



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Trabajo Fin de Grado

Diseño de dron submarino: diseño estructural, control de movimiento y sistema de alimentación

Autor: David Henry González

Tutores:
Jonay Tomás Toledo Carrillo
Rafael Arnay del Arco

Junio 2019

D. **Jonay Tomás Toledo Carrillo**, con N.I.F. 78.698.554-Y profesor Titular de Universidad adscrito al Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas de la Universidad de La Laguna, como tutor.

D. **Rafael Arnay del Arco**, con N.I.F. 78.569.591-G profesor Ayudante doctor adscrito al Departamento de Nombre del Departamento de la Universidad de La Laguna, como cotutor.

C E R T I F I C A (N)

Que la presente memoria titulada:

“Diseño de dron submarino: diseño estructural, control de movimiento y sistema de alimentación”

ha sido realizada bajo su dirección por D. **David Henry González**, con N.I.F. 51.151.025-Z.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 10 de junio de 2019.

Agradecimientos

En este apartado quiero mencionar a aquellas personas que me han apoyado y me han tratado de forma excepcional y que han sido partícipes en mayor o menor medida de los resultados obtenidos durante el desarrollo de este TFG.

A mis padres y mis hermanas, por su incondicional apoyo desde que comencé esta aventura y por soportarme trabajando con el dron día tras día a altas horas de la madrugada.

A mis compañeros de proyecto y amigos Iván y Nicolás, por enseñarme a ver siempre el lado positivo de las cosas aunque los días fueran grises y por compartir muy buenos momentos durante la realización de este proyecto.

A mi amigo José, por acompañarme en numerosas ocasiones para transportar el prototipo en las pruebas realizadas en el mar.

Al profesor D. Carmelo Militello Militello, por ayudarme en el diseño mecánico del prototipo al inicio del proyecto.

Al profesor D. Federico Padrón Martín, por posibilitar que pudiera realizar pruebas con el prototipo en el muelle de Náutica.

A todo el personal del Laboratorio de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de La Laguna, por su buen trato y ayudarme si era necesario.

A los profesores involucrados en el proyecto D. Leopoldo Acosta Sánchez, D. Fernando Luis Rosa González y Oswaldo Bernabé González Hernández, por aconsejarme las mejores decisiones y ayudarme en todo lo posible.

Por último, quiero realizar una mención especial para mis tutores D. Jonay Tomás Toledo Carrillo y D. Rafael Arnay del Arco, por la confianza depositada en mí, por haber estado siempre apoyándome en los momentos en los que costaba avanzar, por ayudarme a ver los puntos débiles para conseguir soluciones que mejoraran verdaderamente el prototipo y por tener siempre las puertas abiertas para comentar cualquier aspecto del proyecto.

Muchas gracias a todos.

Resumen

El objetivo del presente TFG es diseñar estructuralmente un prototipo funcional de dron submarino. El prototipo debe ser capaz de moverse debajo del agua y alcanzar 20 metros de profundidad, siendo totalmente estanco.

Se estudia la flotabilidad del submarino, su integridad estructural y la implementación de un cordón umbilical para unir el prototipo con la unidad de control. Además, diseñando un sistema que dota de movilidad al submarino mediante propulsores. Paralelamente, se implementará un sistema de alimentación compuesto por una batería de alta capacidad que se ubicará en el interior del submarino. Asimismo, se llevará a cabo un análisis energético de los diversos sistemas empleados.

Se analizarán los resultados de las pruebas de estanqueidad y movimiento que se han llevado a cabo para verificar el correcto comportamiento del prototipo ante los problemas que presenta el medio.

Se concluye que el dron es eficaz en la observación del fondo marino, cumpliendo los requisitos de diseño propuestos.

Abstract

The aim of this TFG work is to structurally design a functional submarine drone prototype. This prototype must be able to move through underwater conditions and reach a level of 20 metres depth, maintaining water tightness.

The submarine's buoyancy, its structural integrity and implementing an underwater Tether for a prototype with a control unit are studied. In addition, a submarine mobility system by means of propellers is designed. At the same time, a feeding system composed of a high capacity battery located inside the submarine is installed.

Meanwhile, an energy analysis of the various systems used will be carried out. The results of the tightness and movement tests have been accomplished in order to verify the correct behaviour of this prototype before the problems presented by the sea water environment will be analysed.

It can be concluded that the drone is effective in observing the seabed, meeting the proposed design requirements.

Índice general

1	Introducción	14
1.1	Descripción del proyecto	14
1.2	Objetivos	16
1.3	Análisis del estado del arte	16
1.4	Software utilizado	19
1.5	Contenido de la memoria	19
2	Diseño estructural	21
2.1	Problemas del medio	21
2.2	Elección de los materiales	22
2.3	Diseño inicial del prototipo	22
2.4	Aspectos de especial interés	30
2.5	Evolución del prototipo	33
2.5.1	Problemas de este diseño	33
2.5.2	Búsqueda de soluciones	33
2.6	Diseño final	35
3	Cálculos estructurales	39
3.1	Centro de gravedad	39
3.2	Centro de flotación	45
3.3	Empuje total	46
3.4	Peso esperado total	47
3.5	Equilibrado de la flotabilidad	48
3.6	Comparación de los cálculos teóricos con los medidos	50
4	Fabricación y ensamblaje del prototipo	51
4.1	Estructura de acero inoxidable	51
4.2	Estructura de PVC	52
4.2.1	Prototipo inicial	52
4.2.2	Prototipo final	55
4.3	Impermeabilización de la estructura	56
4.4	Implementación de cordón umbilical y soporte para su transporte y recogida	60
4.5	Disposición de elementos internos y externos a la estructura	62
4.6	Elementos de apoyo de la estructura	65

5	Pruebas de estanqueidad.....	67
5.1	Prueba en piscina de agua dulce	67
5.2	Pruebas de presión repetitivas.....	68
5.3	Prueba en mar	70
5.4	Análisis del estado de los materiales	70
6	Control de movimiento.....	71
6.1	Hardware y software específicos empleados	71
6.1.1	ArduCopter/ArduPilot e IMU	71
6.1.2	Arduino IDE.....	74
6.1.3	Mission Planner y calibración de la IMU.....	75
6.2	Electrónica empleada	77
6.2.1	Lectura de la IMU mediante SPI.....	77
6.2.2	Variadores de velocidad (ESC)	78
6.2.3	Motores T-200.....	80
6.3	Configuración y desempeño del movimiento	84
7	Sistema de alimentación	86
7.1	Esquema general de alimentación.....	86
7.1.1	Circuito de alimentación general.....	86
7.2	Batería LiPo	88
7.2.1	Consumo de la electrónica y duración estimada	89
7.2.2	Carga de la batería.....	91
7.3	Sistema de carga externo a la estructura	94
8	Diseños para el interior del tubo de PVC mediante impresión 3D	95
8.1	Bandejas porta-electrónica y sujeción de la electrónica	95
8.2	Recogedor Ethernet.....	96
9	Resultados.....	98
10	Conclusiones.....	99
11	Conclusions	100
12	Presupuesto del proyecto	101
13	Bibliografía empleada	104
14	Anexos.....	106
14.1	Elementos que conforman el prototipo	106

14.1.1	Componentes del diseño.....	106
14.1.2	Planos	107
14.1.2.1	Planos del desglose de componentes de la estructura	107
14.1.2.2	Planos de los componentes de la estructura	110
14.1.2.3	Planos de las piezas diseñadas en 3D.....	129
14.2	Códigos implementados.....	138
14.2.1	Lectura de la IMU mediante SPI.....	138
14.2.2	Calibración de los ESC.....	141
14.2.3	Prueba inicial de los motores en la piscina.....	142
14.2.4	Funcionamiento completo de los motores.....	143
14.3	Datasheets	146
14.3.1	Encapsulado de diodos Schottky.....	146
14.3.2	Regulador de tensión DC-DC MP1584EN.....	153
14.3.3	Regulador de tensión (7812CT)	170

Índice de figuras

Figura 1.1. Partes del proyecto.....	15
Figura 1.2. Prototipo final en una operación en el mar	15
Figura 1.3. Glider	17
Figura 1.4. Power Vision PowerRay	17
Figura 1.5. BlueROV2	18
Figura 1.6. PoE+ de 56 Voltios de continua.....	18
Figura 2.1. Presión de funcionamiento vs Temperatura.....	21
Figura 2.2. Disposición de la estructura de un quadcopter.....	23
Figura 2.3. Flotabilidad neutra	24
Figura 2.4. Centro de gravedad (CG) y centro de flotación (CF).....	24
Figura 2.5. Centro de gravedad (CG, centro de flotación (CF) y metacentro (M)	25
Figura 2.6. Posición de reposo (inestabilidad)	25
Figura 2.7. Recibe una perturbación (inestabilidad)	26
Figura 2.8. Posición de reposo (estabilidad)	26
Figura 2.9. Recibe una perturbación (estabilidad)	27
Figura 2.10. Vista en perspectiva del prototipo.....	27
Figura 2.11. Vista lateral del prototipo.....	28
Figura 2.12. Vista posterior del prototipo	28
Figura 2.13. Vista superior del prototipo	29
Figura 2.14. Disposición de las juntas de grifo en el perfil de acero inoxidable.....	30
Figura 2.15. Webcam e iluminación	31
Figura 2.16. Terminales de carga e interruptor	31
Figura 2.17. Carcasa de la empresa NK empleada en el prototipo.....	31
Figura 2.18. Penetradores de la empresa BlueRobotics	32
Figura 2.19. Conectores XT-90.....	32
Figura 2.20. Barómetro con acople roscado de latón, y terminal roscado de PVC.....	32
Figura 2.21. Disposición de los tornillos del motor T-200	34
Figura 2.22. Soldadura de los perfiles y tornillos empleados.....	35
Figura 2.23. Vista en perspectiva de la estructura de acero inoxidable.....	35
Figura 2.24. Vista en perspectiva de los elementos de PVC	36
Figura 2.25. Vista en perspectiva del prototipo.....	36
Figura 2.26. Vista lateral del prototipo.....	37
Figura 2.27. Vista posterior del prototipo	37
Figura 2.28. Vista superior del prototipo	38
Figura 3.1. Centroides de la barra maciza a la izquierda y de la tubería hueca a la derecha	39

Figura 3.2. Editor de propiedades mecánicas y centroide del componente.....	41
Figura 3.3. Sistema de coordenadas absoluto.....	41
Figura 3.4. Elementos cuya masa se ha hallado de forma teórica.....	43
Figura 3.5. Elementos cuya masa se ha hallado mediante una báscula de precisión.....	43
Figura 3.6. Disposición de los motores en el perfil de acero inoxidable.....	44
Figura 3.7. Centroides visto desde el plano YZ.....	44
Figura 3.8. Centroides visto en perspectiva.....	45
Figura 3.9. CF del conjunto de tuberías y accesorios de PVC.....	46
Figura 3.10. Volumen confinado en la junta universal.....	47
Figura 3.11. Masa del prototipo.....	48
Figura 3.12. Flotador cilíndrico a la izquierda y toroidal a la derecha.....	49
Figura 3.13. Radios del toroide.....	49
Figura 4.1. Proceso de apriete de los tornillos de las abrazaderas.....	52
Figura 4.2. Medida del segmento de tubo de 30 cm.....	52
Figura 4.3. Aplicación de silicona en la izquierda y pegamento para PVC en la derecha.....	53
Figura 4.4. Unión de los elementos y aplicación de silicona y pegamento a la cara externa.....	53
Figura 4.5. Aplicación de pegamento a la unión del tubo y el acople de la junta universal.....	54
Figura 4.6. Silicona en estado sólido.....	54
Figura 4.7. Versión inicial del prototipo.....	55
Figura 4.8. Rebajado del material.....	56
Figura 4.9. Penetrador M10 para el paso de 6 mm a la izquierda y resina Epoxi a la derecha...	56
Figura 4.10. Resina Epoxi en el interior de la tuerca hueca (penetrador).....	57
Figura 4.11. Penetradores con el cable de los motores.....	57
Figura 4.12. Resina Epoxi aplicada en los orificios de la cámara y en penetradores.....	58
Figura 4.13. Alisado de la superficie taladrada.....	58
Figura 4.14. Cables pasados a través de los penetradores y sensor de presión.....	59
Figura 4.15. Protección de los elementos que no se van a pintar.....	59
Figura 4.16. Proceso de vinilado del PVC.....	60
Figura 4.17. Cinta vulcanizante de Tangit.....	60
Figura 4.18. Bobinado de Ethernet mediante 2 bobinas.....	61
Figura 4.19. Laminado del recogedor con Cura.....	61
Figura 4.20. Proceso de enrollado de cable en el recogedor.....	62
Figura 4.21. Cámara situada sobre el tubo.....	63
Figura 4.22. Tubos corrugados para agrupar cables.....	63
Figura 4.23. Soldadura de terminales y recubrimiento con silicona.....	63
Figura 4.24. Vista delantera y trasera de la bandeja de la batería dentro del tubo.....	64
Figura 4.25. Bandeja con microprocesadores.....	64
Figura 4.26. Teflón en la rosca del tapón.....	65

Figura 4.27. Prototipo inicial sin apoyos.....	65
Figura 4.28. Prototipo final con apoyos	66
Figura 4.29. Prototipo final en el mar	66
Figura 5.1. Primera versión del prototipo en la piscina de agua dulce.....	67
Figura 5.2. Sistema de comprobación de entrada de agua	68
Figura 5.3. Prototipo final en la piscina	68
Figura 5.4. Tanque de presión a la izquierda y manómetro a 2 bares a la derecha	69
Figura 5.5. Estructura de PVC sumergida.....	69
Figura 5.6. Prototipo sumergido en el mar.....	70
Figura 6.1. MPU-6000	71
Figura 6.2. Vista de la cara TOP del ArduCopter APM 2.8.....	72
Figura 6.3. Vista de las capas del ArduCopter APM 2.8	73
Figura 6.4. APM 2.8 Schematic	73
Figura 6.5. APM 2.5 Schematic	73
Figura 6.6. Verificación de la tensión del pulso dado por un pin PWM de salida	74
Figura 6.7. Inicio de la calibración del acelerómetro	75
Figura 6.8. Posición inicial y posición siguiente.....	75
Figura 6.9. Posición inicial del controlador	75
Figura 6.10. Calibración del acelerómetro completada.....	76
Figura 6.11. Inicio de la calibración del giróscopo	76
Figura 6.12. Muestras del giro del controlador en los tres ejes	76
Figura 6.13. Número de muestras de giro finalizado en el eje X	77
Figura 6.14. Señal PWM de un ESC	78
Figura 6.15. ESC R3 de BlueRobotics	79
Figura 6.16. Conexión asociada a un ESC	79
Figura 6.17. Valor del empuje en la zona muerta de operación.....	80
Figura 6.18. Partes de un motor brushless.....	80
Figura 6.19. Propulsor T-200 de BlueRobotics.....	81
Figura 6.20. PWM vs Empuje a 12 y 16 V	82
Figura 6.21. PWM vs Corriente a 12 y 16 V.....	82
Figura 6.22. PWM vs Potencia consumida a 12 y 16 V.....	83
Figura 6.23. Partes del motor T-200.....	83
Figura 6.24. Prueba de presión a 3000 m de profundidad realizada por BlueRobotics	84
Figura 6.25. Configuración de los motores en un quadcopter.....	84
Figura 6.26. Configuración de los motores en nuestro prototipo	85
Figura 6.27. Hélices en sentido horario (CW) y antihorario (CCW), respectivamente	85
Figura 7.1. Circuito de alimentación general	87
Figura 7.2. Cara superior del circuito.....	87

Figura 7.3. Cara inferior del circuito	88
Figura 7.4. Batería LiPo de 8000 mAh empleada	88
Figura 7.5. Consumo de corriente con distintos anchos de pulso	89
Figura 7.6. Consumo de corriente con un ancho de pulso de 1200 μ s	90
Figura 7.7. Carga de una celda mediante CC-CV	92
Figura 7.8. Selección del tipo de batería, capacidad y voltaje de carga	92
Figura 7.9. Comprobación del correcto estado de la batería	92
Figura 7.10. Confirmación de la carga	93
Figura 7.11. Inicio de la carga.....	93
Figura 7.12. Proceso de carga finalizado	93
Figura 7.13. Terminales de carga situados en la carcasa.....	94
Figura 8.1. Soportes de los microcontroladores	95
Figura 8.2. Bandeja de microcontroladores.....	96
Figura 8.3. Bandeja de sensores y batería	96
Figura 8.4. Recogedor Ethernet.....	97
Figura 8.5. Carcasa cubriendo sensor.....	97
Figura 8.6. Carcasa con silicona.....	97
Figura 14.1. Lista de componentes diseñados para desarrollar el prototipo.....	107

Índice de tablas

Tabla 2.1. Diámetros externos y presiones internas de PVC	22
Tabla 2.2. Diámetros de sujeción de las abrazaderas	30
Tabla 2.3. Tornillos con métrica M3	34
Tabla 3.1. Cálculos del centro de masa de la estructura.....	42
Tabla 3.2. Cálculo del volumen de fluido desalojado	47
Tabla 3.3. Empuje en Newtons del prototipo	47
Tabla 3.4. Volumen y empuje de cada tipo de flotador.....	49
Tabla 12.1. Costes materiales del prototipo	102
Tabla 12.2. Coste de mano de obra del prototipo.....	103
Tabla 12.3. Coste total del TFG	103

Índice de fórmulas

Ecuación (3.1): Masa en función de la densidad y el volumen de un cuerpo	40
Ecuación (3.2): Volumen de un cilindro	40
Ecuación (3.3): Volumen de un cilindro hueco.....	40
Ecuación (3.4): Volumen de un prisma rectangular	40
Ecuación (3.5): Centro de gravedad del eje Y y del eje Z.....	41
Ecuación (3.6): Centro de gravedad del prototipo	41
Ecuación (3.7): Centro de flotación del prototipo.....	46
Ecuación (3.8): Empuje de un cuerpo	46
Ecuación (3.9): Volumen de un cilindro teniendo en cuenta el radio externo	46
Ecuación (3.10): Volumen de un toroide	49
Ecuación (7.1): Corriente extraída de la batería: Centro de gravedad del prototipo	90
Ecuación (7.2): Tiempo de funcionamiento teórico de una batería.....	90
Ecuación (7.3): Tiempo de funcionamiento real de una batería.....	90

1 Introducción

1.1 Descripción del proyecto

En primer lugar, debe decirse que se trata de un proyecto que engloba tres trabajos de fin de grado (TFG) en el que se desarrollará un prototipo de dron submarino no tripulado (ROUV, Remote Operated Underwater Vehicle). Este vehículo será controlado de forma remota mediante un cordón umbilical o Tether, éste servirá de enlace entre el ROUV y el sistema de monitorización en tierra. Además, nos ayudaremos de un sistema de visión para poder realizar una navegación controlada y poder realizar un reconocimiento de objetos para analizar características de interés.

Posteriormente, este proyecto tiene como finalidad realizar labores de exploración en aguas poco profundas teniendo como máxima profundidad de trabajo los 20 metros bajo el nivel del mar, este valor viene dado por tener un margen de actuación sobre los puertos en Canarias. El calado de los muelles en el archipiélago se sitúa en torno a los 14 metros de profundidad, cifra que se puede consultar en la web de la autoridad portuaria [1].

El prototipo cuenta con 4 motores guardando relación con la configuración típica de los drones de aire o quadcopters. Estos quedarán por debajo del tubo que contendrá la electrónica que, a su vez, estará constituida por los microcontroladores (Raspberry, Arduino Mega 2560 y ArduPilot) y las placas de circuito impreso (PCB).

Paralelamente en cuanto a los elementos que conforman el dron, aparecen un conjunto de sensores distribuidos en una placa de circuito impreso de una cara, entre los que encontramos: un sensor de presión externa o barómetro, un barómetro interno (BMP 180), una cámara e iluminación de la misma mediante una bombilla, una sonda de temperatura para el exterior, un sensor de humedad y temperatura en el interior, dos IMU (sensores de unidad de medición inercial) de 6 grados de libertad que incluyen un giróscopo y un acelerómetro cada una, sensores de presencia de agua y un medidor de voltaje. Durante el desarrollo del prototipo se han incluido más sensores como medidores de corriente para conocer la corriente consumida por cada motor, varios BMP 180, encargados de leer la presión atmosférica y una conexión I2C habilitada para poder incluir más sensores si fuese oportuno.

Asimismo, se cuenta con una comunicación entre el submarino y la estación que se encuentra en tierra, a través del cable Ethernet, debiendo ser éste fiable para asegurar que la velocidad de transmisión y recepción sea alta para poder desempeñar las tareas sin tener problemas. En tierra disponemos de un PC que se comunica con una Raspberry Pi 3 Model B+ que se encuentra dentro del submarino y que hará la función de maestro con respecto al Arduino Mega, encargado de los sensores y al ArduPilot, responsable de los motores. Adicionalmente, nos hemos apoyado en ROS (*Robotic Operating System*) Kinetic [2], un software que posibilita el control a bajo nivel de los dispositivos con los que trabajemos, administrar paquetes y comunicar procesos, entre otras funcionalidades.

El proyecto está estructurado en tres partes, tratándose de 3 TFG en los que los compañeros y yo nos centramos en distintas tareas. La división del desarrollo del proyecto queda configurada de la siguiente forma en la Figura 1.1.

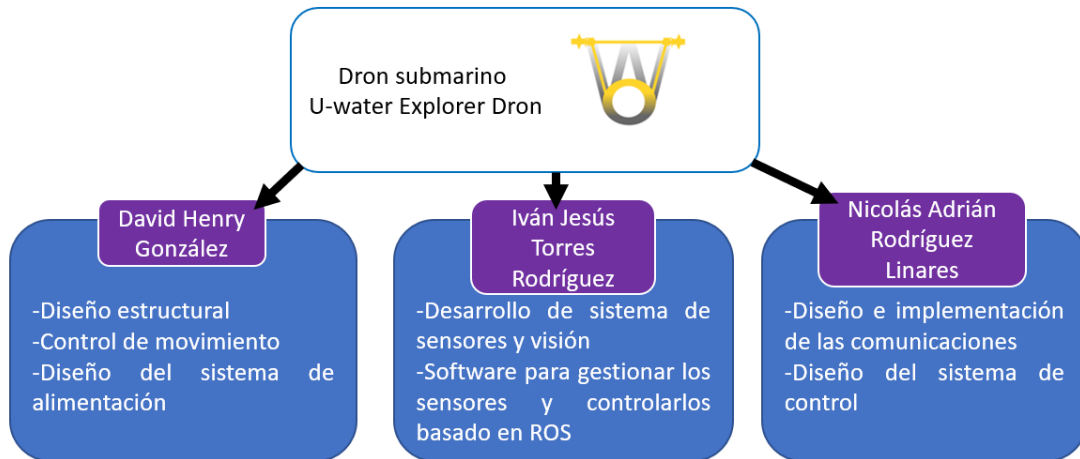


Figura 1.1. Partes del proyecto

El compañero, Iván Jesús Torres Rodríguez, se encarga de realizar el TFG titulado: *“Diseño de dron submarino: Desarrollo del sistema de sensores y visión gestionado mediante software basado en ROS”*. Por otro lado, el compañero, Nicolás Adrián Rodríguez Linares, hace lo propio con el TFG titulado: *“Diseño de dron submarino: Diseño e implementación del sistema de comunicaciones y diseño del sistema de control”*.

Por último, el contenido correspondiente al TFG que se presenta en este documento: *“Diseño de dron submarino: diseño estructural, control de movimiento y sistema de alimentación”* se desarrollará en los siguientes capítulos y se puede observar el resultado en la Figura 1.2.

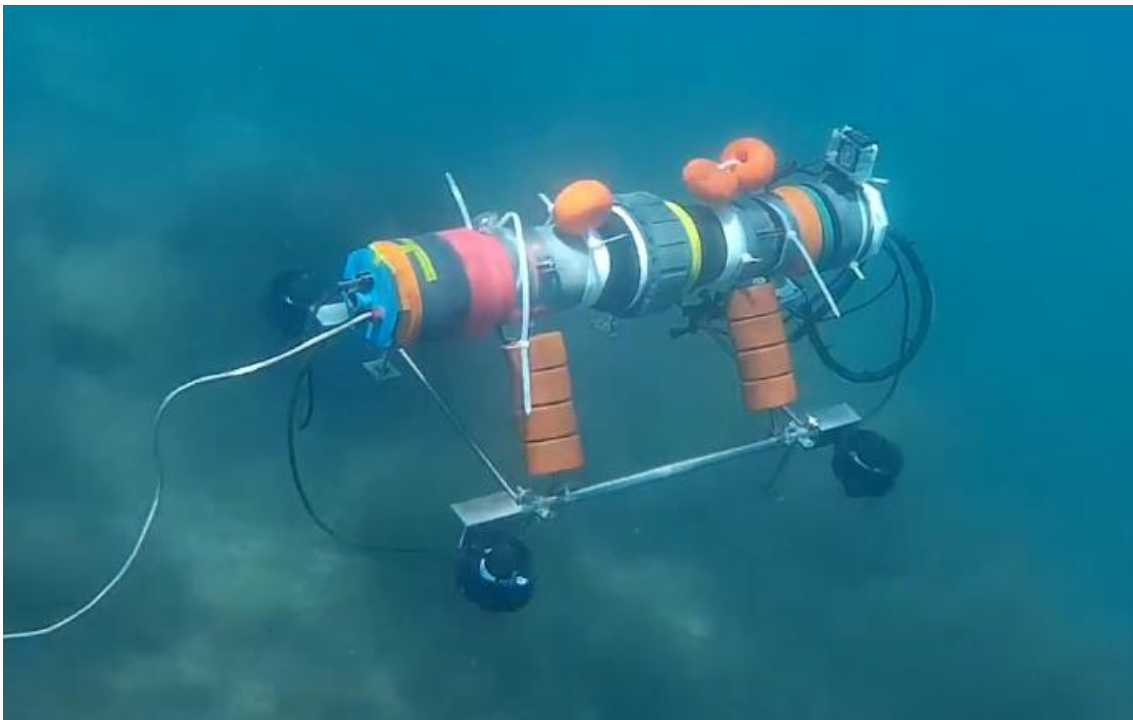


Figura 1.2. Prototipo final en una operación en el mar

1.2 Objetivos

El dron submarino se ha diseñado con la finalidad de obtener un prototipo funcional que sea capaz de conseguir movimientos libres en el espacio mediante la disposición adoptada de los motores. Asimismo, se debe dotar de un control del prototipo desde tierra mediante un cable Ethernet con conector RJ45 que comunicará el ordenador en el que operará el usuario con el dron.

El control de los movimientos será posible al utilizar un mando USB para enviarle las instrucciones al submarino. La constitución de este sistema de control desde el exterior posibilita la operación del dispositivo a gran distancia, permitiéndole explorar el fondo de los puertos, así como, analizar el estado de los cascos de los barcos e incluso comprobar si hay fugas en las tuberías. Asimismo, se deberá diseñar un sistema que capte la señal de la estación en tierra mediante algún dispositivo para posibilitar el control de los elementos que permitan el desplazamiento del prototipo.

Además, debe comprobarse la correcta unión de los componentes e impermeabilización de los mismos para asegurar la estanqueidad del recinto del prototipo en el que se encuentra la electrónica. Por otro lado, se debe asegurar la integridad de la estructura para evitar el colapso de la misma y que no afecte al movimiento.

Adicionalmente, se realizarán pruebas de presión para cerciorarnos de que el prototipo es capaz de soportar la presión de operación (2 bares) sin que entre agua.

1.3 Análisis del estado del arte

Los vehículos submarinos autónomos (AUV) son capaces de desplazarse en el agua sin tener un operador que se encuentre en el interior de los mismos. Estos dispositivos se encuentran dentro del grupo de los vehículos submarinos no tripulados que, a su vez, incluyen a los vehículos submarinos operados por control remoto no autónomos o ROV (Remote Operated Vehicle) [3], en los que es indispensable una conexión del dispositivo a un sistema de control ubicado en la superficie por medio de un cable umbilical. A la hora de interactuar con los mismos, el operador envía señales mediante un mando de control. Paralelamente, la alimentación puede llevarse por dicho cable umbilical o puede encontrarse en el interior del vehículo mediante algún tipo de batería.

Profundizando en el modo de funcionamiento de estos dispositivos submarinos, aparecen dos vehículos que han adquirido cierto reconocimiento en los últimos años.

En primer lugar, encontramos los gliders o planeadores submarinos [4], estos vehículos son operados de forma remota y reciben las instrucciones oportunas para iniciar la misión una vez que son depositados en el mar. El planeamiento se consigue al tener control sobre la flotabilidad con la ayuda de un sistema de vaciado y llenado de un pistón que se encuentra en el interior. Cuando éste se llena, el glider consigue sumergirse mientras que al vaciarse de agua aumenta el volumen de aire dentro del pistón lo que provoca que el glider flote, es decir, existe una componente que lo empuja hacia la superficie. Asimismo, este dispositivo cuenta con una vejiga que recoge aire al estar en la superficie para que el agua no cubra la antena y se pueda establecer la comunicación.

El propósito de utilizarlos reside en el escaso consumo de energía que requieren al no tener la necesidad de alimentar un motor o una hélice. Este hecho repercute en facilitar la monitorización en tiempo real del fondo marino, ya que se incorporan numerosos instrumentos de medida de parámetros del agua: temperatura, salinidad, profundidad, turbidez del agua o concentración de oxígeno entre otros, cuyo consumo va a poder ser soportado por una batería interior.

Adicionalmente, la batería contribuye en el control de la flotabilidad pues se desplaza hacia delante y hacia detrás ayudando al glider a sumergirse o a flotar, respectivamente. El glider se puede observar en la Figura 1.3.

Al no disponer de un sistema de movimiento de motores no consigue alcanzar gran velocidad, pero supe este aspecto al soportar adecuadamente la presión, consiguiendo sumergirse hasta 800-1000 metros de profundidad en algunos modelos.



Figura 1.3. Glider

Por otro lado, encontramos los ROUV (Remote Operated Underwater Vehicle), tratándose de robots submarinos no tripulados y operados de forma remota mediante un cable umbilical o Tether. Entre los distintos tipos de ROUV que se encuentran en el mercado, nos centraremos en aquellos cuyo ámbito de operación es la observación como el que se muestra en la Figura 1.4.



Figura 1.4. Power Vision PowerRay

El control de los mismos se lleva a cabo mediante un mando de control que nos permite interactuar con el robot y con ello, enviarle distintas instrucciones para conseguir el movimiento o realizar otras tareas vinculadas con los sensores que incorporan.

El movimiento que realizan estos vehículos es muy similar al realizado por los drones aéreos o quadcopters, teniendo configuraciones de 4, 6 u 8 motores, en los que se compensan y descompensan las fuerzas resultantes y los momentos de inercia para conseguir cualquier movimiento en los tres ejes de rotación (yaw, pitch y roll).

De forma adicional, estos vehículos incorporan un sistema de visión con su correspondiente iluminación para poder ver a una profundidad considerable. Paralelamente, la sensorica implementada en estos dispositivos es muy similar a la utilizada en el caso de los gliders, pudiendo albergar un amplio conjunto de sensores que incluyen: sensores de profundidad, sensores de distancia, sondas de temperatura y salinidad entre otros.

En este subgrupo de los ROUV no necesitamos un conjunto de brazos manipuladores ni herramientas para realizar labores debajo del agua, aliviando el peso del conjunto y permitiendo un mejor control del movimiento. El consumo de energía de los motores ocupa casi la totalidad de la capacidad de la alimentación, por lo que suele recurrirse a un grupo generador que se encuentre en tierra, teniendo el problema de que a medida que aumente la longitud del cable la pérdida de potencia será mayor.

El vehículo que se muestra en la Figura 1.5 corresponde con el modelo BlueROV2 [5] de la empresa BlueRobotics. Los propulsores T-200 que se emplean en nuestro prototipo son de este fabricante, al estar especialmente diseñados para trabajar en entornos marinos.



Figura 1.5. BlueROV2

Sin embargo, tener que llevar dos cables de alimentación además del cable Ethernet y el recubrimiento de los mismos, facilita el hecho de que se produzca la rotura de los mismos. Los últimos modelos incorporan alimentación a través del propio cable de Ethernet (PoE+, Power-over-Ethernet) [6], permitiendo suministrar energía a los dispositivos de red a través de la conexión de datos existente, es decir, nos da la oportunidad de usar un único cable tanto para la transmisión de datos como para la alimentación como se puede observar en la Figura 1.6. Por tanto, podremos entregar hasta un máximo de 30 W (56 Vdc) que disminuirán a medida que aumenta la distancia con respecto al receptor.



Figura 1.6. PoE+ de 56 Voltios de continua

Asimismo, si el ROV se quiere utilizar a una cierta distancia de la costa, en el caso de una lancha, no resulta cómodo llevar un sistema de generación externo lo que conlleva el uso de baterías internas para soportar el consumo de energía de la electrónica y de los motores. En cuanto al ciclo de vida y a la reacción química que se produce, podemos encontrar un conjunto de baterías que permiten ser recargadas un número elevado de veces.

Estas baterías suelen emplearse en algunos sistemas ROV / Hybrid ROV. Las diferentes reacciones químicas incluyen celdas de plomo ácido, celdas de plata-zinc, celdas de níquel-cadmio (NiCd) y celdas de polímero de iones de litio (LiPo). Las celdas de plomo-ácido son baratas, pero ocupan un gran tamaño y son pesadas. Las celdas de plata-zinc ofrecen una alta densidad de energía, pero son muy caras y tienen ciclos de vidas cortos, entre 100 y 250 ciclos. Las baterías de (NiCd) tienen como punto fuerte el hecho de poder entregar una corriente elevada, siendo baratas y muy pesadas. Por último, las celdas de iones de litio son pequeñas y ofrecen mayor densidad de energía que las demás, siendo más peligrosas, pero con la posibilidad de proporcionar corrientes elevadas durante un período de tiempo considerable que dependerá de la capacidad de la propia batería.

Una vez que se han descrito ambos vehículos, podemos concluir que los ROV resultan más interesantes al dotarnos un mayor control del movimiento y poder saber qué ocurre en todo momento, en caso contrario, sólo nos comunicaríamos una vez que el glider subiese a la superficie. Además, al tener baterías de alta capacidad nos encontraremos con una autonomía de trabajo holgada para realizar las exploraciones submarinas.

1.4 Software utilizado

Uno de los elementos que adquieren gran interés es el Software empleado a la hora de realizar las distintas partes del proyecto:

- Para diseñar el prototipo de forma fiel a la realidad se ha utilizado el Autodesk Inventor 2019 [7]. Este programa también ha facilitado la obtención de los planos de las partes del prototipo, posibilitando un futura reproducción y ensamblaje del mismo.
- Para laminar los diseños realizados con el fin de obtener una impresión 3D se ha empleado el Cura 3.6.1 [8].
- Para realizar el control de los variadores de velocidad (ESC) y los motores mediante la placa ArduPilot se ha empleado el entorno de programación Arduino IDE 1.8.9 [9].
- Para realizar los cálculos estructurales y calcular los gastos del proyecto se ha utilizado el Microsoft Excel 365 [10].
- Para llevar un control de versiones que permita tener accesible en todo momento la información del proyecto se ha utilizado GitHub [11].
- Para analizar la configuración y calibración de la IMU de 6 grados de libertad del ArduPilot se ha empleado el Mission Planner 1.3.62 [12].
- Para almacenar las fotos, así como, los videos que se han sacado durante el desarrollo del proyecto se ha utilizado Google Drive [13].

1.5 Contenido de la memoria

En este apartado se describirá brevemente el contenido de cada uno de los capítulos que componen este documento.

- **Capítulo 2: Diseño estructural.** Se analizarán los problemas presentes al operar en un entorno acuático y las mejoras de diseño a nivel funcional. Asimismo, se fundamentará

el uso de los materiales empleados y su disposición, contemplada en el diseño del prototipo final para conformar un modelo que cumpla con los requisitos establecidos.

- **Capítulo 3: Cálculos estructurales.** Se hallará el centro de gravedad y el centro de flotación para analizar si nos encontramos en una situación de equilibrio estable. Además, se emplearán flotadores para equilibrar la flotabilidad del prototipo y se comprobará si los cálculos realizados corresponden con la realidad.
- **Capítulo 4: Fabricación y ensamblaje del prototipo.** Se llevará a cabo el ensamblaje de las distintas partes que componen el diseño del prototipo, incluyendo la disposición de los elementos que se encuentran en el interior de la tubería de PVC. Posteriormente, se impermeabilizará dicha tubería y se incorporará un sistema que posibilite el apoyo del dron.
- **Capítulo 5: Pruebas de estanqueidad.** Se realizarán pruebas de estanqueidad progresivas de manera que vaya aumentando el grado de exigencia hasta asegurar la operación a 20 metros de profundidad. Se realizarán pruebas en una piscina de agua dulce, en un tanque de presión configurable y en el mar. Paralelamente, se verificará el estado de los materiales que conforman el prototipo al trabajar en el entorno de trabajo.
- **Capítulo 6: Control de movimiento.** Se diseñará un sistema que posibilite el movimiento del prototipo mediante propulsores y un sistema de control de los mismos. Además, se especificará el hardware y el software utilizado para conseguir el objetivo de movimiento. Luego, se analizará la disposición de los motores en la estructura de acuerdo al requisito de movimiento y para que ésta no afecte al sistema de visión.
- **Capítulo 7: Sistema de alimentación.** Se diseñará un sistema de alimentación que contenga circuitos que satisfagan las especificaciones de tensión y corriente de la electrónica empleada, mediante una batería en el interior del tubo de PVC. Posteriormente, se realizará un estudio del consumo de los dispositivos para conocer la duración de la batería en una operación en el mar.
- **Capítulo 8: Diseños para el interior del tubo de PVC mediante impresión 3D.** Se diseñará un sistema de sujeción que proteja y permita fijar y poder desplazar la electrónica que se encuentra dentro del tubo cuando sea necesario. Asimismo, se diseñará un recogedor de cable Ethernet que permita enrollarlo y desenrollarlo de forma práctica.
- **Capítulo 9: Resultados.** Se describirán los resultados obtenidos.
- **Capítulos 10 y 11: Conclusiones.** Se realizarán las conclusiones pertinentes.
- **Capítulo 12: Presupuesto del proyecto.** Se desglosarán los costes de mano de obra y materiales, incluyendo impuestos directos e indirectos.
- **Capítulo 13: Bibliografía empleada.** Se enumerará la bibliografía utilizada para el desarrollo del presente documento.
- **Capítulo 14: Anexos.** En este capítulo se encontrarán los planos de los elementos del diseño del prototipo, los códigos implementados y las datasheets consultadas.

2 Diseño estructural

Una vez que se han organizado todos los elementos que integrarán el prototipo y se han planificado los pasos a seguir, es posible comenzar a diseñar la estructura y geometría que tendrá el prototipo de acuerdo a las especificaciones del propio diseño.

Asimismo, se analizarán aquellos inconvenientes asociados al mar que repercutan negativamente en el desempeño del dron y otros aspectos relevantes que posibilitan una mejora en cuanto a la funcionalidad y la eficacia del prototipo.

Por otro lado, se estudiará el uso de los materiales apropiados para trabajar en un entorno acuático. Paralelamente, se verificará si los materiales seleccionados cumplen con su propósito en las distintas fases de diseño del dron. En el caso de que alguno de los aspectos del diseño no satisfaga las necesidades que implica su uso, se estudiarán alternativas que traten de solventar dichos defectos y su implementación en el diseño.

2.1 Problemas del medio

El hecho de trabajar en un entorno marino supone afrontar una serie de impedimentos propios al medio. El primer contratiempo que surge es la presencia del agua en el entorno, lo que repercute en un diseño estanco para evitar que se estropee la electrónica y perdamos el control sobre el prototipo.

Un factor vinculado al agua salada es la alta concentración de sales minerales que contiene, provocando una reacción química en la que oxígeno del aire y el que se encuentra disuelto en el agua se combina con el hierro para crear óxido férrico Fe_2O_3 . Cuando el prototipo termina su labor debe ser limpiado para eliminar la sal remanente.

Paralelamente, a medida que el dron se sumerge se produce un descenso de la temperatura, y con ello, un aumento de la presión proporcional a la profundidad, teniendo que elegir materiales que soporten una determinada presión y que no sufran cambios al encontrarse a temperaturas bajas. En el caso de las tuberías PN10 empleadas vemos que no sufren cambios al disminuir la temperatura ambiente (25 °C). En cambio, si se sometiese a una temperatura más alta del fluido, se vería una disminución de las prestaciones de presión de la tubería como se puede apreciar en la Figura 2.1. Difícilmente nos vamos a encontrar una situación en la que el agua sea tan cálida que la tubería no sea capaz de soportar una presión de 2 bares.

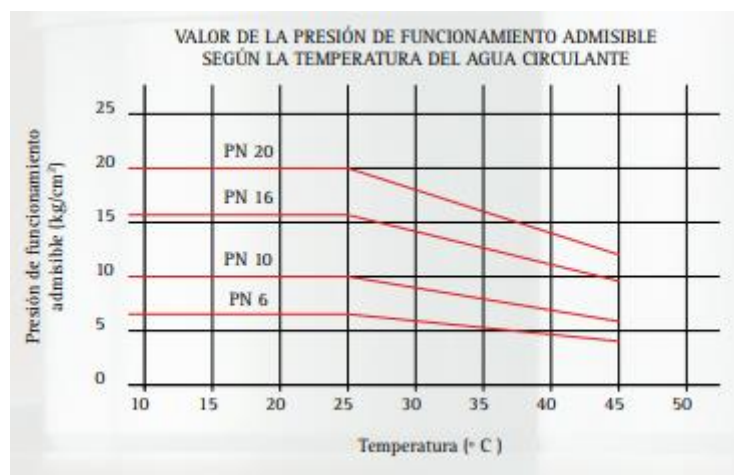


Figura 2.1. Presión de funcionamiento vs Temperatura

Por otro lado, la intensidad de las corrientes marinas va a comprometer el movimiento del prototipo, dificultando los giros y el avance del mismo.

Por último, al trabajar en entornos en los que la vegetación es notable (caso de las algas marinas) y en los que existen sedimentos en movimiento como puede ser la arena, la visión se verá afectada, llegando incluso a impedir completamente ésta.

2.2 Elección de los materiales

Con la intención de conformar una estructura rígida, estable y fiable, teniendo en cuenta que el precio de los elementos no sea elevado para poder ser replicable, evitando el colapso de la misma, y asegurando la protección del elemento estanco, se han empleado tubos de PVC [14] de presión interna de 10 atm (PN10), siendo inertes a la corrosión y cumpliendo la norma UNE-EN ISO 1452, con el objetivo de soportar la presión correspondiente a 2 atmósferas debajo del nivel del mar. Las características de estos tubos se pueden ver en la Tabla 2.1. El presupuesto correspondiente a estos elementos se puede consultar en el Capítulo 12: Presupuesto del proyecto.

Ø ext. (mm)	PN (Bar)							
	PN 6		PN 10		PN 16		PN 20	
	Código	Espesor (mm)	Código	Espesor (mm)	Código	Espesor (mm)	Código	Espesor (mm)
20	-	-	-	-	-	-	203119	1,9
25	-	-	-	-	203011	1,9	203120	2,3
32	-	-	-	-	203016	2,4	203121	2,9
40	-	-	203020	1,9	203021	3,0	203122	3,7
50	-	-	203025	2,4	203026	3,7	203123	4,6
63	203090	2,0	203030	3,0	203046	4,7	203124	5,8
75	203091	2,3	203034	3,6	203080	5,6	203125	6,8
90	203092	2,8	203038	4,3	203081	6,7	203126	8,2
110	203093	2,7	203103	4,2	203111	6,6	203127	8,1
125	203094	3,1	203104	4,8	203112	7,4	203128	9,2
140	203095	3,5	203105	5,4	203113	8,3	203129	10,3
160	203096	4,0	203106	6,2	203114	9,5	203130	11,8
180	203097	4,4	203107	6,9	203115	10,7	203131	13,3
200	203098	4,9	203108	7,7	203116	11,9	203132	14,7
250	203099	6,2	203109	9,6	203117	14,8	203133	18,4
315	203100	7,7	203110	12,1	203118	18,7	203134	23,2

Tabla 2.1. Diámetros externos y presiones internas de PVC

Paralelamente, se han utilizado tapones roscados, una junta tórica de presión para unir los tramos de tubería en la parte central y manguitos roscados para conectar los tramos de tubería en los extremos con los propios tapones. El diseño del prototipo se ha realizado con los elementos anteriormente citados y está preparado para soportar una presión de 2 bares.

En consonancia con lo anterior, se han empleado varillas macizas lisas y roscadas, planchas, perfiles, abrazaderas, tuercas y tornillos de acero inoxidable AISI 304 y AISI 316 [15], confiriéndole gran resistencia a la corrosión en zonas agresivas. Aquellos elementos que no se encontraban disponibles en calidad marina AISI 316 han sido utilizados en calidad AISI 304 [16], cuya resistencia a la corrosión es ligeramente inferior. El presupuesto correspondiente a estos elementos de acero se puede consultar en el Capítulo 12: Presupuesto del proyecto.

2.3 Diseño inicial del prototipo

La configuración inicial de la estructura trató de emular la disposición de los elementos de un quadcopter como se ve en la Figura 2.2, pero prestando especial atención al medio en el que se moverá. Al tratarse de agua en vez de aire, el peso resultante del cuerpo ejerce una fuerza hacia el suelo por el hecho de tener masa y tendrá una componente contraria a la misma, tratándose del

empuje o flotabilidad que trata de compensar la componente del peso por el hecho de que el cuerpo ocupa un volumen con menor densidad que el agua.



Figura 2.2. Disposición de la estructura de un quadcopter

Al contrario de lo que ocurre en la distribución de masas en un quadcopter, tendremos parte de la masa de la estructura fundamentalmente en dos planos o zonas. El superior corresponderá con la masa del tubo y los accesorios de unión que contienen el volumen de aire mientras que el inferior será el más masivo al tener las barras de hierro y, por tanto, el que tenderá a hundir la estructura.

Definiéndose de este modo el *Principio de Arquímedes*, en el que un cuerpo sumergido parcial o totalmente en un fluido se verá sometido a una fuerza ascendente igual al peso del fluido desplazado. Por tanto, va a ser fundamental que no se igualen la componente del peso y del empuje cuando el dron se encuentre sumergido, es decir, evitar que nos encontremos en una situación en la que el dron ni se hunda ni flote a una profundidad dada. Por este motivo, necesitaremos que la flotabilidad del prototipo no sea neutra sino negativa, en la que el peso del dron se imponga ante el empuje hacia la superficie del mismo.

Este cambio supone una dinámica de movimiento distinta a la propia de un quadcopter pues no tenemos la masa en el mismo plano. Por un lado, en el aire existe un peso como consecuencia de la acción de la gravedad que no va a ser contrarrestado por ninguna fuerza ascendente en estado de reposo. Por ello, cuando las hélices de los motores de un quadcopter están en movimiento se está compensando la componente gravitatoria para poder operar a una altura dada.

En el caso de trabajar dentro del agua y para cumplir que las dos componentes no sean equiparables, no debe existir flotabilidad neutra, es decir, debemos garantizar que el cuerpo no esté en equilibrio al estar hundido. Para visualizar este concepto aparece la Figura 2.3. Esto se consigue desequilibrando las dos componentes para que tenga la componente del peso sea mayor a la del empuje. Por tanto, estamos creando una fuerza resultante que tiende a hundir el dron, emulando así al efecto de caída hacia el suelo de los drones por el hecho de tener peso. Por tanto, al mover los propulsores para que el dron ascienda, estaremos ejerciendo una fuerza hacia la superficie que deberá vencer a la fuerza resultante que hundía al prototipo. Si esto ocurre, efectivamente, conseguiremos ascender.

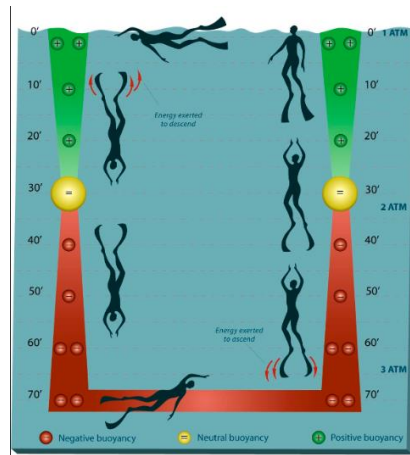


Figura 2.3. Flotabilidad neutra

Más tarde, debe decirse que en el análisis previo que hemos realizado en cuanto a la disposición de la masa en la estructura, encontrábamos dos planos en los que se concentraba la masa y, por tanto, el centro de gravedad o de masa [17] se situará entre dichos planos, siendo en el superior, además, donde se encontrará el centro de flotación [18] al tener un volumen de aire. De esta forma, si el centro de flotación o de empuje se encuentra a mayor distancia de la superficie que el centro de gravedad del conjunto, se creará una inestabilidad que propiciará que rote el dron hasta alcanzar una posición en la que el centro de gravedad se sitúe por debajo del centro de flotabilidad.

Esto se traduce en una situación de estabilidad rotacional en la que se pretende conseguir un equilibrio estable o de reposo [19], en la que al existir perturbaciones los pares propios de la estructura, por el hecho de estar en movimiento, devuelven al dron a la posición de reposo. Por tanto, conseguiremos esta tendencia al equilibrio siempre que la parte inferior de la estructura tenga mayor densidad que la superior de forma que el centro de gravedad se sitúe por debajo del centro de flotación como se puede ver en la Figura 2.4.

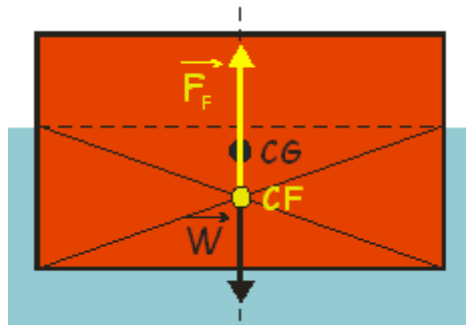


Figura 2.4. Centro de gravedad (CG) y centro de flotación (CF)

En consonancia con lo anterior, cuando el dron se encuentra en equilibrio sabemos que la línea vertical que trazamos cortando el centro flotación (línea vertical discontinua de color negro en la Figura anterior) y la propia con el centro de gravedad van a coincidir, actuando ambas componentes en esta vertical. En cambio, si se inclina un ángulo pequeño, el centroide cambiará de posición y pasará a estar fuera de esa vertical (línea discontinua con un cierto ángulo B'), mientras que la resultante de la componente de empuje permanecerá estando en vertical (línea discontinua vertical A').

Además, el eje de la estructura que pasa por el centro de gravedad (línea discontinua con un cierto ángulo B') consecuentemente habrá rotado. Por tanto, se formará un ángulo entre ambas rectas (centro de gravedad y centro de flotación), que coincidirá con el ángulo que ha rotado el cuerpo.

Asimismo, el metacentro [20] que es el punto de intersección de las rectas A' y B' , se encontrará por encima del centro de gravedad y el dron se encontrará en una situación de equilibrio estable como se ve en la Figura 2.5.

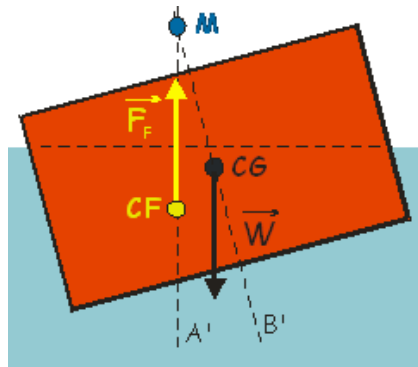


Figura 2.5. Centro de gravedad (CG, centro de flotación (CF) y metacentro (M)

En las siguientes figuras, se puede identificar claramente la situación de inestabilidad y de estabilidad aplicadas a nuestra geometría, dependiendo de cómo sea ésta el prototipo será estable o no. En el primer caso partimos de la posición de reposo (Figura 2.6) en la que el centro de gravedad se encuentra por encima del centro de flotación y al recibir una perturbación (Figura 2.7), un par M es aplicado a la estructura, que tiende a aumentar el desplazamiento angular como consecuencia de la perturbación. Por tanto, en esta situación se alcanzaría un equilibrio inestable, siendo perjudicial para la estabilidad del prototipo. A continuación, se muestra la situación de inestabilidad.

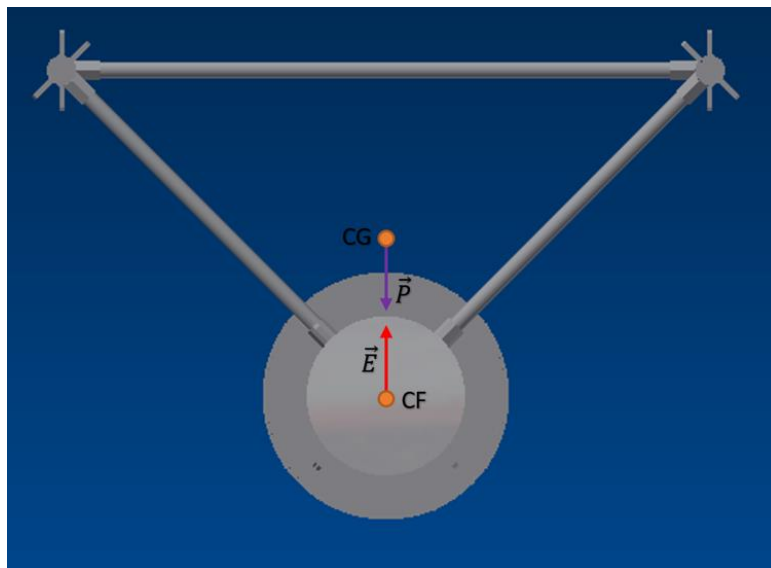


Figura 2.6. Posición de reposo (inestabilidad)

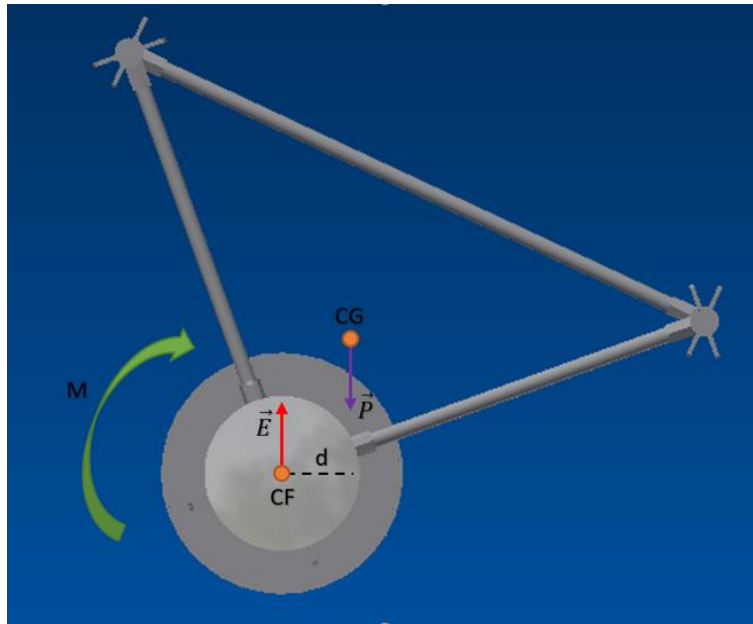


Figura 2.7. Recibe una perturbación (inestabilidad)

Por otro lado, la situación deseada será tener el centro de gravedad situado debajo del centro de flotación. En este caso, partiremos de la posición de reposo (Figura 2.8) y el dron sufrirá una perturbación (Figura 2.9) que genera un par restaurador M , que tiende a disminuir el desplazamiento angular y a retornar el cuerpo a la posición inicial, como se puede ver en las siguientes figuras.

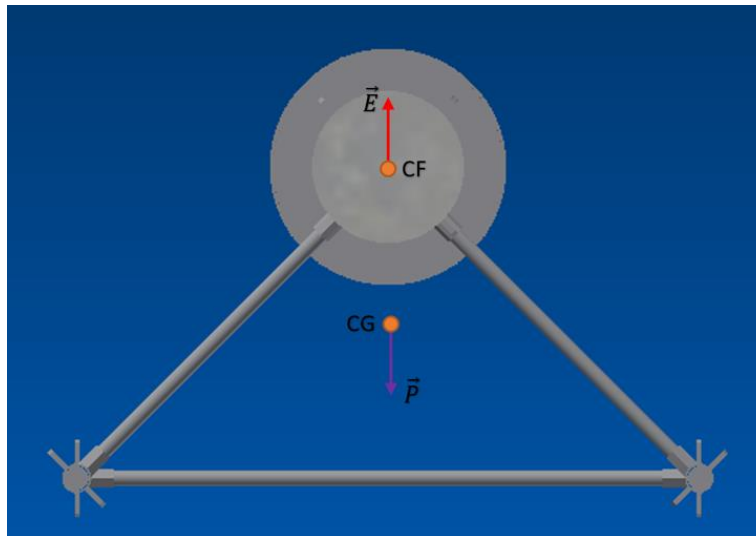


Figura 2.8. Posición de reposo (estabilidad)

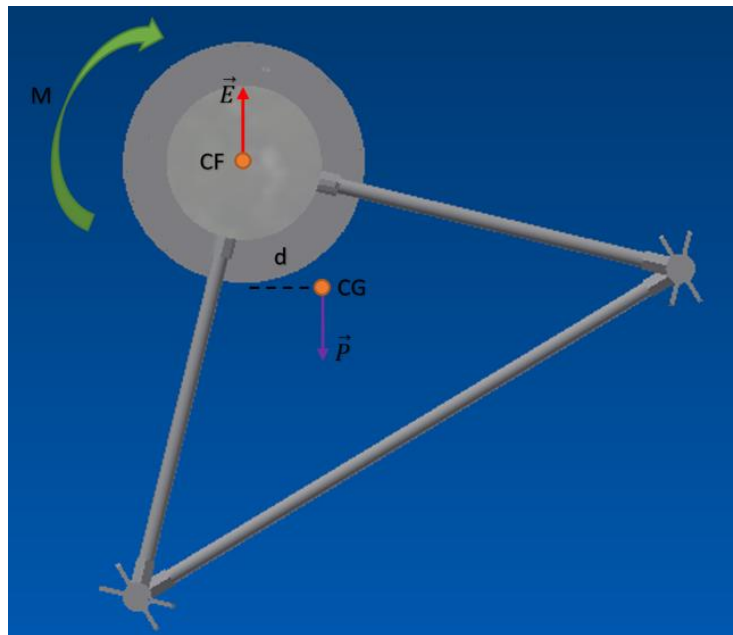


Figura 2.9. Recibe una perturbación (estabilidad)

En cuanto a la fuerza de rozamiento que opone el agua al movimiento del prototipo, debe decirse que asumimos que va a ser un término que perjudicará el movimiento del dron, pero que no vamos a calcular debido a la dificultad de diseñar una prueba para conocer realmente cuanto va a valer el coeficiente de arrastre o drag, el área de la sección transversal a la dirección del movimiento y la velocidad relativa del dron respecto del fluido. El sistema de control será el encargado de reducir este efecto mediante la lectura de la IMU tanto del ArduPilot como la de la PCB.

Los cálculos que justifican el diseño se encuentran en el Capítulo 3: Cálculos estructurales. El diseño de la estructura del dron se puede ver desde distintas vistas en las Figuras: Figura 2.10, Figura 2.11, Figura 2.12 y Figura 2.13.

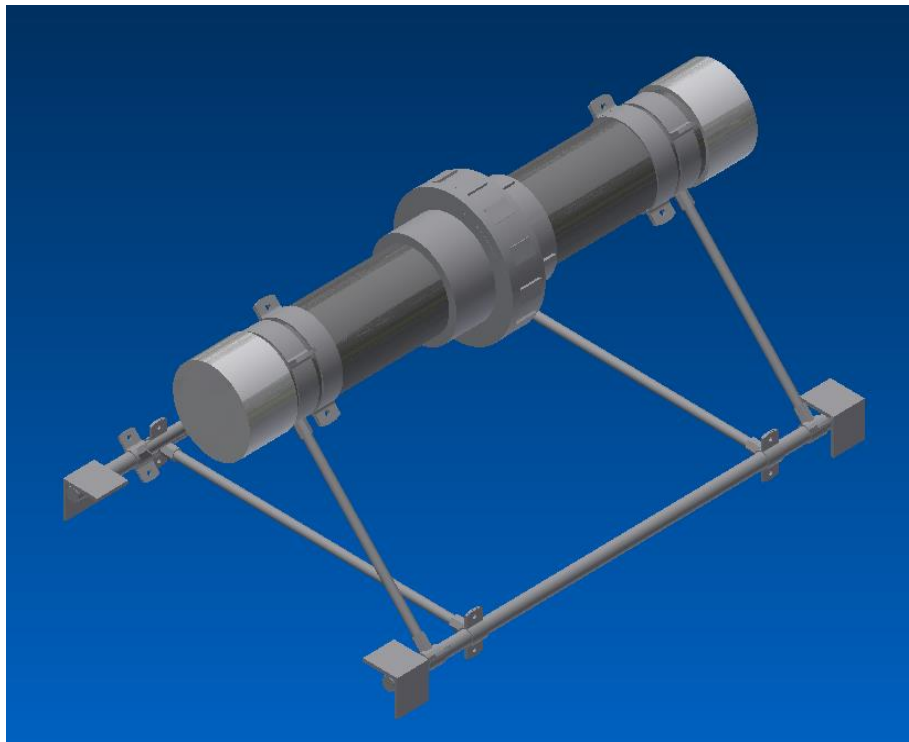


Figura 2.10. Vista en perspectiva del prototipo

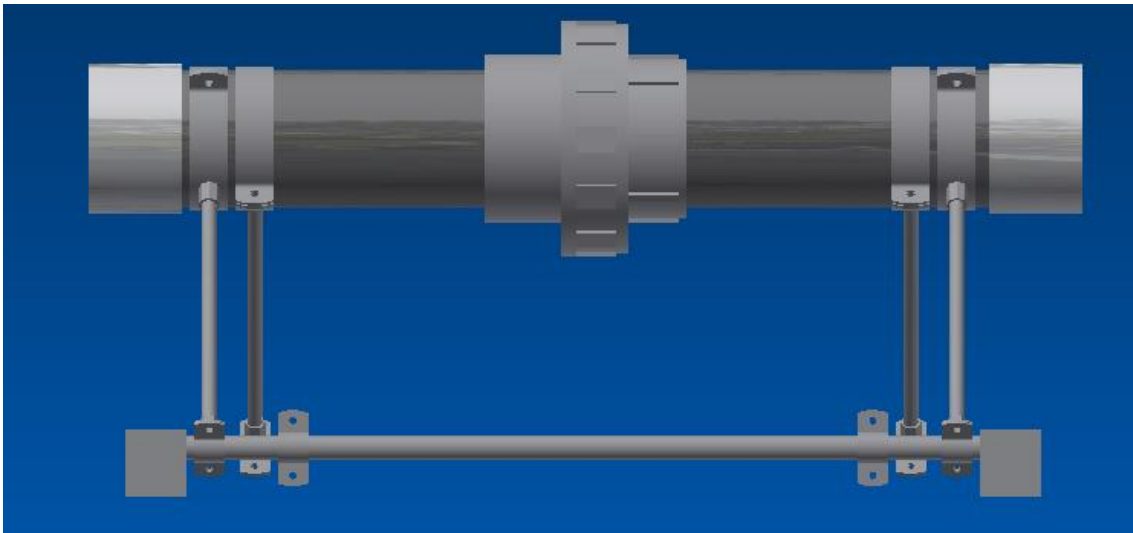


Figura 2.11. Vista lateral del prototipo

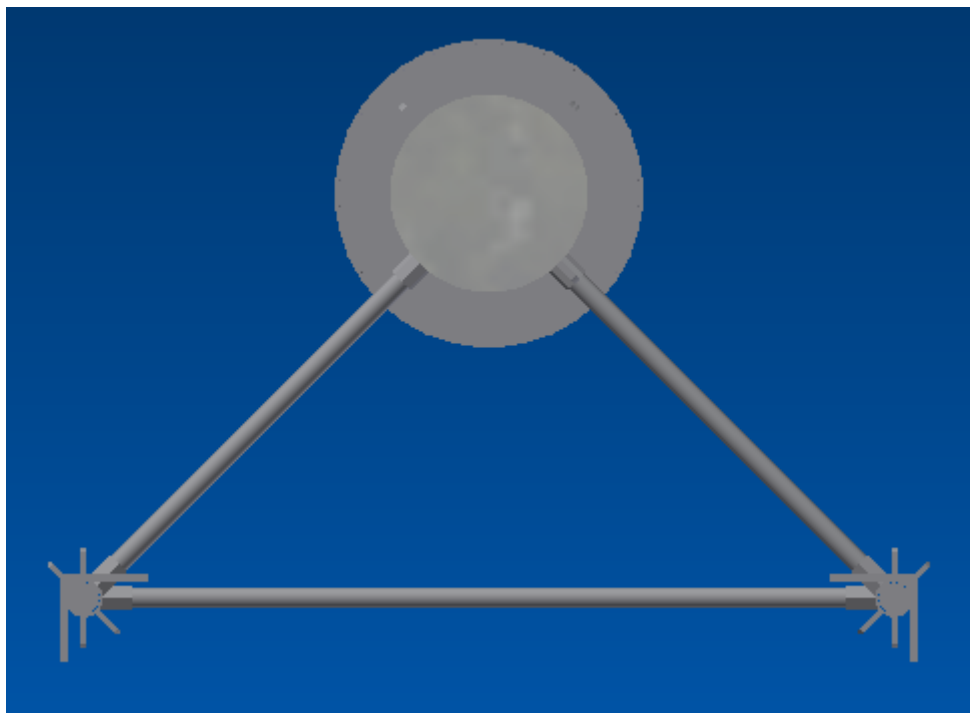


Figura 2.12. Vista posterior del prototipo

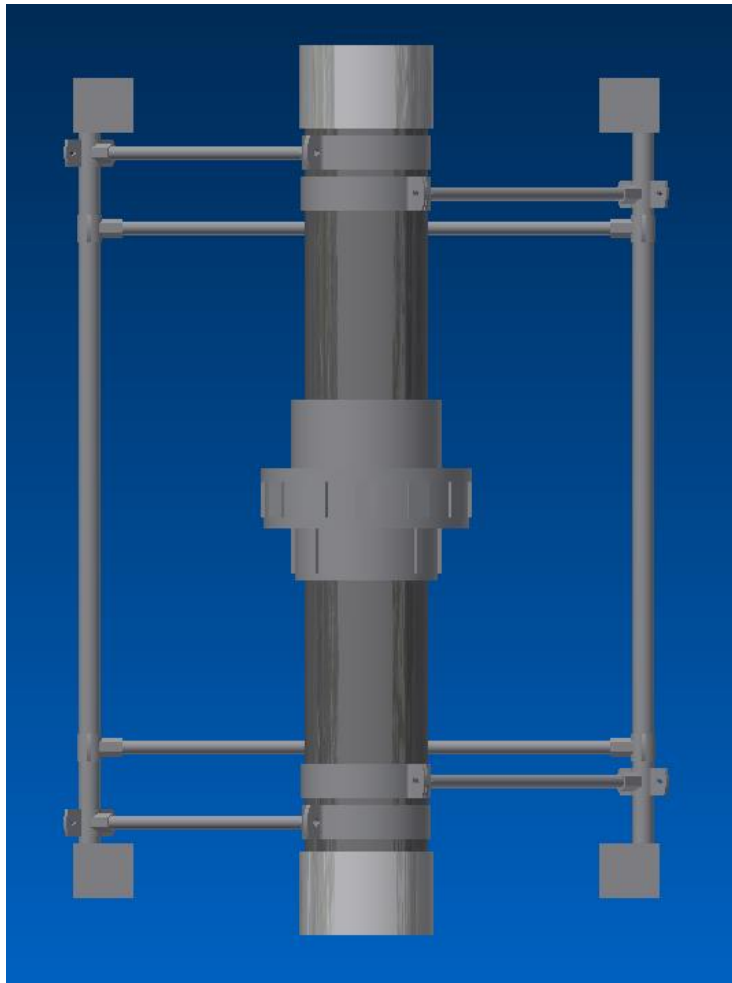


Figura 2.13. Vista superior del prototipo

En cuanto a los elementos que componen este diseño encontramos: dos tapones de PVC de 90 mm de diámetro interior, dispuestos en los extremos del prototipo. Una junta universal roscada de 90 mm que une los segmentos de tubo de 30 cm cada uno y 90 mm de diámetro externo y que permite la apertura del submarino en este punto. Este conjunto de elementos conforma el espacio en el que se dispondrá toda la electrónica del proyecto.

Paralelamente, se han utilizado 2 barras macizas de acero inoxidable AISI 316 de 18 mm de diámetro que se unen entre sí mediante dos varillas roscadas M10 (métrica 10, se refiere al diámetro del elemento) AISI 316 dispuestas perpendicularmente a las barras macizas mediante abrazaderas M10 de rosca AISI 304, que a su vez fijan la barra maciza al tener una métrica DN 10, es decir, un diámetro de sujeción que se sitúa en torno $\frac{3}{8}$ de pulgada que equivale a 18 mm. Teniendo siempre una cierta tolerancia en el diámetro para poder fijar barras de un tamaño algo inferior o superior respecto a la medida nominal. A su vez, encontramos 4 perfiles de acero AISI 316 de 4 mm de grosor, soldados a las barras M18 que será donde se coloquen los motores, estos perfiles se verán modificados en los siguientes apartados. Además, se cuenta con 4 varillas roscadas AISI 316 que salen de las abrazaderas M10 (dispuestas sobre la barra M18) y llegan a las abrazaderas M10 AISI 304 y diámetro de sujeción DN 80 (90 mm que equivalen a 3 pulgadas) que fijan a los elementos de PVC que se encuentran en el plano superior. Las abrazaderas no son isofónicas, puesto que las que estaban recubiertas con goma isofónica tenían acabado en acero galvanizado, suponiendo un impedimento para trabajar en el mar. Los diámetros de sujeción de las abrazaderas pueden verse en la Tabla 2.2.

Medida [mm]	Ø D (mm)	Ø D (")	A x B (mm)	Carga Máxima recomendada (kg)
18	15 - 19	3/8"	18.5x1.75	150
22	20 - 25	1/2"	18.5x1.75	150
28	26 - 30	3/4"	18.5x1.75	150
35	32 - 36	1"	18.5x1.75	150
40	38 - 43	1 1/4"	18.5x1.75	150
48	47 - 51	1 1/2"	18.5x1.75	150
54	53 - 56	-	18.5x1.75	150
60	60 - 64	2"	18.5x1.75	150
70	68 - 72	-	18.5x1.75	150
75	75 - 80	2 1/2"	18.5x1.75	150
83	81 - 86	-	18.5x1.75	150
90	87 - 92	3"	18.5x1.75	150

Tabla 2.2. Diámetros de sujeción de las abrazaderas

2.4 Aspectos de especial interés

En el diseño de esta primera versión del prototipo se han añadido algunas mejoras para evitar ciertos conflictos en el dron. Por un lado, se han añadido juntas de grifo para evitar la transmisión de las vibraciones de las hélices de cada propulsor a la estructura de acero. Estas juntas hacen la función de un material que amortigüe la propagación de las vibraciones (Figura 2.14), estando situado en los tornillos de fijación de cada motor que unen el propio motor con los perfiles de acero.



Figura 2.14. Disposición de las juntas de grifo en el perfil de acero inoxidable

Adicionalmente, mediante esta implementación conseguimos reducir en gran medida los fenómenos de resonancia, producidos cuando coincide la frecuencia propia de la estructura y la frecuencia de las hélices de los propulsores.

Posteriormente, se ha añadido a la estructura una carcasa de cámara de acción estanca [21] para proteger el sistema de visión (Figura 2.15) y poder acceder a éste de forma sencilla, mediante la apertura de la propia carcasa. De forma análoga, se ha utilizado otra carcasa (Figura 2.16) en la que se encuentran un interruptor para poder cortar la alimentación a la Raspberry y los

terminales procedentes de la batería desde donde podremos poner a cargar sin tener que abrir el tubo y extraer la batería. Ambas carcasas tienen una certificación que confirma que pueden ser sumergidas hasta 30 metros, cumpliendo el requisito de poder ser utilizado a 20 metros de profundidad.



Figura 2.15. Webcam e iluminación



Figura 2.16. Terminales de carga e interruptor

Adicionalmente, los motores se han dispuesto a una distancia considerable de la carcasa que protege sistema de visión (Figura 2.17), para evitar que el flujo turbulento en rotación o vórtice de agua aparezca en el campo de visión y dificulte ver.



Figura 2.17. Carcasa de la empresa NK empleada en el prototipo

Uno de los aspectos clave del diseño fue establecer un sistema que permitiera el paso de los cables desde el interior del dron hacia el exterior. En las carcasas de la cámara se aprovecharon los pulsadores para ser desmontados y pasar los cables, para posteriormente, conseguir que la carcasa

fuese estanca. Por otro lado, se adquirieron dos modelos de penetradores: el primero M10 para el paso de hasta 6 mm [22] y el segundo, para el paso de hasta 8 mm [23], siendo ambos de aluminio anodizado (Figura 2.18) para tener una alta resistencia a la corrosión que se colocan en los tapones de PVC para permitir el paso de los cables. Estos procesos se detallarán en profundidad en el Capítulo: Fabricación y ensamblaje.



Figura 2.18. Penetradores de la empresa BlueRobotics

Asimismo, para tener una mejor distribución del recorrido de los distintos cables se han agrupado en tubos corrugados. Además, para tener los terminales procedentes de la batería que se encuentran en la carcasa accesibles y sin riesgo de que se toquen, se han soldado los cables a conectores XT-90 (Figura 2.19), para así facilitar una posterior conexión hembra macho con el sistema de carga de la batería.



Figura 2.19. Conectores XT-90

Por otro lado, se utilizó un terminal hembra roscado de PVC en cuyo interior se enroscó un acople roscado de latón que a su vez, enroscaba con la rosca del barómetro, el terminal de PVC irá soldado al tapón de PVC (Figura 2.20).

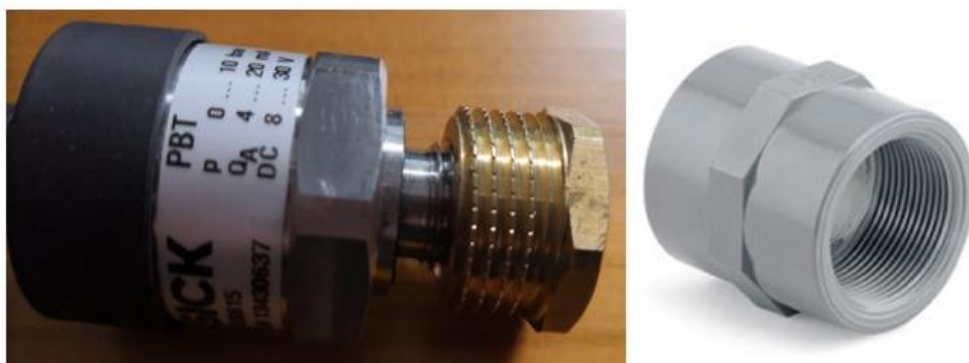


Figura 2.20. Barómetro con acople roscado de latón, y terminal roscado de PVC

Paralelamente, se escogió el cable Ethernet de categoría 5 e (CAT 5e) [24], debido a que tiene una resistencia máxima a la tracción de 150 N, es decir, se puede tirar del cable con una fuerza inferior a 15 kg. Por tanto, una vez que nos encontremos en el agua, se podría tirar del dron por el cable Ethernet sin que se produjera la rotura del mismo. Por este motivo, no se ha dimensionado otro cable (o cuerda) alternativo al cable Ethernet para tirar del dron si fuese oportuno.

2.5 Evolución del prototipo

Una vez que se terminó el montaje de esta primera versión del submarino, se intentó diseñar una nueva versión que satisficiera ciertos aspectos que habían aparecido una vez que se había trabajado manualmente con el ensamblaje.

2.5.1 Problemas de este diseño

A continuación, se expondrán los inconvenientes que lleva consigo la primera versión del prototipo.

En primer lugar, a la hora de trabajar en el interior del tubo para conectar la electrónica no resultaba una tarea muy cómoda al operar sobre un recinto de trabajo de 81,4 mm de diámetro interior, puesto que el grosor de la tubería de 90 mm es de 4,3 mm. La operación más costosa era poder apretar los penetradores con una llave fija de tubo, ya que la tuerca de los pasadores solo tiene 2 lados planos y la llave cuenta con 6 lados, por lo que había que recurrir una medida interior de 18-19 mm para poder apretar la tuerca, siendo una tarea complicada por el espacio, puesto que con una llave inglesa o una llave fija no se podría hacer el suficiente para dejar bien roscada la tuerca.

Otro de los puntos destacados que no se había contemplado en el diseño inicial, era un elemento de apoyo para poder dejar la estructura, sin que los motores se dañaran si el prototipo se depositaba en el suelo, salvo que pudiéramos un elemento temporal que lo aguantara.

Más tarde, el hecho de que sólo se pudiera abrir el tubo por la junta universal que se encuentra en el centro, hacía que fuese más difícil operar con los elementos del interior del tubo, ya que sólo disponíamos de una zona para abrirlo. Se había diseñado de esta forma para asegurar la estanqueidad del mismo, permitiendo el acceso al interior abriendo dicho elemento.

2.5.2 Búsqueda de soluciones

El primer paso a seguir fue investigar si existían accesorios de PVC disponibles que cumplieren los requisitos de presión y que no afectaran en gran medida a la estructura ya diseñada. Se encontró un tubo de presión de PVC PN 10 (10 atmósferas) de 110 mm de diámetro externo, es decir, 4 pulgadas, con un espesor de pared de 4,2 cm. Asimismo, con el fin de tener una mejor accesibilidad para manipular la electrónica interior y poder apretar los penetradores con mayor facilidad, se adquirió un tapón roscado de PVC de 110 mm y un manguito roscado de PVC de 110 mm para cada extremo del tubo. Además, se adquirió una junta universal roscada de 110 mm que une los segmentos de tubo de 30 cm cada uno y 110 mm de diámetro externo y que permite la apertura del submarino en este punto, además, de los tapones roscados en los extremos.

Posteriormente, se diseñaron unos soportes inferiores para la estructura, se trata de un sistema formado por abrazaderas M8 (dispuestas sobre la barra M18) AISI 304, que se enroscan a una varilla roscada AISI 316 que, a su vez, se encuentra soldada a una plancha de acero inoxidable AISI 316 de 4mm de grosor y cortada de forma cuadrada, en cada una de las 4 esquinas.

Además, se decidió ampliar la longitud de los perfiles que fijan a los motores mediante tornillos, pasando a ser de 8 cm (anteriormente 4 cm), permitiendo ahora que la soldadura de la barra maciza M18 se realizara hasta la mitad del perfil y dejando los 4 cm restantes para fijar el motor.

Las roscas de los agujeros de los motores T-200 [25] eran M3, una métrica normalizada, pero con la que no se suele trabajar en la industria, dificultando su adquisición. Además, el paso del tornillo no coincidía con el tornillo que había escogido BlueRobotics para fijar el motor (Figura 2.21).

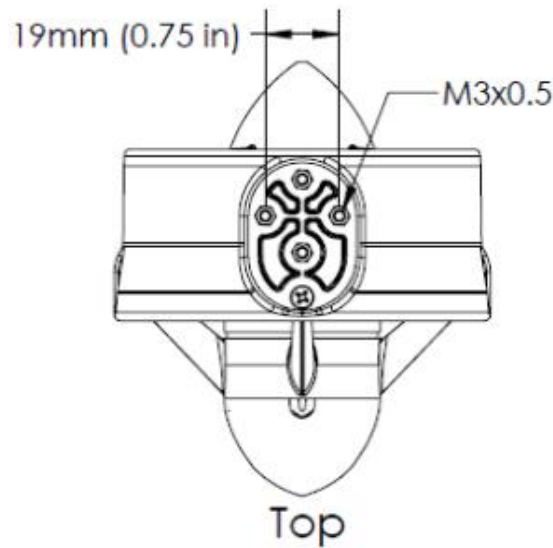


Figura 2.21. Disposición de los tornillos del motor T-200

Asimismo, el acabado de los tornillos suele ser zincado. Sin embargo, pudimos encontrar tornillos de acero inoxidable y, además, de la longitud deseada (25 mm), pues teniendo en cuenta la profundidad de la rosca del motor y conociendo el grosor del perfil y el de junta de grifo pudimos adquirirlos para que quedarán bien fijados. A continuación, se muestra la Tabla 2.3 con roscas de distintas métricas, incluyendo M3.

Rosca Thread	Paso Pitch	Ø Broca Ø Drill
M 1	0,25	0,75
M 1,1	0,25	0,85
M 1,2	0,25	0,95
M 1,4	0,30	1,1
M 1,6	0,35	1,25
M 1,7	0,35	1,35
M 1,8	0,35	1,45
M 2	0,40	1,6
M 2,2	0,45	1,75
M 2,3	0,40	1,85
M 2,5	0,45	2,05
M 2,6	0,45	2,1
M 3	0,5	2,5

Tabla 2.3. Tornillos con métrica M3

Posteriormente, se muestra en la Figura 2.22 los tornillos colocados en los orificios de los motores y el perfil de acero inoxidable soldado a la barra M18.

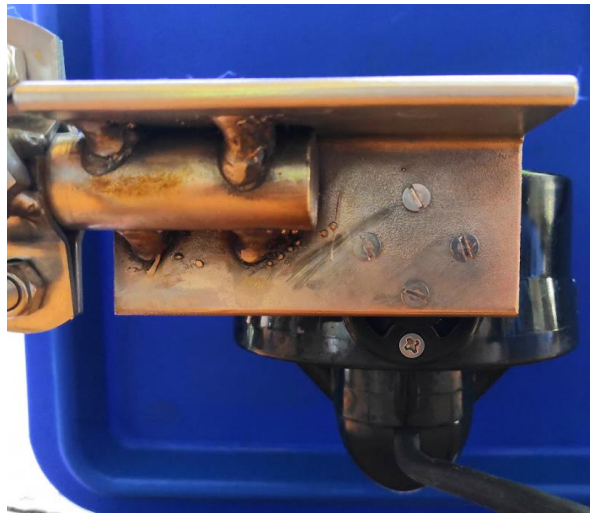


Figura 2.22. Soldadura de los perfiles y tornillos empleados

Por último, se imprimieron varias piezas en 3D para mejorar el acceso a la electrónica interior mediante bandejas, que se desplazan sobre un soporte semicircular, piezas para la sujeción de los microcontroladores y recubrimiento de algunos sensores. La funcionalidad y el propósito de estas piezas se desarrollará en el Capítulo 8: Diseños para el interior del tubo de PVC mediante impresión 3D.

2.6 Diseño final

Una vez que conseguimos todos los materiales necesarios pudimos llevar a cabo el nuevo diseño. En primer lugar, se seguirán utilizando los elementos que conformaban la estructura metálica, a ésta se le añadirán los 4 soportes también de acero inoxidable (Figura 2.23), se aumentarán los perfiles que se encuentran en los extremos y las nuevas abrazaderas de 110 mm, ya que las abrazaderas anteriores no permitían fijar la nueva tubería, puesto que no llegaban a rodearla dado el menor diámetro que tienen.

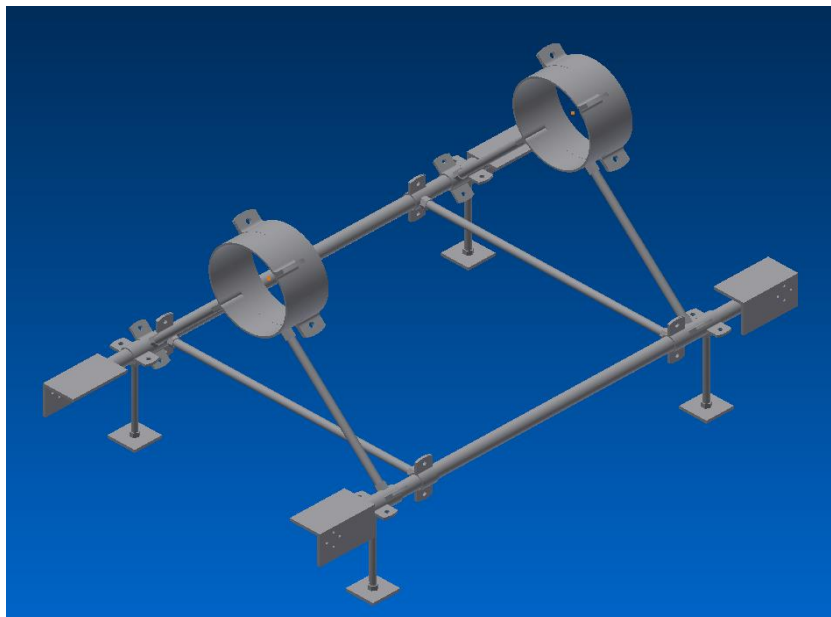


Figura 2.23. Vista en perspectiva de la estructura de acero inoxidable

Acto seguido, se diseñarán los nuevos componentes de PVC (Figura 2.24) que conformarán la zona que almacenará la electrónica. Se diseñará la nueva junta universal, los dos segmentos de tubería de 110 mm, los tapones roscados y los manguitos roscados para ver si las medidas son correctas y no suponen un cambio de modelo en cuanto a la dinámica del mismo.

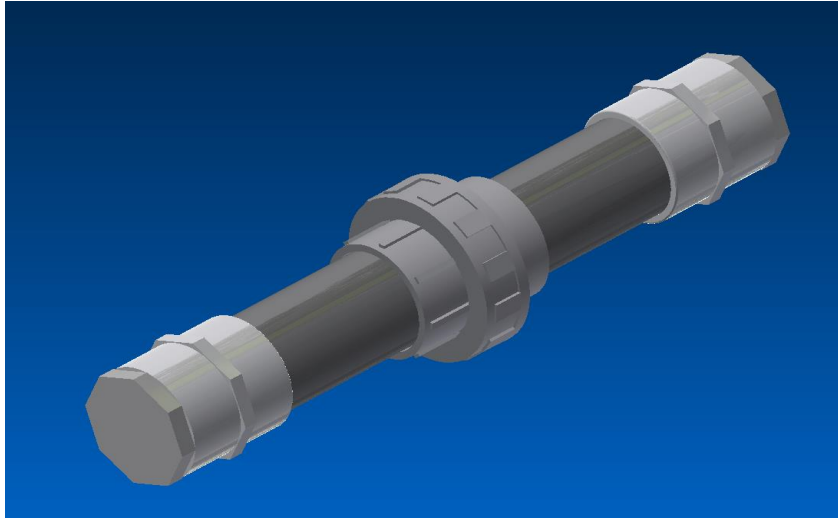


Figura 2.24. Vista en perspectiva de los elementos de PVC

Más tarde, realizamos el ensamblaje del prototipo para poder ver el resultado final del mismo con implementación de los nuevos componentes en las Figuras: Figura 2.25, Figura 2.26, Figura 2.27 y Figura 2.28.

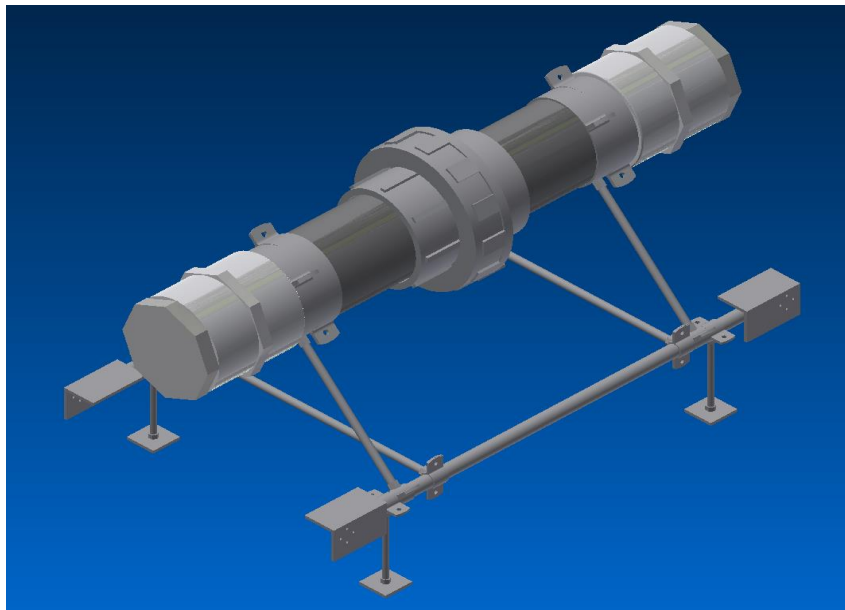


Figura 2.25. Vista en perspectiva del prototipo

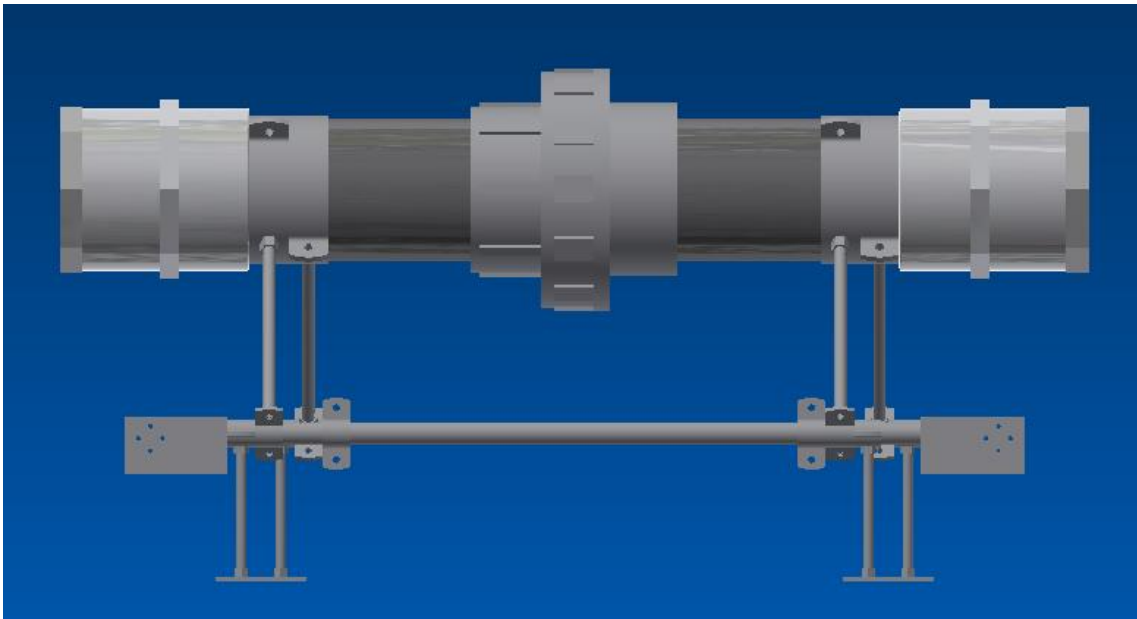


Figura 2.26. Vista lateral del prototipo

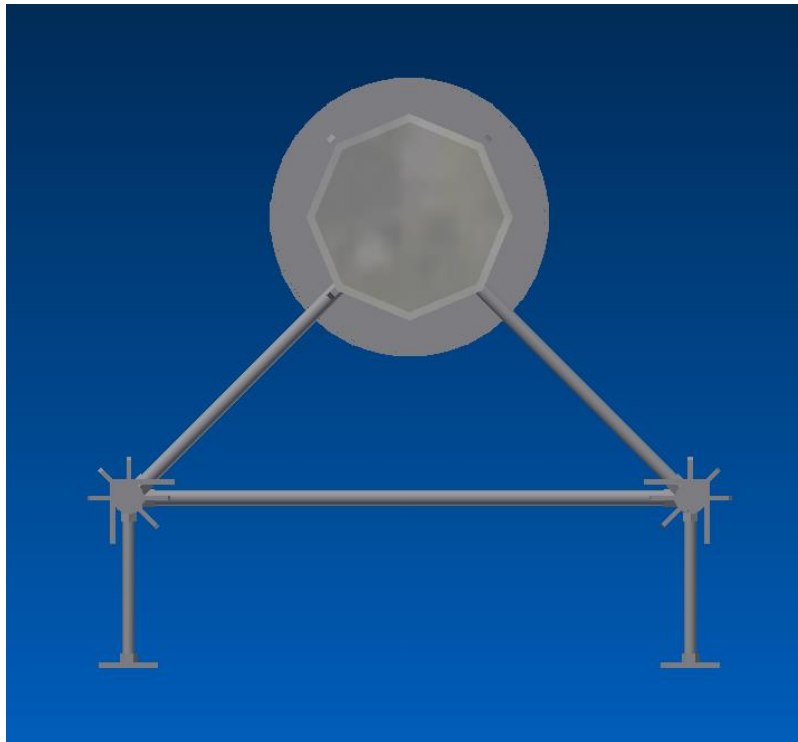


Figura 2.27. Vista posterior del prototipo

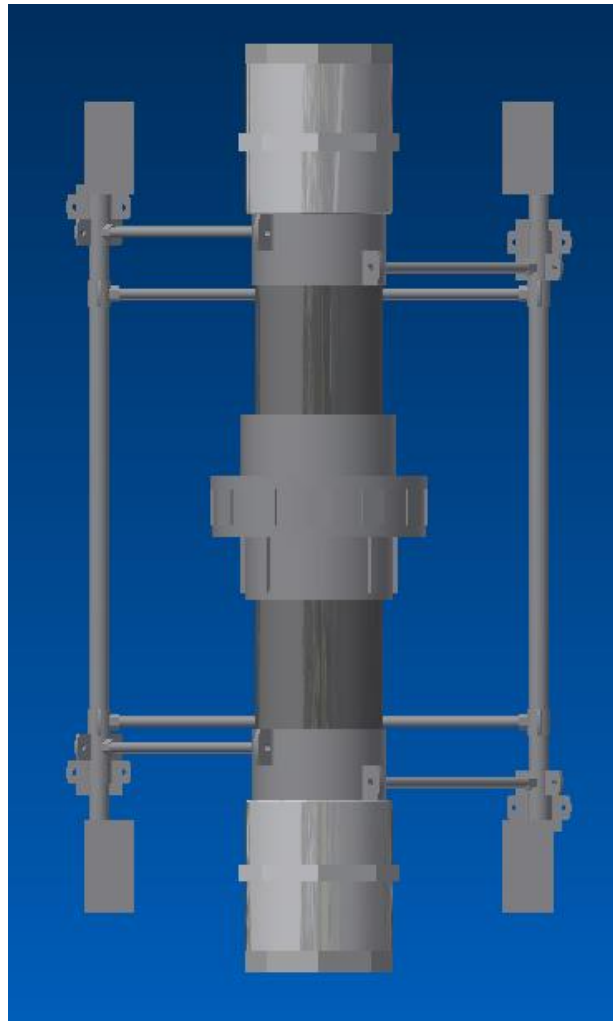


Figura 2.28. Vista superior del prototipo

En el ensamblaje se le ha asignado el color característico de cada material empleado, de modo que refleje de forma fiel el color que tiene cada parte del submarino en la realidad como se mostrará en el Capítulo: Fabricación y ensamblaje.

3 Cálculos estructurales

En este capítulo se llevarán a cabo los cálculos que justifican el diseño del prototipo, en los que se incluyen el centro de gravedad y el centro de flotación de la estructura.

Paralelamente, se analizará el peso y el empuje que experimenta el dron para saber en qué situación nos encontramos con respecto a conseguir que el prototipo se encuentre en un estado de equilibrio estable.

En consonancia con lo anterior, deberemos idear un sistema para conseguir dicha situación, apoyándonos en el uso de flotadores para equilibrar la flotabilidad, al ser mayor el peso que el empuje y tener una distribución del peso no simétrica en el interior del tubo al contener la electrónica y la batería. Asimismo, veremos si los cálculos realizados realmente guardan relación con el prototipo ya ensamblado.

3.1 Centro de gravedad

En primer lugar, para poder conocer el centro de gravedad (CG), siendo éste el punto del cuerpo que se mueve como si toda la masa del propio cuerpo estuviera confinada en dicho punto y, a su vez, que todas las fuerzas externas estuviesen aplicadas sobre él, debemos conocer la forma o geometría del cuerpo y su masa asociada.

En cuanto a las geometrías presentes, encontramos cilindros sólidos y huecos y, otros elementos con formas más complejas por lo que obtendremos su masa mediante una báscula de precisión. El origen del sistema de coordenadas se situará en el extremo central de la parte delantera del tubo para poder referenciar de forma más cómoda las coordenadas de cada elemento.

El centroide de las barras macizas se encontrará en el eje longitudinal, a la mitad de la longitud de la barra, siendo 0 las componentes de los otros 2 ejes. Análogamente, el centroide de las tuberías de PVC se encontrará también en el mismo punto. En la Figura 3.1 podemos ver los dos centroides.

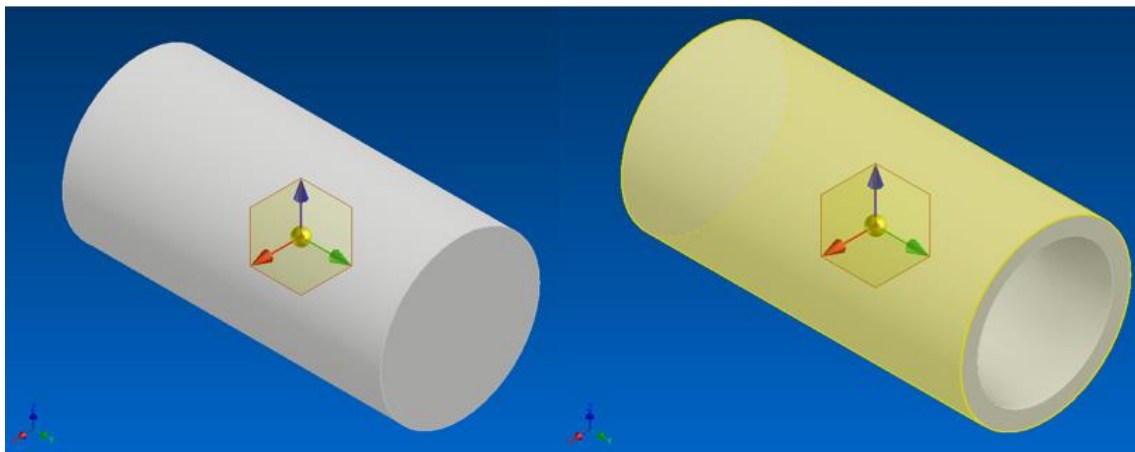


Figura 3.1. Centroides de la barra maciza a la izquierda y de la tubería hueca a la derecha

Asimismo, en el caso de realizar el cálculo teórico de la masa de los elementos, obtendremos la masa del producto de la densidad del elemento (ρ) y su volumen (V), siendo:

$$\mathbf{m = \rho \cdot V} \quad (3.1)$$

En el caso del PVC de presión de 10 atmósferas tendremos una densidad de 1,42 g/cm³, mientras que para el acero inoxidable AISI 304 la densidad será de 7,93 g/cm³ (las abrazaderas no se tomarán en cuenta en el cálculo debido a su escaso peso) y para el acero inoxidable AISI 316 la densidad será de 7,96 g/cm³, apreciándose una ligera diferencia entre estos dos aceros.

Posteriormente, deberemos calcular el volumen de los cilindros, siendo éste:

$$\mathbf{V = \pi \cdot r^2 \cdot h} \quad (3.2)$$

donde r , es el radio del cilindro y h su altura, para las barras macizas. En cambio, para obtener el volumen resultante de los cilindros huecos, deberemos restar al volumen del cilindro como si éste fuese sólido, el volumen del cilindro con radio desde el centro hasta la pared interior del tubo. De este modo la fórmula quedaría de la siguiente forma:

$$\mathbf{V = \pi \cdot h \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)} \quad (3.3)$$

donde r_{ext} es el radio externo del cilindro y r_{int} el radio interno. Para las planchas que hacen de soporte de la estructura, el volumen de un prisma rectangular será:

$$\mathbf{V = l_1 \cdot l_2 \cdot h} \quad (3.4)$$

donde l_1 es la longitud de un lado, l_2 la longitud del lado restante y h su altura. Sin embargo, al ser una pieza de 4x4x40 mm³ su masa será de apenas 5 gramos por lo que despreciaremos su masa para el cálculo, al igual que se ha hecho con las abrazaderas.

A continuación, calculamos el centro de gravedad de los elementos con una geometría compleja, nos ayudaremos de la herramienta de cálculo del centro de masa del Autodesk Inventor (Figura 3.2). En las propiedades del componente le asignamos la densidad del material y el programa obtiene el centro de masa. A modo de ejemplo se muestra el procedimiento seguido para hallar el centroide del tapón roscado de PVC con respecto a su sistema de coordenadas.

Este proceso se ha realizado para los manguitos roscados de PVC, la junta universal de PVC, los perfiles de acero inoxidable AISI 316 y los motores T-200. Además, para corroborar que el cálculo de la masa era correcto se pesaron los elementos mencionados y la diferencia fue de 34 gramos en el peor caso (junta universal), dando por buena esta metodología. Adicionalmente, se comprobó la masa de los motores dada por el fabricante y también resultaba muy similar.

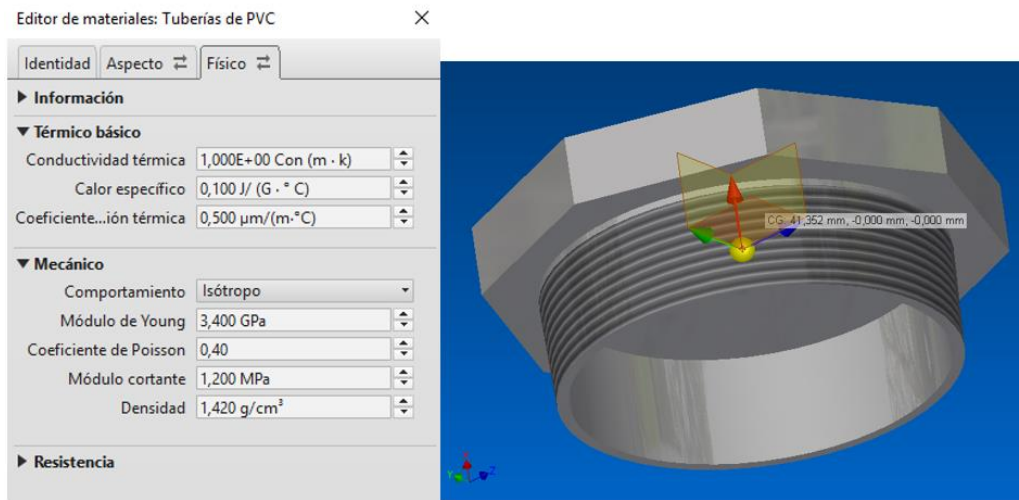


Figura 3.2. Editor de propiedades mecánicas y centroide del componente

El centroide de cada elemento lo referenciamos al sistema de coordenadas absoluto que se muestra a continuación (Figura 3.3).

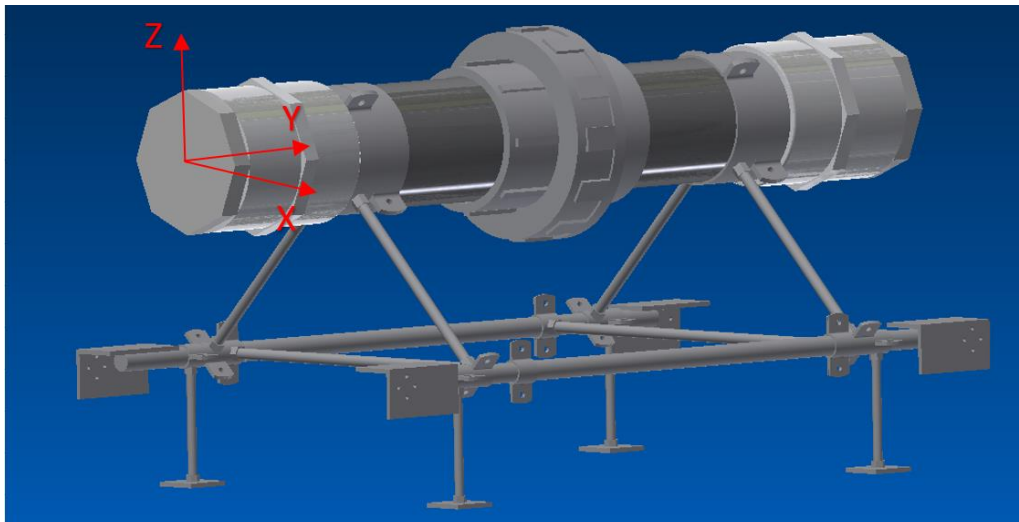


Figura 3.3. Sistema de coordenadas absoluto

Una vez que hemos hallado las coordenadas del centro de gravedad de cada componente y las masas reales y teóricas, podemos hallar el centroide de cada eje del sistema de coordenadas. Al tratarse de una estructura simétrica en el eje X, el centro de gravedad va a depender de la coordenada del eje Y y la coordenada del eje Z. Por tanto, el centro de gravedad va a venir dado por:

$$CG_{ejeY} = \frac{\sum(mi \cdot yi)}{\sum mi} \text{ y } CG_{ejeZ} = \frac{\sum(mi \cdot zi)}{\sum mi} \quad (3.5)$$

En la Tabla 3.1 se muestran los cálculos realizados y el CG del conjunto siendo éste:

$$CG(x,y,z) = (0,39.97,-10.45) \text{ cm} \quad (3.6)$$

Cálculo de centro de masa de la estructura													
Componente	Coordenadas (cm)			Masa (kg)								CG _{ejex} (cm)	0
	X	Y	Z	ρ (kg/m ³)	V (m ³)	masa _{TEÓRICA} (g)	masa _{REAL} (g)	y _i (cm)	z _i (cm)	m _i ·y _i	m _i ·z _i	CG _{ejey} (cm)	39.97
1	0	23.17	0	1420	0.00042	594.70		23.17	0	13779.09	0.00	CG _{ejez} (cm)	-10.45
2	0	57.01	0	1420	0.00042	594.70		57.01	0	33903.57	0.00		
3	0	22.05	-18.96	7960	0.00003	225.56		22.05	-18.96	4973.68	-4276.69	ρ INOX _{AISI304} (g/cm ³)	7.93
4	0	58.13	-18.96	7960	0.00003	225.56		58.13	-18.96	13112.03	-4276.69	ρ INOX _{AISI316} (g/cm ³)	7.96
5	-11.6	19.38	-11.6	7960	0.00002	125.04		19.38	-11.6	2423.19	-1450.41	ρ PVC10ATM (g/cm ³)	1.42
6	11.6	16.33	-11.6	7960	0.00002	125.04		16.33	-11.6	2041.83	-1450.41	De acuerdo a ISO 1183-1	
7	-11.6	63.85	-11.6	7960	0.00002	125.04		63.85	-11.6	7983.51	-1450.41	Σ (m _i) (g)	10951.93
8	11.6	60.8	-11.6	7960	0.00002	125.04		60.8	-11.6	7602.15	-1450.41	Σ (m _i ·y _i) (g·cm)	437802.09
9	-18.96	40.09	-18.96	7960	0.00016	1255.86		40.09	-18.96	50347.24	-23811.02	Σ (m _i ·z _i) (g·cm)	-114416.04
10	18.96	40.09	-18.96	7960	0.00016	1255.86		40.09	-18.96	50347.24	-23811.02		
11	-18.96	22.15	-25.03	7960	0.00001	40.01		22.15	-25.03	886.25	-1001.48		
12	18.96	20.14	-25.03	7960	0.00001	40.01		20.14	-25.03	805.83	-1001.48		
13	-18.96	60.04	-25.03	7960	0.00001	40.01		60.04	-25.03	2402.28	-1001.48		
14	18.96	58.03	-25.03	7960	0.00001	40.01		58.03	-25.03	2321.86	-1001.48		
15	0	4.14	0				522.46	4.14	0	2162.98	0.00		
16	0	76.04	0				522.46	76.04	0	39727.86	0.00		
17	0	6.98	0				663.87	6.98	0	4633.81	0.00		
18	0	73.2	0				663.87	73.2	0	48595.28	0.00		
19	0	39.29	0				1575.77	39.29	0	61912.00	0.00		
20	-19.04	8.78	-19.04				203.77	8.78	-19.04	1789.10	-3879.78		
21	19.04	8.78	-19.04				203.77	8.78	-19.04	1789.10	-3879.78		
22	-19.04	71.4	-19.04				203.77	71.4	-19.04	14549.18	-3879.78		
23	19.04	71.4	-19.04				203.77	71.4	-19.04	14549.18	-3879.78		
24	-24.38	6.62	-23.92				344	6.62	-23.92	2277.28	-8228.48		
25	24.38	6.62	-23.92				344	6.62	-23.92	2277.28	-8228.48		
26	-24.38	73.56	-23.92				344	73.56	-23.92	25304.64	-8228.48		
27	24.38	73.56	-23.92				344	73.56	-23.92	25304.64	-8228.48		

Tabla 3.1. Cálculos del centro de masa de la estructura

Paralelamente, se han enumerado los distintos componentes para poder identificar su centro de gravedad con respecto al sistema de coordenadas absoluto. Dentro de ellos, haremos una subclasificación entre aquellos elementos cuya masa se ha calculado por medio de fórmulas, es decir, de forma teórica (numerados en rojo en la Figura 3.4) y los elementos que se han pesado en una báscula de precisión (numerados en verde en la Figura 3.5). La masa de los motores también se obtuvo mediante la báscula y se comprobó dicho valor con la hoja de datos dada por el fabricante, se han numerado con el color violeta para ser diferenciados de los subgrupos anteriores en la Figura 3.5.

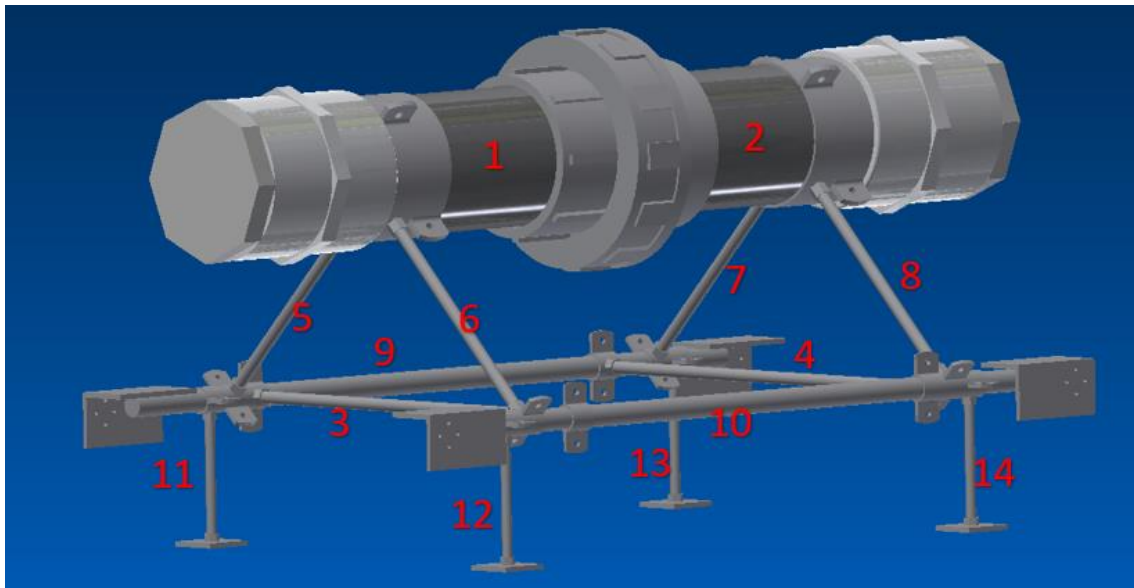


Figura 3.4. Elementos cuya masa se ha hallado de forma teórica

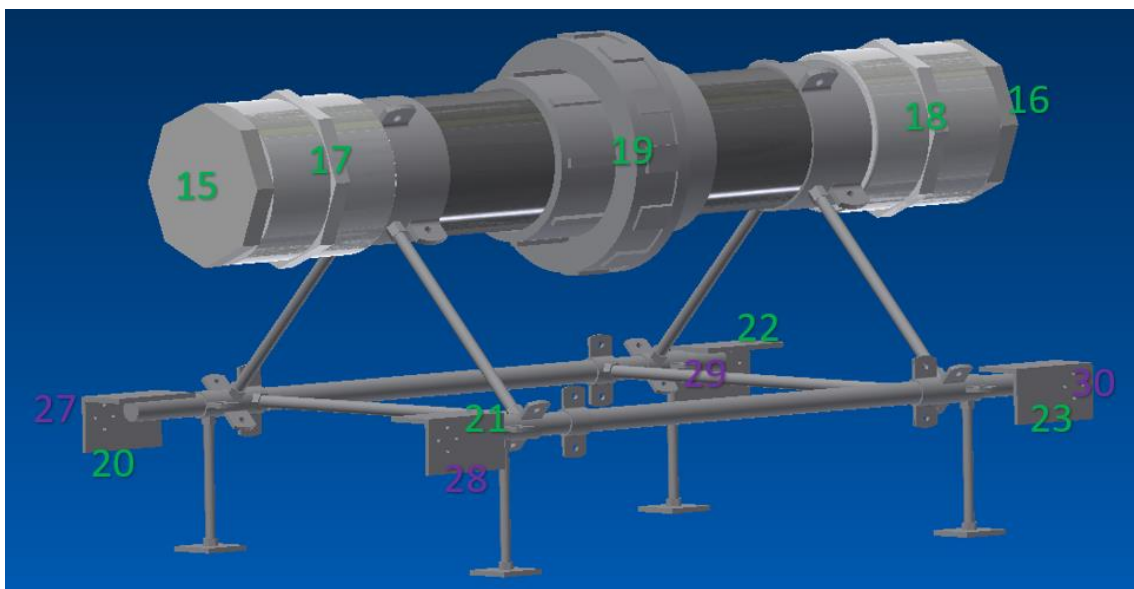


Figura 3.5. Elementos cuya masa se ha hallado mediante una báscula de precisión

Además, se añade en la Figura 3.6 la disposición del motor sobre el perfil de acero inoxidable, en concreto, corresponden con el elemento 20 y el 27, tratándose del perfil y del motor, respectivamente.



Figura 3.6. Disposición de los motores en el perfil de acero inoxidable

Con el objetivo de poder visualizar de forma más clara dónde se encuentra exactamente, el centro de gravedad se muestran los cortes de los planos en dicho punto (Figura 3.7 y Figura 3.8).

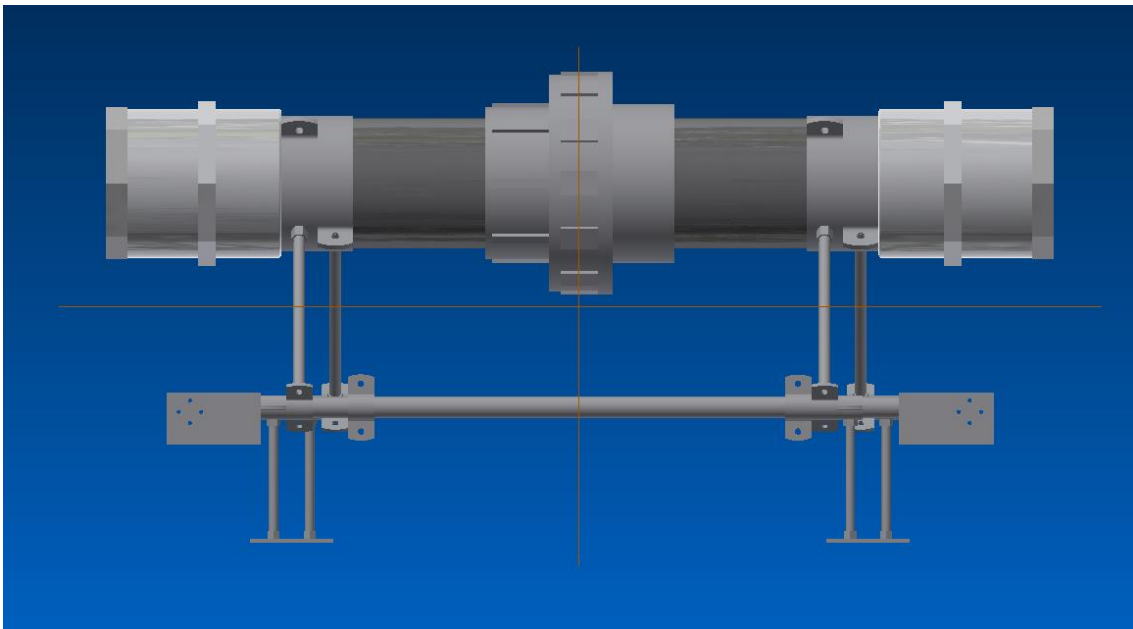


Figura 3.7. Centroide visto desde el plano YZ

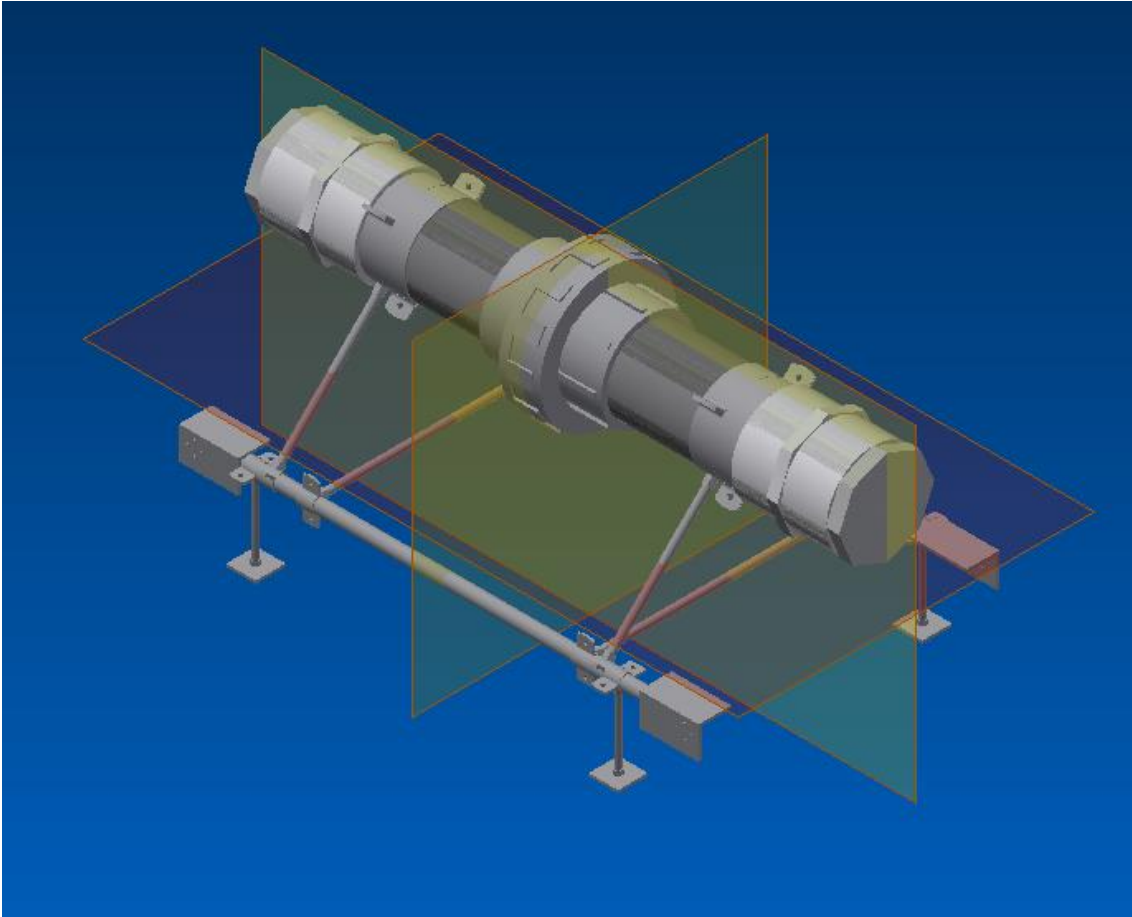


Figura 3.8. Centroide visto en perspectiva

En consonancia con las gráficas anteriores, podemos concluir que efectivamente, el dron es simétrico en el eje X y que es casi simétrico en su eje Y (39,97 cm), el efecto del centro de gravedad de la junta universal de PVC repercute en el desplazamiento hacia el origen del eje Y. La longitud total del submarino es de 80,18 cm y, por tanto, si la junta fuese simétrica, la coordenada Y del centro de gravedad de la estructura debería encontrarse a la mitad de la longitud de la misma (40,09 cm). En cuanto a la coordenada del eje Z, cabe destacar que se encuentra por debajo de la tubería y accesorios de PVC.

3.2 Centro de flotación

A la hora de hallar el centro de flotación, debemos saber que aquellos elementos de la estructura que tengan mayor densidad que la del agua no experimentarán una fuerza de empuje hacia la superficie. En cambio, si algún elemento tiene una densidad menor a la del fluido, en este caso, agua, experimentará una fuerza de ascensión hacia la superficie. En el caso de los motores, la parte interna de la carcasa se mantiene en contacto con la carcasa pues necesita lubricarse, lo que hace que por su composición se hunda en el agua.

En este apartado se considerarán aquellos elementos de PVC situados en la parte superior de la estructura. En primer lugar, debemos consultar la densidad del agua salada, siendo ésta de 1027 kg/m^3 , 1420 kg/m^3 la del PVC PN10 y $1,17 \text{ kg/m}^3$ la del aire a nivel del mar a 25°C .

El centro de flotación en el eje X será 0, ya que el volumen encerrado por los segmentos de tubo de PVC y los accesorios es simétrico en este eje. Asimismo, el eje Z también es simétrico. Por tanto, el centro de flotación se encontrará en el eje Y. Si dividimos la zona de PVC por el centro nos quedarían dos partes iguales, por ello, el volumen confinado en ambas partes coincidiría.

Podemos concluir que el centro de flotación en el eje Y se encontrará a la mitad de la longitud que ocupa el ensamblaje de los elementos. Las coordenadas del CF del conjunto de PVC serán:

$$\mathbf{CF}(x,y,z) = (0,40.09,0) \text{ cm} \quad (3.7)$$

En la Figura 3.9 se pueden ver el lugar en el que se encuentran las coordenadas del centro de flotación.

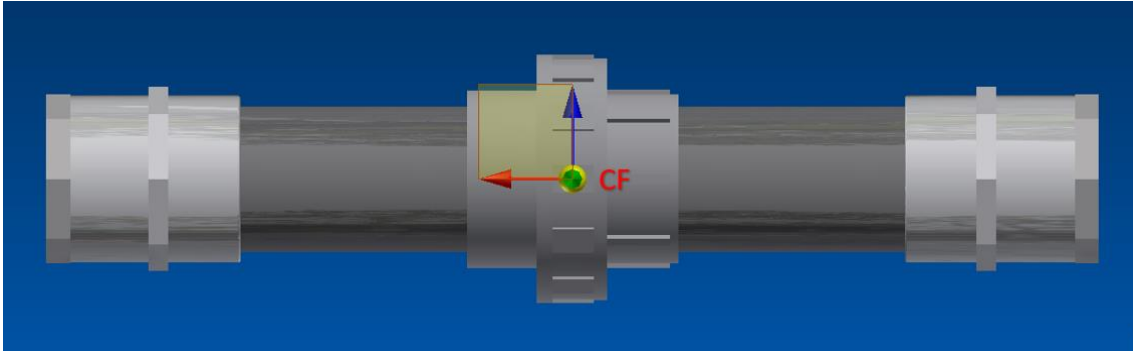


Figura 3.9. CF del conjunto de tuberías y accesorios de PVC

3.3 Empuje total

Para poder conocer el empuje del prototipo debemos aplicar el principio de Arquímedes, mediante la ecuación del módulo del empuje:

$$\mathbf{E} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \mathbf{V}_{\text{fluido}} \cdot \mathbf{g} \quad (3.8)$$

donde $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ es la densidad del agua marina (1027 kg/m^3), V_{fluido} el volumen de fluido desalojado y g , la aceleración de la gravedad. Como no sabemos cuál es la masa de aire encerrada en el tubo, calcularemos el empuje por medio de su densidad y volumen.

En primer lugar, el volumen de aire dentro del conjunto del tubo y el volumen conformado por el PVC, es decir, el volumen de agua desalojado vendrá dado por el espacio interior del contorno de los tubos y accesorios del ensamblaje. Por un lado, debemos indicar que se utilizará la fórmula del volumen para un cilindro, en la que tendremos en cuenta el diámetro externo que será el límite que encierre el conjunto, por tanto, tenemos:

$$\mathbf{V} = \pi \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{r}_{\text{ext}}^2 \quad (3.9)$$

Asimismo, el volumen total estará formado por la suma de los volúmenes:

- 1.- Tapón roscado y manguito roscado (lado izquierdo y derecho).
- 2.- Tubo de PVC desde el final del manguito roscado hasta la llegada a la unión de la junta universal (lado izquierdo y derecho).
- 3.- Unión delantera roscada de la junta universal
- 4.- Parte central de la junta universal.
- 5.- Unión trasera de la junta universal.

En la Tabla 3.2 se puede observar el volumen total obtenido y a continuación, se enumeran los volúmenes hallados del tubo en la Figura 3.10. Volumen confinado en la junta universal Figura 3.10.

Cálculo del empuje total del prototipo					
Componente	Diámetro externo (mm)	Longitud (cm)	Volumen (dm ³)	$\Sigma (V_{\text{fluido}}) (\text{dm}^3)$	9.96
1	126.50	14.8	1.86		
1	126.50	14.8	1.86		
2	110.00	17.25	1.64		
2	110.00	17.25	1.64		
3	130.30	5.45	0.73		
4	188.20	5.36	1.49		
5	134.40	5.27	0.75		
	$\Sigma (\text{Longitud}) (\text{cm})$	80.18			

Tabla 3.2. Cálculo del volumen de fluido desalojado

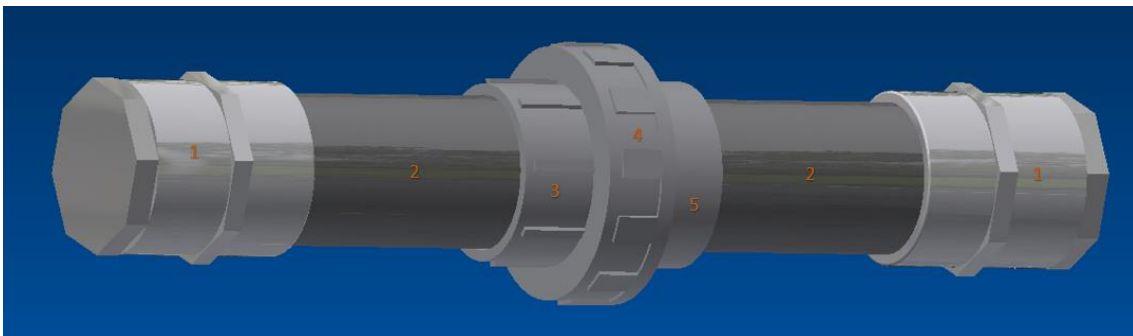


Figura 3.10. Volumen confinado en la junta universal

Una vez que hemos hallado del volumen de aire dentro del tubo, aplicamos la fórmula y obtenemos el empuje del prototipo (Tabla 3.3).

$V_{\text{(fluido)}} (\text{dm}^3)$	9.96
$\rho_{\text{H}_2\text{O}} (\text{kg/m}^3)$	1027.00
$g (\text{m/s}^2)$	9.80
$E (\text{N})$	100.29

Tabla 3.3. Empuje en Newtons del prototipo

Este cálculo nos permite conocer el módulo de la componente ascendente de fuerza del tubo, siendo ésta de 10,23 kg. Se trata de un cálculo orientativo ya que dentro del tubo habrá electrónica que tendrá peso y que disminuirá el volumen de aire en el tubo.

3.4 Peso esperado total

Por otro lado, se pesó el prototipo totalmente ensamblado, con el cableado montado, las carcasas colocadas, la electrónica, la batería en el interior y las piezas de impresas en 3D. En este proceso

se empleó un dinamómetro, en el que se estira un resorte interior del dispositivo en un rango de medida establecido de acuerdo a la *Ley de Elasticidad de Hooke*.

El dinamómetro cuenta con una resolución de centésimas de kilogramo y es capaz de detectar hasta 40 kilogramos. El prototipo tiene una masa de 15,70 kg (Figura 3.11), que corresponde con un Peso = 153,86 N. Por tanto, ahora podemos saber la masa real de todo el conjunto.



Figura 3.11.Masa del prototipo

3.5 Equilibrado de la flotabilidad

Con el objetivo de obtener un conjunto que no se encuentre en flotabilidad neutra y que tenga una fuerza resultante que tienda a sumergir el dron, debemos analizar cuál de las componentes de fuerza, ascendente o descendente, predomina.

Por un lado, ya conocemos el peso del dron y por otro, el empuje del mismo. Por tanto, sabemos que el dron tiene sus componentes descompensadas, posibilitando que el dron se hunda y no flote. Sin embargo, queremos tener el peso descompensado con el empuje con un valor menor para que se hunda de forma controlada. Asimismo, para contrarrestar el distinto reparto de pesos dentro del tubo, ya que la batería se encuentra en un lado del tubo y tiene más masa que el resto de los componentes electrónicos, deberemos compensar dicho lado de forma experimental en el mar, es decir, el ajuste fino se realizará después de llevar a cabo este aumento del empuje.

Para tal efecto se han introducido flotadores cilíndricos y toroidales como los de la Figura 3.12, con los cuales podemos hacer que el dron flote de forma simétrica debido a su colocación en el mismo.



Figura 3.12. Flotador cilíndrico a la izquierda y toroidal a la derecha

En el primer caso se trata de un cilindro hueco por lo que el volumen desalojado va a venir dado por la resta de estos dos diámetros al cuadrado, ver (3.3)

En segundo lugar, el flotador se asemeja a un toroide (Figura 3.13). El volumen vendrá dado por:

$$V = 2 \cdot \pi^2 \cdot R \cdot r^2 \quad (3.10)$$

donde R es el radio del círculo mayor y, r el del menor.

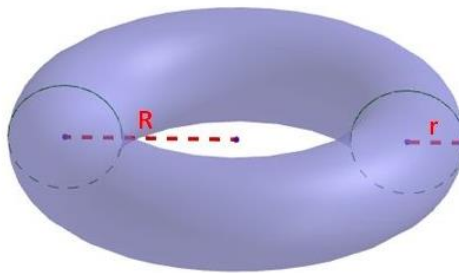


Figura 3.13. Radios del toroide

El volumen y el empuje de estos flotadores se reflejan en la Tabla 3.4.

Componente	Diámetro externo (mm)	Diámetro interno (mm)	Altura (cm)	Volumen (dm ³)	ρ_{H_2O} (kg/m ³)	1027.00
Flotador cilíndrico	75.00	12.00	4	0.1722	g (m/s ²)	9.80
					E (N)	1.7330

Componente	Radio del círculo mayor (cm)	Radio del círculo menor (cm)	Volumen (dm ³)	E (N)	1.1175
Flotador toroidal	2.50	1.50	0.1110		

Tabla 3.4. Volumen y empuje de cada tipo de flotador

En la estructura se han implementado 16 flotadores cilíndricos, agrupándose de 4 en 4 en cada una de las varillas roscadas que conectan la estructura metálica con el tubo de PVC para tener el empuje equilibrado. La fuerza ascendente equivalente es de 2,83 kg. Adicionalmente, se han dispuesto 3 flotadores toroidales en el tubo, fijados por medio de bridas, 2 de ellos se sitúan en el lado de la batería, puesto que tiene que aumentar la flotabilidad en ese lado y el restante en el lado contrario. La fuerza resultante a estos 3 flotadores es de 0,34 kg.

Ahora, ya podemos estimar con mayor precisión cuánta fuerza ejerce el submarino mientras se hunde. Esta fuerza es de 2,3 kg siendo mucho menor que los 5,47 kg iniciales, sin poner los flotadores. Asimismo, no se ha tenido en cuenta a efectos de cálculo, el volumen ocupado por las 2 carcasas ni por los cables que se encuentran por fuera del dron, que se encuentran en el lado de la batería.

3.6 Comparación de los cálculos teóricos con los medidos

Con esta configuración de los flotadores y los elementos en el dron, la distribución del peso en el mismo permite que el prototipo se sumerja de forma natural, dejándolo en estado de reposo en la superficie, sin que se produzcan cambios significativos en la orientación en cada eje del dron.

Posteriormente, con el fin de corroborar si los cálculos se han realizados correctamente, se ha verificado el peso en el agua, siendo éste de 1,74 kg que tienden a sumergir el prototipo. Por lo que se puede concluir que la estimación realizada ha posibilitado operar con el dron de forma adecuada y pese a existir una diferencia de aproximadamente 0,6 kg entre la masa real del prototipo y la estimada, en la que no se ha tenido en cuenta: la masa de la electrónica interior (cableado, sensores y microprocesadores), la masa asociada al contenido de las carcasas y la flotabilidad de las mismas, no se ha apreciado ningún cambio significativo a la hora de trabajar con el dron en el agua. Además, con el objetivo de intentar reducir este efecto, aunque no sea perjudicial en gran medida, se han utilizado los flotadores para equilibrar esa masa añadida por los elementos, no considerados a efectos de cálculo, de forma empírica.

El desglose de las masas de las partes del dron queda de la siguiente manera:

- Tubo PVC (electrónica, batería, motores, carcasas y cables). Masa tubo PVC = 8,6 kg.
- Estructura metálica (varillas roscadas, barras sólidas, abrazaderas, soporte inferior y perfiles). Masa estructura metálica = 7,1 kg.

Por tanto, el centro de gravedad del conjunto se encontrará por debajo del de flotación, pero estando más cerca del tubo de PVC que del plano inferior, donde se encuentran las barras de acero.

4 Fabricación y ensamblaje del prototipo

En este capítulo, se detallará el proceso llevado a cabo para fabricar el prototipo, deteniéndonos especialmente en aquellos aspectos más complejos o conflictivos. Como se ha mencionado en el Capítulo 2: Diseño estructural, contamos con 2 materiales que son fundamentales para el desarrollo del prototipo. La utilización de los mismos, así como, su ensamblaje se desarrollará a continuación.

Por otro lado, se tratarán aspectos de especial interés como la impermeabilización de la estructura para evitar la entrada de agua y la disposición tanto de la electrónica interior como del cordón umbilical.

Más tarde, se analizará la incorporación de un sistema que permita apoyar la estructura al suelo terrestre o marino y su posterior ensamblaje al prototipo.

4.1 Estructura de acero inoxidable

En primer lugar, se diseñó una estructura resistente para soportar el lugar donde iría la electrónica. Se buscaron los elementos de acero de calidad inoxidable AISI 316, para poder combatir la sal marina sin que produjera la oxidación de los componentes. Todas las barras sólidas, las varillas roscadas de las distintas métricas utilizadas, perfiles y planchas, se encontraron de calidad AISI 316. Sin embargo, las abrazaderas son de calidad AISI 304, soportando el óxido de manera notable, pero su resistencia con el tiempo no es tan alta como la de los elementos AISI 316.

Inicialmente, se hizo una prueba en una piscina de agua dulce con varillas roscadas de acero zincado y abrazaderas zincadas. Cuando habían transcurrido 2 días, los elementos se encontraban oxidados e inservibles, por lo que se procedió a comprar elementos más resistentes al óxido.

Posteriormente, se realizó la misma prueba con una duración de una semana con elementos de acero inoxidable calidad AISI 316 (varillas roscadas m10) y calidad AISI 304 (abrazaderas de 18 mm M10). El resultado fue idóneo ya que no se apreció que el acero experimentase un proceso de oxidación.

Al comprobar que los materiales de la estructura de acero eran los adecuados para llevar a cabo la construcción del prototipo se procedió a comenzarla.

A la hora de realizar los procesos de corte y soldadura que requerían el diseño hemos contado con la ayuda del SEGAI (Servicios Generales de Apoyo a la Investigación de la Universidad de la Laguna), en concreto, del Servicio de Mecánica.

Una vez que estaba montada la estructura, con las abrazaderas de menor tamaño formando un ángulo de 45° con la horizontal, se introdujo el tubo de 90 mm de diámetro externo en las abrazaderas de 90 mm. Al apretar los tornillos de las abrazaderas (Figura 4.1) el tubo quedó completamente fijado. Ello era necesario para comprobar si el proceso de corte de las varillas y la soldadura de las tuercas de las abrazaderas se había realizado correctamente, en caso contrario se debería repetir la operación.



Figura 4.1. Proceso de apriete de los tornillos de las abrazaderas

Para la nueva versión del prototipo se adquirieron abrazaderas de 110 mm para poder abrazar los nuevos segmentos de tubería de 110 mm.

4.2 Estructura de PVC

El siguiente paso fue construir la estructura de PVC y probar si cumplía los requerimientos de diseño, entre los que se encuentran: estanqueidad y presión.

4.2.1 Prototipo inicial

Debe decirse que en esta primera versión del prototipo se trabajó con tuberías de PVC (PN10) de 90 mm de diámetro exterior. Comenzamos con el corte de los 2 tubos en segmentos de 30 cm (Figura 4.2).



Figura 4.2. Medida del segmento de tubo de 30 cm

El siguiente paso fue aplicar un sustituto de junta (Nural 60 de Pattex) [26], compuesto por silicona y que permite dotar de una cierta elasticidad al tubo para que no queden grietas por las que pueda entrar las partículas de agua. Adicionalmente, se le aplicó un pegamento adhesivo especial para PVC rígido (PVC-U de Tangit) [27] con el objetivo de conseguir uniones resistentes y duraderas entre los elementos (Figura 4.3).



Figura 4.3. Aplicación de silicona en la izquierda y pegamento para PVC en la derecha

Antes de que se solidifique el producto debemos ejercer fuerza para unir los elementos (tapón y tubo) y aplicar los compuestos de nuevo, en la cara exterior de la unión (Figura 4.4).

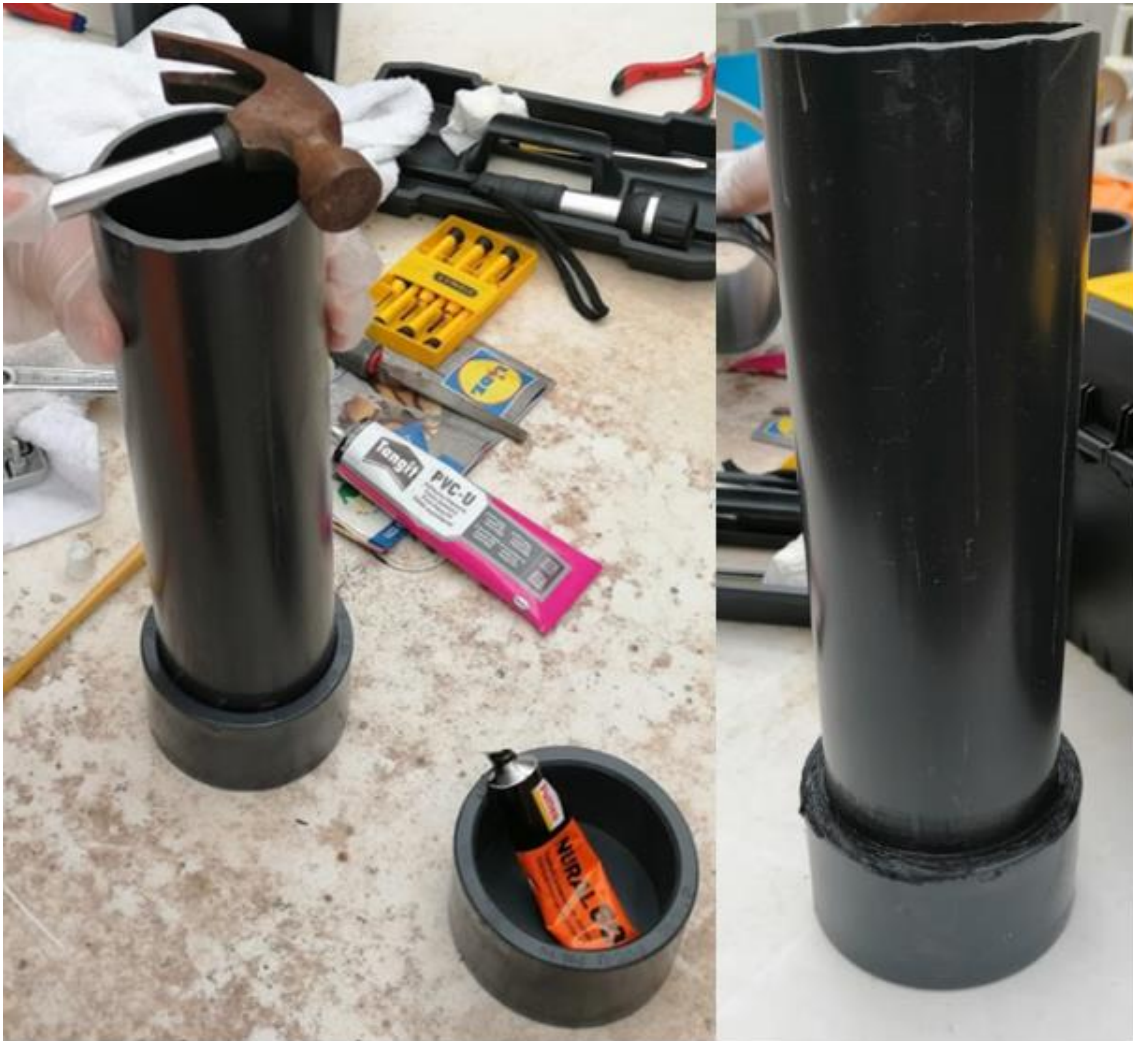


Figura 4.4. Unión de los elementos y aplicación de silicona y pegamento a la cara externa

Por otro lado, como el corte de los tubos siempre ocasiona imperfecciones en la superficie, tuvimos que pulir esta superficie mediante un disco de pulimento con una esmeriladora, para posteriormente repetir el proceso con esta zona del tubo y los acoples de la junta universal (Figura 4.5). En la Figura 4.4, la superficie equivalente que se encuentra ya encajada correspondía al inicio del tubo por lo que su homogeneidad era adecuada.

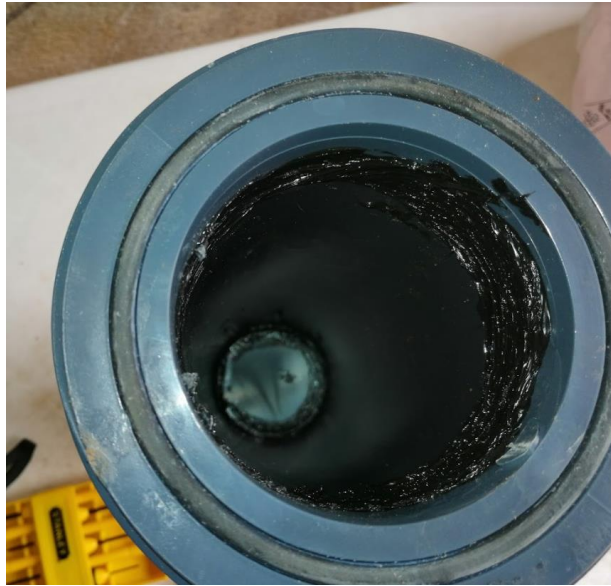


Figura 4.5. Aplicación de pegamento a la unión del tubo y el acople de la junta universal

Asimismo, en la imagen anterior se puede apreciar la junta tórica que impide el paso de agua desde el exterior hacia el interior y viceversa. En la Figura 4.6, se puede apreciar el acabado de la silicona una vez que se ha solidificado.



Figura 4.6. Silicona en estado sólido

Una vez que comprobamos que los productos se encontraban totalmente secos y sólidos (24 horas después de la aplicación), procedimos a roscar los elementos de la junta universal. De este modo, se terminó de ensamblar los tubos y los accesorios. Acto seguido, unimos dicha estructura con la de acero y lo introducimos en la piscina para simular agua a presión, disminuyendo el área del orificio de la manguera y lo dejamos sumergido varias horas (Figura 4.7). Abrimos el tubo y no había entrado agua, concluyendo que a presión atmosférica no le entraba agua.



Figura 4.7. Versión inicial del prototipo

4.2.2 Prototipo final

Debido a los problemas que surgieron tras trabajar con esta primera versión del dron, desarrollados en el Capítulo 2: Diseño estructural, surgió la necesidad de cambiar ciertos aspectos en el prototipo y con ello, construir una nueva estructura de PVC.

El procedimiento de unión de las piezas para ensamblar el prototipo inicial es similar al que se lleva a cabo en el nuevo diseño. En la nueva estructura de PVC se incluyen un tapón roscado y un manguito roscado sustituyen a la tapa del modelo anterior. Además, con el objetivo de poder trabajar más cómodamente en el interior y contar con más espacio para la disposición interna de la electrónica, se ha adquirido una tubería PVC (PN10) de 110 mm (4 pulgadas) de diámetro externo.

La composición de esta nueva tubería de PVC es distinta a la de la versión previa. Debido a ello, la adhesión del pegamento sobre la superficie resultaba más costosa, por lo que se procedió a rebajar el material en un ángulo de 45° (Figura 4.8), a través de un disco de pulimento de la esmeriladora, de las zonas de contacto de los acoples de PVC y de los manguitos roscados para tener una mayor zona de contacto y facilitar la adhesión a la tubería.



Figura 4.8. Rebajado del material

4.3 Impermeabilización de la estructura

Posteriormente, llega el punto clave de la estructura de PVC. El hecho de tener que pasar cables desde fuera hacia dentro y viceversa, es una tarea crítica, pues compromete la estanqueidad del conjunto, haciendo que sea más fácil que entre agua al haber más superficie no homogénea.

La opción más segura y eficaz para pasar los cables fue taladrar los tapones roscados e insertar en dichos huecos penetradores de dos medidas (M10 para el paso de hasta 6 mm y 8 mm, acabados en rojo o en negro, respectivamente) de aluminio anodizado (Figura 4.9), compuestos por una tuerca roscada hueca, ésta tiene una junta tórica que se encontraría en contacto con la superficie externa del tapón y por otro lado, desde la cara interna se aprieta una rosca para provocar que la junta tórica esté en contacto con el tapón y no deje pasar agua por el exterior de la tuerca. Asimismo, para impedir el paso del agua por el interior del penetrador, se adquirió un preparado de resina Epoxi (Figura 4.9). Se debe extraer la cantidad que queramos del preparado que tiene en la etiqueta Poximel 150B y el doble del preparado con etiqueta Poximel 150A.



Figura 4.9. Penetrador M10 para el paso de 6 mm a la izquierda y resina Epoxi a la derecha

Luego, removemos durante varios minutos y podemos aplicar la resina en el interior del penetrador una vez que hemos pasado el cable o conjunto de cables. En la Figura 4.10 podemos observar una vista de sección del penetrador.

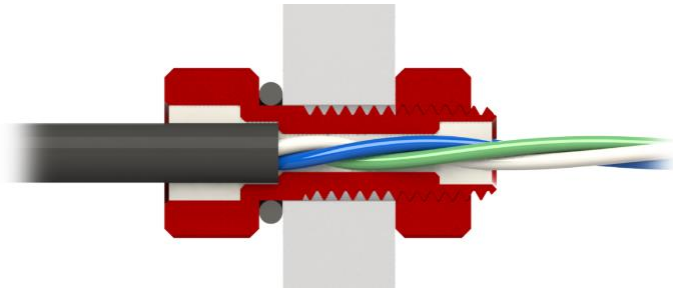


Figura 4.10. Resina Epoxi en el interior de la tuerca hueca (penetrador)

Acto seguido, debemos colocar los penetradores perpendicularmente al eje horizontal para que no gotee la resina y, a su vez, tirar del cable por debajo de la superficie para que no descienda la resina por el interior del penetrador y no consigamos pegar el cable.

Esta operación la realizamos con los 4 motores (Figura 4.11), quitando el teflón que recubre los 3 cables de cada motor y el resto de cables de entrada al submarino, así como, la sonda de temperatura.



Figura 4.11. Penetradores con el cable de los motores

Paralelamente, se ha seguido este procedimiento para sellar los agujeros de las carcasas de la cámara (Figura 4.12). Inicialmente, habíamos quitado los resortes y el pulsador de las carcasas de la cámara para aprovechar el paso de los cables, ya que si consiguiésemos sellar dichos agujeros, ya tendríamos una carcasa estanca, pues la especificación de diseño de la misma autoriza su uso a 30 metros debajo del agua.

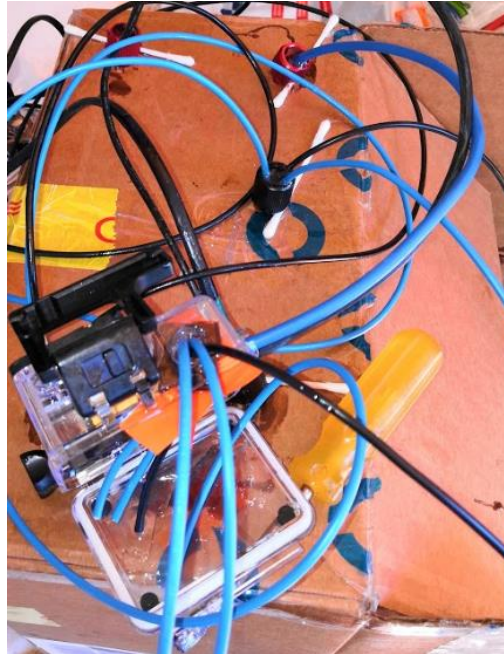


Figura 4.12. Resina Epoxi aplicada en los orificios de la cámara y en penetradores

Este procedimiento lleva consigo mucho tiempo, ya que la carcasa tiene orificios en los 3 ejes y es difícil lograr que la resina Epoxi no descienda. Asimismo, la resina tarda 24 horas en solidificarse lo que repercute en un mayor tiempo para finalizar el sellado de las carcasas.

Asimismo, se ha alisado la superficie de los orificios taladrados con la ayuda de una escofina para que el penetrador encaje y quede en contacto con la superficie lisa (Figura 4.13).



Figura 4.13. Alisado de la superficie taladrada

Por otro lado, en la Figura 4.13 se puede apreciar un orificio de mayor tamaño que el resto. Se trata de la soldadura en frío (adhesión PVC-U) de un terminal hembra roscado de PVC a la tapa de PVC en cuyo interior se enrosca un acople roscado de latón que, a su vez, enrosca con la rosca del sensor de presión.



Figura 4.14. Cables pasados a través de los penetradores y sensor de presión

Como se puede ver en la Figura 4.14, se pintó una capa de vinilo líquido para cubrir toda la estructura de PVC y así mejorar la impermeabilización del conjunto. El proceso consistió en proteger una cierta superficie de los penetradores (unir la tapa con el penetrador con la ayuda del vinilo) y aquellos elementos que no tenían como objetivo ser pintados como las roscas internas (Figura 4.15) y proceder a pintar el resto de elementos (Figura 4.16). Sin embargo, con el paso del tiempo y con el roce de los elementos se ha ido despegando el vinilo salvo en las tapas. De todas formas, se aplicó un bote para las 4 piezas, si se aplicasen más capas durarían más tiempo.



Figura 4.15. Protección de los elementos que no se van a pintar



Figura 4.16. Proceso de vinilado del PVC

Por último, se adquirieron cintas vulcanizantes o autofundentes Fix It de Tangit [28], estas cintas se pueden aplicar en superficies húmedas y soportan una presión de 4 bares (Figura 4.17), hecho positivo, ya que cumple con nuestros requisitos. Su modo de uso se basa en estirar la cinta mientras se rodea la parte del tubo deseada y cuando terminemos de usarla, rodear la última capa con otra cinta para evitar que se arrugue la última capa de la cinta vulcanizante. Además, a los 5 minutos se puede utilizar, pero es a las 24 horas cuando se solidifica o funde completamente y crea una capa sólida que se adhiere al PVC como si se tratara de una costra. Se colocó una cinta en la unión del manguito roscado y la tubería en cada lado y, en la unión del tubo con los acoples de la junta universal. Más tarde, si el producto no entra en contacto con el agua en pocos días tras su aplicación comienza a tensarse hasta que se fisura.



Figura 4.17. Cinta vulcanizante de Tangit

4.4 Implementación de cordón umbilical y soporte para su transporte y recogida

El cable Ethernet constituye el cordón umbilical que comunica el prototipo con el ordenador en tierra y se introdujo al tubo por medio de un pasador. Para ello, tuvimos que cortar el cable y

posteriormente, crimparlo para poder conectarlo a la Raspberry. Asimismo, la longitud del cable era inicialmente de 100 metros, lo que suponía un impedimento para la correcta calidad de la comunicación. Por ello, se fue reduciendo dicha distancia hasta que la transmisión y recepción de la señal era satisfactoria, siendo necesario el proceso de crimpado del extremo que se había cortado en cada caso.

El hecho de no tener un soporte para ordenar y poder llevar el cable sin que se enredara, nos llevó a utilizar dos bobinas vacías de filamento de impresión 3D para enrollar el cable (Figura 4.18).

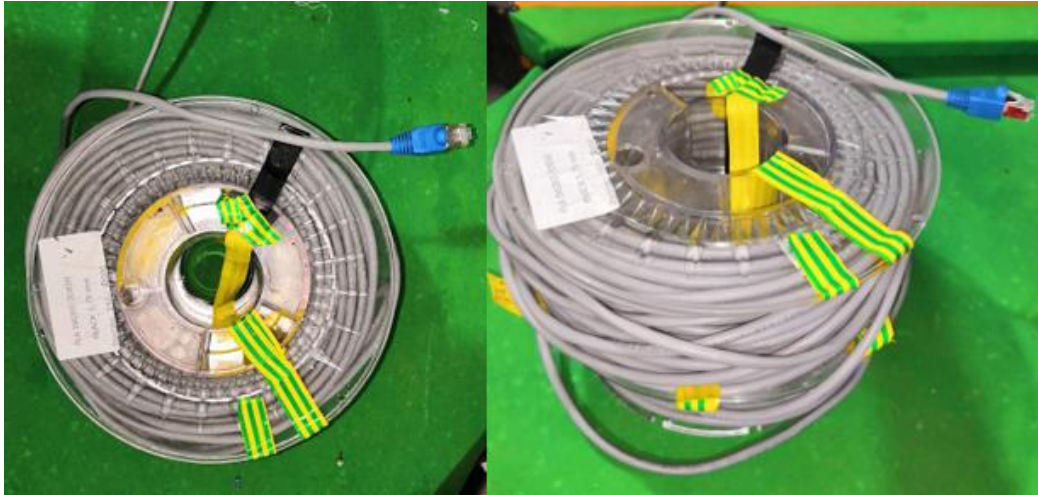


Figura 4.18. Bobinado de Ethernet mediante 2 bobinas

Sin embargo, esta solución no era del todo práctica, ya que al contar con 2 bobinas para enrollar el cable, se hacía difícil ir soltando cable con una, pues la otra tenía el extremo que entraba al dron y tendía a soltarse. Paralelamente, para el transporte se debía utilizar cinta para que el cable no se saliese, así como, evitar que se separasen las bobinas.

Este conjunto de problemas nos llevó a diseñar un soporte mediante impresión 3D (Figura 4.19), que contase con un sólo elemento para enrollar el cable y que tuviera un hueco para poder sacar el extremo que se conecta al ordenador. Además, debía ser resistente y ligero, pesando menos de medio kilogramo.

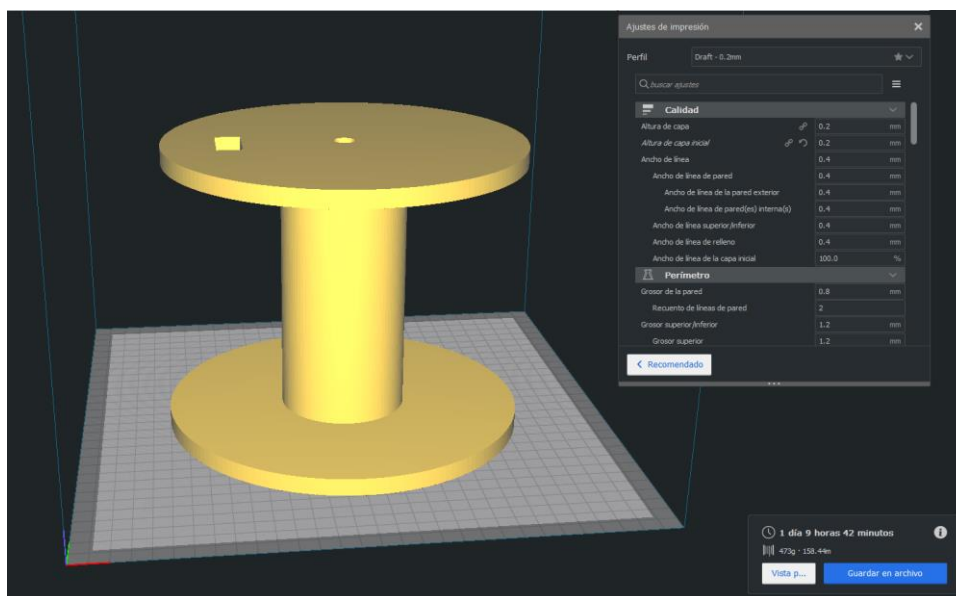


Figura 4.19. Laminado del recogedor con Cura

Una vez que imprimimos la pieza en PLA, comenzamos a enrollar el cable (Figura 4.20) y al concluir probamos a soltar y recoger cable, siendo mucho más cómodo que con el método previo. Adicionalmente, se añadió un hueco circular en el centro del recogedor para poder pasar una varilla roscada M10 y que así girase mientras la varilla lo sujetaba.

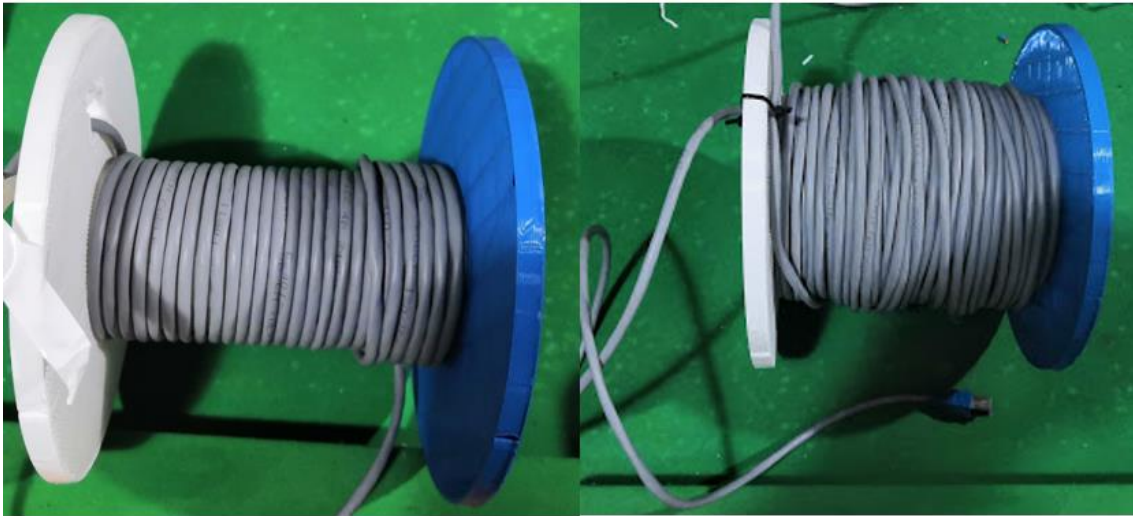


Figura 4.20. Proceso de enrollado de cable en el recogedor

4.5 Disposición de elementos internos y externos a la estructura

Cuando terminamos la tarea de asegurar la estanqueidad del conjunto, colocamos los elementos externos de acuerdo a la distribución de pesos más favorable. En este punto, se colocaron las carcasas de cámara y se llevó a cabo el trazado que debían seguir los cables.

Inicialmente se fijaron la carcasa que contiene la cámara y la carcasa que tiene el interruptor y los terminales que llegan a la batería, en las varillas roscadas M10 que unen las barras macizas M18. El cableado que llegaba a ambas carcasas salía del tapón roscado delantero, por lo que ambas carcasas estarían próximas. Sin embargo, las turbulencias generadas por los motores impedían que se viese correctamente la imagen, pues se apreciaba una gran cantidad de burbujas.

Por este motivo, se dejó en el mismo sitio la carcasa que contiene el interruptor, ya que necesitamos que sea accesible y se colocó la carcasa con la cámara en la parte superior del manguito roscado mediante un accesorio que tiene una cara con pegamento (Figura 4.21), además, se rodeó con una brida para asegurar su fijación. De este modo, los motores se encontraban lo suficientemente alejados como para afectar significativamente a la visión de la cámara.



Figura 4.21. Cámara situada sobre el tubo

Posteriormente, se introdujeron varios cables en tubos corrugados (Figura 4.22) para evitar que se muevan y se mezclen al operar en el agua. Además de servir de revestimiento en caso de que sufran un golpe.



Figura 4.22. Tubos corrugados para agrupar cables

Acto seguido, se soldaron los terminales que llegan desde la batería para posibilitar la carga desde fuera del tubo sin tener que sacar forzosamente la batería. También se soldó el interruptor de corte de alimentación a la Raspberry y los cables de la otra carcasa, entre los que se incluyen el cable USB y los cables de la bombilla. Al terminar la soldadura, se aplicó silicona para evitar que se produjese un mal contacto entre los terminales (Figura 4.23).

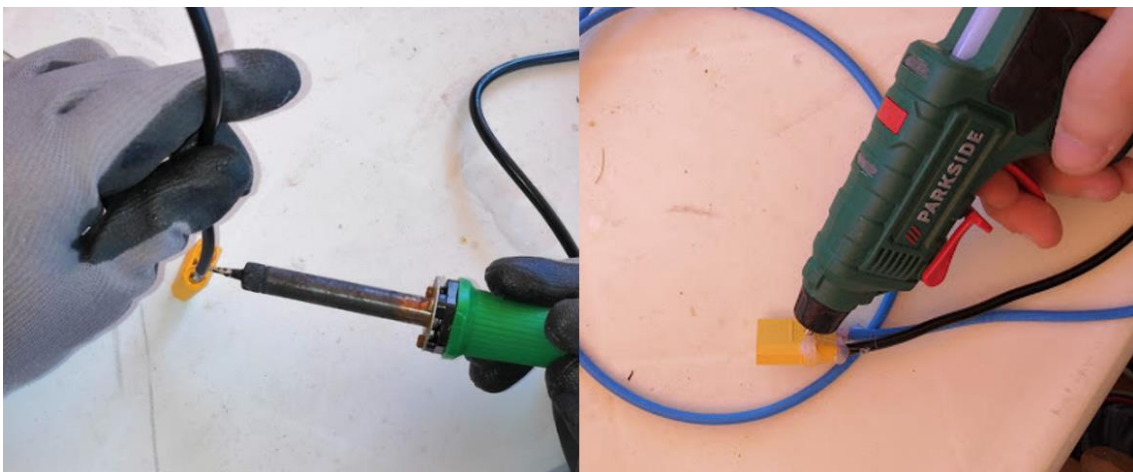


Figura 4.23. Soldadura de terminales y recubrimiento con silicona

Asimismo, se unieron el resto de cables dentro del tubo, en algunos casos, por medio de regletas para evitar la soldadura en sitios conflictivos y se situó la electrónica en las bandejas porta-

electrónica para facilitar el desplazamiento dentro del tubo y después se fijaron mediante un tornillo. En las imágenes siguientes podemos ver la disposición de la batería en la bandeja y el paso de los cables de los 2 motores que salen por la tapa de la batería por encima de la batería y, del sensor de presión (en naranja) y el cable Ethernet (Figura 4.24). El espacio sin ocupar de la imagen de la izquierda corresponde a la PCB, no obstante, se ha quitado para ver mejor el soporte y la bandeja, así como, el hueco para el tornillo de sujeción.

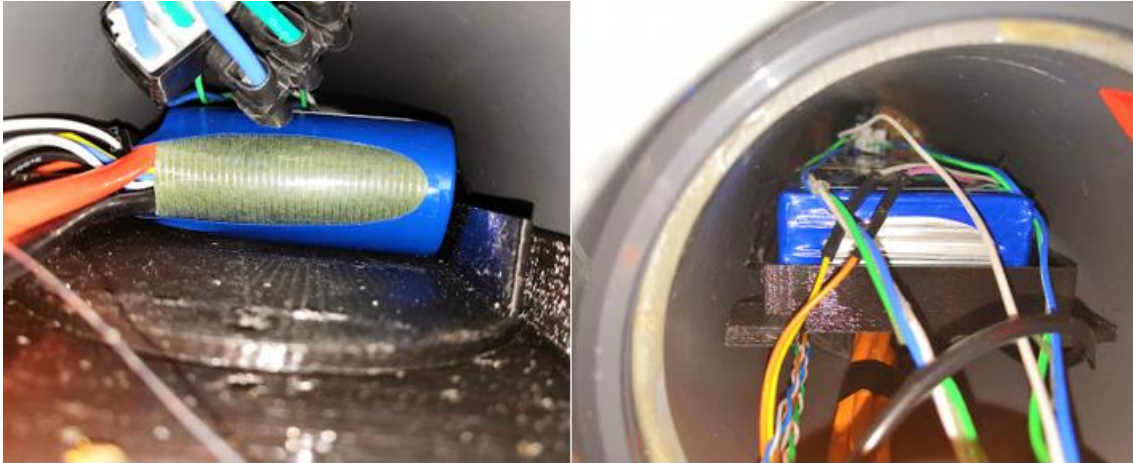


Figura 4.24. Vista delantera y trasera de la bandeja de la batería dentro del tubo

Por otro lado, en el otro segmento de tubo empleamos el mismo sistema salvo que con soportes para que los microcontroladores queden fijos (Figura 4.25). Tras comprobar que todo estaba bien conectado se procedió a fijar los pines a los lugares donde iban al igual que con los cables que alimentan los microprocesadores.

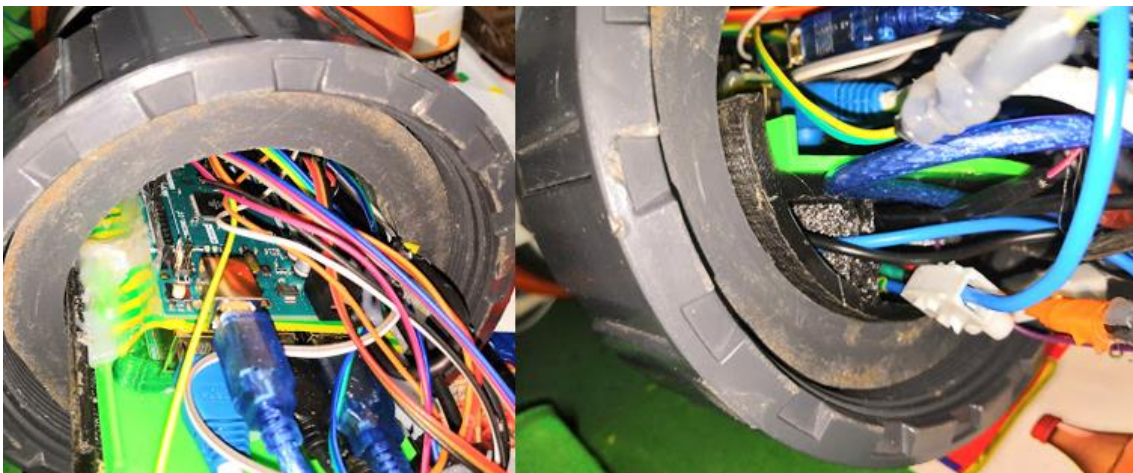


Figura 4.25. Bandeja con microprocesadores

En la Figura 4.25, en la zona de la derecha se pueden apreciar los huecos por donde pasan los cables por debajo de la bandeja. Disponemos de 3 canales para pasar cables y así tenerlos organizados en ambas bandejas. Además, tienen una porción de pieza que impiden que estén en contacto con el suelo para evitar que entren en contacto con agua si en algún momento le entrase. Ello se debe a que si entrase agua, los sensores de presencia de agua ubicados uno en el centro y otro en cada tapón lateral, serían los primeros en entrar en contacto con el agua y por tanto, detectarían la presencia de la misma al encontrarse acostados en el plano horizontal.

Más tarde, esos agujeros o canales permiten ser sujetados por un alicate, siendo este hecho vital para poder cerrar el prototipo. Cuando queremos cerrar el prototipo por el centro no existe ningún problema ya que los tubos permanecen quietos y el elemento central de la junta universal es el

único que gira. Sin embargo, si queremos roscar los tapones en los manguitos debemos utilizar teflón para impedir el paso de agua (en el caso de la junta universal disponemos de una junta tórica) y girar la estructura de soporte de las bandejas a medida que roscamos los tapones (Figura 4.26).



Figura 4.26. Teflón en la rosca del tapón

Además, se han dispuesto los penetradores de los motores en los extremos de los tapones, para que al terminar de roscar quede cada uno en el lado en el que se encuentra su motor, en cada una de las tapas.

4.6 Elementos de apoyo de la estructura

Uno de los problemas que había surgido en el primer prototipo (Figura 4.27) era la inexistencia de un sistema que soportase el peso de la estructura y así no tener que utilizar elementos externos para sujetarlo en el suelo.



Figura 4.27. Prototipo inicial sin apoyos

Por tanto, en el segundo prototipo se diseñó un sistema de apoyo de la estructura mediante una plancha de acero inoxidable que irá soldada a una tuerca M8 que, a su vez, se roscará en una varilla roscada M8 en el extremo inferior de la misma. La parte superior de la varilla irá conectada a una abrazadera M8 que se fija a la barra maciza M18. Gracias a esta mejora, el prototipo final cuenta con 4 apoyos, uno en cada extremo de la estructura metálica (Figura 4.28 y Figura 4.29).



Figura 4.28. Prototipo final con apoyos

Por último, se incluye una captura del dron en el mar, en la que se puede ver la disposición de los flotadores empleados y los soportes de la estructura (desde otra perspectiva a la imagen previa).



Figura 4.29. Prototipo final en el mar

5 Pruebas de estanqueidad

Al terminar de ensamblar la estructura inicial de PVC y a medida que se han introducido otros elementos que comprometían la estanqueidad de la tubería, ha sido necesario llevar a cabo una serie de pruebas para impedir la entrada de agua al interior del dron.

El procedimiento llevado a cabo para asegurarnos de tener un prototipo totalmente estanco radica en una prueba inicial en una piscina de agua dulce a presión atmosférica. Una vez que el prototipo supera esta prueba podemos simular la operación a 20 metros de profundidad mediante un tanque de presión a 2 atmósferas.

Al finalizar satisfactoriamente la prueba de presión se procede a realizar las pruebas pertinentes en el mar y más tarde, analizar el estado de los elementos una vez que ha terminado la prueba en el mar.

5.1 Prueba en piscina de agua dulce

La primera prueba que se llevó a cabo de forma repetitiva, para las distintas configuraciones de la estructura de PVC, fue introducirla en una piscina de agua dulce y comprobar si le había entrado agua (Figura 5.1).



Figura 5.1. Primera versión del prototipo en la piscina de agua dulce

La altura de la piscina era de 55 cm, lo que limitaba trabajar en un entorno con mayor profundidad, pero cumplía el propósito de cubrir por completo el volumen del dron. En la piscina se realizaron pruebas de corta duración, es decir, hasta 2 horas y de larga duración 24 - 48 horas. La metodología a seguir para conocer si le entraba agua al dron fue introducir servilletas dentro del tubo y en las zonas en las que se había unido los accesorios con el tubo, para poder conocer por dónde entraba agua.

En la Figura 5.2 se puede apreciar las servilletas y la cinta que las fija para poder conocer con exactitud dónde se produce la fuga de aire y por consiguiente, la entrada de agua.



Figura 5.2. Sistema de comprobación de entrada de agua

Acto seguido, se probó la estanqueidad de todo el conjunto del prototipo final en la piscina (Figura 5.3). En este punto, se habían introducido los penetradores y las carcasas.



Figura 5.3. Prototipo final en la piscina

5.2 Pruebas de presión repetitivas

Las pruebas en la piscina eran un punto de partida para asegurar la estanqueidad a presión atmosférica, al estar sumergido unos pocos centímetros, del dron. Sin embargo, era necesario poder simular de alguna manera las condiciones reales de operación del submarino antes de meterlo en el mar.

Para verificar que el prototipo era estanco a 20 metros de profundidad, se introdujo en un tanque de presión a 2 atmósferas (Figura 5.4). Las pruebas se realizaban en intervalos de 10 y 15 minutos, para conocer si entraba agua y en tal caso conocer qué cantidad. Asimismo, se utilizó el método de introducir servilletas para conocer el lugar de entrada del agua. Se introdujo únicamente el tubo, pues no tenía sentido introducir la estructura metálica para realizar dicha prueba de presión.



Figura 5.4. Tanque de presión a la izquierda y manómetro a 2 bares a la derecha

A continuación, podemos ver la estructura de PVC sumergida en el interior del tanque (Figura 5.5).



Figura 5.5. Estructura de PVC sumergida

Al terminar las distintas pruebas con los dos prototipos, comprobamos que no entraba agua en la estructura de PVC ni en las carcasas, pero se apreciaban ciertas gotas de agua debido a la condensación del agua presente en el aire del tubo, al someterlo a una presión de 2 bares.

5.3 Prueba en mar

Una vez que habíamos pasado la prueba crítica de presión, introducimos el dron en agua salada para ver si seguía siendo estanco (Figura 5.6). En este caso contábamos con la información proporcionada por los sensores de presencia de agua ubicados en el interior. Además, no sabíamos cómo se iba a comportar al operar en un entorno con agua salada.

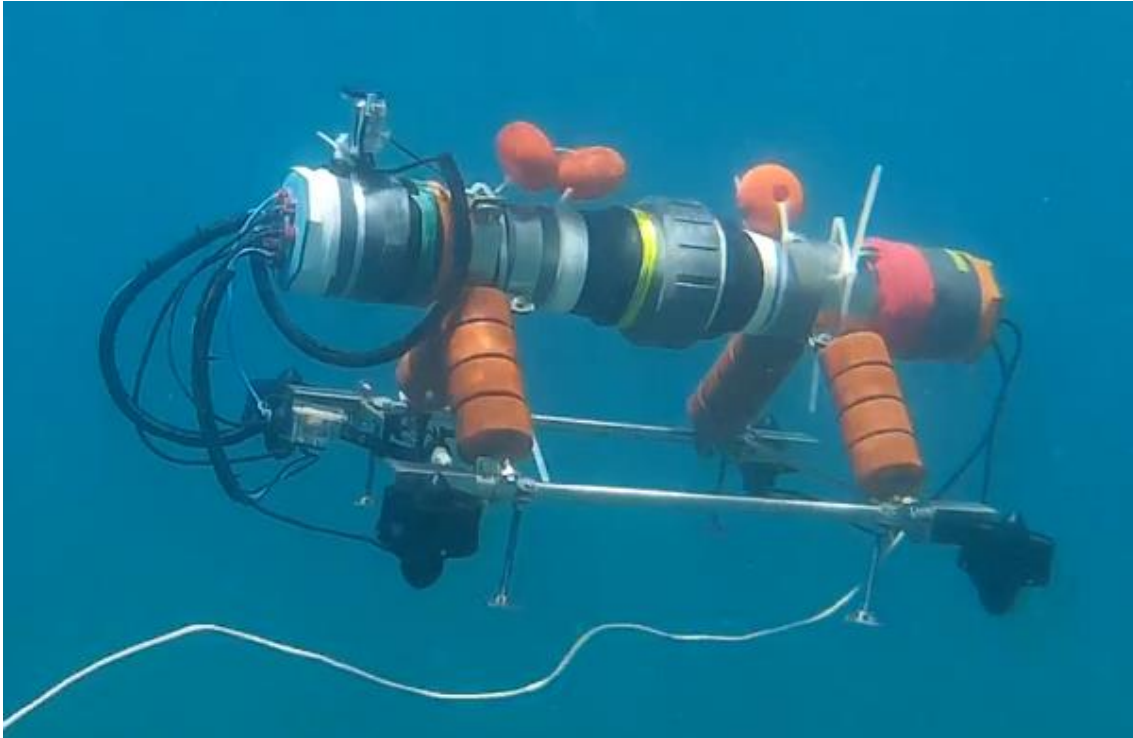


Figura 5.6. Prototipo sumergido en el mar

Tras realizar numerosas pruebas en el mar durante varias semanas, en las que el submarino llegó a sumergirse hasta 4 metros, no se llegó a producir ningún conflicto con el agua. De hecho, se produjeron escasos avisos de los sensores de presencia de agua y tras abrir el submarino se vio que se trataba de la condensación del agua presente en el aire. Por tanto, las pruebas de estanqueidad finalizaron asegurando que no le entra agua al dron en el entorno de operación en el que se realizaron las pruebas.

5.4 Análisis del estado de los materiales

Cada vez que se termina de operar con el dron, se recomienda encarecidamente aplicarle agua dulce y secarlo para que no quede humedad ni sal que pueda oxidar las partes expuestas. En el transcurso de las distintas pruebas llevadas a cabo tanto en piscina como en el tanque de presión y en el agua salada, el estado que presentan los materiales es excelente. No se aprecian síntomas de óxido en la estructura metálica ni desperfectos en el resto del prototipo. Asimismo, la resina Epoxi empleada ha conseguido evitar que pase el agua por los penetradores y por los orificios de la carcasa.

6 Control de movimiento

Para poder realizar operaciones con el dron en el mar necesitamos contar con un sistema que posibilite el movimiento del prototipo. Ello se consigue mediante propulsores y un sistema de control de los mismos, tratándose de variadores de velocidad (ESC), estos elementos se analizarán en profundidad en este capítulo.

También se especificará tanto el hardware como el software utilizado para conseguir el objetivo de movimiento, encontrándonos con el microcontrolador ArduPilot APM 2.5 [29] que es de gran utilidad para poder llevar a cabo esta tarea.

Asimismo, se expondrá la disposición de los motores en la estructura para que el movimiento sea conveniente y su utilización en el mar no afecte al sistema de visión.

6.1 Hardware y software específicos empleados

Con el objetivo de desplazarnos en el agua necesitamos elementos hardware que, a su vez, estén controlados o monitorizados por sistemas software. Durante el transcurso del proyecto se probaron distintas alternativas y se escogió la que mejor resultados ofrecía.

6.1.1 ArduCopter/ArduPilot e IMU

En primer lugar, se trabajó con un ArduCopter APM 2.8 (ArduPilot Mega), se trata de una placa clon basada en Arduino Mega, conteniendo el mismo hardware, pero adicionalmente, incluye sensores dedicados específicamente para misiones o recorridos con UAV (vehículos aéreos no tripulados). Entre ellos encontramos una IMU (Inertial Measurement Unit) de 6 grados de libertad “MPU-6000”, es decir, un chip que contiene un acelerómetro (medición de la aceleración lineal en los 3 ejes) y un giróscopo (medición de los giros realizados en los 3 ejes) para darnos la información de la orientación del chip (Figura 6.1). En este caso no incorpora un magnetómetro, por lo que no tendremos la información de la ubicación con respecto al campo magnético de la tierra. No obstante, no es necesario para nuestra aplicación. Además, tampoco dispone de un sensor de presión atmosférica o barómetro, en este caso, ya se ha implementado un barómetro para conocer dicha información.



Figura 6.1. MPU-6000

El ArduCopter (Figura 6.2) constituye un piloto automático capaz de llevar a cabo una estabilización autónoma, una navegación basada en puntos de referencia o balizas, apoyándose en la telemetría de un conjunto de sensores como pueden ser barómetros y módulos GPS entre

otros. El software que tiene se encuentra en continuo desarrollo por la comunidad de DIY (*Do It Yourself*) Drones lo que facilita su implementación si se sigue la documentación técnica y se emplean los sensores que están pensados para ser configurados y controlados por el software. Asimismo, el software desarrollado es muy complejo y trabajar con él requiere mucho tiempo.

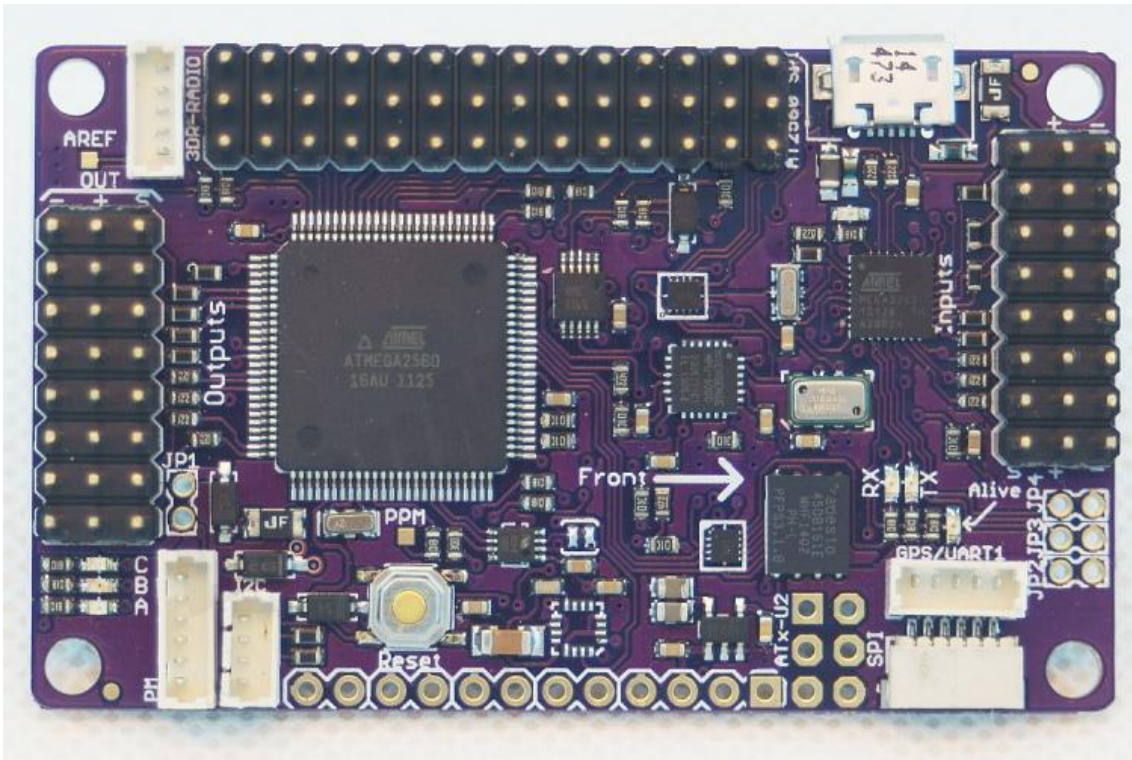


Figura 6.2. Vista de la cara TOP del ArduCopter APM 2.8

Este microcontrolador incorpora múltiples pines tanto analógicos como digitales de entrada y salida. Con los pines de salida podemos enviar los comandos para que el motor se mueva de acuerdo al valor enviado. Posteriormente, cuenta con dos buses de comunicaciones:

- SPI (Serial Peripheral Interface), bus serial síncrono que utiliza tres líneas para transmitir (SDO), recibir (SDI) y para generar la señal de reloj (SCK), ésta es generada por el que actúa como maestro. Luego, la tierra de los dispositivos debe ser la misma y utiliza el modelo maestro-esclavo en el que la comunicación es bidireccional Full-Duplex. Este bus será el utilizado para leer los datos de la IMU interna del APM 2.8.
- I2C (Inter-Integrated Circuit), bus serial síncrono que utiliza sólo dos líneas para transmitir los datos (SDA) y la señal de reloj (SCL). Además, necesitan resistencia pull-up, pues los dispositivos sólo pueden obligar al bus a ponerse al valor lógico '0' y por último, se trata de un modelo maestro-esclavo en el que la comunicación es bidireccional Half-Duplex.

Paralelamente, con el fin de proteger el microcontrolador ante el polvo, éste se encuentra protegido mediante una carcasa (Figura 6.3).

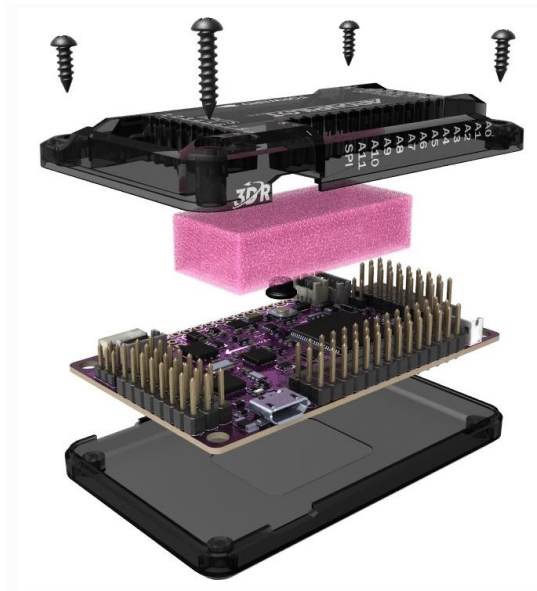


Figura 6.3. Vista de las capas del ArduCopter APM 2.8

El ArduCopter presentaba un problema a la hora de enviar los pulsos de señal a los variadores de velocidad (ESC) que se encuentran antes de los motores, los ESC no llegaban a transmitirle la información a los motores. Por ello, se inspeccionó el Pinout Schematic de este dispositivo (Figura 6.4) para compararlo con el ArduPilot APM 2.5 original (Figura 6.5). La diferencia que se encontró fue la presencia de resistencias de 220 Ω en las salidas PWM (modulación de ancho de pulso) del ArduCopter. En el caso del ArduPilot no aparecían dichas resistencias, sino que los pines de salida de PWM iban conectados directamente de la alimentación al pin correspondiente.

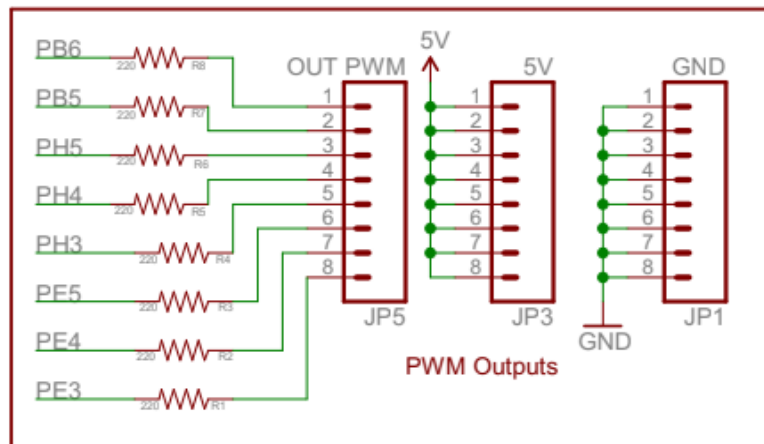


Figura 6.4. APM 2.8 Schematic

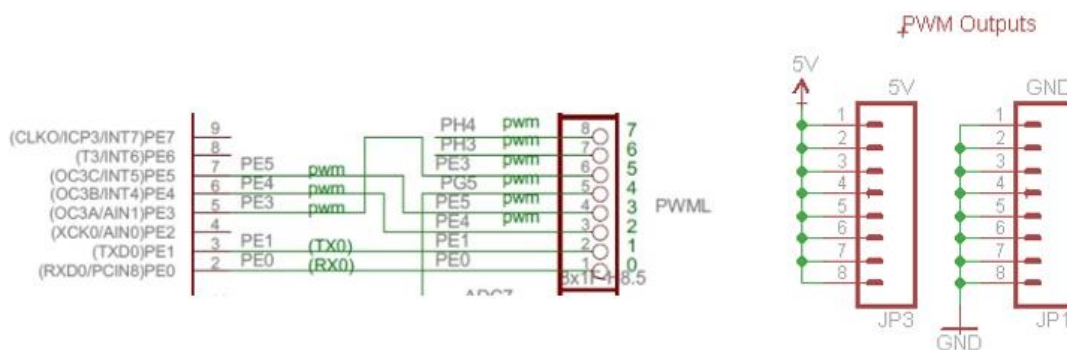


Figura 6.5. APM 2.5 Schematic

Por tanto, decidimos enviar dicha señal desde cada uno de los dos microcontroladores y ver la forma de la onda que se obtenía mediante un osciloscopio. En el caso del ArduPilot, el resultado fue un pulso cuadrado perfecto de 5V de amplitud. Sin embargo, el pulso generado por el ArduCopter se situaba en torno a 4,9 V y presentaba un cierto ruido en la parte positiva del pulso (Figura 6.6). Además, el ancho del pulso era ligeramente menor. Por tanto, dejamos de trabajar con el ArduCopter y durante varios meses el ArduPilot ha funcionado correctamente, enviándole la señal correcta al ESC.

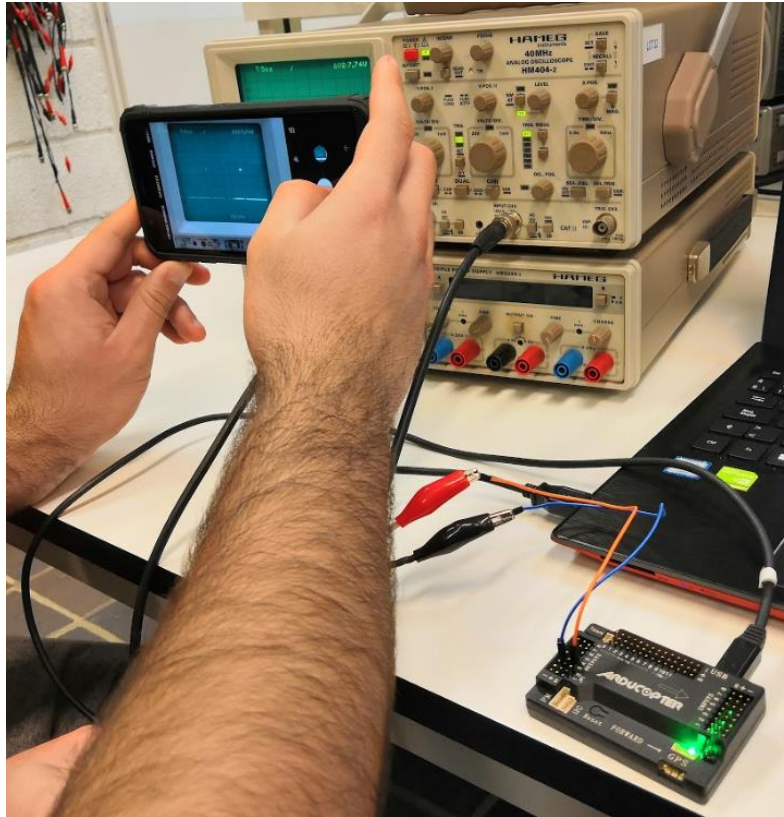


Figura 6.6. Verificación de la tensión del pulso dado por un pin PWM de salida

6.1.2 Arduino IDE

El software empleado para programar los microcontroladores ha sido el Arduino IDE, en el que únicamente teníamos que cambiar la placa a: “Arduino/Genuino Mega or Mega 2560”; y el procesador a: “ATmega2560 (Mega 2560)”. Este entorno de desarrollo integrado (IDE), ha sido empaquetado como un programa de aplicación, consistiendo en un editor de código, un compilador, un depurador y, por último, un (GUI) constructor de interfaz gráfica.

En este entorno se pueden utilizar uno o varios lenguajes de programación (C, C++ y Java). Asimismo, incluye las herramientas para cargar el programa compilado en la memoria flash del hardware. También dispone de un monitor serial para enviar y recibir mensajes tipo string y de serial plotter que permite realizar la gráfica de los datos enviados por serial (USB).

6.1.3 Mission Planner y calibración de la IMU

Más tarde, con la intención de explorar el uso del software desarrollado de los quadcopters, se ha utilizado el Mission Planner. Se trata de un software de control de tierra (CGS) diseñado para los controladores APM. Se trata de la monitorización de sistemas de piloto automático open source y open hardware, en el que el programa te permite actualizar continuamente la versión del firmware según las actualizaciones disponibles, para obtener lecturas de telemetría en tiempo real. Asimismo, permite configurar y sintonizar los parámetros del sistema de piloto automático. Cabe destacar su mayor virtud, este software posibilita programar misiones mediante coordenadas o balizas que le asignemos, pudiendo interactuar sobre el dispositivo de control en cualquier momento.

Esta herramienta ha sido muy útil para poder calibrar el sistema de referencia de la IMU MPU-6000 que incluye el ArduPilot y el ArduCopter, ya que las medidas vienen con cierto offset de fábrica. Este procedimiento consiste en la calibración del acelerómetro y del giróscopo. Inicialmente, para llevar a cabo la calibración del acelerómetro clicamos en *Calibrate Accel* (Figura 6.7) y nos pide que situemos el controlador con los pines hacia arriba y la flecha de “FORWARD” a la derecha (Figura 6.8). Una vez que verifiquemos que se encuentra en dicha posición iremos (Figura 6.9) moviendo el controlador según el mensaje que se notifique en el Mission Planner.

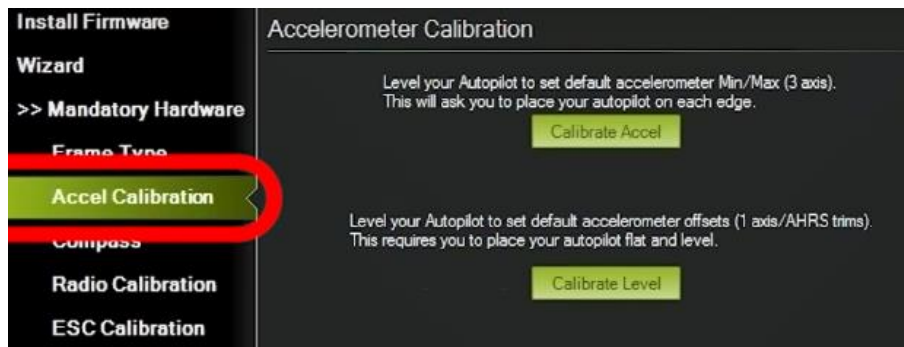


Figura 6.7. Inicio de la calibración del acelerómetro

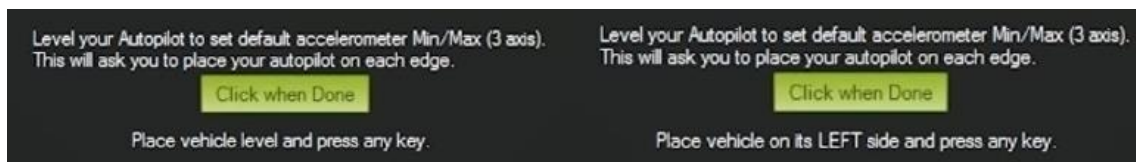


Figura 6.8. Posición inicial y posición siguiente

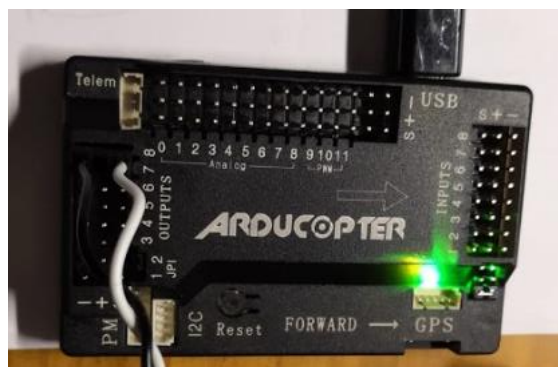


Figura 6.9. Posición inicial del controlador

Una vez que terminamos de colocar el controlador en todas las posiciones, queda concluida la calibración del acelerómetro (Figura 6.10).

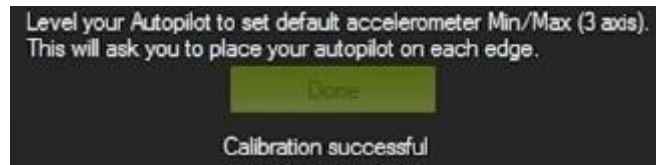


Figura 6.10. Calibración del acelerómetro completada

Por tanto, ahora es el turno de la calibración del giróscopo en tiempo real mediante la opción *Live Calibration* (Figura 6.11). Se nos muestra un mensaje en el que se nos indica que giremos el controlador en los 3 ejes repetidas veces. Cuantos más giros se produzcan mejor será la estimación de la referencia de los ejes y con ello, de la calibración del giróscopo (Figura 6.12).

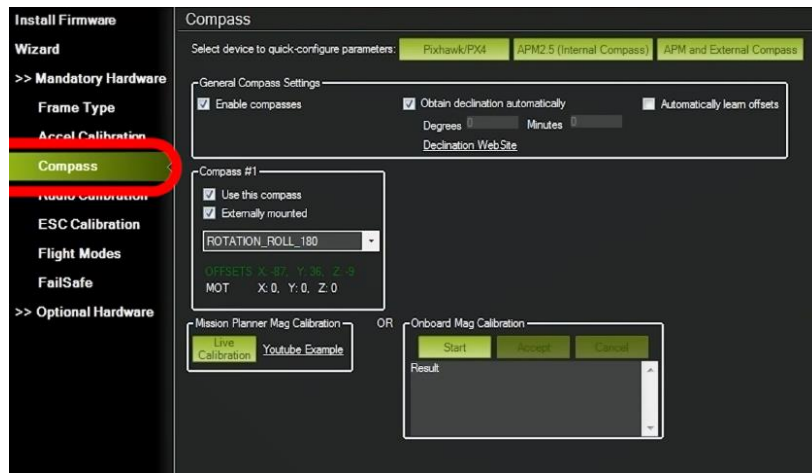


Figura 6.11. Inicio de la calibración del giróscopo

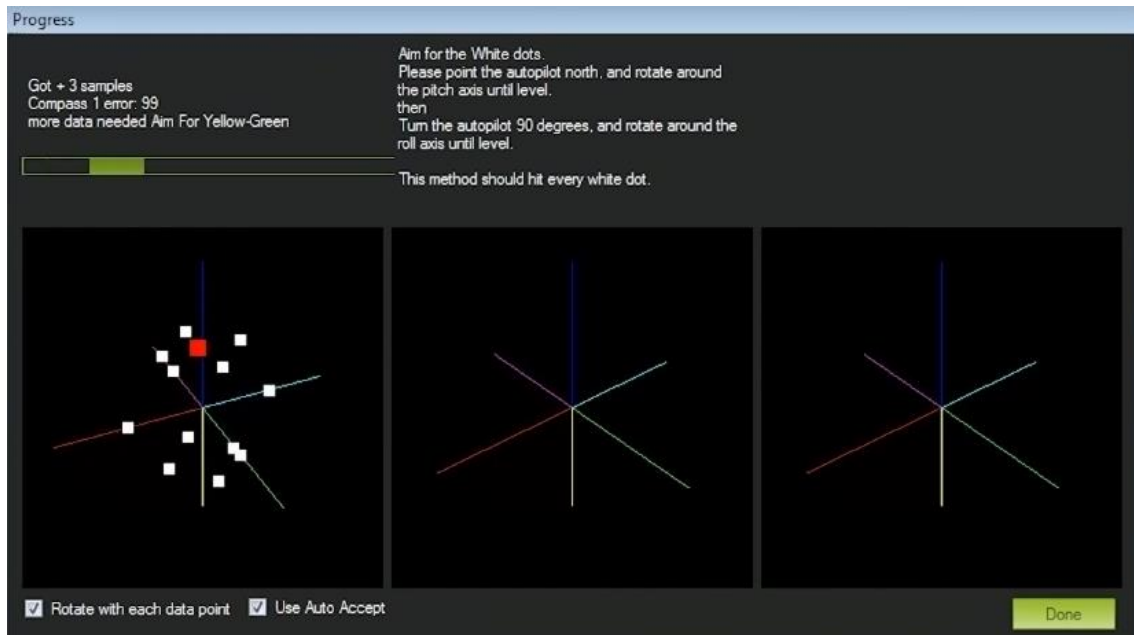


Figura 6.12. Muestras del giro del controlador en los tres ejes

Una vez que decidimos que el número de muestras tomadas es suficiente, clicamos en *Done* y nos notifica el error que presentaba cada eje con respecto al nuevo eje de referencia (Figura 6.13). Esta tarea lleva unos 10 minutos aproximadamente.



Figura 6.13. Número de muestras de giro finalizado en el eje X

6.2 Electrónica empleada

Previamente, se ha explicado el software empleado para llevar a cabo el control de los motores y ahora se detallarán los elementos físicos y la programación asociada de los mismos para poder movernos libremente con el dron.

6.2.1 Lectura de la IMU mediante SPI

Uno de los inconvenientes más destacados de la IMU MPU-6000 es la obtención de los datos a través del protocolo SPI. Existe un modelo de IMU ampliamente extendido que se comunica por I2C (MPU-6050) y cuya obtención de datos es más sencilla. Ello se debe a que en el caso de la comunicación SPI debemos seleccionar el esclavo concreto al que accedemos en cada momento, ya que el bus está pensado para comunicar elementos dentro de la placa, pero no comunicarse con un dispositivo externo.

El código implementado permite leer los valores dados por la IMU mediante “*SPIread*” y “*SPIwrite*” del `ChipSelPin1` y convertirlos a ángulos, se encuentra en el Capítulo 14: Anexos (14.2.1).

6.2.2 Variadores de velocidad (ESC)

En primer lugar, un ESC (Electronic Speed Controller [30]) es un dispositivo electrónico que se encarga de variar la velocidad y el sentido de giro de los motores eléctricos, en concreto de los motores brushless o sin escobillas.

El funcionamiento de un variador de velocidad se basa en el control de una señal PWM. El microcontrolador típicamente emite una señal PWM de 50 Hz al ESC con una variación de período de 1 a 2 ms (Figura 6.14). En este rango, si el período es de 1 ms el motor se encontrará parado y si es de 2 ms el motor se moverá a la máxima velocidad de giro posible. Primero debemos enviar una señal de 1,5 ms para activar el ESC y posteriormente, se envía la señal correspondiente al valor de trabajo. En nuestro caso, trabajaremos en los valores intermedios del rango sin llegar a poner a trabajar los motores a máxima potencia para ahorrar energía y poder realizar el intercambio de conexiones en los bobinados del motor.

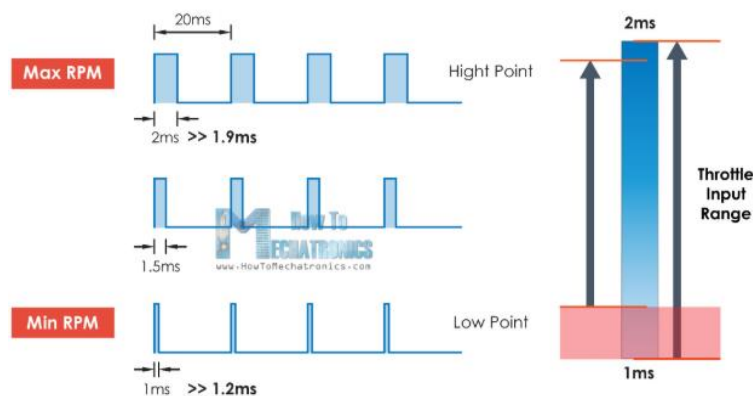


Figura 6.14. Señal PWM de un ESC

Los ESC R3 de BlueRobotics no incorporan un sistema BEC (*Battery Elimination Circuit*). Se trata de un circuito que reduce la corriente de la batería que alimenta los motores para que se pueda emplear la misma batería para alimentar otros circuitos que demanden una corriente elevada. Sin embargo, el hecho de tener una limitación de corriente a la salida y problemas de calentamiento han repercutido en que los ESC de BlueRobotics ya no traigan implementado este sistema. Como veremos en el siguiente apartado, el consumo de corriente de los motores es elevado y el resto de la electrónica no consume mucha corriente, por tanto, el sistema BEC no resultaría útil en nuestro caso.

Por otro lado, los ESC R3 (Figura 6.15) permiten la rotación en el sentido horario y antihorario de las hélices de los motores, empujando hacia delante o hacia atrás según la configuración de hélice escogida y el sentido de la fuerza aplicado. Además, se trata de un dispositivo de alta eficiencia y baja emisión de calor, al estar diseñado para operar en ambientes de escasa refrigeración.



Figura 6.15. ESC R3 de BlueRobotics

En cuenta a las especificaciones técnicas encontramos que el ESC es capaz de trabajar hasta una corriente máxima de 30 A, teniendo una tensión de alimentación admitida entre 7 y 26 V. Por otro lado, cuenta con dos terminales de alimentación (alimentación y tierra); un pin de señal (PWM 3,3 - 5 V) y otro de tierra que irán conectados al microcontrolador que se utilice; y 3 terminales para las fases del motor brushless. Además, tienen una tasa de actualización máxima de 400 Hz, un rango de trabajo desde 1100 hasta 1900 μs , estando parados si se envía una señal de 1500 μs y con una zona muerta “*deadband*” de $\pm 25 \mu\text{s}$ centrada en 1500 μs .

A continuación, se muestra un esquema del conexionado de alimentación del ESC (Figura 6.16), comunicación con las fases del motor y señal recibida de un microcontrolador. El cable de señal de los 4 ESC utilizados, va conectado al pin digital de salida 12, 11, 8 y 7 (OUTPUTS 1, 2, 3 y 4) del ArduPilot, respectivamente, y el cable de tierra directamente al pin de tierra.

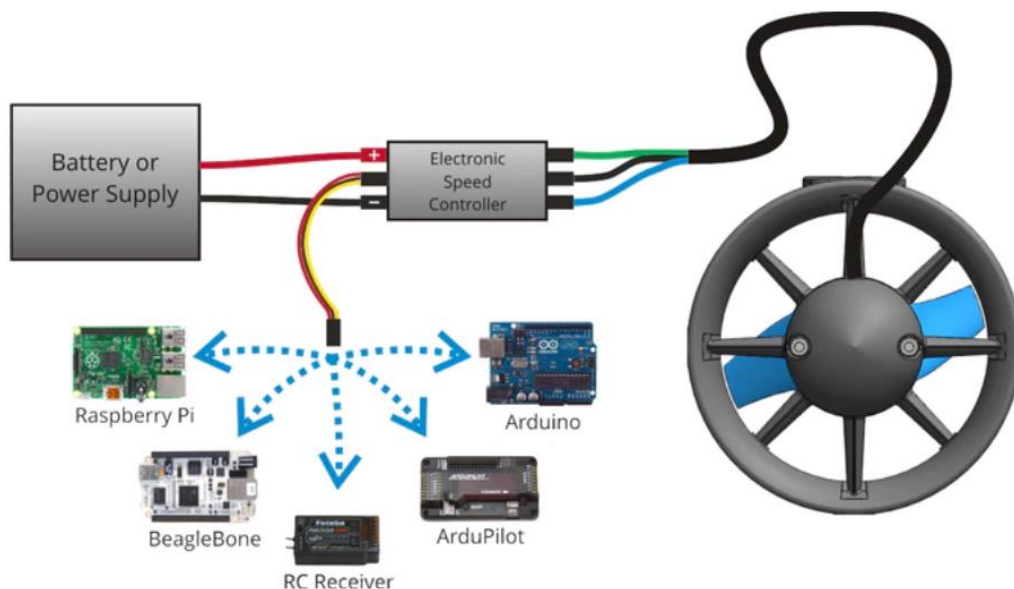


Figura 6.16. Conexión asociada a un ESC

Asimismo, para conocer con exactitud el estado de los ESC adquiridos y el valor de la zona muerta (Figura 6.17) se realizó una calibración de los mismos. La zona muerta comprendía un intervalo de 1476 μs y 1523 μs , por lo que se trabajará desde 1100 hasta 1475 μs en el sentido de giro inverso

y desde 1525 hasta 1900 μs en el otro sentido. El código implementado para el análisis de los ESC se encuentra en el Capítulo 14: Anexos (14.2.2).

T200 Thruster: Thrust vs. PWM Input to ESC

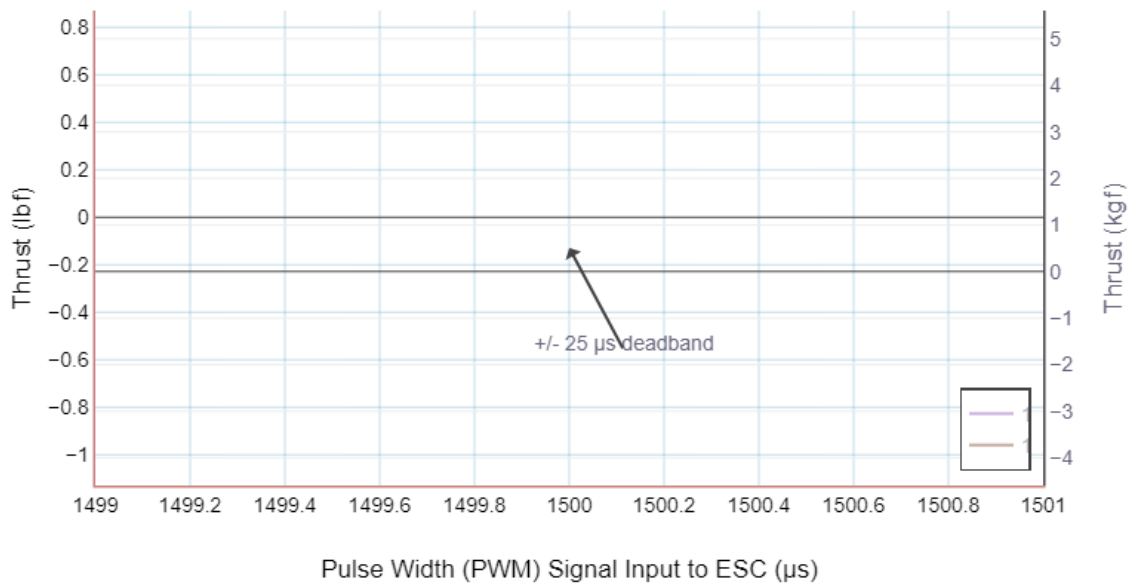


Figura 6.17. Valor del empuje en la zona muerta de operación

6.2.3 Motores T-200

En cuanto a los motores o propulsores empleados, debe decirse que se adquirieron los propulsores brushless T-200 de la empresa BlueRobotics, que no utilizan escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

Los motores brushless son máquinas eléctricas rotativas que están formadas por una parte móvil o rotor, donde se sitúan los imanes permanentes y por una parte fija o estator (Figura 6.18), en la que se sitúan los bobinados.

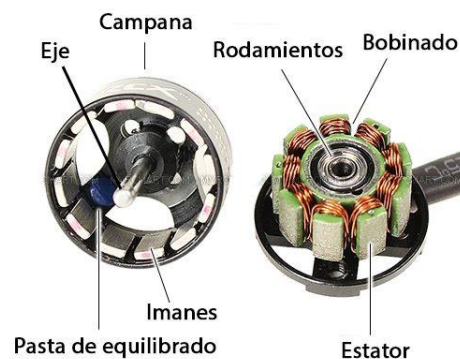


Figura 6.18. Partes de un motor brushless

En primer lugar, los imanes permanentes del rotor crean un campo magnético constante. Por otro lado, al no tener escobillas ni colector de delgas, el ESC controlará la posición del rotor en cada momento para lograr que la corriente suministrada sea la requerida y que el movimiento de rotación corresponda al giro programado.

Esto sucede ya que el ESC es capaz de crear una corriente alterna trifásica desfasada 120° para cada cable que llega al motor a partir de la corriente continua de la batería y como uno de los polos generará un voltaje proporcional a la velocidad de giro del motor, que le servirá al ESC para determinar la velocidad y el sentido de giro del motor. Una vez que el ESC conoce esta información es capaz de enviar la corriente a los electroimanes del motor para que éste gire. Esta corriente genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, lo que permite que aparezca una fuerza que hace girar el rotor y con ello, el eje del motor. Por tanto, podemos cambiar la dirección del campo magnético creado en las bobinas del estátor, eligiendo las bobinas a las que le enviamos corriente podemos mover el motor como queramos.

Cuando el campo magnético de los bobinados sea perpendicular a la dirección del campo magnético de los imanes permanentes, el par generado será máximo, siendo esto fundamental para mover el motor en los puntos de trabajo requeridos.

En cuanto a las especificaciones del T-200 (Figura 6.19), cabe destacar que se mencionarán aquellas características relevantes para el diseño y que han posibilitado desarrollar la configuración del movimiento deseada.



Figura 6.19. Propulsor T-200 de BlueRobotics

Por un lado, encontramos que el motor tiene un empuje máximo hacia delante de 5,1 kgf (50 N aprox.) y un empuje máximo hacia detrás de 4,1 kgf (40,2 N aprox.) a 16 V (Figura 6.20). El fabricante nos ofrece las gráficas del empuje generado según el ancho de pulso de la señal PWM y la tensión de alimentación (16 V en violeta y 12 V en marrón). Nuestra batería completamente cargada se encuentra a 16,8 V, por lo que nos ajustaremos al comportamiento de 16 V cuando la batería esté en un nivel de carga alto y a medida que se vaya consumiendo el valor ésta, tendremos un comportamiento más similar al dado por los 12 V. El motor trabaja con una tensión de alimentación de 6 a 20 V.

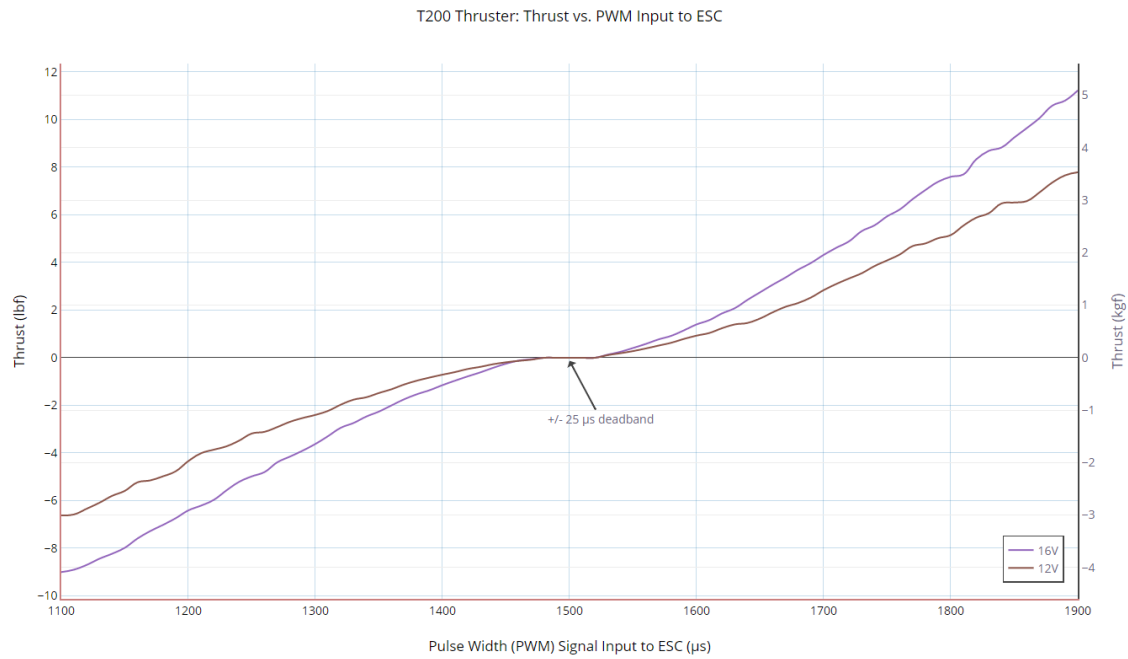


Figura 6.20. PWM vs Empuje a 12 y 16 V

Por otro lado, la máxima corriente solicitada por el motor será de 25 A (Figura 6.21), por ello, el ESC escogido permite una mayor corriente, no obstante, estos valores de pico de corriente no se alcanzarán salvo en el arranque, por lo que el consumo será menor al dado por la corriente máxima. Asimismo, la máxima potencia de consumo por motor es de 350 W (Figura 6.22).

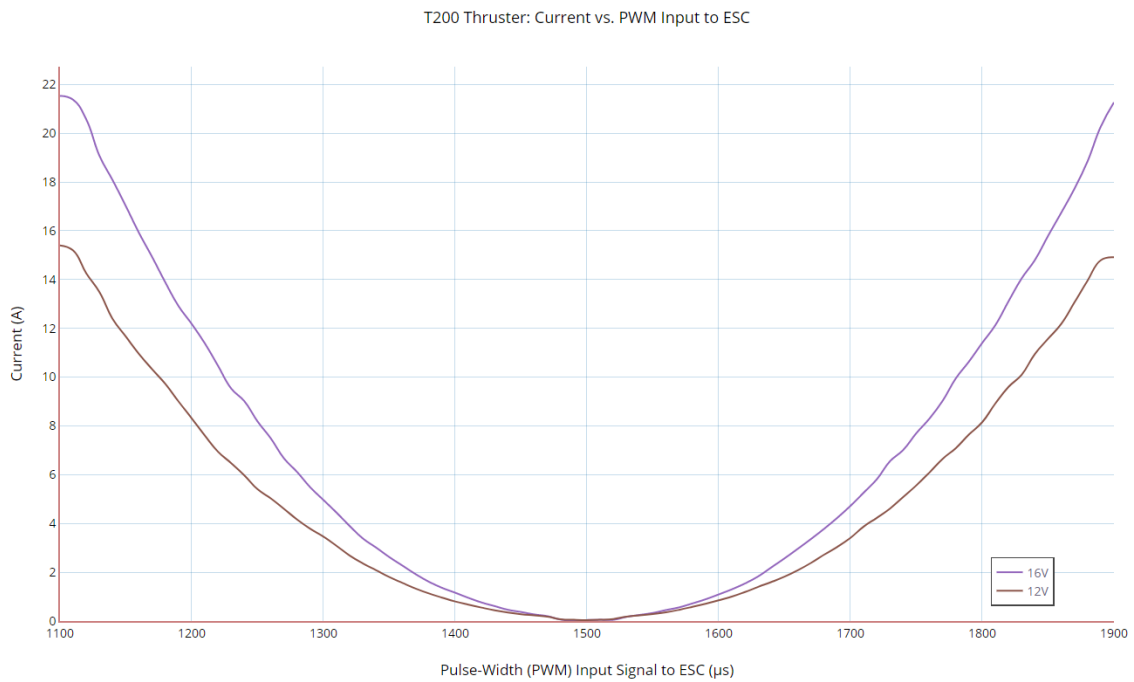


Figura 6.21. PWM vs Corriente a 12 y 16 V

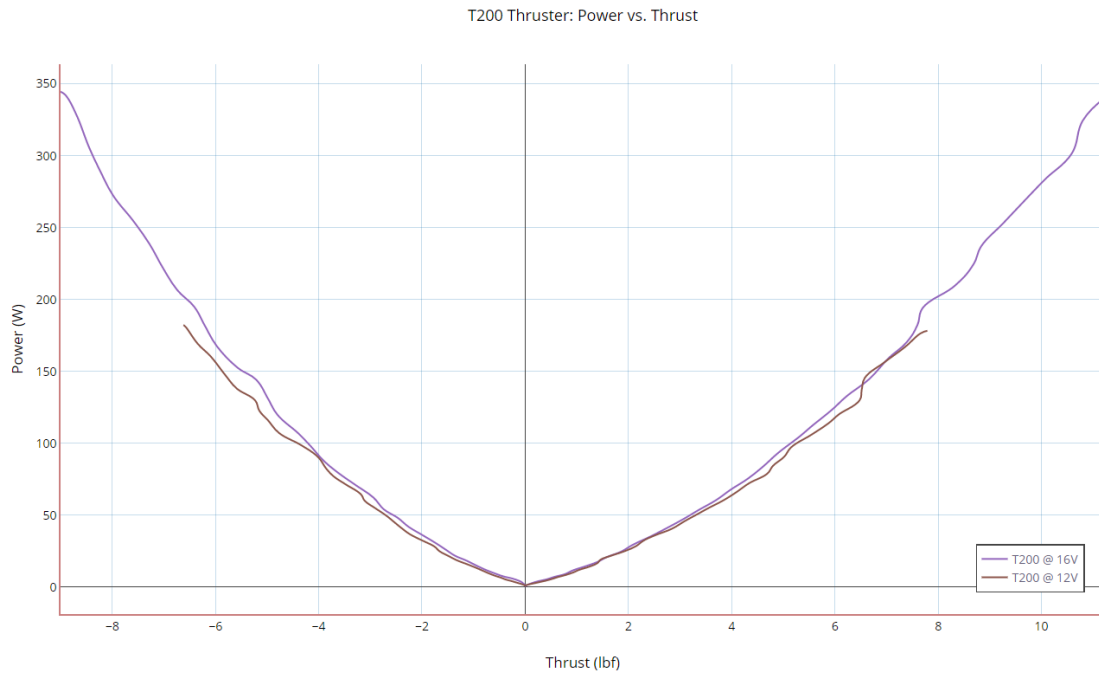


Figura 6.22. PWM vs Potencia consumida a 12 y 16 V

En cuanto a los materiales debe decirse que los propulsores T200 están hechos de plástico moldeado por inyección de policarbonato de alta resistencia y son resistentes a los rayos UV. El núcleo del motor está sellado y protegido con un revestimiento de resina Epoxi y utiliza cojinetes de plástico de alto rendimiento en vez de cojinetes de acero, puesto que se oxidarían en agua salada, salvo que fuesen de acero inoxidable. Los elementos que no son de plástico son de aluminio o acero inoxidable de alta calidad imposibilitando que se corra (Figura 6.23).

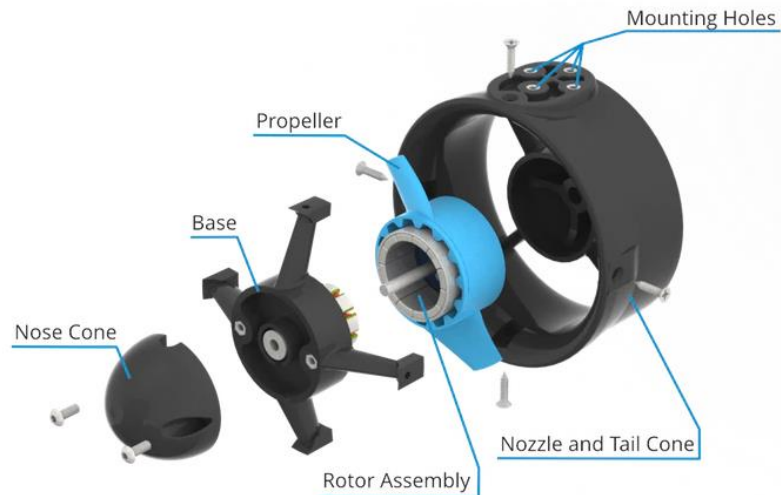


Figura 6.23. Partes del motor T-200

También cuentan con una hélice y una boquilla especialmente diseñadas que proporcionan un empuje eficiente y potente. El enfriamiento del motor es continuo al estar en el agua, ésta lubrica todas las partes del motor mientras está funcionando. Este factor limita su uso en el aire, debido a que experimentaría un sobrecalentamiento. Además, pueden soportar presiones extremas, alcanzando 3000 metros de profundidad [31], cumpliendo con creces nuestro requisito de ser capaz de sumergirse 20 metros (Figura 6.24).

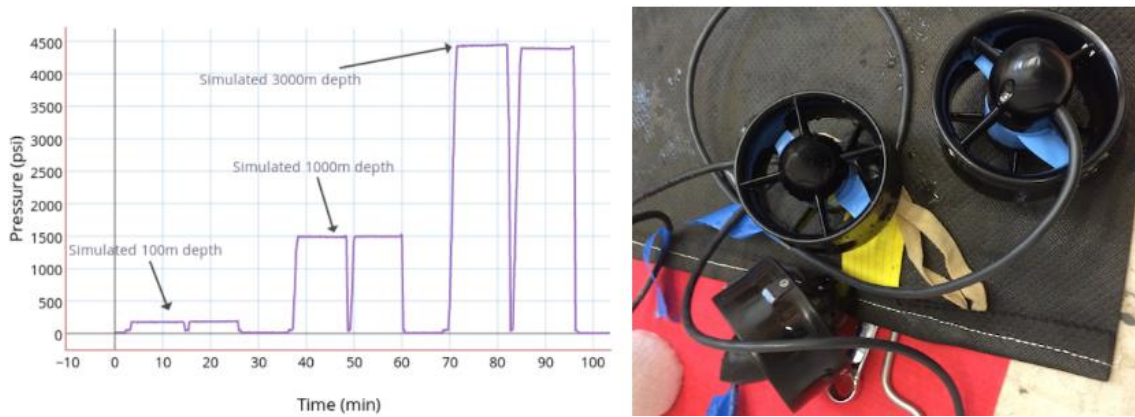


Figura 6.24. Prueba de presión a 3000 m de profundidad realizada por BlueRobotics

Por último, se procedió a comprobar el funcionamiento de un motor en la piscina de agua dulce con el objetivo de conocer la fuerza del motor de acuerdo al ancho del período de la señal PWM a distintos niveles de voltaje de la batería. El código implementado para la prueba del motor en la piscina se encuentra en el Capítulo 14: Anexos (14.2.3).

6.3 Configuración y desempeño del movimiento

Uno de los aspectos más importantes del diseño fue atender a la colocación y orientación de los motores en la estructura para posibilitar un correcto uso del sistema de visión, ya que si los motores se encuentran cerca del sistema de visión, el agua propulsada por los motores podría dificultar la visión.

Por otro lado, para evitar que el motor entre en resonancia con la estructura de acero se han empleado juntas de grifo entre los tornillos del motor y el perfil de acero. De este modo, conseguimos amortiguar las vibraciones.

La configuración de los motores en la estructura (Figura 6.25), para llevar a cabo el desplazamiento del prototipo de manera que emule a un quadcopter exige que 2 de las hélices de los extremos giren en sentido horario (CW) y las otras dos en sentido antihorario (CCW), de acuerdo al esquema siguiente.



Figura 6.25. Configuración de los motores en un quadcopter

En nuestro prototipo la configuración de los motores es la misma que la anterior salvo que cambiamos las hélices o propellers de sitio para seguir un orden más claro a la hora de conocer qué hélice lleva montada cada motor. La disposición de los motores se aprecia en la Figura 6.26.



Figura 6.26. Configuración de los motores en nuestro prototipo

Los motores vienen montados con las hélices con el sentido de giro horario por defecto. Por ello, procedimos a cambiar las hélices de 2 motores. A continuación, se muestran las hélices con las que trabajamos en la Figura 6.27.

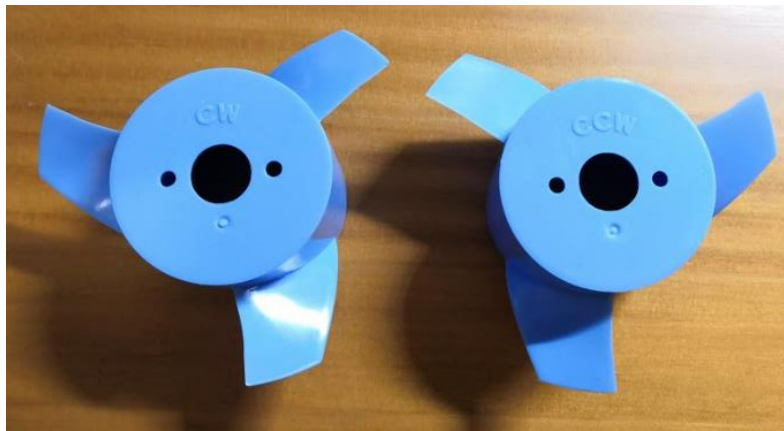


Figura 6.27. Hélices en sentido horario (CW) y antihorario (CCW), respectivamente

Una vez finalizamos de configurar elementos físicos del motor, se programó un código para comprobar el funcionamiento completo de los motores, en el que se reciben los comandos enviados por un mando controlador con joysticks y botones, a través de un mensaje de ROS. Cada uno de los ESC se asigna a un pin para poder transmitirle la señal con los μs correspondientes al movimiento del joystick. Cuando la función “*ejecucion_motores*” se habilita al pulsar “*LI + X*”, enviamos la señal de activación a los motores (señal de $1500 \mu\text{s}$) y ya podríamos enviarle el ancho de pulso a los motores mediante los ESC de acuerdo al movimiento de los joysticks. Si pulsamos “*LI + O*” desactivaríamos los motores y se pararían al enviar una señal de $1500 \mu\text{s}$. Además, se han establecido los rangos de trabajo desde 1100 hasta $1475 \mu\text{s}$ en el sentido de giro inverso y desde 1525 hasta $1900 \mu\text{s}$ en el otro sentido. El código implementado para el movimiento completo de los motores se encuentra en el Capítulo 14: Anexos (14.2.4).

7 Sistema de alimentación

Para poder comunicar los distintos dispositivos, leer la información de los sensores y activar el movimiento de los motores del dron hace falta un sistema de alimentación que cubra las necesidades de cada dispositivo.

El sistema de alimentación que se ha empleado, debido a la versatilidad del mismo y a la facilidad para poder alimentar toda la electrónica sin presentar limitaciones de tensión ni de corriente que afecten al proyecto, es una batería LiPo [32] de 8000 mAh.

Paralelamente, se realizará un estudio del consumo de corriente de los dispositivos para conocer la duración real de la batería en condiciones de operación reales. También se describirán las características fundamentales de las baterías LiPo y el procedimiento de carga de las mismas.

Por otro lado, se incluirán circuitos específicos para mejorar la alimentación de ciertos dispositivos, así como, aumentar su seguridad.

7.1 Esquema general de alimentación

Con el objetivo de alimentar la electrónica se ha diseñado un esquema de alimentación, en el que la tensión llegue a los elementos de forma adecuada.

7.1.1 Circuito de alimentación general

En primer lugar, se ha situado un encapsulado con dos diodos Schottky a la salida de la batería y un condensador de 3,3 mF para poder proporcionar un rectificado de la tensión con gran eficacia, cayendo 0,2 V por el diodo al tener éste una tensión umbral que se sitúa en torno a los 0,2 V. Además, con los diodos Schottky impedimos el paso de corriente hacia atrás.

En este punto del circuito nos encontramos con un sensor de medida del voltaje, un interruptor de corte de alimentación y un regulador de tensión.

El sensor de medida de tensión nos servirá para poder conocer en todo momento el valor de voltaje a la salida de los diodos. Por tanto, cuando alcancemos un valor de 3,8 V en este nodo, es decir, 4 V en la batería, procederemos a cargarla.

Por otro lado, nos encontramos con un regulador de tensión (7812CT) con 12 V a la salida y un condensador de 220 μ F, dando lugar a la alimentación de entrada a la PCB que contiene los sensores.

Más tarde, aparece un interruptor conectado a un convertidor o regulador de tensión DC-DC MP1584EN de tipo conmutado reductor (Step-Down) que tiene como función entregar un voltaje a la salida constante de 5V inferior a la tensión de entrada 16,6 V del regulador, independientemente de las variaciones que presente esta tensión de entrada o del voltaje de carga. La salida del regulador servirá para alimentar a la Raspberry Pi 3 Model B+. Además, este regulador nos proporciona una corriente máxima de salida de 3A, siendo un valor mayor al consumo de corriente que va a solicitar la propia Raspberry. Asimismo, la Raspberry alimentará por USB al ArduPilot APM 2.5 y al Arduino Mega 2560.

A continuación, en la Figura 7.1 se muestra un esquema del circuito de alimentación del dron.

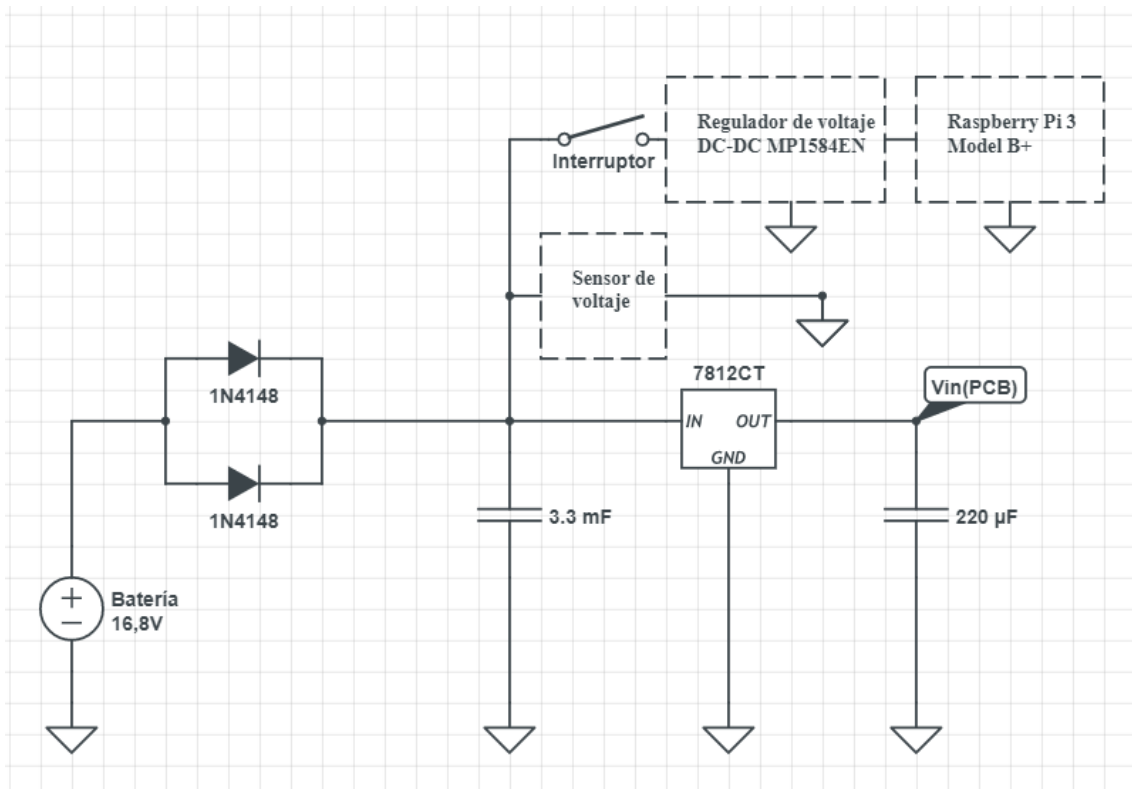


Figura 7.1. Circuito de alimentación general

Este circuito se implementó en una placa de matriz de puntos como se puede ver a continuación en la Figura 7.2 y en la Figura 7.3.

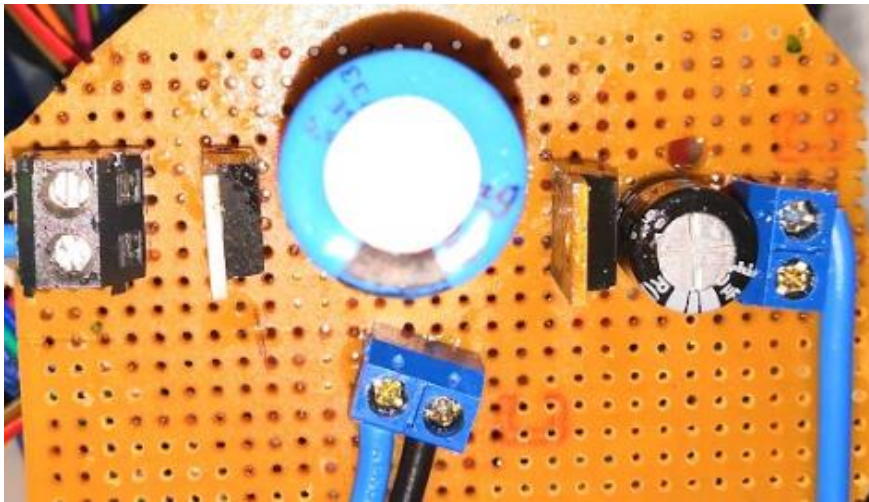


Figura 7.2. Cara superior del circuito



Figura 7.3. Cara inferior del circuito

7.2 Batería LiPo

Dos de los aspectos que han repercutido en la elección de una batería de polímero de litio han sido la gran capacidad que presentan en un formato reducido y la alta tasa de descarga, siendo capaz de descargar mucha corriente en poco tiempo.

Las baterías LiPo están compuestas por celdas de 3,7 V que alcanzarán su máximo rendimiento al voltaje máximo de trabajo (4,2 V). En nuestro caso contamos con una batería de 4 celdas, es decir, 14,8 V (4S1P), siendo S, el número de celdas en serie que tiene conectadas en serie, en este caso 4 y P, el número de baterías conectadas en paralelo, ya que existen baterías como puede ser 3SP2 que cuentan con 2 baterías en paralelo, teniendo cada una 3 celdas.

Por otro lado, aparece la capacidad de la batería o energía que es capaz de almacenar en mAh, es decir, la cantidad de carga medida (mA) que se pueden poner en la batería durante 1 hora para que la batería se descargue por completo. Nuestra batería de 8000 mAh (Figura 7.4) se descargaría completamente en una hora, con una carga de 8000 mA colocada en la batería.

Más tarde, la tasa de descarga o C_{rate} , es el pico de corriente que puede dar una batería durante un período muy pequeño del orden de ms o decenas de ms según la batería y, por tanto, no vamos a poder entregar corriente de forma continua a 30C.



Figura 7.4. Batería LiPo de 8000 mAh empleada

7.2.1 Consumo de la electrónica y duración estimada

Una vez que conocemos los parámetros fundamentales de la batería, deberemos prever la carga que supondrá el uso de los dispositivos electrónicos que incorpora el dron para poder estimar el consumo del conjunto y con ello la duración de la batería [33].

La previsión de corriente de la Raspberry, incluyendo las 2 PCB, el ArduPilot y el Arduino Mega es de 1 A, dada la limitación de la Raspberry. Por otro lado, realizamos la estimación del consumo de los motores asumiendo que trabajarán a la mitad de la potencia total por lo que nos encontraremos con un ancho de pulso cercano a 1800 μ s en el sentido de giro horario y 1200 μ s en el sentido de giro antihorario.

Por tanto, trabajando con una tensión nominal de 4V por celda, en total 16 V (se operará con un voltaje mayor cuando esté totalmente cargada y menor a medida que se solicite corriente). Además, cuando el valor es cercano a los 14 V, es decir, 3,5 V por celda, procedemos a cargar la batería. Asimismo, los motores con un ancho de pulso de 1200 μ s tendrán un consumo de 12,18 A y con un ancho de pulso de 1800 μ s tendrán un consumo de 11,4 A (Figura 7.5).

	thrust @ 16V	rpm	power 16V	current 16V	voltage	pwm		thrust @ 16V	rpm	power 16V	current 16V	voltage	pwm
10	-6.74	2959	206.56	12.91	15.35	1190	59	3.7	2023	60.48	3.78	15.34	1680
11	-6.41	2912	194.88	12.18	15.35	1200	60	3.98	2104	67.68	4.23	15.35	1690
12	-6.21	2847	182.08	11.38	15.35	1210	61	4.32	2212	75.52	4.72	15.34	1700
13	-5.97	2776	167.36	10.46	15.35	1220	62	4.62	2305	84.16	5.26	15.34	1710
14	-5.57	2732	152.48	9.53	15.35	1230	63	4.89	2384	92.96	5.81	15.35	1720
15	-5.21	2663	144.16	9.01	15.35	1240	64	5.32	2443	104.8	6.55	15.35	1730
16	-4.98	2581	130.88	8.18	15.35	1250	65	5.56	2537	112.16	7.01	15.35	1740
17	-4.8	2503	119.84	7.49	15.34	1260	66	5.94	2622	123.2	7.7	15.35	1750
18	-4.39	2467	106.72	6.67	15.35	1270	67	6.23	2683	132.8	8.3	15.34	1760
19	-4.15	2399	97.76	6.11	15.35	1280	68	6.66	2747	144.48	9.03	15.34	1770
20	-3.9	2296	87.68	5.48	15.35	1290	69	7.04	2811	159.2	9.95	15.35	1780
21	-3.62	2228	79.36	4.96	15.35	1300	70	7.39	2880	170.24	10.64	15.35	1790
22	-3.29	2167	71.04	4.44	15.35	1310	71	7.6	2937	182.4	11.4	15.35	1800

Figura 7.5. Consumo de corriente con distintos anchos de pulso

Con el fin de realizar un cálculo que nos permita tener mayor seguridad a la hora de trabajar con el dron, tomaremos el caso más desfavorable, es decir, los motores tendrán un consumo aproximado de 12,18 A (Figura 7.6).

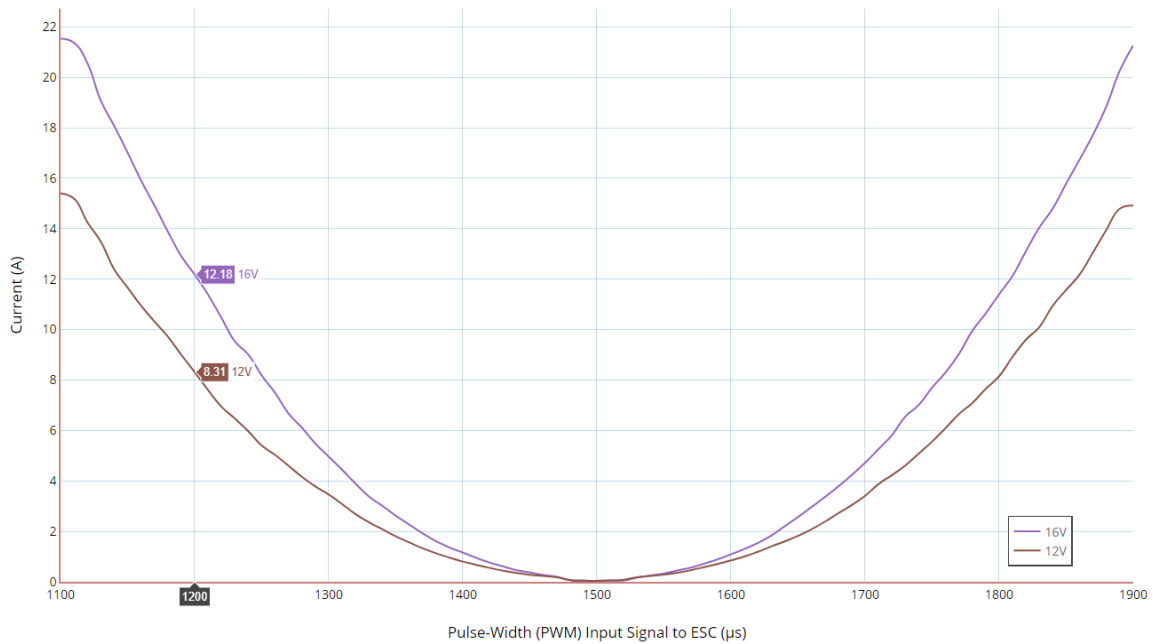


Figura 7.6. Consumo de corriente con un ancho de pulso de 1200 µs

Más tarde, se comprobó que la bombilla que se encuentra en la carcasa de la cámara llegaba a consumir 300 mA. Como ya conocemos los consumos de corriente de los dispositivos alimentados por la batería $I = 50,02$ A, realizaremos el cálculo de la duración de la misma basándonos en los consumos estimados previamente y en las características específicas de la batería.

En primer lugar, podemos relacionar la corriente extraída (I_{bat}) de la batería con su capacidad (C_{bat}) y la tasa de descarga (C_{rate}), mediante la siguiente expresión:

$$I_{bat} = C_{rate} \cdot C_{bat} \quad (7.1)$$

Por tanto, la tasa de descarga será, $C_{rate} = 6,2525$ h⁻¹. Además, sabemos que el tiempo de funcionamiento real va a ser un 30% inferior al tiempo de funcionamiento teórico debido a factores externos como la limitación de la profundidad de descarga (DOD), es decir, el porcentaje de la capacidad total de la batería usada durante un ciclo de carga o descarga.

Paralelamente, el tiempo de funcionamiento teórico ($t_{teórico}$) es inversamente proporcional a la tasa de carga:

$$t_{teórico} = 1 / C_{rate} \quad (7.2)$$

Por tanto, el tiempo real (t_{real}) será:

$$t_{real} = 0,7 / C_{rate} \quad (7.3)$$

La duración real mínima de la batería si estuviésemos enviando de forma ininterrumpida señales PWM con un ancho de pulso cercano al 70% del máximo, la bombilla estuviese encendida y la Raspberry consumiera 1 A, sería de 6 minutos y 43 segundos. Sin embargo, este cálculo se ha realizado en el supuesto de un consumo muy elevado, poniéndonos en un caso muy desfavorable.

Asimismo, en las distintas pruebas que se llevaron a cabo en el mar, la potencia de los motores estaba limitada al 50%, es decir, con anchos de pulso de 1300 μs como valor de mayor consumo en sentido antihorario y 1700 μs como valor superior en sentido horario, correspondiendo con corrientes de 4,96 A y 4,72 A, respectivamente. En las pruebas llevadas a cabo la máxima corriente de consumo se situaría en torno a 21,14 A (manteniendo los valores de corriente de la Raspberry y de la bombilla). De esta manera, la tasa de descarga sería, $C_{\text{rate}} = 2,6425 \text{ h}^{-1}$ y la duración real mínima sería de 15 minutos y 54 segundos.

De forma análoga al primer análisis llevado a cabo, no nos encontraremos en una situación en la que los motores estén funcionando todo el rato y los valores de consumo de la electrónica se sitúen sus máximos. De hecho, la duración de las pruebas en el mar ha superado la hora sin ningún problema, esto se debe fundamentalmente a que los motores no están funcionando de forma ininterrumpida y, por tanto, que se aprecie una gran diferencia entre la duración real en las pruebas en el mar y los cálculos de duración situándonos en el peor caso posible dadas las características del sistema.

7.2.2 Carga de la batería

Se recomienda conocer el valor del voltaje de la batería de forma continua tanto si se usa como si no, revisándolo más a menudo si está alimentando a algún dispositivo que solicita mucha corriente. Asimismo, una vez que consideremos que el valor de tensión está por debajo de aquel que tengamos como tensión mínima de operación, cuando se acerca a los valores de voltaje mínimos por celda o cuando vamos a dejar de usar la batería durante un tiempo prolongado necesitamos llevar a cabo una carga de la batería [34].

En nuestro caso disponemos de un cargador de baterías LiPo ACCUCCELL 6 de Turnigy que está constituido por un circuito de alta potencia 50W. Con este cargador podemos cargar o descargar hasta 15 células de NiCd /NiMH y 6 baterías de Litio en serie con una corriente máxima de 5 A. Adicionalmente, el sistema de enfriamiento es muy eficiente, siendo capaz de absorber la potencia sin que cause ningún problema de funcionamiento de la CPU o del programa operativo.

A pesar de que el cargador dispone de un modo de equilibrado de voltaje externo en la carga o "Balance", en el que el procesador interno del cargador controlará los voltajes de cada celda de la batería y controlará la carga de corriente que alimenta a cada celda con el objetivo de normalizar el voltaje, no utilizaremos este método continuamente sino al llevar un determinado número de ciclos de carga y descarga. Asimismo, si se ha llevado a cabo un número elevado de ciclos de carga y descarga, el voltaje de cada celda consecuentemente se verá desequilibrado con respecto al resto de celdas y por tanto, será necesario utilizar el modo de equilibrado de voltaje externo a la carga, para tener el mismo voltaje en cada celda. Sin embargo, una vez que hayamos seguido este modo de carga, podremos cargar la batería de forma normal sin equilibrar las celdas hasta que se realice el número de ciclos aconsejado por el fabricante. Se recomienda seguir este proceso. Por tanto, no existirá riesgo de sobrecarga de la celda ni de incendio. Si utilizáramos una batería de otra composición distinta a LiPo sí sería necesario llevar a cabo el equilibrado de voltaje externo.

En el proceso de carga de una LiPo se utiliza el método de carga de corriente constante y voltaje constante (CC-CV) (Figura 7.7). Esto significa que se aplica corriente constante durante la primera parte del ciclo de carga y a medida que la tensión de la batería se va acercando a la tensión máxima de carga, se reducirá de forma automática la corriente de carga y posteriormente, aplicará una tensión constante. De este modo, el cargador terminará la carga cuando el voltaje de carga igual a voltaje máximo por celda, es, decir, 4,2 V. A continuación, se muestra un esquema de la carga de una celda, en el que se aprecia el método de carga previamente mencionado.

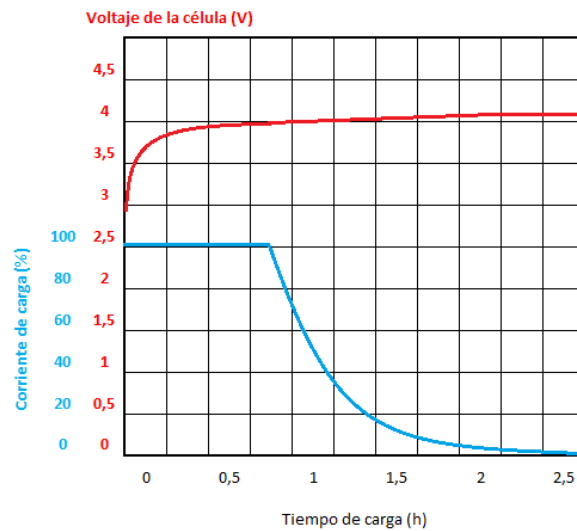


Figura 7.7. Carga de una celda mediante CC-CV

Acto seguido, se mostrará el procedimiento seguido para cargar nuestra batería. Primero, seleccionamos el tipo de batería (Figura 7.8), en este caso “LiPo”, después, la corriente de carga que será de 6 A y, por último, el número de celdas (S), siendo 4. Posteriormente, conectamos las bananas a la batería y automáticamente, se comprueba si la batería se encuentra en buen estado (Figura 7.9). Si lo está nos dejará confirmar que queremos empezar la carga (Figura 7.10), entonces comenzará el ciclo de carga (Figura 7.11) y cuando termine de cargar se parará (Figura 7.12), en este caso ha cargado 3421 mA.



Figura 7.8. Selección del tipo de batería, capacidad y voltaje de carga



Figura 7.9. Comprobación del correcto estado de la batería



Figura 7.10. Confirmación de la carga



Figura 7.11. Inicio de la carga



Figura 7.12. Proceso de carga finalizado

7.3 Sistema de carga externo a la estructura

Una vez que se diseñó el circuito general de alimentación, se añadieron dos terminales que salen de la batería mediante los penetradores y llegan a la carcasa en la que se encuentra el interruptor de corte de alimentación a la Raspberry. El hecho de haber añadido estos terminales soldados a un conector XT-90 hembra (Figura 7.13), posibilita la carga de la batería sin tener que abrir el submarino, constituyendo un método sencillo y con un acceso cómodo al conector.



Figura 7.13. Terminales de carga situados en la carcasa

Si no se hubiesen implementado estos terminales, nos veríamos obligados a disponer de un conector estanco IP68, que soportase la especificación de presión de 20 metros de profundidad. Sin embargo, estos conectores no son frecuentes y, además, no asegurarían su estanqueidad al hundirse a más de un metro y medio durante un tiempo mayor a media hora.

8 Diseños para el interior del tubo de PVC mediante impresión 3D

Con el objetivo de facilitar la fijación de ciertas partes de la electrónica en el interior del tubo se han diseñado varias piezas que posibilitan la sujeción de los microcontroladores y la protección de los mismos, así como, del sensor de presencia de agua.

Además, se ha diseñado un recogedor de cable Ethernet para poder enrollarlo y desenrollarlo a medida que se aleja el dron con mayor facilidad. El material utilizado en la impresión de las piezas el PLA, se trata de un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, obtenido de ciertos alimentos ricos en almidón como el trigo o el maíz. Los diseños de las piezas impresas en 3D se encuentran en el Capítulo 14: Anexos.

8.1 Bandejas porta-electrónica y sujeción de la electrónica

Se han diseñado dos bandejas para fijar y desplazar la electrónica dentro del tubo. Paralelamente, se han dimensionado las bandejas de acuerdo al tamaño de las carcasas protectoras del ArduPilot, Arduino Mega, Raspberry y las dos PCB, encargadas de la IMU (situada encima de la Raspberry) y de la sensórica (Figura 8.1).



Figura 8.1. Soportes de los microcontroladores

El diseño del soporte de forma semicircular de las bandejas permite fijar la bandeja en su plano superior si se desea mediante un tornillo. Este tornillo se colocaría cuando se vaya a introducir en la tubería para que el soporte quede fijo. Además, el soporte contiene 3 huecos para que pasen los cables de forma ordenada y separada. La forma semicircular viene dada por la geometría de la tubería y permite el giro del soporte una vez que queremos roscar el tapón de los extremos. De este modo, evitamos que se giren los cables y que, con ello, se salga alguno de ellos de donde estaba conectado.

A continuación, se muestra el resultado final del soporte con las bandejas de los microcontroladores (Figura 8.2). En este lado, hay dos alturas de soporte, en la más baja se encuentran los elementos de las imágenes previas y en la más alta el Arduino Mega. Adicionalmente, se ha empleado cinta adhesiva y silicona para fijar en mayor medida las bandejas al soporte.

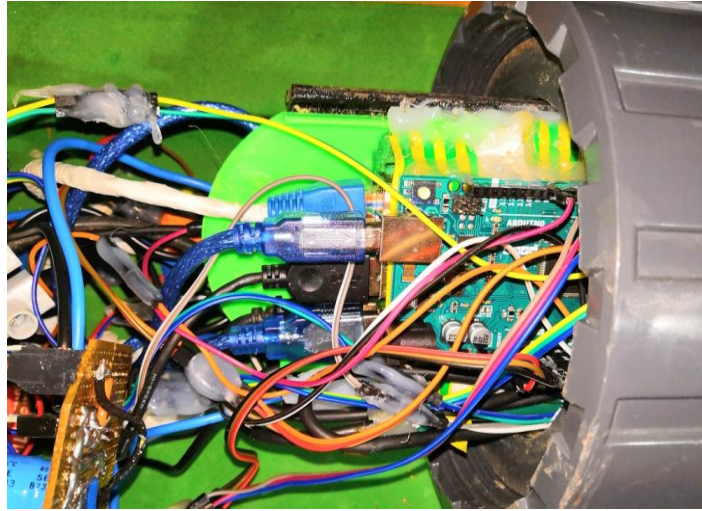


Figura 8.2. Bandeja de microcontroladores

El resultado de la bandeja que contiene la PCB de los sensores y la batería es el de la Figura 8.3.

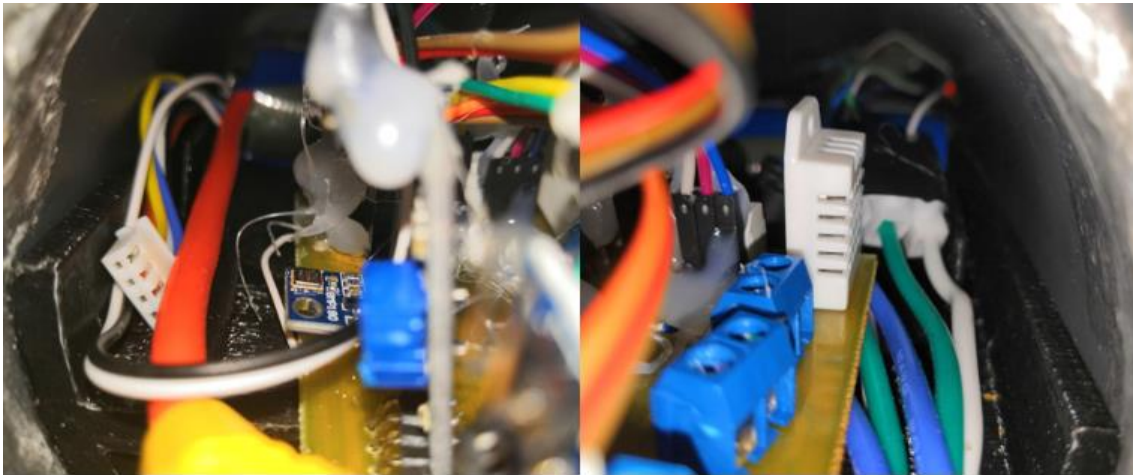


Figura 8.3. Bandeja de sensores y batería

8.2 Recogedor Ethernet

Por otro lado, fue necesario diseñar un elemento que permitiese recoger el cable Ethernet y poder transportarlo sin que se enrollase el cable (Figura 8.4). Para tal propósito se diseñó un recogedor para poder tener recogido el cable en un elemento sólido y de escaso peso.

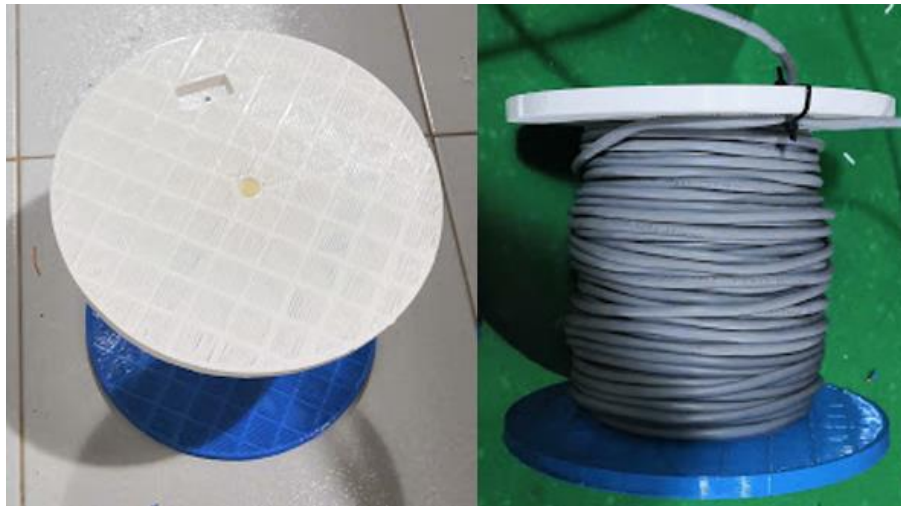


Figura 8.4. Recogedor Ethernet

Una de las observaciones que se tuvieron con respecto a la entrada del dron en un entorno acuático fue la condensación interior que se producían en el tubo. Este fenómeno repercutía en la activación de los sensores de presencia de agua, por lo que con el objetivo de evitar falsas alarmas de entrada de agua se ha diseñado una carcasa de dos piezas que cubre el sensor de la precipitación de gotas de agua desde el techo del tubo y sólo permite la entrada de agua a la altura de la placa en el plano horizontal (Figura 8.5).

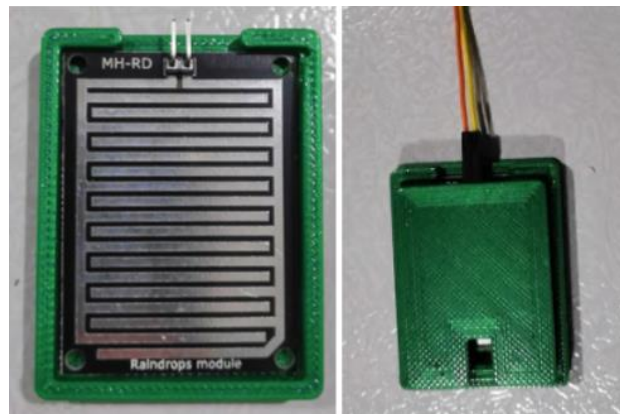


Figura 8.5. Carcasa cubriendo sensor

Además, se decidió aplicar silicona para asegurar que por el perímetro no entrase agua, dado que la precisión de la impresión 3D no es siempre uniforme (Figura 8.6).



Figura 8.6. Carcasa con silicona

9 Resultados

En este capítulo se detallarán los resultados logrados una vez desarrollado el proyecto.

En primer lugar, se ha conseguido diseñar y construir con éxito un prototipo funcional replicable de dron que se puede mover libremente en el mar utilizando un cordón umbilical para ser controlado por el usuario desde tierra. Este dron se ha diseñado de tal manera que durante su operación se encuentra en una situación de equilibrio estable, al tener el centro de gravedad por debajo del centro de flotación y, por tanto, que sus movimientos sean fácilmente controlados.

Paralelamente, el dron ha sido sometido a un conjunto de pruebas de presión entre las que se incluyen: una piscina de agua dulce, un tanque de presión y el mar, siendo exitosas, pues confirmaban la estanqueidad y consistencia del prototipo a 20 metros de profundidad.

Asimismo, se ha verificado la calidad y resistencia de los materiales empleados, destacando el acero inoxidable AISI 304 y 316 por un lado, y, por el otro, las tuberías y accesorios de PVC de presión PN10, que han sido capaces de soportar los problemas de trabajar en un entorno acuático, resistiendo sin ningún problema el posible efecto oxidante.

En cuanto al sistema de control del movimiento, se ha conseguido implementar el mismo satisfactoriamente mediante el uso de los ESC y de los motores T-200, siendo controlados por un ArduPilot APM 2.5. La disposición de los motores en la estructura ha posibilitado que el desplazamiento de agua de los propios motores no afecte al sistema de visión.

Posteriormente, se ha conseguido trabajar con el prototipo durante una duración más que razonable en cada prueba, gracias a la batería LiPo de alta capacidad empleada como fuente de alimentación. La electrónica ubicada en el interior del conjunto de PVC ha funcionado correctamente sin presentar ningún problema durante las pruebas.

10 Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de fin de grado ha servido para conocer con mayor profundidad otros ámbitos que se alejan del contexto específico, aunque éste sea amplio, de aprendizaje de un ingeniero industrial electrónico y automático. Por otro lado, a investigar con rigurosidad para obtener información de calidad y utilidad y, poder aplicar el conocimiento adquirido para diseñar y llevar a cabo la construcción de un prototipo funcional de dron submarino y posteriormente, el sistema de alimentación y de movimiento del prototipo.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se han desempeñado tareas y mejorado habilidades que antes no había realizado y que ni siquiera había tenido en cuenta. Entre este conjunto de elementos, podemos citar los siguientes:

- Análisis riguroso del estado del arte en el entorno de la robótica submarina.
- Diseño mecánico del prototipo de acuerdo a leyes físicas y elección de los materiales empleados en conformidad con los problemas que presenta el mar.
- Diseño de modelos en el espacio 3D para poder conformar el dron, así como, replicarlo e integrar elementos mediante impresión 3D para facilitar la distribución y maniobrabilidad de la electrónica en el interior del prototipo.
- Desarrollo de un procedimiento progresivo de pruebas de presión para simular la operación del dron en condiciones de trabajo antes de llevarse a cabo las mismas en el mar y asegurar la estanqueidad.
- Extracción de información verdaderamente relevante de las hojas de datos consultadas.
- Aplicar una metodología de mejora continua durante el desarrollo del proyecto a la par que solventar los distintos problemas que surgían al trabajar con un sistema real con soluciones eficaces.
- Incentivar el trabajo y el ambiente de equipo entre los integrantes del proyecto.
- Implementar un control del movimiento del dron acorde a las necesidades del prototipo mediante motores adecuados y la electrónica de control de los mismos.
- Diseñar y verificar el correcto comportamiento del sistema de alimentación del conjunto.

Asimismo, me encuentro muy satisfecho con la realización de este proyecto, ya que me ha aportado muchos conocimientos de distintos aspectos íntimamente relacionados con el grado y otros a más distancia, lo que me ha posibilitado tener una visión global más enriquecida del ámbito de la ingeniería electrónica y automática.

Por último, la realización de este trabajo de fin de grado ha servido para obtener un prototipo que desempeña sus funciones satisfactoriamente, consiguiendo durante el desarrollo del mismo, resultados manifiestos.

11 Conclusions

The development of this TFG project has been useful to meet other professional realms not close to the specific context, although this context really broad, of learning a great amount of themes of an electronic and automatic industrial engineer. On the other hand, a highly standard researching has been carried out in order to obtain quality and useful information. Accordingly, the knowledge for the design and to carry out the building of a functional prototype of the submarine robot and later, the feeding system and the movement of the prototype is applied.

Throughout the development of the project, many tasks and improved skills have been performed. Among this set of elements, are mentioned as follows,

- Rigorous analysis of the state of the art in the field of underwater robotics.
- Mechanical design of the prototype according to physical laws and the correct choice of materials in accordance to possible water problems.
- Design of 3D models in order to be able to build a drone, as well as replicating and integrating elements through 3D printing leading to facilitating the distribution and maneuverability of the electronics inside the prototype.
- Development of a progressive pressure testing procedure to simulate the drone operation in working conditions before carrying them out at sea and ensuring water tightness.
- Extraction of truly relevant information from the consulted datasheets.
- Methodology output of continuous improvement during the development of the project at the same time that solving the different problems that arise when working with a real system with effective solutions.
- Encourage teamwork and team environment among the project members.
- Accomplishment of drone movement control according to the needs of the prototype by means of suitable motors and their control electronics.
- Designing and verifying the right behaviour of the whole feeding system.

Likewise, I am very satisfied doing this project, since it has given me a lot of knowledge of different aspects closely related to my degree and other ones at a greater distance, which has enriched me in the global vision of the field of electronic and automatic engineering.

Finally, the completion of this end-of-degree project has served to obtain a prototype that performs its functions satisfactorily, achieving manifest results during its development.

12 Presupuesto del proyecto

El desarrollo del proyecto ha supuesto un conjunto de costes de mano de obra y materiales que se desglosarán en este capítulo. Asimismo, en estos costes están incluidos impuestos directos e indirectos, debido a los costes adicionales que hemos tenido que asumir. También se incluye la seguridad social en el caso que corresponda.

En primer lugar, se expondrán los costes materiales que se han asumido a la hora de construir la estructura final del dron (no se incluyen los costes materiales de los elementos de PVC del primer prototipo, las herramientas disponibles, el material de impresión 3D, el coste de soldadura del Servicio de Mecánica, el coste de prueba en el muelle de Náutica y el coste de prueba en el tanque de presión) y aquellos elementos contemplados en el ámbito de la electrónica del prototipo, en la Tabla 12.1.

Artículo	Unidades	Precio (€) / Unidad	Coste (€)
Batería LiPo 8000MAH 4S1P 30C W/ XT90	1	64,16	64,16 €
MOTOR T-200 Y ESC 30A (BlueRobotics)	5	188,2	941,00 €
MOTOR TURNIGY D2836/8 1100KV	1	12,6	12,60 €
ESC TURNIGY 30A	1	10,28	10,28 €
Penetradores M10 de 6 mm (BlueRobotics)	10	2,73	27,30 €
Penetradores M10 de 8 mm (BlueRobotics)	10	3,62	36,20 €
Regletas plásticas Tamaño L y M	20	0,24	4,80 €
Regleta conexión L	1	3,8	3,80 €
Regleta conexión M	1	1,39	1,39 €
Abrazaderas 18 mm M10	8	0,4	3,20 €
Varilla roscada inox 16 mm	1	7,95	7,95 €
Varilla roscada zincada 10 mm	2	1,3	2,60 €
Varilla roscada inox 10 mm	3	3,85	11,55 €
Ángulo inox 316 40x40x4 (0,86m/1m)	0,86	15,95	13,72 €
Varilla redonda maciza inox 316 M18 2m	1	31,8	31,80 €
Abrazaderas inox 304 3''	4	3,71	14,84 €
Abrazaderas inox A2 M18	8	1,45	11,60 €
Tuerca hexagonal inox M10	8	0,119	0,95 €
Resina Epoxi Poximel	2	7	14,00 €
Jeringuilla 60 ml	1	0,55	0,55 €
Tornillos 912 3x20	20	0,04	0,80 €
Spray de vinilo azul luminoso	1	9,96	9,96 €
ArduPilot APM 2.5	1	27	27,00 €
ArduCopter APM 2.8	2	21,18	42,36 €
Conectores macho-hembra XT90	10	1,064	10,64 €
Conectores bullet	20	0,31	6,20 €
Caja estanca IP66 216x166	1	9,09	9,09 €
Teflón 0,1mmx12m	4	1,18	4,72 €
Cinta de doble cara	1	3,79	3,79 €
Pincel universal plano nº12	2	1,25	2,50 €
Pegamento Nural Juntas negro	2	7,95	15,90 €

Flotador cerco 75 mm	10	1,205	12,05 €
Piscina Ø 230 cm H 50 cm	1	67	67,00 €
Tornillo métrica INOX A4 3x16	10	0,38	3,80 €
Tornillo avellanado INOX A4 3x20	10	0,26	2,60 €
10 Guantes desechables	2	0,89	1,78 €
Tuerca roscada de latón	1	0,78	0,78 €
Terminal PVC rosca hembra	1	1,15	1,15 €
Cinta teflón 0,3 mm 50 m	1	1,75	1,75 €
Pack de 5 juntas de grifo para tornillos	5	1,62	8,10 €
4 Tuercas INOX D10	1	3,2	3,20 €
Pack 6 Cintas Aislantes	2	1,99	3,98 €
Cinta de papel	2	0,85	1,70 €
Manguito U-mixto presión 20	1	1,04	1,04 €
Abrazadera INOX 304 110 mm	4	3,56	14,24 €
Llave fija 2 bocas 18-19 mm	1	7,5	7,50 €
Tapa PVC roscada macho 4"	2	16,05	32,10 €
Tubo 10 atm PVC 1.5m 4"	1	13,87	13,87 €
Terminal R/H PVC 4"	2	11,67	23,34 €
Unión Universal PVC 110 mm	1	29,31	29,31 €
Bridas de nylon	2	1,15	2,30 €
Cinta teflón 0,2 mm 15 metros	1	1,2	1,20 €
Lija tela flexible	2	1,5	3,00 €
Barras de cola termofusible 6 mm	12	0,2	2,40 €
Perfil acero INOX 304 40 mm x4 mm	1	8,42	8,42 €
Abrazaderas INOX tipo RM a 304 3/8"	4	1,24	4,96 €
Tuerca INOX A2	4	0,06	0,24 €
Varilla roscada INOX	2	2,1	4,20 €
Tangit FIX IT 3 metros	7	6,95	48,65 €
Cola termofusible 8 mm	1	2,3	2,30 €
Brida natural	1	4,95	4,95
Flotador 135 mm	1	2,05	2,05
Flotador cerco 75 mm	1	1,17	1,17
Flotador cerco 80 mm	1	1,31	1,31
Conjunto de flotadores	1	11,99	11,99
Cuerda de sujeción trenzada	1	19,95	19,95
Coste total (€)			1.695,63 €

Tabla 12.1. Costes materiales del prototipo

A continuación, se puede consultar el desglose del coste asociado a las horas empleadas en el desarrollo de los distintos aspectos del proyecto, incluyendo impuestos en la mano de obra en la Tabla 12.2.

Concepto	Horas	Coste (€) / Hora	Importe (€)
Diseño estructural del prototipo	220	25	5.500,00 €
Cálculos estructurales	40	20	800,00 €
Fabricación del prototipo	60	20	1.200,00 €
Pruebas de desempeño	80	20	1.600,00 €
Diseño del sistema de alimentación	35	25	875,00 €
Diseño y programación del sistema de movimiento	65	25	1.625,00 €
Diseño de piezas impresas en 3D	20	20	400,00 €
Redacción del proyecto	40	18	720,00 €
Coste total (€)			12.720,00 €

Tabla 12.2. Coste de mano de obra del prototipo

Por último, se muestra el coste total de desarrollo de este TFG, en el que se incluyen los costes detallados de las tablas anteriores (Tabla 12.1 y Tabla 12.2), en la Tabla 12.3.

Concepto	Coste (€)
Costes materiales	1.695,63 €
Coste de mano de obra	12.720,00 €
Coste total (€)	14.415,63 €

Tabla 12.3. Coste total del TFG

13 Bibliografía empleada

- [1] «Puertos de Tenerife,» [En línea]. Available: <https://www.puertosdetenerife.org/index.php/tf-muelles-y-darsenas/tf-santa-cruz-de-tenerife>. [Último acceso: 19 9 2018].
- [2] «ROS,» [En línea]. Available: <http://wiki.ros.org/es>. [Último acceso: 23 11 2018].
- [3] «Glider,» [En línea]. Available: <http://medcliv.es/es/instrumentos/glider/>. [Último acceso: 09 15 2018].
- [4] «ROV,» [En línea]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/11ab/ea5add163b07a8e30e8449aea7968bc84df.pdf>. [Último acceso: 15 9 2019].
- [5] «PoE+,» [En línea]. Available: <https://www.technologyintegrator.net/article/power-over-ethernet-what-does-updated-8023at-poe-standard-mean-you/all/>. [Último acceso: 23 9 2018].
- [6] «BlueRov2,» [En línea]. Available: <https://www.bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/bluerov2/>. [Último acceso: 17 9 2018].
- [7] «Autodesk Inventor 2019,» [En línea]. Available: <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview>. [Último acceso: 5 9 2018].
- [8] «Cura 3.6.1,» [En línea]. Available: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>. [Último acceso: 7 2 2019].
- [9] «Arduino IDE 1.8.9,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. [Último acceso: 3 2 2019].
- [10] «Microsoft Excel 365,» [En línea]. Available: <https://products.office.com/es-es/excel>. [Último acceso: 5 9 2018].
- [11] «GitHub,» [En línea]. Available: <https://github.com/>. [Último acceso: 5 9 2018].
- [12] «Mission Planner 1.3.62,» [En línea]. Available: <http://ardupilot.org/planner/>. [Último acceso: 16 1 2019].
- [13] «Google Drive,» [En línea]. Available: https://www.google.com/intl/es_ALL/drive/. [Último acceso: 5 9 2018].
- [14] «Tuberías PVC,» [En línea]. Available: http://www.tuyper.es/opencms/export/sites/tuyper/galeria_descarga/productos/01_tuberiaPVC/03abastecimiento_riego/01Catalogo_PRESION_PVC.pdf. [Último acceso: 11 10 2018].
- [15] «Acero inoxidable,» [En línea]. Available: <http://www.bonnet.es/Productos/Catalogos/Inoxidable/aceroinox.pdf>. [Último acceso: 18 11 2018].
- [16] «Centro de gravedad,» [En línea]. Available: http://fcm.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA_II/APUNTES/ESTABILIDAD.htm. [Último acceso: 14 10 2018].
- [17] H. A. Moreno, «Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, pp. 13-19, 2014.
- [18] «Equilibrio estable,» [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/equilibrio-estable-inestable/>. [Último acceso: 12 10 2018].
- [19] «Metacentro,» [En línea]. Available: <http://www.patrondeyate.net/wordpress/tag/metacentro/>. [Último acceso: 13 10 2018].

- [20] «AISI 304 y 316,» [En línea]. Available: <https://www.reliance-foundry.com/blog/acero-inoxidable-304-vs-316-es#gref>. [Último acceso: 15 10 2018].
- [21] «Carcasa de cámara de acción estanca,» [En línea]. Available: https://www.mediamarkt.es/es/product/_c%C3%A1mara-deportiva-nk-bf-lente-120-4p-pantalla-2-video-1080-p-30-fps-1439141.html. [Último acceso: 17 1 2019].
- [22] «Penetradores BlueRobotics 6mm,» [En línea]. Available: <https://www.bluerobotics.com/store/cables-connectors/penetrators/penetrator-10-25-a/>. [Último acceso: 20 11 2018].
- [23] «Penetradores BlueRobotics 8mm,» [En línea]. Available: <https://www.bluerobotics.com/store/cables-connectors/penetrators/penetrator-10-25-a-8mm-r2/>. [Último acceso: 20 11 2018].
- [24] «Cable Ethernet CAT 5 E,» [En línea]. Available: https://t3.lappcdn.com/fileadmin/DAM/Lapp_LatAm/Catalogo_por_Marcas/ETHERLIN E.pdf. [Último acceso: 13 12 2018].
- [25] «Blue Robotics Thrusters T-200,» [En línea]. Available: <https://www.bluerobotics.com/store/rov/bluerov2-components-spares/t200-bluerov2-spare-r1/>. [Último acceso: 20 11 2018].
- [26] «Nural 60 de Pattex,» [En línea]. Available: <http://www.pattex.es/pagina-de-inicio/productos/especialidades/para-el-profesional/juntas/nural-60.html>. [Último acceso: 15 12 2018].
- [27] «PVC-U de Tangit,» [En línea]. Available: <https://www.generaladhesivos.com/comprar-pegamento-cola-de-pvc-tangit-649>. [Último acceso: 22 12 2018].
- [28] «Cinta vulcanizante Fix It de Tangit,» [En línea]. Available: <https://www.generaladhesivos.com/comprar-pegamento-cola-de-pvc-tangit-649>. [Último acceso: 4 1 2019].
- [29] «ArduPilot APM 2.5,» [En línea]. Available: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-apm25-and-26-overview.html>. [Último acceso: 16 1 2019].
- [30] «BlueRobotics ESC,» [En línea]. Available: <http://docs.bluerobotics.com/bluesc/>. [Último acceso: 20 11 2018].
- [31] «Prueba de los motores T-200 a 3000 metros de profundidad,» [En línea]. Available: <https://www.bluerobotics.com/pressure-testing-3000m-depth/>. [Último acceso: 20 11 2018].
- [32] «Baterías LiPo,» [En línea]. Available: <https://erlebotics.gitbooks.io/erle-robotics-erle-copter/es/safety/lipo.html>. [Último acceso: 12 12 2018].
- [33] «Cálculo de la duración de la batería,» [En línea]. Available: <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/EN/calculator/battery-runtime/>. [Último acceso: 22 2 2019].
- [34] «Cargador de batería Turnigy,» [En línea]. Available: http://rcnavalcarnero.es/TURNIGY6_manual_esp.pdf. [Último acceso: 18 1 2019].

14 Anexos

14.1 Elementos que conforman el prototipo

14.1.1 Componentes del diseño

A continuación, se muestran los componentes diseñados en el Autodesk Inventor y que forman parte del ensamblaje final (Figura 14.1).

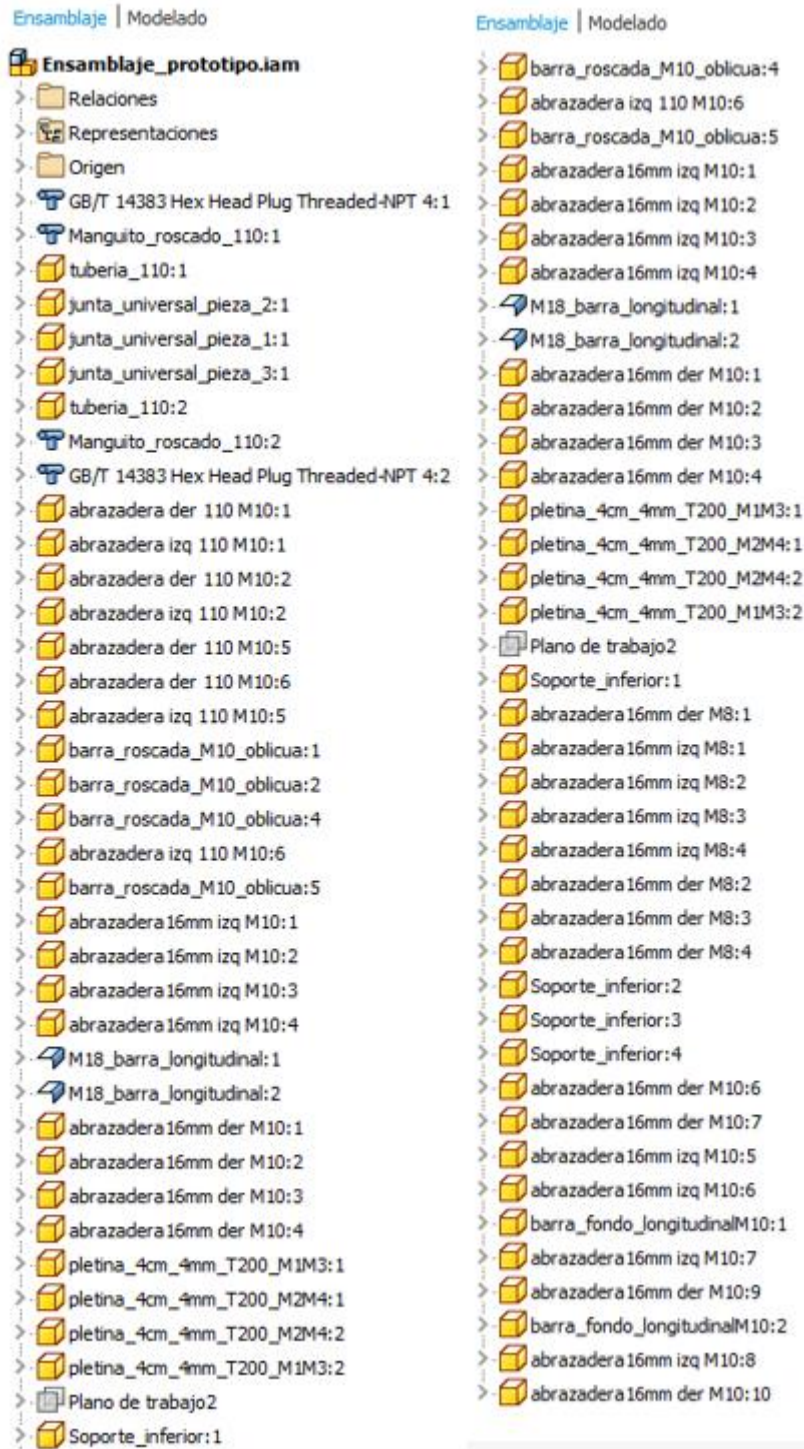
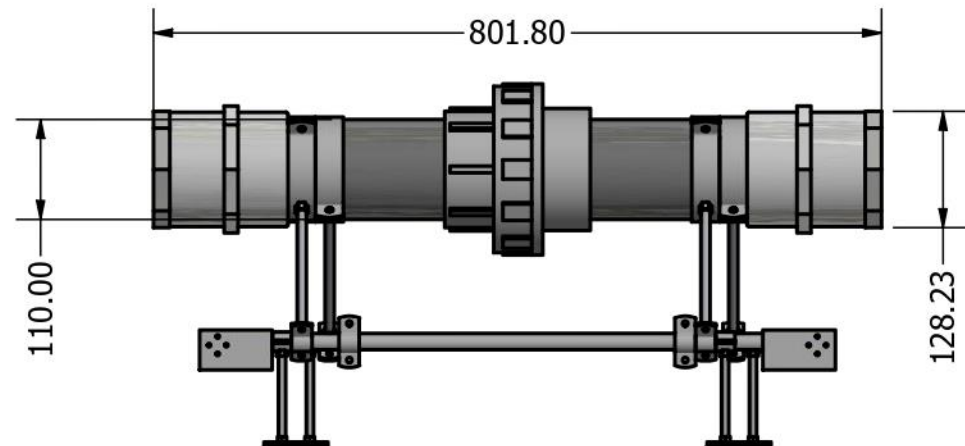
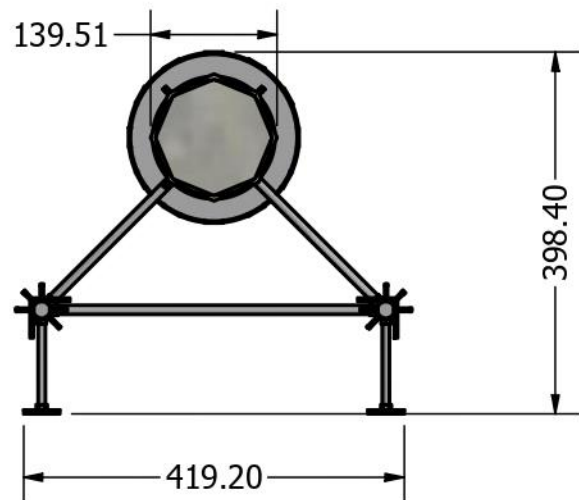
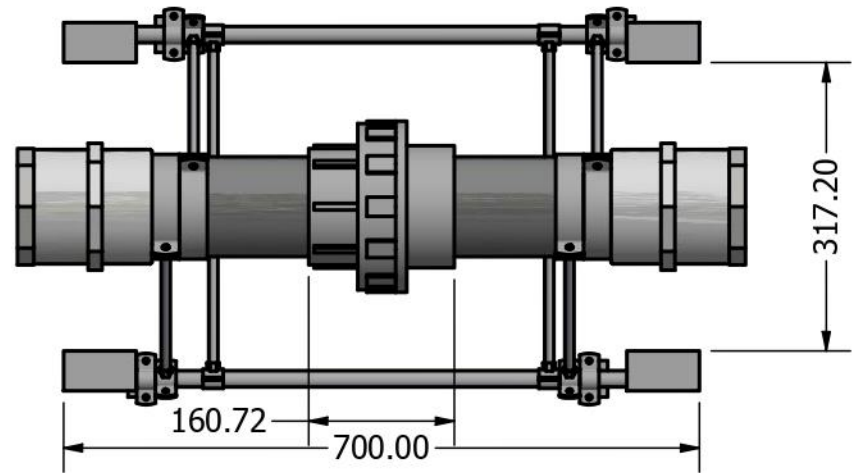
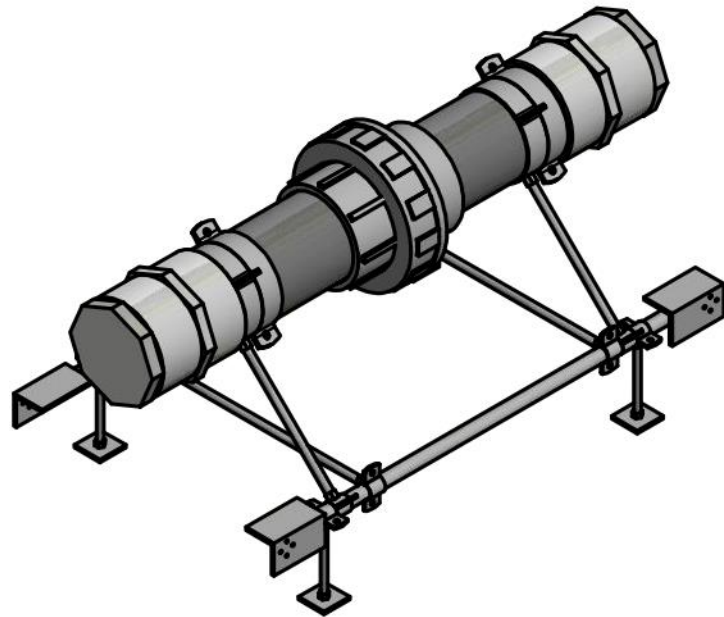


Figura 14.1. Lista de componentes diseñados para desarrollar el prototipo

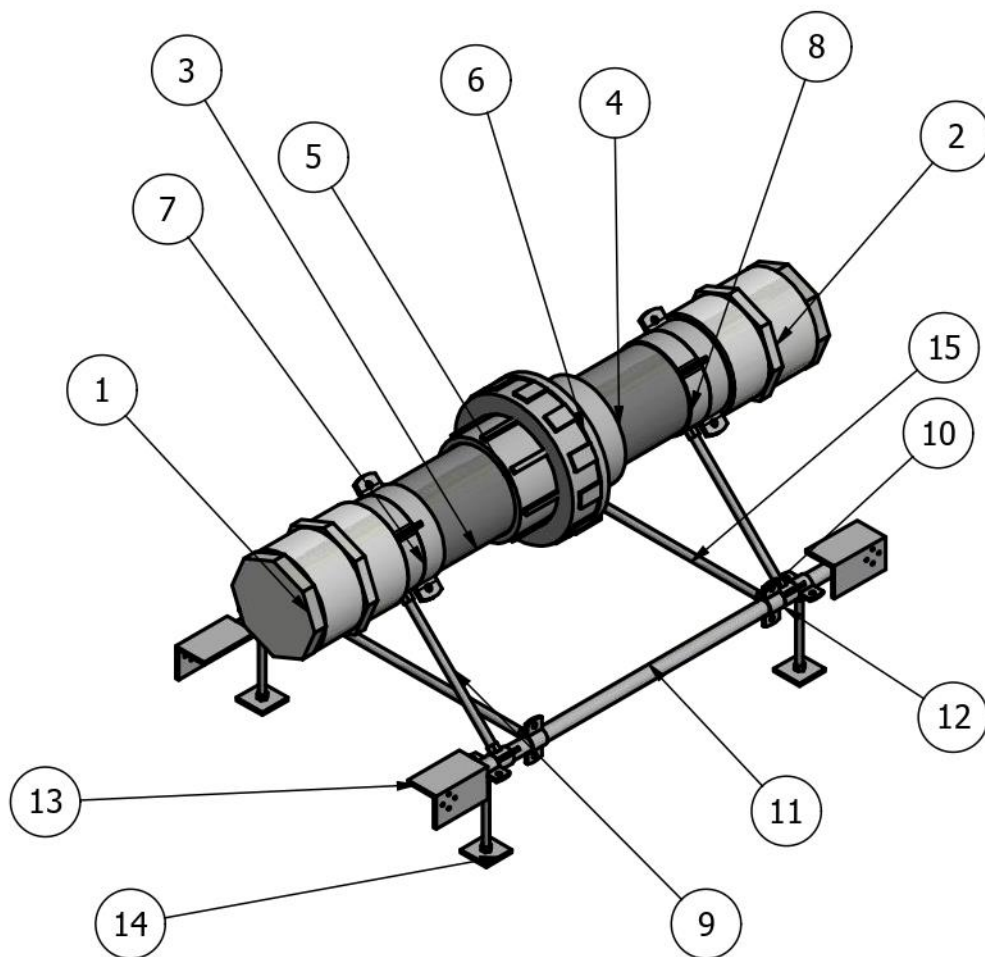
14.1.2 Planos

A continuación, se mostrarán los planos de los elementos que conforman el dron, así como, las piezas impresas en 3D diseñadas.

14.1.2.1 Planos del desglose de componentes de la estructura



	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez				
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 0,12:1	Ensamblaje del prototipo			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1	
				Nombre del archivo : Ensamblaje_prototipo		



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	2	GB/T 14383 4 HHP NPT
2	2	DIN 8063 Manquito tipo MGI 63
3	2	tuberia_110
4	1	junta_universal_pieza_2
5	1	junta_universal_pieza_1
6	1	junta_universal_pieza_3
7	4	abrazadera der 110 M10
8	4	abrazadera izq 110 M10
9	4	barra_roscada_M10_oblicua
10	12	abrazadera16mm izq
11	2	M18_barra_longitudinal
12	12	abrazadera16mm der
13	4	pletina_4cm_4mm_espesor
14	4	Soporte_inferior
15	2	barra_fondo_longitudinalM10

	Fecha	Autor
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Universidad de La Laguna

ESCALA:
0,12:1

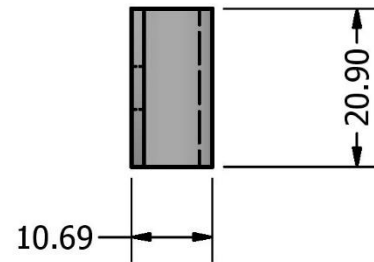
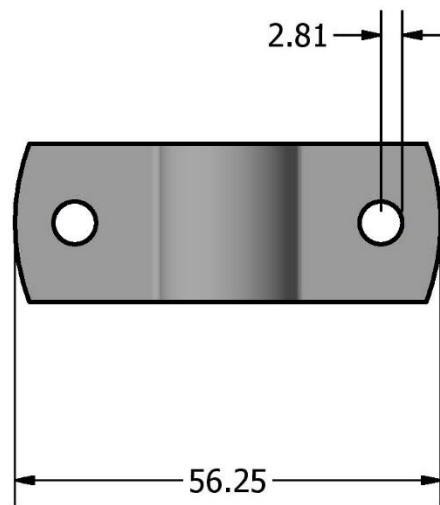
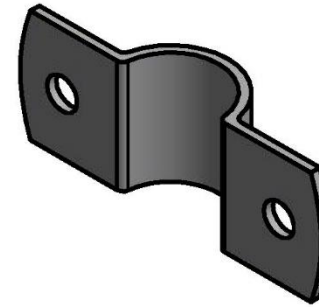
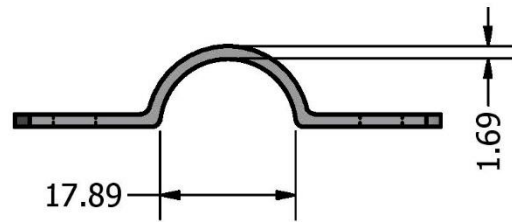
Lista de piezas

Tamaño: A4

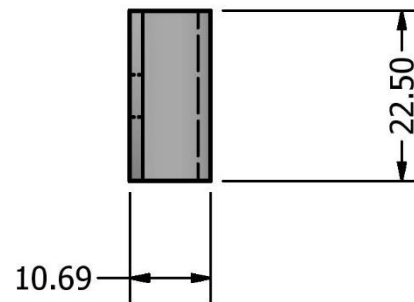
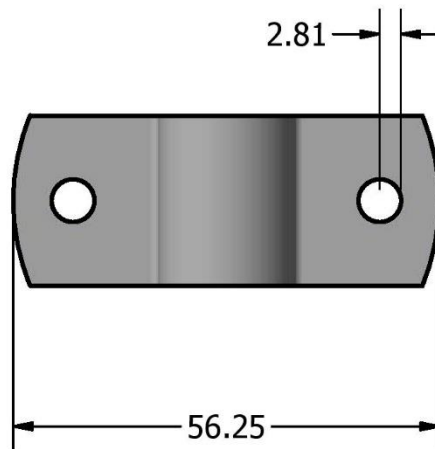
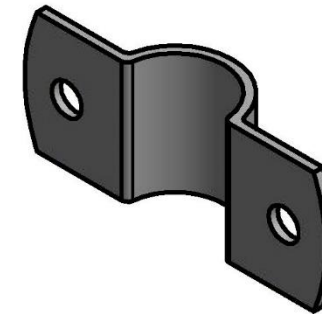
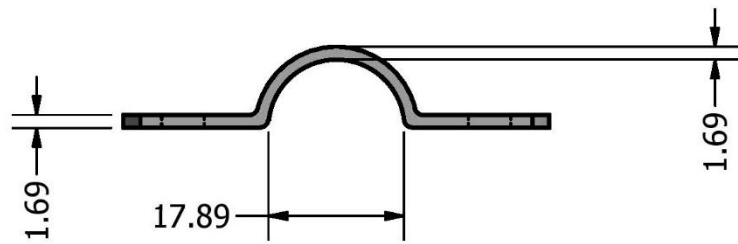
Nº de página: 1 de 1

Nombre del archivo : Ensamblaje_prototipo

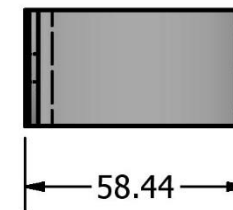
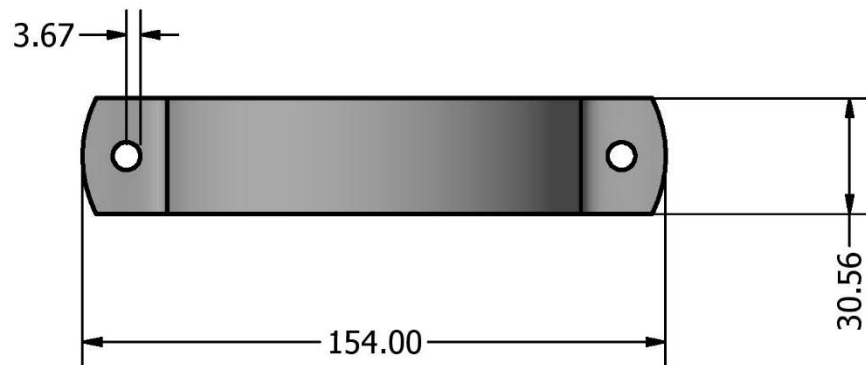
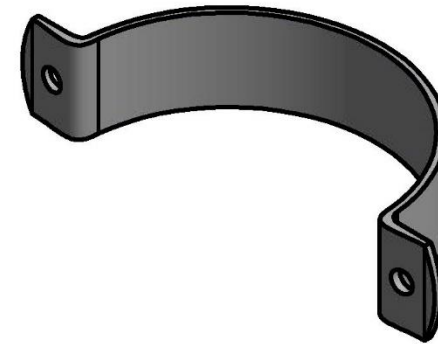
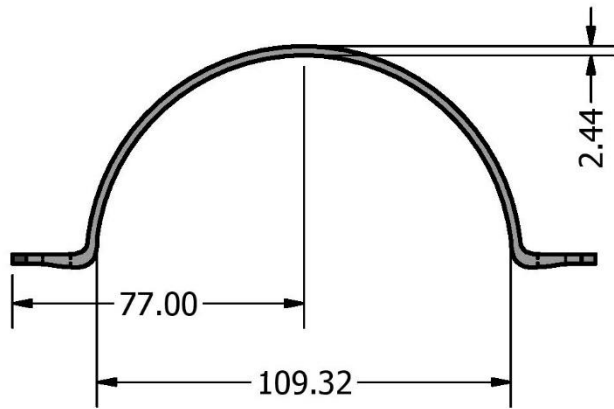
14.1.2.2 Planos de los componentes de la estructura



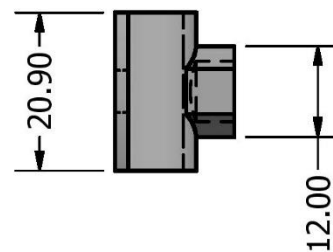
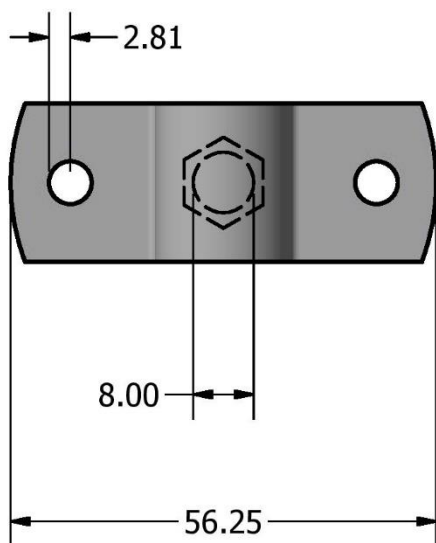
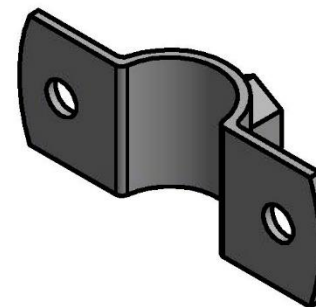
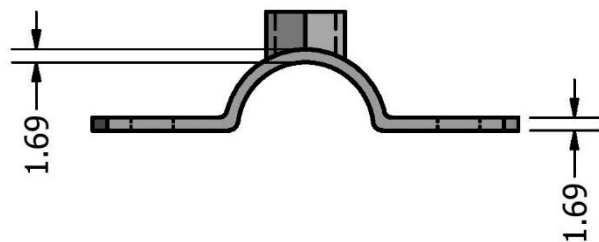
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:1	Abrazadera sin tuerca 16 mm M8			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: abrazadera16mm der M8	



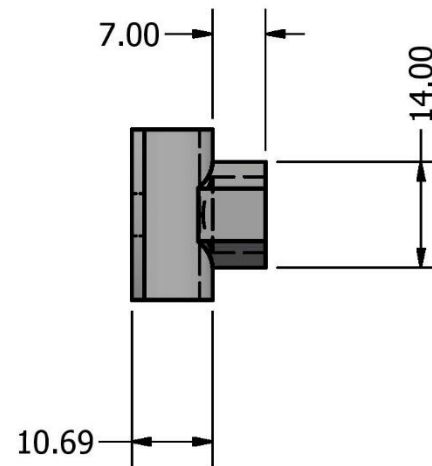
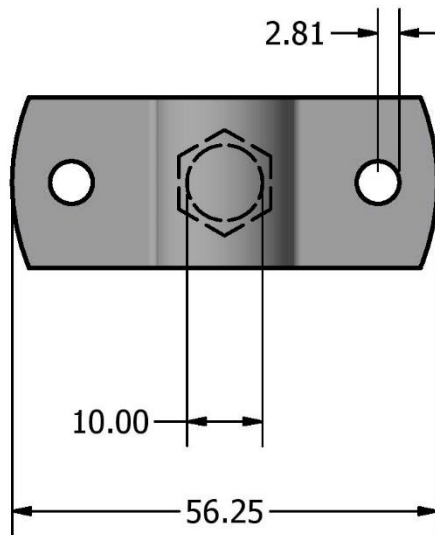
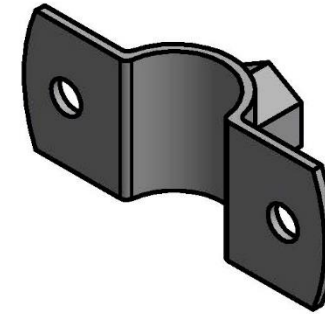
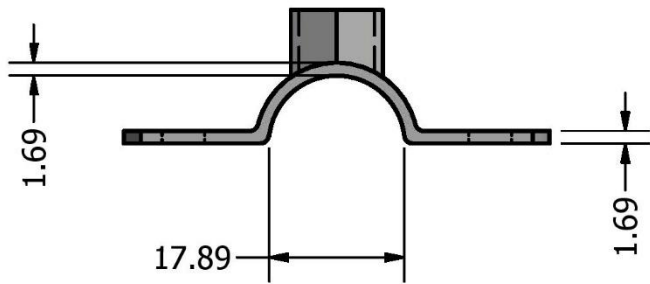
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA:	Abrazadera sin tuerca 16 mm M10			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
1:1				Nombre del archivo: abrazadera16mm der M10	



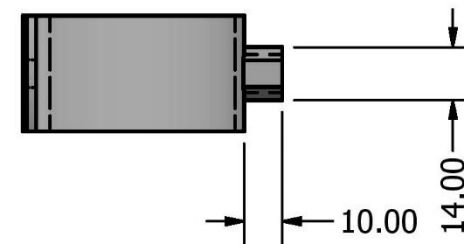
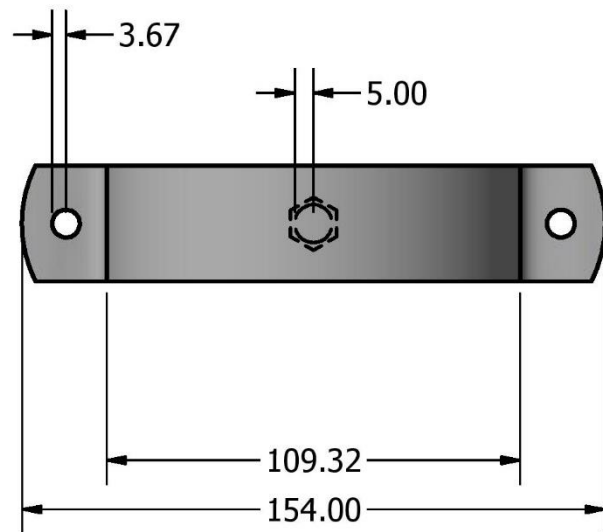
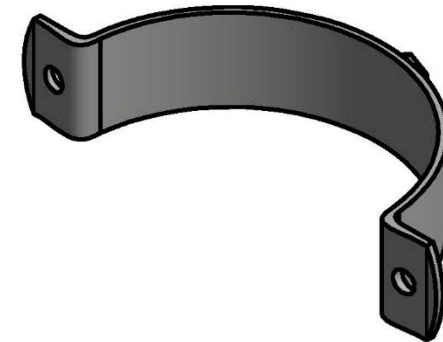
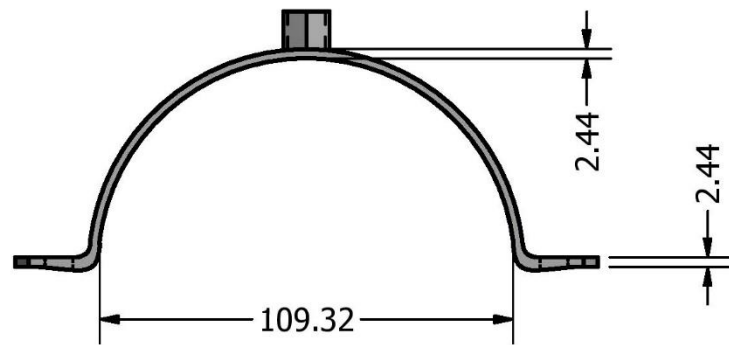
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez				
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 1:2	Abrazadera sin tuerca 110 mm M10			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1	
				Nombre del archivo : abrazadera der 110 M10		



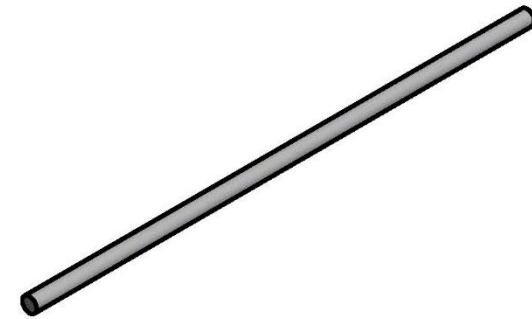
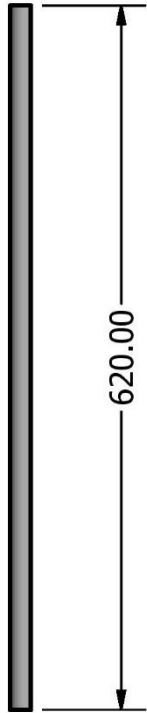
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez			
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA:	Abrazadera con tuerca 16 mm M8			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
1:1				Nombre del archivo: abrazadera16mm zq M8	



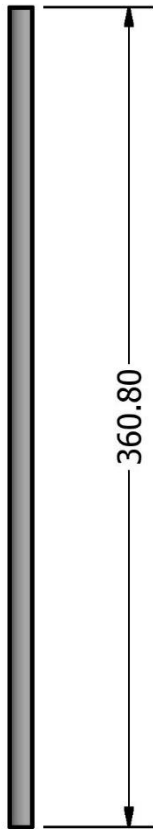
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA:	Abrazadera con tuerca 16 mm M10			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
1:1				Nombre del archivo: abrazadera16mm zq M10	



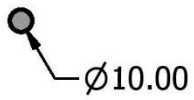
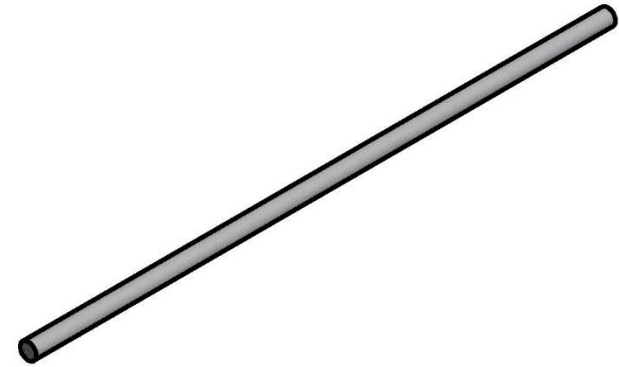
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:2	Abrazadera con tuerca 110 mm M10			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: abrazadera izq 110 M10	



	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 0,15:1	Barra longitudinal M18			Tamaño: A4 N° de página: 1 de 1 Nombre del archivo: M18_barra_longitudina



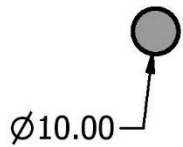
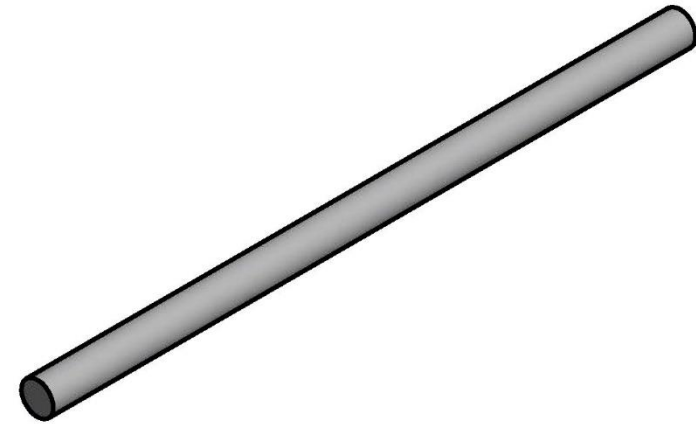
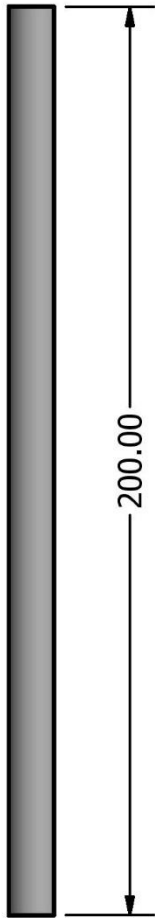
360.80



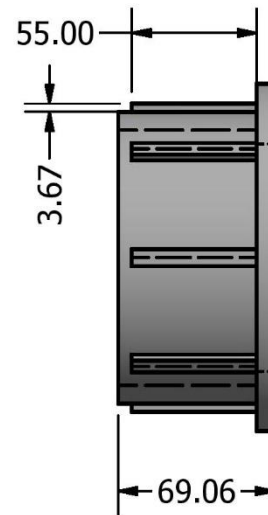
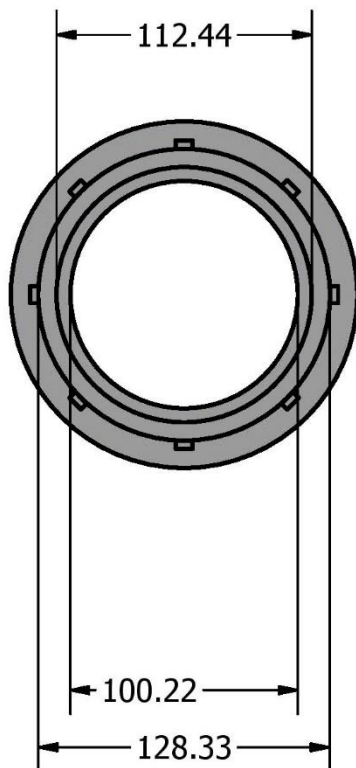
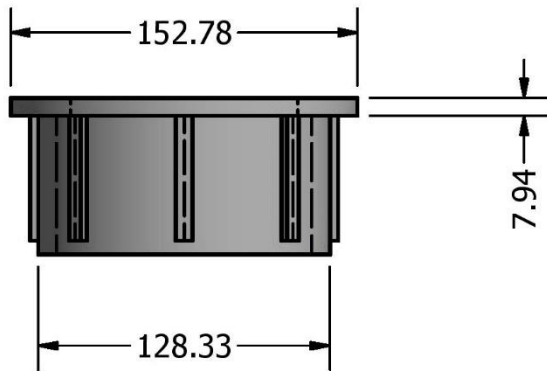
Ø10.00



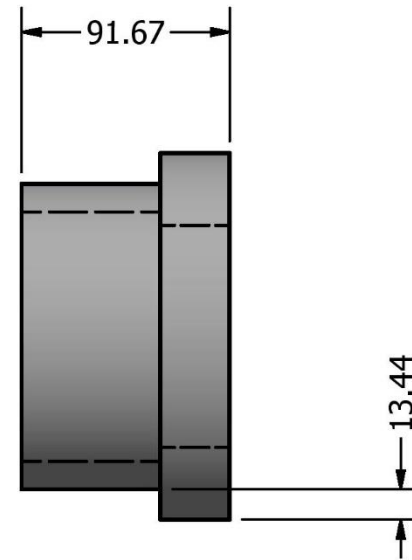
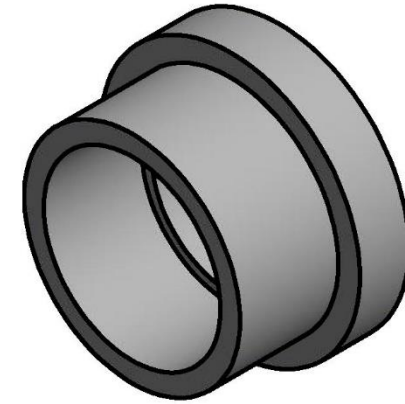
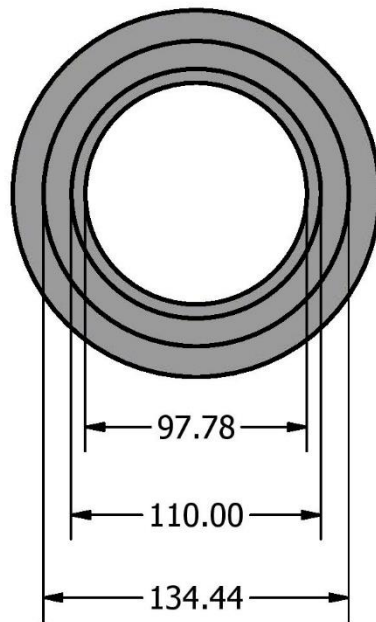
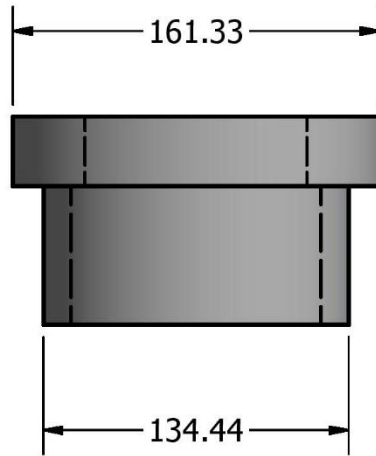
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 0,3:1	Barra longitudinal M10			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: barra_fondo_longitudinalM10	



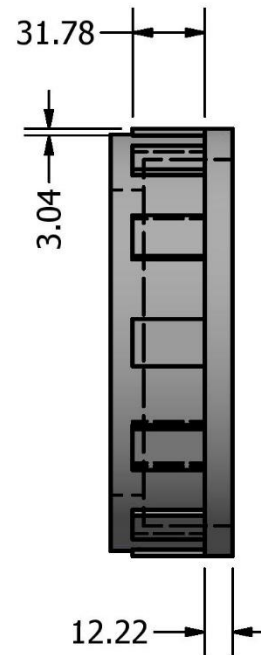
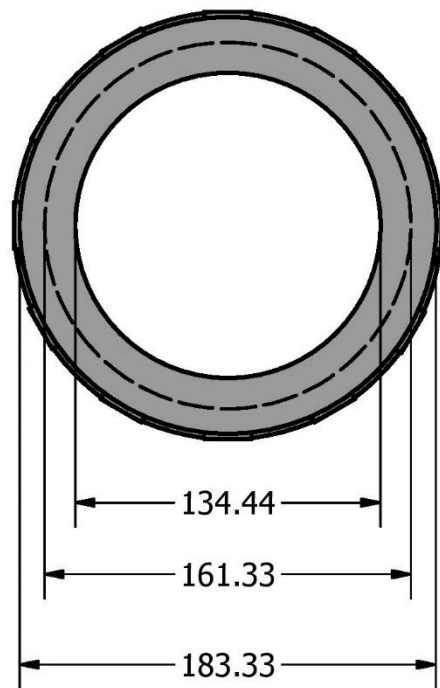
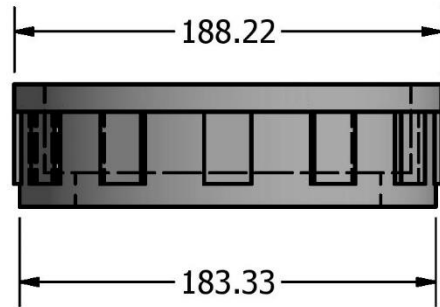
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 0,6:1	Barra oblicua M10			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: barra_roscada_M10_oblicua	



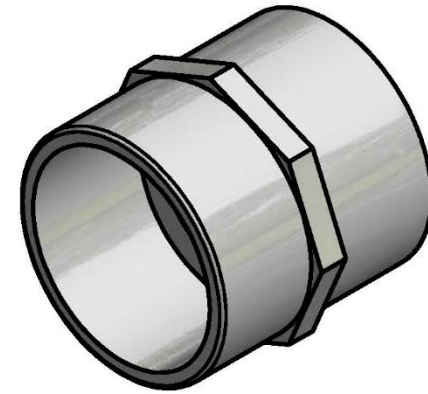
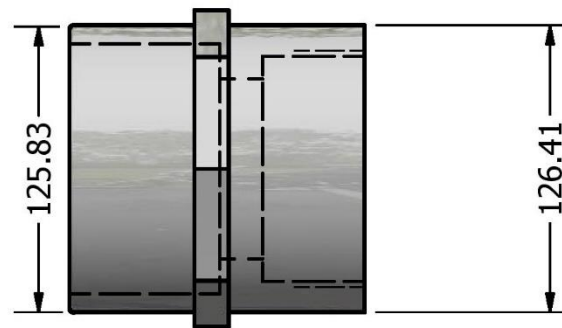
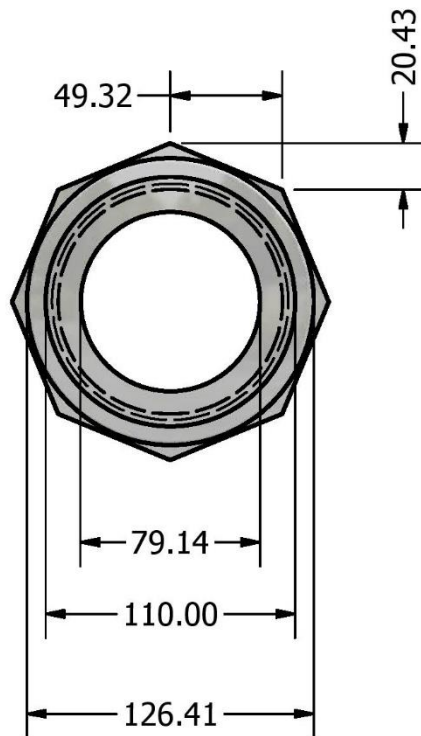
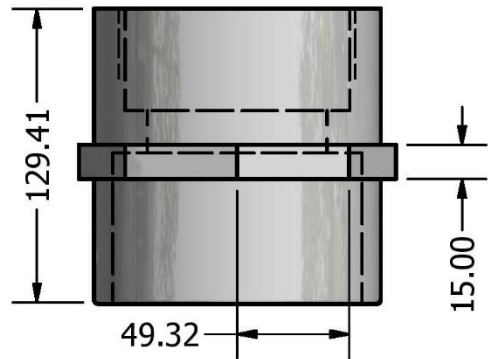
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 0,3:1	Acople izquierdo junta universal			Tamaño: A4	N° de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: junta_universal_pieza_1	



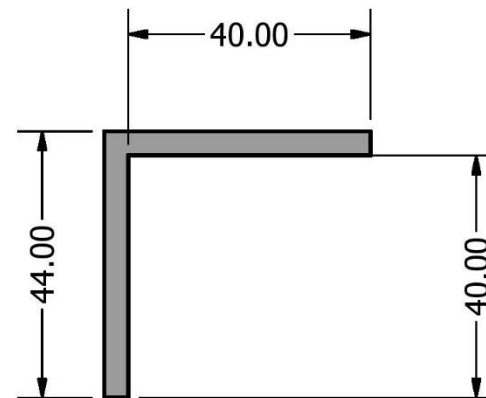
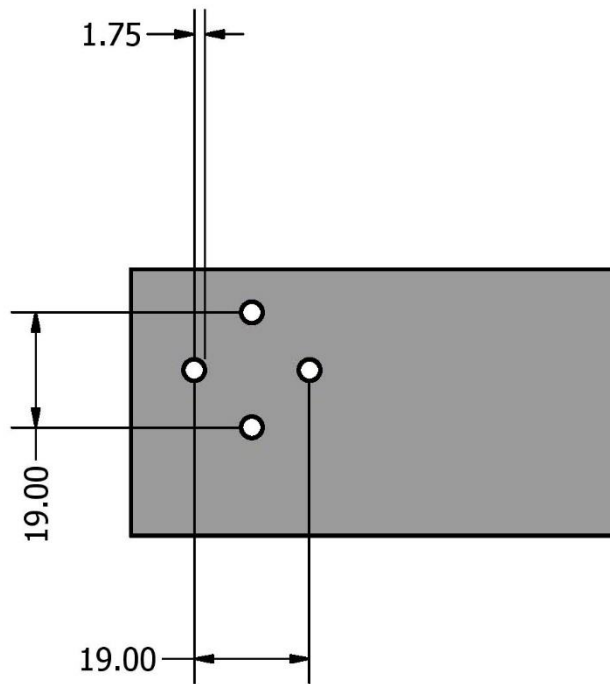
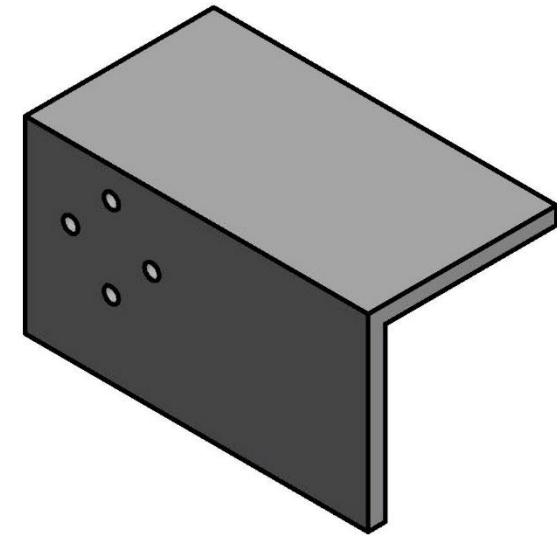
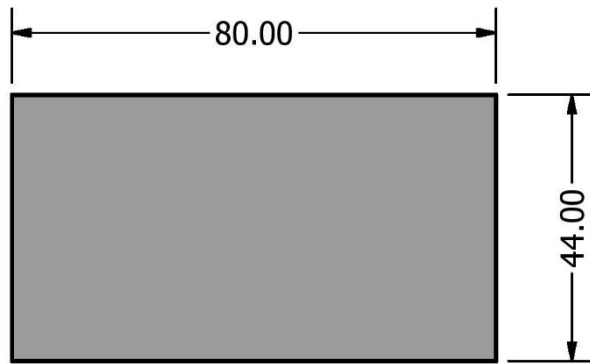
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez				
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 0,3:1	Acople derecho junta universal				Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
					Nombre del archivo: junta_universal_pieza_2	



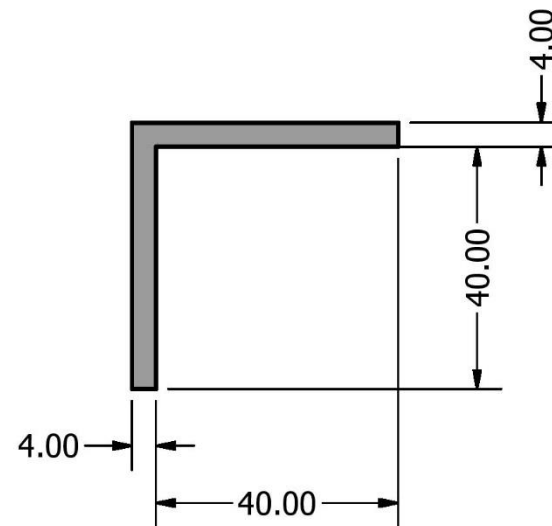
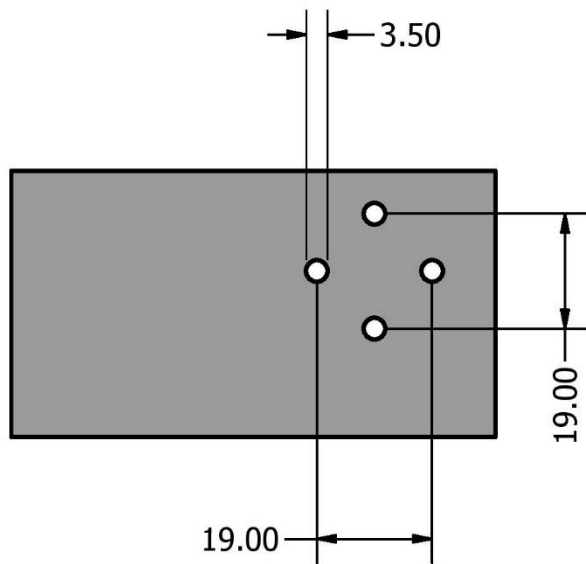
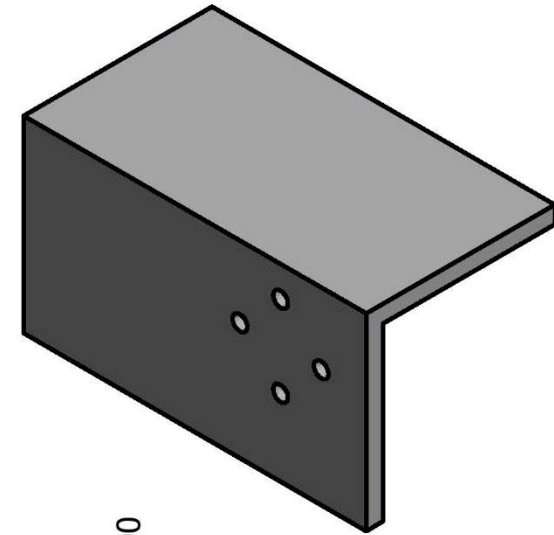
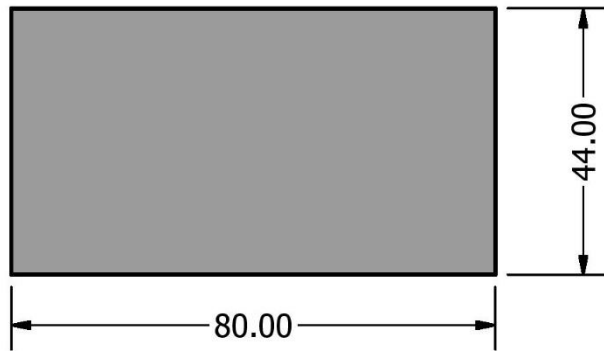
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez				
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 0,3:1	Elemento central junta universal			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1	
				Nombre del archivo: junta_universal_pieza_3		



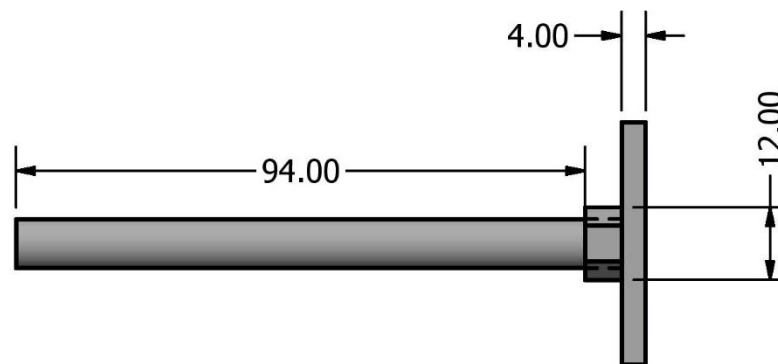
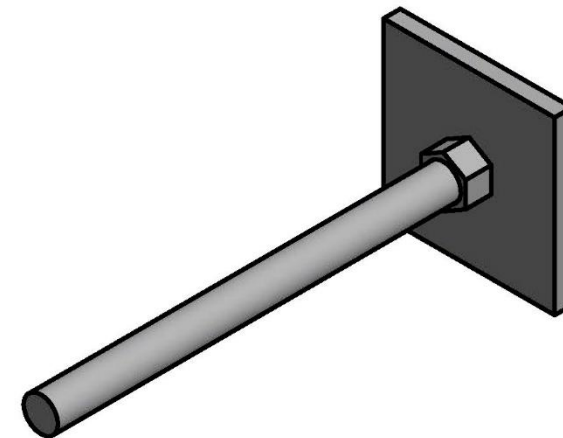
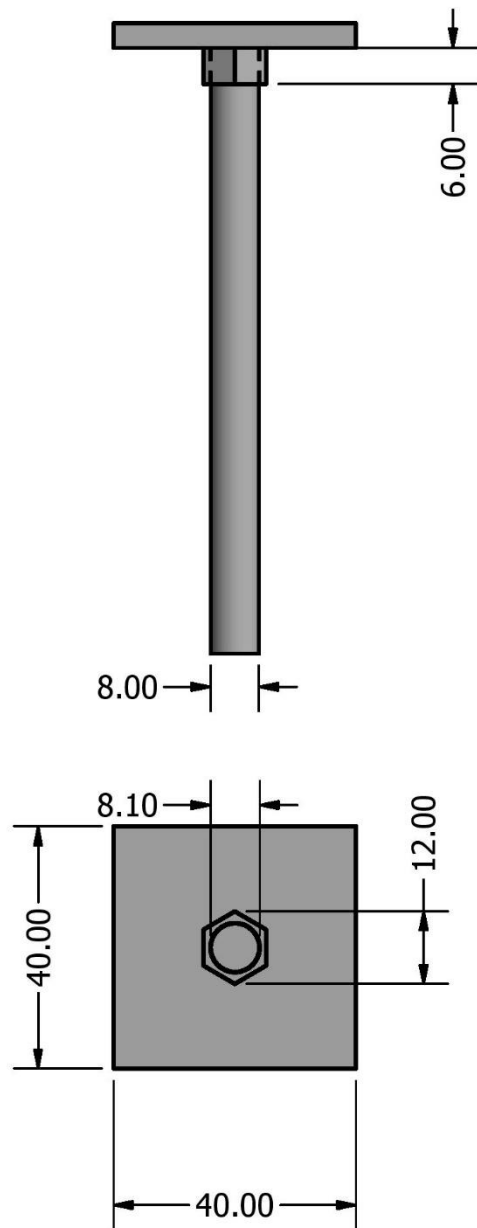
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez				
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 0,3:1	Manguito roscado 110 mm				Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
					Nombre del archivo: Manguito_roscado_110	




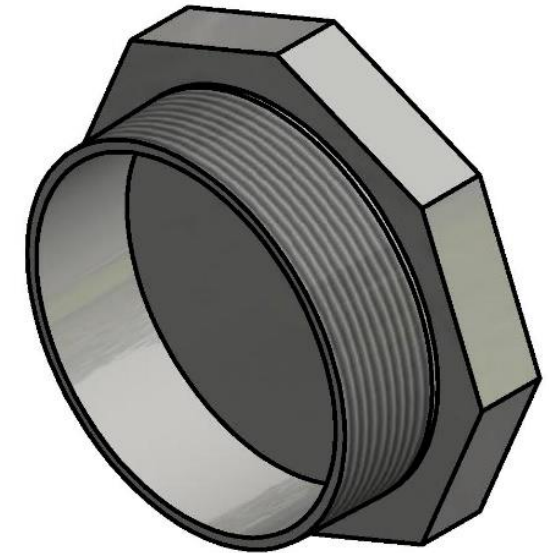
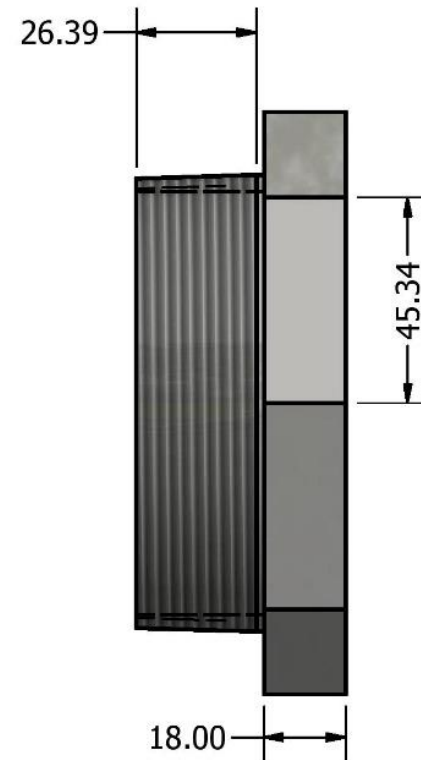
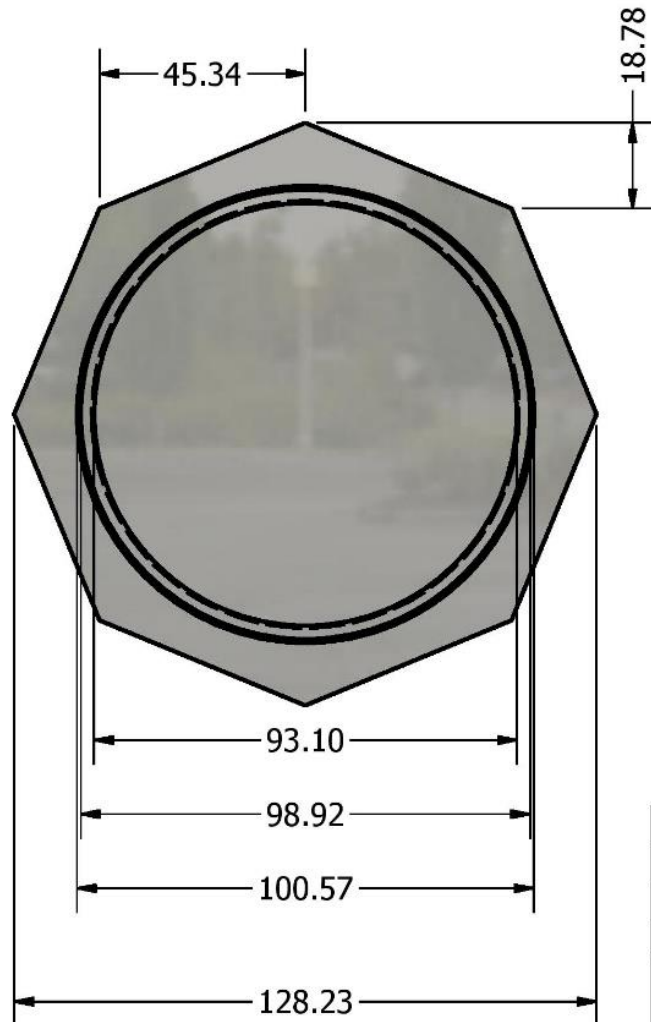
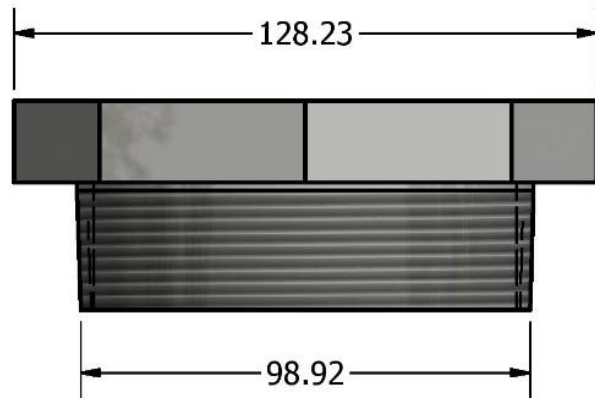
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 0,8:1	Perfil para soporte de motores M1 y M3			Tamaño: A4 N° de página: 1 de 1 Nombre del archivo: pletina_4cm_4mm_T200_M1M3



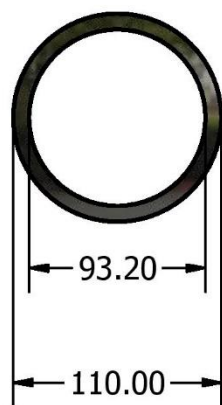
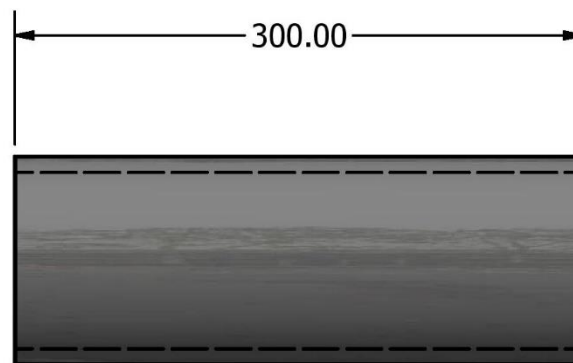
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 0,8:1	Perfil para soporte de motores M2 y M4			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: pletina_4cm_4mm_T200_M2M4	



	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez				
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 0,8:1	Soporte inferior				Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1

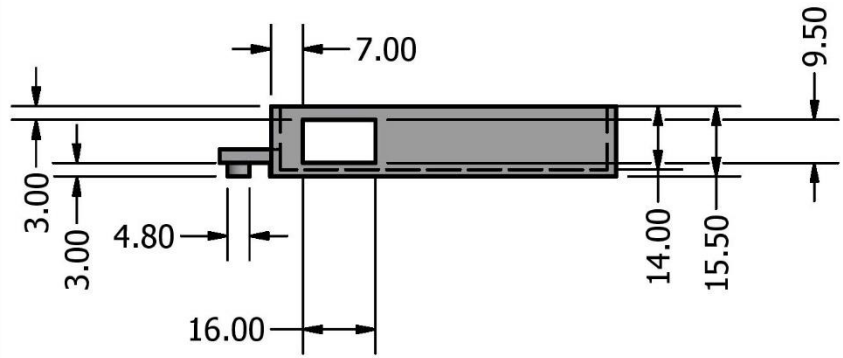
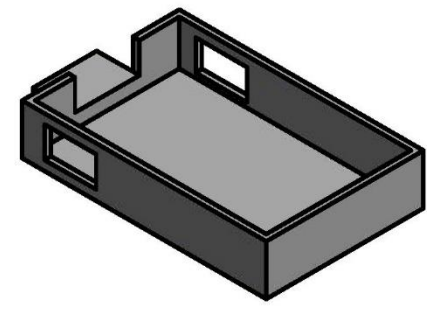
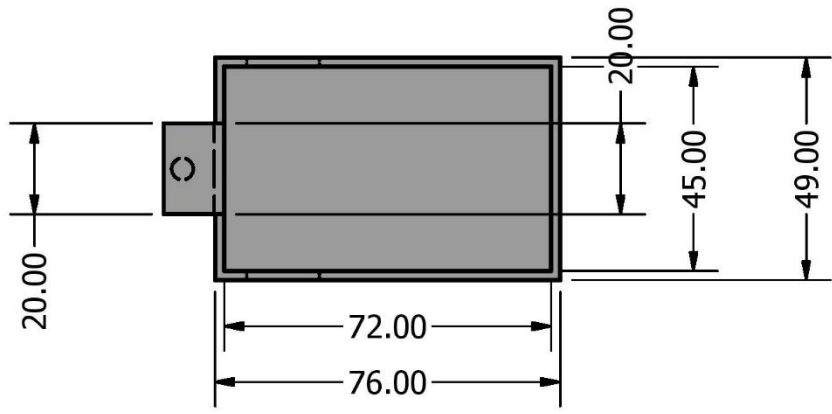


	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 0,6:1	Tapón roscado 110 mm			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
					Nombre del archivo: Tapon_roscado_110



	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez			
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:4	Segmento de tubería 110 mm			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: tuberia_110	

14.1.2.3 Planos de las piezas diseñadas en 3D



	Fecha	Autor
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez
Id. s. normas	UNE-EN-DIN	

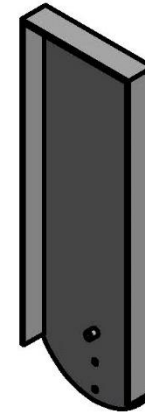
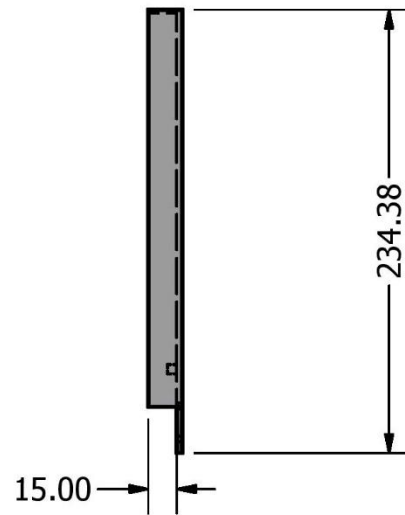
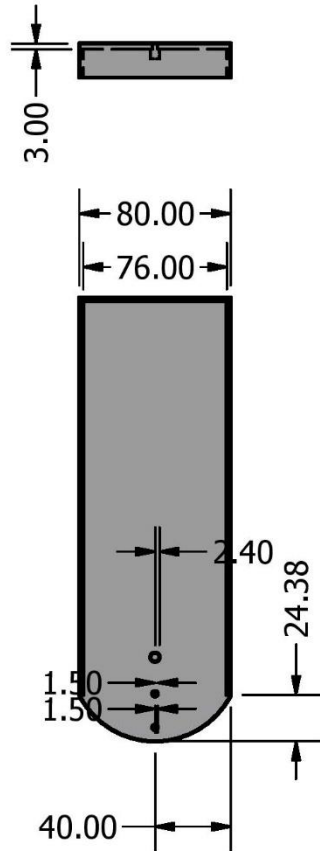


ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
 INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA
 Universidad de La Laguna

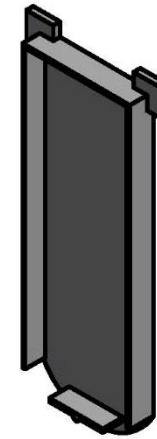
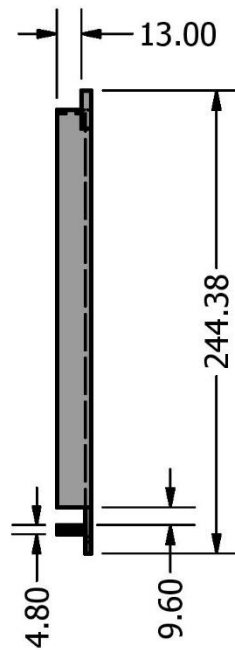
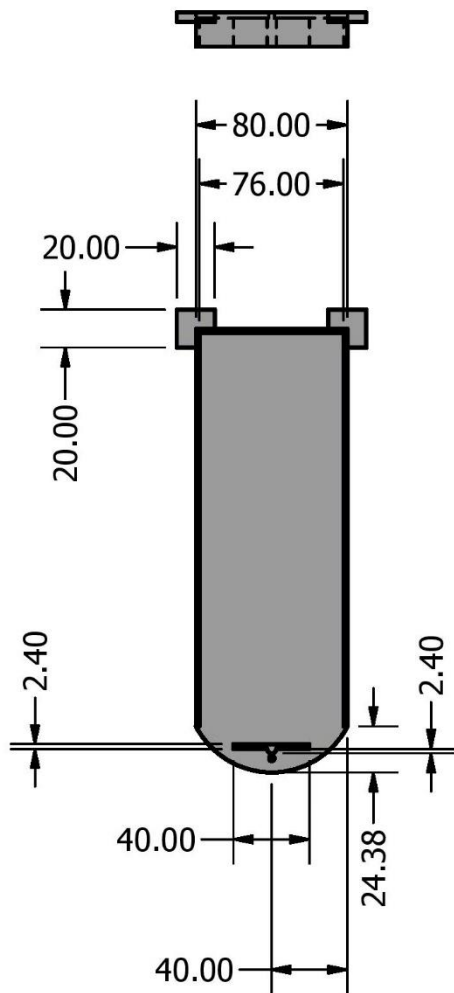
ESCALA:
0,6:1

Soporte ArduCopter

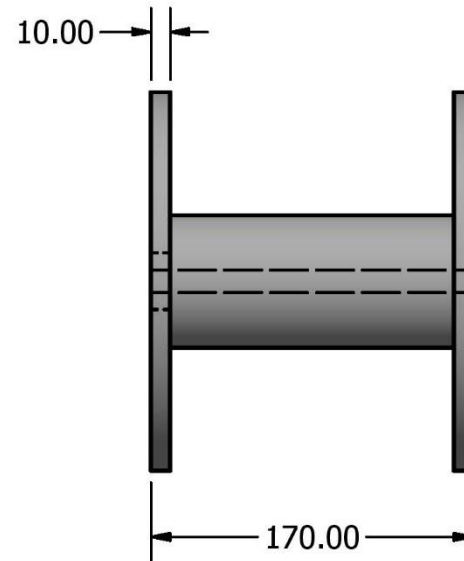
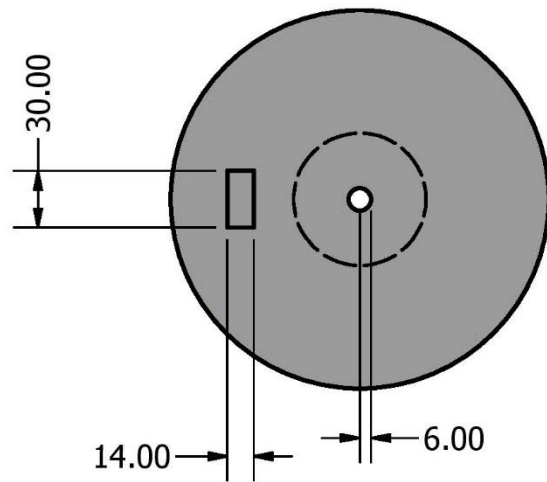
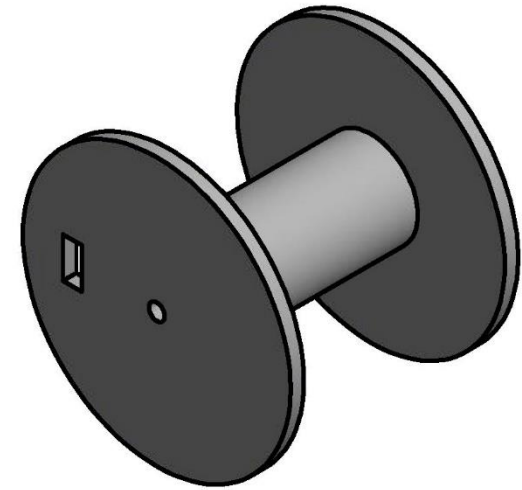
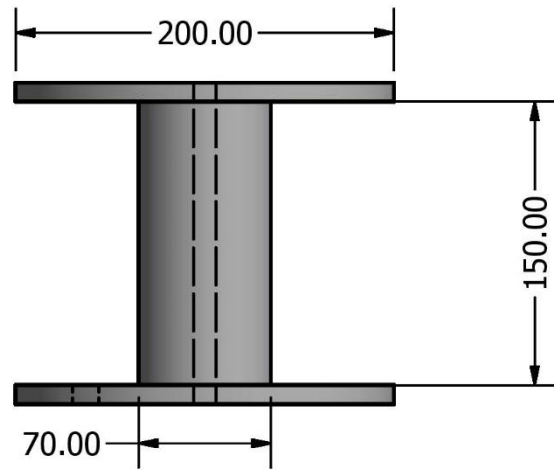
Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
Nombre del archivo: Arducopter_soporte	




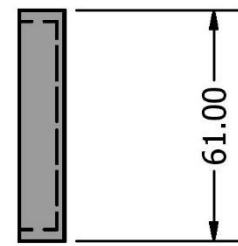
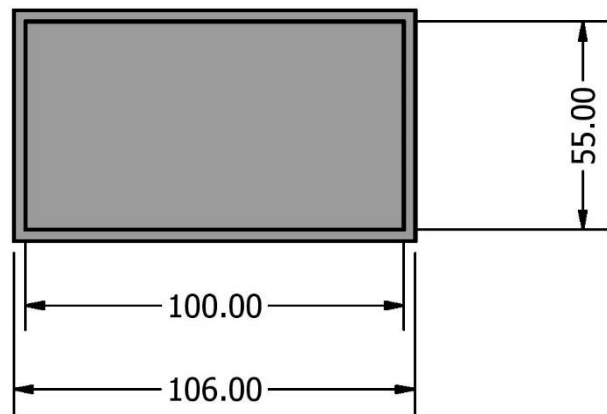
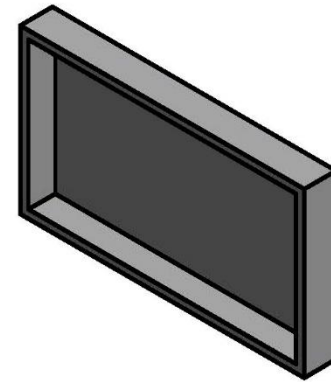
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez			
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:4	Bandeja portaelectrónica inferior			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: bandeja_larga_electrónica	



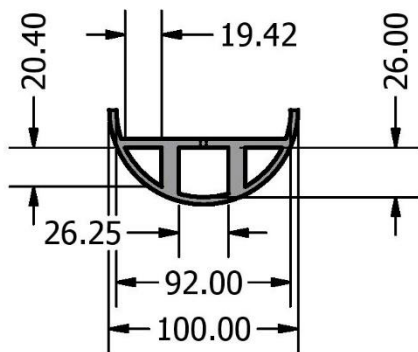
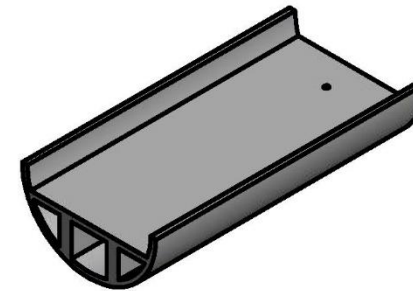
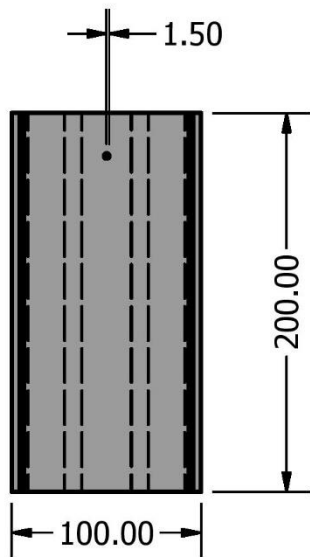
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna		
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 1:4	Bandeja portaelectrónica superior			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1	
				Nombre del archivo: bandeja_larga_electrónica_parte_superior		



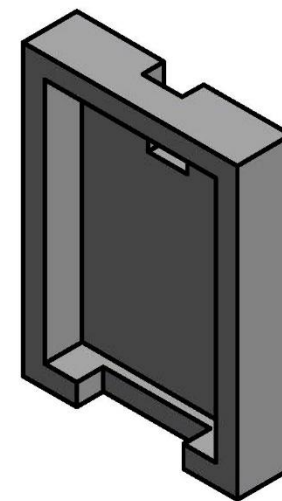
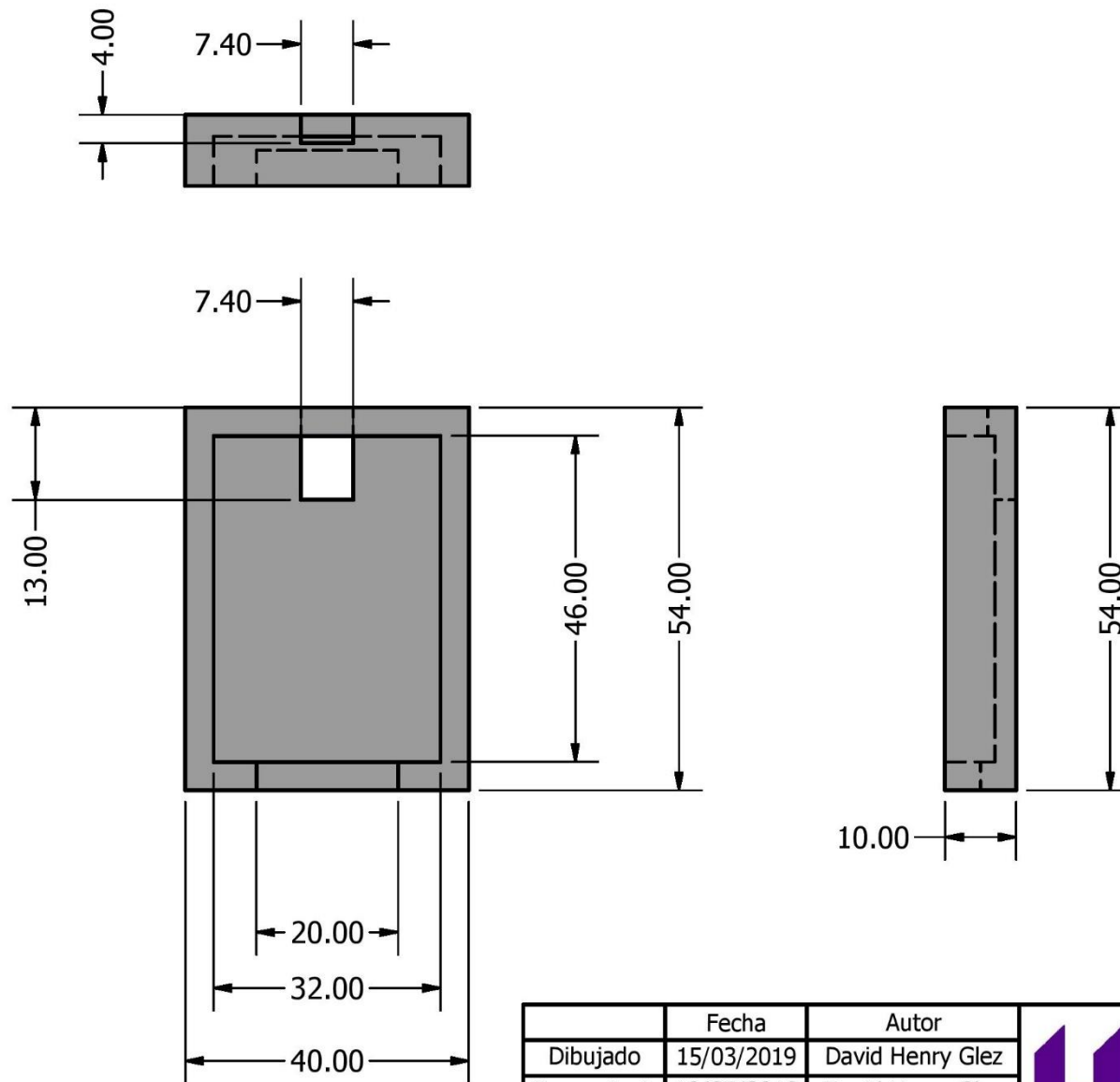
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:4	Recogedor de cable Ethernet			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: Recogedor	



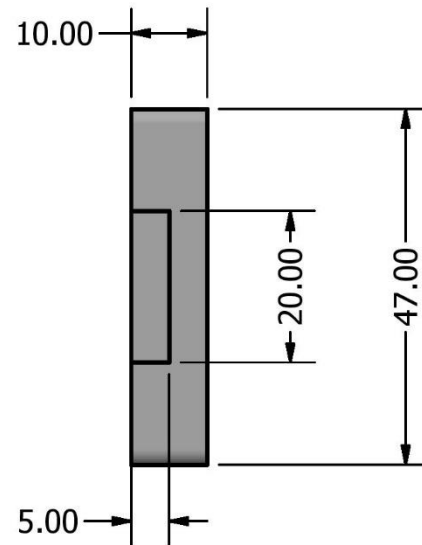
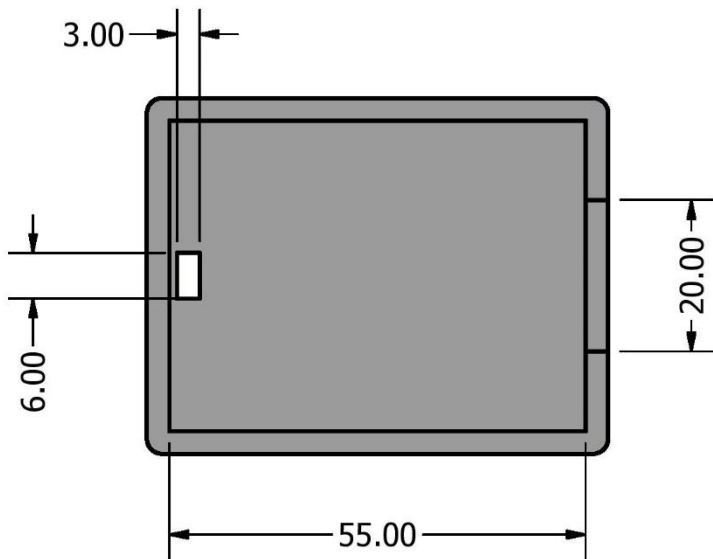
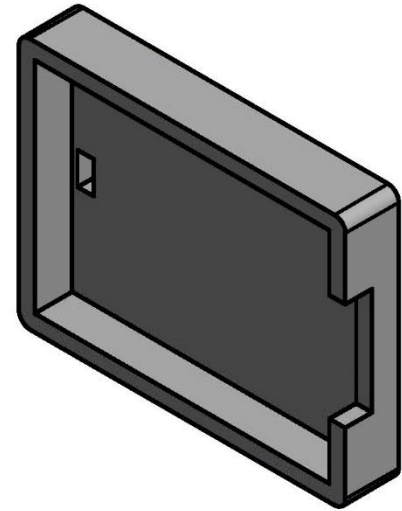
	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA	
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna	
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez			
Id. s. normas	UNE-EN-DIN				
ESCALA: 1:2	Soporte PCB			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: soporte_pcb	



	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA		
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		Universidad de La Laguna		
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez				
Id. s. normas	UNE-EN-DIN					
ESCALA: 1:4	Soporte bandeja portaelectrónica			Tamaño: A4	Nº de página: 1 de 1	
				Nombre del archivo: cilindro_inferior_portabandeja		



	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:1	Tapa del protector sensor de presencia de agua			Tamaño: A4
				Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: Protector_YL-83_tapa



	Fecha	Autor		ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Universidad de La Laguna
Dibujado	15/03/2019	David Henry Glez		
Comprobado	10/05/2019	David Henry Glez		
Id. s. normas	UNE-EN-DIN			
ESCALA: 1:1	Protector sensor de presencia de agua			Tamaño: A4
				Nº de página: 1 de 1
				Nombre del archivo: Protector_YL-83

14.2 Códigos implementados

14.2.1 Lectura de la IMU mediante SPI

```
#include <SPI.h>
#include <math.h>

#define ToD(x) (x/131)
#define ToG(x) (x*9.80665/16384)

#define xAxis 0
#define yAxis 1
#define zAxis 2

#define Aoffset 0.8

const int ChipSelPin1 = 53;

float angle;
float angleX;
float angleY;
float angleZ;
float Total_angle_x, Total_angle_y, Total_angle_z;
float elapsedTime, time=0, timePrev=0; //Variables for time control

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  //As per APM standard code, stop the barometer from holding the SPI bus
  pinMode(40, OUTPUT);
  digitalWrite(40, HIGH);

  SPI.begin();
  SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);

  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
  delay(100);

  pinMode(ChipSelPin1, OUTPUT);

  ConfigureMPU6000(); // configure chip
}

void loop()
{
  Serial.println();
  Serial.println();
  Total_angle_x = AcceDeg(ChipSelPin1,0);
  Total_angle_y = AcceDeg(ChipSelPin1,1);
  Total_angle_z = AcceDeg(ChipSelPin1,2);
  Serial.print("  ÁNGULO X ");
  Serial.print(Total_angle_x);
  Serial.print(" ");
  Serial.print("  ÁNGULO Y ");
  Serial.print(Total_angle_y);
  Serial.print("  ÁNGULO Z ");
  Serial.print(Total_angle_z);
```

```

Serial.println();
Serial.println();
delay(3000);
}

void SPIwrite(byte reg, byte data, int ChipSelPin) {
  uint8_t dump;
  digitalWrite(ChipSelPin,LOW);
  dump=SPI.transfer(reg);
  dump=SPI.transfer(data);
  digitalWrite(ChipSelPin,HIGH);
}

uint8_t SPIread(byte reg,int ChipSelPin) {
  uint8_t dump;
  uint8_t return_value;
  uint8_t addr=reg|0x80;
  digitalWrite(ChipSelPin,LOW);
  dump=SPI.transfer(addr);
  return_value=SPI.transfer(0x00);
  digitalWrite(ChipSelPin,HIGH);
  return(return_value);
}

int AcceX(int ChipSelPin) {
  uint8_t AcceX_H=SPIread(0x3B,ChipSelPin);
  uint8_t AcceX_L=SPIread(0x3C,ChipSelPin);
  int16_t AcceX=AcceX_H<<8|AcceX_L;
  return(AcceX);
}

int AcceY(int ChipSelPin) {
  uint8_t AcceY_H=SPIread(0x3D,ChipSelPin);
  uint8_t AcceY_L=SPIread(0x3E,ChipSelPin);
  int16_t AcceY=AcceY_H<<8|AcceY_L;
  return(AcceY);
}

int AcceZ(int ChipSelPin) {
  uint8_t AcceZ_H=SPIread(0x3F,ChipSelPin);
  uint8_t AcceZ_L=SPIread(0x40,ChipSelPin);
  int16_t AcceZ=AcceZ_H<<8|AcceZ_L;
  return(AcceZ);
}

int GyroX(int ChipSelPin) {
  uint8_t GyroX_H=SPIread(0x43,ChipSelPin);
  uint8_t GyroX_L=SPIread(0x44,ChipSelPin);
  int16_t GyroX=GyroX_H<<8|GyroX_L;
  return(GyroX);
}

int GyroY(int ChipSelPin) {
  uint8_t GyroY_H=SPIread(0x45,ChipSelPin);
  uint8_t GyroY_L=SPIread(0x46,ChipSelPin);
  int16_t GyroY=GyroY_H<<8|GyroY_L;
  return(GyroY);
}

int GyroZ(int ChipSelPin) {
  uint8_t GyroZ_H=SPIread(0x47,ChipSelPin);
  uint8_t GyroZ_L=SPIread(0x48,ChipSelPin);

```

```

int16_t GyroZ=GyroZ_H<<8|GyroZ_L;
return(GyroZ);
}

//--- Function to obtain angles based on accelerometer readings ---//
float AcceDeg(int ChipSelPin,int AxisSelect) {
float Ax=ToG(AcceX(ChipSelPin));
float Ay=ToG(AcceY(ChipSelPin));
float Az=ToG(AcceZ(ChipSelPin));
float ADegX=((atan(Ax/(sqrt((Ay*Ay)+(Az*Az)))))/PI)*180;
float ADegY=((atan(Ay/(sqrt((Ax*Ax)+(Az*Az)))))/PI)*180;
float ADegZ=((atan((sqrt((Ax*Ax)+(Ay*Ay)))/Az)/PI)*180;
switch (AxisSelect)
{
case 0:
return ADegX;
break;
case 1:
return ADegY;
break;
case 2:
return ADegZ;
break;
}
}

//--- Function to obtain angles based on gyroscope readings ---//
float GyroDeg(int ChipSelPin, int AxisSelect) {
timePrev=time;
time=millis();
elapsedTime=(time-timePrev)/1000;
if (elapsedTime>=1000)
{
elapsedTime=0;
}
float Gx=ToD(GyroX(ChipSelPin));
if (Gx>0 && Gx<1.4)
{
Gx=0;
}
float Gy=ToD(GyroY(ChipSelPin));
float Gz=ToD(GyroZ(ChipSelPin));
angleX+=Gx*(elapsedTime);
angleY+=Gy*(elapsedTime);
angleZ+=Gz*(elapsedTime);
switch (AxisSelect)
{
case 0:
return angleX;
break;
case 1:
return angleY;
break;
case 2:
return angleZ;
break;
}
}

void ConfigureMPU6000()
{
// DEVICE_RESET @ PWR_MGMT_1, reset device

```

```

SPIwrite(0x6B,0x80,ChipSelPin1);
delay(150);

// TEMP_DIS @ PWR_MGMT_1, wake device and select GyroZ clock
SPIwrite(0x6B,0x03,ChipSelPin1);
delay(150);

// I2C_IF_DIS @ USER_CTRL, disable I2C interface
SPIwrite(0x6A,0x10,ChipSelPin1);
delay(150);

// SMPRT_DIV @ SMPRT_DIV, sample rate at 1000Hz
SPIwrite(0x19,0x00,ChipSelPin1);
delay(150);

// DLPF_CFG @ CONFIG, digital low pass filter at 42Hz
SPIwrite(0x1A,0x03,ChipSelPin1);
delay(150);

// FS_SEL @ GYRO_CONFIG, gyro scale at 250dps
SPIwrite(0x1B,0x00,ChipSelPin1);
delay(150);

// AFS_SEL @ ACCEL_CONFIG, accel scale at 2g (1g=8192)
SPIwrite(0x1C,0x00,ChipSelPin1);
delay(150);
}

```

14.2.2 Calibración de los ESC

```

#include <Servo.h>

#define MAX_SIGNAL 2000
#define MIN_SIGNAL 1000
#define MOTOR_PIN 9
int DELAY = 1000;

Servo motor;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("ESC calibration...");
  Serial.println(" ");
  delay(1500);
  Serial.println("Program begin...");
  delay(1000);
  Serial.println("This program will start the ESC.");

  motor.attach(MOTOR_PIN);

  Serial.print("Now writing maximum output: (");Serial.print(MAX_SIGNAL);Serial.print(" us in this
case)");Serial.print("\n");
  Serial.println("Turn on power source, then wait 2 seconds and press any key.");
  motor.writeMicroseconds(MAX_SIGNAL);

  // Wait for input
  while (!Serial.available());
  Serial.read();
}

```



```

// Send min output
Serial.println("\n");
Serial.println("\n");
Serial.print("Sending minimum output: (");Serial.print(MIN_SIGNAL);Serial.print(" us in this
case)");Serial.print("\n");
motor.writeMicroseconds(MIN_SIGNAL);
Serial.println("The ESC is calibrated");
Serial.println("----");
Serial.println("Now, type a values between 1000 and 2000 and press enter");
Serial.println("and the motor will start rotating.");
Serial.println("Send 1000 to stop the motor and 2000 for full throttle");

}

void loop() {

if (Serial.available() > 0)
{
int DELAY = Serial.parseInt();
if (DELAY > 999)
{

motor.writeMicroseconds(DELAY);
float SPEED = (DELAY-1000)/10;
Serial.print("\n");
Serial.println("Motor speed:"); Serial.print(" "); Serial.print(SPEED); Serial.print("%");
}
}
}
}

```

14.2.3 Prueba inicial de los motores en la piscina

```

#include <Servo.h>

int servoPin = 12;
Servo servo;
1
void setup() {

servo.attach(servoPin);

for (int i = 0; i < 4; i++){

servo.writeMicroseconds(1500); // send "stop" signal to ESC.
delay(1000); // delay to allow the ESC to recognize the stopped sign

}

}

void loop() {
int signal = 1700 ; // Set signal value, which should be between 1100 and 1900

servo.writeMicroseconds(signal); // Send signal to ESC.
}

```

14.2.4 Funcionamiento completo de los motores

```

#include <Servo.h>
#include <ros.h>
#include <std_msgs/Int32MultiArray.h>
#include <std_msgs/Float32MultiArray.h>

// Declaraciones propias de ROS

ros::NodeHandle nh;
// Declaracion de variables globales y constantes

const int NUM_BOTONES = 8;
const int NUM_MOTORES = 4;

/***** */
int botones_temp[] = {0,0,0,0,0,0,0,0};
float motores_temp[] = {0,0,0,0};

int enable = 0;

Servo L_F_prop;
Servo L_B_prop;
Servo R_F_prop;
Servo R_B_prop;

//Pines control 4 motores
const int servoPin1 = 12; // OUT1
const int servoPin2 = 11; // OUT2
const int servoPin3 = 8; // OUT3
const int servoPin4 = 7; // OUT4

// Declaracion de funciones
void ejecucion_motores(float motor[]){

    if(enable == 1){

        // nh.loginfo("Se ha entrado correctamente a la funcion de ejecucion de los motores");

        int pwmMotor[] = {1500,1500,1500,1500};

        for(int i = 0; i < 4; i++){

            int motorRango = int(1500 + (motor[i] * 400));

            if((motorRango > 1475) && (motorRango < 1525)){
                pwmMotor[i] = 1500;
            }else if(motorRango > 1900){
                pwmMotor[i] = 1900;
            }else if(motorRango < 1100){
                pwmMotor[i] = 1100;
            }else{
                pwmMotor[i] = motorRango;
            }
        }

        L_F_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[0]); // Send signal to ESC.
        R_F_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[1]); // Send signal to ESC.
        R_B_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[2]); // Send signal to ESC.
        L_B_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[3]); // Send signal to ESC.
    }
}

```

```

// nh.logdebug("Motores activos");
}else{

int pwmMotor[] = { 1500,1500,1500,1500};

L_F_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[0]); // Send signal to ESC.
R_F_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[1]); // Send signal to ESC.
R_B_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[2]); // Send signal to ESC.
L_B_prop.writeMicroseconds(pwmMotor[3]); // Send signal to ESC.
// nh.logdebug("Motores parados");
}
}

void ejecucion_botones(int botones[]){

// nh.loginfo("Se ha entrado correctamente a la funcion ejecucion de los botones");

if((botones[4] == 1) && (botones[0] == 1)){//L1 + X
nh.logwarn("Motores activados");
enable = 1;
}
if((botones[4] == 1) && (botones[1] == 1)){//L1 + O
nh.logwarn("Motores desactivados");
enable = 0;
}
}

// Declaracion de Callbacks

void botones(const std_msgs::Int32MultiArray& buttons_msg){
// nh.loginfo("Activacion del callBack asociado a los botones");
for(int i = 0; i < NUM_BOTONES; i++){
botones_temp[i] = buttons_msg.data[i];
/* X,O,Triangulo,Cuadrado
* L1,R1,L2,R2*/
}
ejecucion_botones(botones_temp);
}

void motores(const std_msgs::Float32MultiArray& motors_msg){

// nh.loginfo("Activacion del callBack asociado a los joysticks");
for(int i = 0; i < NUM_MOTORES; i++){
motores_temp[i] = motors_msg.data[i];
}
// Debug

ejecucion_motores(motores_temp);
}

ros::Subscriber<std_msgs::Int32MultiArray> sub_buttons("button_command",&botones);
ros::Subscriber<std_msgs::Float32MultiArray> sub_motors("joy_command",&motores);

void setup(){

Serial.begin(57600);

nh.initNode();
nh.subscribe(sub_buttons);
nh.subscribe(sub_motors);

// nh.loginfo("Configuracion de ROS realizada");

```

```
// Configuración de los motores

L_F_prop.attach(servoPin1);
R_F_prop.attach(servoPin2);
R_B_prop.attach(servoPin3);
L_B_prop.attach(servoPin4);

L_F_prop.writeMicroseconds(1500); // send "stop" signal to ESC.
L_B_prop.writeMicroseconds(1500); // send "stop" signal to ESC.
R_F_prop.writeMicroseconds(1500); // send "stop" signal to ESC.
R_B_prop.writeMicroseconds(1500); // send "stop" signal to ESC.
// nh.loginfo("Activación de los motores realizada");
}

void loop(){

  nh.spinOnce();

}
```

14.3 Datasheets

14.3.1 Encapsulado de diodos Schottky



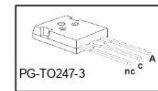
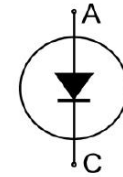
IDW75E60

Fast Switching Emitter Controlled Diode



Features:

- 600V EmCon technology
- Fast recovery
- Soft switching
- Low reverse recovery charge
- Low forward voltage
- 175°C junction operating temperature
- Easy paralleling
- Pb-free lead plating; RoHS compliant
- Complete product spectrum and PSpice Models:
<http://www.infineon.com/emcon/>



Applications:

- Welding
- Motor drives

Datasheet IDW75E60

Type	V_{RRM}	I_F	$V_F, T_J=25^\circ\text{C}$	$T_{j,max}$	Marking	Package
IDW75E60	600V	75A	1.65V	175°C	D75E60	PG-T0247-3

Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	600	V
Continuous forward current	I_F	120	A
$T_C = 25^\circ\text{C}$		82	
$T_C = 90^\circ\text{C}$		75	
Surge non repetitive forward current	I_{FSM}	220	A
$T_C = 25^\circ\text{C}, t_p = 10 \text{ ms, sine halfwave}$			
Maximum repetitive forward current	I_{FRM}	225	A
$T_C = 25^\circ\text{C}, t_p \text{ limited by } t_{j,max}, D = 0.5$			
Power dissipation	P_{tot}	300	W
$T_C = 25^\circ\text{C}$		170	
$T_C = 90^\circ\text{C}$		150	
$T_C = 100^\circ\text{C}$			
Operating junction temperature	T_j	-40...+175	°C
Storage temperature	T_{stg}	-55...+150	
Soldering temperature 1.6mm (0.063 in.) from case for 10 s	T_s	260	



IDW75E60

Thermal Resistance

Parameter	Symbol	Conditions	Max. Value	Unit
Characteristic				
Thermal resistance, junction – case	R_{thJC}		0.5	KW
Thermal resistance, junction – ambient	R_{thJA}		40	

Electrical Characteristic, at $T_j = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

Parameter	Symbol	Conditions	Value			Unit
			min.	typ.	max.	
Static Characteristic						
Collector-emitter breakdown voltage	V_{RRM}	$I_R = 0.25\text{mA}$	600	-	-	V
Diode forward voltage	V_F	$I_F = 75\text{A}$	-	1.65	2.0	
		$T_j = 25^\circ\text{C}$	-	1.65	-	
Reverse leakage current	I_R	$V_R = 600\text{V}$	-	-	40	μA
		$T_j = 25^\circ\text{C}$	-	-	2500	
		$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	-	-	

Dynamic Electrical Characteristics

Diode reverse recovery time	t_{rr}	$T_j = 25^\circ\text{C}$	-	121	-	ns
Diode reverse recovery charge	Q_{rr}	$V_R = 400\text{V}, I_F = 75\text{A},$	-	2.4	-	μC
Diode peak reverse recovery current	I_{rr}	$dI_F/dt = 1460\text{A}/\mu\text{s}$	-	38.5	-	A
Diode peak rate of fall of reverse recovery current during t_b	dI_{rr}/dt		-	921	-	$\text{A}/\mu\text{s}$
<hr/>						
Diode reverse recovery time	t_{rr}	$T_j = 125^\circ\text{C}$	-	155	-	ns
Diode reverse recovery charge	Q_{rrm}	$V_R = 400\text{V}, I_F = 75\text{A},$	-	4.4	-	μC
Diode peak reverse recovery current	I_{rr}	$dI_F/dt = 1460\text{A}/\mu\text{s}$	-	46.6	-	A
Diode peak rate of fall of reverse recovery current during t_b	dI_{rr}/dt		-	960	-	$\text{A}/\mu\text{s}$
<hr/>						
Diode reverse recovery time	t_{rr}	$T_j = 175^\circ\text{C}$	-	182	-	ns
Diode reverse recovery charge	Q_{rrm}	$V_R = 400\text{V}, I_F = 75\text{A},$	-	5.8	-	μC
Diode peak reverse recovery current	I_{rr}	$dI_F/dt = 1460\text{A}/\mu\text{s}$	-	56.2	-	A
Diode peak rate of fall of reverse recovery current during t_b	dI_{rr}/dt		-	1013	-	$\text{A}/\mu\text{s}$



IDW75E60

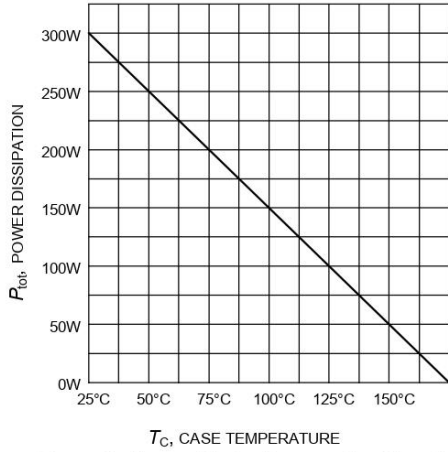


Figure 1. Power dissipation as a function of case temperature
($T_j \leq 175^\circ\text{C}$)

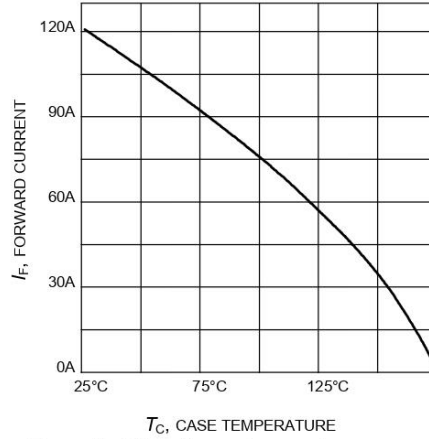


Figure 2. Diode forward current as a function of case temperature
($T_j \leq 175^\circ\text{C}$)

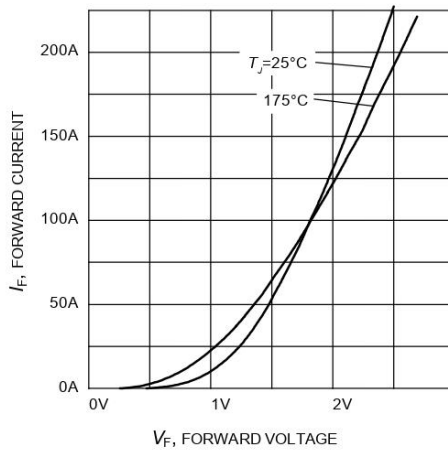


Figure 3. Typical diode forward current as a function of forward voltage

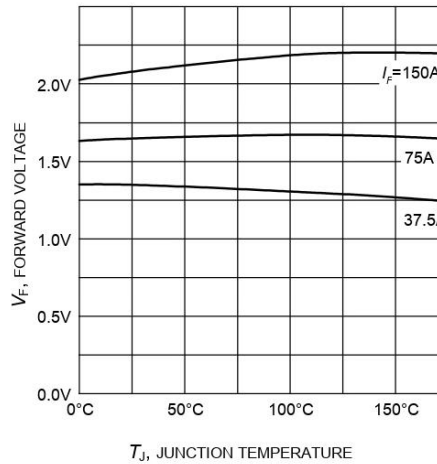


Figure 4. Typical diode forward voltage as a function of junction temperature



IDW75E60

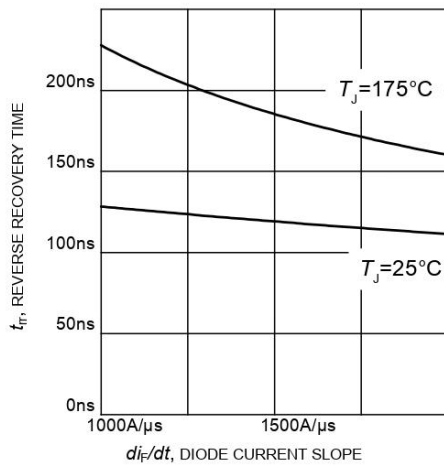


Figure 5. Typical reverse recovery time as a function of diode current slope
($V_R=400V$, $I_F=75A$,
Dynamic test circuit in Figure E)

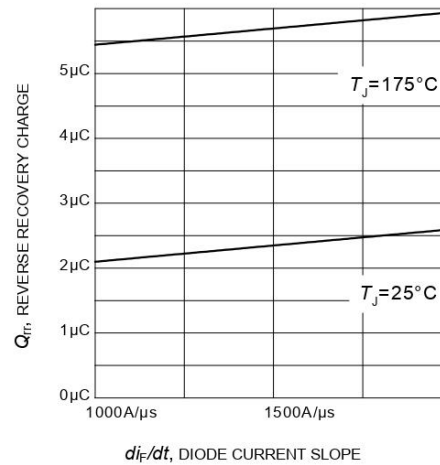


Figure 6. Typical reverse recovery charge as a function of diode current slope
($V_R=400V$, $I_F=75A$,
Dynamic test circuit in Figure E)

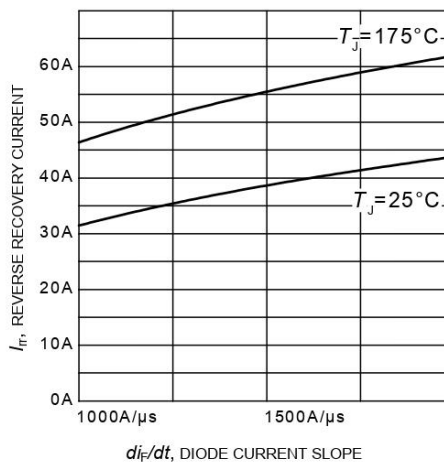


Figure 7. Typical reverse recovery current as a function of diode current slope
($V_R=400V$, $I_F=75A$,
Dynamic test circuit in Figure E)

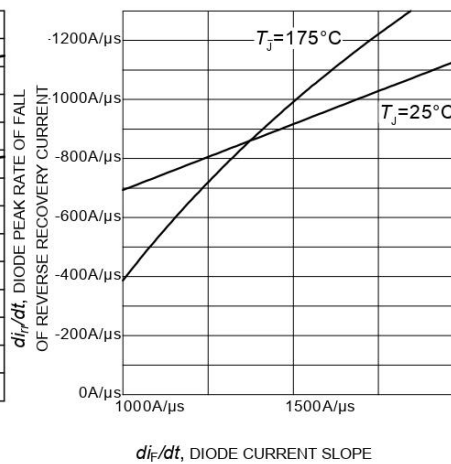


Figure 8. Typical diode peak rate of fall of reverse recovery current as a function of diode current slope
($V_R=400V$, $I_F=75A$,
Dynamic test circuit in Figure E)



IDW75E60

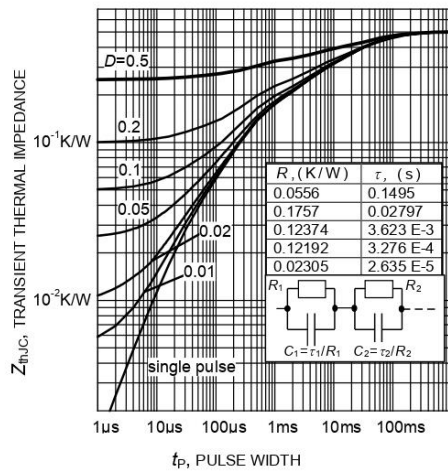
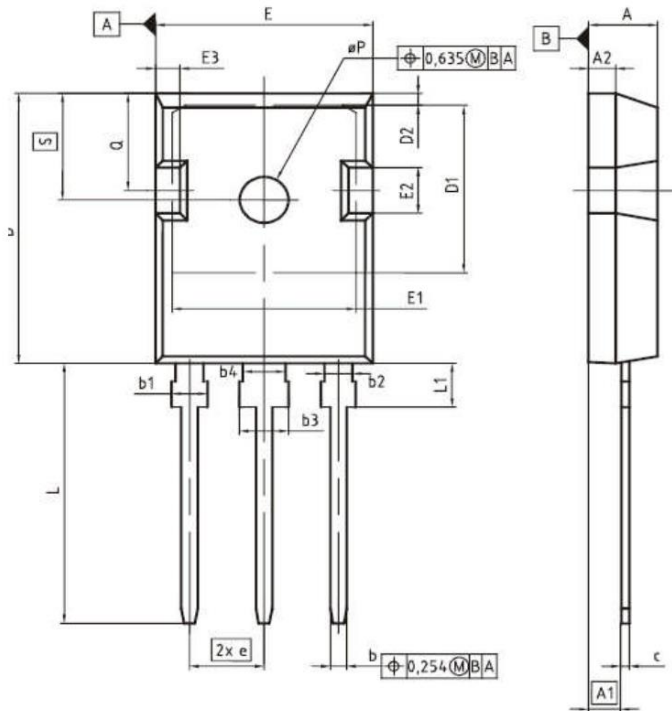


Figure 9. Diode transient thermal impedance as a function of pulse width
($D=t_p/T$)



IDW75E60

PG-T0247-3



DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4,83	5,21	0,190	0,205
A1	2,27	2,54	0,089	0,100
A2	1,85	2,16	0,073	0,085
b	1,07	1,33	0,042	0,052
b1	1,90	2,41	0,075	0,095
b2	1,90	2,16	0,075	0,085
b3	2,87	3,38	0,113	0,133
b4	2,87	3,13	0,113	0,123
c	0,55	0,88	0,022	0,027
D	20,80	21,10	0,819	0,831
D1	16,25	17,85	0,640	0,695
D2	0,95	1,35	0,037	0,053
E	15,70	16,13	0,618	0,635
E1	13,10	14,15	0,516	0,557
E2	3,68	5,10	0,145	0,201
E3	1,00	2,60	0,039	0,102
e	5,44 (BSC)		0,214 (BSC)	
N	3		3	
L	19,80	20,32	0,780	0,800
L1	4,10	4,47	0,161	0,176
eP	3,50	3,70	0,138	0,146
Q	5,49	6,00	0,216	0,236
S	6,04	6,30	0,238	0,248

DOCUMENT NO.
Z8B00003327

SCALE
0 5 7,5mm

EUROPEAN PROJECTION

ISSUE DATE
09-07-2010

REVISION
05

IDW75E60

Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany
© 2013 Infineon Technologies AG
All Rights Reserved.

Legal Disclaimer

The information given in this document shall in no event be regarded as a guarantee of conditions or characteristics. With respect to any examples or hints given herein, any typical values stated herein and/or any information regarding the application of the device, Infineon Technologies hereby disclaims any and all warranties and liabilities of any kind, including without limitation, warranties of non-infringement of intellectual property rights of any third party.

Information

For further information on technology, delivery terms and conditions and prices, please contact the nearest Infineon Technologies Office (www.infineon.com).

Warnings

Due to technical requirements, components may contain dangerous substances. For information on the types in question, please contact the nearest Infineon Technologies Office.
The Infineon Technologies component described in this Data Sheet may be used in life-support devices or systems and/or automotive, aviation and aerospace applications or systems only with the express written approval of Infineon Technologies, if a failure of such components can reasonably be expected to cause the failure of that life-support, automotive, aviation and aerospace device or system or to affect the safety or effectiveness of that device or system. Life support devices or systems are intended to be implanted in the human body or to support and/or maintain and sustain and/or protect human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health of the user or other persons may be endangered.

14.3.2 Regulador de tensión DC-DC MP1584EN



MP1584

3A, 1.5MHz, 28V Step-Down Converter

DESCRIPTION

The MP1584 is a high frequency step-down switching regulator with an integrated internal high-side high voltage power MOSFET. It provides 3A output with current mode control for fast loop response and easy compensation.

The wide 4.5V to 28V input range accommodates a variety of step-down applications, including those in an automotive input environment. A 100 μ A operational quiescent current allows use in battery-powered applications.

High power conversion efficiency over a wide load range is achieved by scaling down the switching frequency at light load condition to reduce the switching and gate driving losses.

The frequency foldback helps prevent inductor current runaway during startup and thermal shutdown provides reliable, fault tolerant operation.

By switching at 1.5MHz, the MP1584 is able to prevent EMI (Electromagnetic Interference) noise problems, such as those found in AM radio and ADSL applications.

The MP1584 is available in a thermally enhanced SOIC8E package.

FEATURES

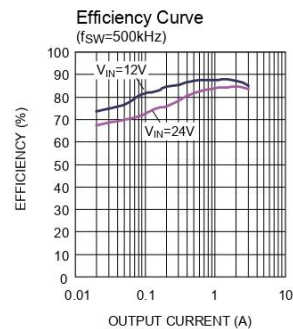
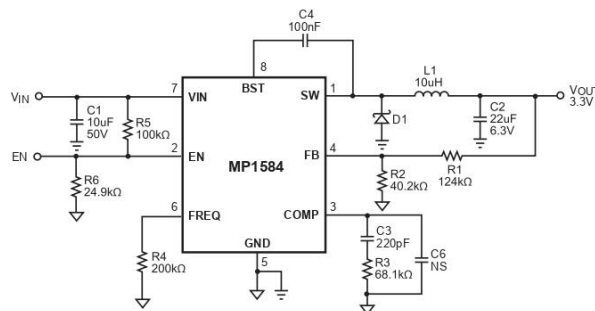
- Wide 4.5V to 28V Operating Input Range
- Programmable Switching Frequency from 100kHz to 1.5MHz
- High-Efficiency Pulse Skipping Mode for Light Load
- Ceramic Capacitor Stable
- Internal Soft-Start
- Internally Set Current Limit without a Current Sensing Resistor
- Available in SOIC8E Package.

APPLICATIONS

- High Voltage Power Conversion
- Automotive Systems
- Industrial Power Systems
- Distributed Power Systems
- Battery Powered Systems

"MPS" and "The Future of Analog IC Technology" are Registered Trademarks of Monolithic Power Systems, Inc.

TYPICAL APPLICATION





MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER

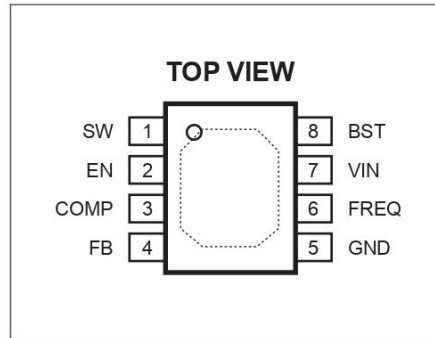
ORDERING INFORMATION

Part Number*	Package	Top Marking	Free Air Temperature (T _A)
MP1584EN	SOIC8E	MP1584EN	-20°C to +85°C

* For Tape & Reel, add suffix -Z (e.g. MP1584EN-Z);

For RoHS Compliant Packaging, add suffix -LF. (e.g. MP1584EN-LF-Z)

PACKAGE REFERENCE

**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS** ⁽¹⁾

Supply Voltage (V_{IN}).....-0.3V to +30V
 Switch Voltage (V_{SW}).....-0.3V to V_{IN} + 0.3V
 BST to SW-0.3V to +6V
 All Other Pins-0.3V to +6V
 Continuous Power Dissipation (T_A = +25°C)⁽²⁾

..... 2.5W

Junction Temperature.....150°C

Lead Temperature260°C

Storage Temperature.....-65°C to +150°C

Recommended Operating Conditions ⁽³⁾

Supply Voltage V_{IN}.....4.5V to 28V

Output Voltage V_{OUT}.....0.8V to 25V

Operating Junct. Temp (T_J)-20°C to +125°C

Thermal Resistance ⁽⁴⁾ θ_{JA} θ_{JC}
 SOIC8E 50 10... °C/W

Notes:

- 1) Exceeding these ratings may damage the device.
- 2) The maximum allowable power dissipation is a function of the maximum junction temperature T_J(MAX), the junction-to-ambient thermal resistance θ_{JA}, and the ambient temperature T_A. The maximum allowable continuous power dissipation at any ambient temperature is calculated by P_D(MAX)=(T_J(MAX)-T_A)/ θ_{JA}. Exceeding the maximum allowable power dissipation will cause excessive die temperature, and the regulator will go into thermal shutdown. Internal thermal shutdown circuitry protects the device from permanent damage.
- 3) The device is not guaranteed to function outside of its operating conditions.
- 4) Measured on JESD51-7, 4-layer PCB.


MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER
ELECTRICAL CHARACTERISTICS
 $V_{IN} = 12V$, $V_{EN} = 2.5V$, $V_{COMP} = 1.4V$, $T_A = +25^{\circ}C$, unless otherwise noted.

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Feedback Voltage	V_{FB}	$4.5V < V_{IN} < 28V$	0.776	0.8	0.824	V
Upper Switch On Resistance	$R_{DS(ON)}$	$V_{BST} - V_{SW} = 5V$		150		m Ω
Upper Switch Leakage		$V_{EN} = 0V$, $V_{SW} = 0V$, $V_{IN} = 28V$		1		μA
Current Limit			4.0	4.7		A
COMP to Current Sense Transconductance	G_{CS}			9		A/V
Error Amp Voltage Gain ⁽²⁾				200		V/V
Error Amp Transconductance		$I_{COMP} = \pm 3\mu A$	40	60	80	$\mu A/V$
Error Amp Min Source current		$V_{FB} = 0.7V$		5		μA
Error Amp Min Sink current		$V_{FB} = 0.9V$		-5		μA
VIN UVLO Threshold			2.7	3.0	3.3	V
VIN UVLO Hysteresis				0.35		V
Soft-Start Time ⁽⁵⁾		$0V < V_{FB} < 0.8V$		1.5		ms
Oscillator Frequency		$R_{FREQ} = 100k\Omega$		900		kHz
Shutdown Supply Current		$V_{EN} = 0V$		12	20	μA
Quiescent Supply Current		No load, $V_{FB} = 0.9V$		100	125	μA
Thermal Shutdown				150		$^{\circ}C$
Thermal Shutdown Hysteresis				15		$^{\circ}C$
Minimum Off Time ⁽²⁾				100		ns
Minimum On Time ⁽²⁾				100		ns
EN Up Threshold			1.35	1.5	1.65	V
EN Hysteresis				300		mV

Note:

5) Guaranteed by design.



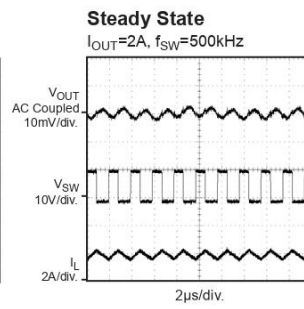
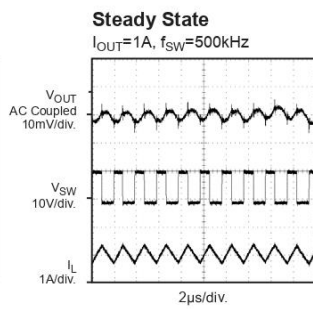
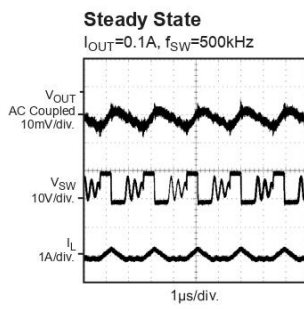
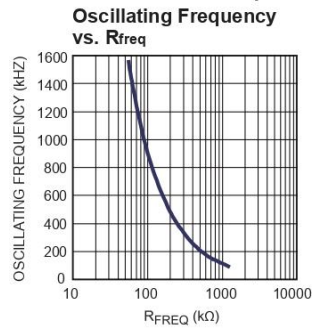
PIN FUNCTIONS

SOIC Pin #	Name	Description
1	SW	Switch Node. This is the output from the high-side switch. A low forward drop Schottky diode to ground is required. The diode must be close to the SW pins to reduce switching spikes.
2	EN	Enable Input. Pulling this pin below the specified threshold shuts the chip down. Pulling it up above the specified threshold or leaving it floating enables the chip.
3	COMP	Compensation. This node is the output of the error amplifier. Control loop frequency compensation is applied to this pin.
4	FB	Feedback. This is the input to the error amplifier. The output voltage is set by a resistive divider connected between the output and GND which scales down V_{OUT} equal to the internal +0.8V reference.
5	GND Exposed Pad	Ground. It should be connected as close as possible to the output capacitor to shorten the high current switch paths. Connect exposed pad to GND plane for optimal thermal performance.
6	FREQ	Switching Frequency Program Input. Connect a resistor from this pin to ground to set the switching frequency.
7	VIN	Input Supply. This supplies power to all the internal control circuitry, both BS regulators and the high-side switch. A decoupling capacitor to ground must be placed close to this pin to minimize switching spikes.
8	BST	Bootstrap. This is the positive power supply for the internal floating high-side MOSFET driver. Connect a bypass capacitor between this pin and SW pin.



TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

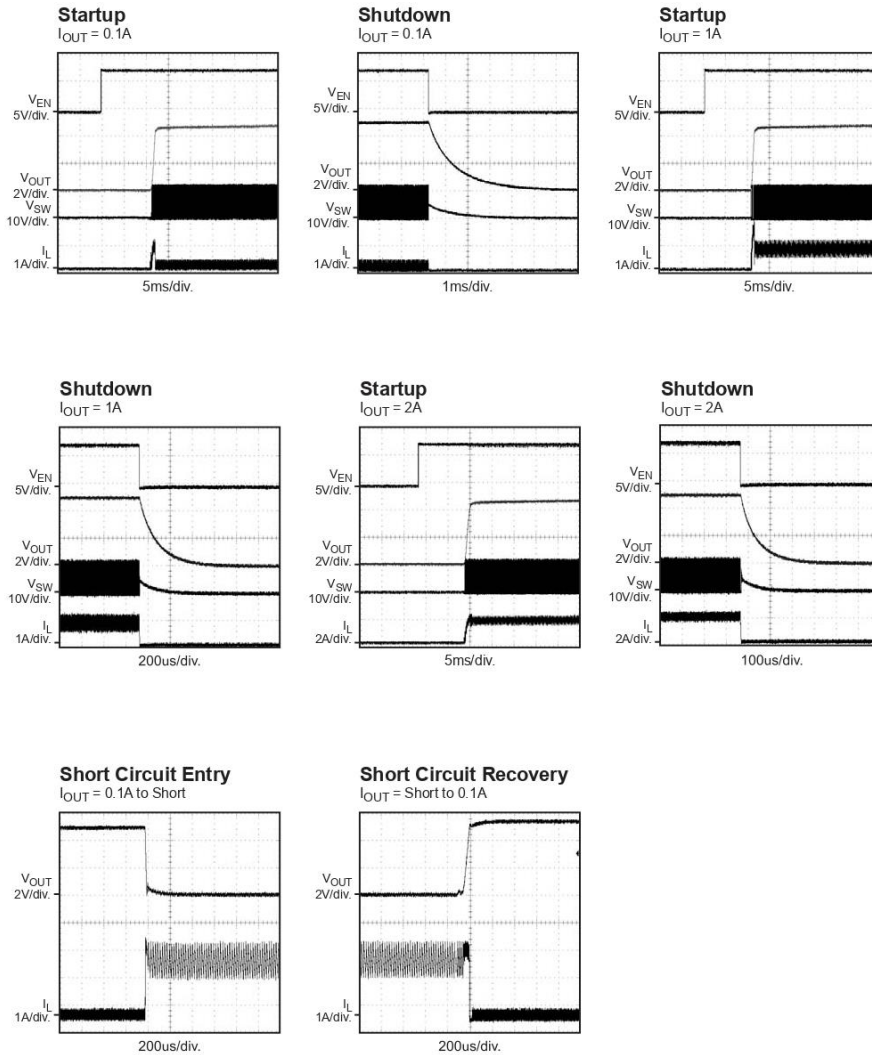
$V_{IN} = 12V$, $V_{OUT} = 5V$, $C1 = 10\mu F$, $C2 = 22\mu F$, $L1 = 10\mu H$, $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.





TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

$V_{IN} = 12V$, $C1 = 10\mu F$, $C2 = 22\mu F$, $L1 = 10\mu H$, $f_{SW} = 500kHz$, and $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.





BLOCK DIAGRAM

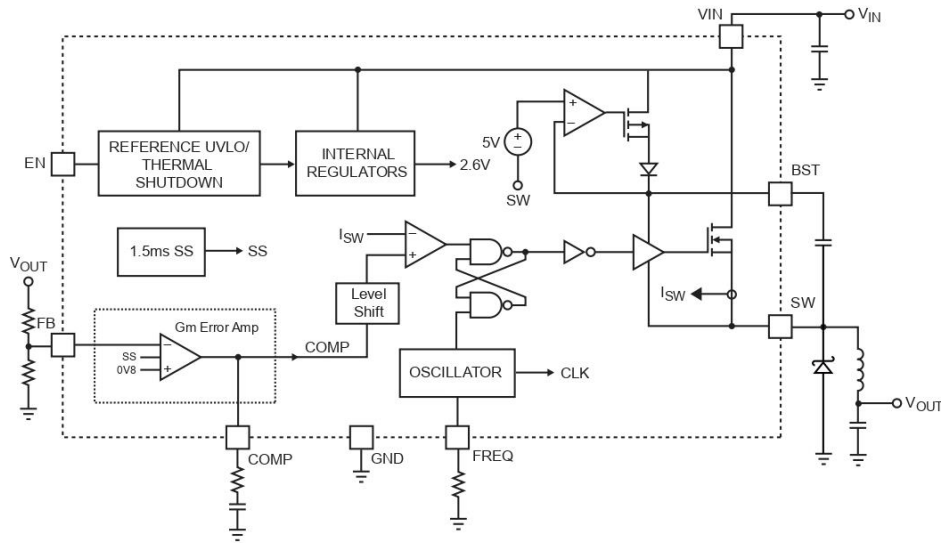


Figure 1—Functional Block Diagram

OPERATION

The MP1584 is a variable frequency, non-synchronous, step-down switching regulator with an integrated high-side high voltage power MOSFET. It provides a highly efficient solution with current mode control for fast loop response and easy compensation. It features a wide input voltage range, internal soft-start control and precision current limiting. Its very low operational quiescent current makes it suitable for battery powered applications.

PWM Control

At moderate to high output current, the MP1584 operates in a fixed frequency, peak current control mode to regulate the output voltage. A PWM cycle is initiated by the internal clock. The power MOSFET is turned on and remains on until its current reaches the value set by the COMP voltage. When the power switch is off, it remains off for at least 100ns before the next cycle starts. If, in one PWM period, the current in the power MOSFET does not reach the COMP set current value, the power MOSFET remains on, saving a turn-off operation.



Error Amplifier

The error amplifier compares the FB pin voltage with the internal reference (REF) and outputs a current proportional to the difference between the two. This output current is then used to charge the external compensation network to form the COMP voltage, which is used to control the power MOSFET current.

During operation, the minimum COMP voltage is clamped to 0.9V and its maximum is clamped to 2.0V. COMP is internally pulled down to GND in shutdown mode. COMP should not be pulled up beyond 2.6V.

Internal Regulator

Most of the internal circuitries are powered from the 2.6V internal regulator. This regulator takes the VIN input and operates in the full VIN range. When VIN is greater than 3.0V, the output of the regulator is in full regulation. When VIN is lower than 3.0V, the output decreases.

Enable Control

The MP1584 has a dedicated enable control pin (EN). With high enough input voltage, the chip can be enabled and disabled by EN which has positive logic. Its falling threshold is a precision 1.2V, and its rising threshold is 1.5V (300mV higher).

When floating, EN is pulled up to about 3.0V by an internal 1 μ A current source so it is enabled. To pull it down, 1 μ A current capability is needed.

When EN is pulled down below 1.2V, the chip is put into the lowest shutdown current mode. When EN is higher than zero but lower than its rising threshold, the chip is still in shutdown mode but the shutdown current increases slightly.

Under-Voltage Lockout (UVLO)

Under-voltage lockout (UVLO) is implemented to protect the chip from operating at insufficient supply voltage. The UVLO rising threshold is about 3.0V while its falling threshold is a consistent 2.6V.

Internal Soft-Start

The soft-start is implemented to prevent the converter output voltage from overshooting during startup. When the chip starts, the internal circuitry generates a soft-start voltage (SS) ramping up from 0V to 2.6V. When it is lower than the internal reference (REF), SS overrides REF so the error amplifier uses SS as the reference. When SS is higher than REF, REF regains control.

Thermal Shutdown

Thermal shutdown is implemented to prevent the chip from operating at exceedingly high temperatures. When the silicon die temperature is higher than its upper threshold, it shuts down the whole chip. When the temperature is lower than its lower threshold, the chip is enabled again.

Floating Driver and Bootstrap Charging

The floating power MOSFET driver is powered by an external bootstrap capacitor. This floating driver has its own UVLO protection. This UVLO's rising threshold is 2.2V with a threshold of 150mV.

The bootstrap capacitor is charged and regulated to about 5V by the dedicated internal bootstrap regulator. When the voltage between the BST and SW nodes is lower than its regulation, a PMOS pass transistor connected from VIN to BST is turned on. The charging current path is from VIN, BST and then to SW. External circuit should provide enough voltage headroom to facilitate the charging.

As long as VIN is sufficiently higher than SW, the bootstrap capacitor can be charged. When the power MOSFET is ON, VIN is about equal to SW so the bootstrap capacitor cannot be charged. When the external diode is on, the difference between VIN and SW is largest, thus making it the best period to charge. When there is no current in the inductor, SW equals the output voltage V_{OUT} so the difference between V_{IN} and V_{OUT} can be used to charge the bootstrap capacitor.



At higher duty cycle operation condition, the time period available to the bootstrap charging is less so the bootstrap capacitor may not be sufficiently charged.

In case the internal circuit does not have sufficient voltage and the bootstrap capacitor is not charged, extra external circuitry can be used to ensure the bootstrap voltage is in the normal operational region. Refer to *External Bootstrap Diode* in Application section.

The DC quiescent current of the floating driver is about 20µA. Make sure the bleeding current at the SW node is higher than this value, such that:

$$I_O + \frac{V_O}{(R1 + R2)} > 20\mu A$$

Current Comparator and Current Limit

The power MOSFET current is accurately sensed via a current sense MOSFET. It is then fed to the high speed current comparator for the current mode control purpose. The current comparator takes this sensed current as one of its inputs. When the power MOSFET is turned on, the comparator is first blanked till the end of the turn-on transition to avoid noise issues. The comparator then compares the power switch current with the COMP voltage. When the sensed current is higher than the COMP voltage, the comparator output is low, turning off the power MOSFET. The cycle-by-cycle maximum current of the internal power MOSFET is internally limited.

Startup and Shutdown

If both VIN and EN are higher than their appropriate thresholds, the chip starts. The reference block starts first, generating stable reference voltage and currents, and then the internal regulator is enabled. The regulator provides stable supply for the remaining circuitries.

While the internal supply rail is up, an internal timer holds the power MOSFET OFF for about 50µs to blank the startup glitches. When the internal soft-start block is enabled, it first holds its SS output low to ensure the remaining circuitries are ready and then slowly ramps up.

Three events can shut down the chip: EN low, VIN low and thermal shutdown. In the shutdown procedure, power MOSFET is turned off first to avoid any fault triggering. The COMP voltage and the internal supply rail are then pulled down.

Programmable Oscillator

The MP1584 oscillating frequency is set by an external resistor, R_{freq} from the FREQ pin to ground. The value of R_{freq} can be calculated from:

$$R_{\text{freq}} (\text{k}\Omega) = \frac{180000}{[f_s (\text{kHz})]^{1.1}}$$



APPLICATION INFORMATION

COMPONENT SELECTION

Setting the Output Voltage

The output voltage is set using a resistive voltage divider from the output voltage to FB pin. The voltage divider divides the output voltage down to the feedback voltage by the ratio:

$$V_{FB} = V_{OUT} \frac{R2}{R1 + R2}$$

Thus the output voltage is:

$$V_{OUT} = V_{FB} \frac{(R1 + R2)}{R2}$$

About 20µA current from high side BS circuitry can be seen at the output when the MP1584 is at no load. In order to absorb this small amount of current, keep R2 under 40KΩ. A typical value for R2 can be 40.2kΩ. With this value, R1 can be determined by:

$$R1 = 50.25 \times (V_{OUT} - 0.8)(k\Omega)$$

For example, for a 3.3V output voltage, R2 is 40.2kΩ, and R1 is 127kΩ.

Inductor

The inductor is required to supply constant current to the output load while being driven by the switched input voltage. A larger value inductor will result in less ripple current that will result in lower output ripple voltage. However, the larger value inductor will have a larger physical size, higher series resistance, and/or lower saturation current.

A good rule for determining the inductance to use is to allow the peak-to-peak ripple current in the inductor to be approximately 30% of the maximum switch current limit. Also, make sure that the peak inductor current is below the maximum switch current limit. The inductance value can be calculated by:

$$L1 = \frac{V_{OUT}}{f_s \times \Delta I_L} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right)$$

Where V_{OUT} is the output voltage, V_{IN} is the input voltage, f_s is the switching frequency, and ΔI_L is the peak-to-peak inductor ripple current.

Choose an inductor that will not saturate under the maximum inductor peak current. The peak inductor current can be calculated by:

$$I_{LP} = I_{LOAD} + \frac{V_{OUT}}{2 \times f_s \times L1} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right)$$

Where I_{LOAD} is the load current.

Table 1 lists a number of suitable inductors from various manufacturers. The choice of which style inductor to use mainly depends on the price vs. size requirements and any EMI requirement.



Table 1—Inductor Selection Guide

Part Number	Inductance (μH)	Max DCR (Ω)	Current Rating (A)	Dimensions L x W x H (mm^3)
Würth Electronics				
7447789003	3.3	0.024	3.42	7.3x7.3x3.2
744066100	10	0.035	3.6	10x10x3.8
744771115	15	0.025	3.75	12x12x6
744771122	22	0.031	3.37	12x12x6
TDK				
RLF7030T-3R3	3.3	0.02	4.1	7.3x6.8x3.2
RLF7030T-4R7	4.7	0.031	3.4	7.3x6.8x3.2
SLF10145T-100	10	0.0364	3	10.1x10.1x4.5
SLF12565T-220M3R5	22	0.0316	3.5	12.5x12.5x6.5
Toko				
FDV0630-3R3M	3.3	0.031	4.3	7.7x7x3
FDV0630-4R7M	4.7	0.049	3.3	7.7x7x3
919AS-100M	10	0.0265	4.3	10.3x10.3x4.5
919AS-160M	16	0.0492	3.3	10.3x10.3x4.5
919AS-220M	22	0.0776	3	10.3x10.3x4.5

Output Rectifier Diode

The output rectifier diode supplies the current to the inductor when the high-side switch is off. To reduce losses due to the diode forward voltage and recovery times, use a Schottky diode.

Choose a diode whose maximum reverse voltage rating is greater than the maximum input voltage, and whose current rating is greater than the maximum load current. Table 2 lists example Schottky diodes and manufacturers.

Table 2—Diode Selection Guide

Diodes	Voltage/ Current Rating	Manufacturer
B340A-13-F	40V, 3A	Diodes Inc.
CMSH3-40MA	40V, 3A	Central Semi

Input Capacitor

The input current to the step-down converter is discontinuous, therefore a capacitor is required to supply the AC current to the step-down converter while maintaining the DC input voltage. Use low ESR capacitors for the best performance. Ceramic capacitors are preferred, but tantalum or low-ESR electrolytic capacitors may also suffice.

For simplification, choose the input capacitor with RMS current rating greater than half of the maximum load current.


MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER

The input capacitor (C1) can be electrolytic, tantalum or ceramic. When using electrolytic or tantalum capacitors, a small, high quality ceramic capacitor, i.e. 0.1µF, should be placed as close to the IC as possible. When using ceramic capacitors, make sure that they have enough capacitance to provide sufficient charge to prevent excessive voltage ripple at input. The input voltage ripple caused by capacitance can be estimated by:

$$\Delta V_{IN} = \frac{I_{LOAD}}{f_s \times C1} \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right)$$

Output Capacitor

The output capacitor (C2) is required to maintain the DC output voltage. Ceramic, tantalum, or low ESR electrolytic capacitors are recommended. Low ESR capacitors are preferred to keep the output voltage ripple low. The output voltage ripple can be estimated by:

$$\Delta V_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{f_s \times L} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \times \left(R_{ESR} + \frac{1}{8 \times f_s \times C2}\right)$$

Where L is the inductor value and R_{ESR} is the equivalent series resistance (ESR) value of the output capacitor.

In the case of ceramic capacitors, the impedance at the switching frequency is dominated by the capacitance. The output voltage ripple is mainly caused by the capacitance. For simplification, the output voltage ripple can be estimated by:

$$\Delta V_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{8 \times f_s^2 \times L \times C2} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right)$$

In the case of tantalum or electrolytic capacitors, the ESR dominates the impedance at the switching frequency. For simplification, the output ripple can be approximated to:

$$\Delta V_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{f_s \times L} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) \times R_{ESR}$$

The characteristics of the output capacitor also affect the stability of the regulation system. The MP1584 can be optimized for a wide range of capacitance and ESR values.

Compensation Components

MP1584 employs current mode control for easy compensation and fast transient response. The system stability and transient response are controlled through the COMP pin. COMP pin is the output of the internal error amplifier. A series capacitor-resistor combination sets a pole-zero combination to control the characteristics of the control system. The DC gain of the voltage feedback loop is given by:

$$A_{VDC} = R_{LOAD} \times G_{CS} \times A_{VEA} \times \frac{V_{FB}}{V_{OUT}}$$

Where A_{VEA} is the error amplifier voltage gain, 200V/V; G_{CS} is the current sense transconductance, 9A/V; R_{LOAD} is the load resistor value.

The system has two poles of importance. One is due to the compensation capacitor (C3), the output resistor of error amplifier. The other is due to the output capacitor and the load resistor. These poles are located at:

$$f_{P1} = \frac{G_{EA}}{2\pi \times C3 \times A_{VEA}}$$

$$f_{P2} = \frac{1}{2\pi \times C2 \times R_{LOAD}}$$

Where, G_{EA} is the error amplifier transconductance, 60µA/V.

The system has one zero of importance, due to the compensation capacitor (C3) and the compensation resistor (R3). This zero is located at:

$$f_{Z1} = \frac{1}{2\pi \times C3 \times R3}$$

The system may have another zero of importance, if the output capacitor has a large capacitance and/or a high ESR value. The zero, due to the ESR and capacitance of the output capacitor, is located at:

$$f_{ESR} = \frac{1}{2\pi \times C2 \times R_{ESR}}$$



In this case (as shown in Figure 2), a third pole set by the compensation capacitor (C6) and the compensation resistor (R3) is used to compensate the effect of the ESR zero on the loop gain. This pole is located at:

$$f_{P3} = \frac{1}{2\pi \times C6 \times R3}$$

The goal of compensation design is to shape the converter transfer function to get a desired loop gain. The system crossover frequency where the feedback loop has the unity gain is important. Lower crossover frequencies result in slower line and load transient responses, while higher crossover frequencies could cause system unstable. A good rule of thumb is to set the crossover frequency to approximately one-tenth of the switching frequency. The Table 3 lists the typical values of compensation components for some standard output voltages with various output capacitors and inductors. The values of the compensation components have been optimized for fast transient responses and good stability at given conditions.

Table 3—Compensation Values for Typical Output Voltage/Capacitor Combinations

V _{OUT} (V)	L (μH)	C2 (μF)	R3 (kΩ)	C3 (pF)	C6
1.8	4.7	47	105	100	None
2.5	4.7 - 6.8	22	54.9	220	None
3.3	6.8 - 10	22	68.1	220	None
5	15 - 22	22	100	150	None
12	22 - 33	22	147	150	None

To optimize the compensation components for conditions not listed in Table 3, the following procedure can be used.

1. Choose the compensation resistor (R3) to set the desired crossover frequency. Determine the R3 value by the following equation:

$$R3 = \frac{2\pi \times C2 \times f_c \times V_{OUT}}{G_{EA} \times G_{CS} \times V_{FB}}$$

Where f_c is the desired crossover frequency.

2. Choose the compensation capacitor (C3) to achieve the desired phase margin. For applications with typical inductor values, setting the compensation zero, f_{z1} , below one fourth of the crossover frequency provides sufficient phase margin. Determine the C3 value by the following equation:

$$C3 > \frac{4}{2\pi \times R3 \times f_c}$$

3. Determine if the second compensation capacitor (C6) is required. It is required if the ESR zero of the output capacitor is located at less than half of the switching frequency, or the following relationship is valid:

$$\frac{1}{2\pi \times C2 \times R_{ESR}} < \frac{f_s}{2}$$

If this is the case, then add the second compensation capacitor (C6) to set the pole f_{P3} at the location of the ESR zero. Determine the C6 value by the equation:

$$C6 = \frac{C2 \times R_{ESR}}{R3}$$



High Frequency Operation

The switching frequency of MP1584 can be programmed up to 1.5MHz with an external resistor.

With higher switching frequencies, the inductive reactance (X_L) of capacitor comes to dominate, so that the ESL of input/output capacitor determines the input/output ripple voltage at higher switching frequency. As a result of that, high frequency ceramic capacitor is strongly recommended as input decoupling capacitor and output filtering capacitor for such high frequency operation.

Layout becomes more important when the device switches at higher frequency. It is essential to place the input decoupling capacitor, catch diode and the MP1584 (VIN pin, SW pin and PGND) as close as possible, with traces that are very short and fairly wide. This can help to greatly reduce the voltage spike on SW node, and lower the EMI noise level as well.

Try to run the feedback trace as far from the inductor and noisy power traces as possible. It is often a good idea to run the feedback trace on the side of the PCB opposite of the inductor with a ground plane separating the two. The compensation components should be placed close to the MP1584. Do not place the compensation components close to or under high dv/dt SW node, or inside the high di/dt power loop. If you have to do so, the proper ground plane must be in place to isolate those. Switching loss is expected to be increased at high switching frequency. To help to improve the thermal conduction, a grid of thermal vias can be created right under the exposed pad. It is recommended that they be small (15mil barrel diameter) so that the hole is essentially filled up during the plating process, thus aiding conduction to the other side. Too large a hole can cause 'solder wicking' problems during the reflow soldering process. The pitch (distance between the centers) of several such thermal vias in an area is typically 40mil.

External Bootstrap Diode

It is recommended that an external bootstrap diode be added when the input voltage is no greater than 5V or the 5V rail is available in the system. This helps improve the efficiency of the regulator. The bootstrap diode can be a low cost one such as IN4148 or BAT54.

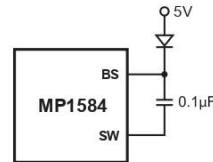


Figure 2—External Bootstrap Diode

This diode is also recommended for high duty cycle operation (when $V_{OUT}/V_{IN} > 65\%$) or low V_{IN} ($< 5V_{in}$) applications.

At no load or light load, the converter may operate in pulse skipping mode in order to maintain the output voltage in regulation. Thus there is less time to refresh the BS voltage. In order to have enough gate voltage under such operating conditions, the difference of $V_{IN} - V_{OUT}$ should be greater than 3V. For example, if the V_{OUT} is set to 3.3V, the V_{IN} needs to be higher than $3.3V + 3V = 6.3V$ to maintain enough BS voltage at no load or light load. To meet this requirement, EN pin can be used to program the input UVLO voltage to $V_{out} + 3V$.



MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER

TYPICAL APPLICATION CIRCUITS

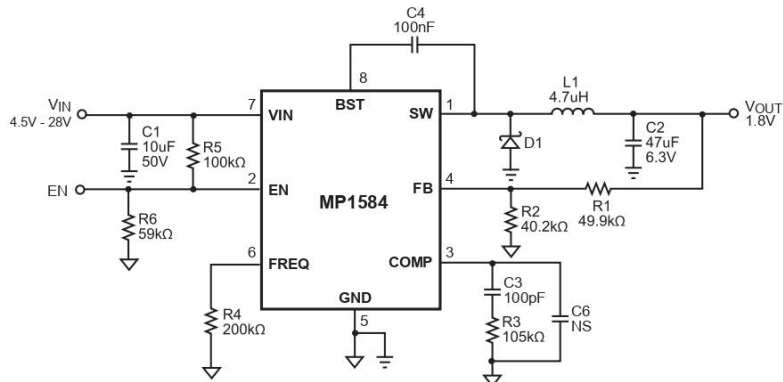


Figure 3—1.8V Output Typical Application Schematic

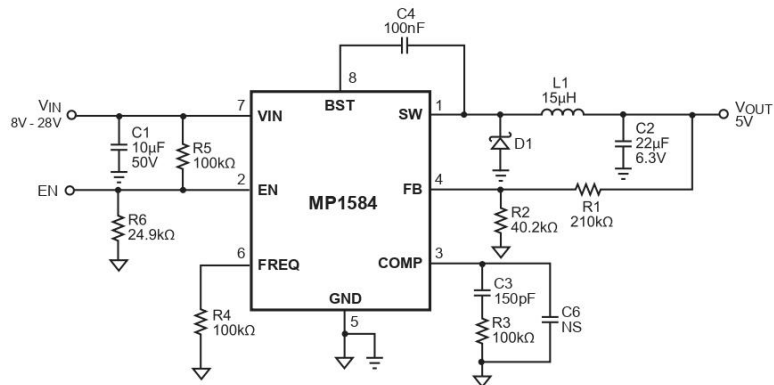


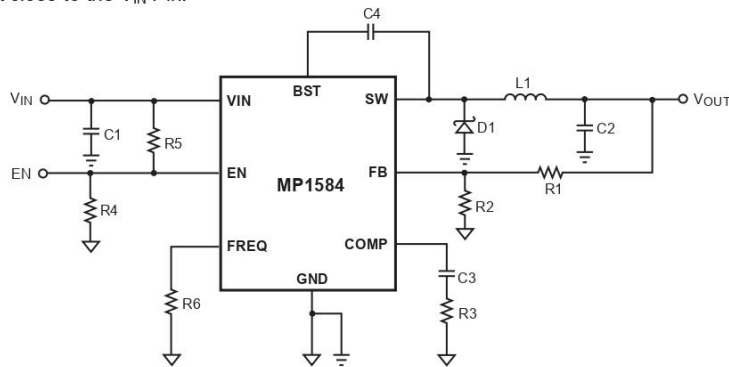
Figure 4—5V Output Typical Application Schematic


MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER
PCB LAYOUT GUIDE

PCB layout is very important to achieve stable operation. It is highly recommended to duplicate EVB layout for optimum performance.

If change is necessary, please follow these guidelines and take Figure 5 for reference.

- 1) Keep the path of switching current short and minimize the loop area formed by Input cap, high-side MOSFET and external switching diode.
- 2) Bypass ceramic capacitors are suggested to be put close to the V_{IN} Pin.
- 3) Ensure all feedback connections are short and direct. Place the feedback resistors and compensation components as close to the chip as possible.
- 4) Route SW away from sensitive analog areas such as FB.
- 5) Connect IN, SW, and especially GND respectively to a large copper area to cool the chip to improve thermal performance and long-term reliability.



MP1584 Typical Application Circuit

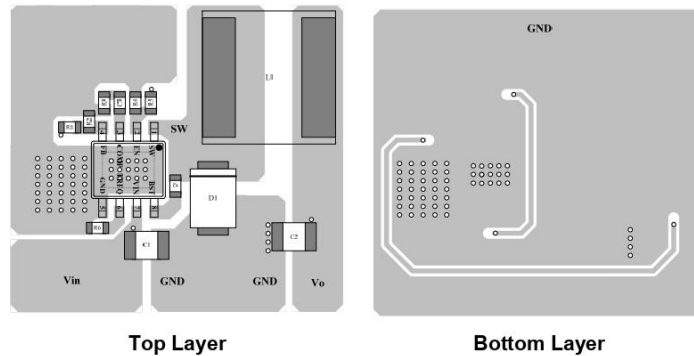


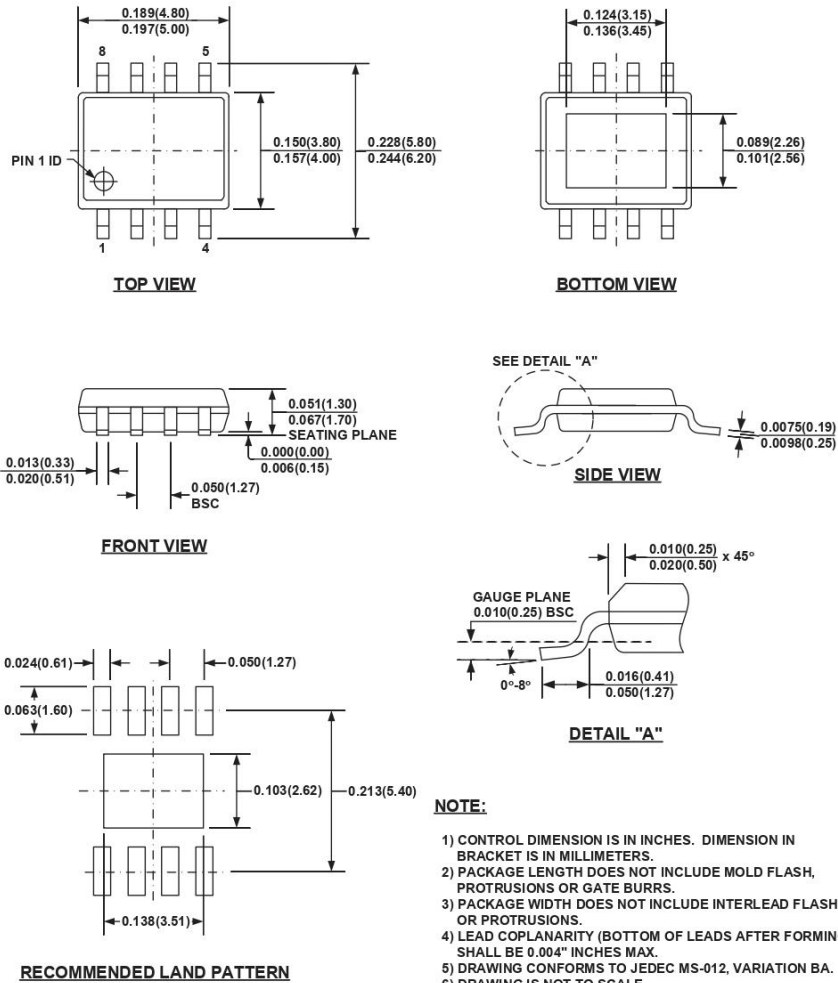
Figure 5—MP1584 Typical Application Circuit and PCB Layout Guide



MP1584 – 3A, 1.5MHz, 28V STEP-DOWN CONVERTER

PACKAGE INFORMATION

SOIC8E (EXPOSED PAD)



NOTICE: The information in this document is subject to change without notice. Users should warrant and guarantee that third party Intellectual Property rights are not infringed upon when integrating MPS products into any application. MPS will not assume any legal responsibility for any said applications.

MP1584 Rev. 1.0
8/8/2011

www.MonolithicPower.com
MPS Proprietary Information. Unauthorized Photocopy and Duplication Prohibited.
© 2011 MPS. All Rights Reserved.

17

14.3.3 Regulador de tensión (7812CT)

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

1.0 A Positive Voltage Regulators

These voltage regulators are monolithic integrated circuits designed as fixed-voltage regulators for a wide variety of applications including local, on-card regulation. These regulators employ internal current limiting, thermal shutdown, and safe-area compensation. With adequate heatsinking they can deliver output currents in excess of 1.0 A. Although designed primarily as a fixed voltage regulator, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

Features

- Output Current in Excess of 1.0 A
- No External Components Required
- Internal Thermal Overload Protection
- Internal Short Circuit Current Limiting
- Output Transistor Safe-Area Compensation
- Output Voltage Offered in 1.5%, 2% and 4% Tolerance
- Available in Surface Mount D²PAK-3, DPAK-3 and Standard 3-Lead Transistor Packages
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable
- These are Pb-Free Devices

MAXIMUM RATINGS (T_A = 25°C, unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value			Unit
		369C	221A	936	
Input Voltage (5.0 – 18 V) (24 V)	V _I	35 40			Vdc
Power Dissipation	P _D	Internally Limited			W
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	R _{θJA}	92	65	Figure 15	°C/W
Thermal Resistance, Junction-to-Case	R _{θJC}	5.0	5.0	5.0	°C/W
Storage Junction Temperature Range	T _{stg}	-65 to +150			°C
Operating Junction Temperature	T _J	+150			°C

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

*This device series contains ESD protection and exceeds the following tests:
Human Body Model 2000 V per MIL-STD-883, Method 3015.
Machine Model Method 200 V.



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>



TO-220
T SUFFIX
CASE 221AB

Heatsink surface
connected to Pin 2.



Pin 1. Input
2. Ground
3. Output

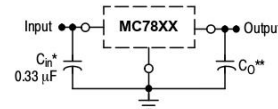
D²PAK-3
D2T SUFFIX
CASE 936

Heatsink surface (shown as terminal 4 in
case outline drawing) is connected to Pin 2.



DPAK-3
DT SUFFIX
CASE 369C

STANDARD APPLICATION



A common ground is required between the input and the output voltages. The input voltage must remain typically 2.0 V above the output voltage even during the low point on the input ripple voltage.

XX, These two digits of the type number indicate nominal voltage.

* C_{in} is required if regulator is located an appreciable distance from power supply filter.

** C_o is not needed for stability; however, it does improve transient response. Values of less than 0.1 µF could cause instability.

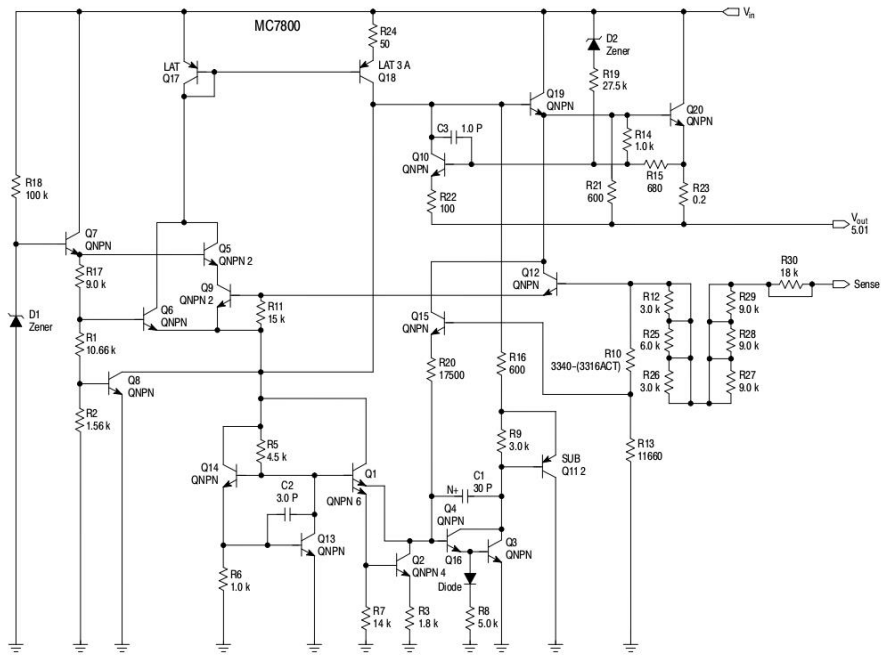
ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 23 of this data sheet.

DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 28 of this data sheet.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800



This device contains 22 active transistors.

Figure 1. Representative Schematic Diagram

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 10\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 1), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7805B, NCV7805B			MC7805C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	4.8	5.0	5.2	4.8	5.0	5.2	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $7.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 20\text{ Vdc}$ $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 20\text{ Vdc}$	V_O	– 4.75	– 5.0	– 5.25	4.75 –	5.0 –	5.25 –	Vdc
Line Regulation (Note 4) $7.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 20\text{ Vdc}$, 1.0 A $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 12\text{ Vdc}$	Reg _{line}	– –	5.0 1.3	100 50	– –	0.5 0.8	20 10	mV
Load Regulation (Note 4) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$ ($T_A = 25^\circ\text{C}$)	Reg _{load}	– –	1.3 0.15	100 50	– –	1.3 1.3	25 25	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.2	8.0	–	3.2	6.5	mA
Quiescent Current Change $7.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ ($T_A = 25^\circ\text{C}$)	ΔI_B	– –	– –	– 0.5	– –	0.3 0.08	1.0 0.8	mA
Ripple Rejection $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 18\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	–	68	–	62	83	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	–	0.9	–	–	0.9	–	m Ω
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	–	0.6	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.3	–	–	–0.3	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

1. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB2. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 10\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 3), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7805AB/MC7805AC/NCV7805AB			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	4.9	5.0	5.1	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $7.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 20\text{ Vdc}$	V_O	4.8	5.0	5.2	Vdc
Line Regulation (Note 4) $7.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 12\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$ $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 12\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $7.3\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 20\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg_{line}	–	0.5 0.8 1.3 4.5	10 12 4.0 10	mV
Load Regulation (Note 4) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg_{load}	–	1.3 0.8 0.53	25 25 15	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.2	6.0	mA
Quiescent Current Change $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $7.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 20\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	0.3 – 0.08	0.8 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 18\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	68	83	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance ($f = 1.0\text{ kHz}$)	r_O	–	0.9	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.3	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

3. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC,= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB4. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 11\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 5), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7806B/NCV7806B			MC7806C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	5.75	6.0	6.25	5.75	6.0	6.25	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 21\text{ Vdc}$ $9.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 21\text{ Vdc}$	V_O	– 5.7	– 6.0	– 6.3	5.7 –	6.0 –	6.3 –	Vdc
Line Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 6) $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$ $9.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 13\text{ Vdc}$	Reg_{line}	– –	5.5 1.4	120 60	– –	0.5 0.8	24 12	mV
Load Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 6) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg_{load}	–	1.3	120	–	1.3	30	mV
Quiescent Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_B	–	3.3	8.0	–	3.3	8.0	mA
Quiescent Current Change $8.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	– –	– –	– 0.5	–	0.3 0.08	1.3 0.5	mA
Ripple Rejection $9.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 19\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	–	65	–	58	65	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	–	0.9	–	–	0.9	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.3	–	–	–0.3	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

5. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB6. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 11\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 7), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7806AC			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	5.88	6.0	6.12	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $8.6\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 21\text{ Vdc}$	V_O	5.76	6.0	6.24	Vdc
Line Regulation (Note 8) $8.6\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $9.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 13\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$	Reg _{line}	–	5.0 1.4	12 15	mV
Load Regulation (Note 8) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg _{load}	–	1.3 0.9 0.2	25 25 15	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.3	6.0	mA
Quiescent Current Change $9.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $9.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 21\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	–	0.8 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $9.0\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 19\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	58	65	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance ($f = 1.0\text{ kHz}$)	r_O	–	0.9	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{sc}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.3	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

7. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB8. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 14\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 9), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7808B/NCV7808B			MC7808C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	7.7	8.0	8.3	7.7	8.0	8.3	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $10.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 23\text{ Vdc}$ $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 23\text{ Vdc}$	V_O	- 7.6	- 8.0	- 8.4	7.6 -	8.0 -	8.4 -	Vdc
Line Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 10) $10.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$ $11\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 17\text{ Vdc}$	Reg_{line}	- -	6.0 1.7	160 80	- -	6.0 1.7	32 16	mV
Load Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 10) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg_{load}	-	1.4	160	-	1.4	35	mV
Quiescent Current	I_B	-	3.3	8.0	-	3.3	8.0	mA
Quiescent Current Change $10.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	- -	- -	- 0.5	- -	- -	1.0 0.5	mA
Ripple Rejection $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 18\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	-	62	-	56	62	-	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	-	2.0	-	-	2.0	-	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	-	10	-	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	-	0.9	-	-	0.9	-	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	-	0.2	-	-	0.2	-	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	-	2.2	-	-	2.2	-	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	-	-0.4	-	-	-0.4	-	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

9. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB10. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 14\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 11), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7800AB/MC7800AC/NCV7800AB			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	7.84	8.0	8.16	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $10.6\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 23\text{ Vdc}$	V_O	7.7	8.0	8.3	Vdc
Line Regulation (Note 12) $10.6\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $11\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 17\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$ $10.4\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 23\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg _{line}	–	6.0	15	mV
		–	1.7	18	
		–	5.0	15	
Load Regulation (Note 12) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg _{load}	–	1.4	25	mV
		–	1.0	25	
		–	0.22	15	
Quiescent Current	I_B	–	3.3	6.0	mA
Quiescent Current Change $11\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $10.6\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 23\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	–	0.8	mA
		–	–	0.8	
		–	–	0.5	
Ripple Rejection $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 21.5\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	56	62	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	–	0.9	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.4	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

11. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB12. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 15\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 13), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7809B/NCV7809B			MC7809C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	8.65	9.0	9.35	8.65	9.0	9.35	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 24\text{ Vdc}$	V_O	8.55	9.0	9.45	8.55	9.0	9.45	Vdc
Line Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 14) $11\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 26\text{ Vdc}$ $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 17\text{ Vdc}$	Reg _{line}	–	6.2 1.8	32 16	–	6.2 1.8	32 16	mV
Load Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 14) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg _{load}	–	1.5	35	–	1.5	35	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.4	8.0	–	3.4	8.0	mA
Quiescent Current Change $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 26\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	–	1.0 0.5	–	–	1.0 0.5	mA
Ripple Rejection $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 21.5\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	56	61	–	56	61	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	–	1.0	–	–	1.0	–	m Ω
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.5	–	–	–0.5	–	mV/ $^\circ\text{C}$

13. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB14. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 15\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 15), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7809AB/MC7809AC			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	8.82	9.0	9.18	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 24\text{ Vdc}$	V_O	8.65	9.0	9.35	Vdc
Line Regulation (Note 16) $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 26\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $12\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 17\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$ $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 24\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	Regline	–	6.2 1.8 5.2	16 7.0 16	mV
Load Regulation (Note 16) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Regload	–	–	25 25 15	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.3	6.0	mA
Quiescent Current Change $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 26\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 24\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	–	0.8 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $11.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 21.5\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	56	61	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_{I_Vo}		2.0		Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_o	–	1.0	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.5	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

15. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC,
 $= -40^\circ\text{C}$ for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB.

16. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 19\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 17), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7812B/NCV7812B			MC7812C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	11.5	12	12.5	11.5	12	12.5	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $14.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 27\text{ Vdc}$ $15.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 27\text{ Vdc}$	V_O	– 11.4	– 12	– 12.6	11.4 –	12 –	12.6 –	Vdc
Line Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 18) $14.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$ $16\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 22\text{ Vdc}$ $14.8\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 27\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$	Reg _{line}	– – –	7.5 2.2 –	240 120 –	– – –	3.8 0.3 –	24 24 48	mV
Load Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 18) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg _{load}	–	1.6	240	–	8.1	60	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.4	8.0	–	3.4	6.5	mA
Quiescent Current Change $14.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $15\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	– – –	– – –	– 1.0 0.5	– – –	– – –	0.7 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $15\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	–	60	–	55	60	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	–	1.1	–	–	1.1	–	m Ω
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.8	–	–	–0.8	–	mV/ $^\circ\text{C}$

17. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC,
 $= -40^\circ\text{C}$ for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB

18. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 19\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 19), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7812AB/MC7812AC/NCV7812AB			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	11.75	12	12.25	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $14.8\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 27\text{ Vdc}$	V_O	11.5	12	12.5	Vdc
Line Regulation (Note 20) $14.8\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $16\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 22\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$ $14.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 27\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg _{line}	–	3.8 2.2 6.0	18 20 120	mV
Load Regulation (Note 20) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	Reg _{load}	–	–	25 25	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.4	6.0	mA
Quiescent Current Change $15\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $14.8\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 27\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	ΔI_B	–	–	0.8 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $15\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 25\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	55	60	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance ($f = 1.0\text{ kHz}$)	r_O	–	1.1	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{sc}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–0.8	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

19. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC,
= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB

20. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 23\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 21), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7815B/NCV7815B			MC7815C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	14.4	15	15.6	14.4	15	15.6	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $17.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$ $18.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$	V_O	- 14.25	- 15	- 15.75	14.25 -	15 -	15.75 -	Vdc
Line Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 22) $17.9\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$ $20\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 26\text{ Vdc}$	Reg_{line}	- -	8.5 3.0	300 150	- -	8.5 3.0	30 28	mV
Load Regulation, $T_J = 25^\circ\text{C}$ (Note 22) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg_{load}	-	1.8	300	-	1.8	55	mV
Quiescent Current	I_B	-	3.5	8.0	-	3.5	6.5	mA
Quiescent Current Change $17.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$ $17.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	- - -	- - -	- 1.0 0.5	- - -	- - -	0.8 0.7 0.5	mA
Ripple Rejection $18.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 28.5\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	-	58	-	54	58	-	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	-	2.0	-	-	2.0	-	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	-	10	-	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	-	1.2	-	-	1.2	-	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	-	0.2	-	-	0.2	-	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	-	2.2	-	-	2.2	-	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	-	-1.0	-	-	-1.0	-	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

21. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB22. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 23\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 23), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7815AB/MC7815AC			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	14.7	15	15.3	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $17.9\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$	V_O	14.4	15	15.6	Vdc
Line Regulation (Note 24) $17.9\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $20\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 26\text{ Vdc}$ $17.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg _{line}	–	8.5 3.0 7.0	20 22 20	mV
Load Regulation (Note 24) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg _{load}	–	1.8 1.5 1.2	25 25 15	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.5	6.0	mA
Quiescent Current Change $17.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $17.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	–	0.8 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $18.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 28.5\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	60	80	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	–	1.2	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–1.0	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

23. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC,= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB24. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 27\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 25), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7818B			MC7818C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	17.3	18	18.7	17.3	18	18.7	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) 21 Vdc $\leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$ 22 Vdc $\leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$	V_O	- 17.1	- 18	- 18.9	17.1 -	18 -	18.9 -	Vdc
Line Regulation, (Note 26) 21 Vdc $\leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$ 24 Vdc $\leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$	Reg_{line}	- -	9.5 3.2	360 180	- -	9.5 3.2	50 25	mV
Load Regulation, (Note 26) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg_{load}	-	2.0	360	-	2.0	55	mV
Quiescent Current	I_B	-	3.5	8.0	-	3.5	6.5	mA
Quiescent Current Change 21 Vdc $\leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	- -	- -	- 0.5	- -	- -	1.0 0.5	mA
Ripple Rejection 22 Vdc $\leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	-	57	-	53	57	-	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_{II} - V_O$	-	2.0	-	-	2.0	-	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	-	10	-	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	-	1.3	-	-	1.3	-	m Ω
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{sc}	-	0.2	-	-	0.2	-	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	-	2.2	-	-	2.2	-	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	-	-1.5	-	-	-1.5	-	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

25. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC,
 $= -40^\circ\text{C}$ for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB

26. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 27\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 27), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7818AC			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	17.64	18	18.36	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $21\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$	V_O	17.3	18	18.7	Vdc
Line Regulation (Note 28) $21\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $24\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$ $24\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $20.6\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg _{line}	–	9.5 3.2 3.2 8.0	22 25 10.5 22	mV
Load Regulation (Note 28) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg _{load}	–	2.0 1.8 1.5	25 25 15	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.5	6.0	mA
Quiescent Current Change $21\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 33\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $21.5\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 30\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	–	0.8 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $22\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 32\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	53	57	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	–	1.3	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{sc}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–1.5	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

27. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB28. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 33\text{ V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 29), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7824B			MC7824C			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	23	24	25	23	24	25	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $27\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$ $28\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$	V_O	- 22.8	- 24	- 25.2	22.8 -	24 -	25.2 -	Vdc
Line Regulation, (Note 30) $27\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$ $30\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 36\text{ Vdc}$	Reg_{line}	- -	11.5 3.8	480 240	- -	2.7 2.7	60 48	mV
Load Regulation, (Note 30) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$	Reg_{load}	-	2.1	480	-	4.4	65	mV
Quiescent Current	I_B	-	3.6	8.0	-	3.6	6.5	mA
Quiescent Current Change $27\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	- -	- -	- 0.5	- -	- -	1.0 0.5	mA
Ripple Rejection $28\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$	RR	-	54	-	50	54	-	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	-	2.0	-	-	2.0	-	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	-	10	-	-	10	-	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance $f = 1.0\text{ kHz}$	r_O	-	1.4	-	-	1.4	-	m Ω
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{SC}	-	0.2	-	-	0.2	-	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	-	2.2	-	-	2.2	-	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	-	-2.0	-	-	-2.0	-	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

29. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC.= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB30. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ($V_{in} = 33\text{ V}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = T_{low}$ to 125°C (Note 31), unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	MC7824AC			Unit
		Min	Typ	Max	
Output Voltage ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	V_O	23.5	24	24.5	Vdc
Output Voltage ($5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$, $P_D \leq 15\text{ W}$) $27.3\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$	V_O	23.2	24	25.8	Vdc
Line Regulation (Note 32) $27\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $30\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 36\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$ $30\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 36\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $26.7\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$, $I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$	Reg _{line}	–	11.5 3.8 3.8 10	25 28 12 25	mV
Load Regulation (Note 32) $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.5\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_O \leq 750\text{ mA}$	Reg _{load}	–	2.1 2.0 1.8	15 25 15	mV
Quiescent Current	I_B	–	3.6	6.0	mA
Quiescent Current Change $27.3\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$, $I_O = 500\text{ mA}$ $27\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$ $5.0\text{ mA} \leq I_O \leq 1.0\text{ A}$	ΔI_B	–	–	0.8 0.8 0.5	mA
Ripple Rejection $28\text{ Vdc} \leq V_{in} \leq 38\text{ Vdc}$, $f = 120\text{ Hz}$, $I_O = 500\text{ mA}$	RR	45	54	–	dB
Dropout Voltage ($I_O = 1.0\text{ A}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	$V_I - V_O$	–	2.0	–	Vdc
Output Noise Voltage ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ kHz}$	V_n	–	10	–	$\mu\text{V}/V_O$
Output Resistance ($f = 1.0\text{ kHz}$)	r_O	–	1.4	–	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current Limit ($T_A = 25^\circ\text{C}$) $V_{in} = 35\text{ Vdc}$	I_{sc}	–	0.2	–	A
Peak Output Current ($T_J = 25^\circ\text{C}$)	I_{max}	–	2.2	–	A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	TCV_O	–	–2.0	–	$\text{mV}/^\circ\text{C}$

31. $T_{low} = 0^\circ\text{C}$ for MC78XXC, MC78XXAC,= -40°C for NCV78XX, MC78XXB, MC78XXAB, and MC78XXAEB32. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

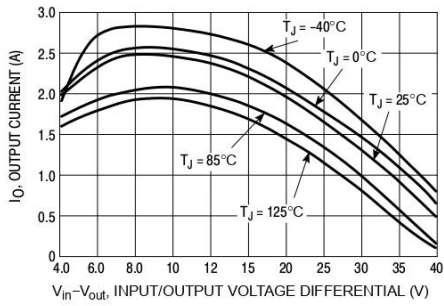


Figure 2. Peak Output Current as a Function of Input/Output Differential Voltage (MC78XXC, AC, B)

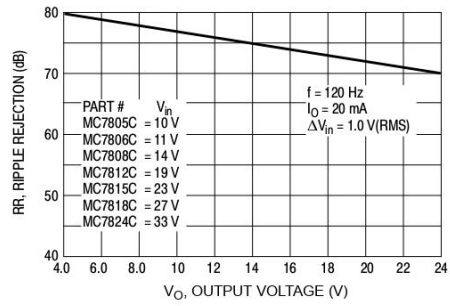


Figure 3. Ripple Rejection as a Function of Output Voltages (MC78XXC, AC, B)

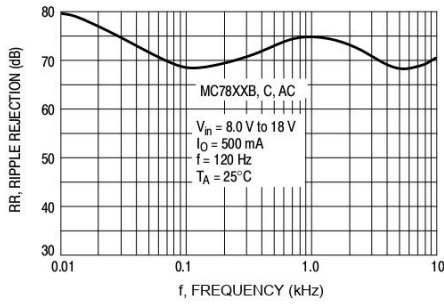


Figure 4. Ripple Rejection as a Function of Frequency (MC78XXC, AC, B)

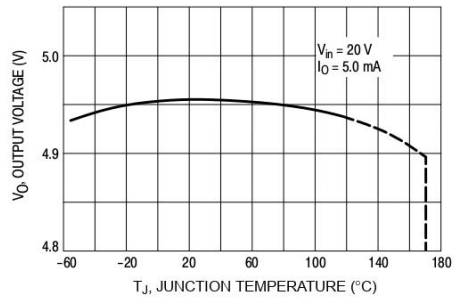


Figure 5. Output Voltage as a Function of Junction Temperature (MC7805C, AC, B)

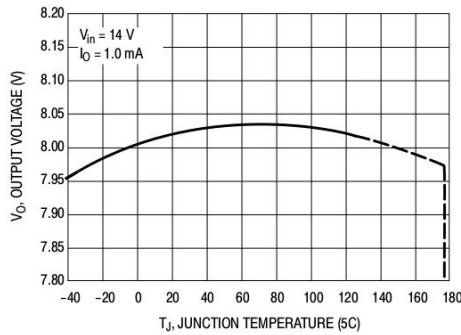


Figure 6. Output Voltage as a Function of Junction Temperature (MC7808AE)

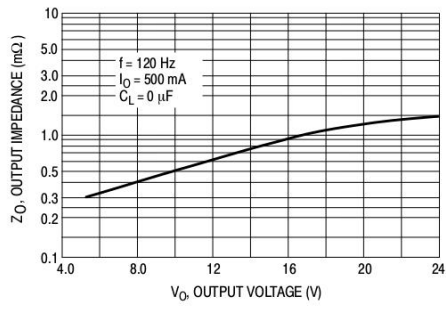
MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

Figure 7. Output Impedance as a Function of Output Voltage (MC78XXC, AC, B)

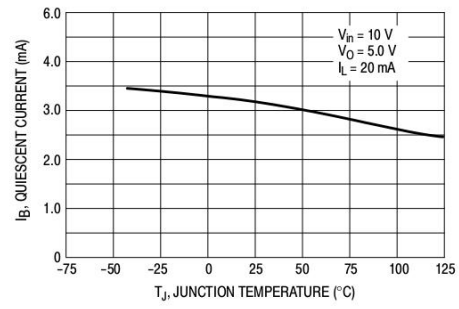


Figure 8. Quiescent Current as a Function of Temperature (MC78XXC, AC, B)

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

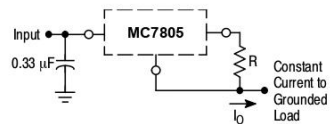
APPLICATIONS INFORMATION

Design Considerations

The MC7800 Series of fixed voltage regulators are designed with Thermal Overload Protection that shuts down the circuit when subjected to an excessive power overload condition, Internal Short Circuit Protection that limits the maximum current the circuit will pass, and Output Transistor Safe-Area Compensation that reduces the output short circuit current as the voltage across the pass transistor is increased.

In many low current applications, compensation capacitors are not required. However, it is recommended that the regulator input be bypassed with a capacitor if the regulator is connected to the power supply filter with long

wire lengths, or if the output load capacitance is large. An input bypass capacitor should be selected to provide good high-frequency characteristics to insure stable operation under all load conditions. A 0.33 μF or larger tantalum, mylar, or other capacitor having low internal impedance at high frequencies should be chosen. The bypass capacitor should be mounted with the shortest possible leads directly across the regulators input terminals. Normally good construction techniques should be used to minimize ground loops and lead resistance drops since the regulator has no external sense lead.



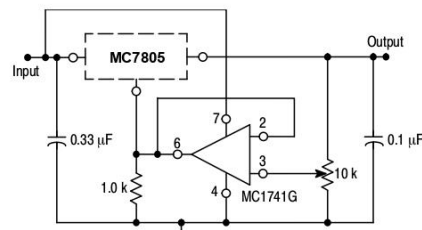
The MC7800 regulators can also be used as a current source when connected as above. In order to minimize dissipation the MC7805C is chosen in this application. Resistor R determines the current as follows:

$$I_O = \frac{5.0 \text{ V}}{R} + I_B$$

$$I_B \cong 3.2 \text{ mA over line and load changes.}$$

For example, a 1.0 A current source would require R to be a 5.0 Ω , 10 W resistor and the output voltage compliance would be the input voltage less 7.0 V.

Figure 9. Current Regulator

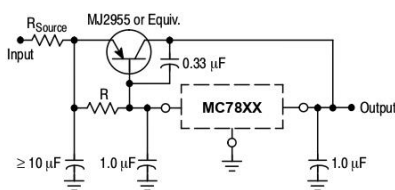


$$V_O = 7.0 \text{ V to } 20 \text{ V}$$

$$V_{IN} = V_O \geq 2.0 \text{ V}$$

The addition of an operational amplifier allows adjustment to higher or intermediate values while retaining regulation characteristics. The minimum voltage obtainable with this arrangement is 2.0 V greater than the regulator voltage.

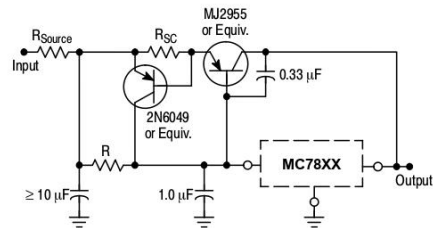
Figure 10. Adjustable Output Regulator



XX = 2 digits of type number indicating voltage.

The MC7800 series can be current boosted with a PNP transistor. The MJ2955 provides current to 5.0 A. Resistor R in conjunction with the V_{BE} of the PNP determines when the pass transistor begins conducting; this circuit is not short circuit proof. Input/output differential voltage minimum is increased by V_{BE} of the pass transistor.

Figure 11. Current Boost Regulator



XX = 2 digits of type number indicating voltage.

The circuit of Figure 11 can be modified to provide supply protection against short circuits by adding a short circuit sense resistor, R_{SC} , and an additional PNP transistor. The current sensing PNP must be able to handle the short circuit current of the three-terminal regulator. Therefore, a four-ampere plastic power transistor is specified.

Figure 12. Short Circuit Protection

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

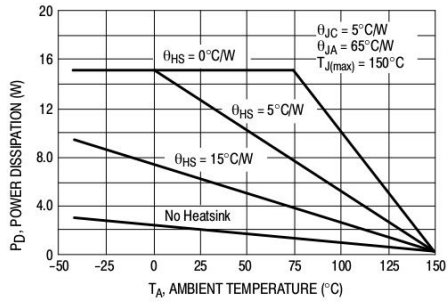


Figure 13. Worst Case Power Dissipation versus Ambient Temperature (Case 221A)

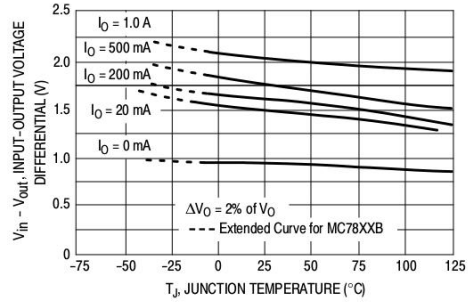


Figure 14. Input Output Differential as a Function of Junction Temperature (MC78XXC, AC, B)

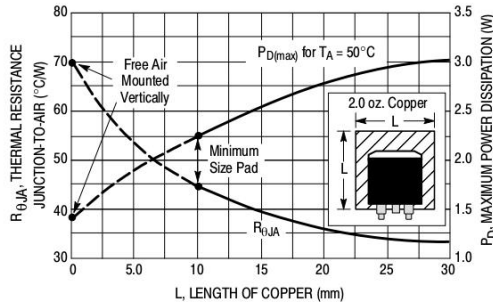


Figure 15. D²PAK Thermal Resistance and Maximum Power Dissipation versus P.C.B. Copper Length

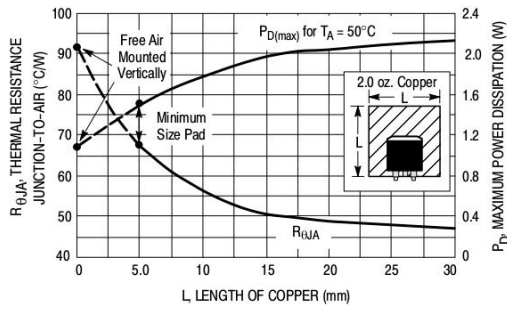


Figure 16. DPAK Thermal Resistance and Maximum Power Dissipation versus P.C.B. Copper Length

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**DEFINITIONS**

Line Regulation – The change in output voltage for a change in the input voltage. The measurement is made under conditions of low dissipation or by using pulse techniques such that the average chip temperature is not significantly affected.

Load Regulation – The change in output voltage for a change in load current at constant chip temperature.

Maximum Power Dissipation – The maximum total device dissipation for which the regulator will operate within specifications.

Quiescent Current – That part of the input current that is not delivered to the load.

Output Noise Voltage – The rms ac voltage at the output, with constant load and no input ripple, measured over a specified frequency range.

Long Term Stability – Output voltage stability under accelerated life test conditions with the maximum rated voltage listed in the devices' electrical characteristics and maximum power dissipation.

ORDERING INFORMATION

Device	Nominal Voltage	Operating Temperature Range	Package	Shipping†
MC7805ABD2TG	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7805ABD2TR4G	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
NCV7805ABD2TR4G*	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7805ABTG	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7805ACD2TG	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7805ACD2TR4G	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7805ACTG	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7805BD2TG	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7805BD2TR4G	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7805BDTG	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7805BDTRKG	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
NCV7805BDTRKG*	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7805BTG	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
NCV7805BTG*	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
NCV7805BD2TG*	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units /Rail
NCV7805BD2TR4G*	5.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7805CD2TG	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units /Rail

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

*NCV devices: T_{low} = -40°C, T_{high} = +125°C. Guaranteed by design. NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable.

<http://onsemi.com>

23

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ORDERING INFORMATION** (continued)

Device	Nominal Voltage	Operating Temperature Range	Package	Shipping [†]
MC7805CD2TR4G	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7805CDTG	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7805CDTRKG	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7805CTG	5.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7806ACTG	6.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7806BD2TG	6.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7806BD2TR4G	6.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7806BTG	6.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7806CTG	6.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808ABD2TG	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808ABD2TR4G	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
NCV7808ABD2TR4G*	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7808ABTG	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808ACTG	8.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808AEBTG	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808BD2TG	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808BD2TR4G	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
NCV7808BD2TR4G*	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7808BDTG	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
NCV7808BDTG*	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7808BDTRKG	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
NCV7808BDTRKG*	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7808BTG	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail

[†]For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

*NCV devices: T_{low} = -40°C, T_{high} = +125°C. Guaranteed by design. NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ORDERING INFORMATION** (continued)

Device	Nominal Voltage	Operating Temperature Range	Package	Shipping [†]
NCV7808BTG*	8.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808CD2TG	8.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7808CD2TR4G	8.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7808CDTG	8.0 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7808CDTT5G	8.0 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7808CDTRKG	8.0 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7808CTG	8.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7809ABTG	9.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7809ACTG	9.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
NCV7809BD2TR4G*	9.0 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7809BTG	9.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
NCV7809BTG*	9.0 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7809CD2TG	9.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7809CD2TR4G	9.0 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7809CTG	9.0 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7812ABD2TG	12 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7812ABD2TR4G	12 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7812ABTG	12 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
NCV7812ABTG*	12 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7812ACD2TG	12 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7812ACD2TR4G	12 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7812ACTG	12 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7812BD2TG	12 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail

[†]For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

*NCV devices: T_{low} = -40°C, T_{high} = +125°C. Guaranteed by design. NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable.

<http://onsemi.com>

25

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ORDERING INFORMATION** (continued)

Device	Nominal Voltage	Operating Temperature Range	Package	Shipping†
MC7812BD2TR4G	12 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
NCV7812BD2TR4G*	12 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7812BDTG	12 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7812BDTRKG	12 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7812BTG	12 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
NCV7812BTG*	12 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7812CD2TG	12 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7812CD2TR4G	12 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7812CDTG	12 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7812CDTRKG	12 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7812CTG	12 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7815ABD2TG	15 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7815ABD2TR4G	15 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7815ABTG	15 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7815ACD2TG	15 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7815ACTG	15 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7815BD2TG	15 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7815BD2TR4G	15 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7815BDTG	15 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7815BDTRKG	15 V	T _J = -40°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7815BTG	15 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
NCV7815BTG*	15 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units / Rail
MC7815CD2TG	15 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units / Rail

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

*NCV devices: T_{low} = -40°C, T_{high} = +125°C. Guaranteed by design. NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable.

<http://onsemi.com>

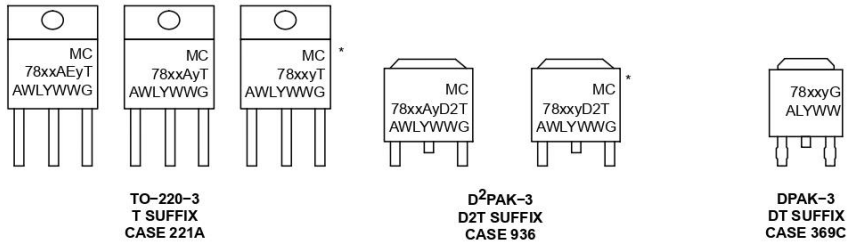
26

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**ORDERING INFORMATION** (continued)

Device	Nominal Voltage	Operating Temperature Range	Package	Shipping [†]
MC7815CD2TR4G	15 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7815CDTG	15 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	75 Units / Rail
MC7815CDTRKG	15 V	T _J = 0°C to +125°C	DPAK (Pb-free)	2500 / Tape & Reel
MC7815CTG	15 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7818ACTG	18 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7818BTG	18 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7818CD2TR4G	18 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7818CTG	18 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7824ACTG	24 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7824BD2TG	24 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7824BD2TR4G	24 V	T _J = -40°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7824BTG	24 V	T _J = -40°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7824CD2TG	24 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	50 Units /Rail
MC7824CD2TR4G	24 V	T _J = 0°C to +125°C	D ² PAK (Pb-free)	800 / Tape & Reel
MC7824CTG	24 V	T _J = 0°C to +125°C	TO-220 (Pb-free)	50 Units /Rail

[†]For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

*NCV devices: T_{low} = -40°C, T_{high} = +125°C. Guaranteed by design. NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800**MARKING DIAGRAMS**

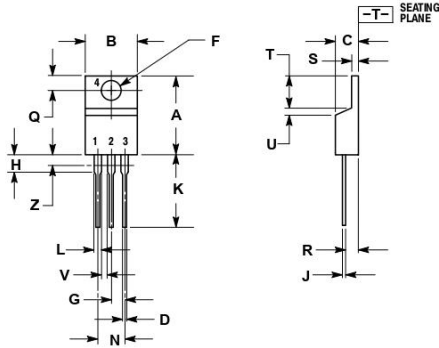
*This marking diagram also applies to NCV78xx family.

xx = 05, 06, 08, 09, 12, 15, 18, or 24
 y = B or C
 A = Assembly Location
 WL, L = Wafer Lot
 Y = Year
 WW = Work Week
 G = Pb-Free Device

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220, SINGLE GAUGE
CASE 221AB
ISSUE A



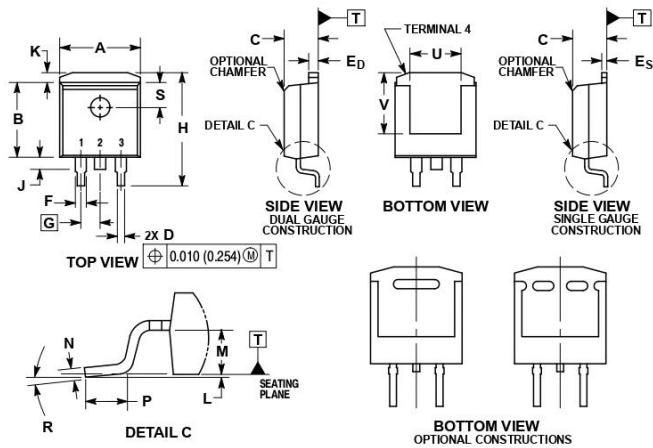
- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCHES.
 3. DIMENSION Z DEFINES A ZONE WHERE ALL BODY AND LEAD IRREGULARITIES ARE ALLOWED.
 4. PRODUCT SHIPPED PRIOR TO 2008 HAD DIMENSIONS S = 0.045 - 0.055 INCHES (1.143 - 1.397 MM)

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.570	0.620	14.48	15.75
B	0.380	0.405	9.66	10.28
C	0.190	0.190	4.87	4.87
D	0.025	0.025	0.64	0.64
F	0.142	0.147	3.61	3.73
G	0.095	0.105	2.42	2.66
H	0.110	0.155	2.80	3.93
J	0.018	0.025	0.46	0.64
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.090	1.15	1.52
N	0.190	0.210	4.83	5.33
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.080	0.110	2.04	2.79
S	0.020	0.024	0.508	0.611
T	0.235	0.255	5.97	6.47
U	0.000	0.050	0.00	1.27
V	0.045	---	1.15	---
Z	---	0.080	---	2.04

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

PACKAGE DIMENSIONS

D²PAK-3
CASE 936-03
ISSUE D

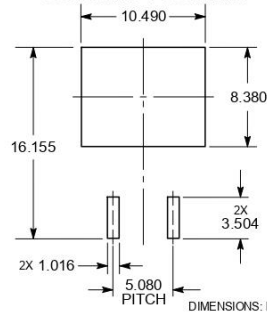


NOTES:

- DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
- CONTROLLING DIMENSION: INCHES.
- TAB CONTOUR OPTIONAL WITHIN DIMENSIONS A AND K.
- DIMENSIONS U AND V ESTABLISH A MINIMUM MOUNTING SURFACE FOR TERMINAL 4.
- DIMENSIONS A AND B DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR GATE PROTRUSIONS. MOLD FLASH AND GATE PROTRUSIONS NOT TO EXCEED 0.025 (0.635) MAXIMUM.
- SINGLE GAUGE DESIGN WILL BE SHIPPED AFTER FPON EXPIRATION IN OCTOBER 2011.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.386	0.403	9.804	10.236
B	0.356	0.368	9.042	9.347
C	0.170	0.180	4.318	4.572
D	0.026	0.036	0.660	0.914
E _D	0.045	0.055	1.143	1.397
E _S	0.018	0.026	0.457	0.660
F	0.051 REF		1.296 REF	
G	0.100 BSC		2.540 BSC	
H	0.539 ± 0.579		13.691 ± 14.707	
J	0.125 MAX		3.175 MAX	
K	0.050 REF		1.270 REF	
L	0.000	0.010	0.000	0.254
M	0.088	0.102	2.235	2.591
N	0.016	0.026	0.457	0.660
P	0.056	0.078	1.423	1.991
R	5° REF		5° REF	
S	0.116 REF		2.946 REF	
U	0.200 MIN		5.080 MIN	
V	0.250 MIN		6.350 MIN	

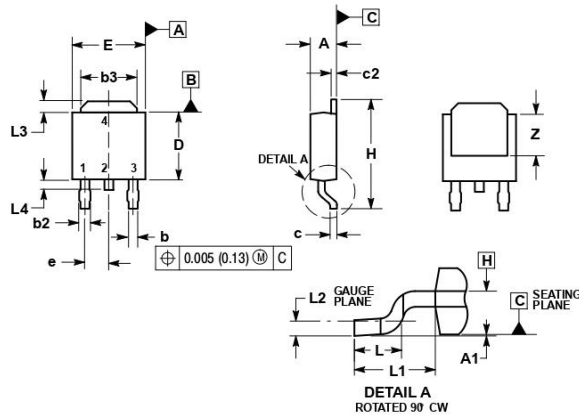
SOLDERING FOOTPRINT*



*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

MC7800, MC7800A, MC7800AE, NCV7800

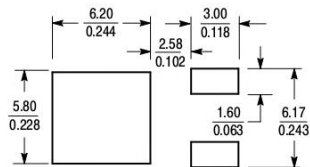
PACKAGE DIMENSIONS

DPAK-3
CASE 369C
ISSUE D

- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCHES.
 3. THERMAL PAD CONTOUR OPTIONAL. WITHIN DIMENSIONS b3, L3 and Z.
 4. DIMENSIONS D AND E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH, PROTRUSIONS, OR BURRS. MOLD FLASH, PROTRUSIONS, OR GATE BURRS SHALL NOT EXCEED 0.006 INCHES PER SIDE.
 5. DIMENSIONS D AND E ARE DETERMINED AT THE OUTERMOST EXTREMES OF THE PLASTIC BODY.
 6. DATUMS A AND B ARE DETERMINED AT DATUM PLANE H.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.085	0.094	2.18	2.38
A1	0.000	0.005	0.00	0.13
b	0.025	0.035	0.63	0.89
b2	0.030	0.045	0.76	1.14
b3	0.180	0.215	4.57	5.46
c	0.018	0.024	0.46	0.61
c2	0.018	0.024	0.46	0.61
D	0.235	0.245	5.97	6.22
E	0.250	0.265	6.35	6.73
e	0.090 BSC		2.29 BSC	
H	0.370	0.410	9.40	10.41
L	0.055	0.070	1.40	1.78
L1	0.108 REF		2.74 REF	
L2	0.020 BSC		0.51 BSC	
L3	0.035	0.050	0.89	1.27
L4	---	0.040	---	1.01
Z	0.155	---	3.93	---

SOLDERING FOOTPRINT*



SCALE 3:1 (mm/inches)

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

ON Semiconductor and are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of SCILLC's product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marketing.pdf. SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative

MC7800/D