



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

**DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL
DE LA FLOTABILIDAD DE UN
VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO**

TRABAJO DE FIN DE GRADO:
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: José Andrés Grau Martínez
Director: Jose Vicente Busquets Mataix
Codirector: Javier Busquets Mataix

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2017

RESUMEN

El presente proyecto aborda el diseño de la electrónica de control del sistema de flotabilidad de un vehículo autónomo subacuático (AUV^[1] tipo Underwater Glider), en desarrollo por varios TFG de las escuelas ETSID y ETSINF.

Del conjunto del submarino, el subsistema hidráulico está compuesto de una bomba de agua y 4 electroválvulas. Estos actuadores irán en el interior del glider.

La electrónica de control se divide en módulos individuales para cada actuador. Tras analizar los actuadores y una vez diseñados, simulados y probados los circuitos en una placa de prototipado, se integran en PCBs que harán de interfaz entre el microcontrolador y los propios actuadores.

Para la implementación del control se utiliza un Arduino Mega 2560; para este se desarrollan las funciones y partes de código que son necesarias para su integración en el proyecto completo.

El código permite, mediante funciones sencillas de usar, hacer funcionar la bomba de agua y las electroválvulas para llenar las vejigas a una velocidad controlada así como vaciarlas. Para implementar el control en bucle cerrado de la bomba de agua se cuenta con un caudalímetro.

El montaje hidráulico, con el que se da fin a este TFG, está realizado en un panel que simula la distribución interior de los actuadores en el interior del glider.

Palabras clave: AUV, Arduino, Control, Electroválvula, Bomba, PCB

^[1] Autonomous underwater vehicle

RESUM

El present projecte tracta el disseny de la electrònica de control del sistema de flotabilitat d'un vehicle autònom subaquàtic (AUV^[2] de tipus Underwater Glider) en desenvolupament per diversos TFG de les escoles ETSID i ETSINF.

Del conjunt del submarí, el subsistema hidràulic està format per una bomba d'aigua i 4 electrovàlvules. Aquests actuadors aniran a l'interior del glider.

La electrònica de control es divideix en mòduls individuals per a cada actuador. Després de l'anàlisi dels actuadors i una vegada dissenyats, simulats i provats els circuits en una placa de prototipat, s'integren en PCBs que fan d'enllaç entre el microcontrolador i els propis actuadors..

Per a la implementació del control s'utilitza un Arduino Mega 2560, per a aquest es desenvolupen les funcions i parts de còdic que son necessàries per a la seua integració al projecte complet.

El codi permet, mitjançant funcions senzilles d'utilitzar fer funcionar la bomba d'aigua i les electrovàlvules per a plenar els tancs a una velocitat controlada així com buidar-los. Per a implementar en control en llaç tancat de la bomba d'aigua es compta amb un caudalímetre.

El muntatge hidràulic, amb el que es dona fi a aquest TFG, està realitzat en un panel que simula la distribució interior dels actuadors en l'interior del glider.

Paraules clau: AUV, Arduino, Control, Electrovàlvula, Bomba, PCB

^[2] Autonomous underwater vehicle

ABSTRACT

This project treats the design of the control's electronics of the buoyancy system of an unmanned underwater (an AUV^[3] of the type Underwater Glider) that is being developed by several TFG from the schools ETSID and ETSINF.

From the submarine as a whole, a water pump and four electrovalves form the hydraulic subsystem. All this actuators will be mounted inside the glider.

The control's electronics are divided in individual modules for each actuator. After the analysis of the actuators, and once the circuits are designed, simulated and tested, they are integrated in a printed board designed for that purpose.

The implementation of the control is made using an Arduino Mega 2560, for this are developed all the functions and pieces of code needed for the integration in the project.

The code allows, through easy-to-use functions, fill the tanks with a controlled flow and also empty them. To implement the closed loop control of the water pump a flowmeter is used.

All the hydraulic parts are mounted in a panel, ending so this project. The panel recreates the internal distribution of the actuators inside the glider.

Keywords: AUV, Arduino, Control, Electrovalve, Pump, PCB

^[3] Autonomous underwater vehicle

DOCUMENTOS

1. MEMORIA
2. PRESUPUESTO
3. ESQUEMAS Y DIAGRAMAS
4. PLIEGO DE CONDICIONES
5. ANEXOS



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA FLOTABILIDAD DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO

1. MEMORIA

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: José Andrés Grau Martínez

Director: Jose Vicente Busquets Mataix

Codirector: Javier Busquet Mataix

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2017

Tabla de contenidos

Contenido

1. Introducción	4
1.1 Contextualización	5
1.2 Motivación	6
1.3 Objetivos	6
2. Planificación	7
3. Diseño y desarrollo	9
3.1 Funcionamiento de la bomba de agua	9
3.2 Diseño del circuito para la bomba de agua	11
3.3 Simulación del circuito para la bomba de agua	16
3.4 Funcionamiento de la electroválvula	18
3.5 Validación del circuito para la electroválvula	19
3.6 Prototipado del circuito	20
3.7 Diseño de la PCB para la bomba de agua	21
3.8 Funcionamiento del caudalímetro	25
3.9 Código para el control	26
3.9.1 Configuración del timer 3	26
3.9.2 Generación de la señal cuadrada	29
3.9.3 Lectura del sensor de caudal	31
3.9.4 Control en bucle cerrado del caudal	32
3.10 Montaje	33
4. Pruebas	34
4.1 Caracterización de la bomba	34
5. Conclusiones	40
6. Bibliografía	41

Tabla de figuras

Figura 1: Esquema de la planificación.....	8
Figura 2: Configuración básica.....	9
Figura 3: Voltajes de entrada y salida del transformador.....	10
Figura 4: Funcionamiento de la bomba de agua.....	10
Figura 5: Primer circuito propuesto.....	11
Figura 6: Detalle de la conmutación a ON del MOSFET.....	13
Figura 7: Circuito completo.....	15
Figura 8: Transitorio de inicio a 50 Hz.....	16
Figura 9: Régimen permanente a 50 Hz.....	17
Figura 10: Régimen permanente a 100 Hz.....	17
Figura 11: Símbolo.....	18
Figura 12: Circuito en placa de prototipado.....	20
Figura 13: Corriente a través de la carga.....	20
Figura 14: Esquema eléctrico en EAGLE.....	21
Figura 15: Diseño del layout del conector de la señal de control.....	21
Figura 16: Diseño del layout del optoacoplador.....	22
Figura 17: Diseño del layout del MOSFET.....	22
Figura 18: Diseño del layout del conector de potencia.....	22
Figura 19: PCB diseñada.....	23
Figura 20: Proceso de fabricación de la PCB.....	24
Figura 21: PCB vacía y con los componentes ya soldados.....	24
Figura 22: Interior del caudalímetro.....	25
Figura 23: Señal de salida del caudalímetro.....	25
Figura 24: Señal de salida para el control de la bomba.....	29
Figura 25: Montaje del sistema en el panel.....	33
Figura 26: Caudal en función del tiempo con control a 20 Hz.....	34
Figura 27: Caudal en función del tiempo con control a 30 Hz.....	34
Figura 28: Caudal en función del tiempo con control a 35 Hz.....	35
Figura 29: Caudal en función del tiempo con control a 40 Hz.....	35
Figura 30: Caudal en función del tiempo con control a 45 Hz.....	35
Figura 31: Caudal en función del tiempo con control a 50 Hz.....	36
Figura 32: Caudal en función del tiempo con control a 55 Hz.....	36
Figura 33: Caudal en función del tiempo con control a 60 Hz.....	36
Figura 34: Caudal en función del tiempo con control a 65 Hz.....	37
Figura 35: Caudal en función del tiempo con control a 70 Hz.....	37
Figura 36: Caudal en función del tiempo con control a 80 Hz.....	37
Figura 37: Caudal en función del tiempo con control a 90 Hz.....	38
Figura 38: Caudal en función del tiempo con control a 100 Hz.....	38
Figura 39: Caudal en función de la frecuencia. De 20 Hz a 100 Hz.....	38
Figura 40: Caudal en función de la frecuencia. De 40 a 60 Hz.....	39

1. Introducción

Este trabajo de fin de grado se integra en un proyecto que propone una solución de bajo coste y alta versatilidad ante la creciente necesidad^[4] de la exploración de la geografía submarina y la medición de variables como la temperatura del agua, la velocidad de las corrientes, niveles de salinidad, etc.

El océano cubre aproximadamente el 70% de la superficie terrestre. Y las actividades que se desarrollan en él son muy diversas, entre otras, la pesca comercial, la investigación oceánica, la minería marina o el uso de energía mareomotriz. Los recursos ocultos bajo el agua son abundantes.

El océano juega también un papel crucial en el problema del calentamiento global, ya que cada vez retiene más y más energía incrementando así su temperatura. Por tanto, no es difícil predecir que estos cambios en el océano tendrán un gran impacto en el planeta^[5].

Aun así, el foco de la atención no está aquí. Pasa desapercibido para el público general ya que los esfuerzos para combatir el cambio climático se centran principalmente en actuar en tierra firme^[6] y en su efecto en la atmosfera. A esto se le suma que el océano no está explorado en toda su extensión.

Existen estudios^{[7],[8]}, que utilizaban submarinos tripulados, que demuestran que una gran cantidad de dióxido de carbono procede del fondo marino y de grupos de organismos que viven en volcanes submarinos.

Por tanto, los vehículos submarinos pueden ayudar a los investigadores a adquirir información para entender el océano, saber que efecto tiene el calentamiento global en él y, así, desarrollar herramientas para protegerlo y utilizarlo eficientemente.

Sin embargo, la exploración submarina entraña peligros añadidos debido a la naturaleza (todavía) impredecible del ambiente oceánico. Desarrollando una gama de vehículos no tripulados de bajo coste se pretende que grupos de investigación que por los riesgos que conllevan estas expediciones no pueden permitirse la pérdida o la avería de los actuales vehículos comerciales puedan empezar a trabajar.

^[4] http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/articulos-de-opinion/2016-10-chicote-pujana_tcm7-432603.pdf

^[5] <http://science.sciencemag.org/content/328/5985/1520>

^[6] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/047134608X.W5402.pub2/pdf>

^[7] <http://science.sciencemag.org/content/328/5982/1147>

^[8] <http://www.ingentaconnect.com/content/sut/unwt/2010/00000029/00000002/art00004>

1.1 Contextualización

Actualmente, el desarrollo de vehículos no tripulados está en auge debido a las posibilidades que ofrecen para desempeñar un gran número de tareas no necesitando tripulación, consiguiendo menores costes, y sin poner en riesgo vidas humanas.

Los vehículos autónomos submarinos (en adelante AUV, *Autonomous Underwater Vehicle*), son robots que viajan por debajo del agua sin que nadie los maneje, a diferencia de los ROV (*Remotely Operated Vehicle*), que están controlados a distancia por un operador^[9].

En cuanto a la propulsión hay dos soluciones principales^[10], siempre teniendo en cuenta que la fuente de energía para los AUV, hoy en día, son fundamentalmente las baterías recargables.

Así pues, se puede optar por turbinas movidas por motores eléctricos (con o sin escobillas) que, aunque hacen un consumo intensivo de la carga de la batería, permite alcanzar altas velocidades y tener una maniobrabilidad elevada.

Por otra parte, los planeadores submarinos (underwater glider), no se propulsan por si mismos; sus aletas están diseñadas de manera que cambiando el centro de gravedad mientras se hunden o salen a flote, convierten el movimiento vertical en avance. Para variar la flotabilidad utilizan unas vejigas que se llenan de un fluido menos denso que el agua (típicamente aceite) con una bomba para hundirse y se vacían para flotar. Para cambiar el centro de gravedad, se mueve una carga interna (típicamente las baterías) a lo largo del casco.

Este proyecto se centra en los AUV de tipo planeador, ya que al estar enfocados a la investigación submarina y la recolección de datos prima la autonomía y la distancia recorrida sobre la velocidad de desplazamiento.

^[9] <http://www.oceanografialitoral.com/productos/auv-rov>

^[10] https://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_underwater_vehicle#Propulsion

1.2 Motivación

Para mí, estudiante de ingeniería electrónica industrial y automática, la razón por la que he elegido este proyecto viene dada por la posibilidad que me ha ofrecido de, partiendo de la necesidad de controlar la flotabilidad del vehículo, llevar a cabo el desarrollo electrónico completo desde la idea del circuito hasta la PCB, pasando por los cálculos en papel, la simulación, el prototipado, y el diseño de la PCB. Así como el control en bucle cerrado del caudal de salida de una bomba de agua, utilizando las dos ramas principales, electrónica y automática, en las que se basa el grado, para cumplir el objetivo.

Habiendo participado anteriormente en otros proyectos que se centraban únicamente o bien en la parte puramente electrónica, en la parte de programación o en la parte de control, este proyecto ha supuesto un reto al aunar lo aprendido de cada rama dándole un enfoque más amplio.

1.3 Objetivos

El objetivo de este proyecto es, dadas las electroválvulas y la bomba de agua a utilizar, diseñar la electrónica de control así como el código que sea necesario para llenar las vejigas del submarino con un caudal controlado.

2. Planificación

El proyecto se ha desarrollado de manera modular, desarrollando y probando individualmente las diferentes secciones que lo componen para finalmente ensamblarlo todo.

Primero, se realizó un análisis de los actuadores a utilizar. Buscando así cual sería la mejor estrategia para controlarlos; y si fuese posible, que el mismo circuito sirviese tanto para la bomba como para las electroválvulas.

Una vez escogido el circuito, tuvo lugar la validación de la simulación, con el fin de observar que el comportamiento del circuito era el correcto y que permitía controlar ambos actuadores como se pretendía.

Estando ya clara la estrategia de control, se implementó el código que permitiese generar la onda cuadrada para el control de la bomba, la lectura del caudalímetro y se dejaron las bases para la retroalimentación.

El siguiente paso fue la elección de componentes, teniendo en cuenta una buena relación calidad-precio-disponibilidad. Finalmente se optó por comprar en una tienda física de Valencia la gran mayoría de los componentes.

Tras testear el circuito en una placa de prototipado se procedió al diseño de la PCB, la impresión de la cual fue encargada a la empresa PCBWay^[11] por su precio imbatible y rápida entrega.

Finalmente, al recibir las placas se procedió a soldar los componentes y preparar el panel sobre el que va montado el sistema.

[11] www.pcbway.com

1. Memoria

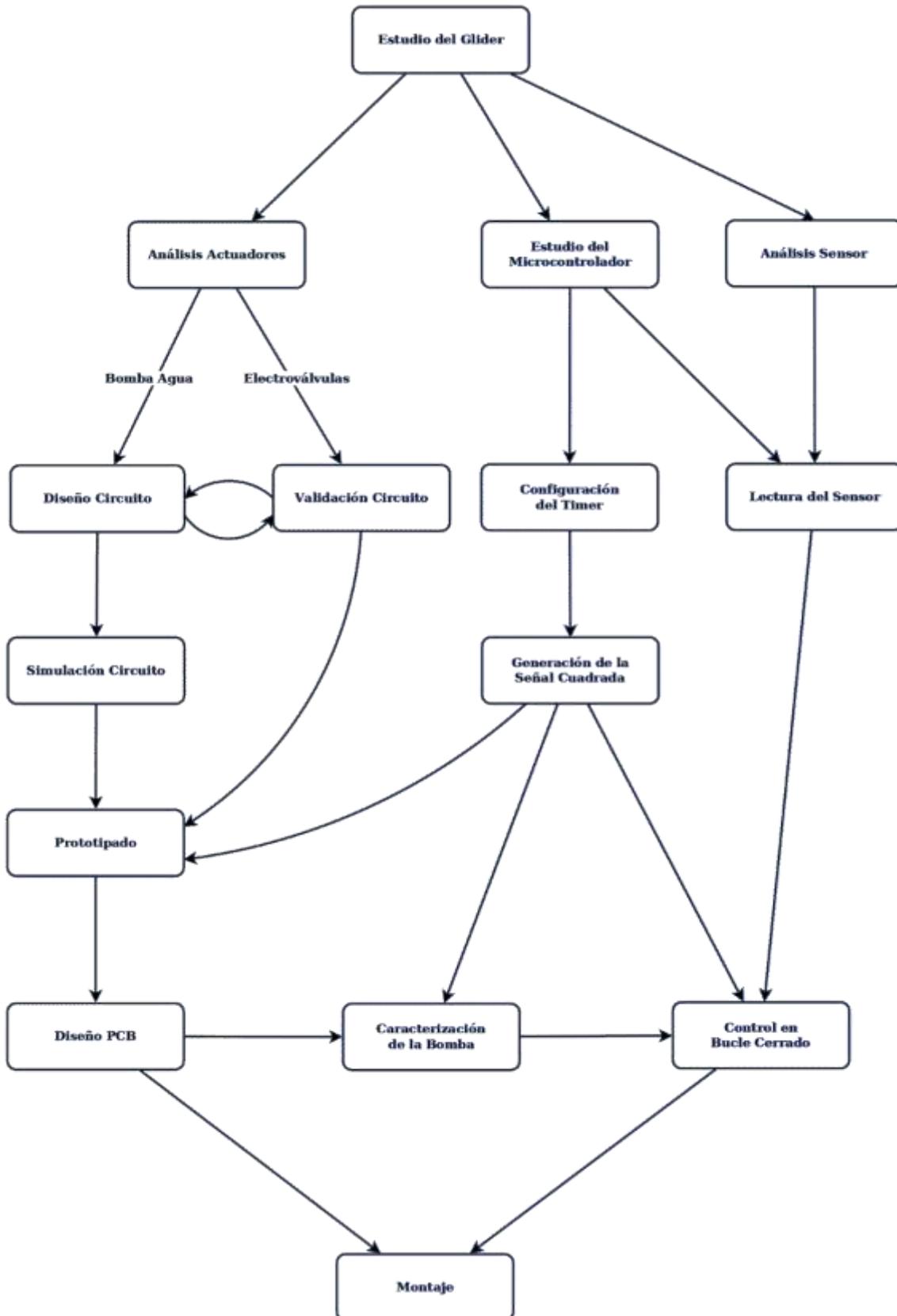


Figura 1: Esquema de la planificación

3. Diseño y desarrollo

Este apartado se centra en el análisis de cada uno de los pasos seguidos, reflejados en el esquema del apartado anterior, para obtener las soluciones que dan respuesta a las necesidades recogidas en el pliego de condiciones.

3.1 Funcionamiento de la bomba de agua

La bomba de agua usada es una ULKA EX5 24V 2/1 50Hz^[12]. Analizando el nombre de la bomba se deduce que: el fabricante es ULKA, el modelo de bomba, y por tanto su curva característica presión en función del caudal, es el EX5; el voltaje nominal de trabajo es 24V, por cada 2 minutos de trabajo la bomba debe descansar 1 y su frecuencia de operación es de 50 Hz.

De la hoja de características de la bomba, aparte de confirmar lo anterior, se extrae también que su consumo es de 48 W y que las bombas de agua ULKA son de tipo solenoide, típicamente alimentadas con corriente alterna sinusoidal procedente de un transformador o directamente de la red eléctrica y rectificadas por un diodo 1N4007 conectado en serie con la bobina. Es importante tener en cuenta que en el modelo de 24 V este diodo no viene integrado en la bobina y no es necesario si sólo se suministra corriente directa.

Esta bomba consiste básicamente en un electroimán, un muelle y un diafragma. Cuando el solenoide se activa con un pulso positivo, el electroimán desplaza el diafragma hacia delante, que a su vez desplaza el fluido. Cuando el solenoide se desactiva, el muelle devuelve el diafragma a su posición original permitiendo que más líquido de la manguera de succión entre en la cámara para que en el siguiente pulso positivo sea empujado fuera.

Se plantea la siguiente configuración:

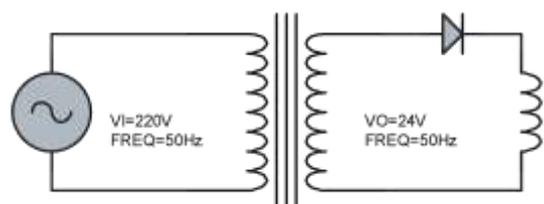


Figura 2: Configuración básica

^[12] http://ulka-ceme.co.uk/Ulka_E_Models.html

1. Memoria

En azul se representa el voltaje de la red y en naranja el voltaje aplicado a la bomba de agua, reducido por el transformador y recortado por el diodo.



Figura 3: Voltajes de entrada y salida del transformador

Durante el primer semiciclo el electroimán empuja el diafragma vaciando el área sombreada

Durante el segundo semiciclo el muelle ensancha el diafragma y el área sombreada se llena de fluido.

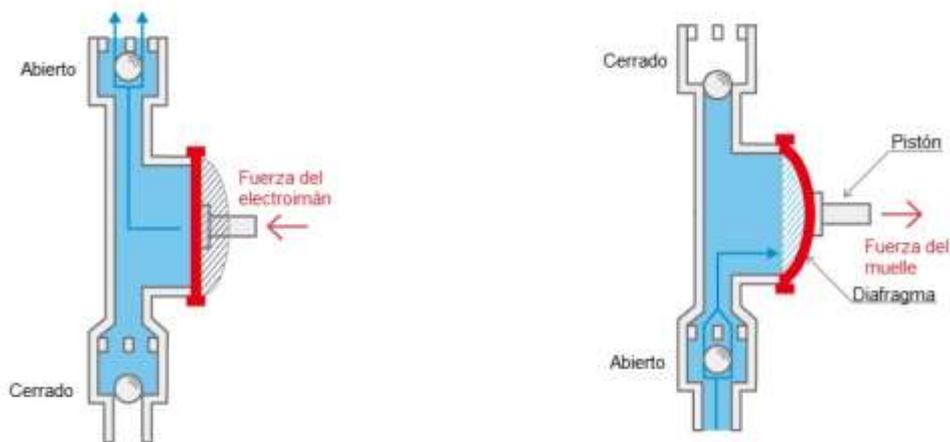


Figura 4: Funcionamiento de la bomba de agua

3.2 Diseño del circuito para la bomba de agua

A raíz de lo expuesto en el subapartado anterior se ha decidido que, dado que el glider incorpora dos baterías de 12 V en serie para obtener el voltaje nominal de 24 V que requiere la bomba, se va a suministrar una forma de onda cuadrada en vez de una senoidal recortada. Esto permite una mayor eficiencia al encender el solenoide y un circuito de control más sencillo.

De las especificaciones se conoce que la bomba consume un máximo de 48 W. Suponiendo un consumo de corriente casi constante I_M durante el semiciclo positivo se tiene:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \rightarrow P = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_N \cdot i(t) dt \rightarrow$$

$$P = \frac{V_N}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i(t) dt \rightarrow \frac{P \cdot T}{V_N} = \frac{I_M}{2} \cdot T \rightarrow I_M = \frac{2 \cdot P}{V_N} \rightarrow I_M = 4 A.$$

Por tanto, se necesita un circuito que sea capaz de suministrar 4 A al solenoide durante el ciclo positivo, y que se pueda controlar desde una salida digital del Arduino Mega 2560 (0 y 5 V). Además, el circuito ha de estar adaptado a la carga ligeramente inductiva.

La primera aproximación fue la siguiente.

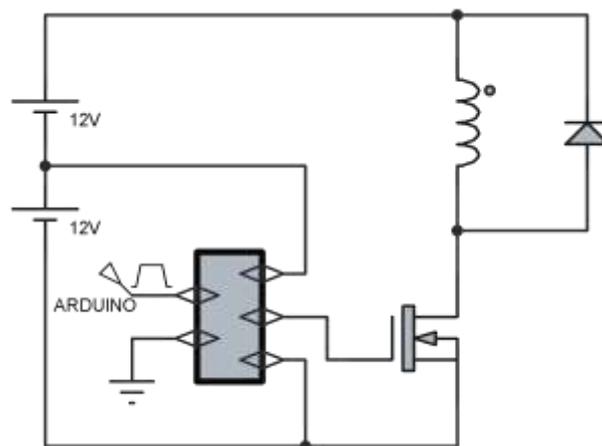


Figura 5: Primer circuito propuesto

1. Memoria

La idea es conectar la carga, la bomba, entre la alimentación y el drenador de un MOSFET de potencia de canal N con el surtidor conectado a masa. Además la bomba debe tener conectado en antiparalelo un diodo para que la corriente pueda seguir circulando evitando que su carácter inductivo haga aumentar el voltaje sobre la bobina hasta niveles peligrosos al abrir el circuito

Además, la puerta del MOSFET será controlada a través de un pin de salida digital del Arduino MEGA 2560 utilizando algún driver todavía por determinar que provea también aislamiento óptico entre los circuitos.

A partir de este punto, la elección de componentes queda restringida a la disponibilidad de estos en alguna tienda física de Valencia para evitar demoras en el desarrollo del proyecto.

Para el diodo en antiparalelo se precisa un diodo de tipo Schottky por su alta velocidad para minimizar las pérdidas. Además, debe ser capaz de aguantar una tensión inversa considerablemente superior a los 24 V de la alimentación. Se escoge el diodo 1N5822 ^[13], que soporta hasta 40 V.

El MOSFET requiere poder conducir la corriente necesaria, 4 A. Soportar la tensión inversa de 24 V cuando no esté conduciendo. Poder saturar cómodamente con un voltaje de puerta de, al menos, 12 V. No preocupan los tiempos de conmutación ya que se va a trabajar a muy baja frecuencia (aun así, si es rápido, mejor). Por disponibilidad, se escoge el MOSFET IRF540N ^[14] que cumple ampliamente las especificaciones al poder aguantar una tensión inversa de hasta 100 V, conducir 33 A a través de él y saturar, para 4 A, con una tensión de puerta de 10 V.

Como driver, se opta por utilizar el integrado TLP351H ^[15]. Que incluye salida totem pole y aislamiento óptico en un mismo circuito. Soporta alimentación de 12 V y requiere un condensador de 100 nF conectado entre alimentación y masa y una resistencia de 20 Ohm en serie con la puerta del MOSFET. Lo que permite que circule una intensidad máxima de 600 mA.

Sobre el MOSFET falta analizar si será necesario utilizar un disipador térmico. El fabricante proporciona la siguiente figura para realizar esta comprobación:

^[13] https://www.pdp8online.com/mfm/board/datasheets/Fairchild_1N5820.pdf

^[14] <https://www.infineon.com/dgdl/irf540n.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e396cb199f>

^[15] <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=11330&prodName=TLP351H>

1. Memoria

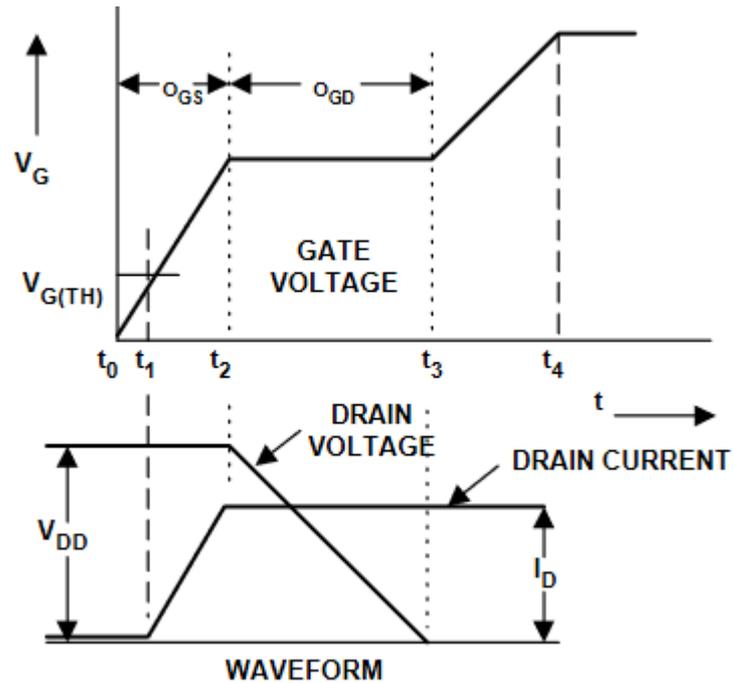


Figura 6: Detalle de la conmutación a ON del MOSFET

Cuando la puerta recibe el impulso en t_0 empieza a cargarse hasta $V_{G(TH)}$ (t_1). Es en este momento cuando empieza a circular la corriente por el drenador y la capacitancia C_{GS} empieza a cargarse entre t_1 y t_2 . El voltaje de la puerta aumenta y la intensidad de drenador aumenta proporcionalmente. Hasta que, llegado t_2 , la puerta está totalmente cargada y la corriente de drenador ha alcanzado el valor nominal de funcionamiento. En este punto, el voltaje de drenador empieza a caer mientras se carga la capacitancia de Miller. Cuando finalmente en t_3 las capacitancias C_{GS} y C_{GD} están totalmente cargadas, el voltaje de la puerta aumenta hasta el valor de alimentación.

Entre los instantes t_1 y t_3 el MOSFET disipa la potencia de conmutación.

T_1-t_2 viene indicado en la hoja de características como t_r y tiene un valor de 35 ns

T_2-t_3 puede ser calculado:

Sabiendo que la carga es el producto de la capacidad por el voltaje ($Q = C \cdot V$) y que la intensidad es la capacidad por la variación del voltaje respecto del tiempo $I = C \cdot \frac{dv}{dt}$ se puede deducir que la carga es el tiempo por la corriente ($Q = t \cdot I$).

1. Memoria

Por tanto, si el driver proporciona una corriente de 600 mA y se tiene que cargar la capacitancia de Miller con 21 nC, se necesitan aproximadamente 35 μ s.

En total, entre los instantes t_1 y t_3 habrán transcurrido 70 ns.

Asumiendo que en la conmutación a off la potencia disipada en conmutación es la misma que la de on, la potencia total disipada en conmutación se puede calcular como:

$$P_c = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_3} v(t) \cdot i(t) dt \rightarrow P_c = \frac{2}{T} \left[\frac{I_D \cdot V_{DD}}{2} \cdot (t_3 - t_1) \right] \rightarrow$$

$$P_c = 100 \cdot \left(\frac{4 \cdot 24}{2} \cdot 70 \cdot 10^{-9} \right) \rightarrow 0,00036 W$$

Se puede ver que, trabajando a tan baja frecuencia las pérdidas en conmutación son despreciables.

La mayoría de pérdidas que se van a tener son por conducción, durante medio periodo, cuando la corriente y el voltaje a través del semiconductor son constantes y de valor el producto de la intensidad en conducción (4 A) y el voltaje drenador-surtidor en saturación que se puede extraer de la hoja de características. (0,4 V)

$$P_{on} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \rightarrow P_{on} = \frac{1}{T} \left[I_D \cdot V_{DS(sat)} \cdot \left(\frac{T}{2} \right) \right] \rightarrow$$

$$P_{on} = \left[\frac{I_D \cdot V_{DS(sat)}}{2} \right] \rightarrow P_{on} = \frac{4 \cdot 0,4}{2} \rightarrow 0,8 W$$

Con la potencia que se disipa y la resistencia térmica unión-ambiente ($R_{\theta JA} = 62 \text{ } ^\circ\text{C/W}$) se puede calcular si se superaría la temperatura máxima de 175 $^\circ\text{C}$ en la unión. Aunque por seguridad, se estiman 100 $^\circ\text{C}$ de temperatura máxima como valor seguro y dado que el submarino es un espacio cerrado estanco, una temperatura ambiente de 40 $^\circ\text{C}$.

$$T_j - T_A = P_{on} \cdot R_{\theta JA} \rightarrow T_j = 0,8 \cdot 62 + 40 \rightarrow T_j = 89,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bastante inferior a los 100 $^\circ\text{C}$ que se habían fijado como límite.

1. Memoria

El circuito queda finalmente definido así:

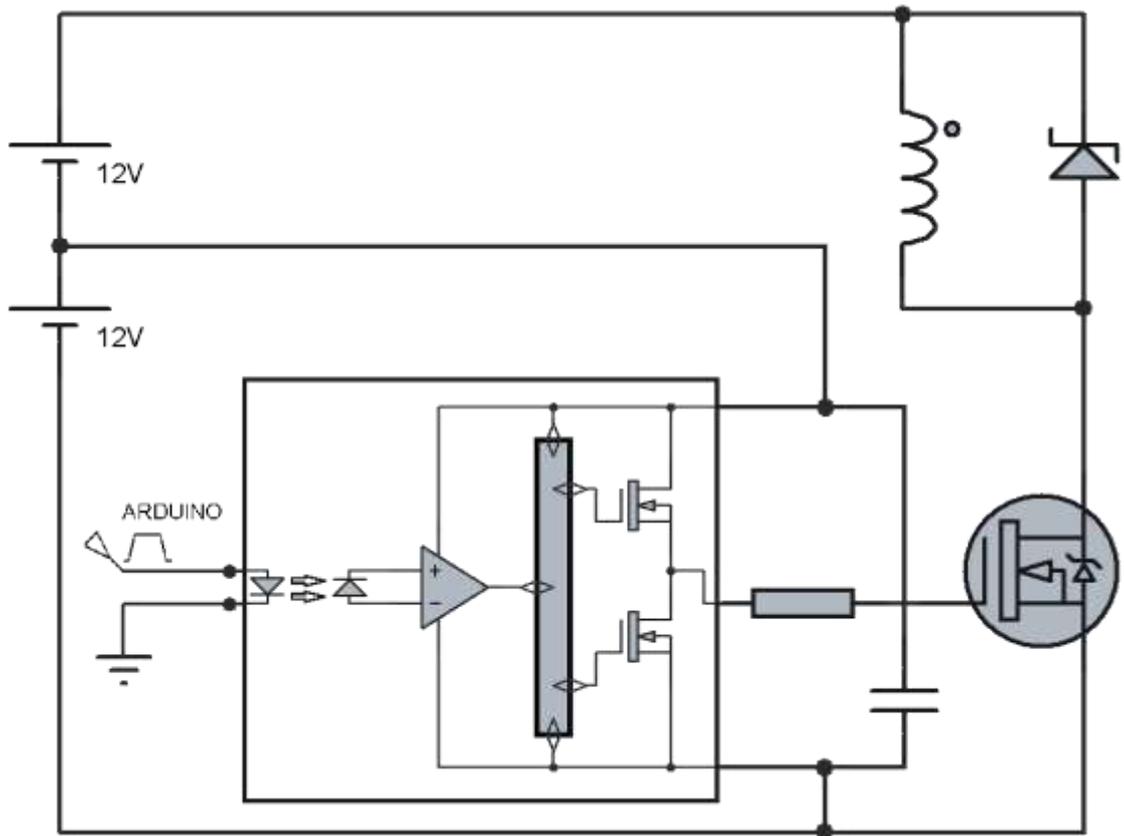


Figura 7: Circuito completo

1. Memoria

3.3 Simulación del circuito para la bomba de agua

Una vez diseñado el circuito sobre el papel, es momento de ver si en simulación se comporta como se espera. En concreto se desea estudiar el transitorio de inicio y su desempeño en régimen permanente.

Para esto, se utilizarán las herramientas de análisis analógico del software Proteus 8, de Labcenter Electronics^[16].



Figura 8: Transitorio de inicio a 50 Hz

Como se aprecia en la gráfica, al inicio de la acción no se tiene ningún transitorio peligroso, todas las magnitudes están dentro de los valores asegurados por los fabricantes de los componentes del circuito. Además, en la siguiente figura se puede comprobar que en régimen permanente el circuito también presenta un comportamiento estable.

[16] www.labcenter.com

1. Memoria



Figura 9: Régimen permanente a 50 Hz

Es más, la simulación permite ver cuál sería la frecuencia máxima a la que se podría conmutar la bomba, ya que de funcionar la bobina en modo continuo no podría empujar completamente el pistón que desplaza el diafragma ni dar tiempo al muelle a que vuelva a su posición original.



Figura 10: Régimen permanente a 100 Hz

Este límite se halla sobre los 100 Hz. A partir de esta frecuencia, el caudal de salida de la bomba de agua se aproximaría a 0.

3.4 Funcionamiento de la electroválvula

La electroválvula usada es una ASCO SCG356B001VMS ^[17]. Se trata de una válvula distribuidora de tipo 3/2, tiene 2 posiciones y 3 conexiones. Cuando está en reposo permite el paso de fluido de 1 a 3 y al excitarla, de 2 a 1.

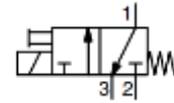


Figura 11: Símbolo

Para este proyecto, más que distribuir fluido por dos caminos distintos lo que se desea es poder permitir o impedir completamente que el agua circule por el interior del circuito. Sin embargo, se utilizan estas válvulas en vez de válvulas de tipo 2/2 por la disponibilidad de las primeras en el laboratorio.

Por tanto, para obtener un funcionamiento todo-nada a partir de la válvula que se tiene, se opta por obstruir la salida 3 de forma que en reposo no se permitirá la circulación de fluido y al aplicar corriente, el fluido podrá ir del punto 2 al 1.

Es importante destacar también que el uso de la vía 3 es poco recomendable ya que la sección de su conexión es menor a la de las vías 1 y 2.

A parte de utilizar una válvula de tipo 2/2, en futuras implementaciones se recomienda utilizar electroválvulas con enclavamiento para aumentar la eficiencia, ya que así solo se consumirá electricidad en las conmutaciones y no mientras esté activa.

La electroválvula funciona debido a un solenoide interno que al activarse desplaza un pistón permitiendo la comunicación de las vías 2 y 1. Al cesar la excitación, el pistón vuelve a su posición original gracias a un muelle abriendo el paso entre los puntos 1 y 3. Este solenoide trabaja con un voltaje nominal de 12 V y consume una potencia de 6,9 W para mantenerla funcionando.

^[17] http://www.valves-direct.com/media/specs/Series_356_-_ASCO_Direct_Operated_Solenoid_Valves_G1-8_G1-4_1.pdf

3.5 Validación del circuito para la electroválvula

Dado que ambas cargas a controlar son de corriente directa se puede plantear que el mismo circuito sirva para todo, con la consiguiente reducción de costes a la hora de encargar tanto los componentes como la fabricación de las placas.

La bomba de agua trabaja en conmutación mientras que las electroválvulas han de tener siempre corriente circulando por su bobina para funcionar. El circuito diseñado para el control de la bomba de agua, además de trabajar a una frecuencia de hasta 100 Hz permite también mantener el MOSFET encendido y apagado por largos periodos de tiempo.

Las electroválvulas requieren menor voltaje que la bomba de agua, así como menos corriente, con lo que el MOSFET y el diodo de libre circulación estarían ampliamente sobredimensionados para esta aplicación.

Por tanto, la única diferencia vendrá dada por la señal de control, así pues mientras que para la bomba de agua será necesario un código que permita generar trenes de pulsos, para las electroválvulas bastarán niveles altos y bajos.

3.6 Prototipado del circuito

A fin de validar el diseño, se monta el módulo sobre un circuito impreso para comprobar que es capaz de controlar la bomba de agua y las electroválvulas correctamente.

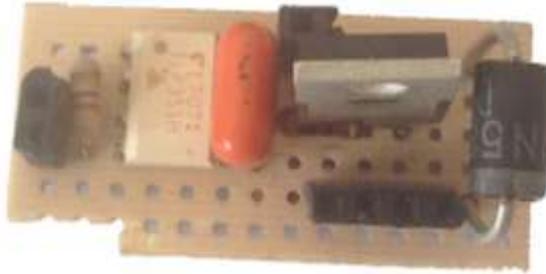


Figura 12: Circuito en placa de prototipado

Como puede observarse, cuando está conectada la bomba de agua, midiendo con una sonda amperimétrica la forma de onda de la corriente sobre esta coincide con la predicha por la simulación.

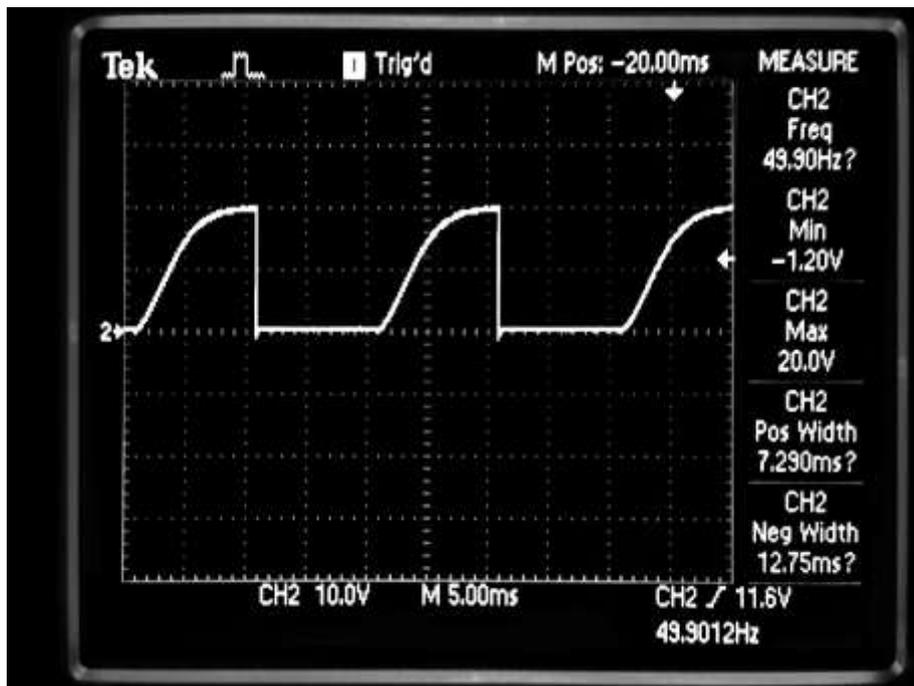


Figura 13: Corriente a través de la carga

1. Memoria

3.7 Diseño de la PCB para la bomba de agua

Una vez seguros de que el prototipo funciona es momento de plasmarlo en una PCB tal y como irá dentro del AUV. Para esto, se utilizará el software EAGLE [18] en su versión gratuita que permite diseñar circuitos impresos de hasta 2 capas con una superficie menor a 80 cm²

Cada módulo consta de 2 resistencias, un optoacoplador con salida totem pole, un MOSFET de potencia, un condensador, un diodo schottky y las conexiones para las entradas de control, alimentación y salidas de potencia.

El primer paso es diseñar el esquema eléctrico del circuito

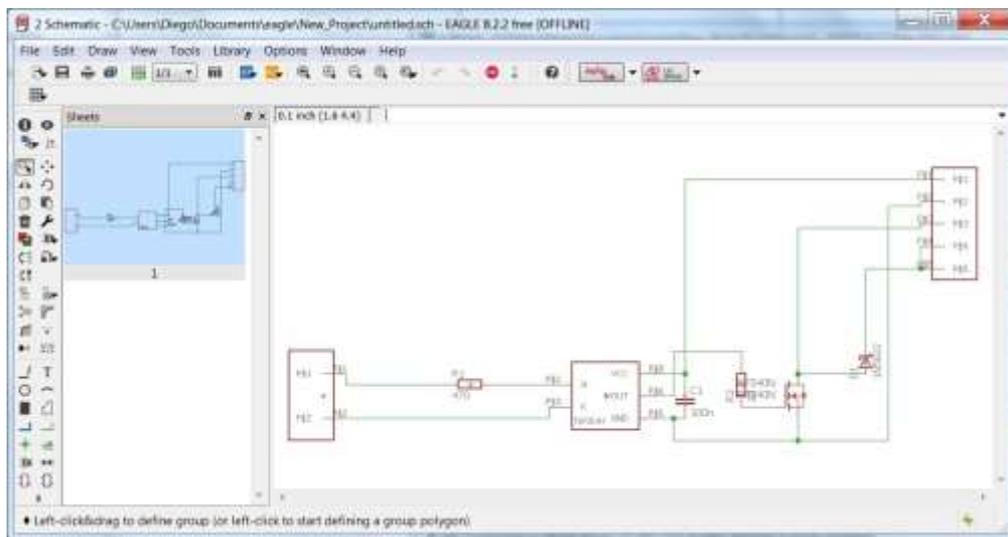


Figura 14: Esquema eléctrico en EAGLE

No todos los componentes que se utilizan en el diseño forman parte de las bibliotecas que contiene el software, debiendo diseñarse su empaquetado.

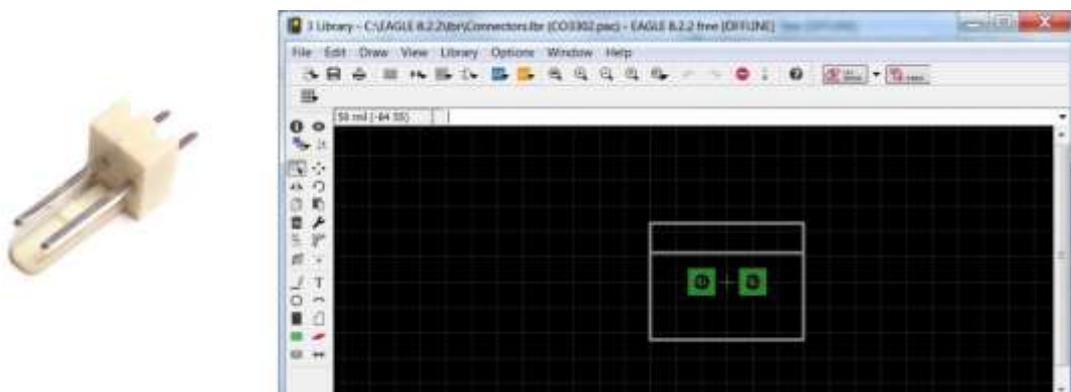


Figura 15: Diseño del layout del conector de la señal de control

[18] <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>

1. Memoria

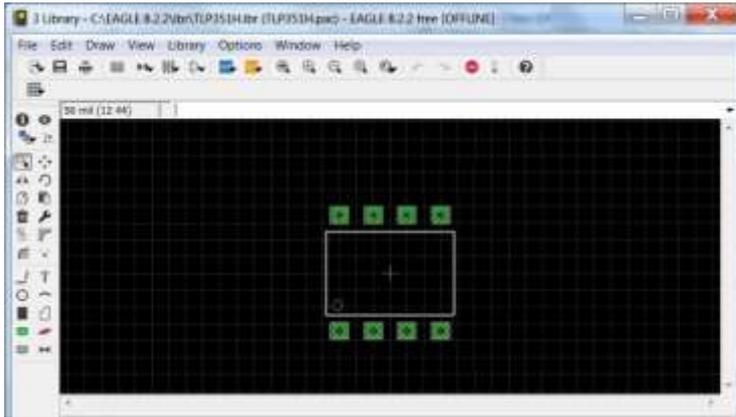


Figura 16: Diseño del layout del optoacoplador

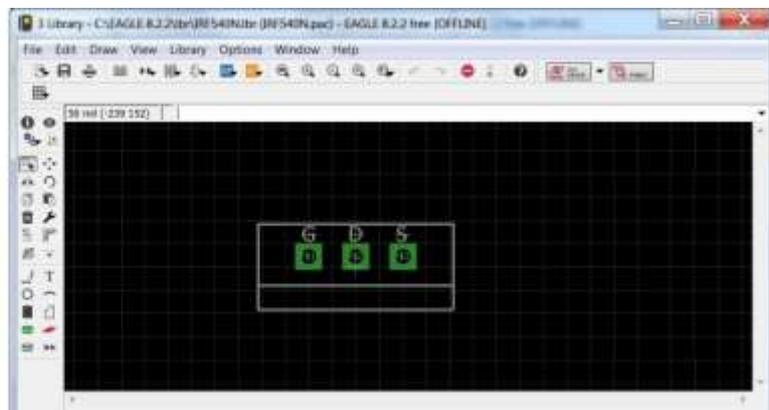


Figura 17: Diseño del layout del MOSFET

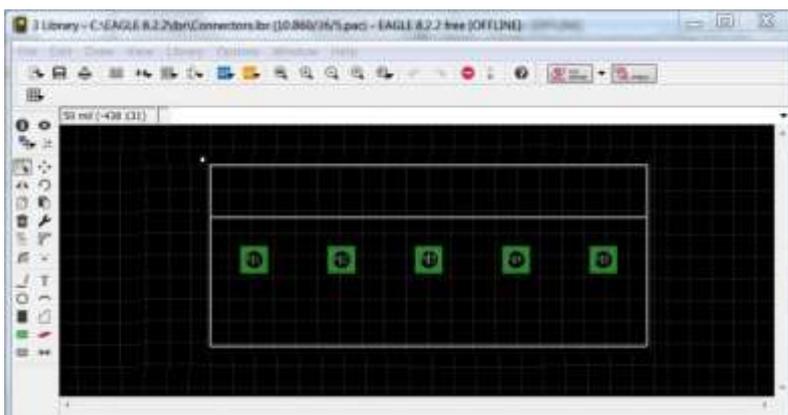


Figura 18: Diseño del layout del conector de potencia

Finalmente se diseña la placa, las vías del circuito de potencia tienen mayor grosor que las del circuito de control.

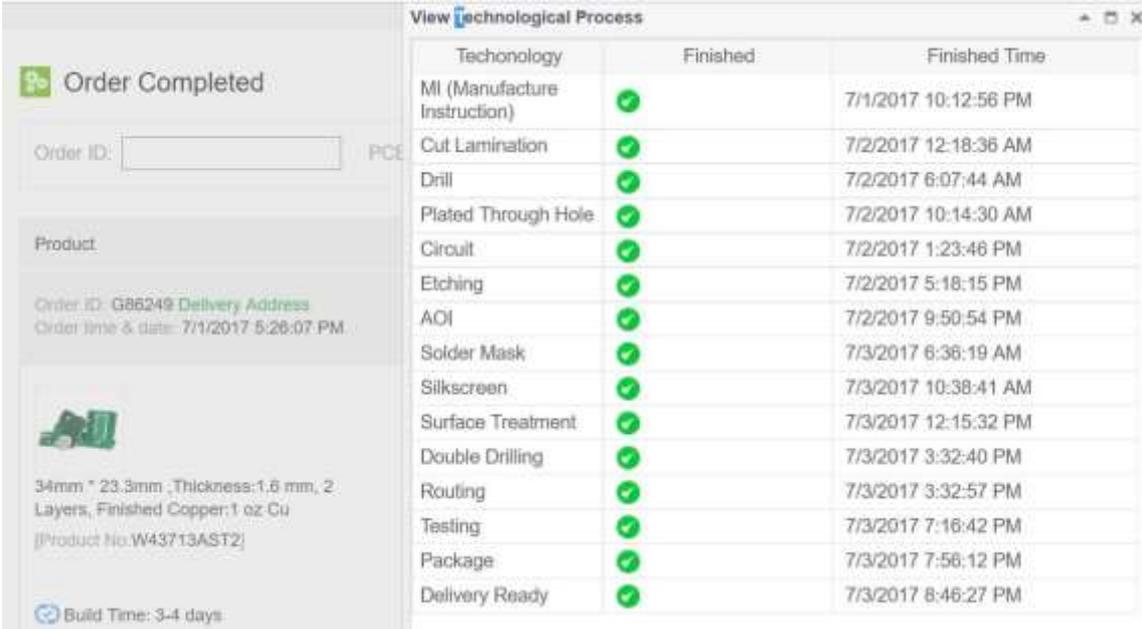
1. Memoria



Figura 19: PCB diseñada

1. Memoria

Una vez diseñada y comprobada, los ficheros Gerber son enviados para su fabricación por la empresa PCBWay.



Technology	Finished	Finished Time
MI (Manufacture Instruction)	✓	7/1/2017 10:12:56 PM
Cut Lamination	✓	7/2/2017 12:18:36 AM
Drill	✓	7/2/2017 6:07:44 AM
Plated Through Hole	✓	7/2/2017 10:14:30 AM
Circuit	✓	7/2/2017 1:23:46 PM
Etching	✓	7/2/2017 5:18:15 PM
AOI	✓	7/2/2017 9:50:54 PM
Solder Mask	✓	7/3/2017 6:36:19 AM
Silkscreen	✓	7/3/2017 10:38:41 AM
Surface Treatment	✓	7/3/2017 12:15:32 PM
Double Drilling	✓	7/3/2017 3:32:40 PM
Routing	✓	7/3/2017 3:32:57 PM
Testing	✓	7/3/2017 7:16:42 PM
Package	✓	7/3/2017 7:56:12 PM
Delivery Ready	✓	7/3/2017 8:46:27 PM

Figura 20: Proceso de fabricación de la PCB

Y a los pocos días llega el resultado:

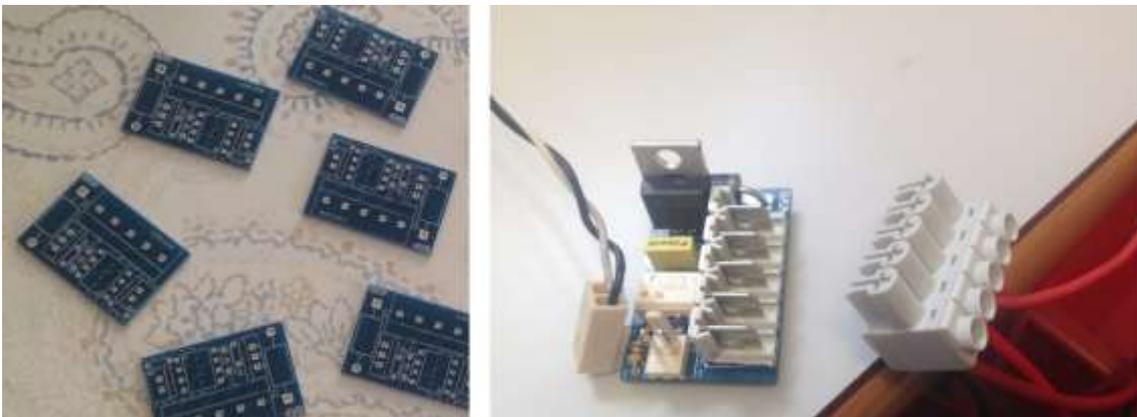


Figura 21: PCB vacía y con los componentes ya soldados

3.8 Funcionamiento del caudalímetro

El caudalímetro empleado es el 932-9521 de Digimesa ^[19]. Este sensor utiliza el efecto Hall como principio de funcionamiento.

El sensor ha de montarse en serie a la salida de la bomba de agua, ya que mide el caudal que circula a través de él mismo. En su interior, contiene una ruedecita la cual al girar emite una señal de salida cuadrada de frecuencia directamente proporcional al caudal que la atraviesa y ciclo de trabajo del 50 %.



Figura 22: Interior del caudalímetro

Por tanto la forma de onda que se tendría a la salida queda así:

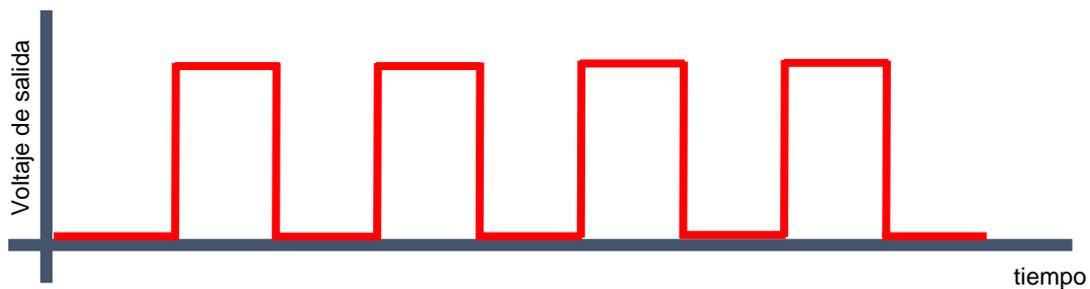


Figura 23: Señal de salida del caudalímetro

Según el fabricante, la rueda da 1925 pulsos por cada litro de fluido. Si se conoce el periodo de la señal (midiendo entre dos flancos de subida), se puede calcular el caudal como

$$Q = \frac{1}{1925 \cdot T}$$

El montaje eléctrico del sensor es muy simple, tiene 3 pines: el negro, para masa; el rojo, para la alimentación y el amarillo, para la salida. Hay que tener en cuenta que la salida del sensor es de tipo colector abierto, por tanto se debe activar la resistencia de pull up (10 k) en la entrada digital del Arduino.

[19]

3.9 Código para el control

El código debe ser capaz de producir una señal cuadrada de frecuencia y ciclo de trabajo variables para el control de la bomba, así como mantener las electroválvulas abiertas o cerradas.

Para ello, se utilizan los pines 9, 10, 11 y 12 como salidas de control para las electroválvulas; el pin 13 como salida de control para la bomba de agua y el pin 3 para leer el sensor de caudal.

El lenguaje de implementación es C, como consta en el pliego de condiciones.

3.9.1 Configuración del timer 3

Se empieza por crear una función de tipo void para configurar el timer que se usará para generar la señal cuadrada.

Para configurar el timer, en este caso el timer 3, se deben manipular los registros TCCR3A y TCCR3B, aunque previamente hay que desactivar las interrupciones globales para poder configurar los registros de manera segura.

Del registro TCCR3A los bits del 7 al 2 controlan la salida de los pines de comparación OC3A (bits 7:6), OC3B (bits 5:4) y OC3C (bits 3:2). Si uno o ambos de estos se encuentra a 1 se sobrescribe el funcionamiento normal de entrada/salida que pudiese tener el pin al que está conectado. Se escoge dejarlo todo a 0 y utilizar el modo normal de entrada/salida ya que aunque otros modos permiten ajustar el ciclo de trabajo con precisión, no son aptos para variar la frecuencia del pwm sin volver a configurar el timer cada vez que se va a cambiar la frecuencia.

Los bits 1 y 0, junto con los bits 3 y 4 del registro TCCR3B controlan el modo de cuenta del contador y el tipo de generación de la señal de salida. Se escoge el modo 4 (Clear Time on Compare Match), que corresponde a poner el bit 3 a 1. Cada vez que el timer llegue al valor OCR3B generará una interrupción. Al llegar al valor OCR3A generará otra interrupción distinta y reseteará el timer a 0. Se utilizarán estas interrupciones para poner a nivel alto y a nivel bajo el pin 13 y controlando los valores se podrá variar tanto la frecuencia como el ciclo de trabajo

1. Memoria

En el registro TCCR3B el bit 7, de estar activado, activa el filtrado del ruido que pudiese haber en la entrada del pin ICP3. Esta función es útil si se va a utilizar el timer como contador. No siendo el caso, se mantiene desactivado.

El bit 6 selecciona si se va a detectar el flanco de subida o el de bajada en el pin ICP3. Una vez más, no aplica al no usarse este timer como contador.

El bit 5 está reservado para uso futuro y debe permanecer a 0.

Los bits 2, 1 y 0 fijan el preescaler del timer. Se puede escoger el mejor preescaler como aquel que permita mayor resolución pudiendo generar las frecuencias entre el máximo y el mínimo que son de 1 a 100 Hz.

La frecuencia máxima del timer es 16 MHz, que se puede dividir entre 1, 8, 64, 256 o 1024. El timer es de 16 bits, con lo que desborda al llegar a 65535.

$$Timer\ frequency = \frac{16\ MHz}{prescaler} \cdot \frac{2^{16} - Number\ of\ counts}{2^{16}}$$

Manteniendo el preescaler fijo, en el funcionamiento normal se variará el número de cuentas para variar la frecuencia. Si el timer ha de hacer 65535 cuentas, la frecuencia será mínima, sin embargo, si la interrupción se genera con 0 cuentas se tendrá la frecuencia máxima.

Prescaler	Frecuencia mínima N=65535	Frecuencia máxima N=0
1	244,14 Hz	16 MHz
8	30,52 Hz	2 MHz
64	3,81 Hz	250 KHz
256	0,95 Hz	62,5 KHz
1024	0,2384 Hz	15,625 KHz

Se escoge por tanto un preescaler de 256, que corresponde con poner el bit 2 del registro TCCR3B a 1.

Una vez configurado el timer, se vuelven a habilitar las interrupciones globales, con lo que el timer estará listo para funcionar.

1. Memoria

```

void configTimer() { // initialize Timer3
    cli(); // disable global interrupts

    //REGISTER A

    //COM3A1 , COM3A0 , COM3B1 , COM3B0 , COM3C1 , COM3C0 , WGM31 , WGM30
    //Bits 7-2: comparator modes. Bits 1-0: Waveform generation.

    TCCR3A = 0; // set register TCCR3A to 0, normal modes. Table 17-3 and 17-2

    //REGISTER B

    //ICNC3 , ICES3 , - , WGM33 , WGM32 , CS32 , CS31 , CS30
    //See 17.11.6 for bits 7-3
    //Bits 2-0 adjust prescaler

    TCCR3B = 0; // set register TCCR3B to 0, normal modes.
                // Adjust prescale according to Table 17-6
                // timer resolution w/o prescaler 1/16M
    //timer resolution w/ prescaler (1/16M) * prescaler
    //(number of counts + 1) = (desired period) / (timer resolution)
    //number of counts = ((1/frequency) / ((1/16M) * prescaler)) - 1
    //
    //Possible frecuencies with different prescales:
    //period = (number of counts + 1) * (timer resolution)
    //period = (number of counts + 1) * ((1/16M) * prescaler)
    //the maximum number of counts is 2^16 - 1 = 65535
    //Prescaler      Minimum(Hz)
    Maximum(Hz)
    //1              244,14
    16000000,00
    //8              30,52
    2000000,00
    //64             3,81
    250000,00
    //256            0,95
    62500,00
    //1024           0,24
    15625,00

    //With a signal control not lower than 1 Hz, a prescaler of 256 can be used
    // Set the timer to Clear Timer on Compare Match, Mode (Mode 4) Table 17-2
    TCCR3B |= (1 << WGM32) | (1 << CS32) | (0 << CS31) | (0 << CS30);

    // enable global interrupts:
    sei();
}

```

3.9.2 Generación de la señal cuadrada

Se continúa con la creación de una función para controlar la frecuencia y el ciclo de trabajo de la bomba. Por ahora no hay control de caudal, se está trabajando en bucle abierto.

La función acepta 2 parámetros de entrada, la frecuencia y ciclo de trabajo deseados. Con estos 2 parámetros y sabiendo el prescaler utilizado se pueden calcular los valores OCR3B y OCR3A para que se generen las interrupciones en el momento exacto en el que haya que cambiar de nivel alto a nivel bajo.

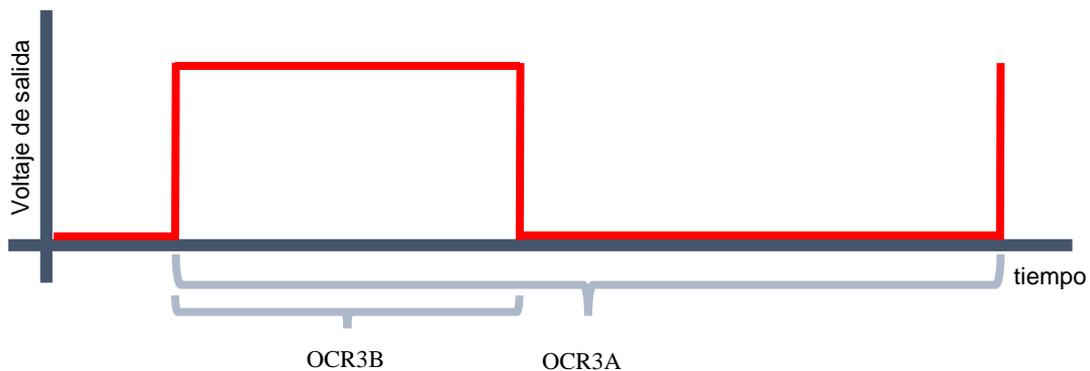


Figura 24: Señal de salida para el control de la bomba

Así pues, se sabe que la frecuencia a la que se va a generar la onda depende del valor OCR3A.

$$\text{Timer frequency} = \frac{16 \text{ MHz}}{\text{prescaler}} \cdot \frac{2^{16} - \text{Number of counts}}{2^{16}} \rightarrow$$

$$\text{Number of counts} = 2^{16} - \left(\frac{\text{Timer frequency} \cdot 2^{16} \cdot \text{prescaler}}{16 \text{ MHz}} \right)$$

Escrito de otra forma,

$$\text{OCR3A} = 2^{16} - \left(\frac{\text{Frequency} \cdot 2^{16} \cdot \text{prescaler}}{16 \text{ MHz}} \right)$$

Y por tanto OCR3B, que regula el ciclo de trabajo quedaría definido como

$$\text{OCR3B} = \text{OCR3A} \cdot \frac{\text{Duty Cycle}}{100}$$

1. Memoria

Finalmente, se utiliza el registro TIMSK3 para activar los puntos de comparación.

```
void setSquareWave(double frequency, uint8_t dutycycle) {
  //frequency in Hz, dutycycle from 0 to 100.
  //
  //timer resolution w/o prescaler 1/16M
  //timer resolution w/ prescaler (1/16M) * prescaler
  //(number of counts + 1) = (desired period) / (timer resolution)
  //number of counts = ((1/frequency) / ((1/16M) * prescaler)) - 1
  //
  //Possible frequencies with different prescales:
  //period = (number of counts + 1) * (timer resolution)
  //period = (number of counts + 1) * ((1/16M) * prescaler)
  //the maximum number of counts is 2^16 - 1 = 65535
  //
  //    244,14      16000000,00
  //    30, 52     2000000, 00
  //    3, 81      250000, 00
  //    0, 95      62500, 00
  //    0, 24      15625, 00
  //
  //OCR3A = ((1/frequency)/((1/16*10^6)*256))-1;
  //OCR3A = ((1/frequency)/(1.6E-5))-1;
  //And simplified looks like:
  OCR3A = (uint16_t)((1.0 / frequency) / (1.6E-5)) - 1;
  //reset happens in point A, so point B has to be lower than point A
  if (dutycycle < 100) OCR3B = (uint16_t)(OCR3A *(dutycycle / 100.0));
  else
    OCR3B = OCR3A;

  //Serial.print("\n");
  //Serial.print(OCR3A);
  //Serial.print("\n");
  //Serial.print(OCR3B);
  //Serial.print("\n");

  //Activate both compare points
  TIMSK3 = (1 << OCIE3B) | (1 << OCIE3A);
}
```

Solo resta utilizar las rutinas de interrupción para poner a nivel alto y a nivel bajo la salida de la bomba de agua:

```
ISR(TIMER3_COMPA_vect)
{
  //Pin will be at low level until it reaches point A
  digitalWrite(PIN_POS, HIGH);
}
ISR(TIMER3_COMPB_vect)
{
  //Pin will be at high level until it reaches point B
  digitalWrite(PIN_POS, LOW);
}
```

3.9.3 Lectura del sensor de caudal

Como se ha expuesto en el apartado 3.8 la lectura del sensor se reduce a medir el tiempo entre dos pulsos consecutivos, por ejemplo, entre dos flancos de subida.

Para esta tarea se propone el uso de uno de los pines de entrada/salida que soporta interrupciones externas por flanco de subida: el pin 3.

Así pues, en la función void setup() que se ejecuta al inicio se añade la siguiente línea:

```
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_WATERSENSOR), interrupt_WS, RISING);
```

Cada vez que se detecte un flanco de subida en el pin 3 se llamará a la función void interrupt_WS().

En esta función, se obtendrá el intervalo de tiempo en microsegundos desde la última vez que se ejecutó la función. Para esto, se declara una variable global de tipo volatile unsigned long llamada deltaT informada con el incremento y otra llamada previousT informada con el instante de tiempo en cada ejecución.

```
//microseconds between each rising pulse of the water sensor. AKA period.  
volatile unsigned long deltaT, previousT;
```

```
void interrupt_WS() {  
    deltaT = micros()-previousT;  
    previousT = micros();  
}
```

Mientras esta interrupción esté activada, el periodo de la señal de entrada será guardado.

Como este periodo está siendo constantemente monitorizado, para obtener en un momento dado el caudal más reciente se puede hacer uso de la siguiente función:

```
double getFlow() {  
    if (micros() - previousT > deltaT * 10) return 0.0; //if deltaT is 10  
    times the magnitude order than expected, no Q is flowing  
    else return (1 / (1993.0 * deltaT / (1000.0 * 1000.0 * 60.0)));  
}
```

getFlow() devolverá el valor en litros por minuto del fluido que circula a través del sensor.

3.9.4 Control en bucle cerrado del caudal

Con lo implementado hasta el momento, el código puede por una parte leer el caudal y por otra parte fijar la frecuencia y ciclo de trabajo con el que opera la bomba.

Es hora de aunar todo mediante una función que, recibiendo como parámetro el caudal deseado en litros por minuto será llamada periódicamente para calcular qué frecuencia debe aplicarse a la bomba de agua e invocará la función `setSquareWave` definida anteriormente.

Hay que tener en cuenta que la relación entre el caudal y la frecuencia no es lineal en el rango de 1 a 100 Hz, como se verá en el apartado 4.1; pero para el rango entre 40 y 60 Hz la respuesta es prácticamente lineal, por lo que el control de tipo PID o PI se ajusta a las necesidades.

```
void setFlow(double desiredFlow) {
    //PID
    //A=K+(K·Td)/To
    //B=K·To·Ki - K - 2·K·Td/To
    //C=K·Td/To
    //Where A>0, (A-C)>0, A>(2A+B), (A+B+C)>0

    //If PI then Td=0, A>0, A+B>0

    //u(k)=u(k-1)+A·e(k)+B·e(k-1)+C·e(k-2)
    //uk=uk1+A*ek+B*ek1+C*ek2 //PID
    //uk=uk1+A*ek+B*ek1 //PI

    //desiredFlow is the reference
    //so error = desiredFlow - getFlow()
    ek = desiredFlow - getFlow();

    uk = uk1 + A*ek + B*ek1; //PI

    if(uk>60) uk=60;
    else if(uk<40) uk=40;
    setSquareWave(uk, 50);
    uk1 = uk;
    ek2 = ek1;
    ek1 = ek;
}
```

3.10 Montaje

Todo el circuito va montado en un panel de madera que simula la distribución de los componentes en el interior de AUV.

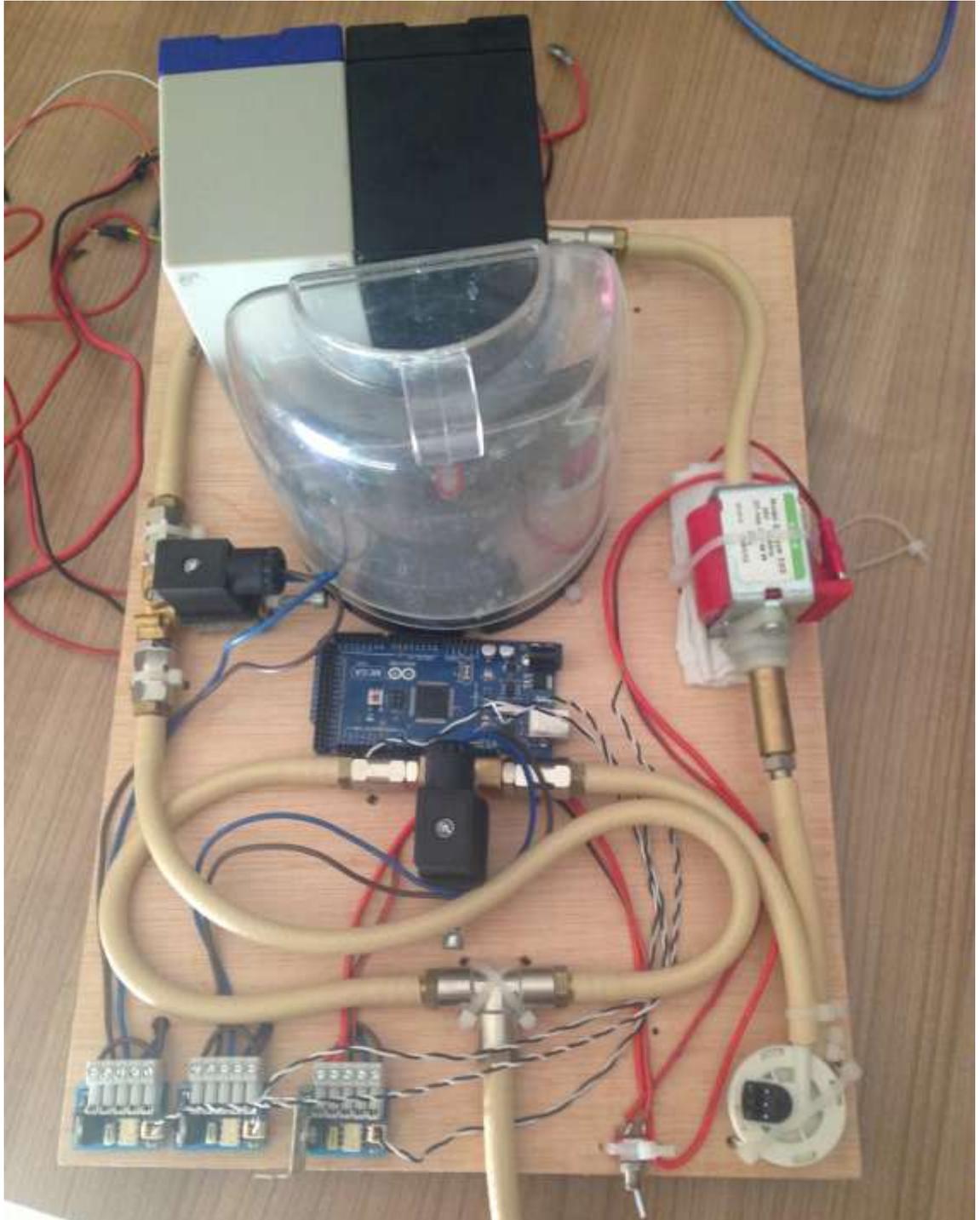


Figura 25: Montaje del sistema en el panel

4. Pruebas

4.1 Caracterización de la bomba

Una vez montado el panel se puede empezar el estudio del funcionamiento de la bomba de agua.

Interesa conocer como varía exactamente el caudal con distintas frecuencias a presión ambiente. Para ello se propone leer el caudalímetro mientras se está generando un tren de pulsos a una frecuencia conocida y se llena un recipiente de 0,5L.

Aunque el glider utilizará aceite como fluido, las pruebas se harán con agua para evitar suciedad.

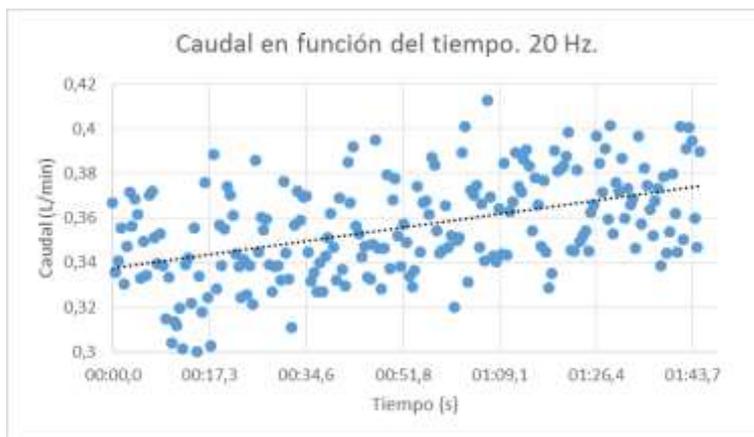


Figura 26: Caudal en función del tiempo con control a 20 Hz

Caudal promedio:

0,36 L/min

Duración:

1 min 45 seg

Líquido estimado:

0,622 L

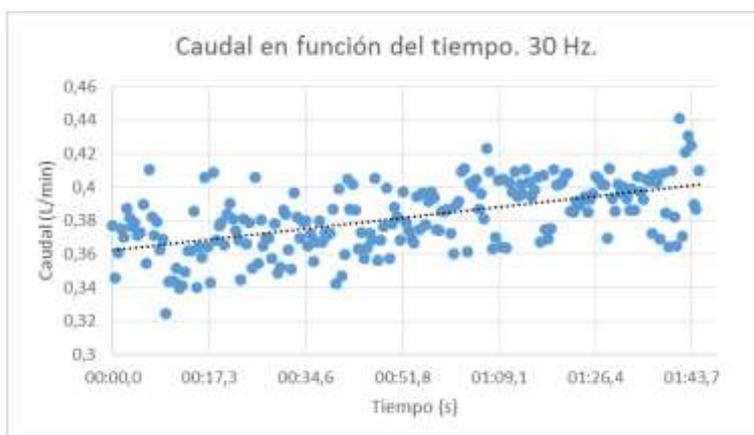


Figura 27: Caudal en función del tiempo con control a 30 Hz

Caudal promedio:

0,38 L/min

Duración:

1 min 45 seg

Líquido estimado:

0,668 L

1. Memoria

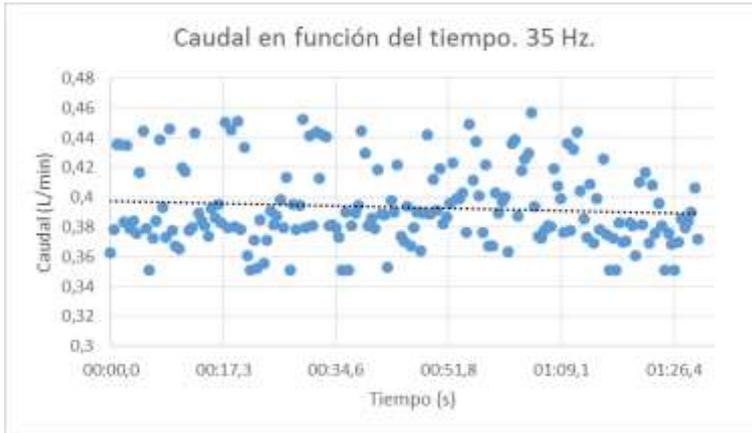


Figura 28: Caudal en función del tiempo con control a 35 Hz

Caudal promedio:

0,39 L/min

Duración:

1 min 30 seg

Líquido estimado:

0,59 L

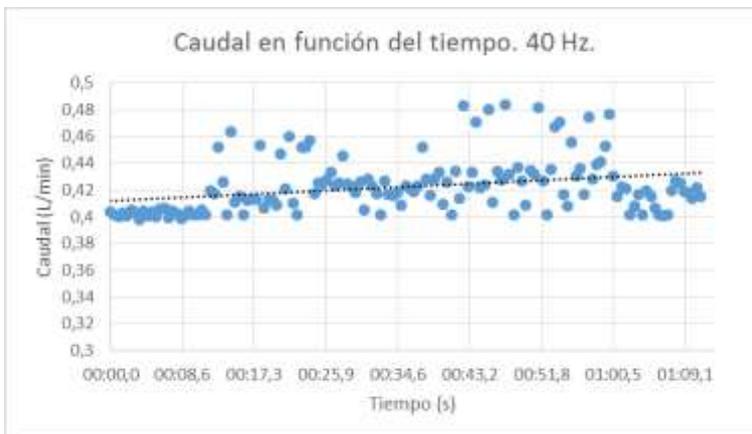


Figura 29: Caudal en función del tiempo con control a 40 Hz

Caudal promedio:

0,423 L/min

Duración:

1 min 11 seg

Líquido estimado:

0,51 L

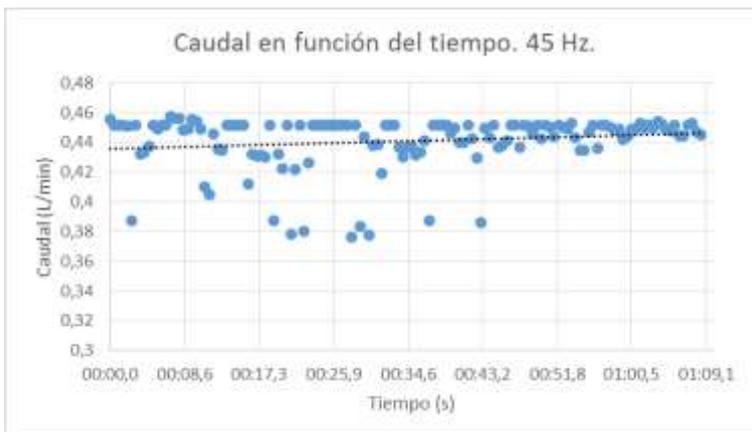


Figura 30: Caudal en función del tiempo con control a 45 Hz

Caudal promedio:

0,44 L/min

Duración:

1 min 8 seg

Líquido estimado:

0,5 L

1. Memoria

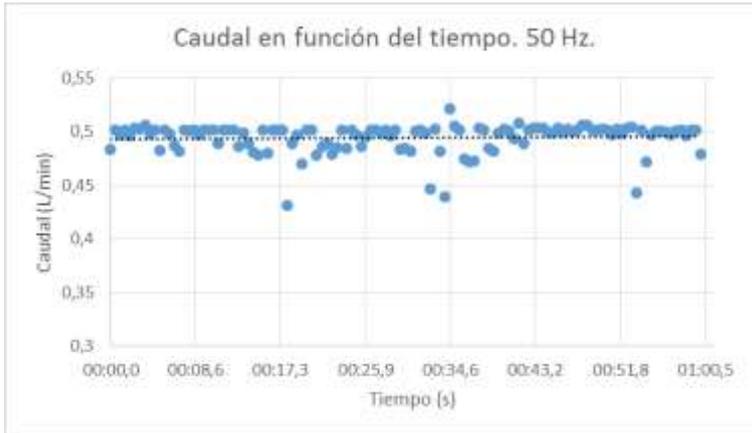


Figura 31: Caudal en función del tiempo con control a 50 Hz

Caudal promedio:

0,49 L/min

Duración:

1 min

Líquido estimado:

0,49 L

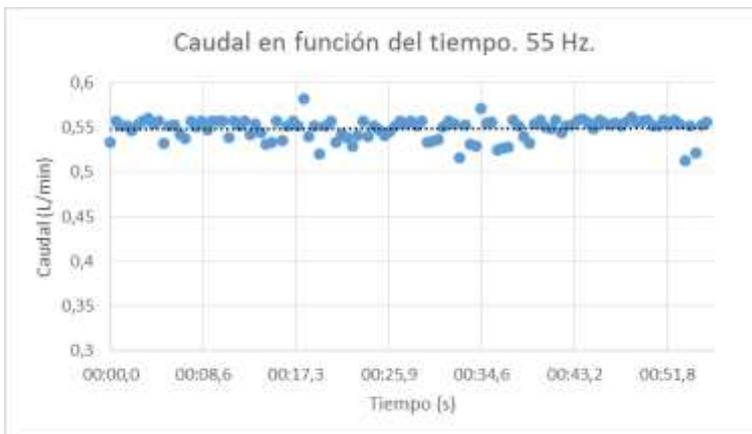


Figura 32: Caudal en función del tiempo con control a 55 Hz

Caudal promedio:

0,55 L/min

Duración:

0,55

Líquido estimado:

0,51 L



Figura 33: Caudal en función del tiempo con control a 60 Hz

Caudal promedio:

0,6 L/min

Duración:

50 seg

Líquido estimado:

0,5 L

1. Memoria



Figura 34: Caudal en función del tiempo con control a 65 Hz

Caudal promedio:

0,59 L/min

Duración:

50 seg

Líquido estimado:

0,49 L

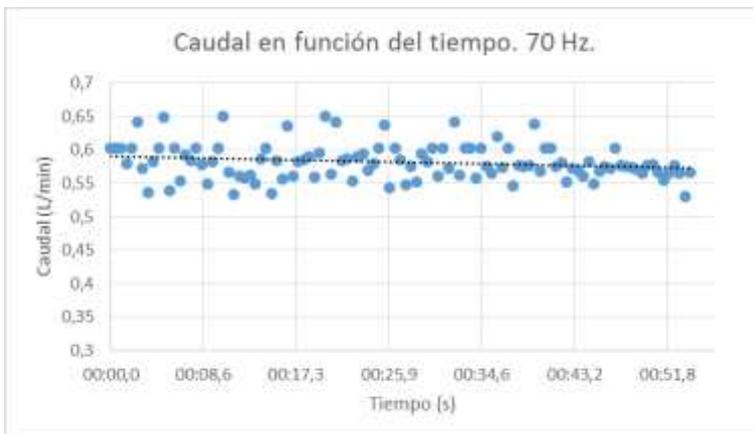


Figura 35: Caudal en función del tiempo con control a 70 Hz

Caudal promedio:

0,58 L/min

Duración:

54 seg

Líquido estimado:

0,52 L

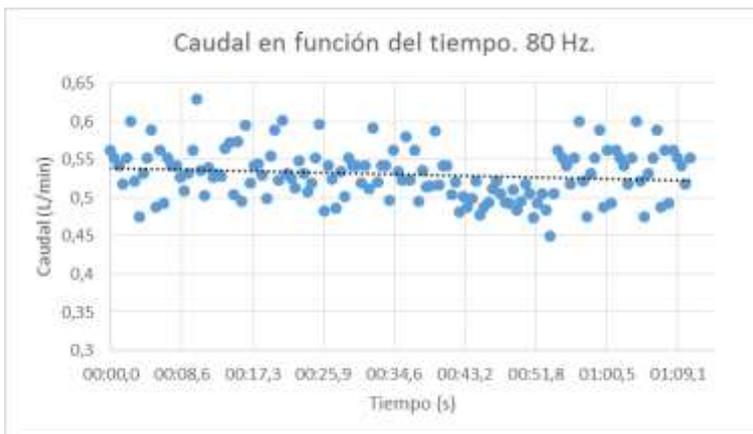


Figura 36: Caudal en función del tiempo con control a 80 Hz

Caudal promedio:

0,53 L/min

Duración:

1 min 10 seg

Líquido estimado:

0,6 L

1. Memoria



Caudal promedio:

0,4 L/min

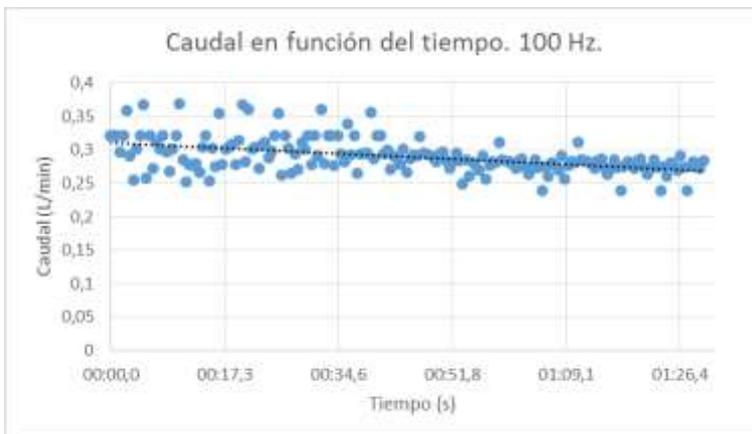
Duración:

1 min 30 seg

Líquido estimado:

0,6 L

Figura 37: Caudal en función del tiempo con control a 90 Hz



Caudal promedio:

0,29 L/min

Duración:

1 min 30 seg

Líquido estimado:

0,44 L

Figura 38: Caudal en función del tiempo con control a 100 Hz

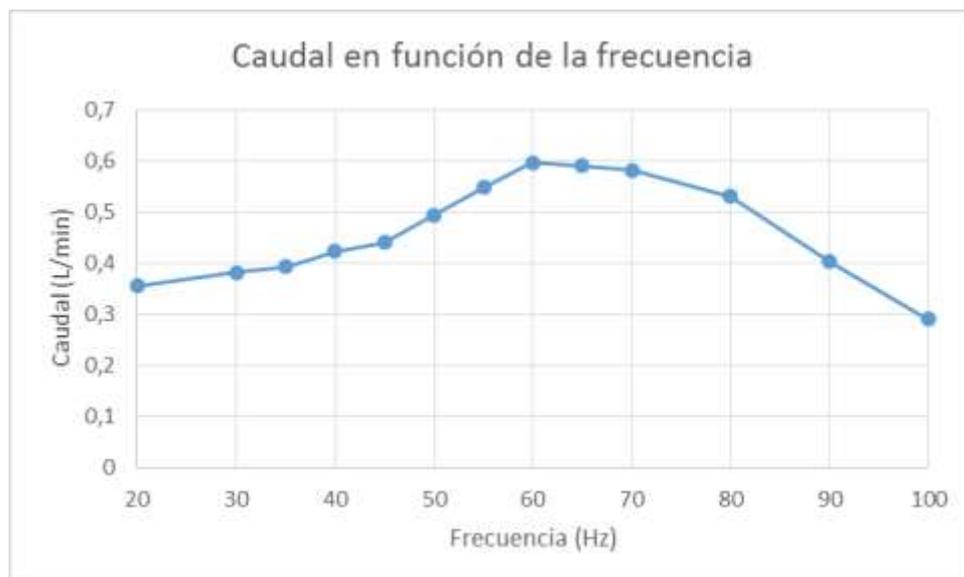


Figura 39: Caudal en función de la frecuencia. De 20 Hz a 100 Hz.

1. Memoria

Las gráficas reflejan que el caudal y la frecuencia no guardan una relación lineal en todo el rango previsto inicialmente. Además, caudales entre 0,3 L/min y 0,6 L/min podrían conseguirse con distintas frecuencias.

Es por esto que se propone delimitar el rango de funcionamiento a menos de 60 Hz, ya que mayores frecuencias conllevan un mayor estrés para las partes mecánicas con la consiguiente reducción de la vida útil de la bomba de agua sin que esto repercuta en un mayor caudal de salida.

También se propone evitar el uso de frecuencias inferiores a 40 Hz, de esta forma, utilizando el rango 40 Hz a 60 Hz la relación caudal – frecuencia sí es prácticamente lineal.

Del mismo modo, la desviación típica tampoco se mantiene constante en todo el rango, siendo mayor de 20 Hz a 40 Hz y de 70 Hz a 100 Hz. Lo que desaconseja también utilizar estos rangos

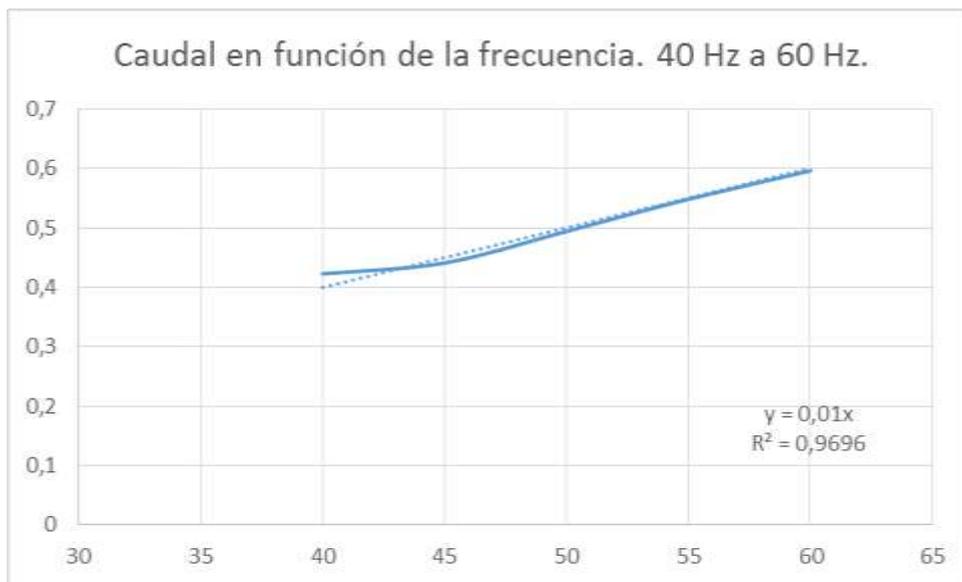


Figura 40: Caudal en función de la frecuencia. De 40 a 60 Hz.

Obteniendo así que:

$$\text{Caudal} = \text{Frecuencia} \cdot 0,01$$

5. Conclusiones

Como muchas otras decisiones importantes que he tomado en mi vida, me atrajo el título del proyecto, aunque a duras penas intuía cómo puede un submarino funcionar sin propulsión ni tripulación, me fascinó el poder profundizar en este campo. Así que puedo decir que mis conocimientos en esta área han aumentado con la búsqueda de información y bibliografía.

Aunque competencias como el diseño electrónico, la simulación de un circuito, programación de microcontroladores y montajes eléctricos, no son nuevas, he ahondado en estas y me ha permitido adquirir otros conocimientos técnicos, ya que por primera vez me he enfrentado al diseño de una PCB, la selección de componentes y el montaje del sistema hidráulico en un panel.

Gracias a este proyecto he podido ver cómo las ramas de la electrónica, la automática y la informática se unían para dar respuesta a los objetivos fijados en el proyecto y a los problemas que han sobrevenido durante el desarrollo. Y me gustaría hacer hincapié en esto, ya que durante todo el grado se enseñan las diversas áreas por separado y cuesta ver las sinergias y relaciones entre las diferentes disciplinas.

También me ha servido para enfrentarme al cumplimiento de una obra en tiempo y forma adoptando para ello una planificación como si se tratase de un cliente o trabajo real.

Y esto es un poco todo.

6. Bibliografía

<<https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>>

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322714000747>>

<http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/articulos-de-opinion/2016-10-chicote-pujana_tcm7-432603.pdf>

<https://www.tacmina.com/learn/basics/01.html>

<<http://science.sciencemag.org/content/328/5985/1520>>

<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/047134608X.W5402.pub2/pdf>>

<<http://science.sciencemag.org/content/328/5982/1147>>

<<http://www.ingentaconnect.com/content/sut/unwt/2010/00000029/00000002/art00004>>

<<https://www.czujnikisterowniki.pl/pl/p/Zawor-Elektromagnetyczny-SCG356B002VMS-18/1086>>

<<http://www.oceanografialitoral.com/productos/auv-rov>>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_underwater_vehicle#Propulsion>

<www.pcbway.com>

<http://ulka-ceme.co.uk/Ulka_E_Models.html>

<https://www.pdp8online.com/mfm/board/datasheets/Fairchild_1N5820.pdf>

<<https://www.infineon.com/dgdl/irf540n.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e396cb199f>>

<<https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=11330&prodName=TLP351H>>

<http://www.valves-direct.com/media/specs/Series_356_-_ASCO_Direct_Operated_Solenoid_Valves_G1-8_G1-4_1.pdf>

<<https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>>

<http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf>



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA FLOTABILIDAD DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO

2. PRESUPUESTO

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: José Andrés Grau Martínez

Director: Jose Vicente Busquets Mataix

Codirector: Javier Busquets Mataix

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2017

Tabla de contenidos

Tabla de contenido

1. Costes de materiales	3
2. Costes de desarrollo y mano de obra	3
3. Presupuesto	3

2. Presupuesto

1. Costes de materiales

Descripción	Unidad	Coste (€/u)	Unidades	Precio total (€)
ARDUINO MEGA 2560	u	34,50	1	34,50
1N5822	u	0,24	10	2,40
IRF540N	u	0,66	10	6,60
TLP351H	u	0,71	10	7,10
RESISTENCIA 10 Ohm	u	0,02	10	0,16
RESISTENCIA 470 Ohm	u	0,02	10	0,16
Condensador 100 nF	u	0,35	10	3,50
ULKA EX5 24V 2/1 50Hz	u	35,26	1	35,26
ASCO SCG356B001VMS	u	30,66	4	122,64
Contrarosca 1/8 a 1/4	u	1,89	14	26,46
Manguito 1/4 a 1/4	u	2,58	8	20,64
Racor Manguera Macho 1/4	u	3,95	8	31,60
T 1/4	u	3,30	2	6,60
PCB	u	0,50	10	5,00
Baterías 7.2 AH - 12 V	u	12,00	2	24,00
				326,61

2. Costes de desarrollo y mano de obra

Descripción	Unidad	Coste (€/h)	Unidades	Precio total (€)
Estudio del proyecto	h	25,00	15	375,00
Diseño del software	h	25,00	20	500,00
Diseño del hardware	h	25,00	25	625,00
Implementación del software	h	25,00	40	1000,00
Implementación del hardware	h	25,00	80	2000,00
Montaje	h	25,00	8	200,00
Testeo	h	25,00	20	500,00
Documentación	h	25,00	60	1500,00
				6700,00

3. Presupuesto

Descripción	Unidad	Coste (€/u)	Unidades	Precio total (€)
Costes de materiales	u	326,61	1	326,61
Costes de desarrollo y mano de obra	u	6700,00	1	6700,00
				7026,61



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA FLOTABILIDAD DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO

3. ESQUEMA Y DIAGRAMAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: José Andrés Grau Martínez

Director: Jose Vicente Busquets Mataix

Codirector: Javier Busquets Mataix

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2017

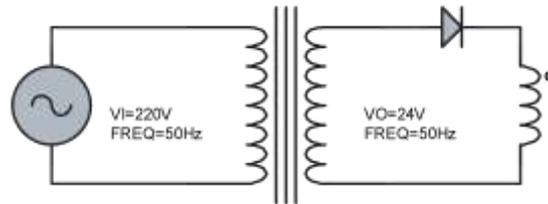
Tabla de contenidos

Tabla de contenido

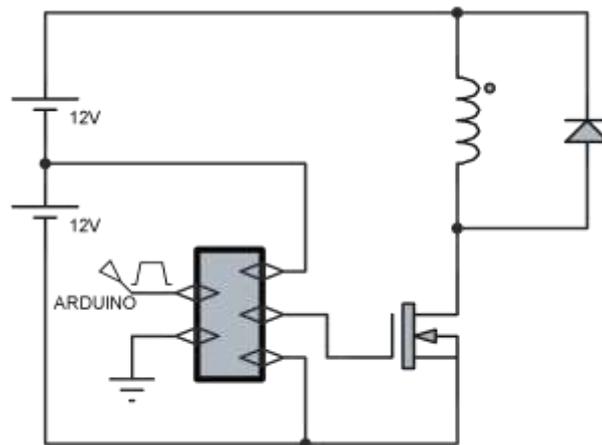
1. Esquemas de conexiones	3
1.1 Conexión básica de la bomba de agua	3
1.2 Primera aproximación del circuito	3
1.3 Circuito final.....	4
2. Esquemas de la PCB	4
2.1 Esquema de conexiones.....	4
2.2 Layout del conector de señal de dos pines	5
2.3 Layout del optoacoplador TLP351H.....	6
2.4 Layout del MOSFET de potencia IRF540N.....	6
2.5 Layout del conector de potencia de cinco pines.....	6
2.6 Layout completo	7
3. Otros esquemas	8
3.1 Esquema de planificación	8

1. Esquemas de conexiones

1.1 Conexión básica de la bomba de agua

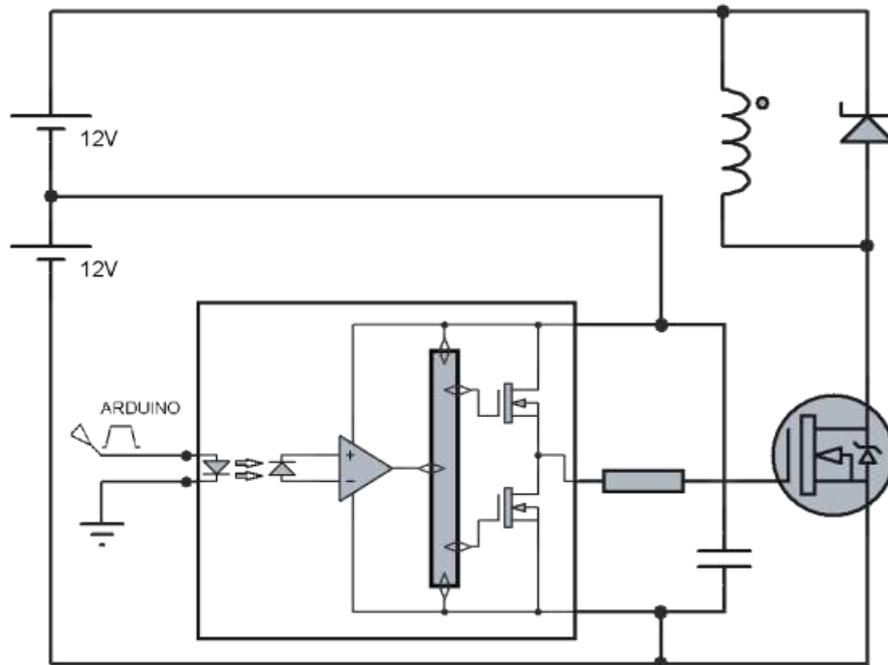


1.2 Primera aproximación del circuito



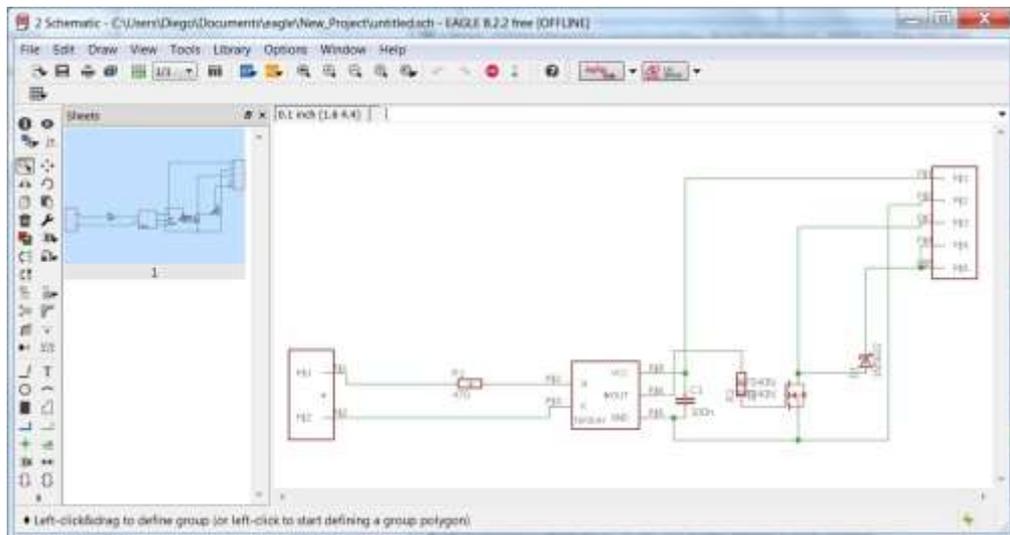
3. Esquema y Diagramas

1.3 Circuito final



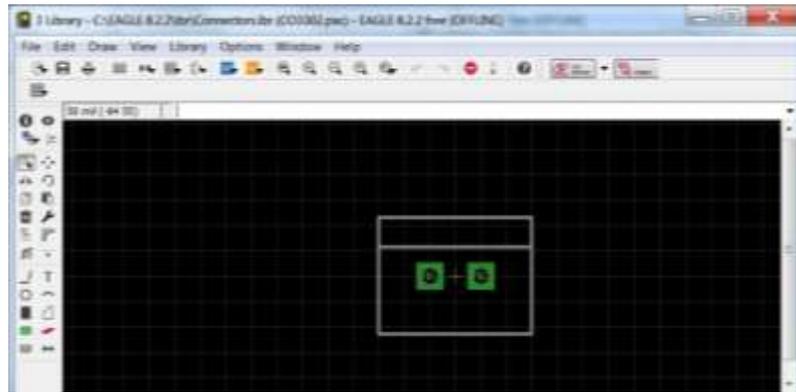
2. Esquemas de la PCB

2.1 Esquema de conexiones



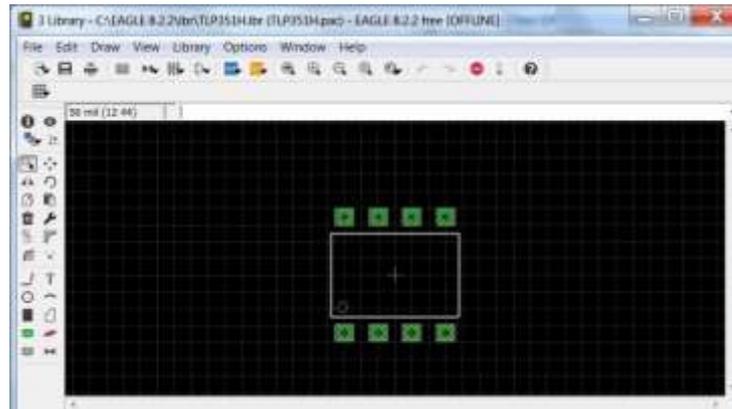
3. Esquema y Diagramas

2.2 Layout del conector de señal de dos pines

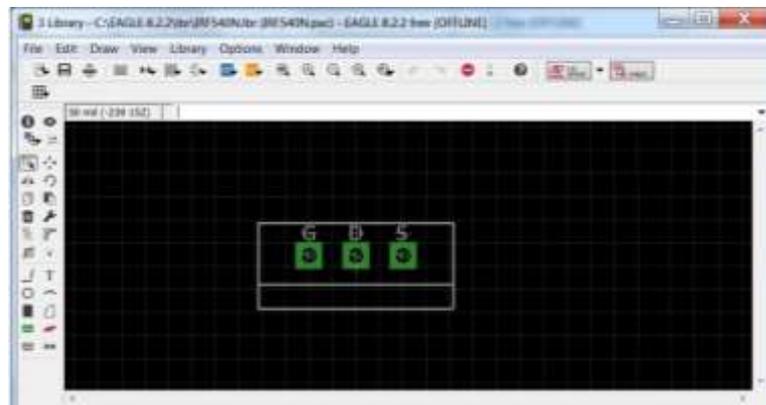


3. Esquema y Diagramas

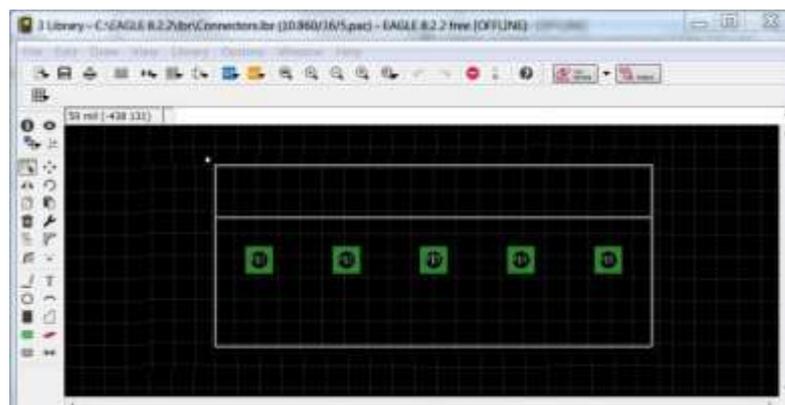
2.3 Layout del optoacoplador TLP351H



2.4 Layout del MOSFET de potencia IRF540N

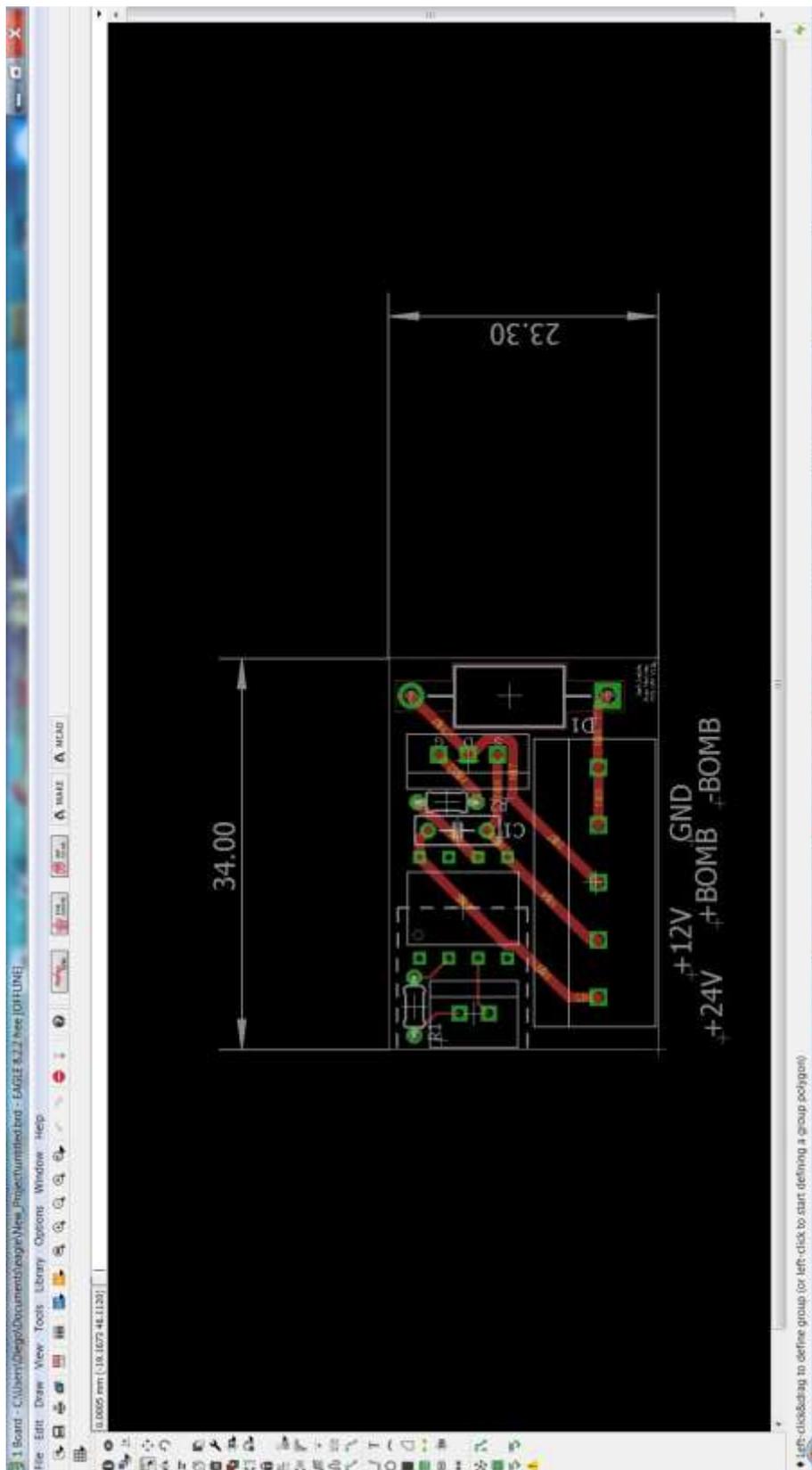


2.5 Layout del conector de potencia de cinco pines



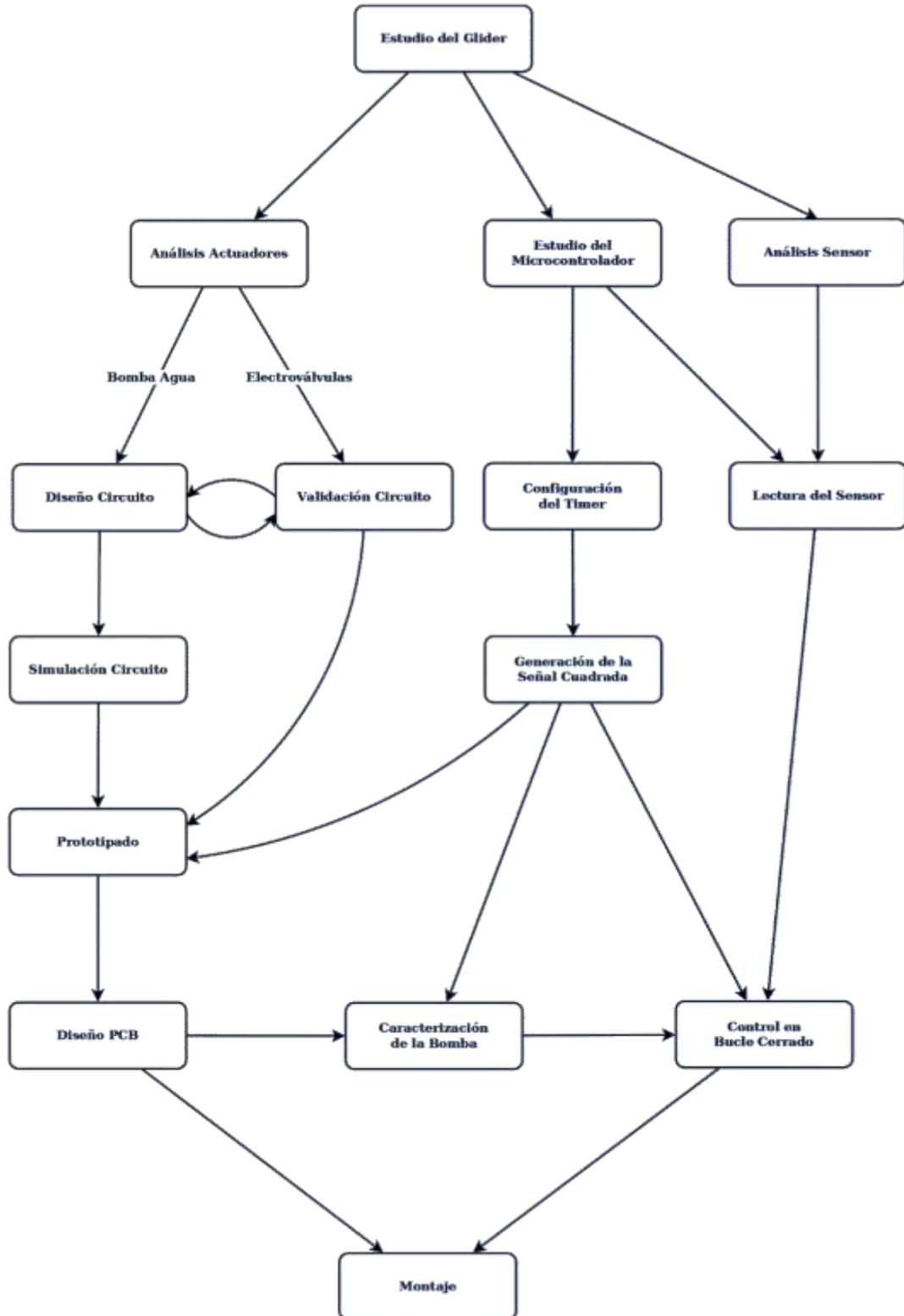
3. Esquema y Diagramas

2.6 Layout completo



3. Otros esquemas

3.1 Esquema de planificación





UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA FLOTABILIDAD DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO

4. PLIEGO DE CONDICIONES

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: José Andrés Grau Martínez

Director: Jose Vicente Busquets Mataix

Codirector: Javier Busquets Mataix

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2017

Tabla de contenidos

Tabla de contenido

1. Pliego de condiciones	3
--------------------------------	---

1. Pliego de condiciones

Para que el glider pueda llevar a cabo su función, este trabajo de fin de grado debe dar solución a los siguientes requisitos:

Ser capaz de provocar el desplazamiento del glider. Llenar las vejigas y vaciarlas para producir un cambio en la flotabilidad consiguiendo así el avance.

Ser de bajo coste, utilizando material ya disponible en el laboratorio: la bomba de agua, las electroválvulas, las vejigas y el caudalímetro.

Cada actuador debe tener su propio circuito para mayor flexibilidad ante el cambio o avería del mismo.

El lenguaje de programación del microcontrolador debe ser C para posibilitar la integración con el resto de módulos del glider.

La implementación del código debe ser independiente y se ejecutará al ser invocado por interrupciones evitando en todo momento el uso del bucle principal.

Electrónica de control fiable, teniendo en cuenta que se respetan los valores límite con un margen de seguridad amplio.

Hardware ensamblado en una PCB del menor tamaño posible.

La bomba de agua debe ser controlable en bucle abierto prefijando la frecuencia y ciclo de trabajo de la señal de control.

La bomba de agua debe ser controlable en bucle cerrado utilizando la lectura de un caudalímetro.

Las electroválvulas deben ser controlables mediante un nivel alto o un nivel bajo de una salida digital del microcontrolador.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA FLOTABILIDAD DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBACUÁTICO

5. ANEXOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO:

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: José Andrés Grau Martínez

Director: Jose Vicente Busquets Mataix

Codirector: Javier Busquets Mataix

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2017-

Contenido

1. Hoja de características IRF540N.....	3
2. Hoja de características 1N5820	12
3. Hoja de características TLP351H.....	14
4. Hoja de características ULKA.....	30
5. Hoja de características ASCO.....	32
6. Código completo	34

1. Hoja de características IRF540N



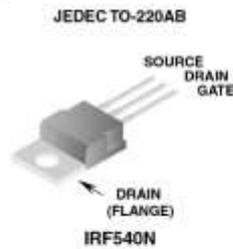
FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR®

IRF540N

Data Sheet
January 2002

33A, 100V, 0.040 Ohm, N-Channel, Power MOSFET

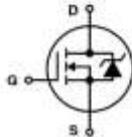
Packaging



Features

- Ultra Low On-Resistance
 - $r_{DS(ON)} = 0.040\Omega$, $V_{GS} = 10V$
- Simulation Models
 - Temperature Compensated PSPICE™ and SABER® Electrical Models
 - Spice and SABER® Thermal Impedance Models
 - www.fairchildsemi.com
- Peak Current vs Pulse Width Curve
- UIS Rating Curve

Symbol



Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
IRF540N	TO-220AB	IRF540N

Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

	IRF540N	UNITS
Drain to Source Voltage (Note 1)	100	V
Drain to Gate Voltage ($R_{GS} = 20k\Omega$) (Note 1)	100	V
Gate to Source Voltage	± 20	V
Drain Current		
Continuous ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $V_{GS} = 10V$) (Figure 2)	33	A
Continuous ($T_C = 100^\circ\text{C}$, $V_{GS} = 10V$) (Figure 2)	23	A
Pulsed Drain Current	Figure 4	
Pulsed Avalanche Rating	Figures 6, 14, 15	UIS
Power Dissipation	120	W
Derate Above 25°C	0.80	W/°C
Operating and Storage Temperature	-55 to 175	°C
Maximum Temperature for Soldering		
Leads at 0.063in (1.6mm) from Case for 10s	300	°C
Package Body for 10s, See Techbrief TB334	260	°C

NOTES:

1. $T_J = 25^\circ\text{C}$ to 150°C .

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

5. Anexos

IRF540N

Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
OFF STATE SPECIFICATIONS						
Drain to Source Breakdown Voltage	BV_{DSS}	$I_D = 250\mu\text{A}$, $V_{GS} = 0\text{V}$ (Figure 11)	100	-	-	V
Zero Gate Voltage Drain Current	I_{DSS}	$V_{DS} = 95\text{V}$, $V_{GS} = 0\text{V}$	-	-	1	μA
		$V_{DS} = 90\text{V}$, $V_{GS} = 0\text{V}$, $T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	250	μA
Gate to Source Leakage Current	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{V}$	-	-	± 100	nA
ON STATE SPECIFICATIONS						
Gate to Source Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}$, $I_D = 250\mu\text{A}$ (Figure 10)	2	-	4	V
Drain to Source On Resistance	$r_{DS(ON)}$	$I_D = 33\text{A}$, $V_{GS} = 10\text{V}$ (Figure 9)	-	0.033	0.040	Ω
THERMAL SPECIFICATIONS						
Thermal Resistance Junction to Case	$R_{\theta JC}$	TO-220	-	-	1.25	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$		-	-	62	$^\circ\text{C/W}$
SWITCHING SPECIFICATIONS ($V_{GS} = 10\text{V}$)						
Turn-On Time	t_{ON}	$V_{DD} = 50\text{V}$, $I_D = 33\text{A}$	-	-	100	ns
Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	$V_{GS} = 10\text{V}$, $R_{GS} = 9.1\Omega$	-	9.5	-	ns
Rise Time	t_r	(Figures 18, 19)	-	57	-	ns
Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	40	-	ns
Fall Time	t_f		-	55	-	ns
Turn-Off Time	t_{OFF}		-	-	145	ns
GATE CHARGE SPECIFICATIONS						
Total Gate Charge	$Q_g(TOT)$	$V_{GS} = 0\text{V}$ to 20V	-	66	79	nC
Gate Charge at 10V	$Q_g(10)$	$V_{GS} = 0\text{V}$ to 10V				
Threshold Gate Charge	$Q_g(TH)$	$V_{GS} = 0\text{V}$ to 2V				
Gate to Source Gate Charge	Q_{gs}					
Gate to Drain "Miller" Charge	Q_{gd}					
CAPACITANCE SPECIFICATIONS						
Input Capacitance	C_{ISS}	$V_{DS} = 25\text{V}$, $V_{GS} = 0\text{V}$, $f = 1\text{MHz}$	-	1220	-	pF
Output Capacitance	C_{OSS}	(Figure 12)	-	295	-	pF
Reverse Transfer Capacitance	C_{RSS}		-	100	-	pF

Source to Drain Diode Specifications

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Source to Drain Diode Voltage	V_{SD}	$I_{SD} = 33\text{A}$	-	-	1.25	V
		$I_{SD} = 17\text{A}$	-	-	1.00	V
Reverse Recovery Time	t_{rr}	$I_{SD} = 33\text{A}$, $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	112	ns
Reverse Recovered Charge	Q_{RR}	$I_{SD} = 33\text{A}$, $dI_{SD}/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	400	nC

5. Anexos

IRF540N

Typical Performance Curves

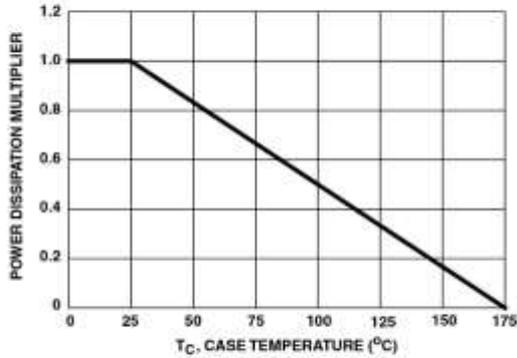


FIGURE 1. NORMALIZED POWER DISSIPATION vs CASE TEMPERATURE

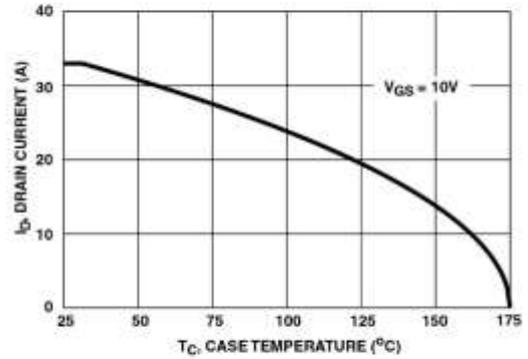


FIGURE 2. MAXIMUM CONTINUOUS DRAIN CURRENT vs CASE TEMPERATURE

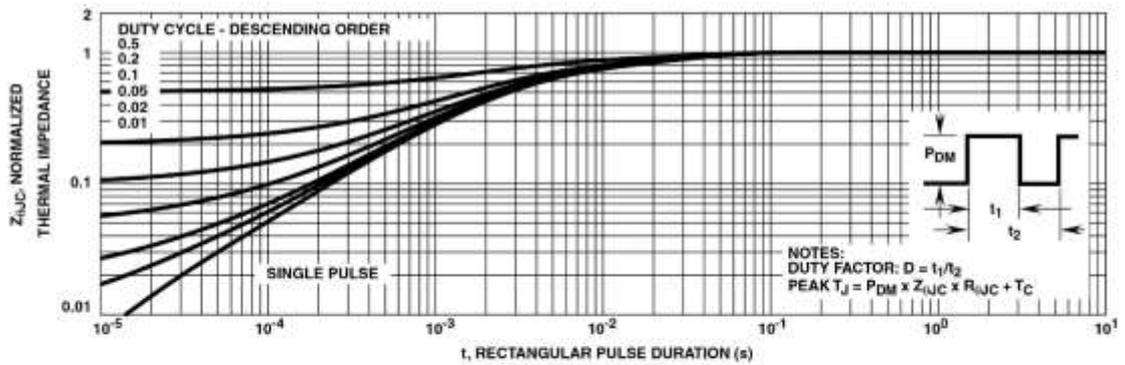


FIGURE 3. NORMALIZED MAXIMUM TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE

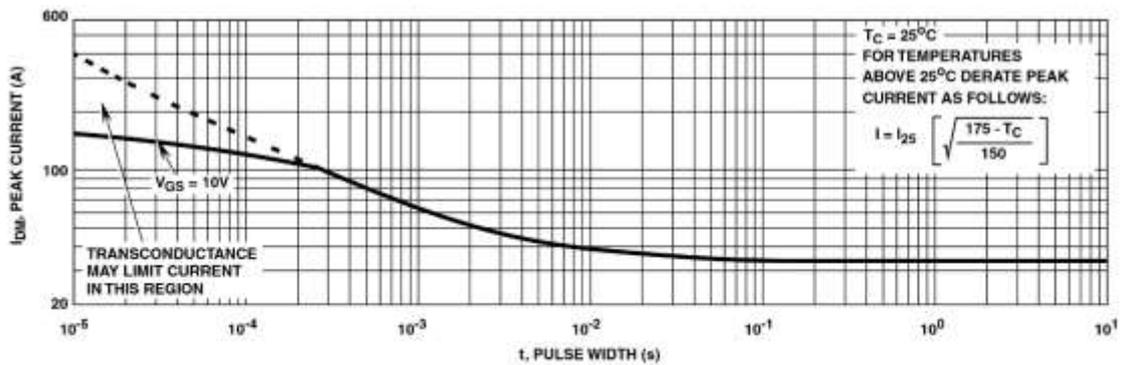


FIGURE 4. PEAK CURRENT CAPABILITY

5. Anexos

IRF540N

Typical Performance Curves (Continued)

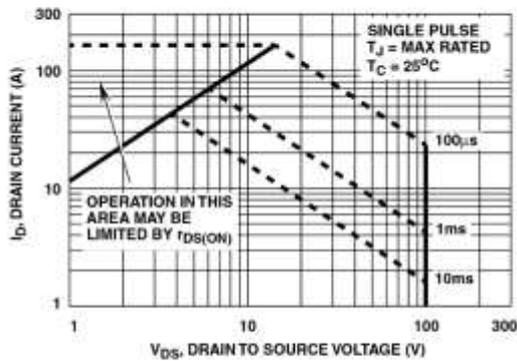
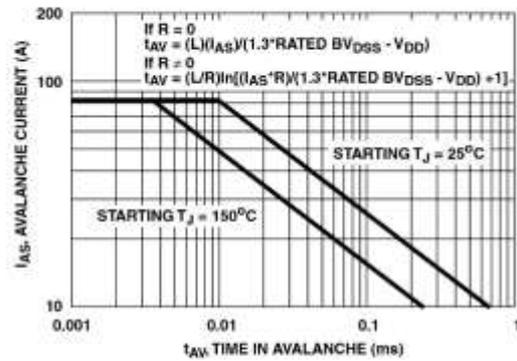


FIGURE 5. FORWARD BIAS SAFE OPERATING AREA



NOTE: Refer to Application Notes AN9321 and AN9322.

FIGURE 6. UNCLAMPED INDUCTIVE SWITCHING CAPABILITY

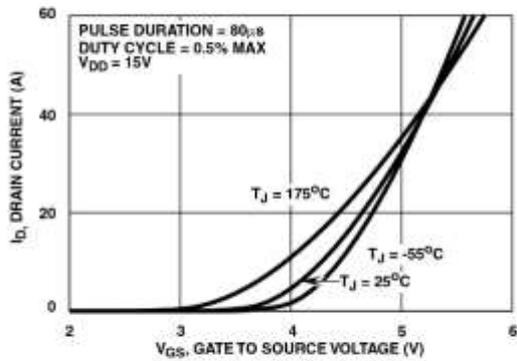


FIGURE 7. TRANSFER CHARACTERISTICS

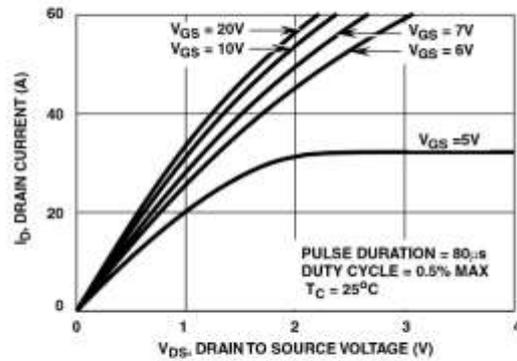


FIGURE 8. SATURATION CHARACTERISTICS

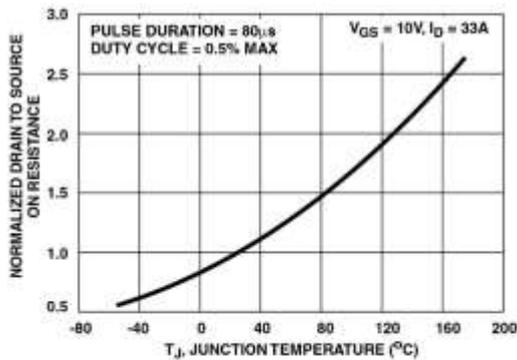


FIGURE 9. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE ON RESISTANCE vs JUNCTION TEMPERATURE

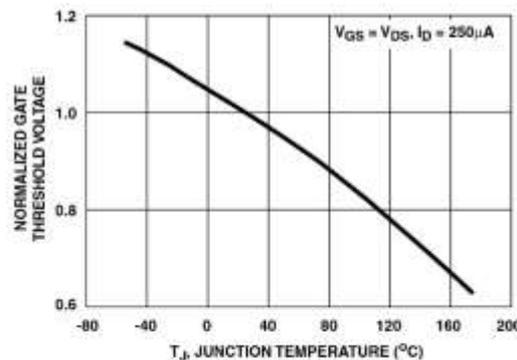


FIGURE 10. NORMALIZED GATE THRESHOLD VOLTAGE vs JUNCTION TEMPERATURE

5. Anexos

IRF540N

Typical Performance Curves (Continued)

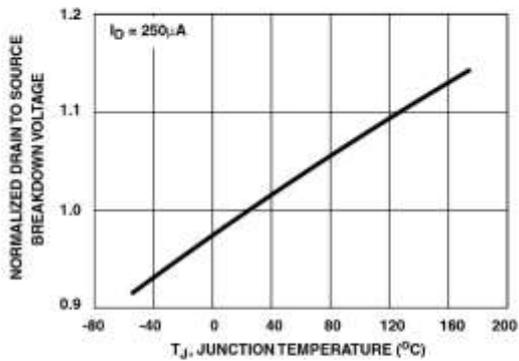


FIGURE 11. NORMALIZED DRAIN TO SOURCE BREAKDOWN VOLTAGE vs JUNCTION TEMPERATURE

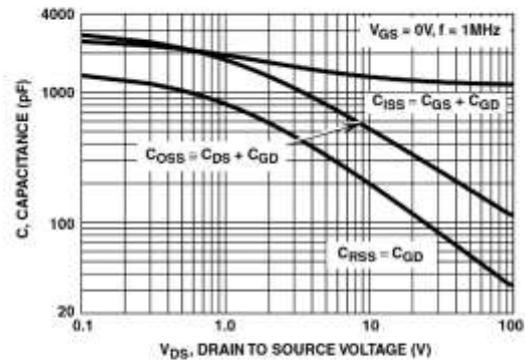
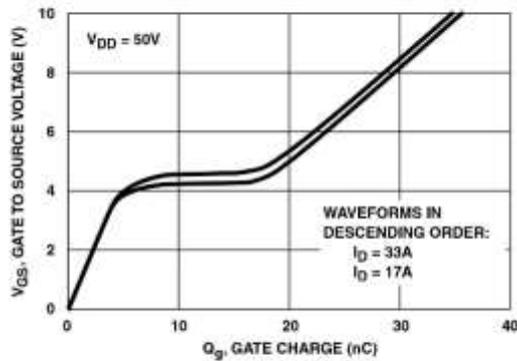


FIGURE 12. CAPACITANCE vs DRAIN TO SOURCE VOLTAGE



NOTE: Refer to Application Notes AN7254 and AN7260.

FIGURE 13. GATE CHARGE WAVEFORMS FOR CONSTANT GATE CURRENT

Test Circuits and Waveforms

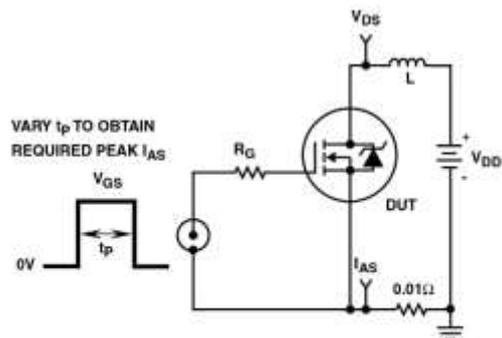


FIGURE 14. UNCLAMPED ENERGY TEST CIRCUIT

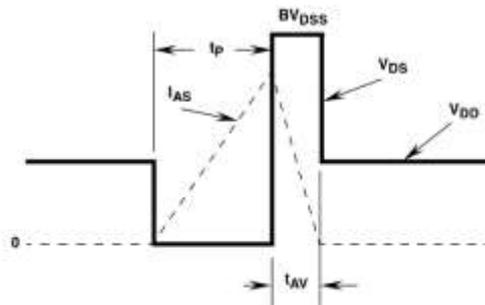


FIGURE 15. UNCLAMPED ENERGY WAVEFORMS

IRF540N

Test Circuits and Waveforms (Continued)

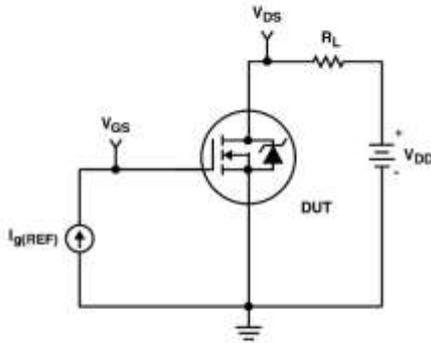


FIGURE 16. GATE CHARGE TEST CIRCUIT

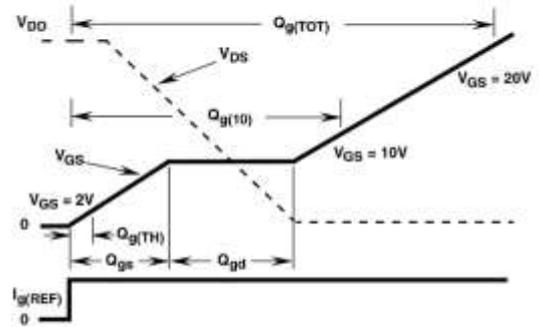


FIGURE 17. GATE CHARGE WAVEFORMS

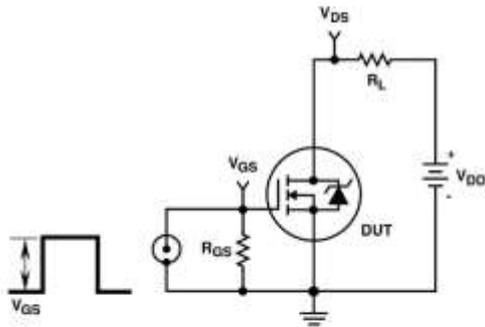


FIGURE 18. SWITCHING TIME TEST CIRCUIT

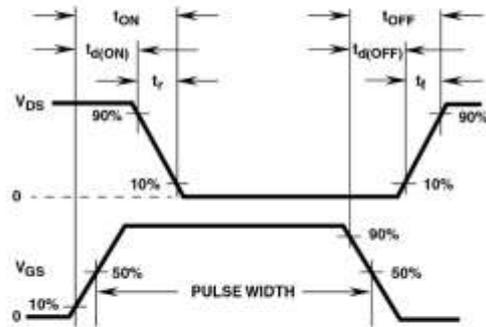


FIGURE 19. SWITCHING TIME WAVEFORM

5. Anexos

IRF540N

PSPICE Electrical Model

.SUBCKT IRF540N 2 1 3 ; rev 19 July 1999

CA 12 8 1.95e-9
 CB 15 14 1.90e-9
 CIN 6 8 1.12e-9

DBODY 7 5 DBODYMOD
 DBREAK 5 11 DBREAKMOD
 DPLCAP 10 5 DPLCAPMOD

EBREAK 11 7 17 18 112.8
 EDS 14 8 5 8 1
 EGS 13 8 6 8 1
 ESG 6 10 6 8 1
 EVTHRES 6 21 19 8 1
 EVTEMP 20 6 18 22 1

IT 8 17 1

LDRAIN 2 5 1.0e-9
 LGATE 1 9 6.19e-9
 LSOURCE 3 7 2.18e-9

MMED 16 6 8 8 MMEDMOD
 MSTRO 16 6 8 8 MSTROMOD
 MWEAK 16 21 8 8 MWEAKMOD

RBREAK 17 18 RBREAKMOD 1
 RDRAIN 50 16 RDRAINMOD 2.00e-2
 RGATE 9 20 1.77
 RLDRAIN 2 5 10
 RLGATE 1 9 26
 RLSOURCE 3 7 11
 RSLC1 5 51 RSLCMOD 1e-6
 RSLC2 5 50 1e3
 RSOURCE 8 7 RSOURCEMOD 6.5e-3
 RVTHRES 22 8 RVTHRESMOD 1
 RVTEMP 18 19 RVTEMPMOD 1

S1A 6 12 13 8 S1AMOD
 S1B 13 12 13 8 S1BMOD
 S2A 6 15 14 13 S2AMOD
 S2B 13 15 14 13 S2BMOD

VBAT 22 19 DC 1

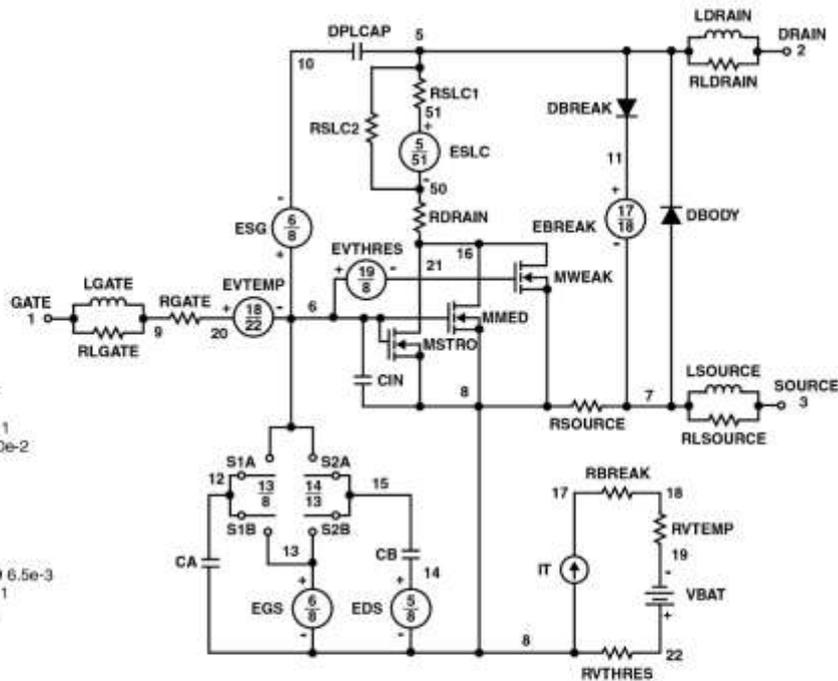
ESLC 51 50 VALUE=-(V(5,51)/ABS(V(5,51)))^(PWR(V(5,51)/(1e-6*71),3.5))

.MODEL DBODYMOD D (IS = 1.20e-12 RS = 4.2e-3 XTI = 5 TRS1 = 1.3e-3 TRS2 = 8.0e-6 CJO = 1.50e-9 TT = 7.47e-8 M = 0.63)
 .MODEL DBREAKMOD D (RS = 4.2e-1 TRS1 = 8e-4 TRS2 = 3e-6)
 .MODEL DPLCAPMOD D (CJO = 1.45e-9 IS = 1e-30 M = 0.82)
 .MODEL MMEDMOD NMOS (VTO = 3.11 KP = 5 IS = 1e-30 N = 10 TOX = 1 L = 1u W = 1u RG = 1.77)
 .MODEL MSTROMOD NMOS (VTO = 3.57 KP = 33.5 IS = 1e-30 N = 10 TOX = 1 L = 1u W = 1u)
 .MODEL MWEAKMOD NMOS (VTO = 2.68 KP = 0.09 IS = 1e-30 N = 10 TOX = 1 L = 1u W = 1u RG = 17.7)
 .MODEL RBREAKMOD RES (TC1 = 1.05e-3 TC2 = -5e-7)
 .MODEL RDRAINMOD RES (TC1 = 9.40e-3 TC2 = 2.93e-5)
 .MODEL RSLCMOD RES (TC1 = 3.5e-3 TC2 = 2.0e-6)
 .MODEL RSOURCEMOD RES (TC1 = 1e-3 TC2 = 1e-6)
 .MODEL RVTHRESMOD RES (TC1 = -1.8e-3 TC2 = -8.6e-6)
 .MODEL RVTEMPMOD RES (TC1 = -3.0e-3 TC2 = 1.5e-7)

.MODEL S1AMOD VSWITCH (RON = 1e-5 ROFF = 0.1 VON = -6.2 VOFF = -3.1)
 .MODEL S1BMOD VSWITCH (RON = 1e-5 ROFF = 0.1 VON = -3.1 VOFF = -6.2)
 .MODEL S2AMOD VSWITCH (RON = 1e-5 ROFF = 0.1 VON = -1.0 VOFF = 0.5)
 .MODEL S2BMOD VSWITCH (RON = 1e-5 ROFF = 0.1 VON = 0.5 VOFF = -1.0)

.ENDS

NOTE: For further discussion of the PSPICE model, consult **A New PSPICE Sub-Circuit for the Power MOSFET Featuring Global Temperature Options**, IEEE Power Electronics Specialist Conference Records, 1991, written by William J. Hepp and C. Frank Wheatley.



5. Anexos

IRF540N

SABER Electrical Model

REV 19 July 1999

template IRF540N n2,n1,n3
electrical n2,n1,n3

```

{
var i iscl
d..model dbodymod = (is = 1.20e-12, cjo = 1.50e-9, tt = 7.47e-8, xti = 5, m = 0.63)
d..model dbreakmod = ()
d..model dpicapmod = (cjo = 1.45e-9, is = 1e-30, m = 0.82)
m..model mmedmod = (type=_n, vto = 3.11, kp = 5, is = 1e-30, tox = 1)
m..model mstrongmod = (type=_n, vto = 3.57, kp = 33.5, is = 1e-30, tox = 1)
m..model mweakmod = (type=_n, vto = 2.68, kp = 0.09, is = 1e-30, tox = 1)
sw_vcsp..model s1amod = (ron = 1e-5, roff = 0.1, von = -6.2, voff = -3.1)
sw_vcsp..model s1bmod = (ron = 1e-5, roff = 0.1, von = -3.1, voff = -6.2)
sw_vcsp..model s2amod = (ron = 1e-5, roff = 0.1, von = -1.0, voff = 0.5)
sw_vcsp..model s2bmod = (ron = 1e-5, roff = 0.1, von = 0.5, voff = -1.0)

```

```

c.ca n12 n8 = 1.95e-9
c.cb n15 n14 = 1.90e-9
c.cin n6 n8 = 1.12e-9

```

```

d.dbody n7 n71 = model=dbodymod
d.dbreak n72 n11 = model=dbreakmod
d.dpicap n10 n5 = model=dpicapmod

```

```
lit n8 n17 = 1
```

```

l.drain n2 n5 = 1e-9
l.gate n1 n9 = 8.19e-9
l.source n3 n7 = 2.18e-9

```

```

m.mmed n16 n6 n8 n8 = model=mmedmod, l=1u, w=1u
m.mstrong n16 n6 n8 n8 = model=mstrongmod, l=1u, w=1u
m.mweak n16 n21 n8 n9 = model=mweakmod, l=1u, w=1u

```

```

res.rbreak n17 n18 = 1, tc1 = 1.05e-3, tc2 = -5.0e-7
res.rbody n71 n5 = 4.2e-3, tc1 = 1.30e-3, tc2 = 8.0e-6
res.rdbreak n72 n5 = 4.2e-1, tc1 = 8.0e-4, tc2 = 3.0e-6
res.rdrain n50 n16 = 2.00e-2, tc1 = 9.40e-3, tc2 = 2.93e-5
res.rgate n9 n20 = 1.77
res.ridrain n2 n5 = 10
res.rigate n1 n9 = 26
res.risource n3 n7 = 11
res.rslc1 n5 n51 = 1e-6, tc1 = 3.5e-3, tc2 = 2.0e-6
res.rslc2 n5 n50 = 1e3
res.rsource n8 n7 = 6.5e-3, tc1 = 1e-3, tc2 = 1e-6
res.rvtemp n18 n19 = 1, tc1 = -3.0e-3, tc2 = 1.5e-7
res.rvthres n22 n8 = 1, tc1 = -1.8e-3, tc2 = -8.6e-6

```

```

spe.ebreak n11 n7 n17 n18 = 112.8
spe.eds n14 n8 n5 n8 = 1
spe.egs n13 n8 n6 n8 = 1
spe.esg n6 n10 n6 n8 = 1
spe.evtemp n20 n6 n18 n22 = 1
spe.avthres n6 n21 n19 n8 = 1

```

```

sw_vcsp.s1a n6 n12 n13 n8 = model=s1amod
sw_vcsp.s1b n13 n12 n13 n8 = model=s1bmod
sw_vcsp.s2a n6 n15 n14 n13 = model=s2amod
sw_vcsp.s2b n13 n15 n14 n13 = model=s2bmod

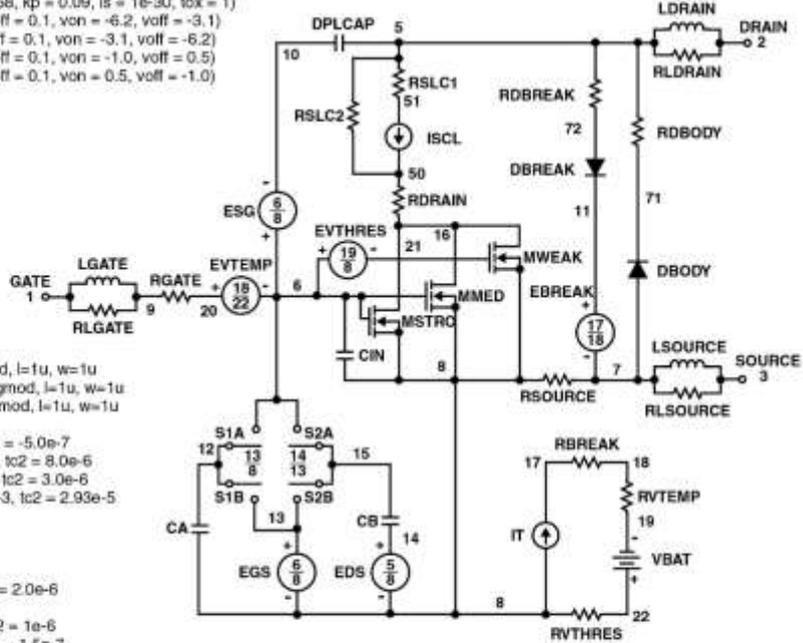
```

```
v.vbat n22 n19 = dc=1
```

```

equations {
l (n51->n50) += iscl
iscl: v(n51,n50) = ((v(n5,n51)/(1e-9+abs(v(n5,n51))))*(abs(v(n5,n51)**1e6/71))** 3.5)
}

```



5. Anexos

IRF540N

SPICE Thermal Model

REV 26 July 1999

IRF540NT

CTHERM1 th 6 2.60e-3
 CTHERM2 6 5 8.85e-3
 CTHERM3 5 4 7.60e-3
 CTHERM4 4 3 7.65e-3
 CTHERM5 3 2 1.22e-2
 CTHERM6 2 1 8.70e-2

RTHERM1 th 6 9.00e-3
 RTHERM2 6 5 1.80e-2
 RTHERM3 5 4 9.15e-2
 RTHERM4 4 3 2.43e-1
 RTHERM5 3 2 3.10e-1
 RTHERM6 2 1 3.21e-1

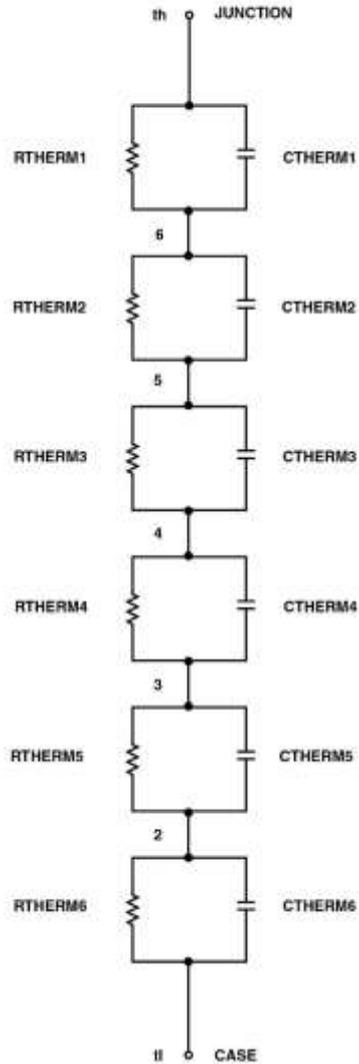
SABER Thermal Model

SABER thermal model IRF540NT

template thermal_model th II
 thermal_c th, II

```
(
    ctherm.cthem1 th 6 = 2.60e-3
    ctherm.cthem2 6 5 = 8.85e-3
    ctherm.cthem3 5 4 = 7.60e-3
    ctherm.cthem4 4 3 = 7.65e-3
    ctherm.cthem5 3 2 = 1.22e-2
    ctherm.cthem6 2 1 = 8.70e-2
```

```
rtherm.rthem1 th 6 = 9.00e-3
rtherm.rthem2 6 5 = 1.80e-2
rtherm.rthem3 5 4 = 9.15e-2
rtherm.rthem4 4 3 = 2.43e-1
rtherm.rthem5 3 2 = 3.10e-1
rtherm.rthem6 2 1 = 3.21e-1
)
```



2. Hoja de características 1N5820

1N5820-1N5822



1N5820 - 1N5822

Features

- 3.0 ampere operation at $T_A = 95^\circ\text{C}$ with no thermal runaway.
- For use in low voltage, high frequency inverters free wheeling, and polarity protection applications.



DO-201AD
COLOR BAND DENOTES CATHODE

Schottky Rectifiers

Absolute Maximum Ratings* $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value			Units
		1N5820	1N5821	1N5822	
V_{RRM}	Maximum Repetitive Reverse Voltage	20	30	40	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current 3/8" lead length @ $T_A = 95^\circ\text{C}$	3.0			A
I_{FSM}	Non-repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	80			A
T_{stg}	Storage Temperature Range	-65 to +125			$^\circ\text{C}$
T_J	Operating Junction Temperature	-65 to +125			$^\circ\text{C}$

*These ratings are limiting values above which the serviceability of any semiconductor device may be impaired.

Thermal Characteristics

Symbol	Parameter	Value	Units
P_D	Power Dissipation	3.6	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	28	$^\circ\text{C/W}$

Electrical Characteristics

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Device			Units
		1N5820	1N5821	1N5822	
V_F	Forward Voltage	@ 3.0 A	475	500	mV
		@ 9.4 A	850	900	mV
I_R	Reverse Current @ rated V_R	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.5		mA
		$T_A = 100^\circ\text{C}$	20		mA
C_T	Total Capacitance $V_R = 4.0\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$	190			pF

©2001 Fairchild Semiconductor Corporation
1N5820-1N5822, Rev. C

Schottky Rectifiers
(continued)

Typical Characteristics

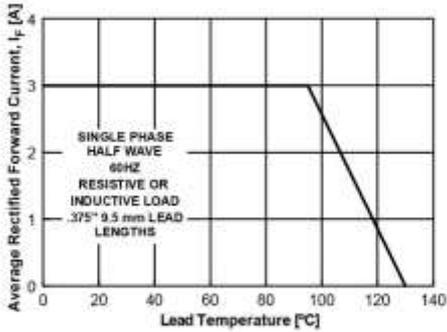


Figure 1. Forward Current Derating Curve

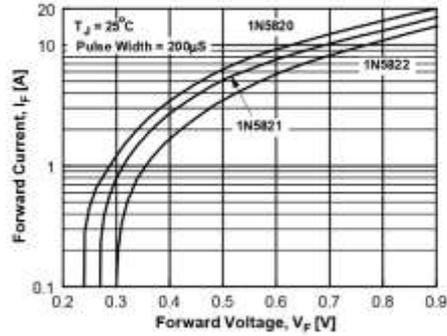


Figure 2. Forward Voltage Characteristics

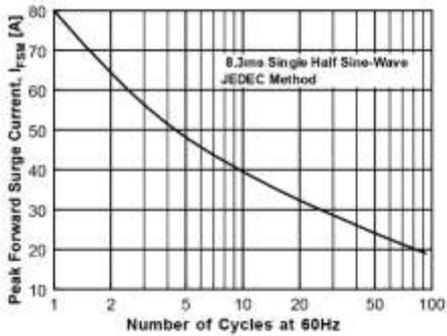


Figure 3. Non-Repetitive Surge Current

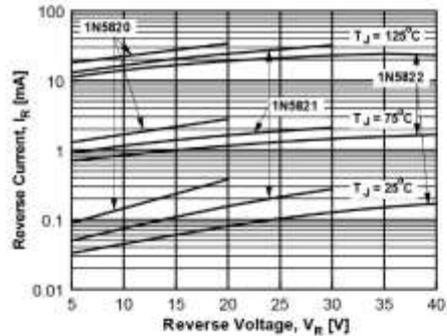


Figure 4. Reverse Current vs Reverse Voltage

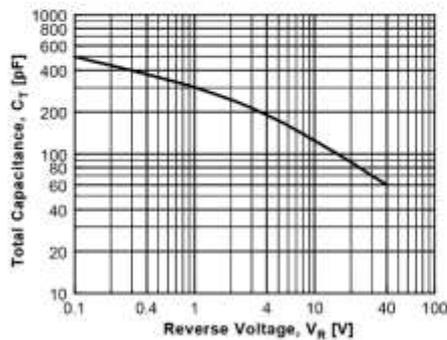


Figure 5. Total Capacitance

3. Hoja de características TLP351H

TOSHIBA

TLP351H, TLP351HF

Photocouplers GaAsInfrared LED & Photo IC

TLP351H, TLP351HF

1. Applications

- Industrial Inverters
- MOSFET Gate Drivers
- IGBT Gate Drivers
- Induction Cooktop and Home Appliances

2. General

The TLP351H is a photocoupler in a DIP8 package that consists of a GaAsInfrared light-emitting diode (LED) optically coupled to an integrated high-gain, high-speed photodetector IC chip. It provides guaranteed performance and specifications at temperatures up to 125°C. The TLP351H has an internal Faraday shield that provides a guaranteed Common-mode transient immunity of ± 20 kV/ μ s.

It has a totem-pole output that can both sink and source current. The TLP351H is ideal for IGBT and power MOSFET gate drive.

3. Features

- (1) Output peak current: ± 0.6 A (max)
- (2) Operating temperature: -40 to 125 °C
- (3) Supply current: 2 mA (max)
- (4) Supply voltage: 10 to 30 V
- (5) Threshold input current: 5 mA (max)
- (6) Propagation delay time: 700 ns (max)
- (7) Common-mode transient immunity: ± 20 kV/ μ s (min)
- (8) Isolation voltage: 3750 Vrms (min)
- (9) Safety standards

UL-approved: UL1577, File No.E67349

cUL-approved: CSA Component Acceptance Service No.5A File No.E67349

VDE-approved: EN60747-5-5, EN60065 or EN60950-1 (**Note 1**)

CQC-approved: GB4943.1, GB8898 Japan Factory

Note 1: When an EN60747-5-5 approved type is needed, please designate the **Option (D4)**.

Start of commercial production

2011-08

©2016 Toshiba Corporation

1

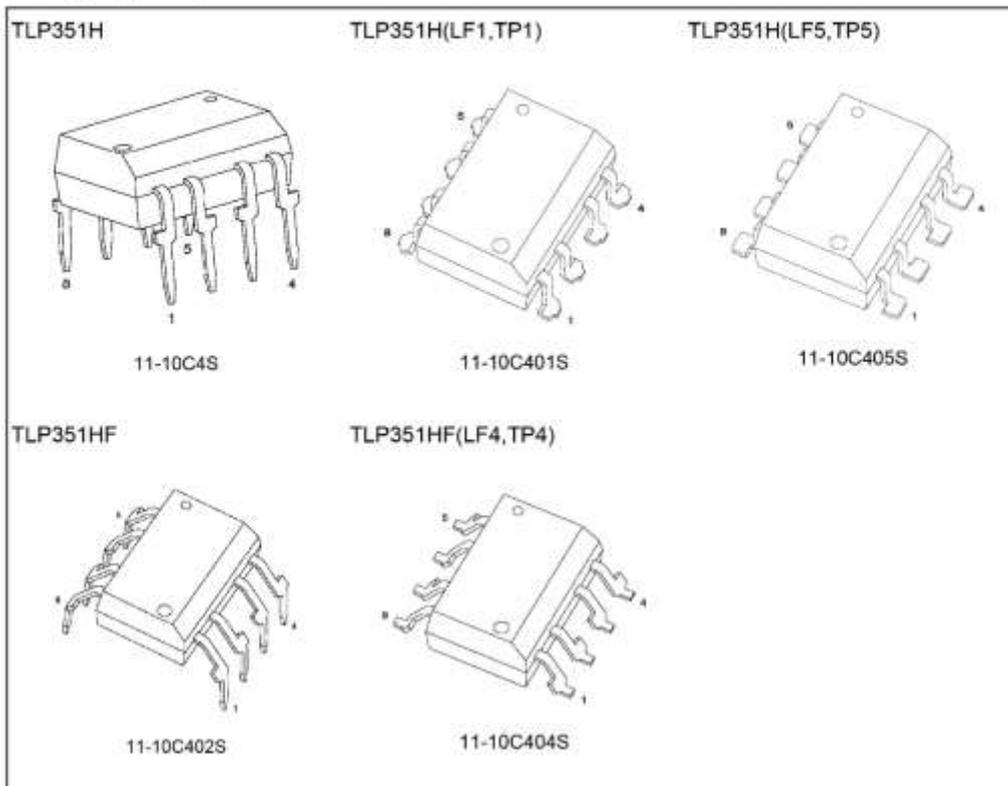
2016-10-19

Rev.8.0

TOSHIBA

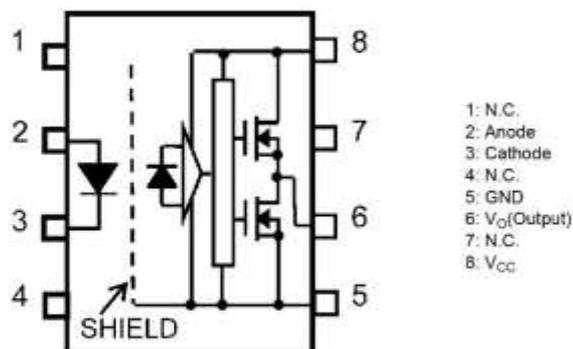
TLP351H,TLP351HF

4. Packaging (Note)

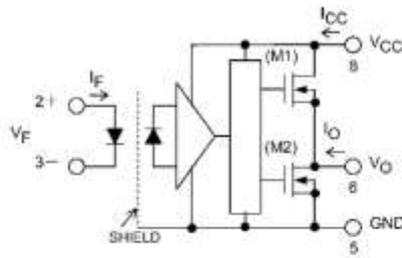


Note: Through-hole type: TLP351H, TLP351HF
 Lead forming option: (LF1), (LF4), (LF5)
 Taping option: (TP1), (TP4), (TP5)

5. Pin Assignment



6. Internal Circuit (Note)



Note: A 0.1- μ F bypass capacitor must be connected between pin 8 and pin 5.

7. Principle of Operation

7.1. Truth Table

Input	LED	M1	M2	Output
H	ON	ON	OFF	H
L	OFF	OFF	ON	L

7.2. Mechanical Parameters

Characteristics	7.62-mm Pitch TLP351H	10.16-mm Pitch TLP351HF	Unit
Creepage distances	7.0 (min)	8.0 (min)	mm
Clearance distances	7.0 (min)	8.0 (min)	
Internal isolation thickness	0.4 (min)	0.4 (min)	

TOSHIBA

TLP351H, TLP351HF

8. Absolute Maximum Ratings (Note) (Unless otherwise specified, $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$)

	Characteristics	Symbol	Note	Rating	Unit
LED	Input forward current	I_F		20	mA
	Input forward current derating ($T_a \geq 116\text{ }^\circ\text{C}$)	$\Delta I_F / \Delta T_a$		-0.6	mA/°C
	Peak transient input forward current	I_{FPT}	(Note 1)	1	A
	Peak transient input forward current derating ($T_a \geq 110\text{ }^\circ\text{C}$)	$\Delta I_{FPT} / \Delta T_a$		-25	mA/°C
	Input reverse voltage	V_R		5	V
	Input power dissipation	P_D		40	mW
	Input power dissipation derating ($T_a \geq 110\text{ }^\circ\text{C}$)	$\Delta P_D / \Delta T_a$		-1.0	mW/°C
Detector	Peak high-level output current ($T_a = -40\text{ to }125\text{ }^\circ\text{C}$)	I_{OPH}	(Note 2)	-0.6	A
	Peak low-level output current ($T_a = -40\text{ to }125\text{ }^\circ\text{C}$)	I_{OPL}	(Note 2)	+0.6	A
	Output voltage	V_O		35	V
	Supply voltage	V_{CC}		35	V
	Output power dissipation	P_D		260	mW
	Output power dissipation derating ($T_a \geq 110\text{ }^\circ\text{C}$)	$\Delta P_D / \Delta T_a$		-6.5	mW/°C
Common	Operating temperature	T_{opr}		-40 to 125	°C
	Storage temperature	T_{stg}		-55 to 150	
	Lead soldering temperature (10 s)	T_{sol}	(Note 3)	260	
	Isolation voltage AC, 60 s, R.H. $\leq 60\%$, $T_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$	BV_S	(Note 4)	3750	Vrms

Note: Using continuously under heavy loads (e.g. the application of high temperature/current/voltage and the significant change in temperature, etc.) may cause this product to decrease in the reliability significantly even if the operating conditions (i.e. operating temperature/current/voltage, etc.) are within the absolute maximum ratings.

Please design the appropriate reliability upon reviewing the Toshiba Semiconductor Reliability Handbook ("Handling Precautions"/"Derating Concept and Methods") and individual reliability data (i.e. reliability test report and estimated failure rate, etc.).

Note 1: Pulse width (PW) $\leq 1\text{ }\mu\text{s}$, 300 pps

Note 2: Exponential waveform. Pulse width $\leq 10\text{ }\mu\text{s}$, $f \leq 15\text{ kHz}$

Note 3: $\geq 2\text{ mm}$ below seating plane.

Note 4: This device is considered as a two-terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 are shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 are shorted together.

9. Recommended Operating Conditions (Note)

Characteristics	Symbol	Note	Min	Typ.	Max	Unit
Input on-state current	$I_{F(ON)}$	(Note 1)	6.5	—	15	mA
Input off-state voltage	$V_{F(OFF)}$		0	—	0.8	V
Supply voltage	V_{CC}	(Note 2)	10	—	30	V
Peak high-level output current	I_{OPH}		—	—	-0.2	A
Peak low-level output current	I_{OPL}		—	—	+0.2	A
Operating frequency	f	(Note 3)	—	—	25	kHz

Note: The recommended operating conditions are given as a design guide necessary to obtain the intended performance of the device. Each parameter is an independent value. When creating a system design using this device, the electrical characteristics specified in this datasheet should also be considered.

Note: A ceramic capacitor (0.1 μF) should be connected between pin 8 and pin 5 to stabilize the operation of a high-gain linear amplifier. Otherwise, this photocoupler may not switch properly. The bypass capacitor should be placed within 1 cm of each pin.

Note 1: The rise and fall times of the input on-current should be less than 0.5 μs .

Note 2: Denotes the operating range, not the recommended operating condition.

Note 3: Exponential waveform. $I_{OPH} \geq -0.4\text{ A}$ ($\leq 2.0\text{ }\mu\text{s}$), $I_{OPL} \leq 0.4\text{ A}$ ($\leq 2.0\text{ }\mu\text{s}$), $T_a = 125\text{ }^\circ\text{C}$

TOSHIBA

TLP351H, TLP351HF

10. Electrical Characteristics (Note)
(Unless otherwise specified, $T_a = -40$ to 125 °C)

Characteristics	Symbol	Note	Test Circuit	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Input forward voltage	V_F			$I_F = 10$ mA, $T_a = 25$ °C	1.45	1.55	1.7	V
Input forward voltage temperature coefficient	$\Delta V_F / \Delta T_a$			$I_F = 10$ mA	—	-2.0	—	mV/°C
Input reverse current	I_R			$V_R = 5$ V, $T_a = 25$ °C	—	—	10	μA
Input capacitance	C_i			$V = 0$ V, $f = 1$ MHz, $T_a = 25$ °C	—	95	—	pF
Peak high-level output current	I_{OCH}	(Note 1)	Fig. 13.1.1	$I_F = 5$ mA, $V_{CC} = 15$ V, $V_{B,6} = 4$ V $I_F = 5$ mA, $V_{CC} = 15$ V, $V_{B,8} = 10$ V	—	-0.4	-0.2	A
Peak low-level output current	I_{OFL}	(Note 1)	Fig. 13.1.2	$I_F = 0$ mA, $V_{CC} = 15$ V, $V_{B,6} = 2$ V $I_F = 0$ mA, $V_{CC} = 15$ V, $V_{B,8} = 10$ V	0.2	0.5	—	
High-level output voltage	V_{OH}		Fig. 13.1.3	$I_F = 5$ mA, $V_{CC} = 10$ V, $I_O = -100$ mA	6.0	6.5	—	V
Low-level output voltage	V_{OL}		Fig. 13.1.4	$V_F = 0.8$ V, $V_{CC} = 10$ V, $I_O = 100$ mA	—	0.34	1.0	
High-level supply current	I_{CCH}		Fig. 13.1.5	$I_F = 10$ mA, $V_{CC} = 10$ to 30 V, $V_O = \text{Open}$	—	1.2	2.0	mA
Low-level supply current	I_{CCL}		Fig. 13.1.6	$I_F = 0$ mA, $V_{CC} = 10$ to 30 V, $V_O = \text{Open}$	—	1.1	2.0	
Threshold input current (L/H)	I_{FLH}			$V_{CC} = 15$ V, $V_O > 1$ V	—	1.1	5	
Threshold input voltage (H/L)	V_{FHL}			$V_{CC} = 15$ V, $V_O < 1$ V	0.8	—	—	V
Supply voltage	V_{CC}			—	10	—	30	

Note: All typical values are at $T_a = 25$ °C.

Note: This device is designed for low power consumption, making it more sensitive to ESD than its predecessors. Extra care should be taken in the design of circuitry and pc board implementation to avoid ESD problems.

Note 1: I_O application time ≤ 50 μs, single pulse.

11. Isolation Characteristics (Unless otherwise specified, $T_a = 25$ °C)

Characteristics	Symbol	Note	Test Conditions	Min	Typ.	Max	Unit
Total capacitance (input to output)	C_S	(Note 1)	$V_S = 0$ V, $f = 1$ MHz	—	1.0	—	pF
Isolation resistance	R_S	(Note 1)	$V_S = 500$ V, R.H. ≤ 60 %	1 $\times 10^{12}$	10^{14}	—	Ω
Isolation voltage	BV_S	(Note 1)	AC, 60 s	3750	—	—	Vrms
			AC, 1 s in oil	—	10000	—	
			DC, 60 s in oil	—	10000	—	Vdc

Note 1: This device is considered as a two-terminal device. Pins 1, 2, 3 and 4 are shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 are shorted together.

TOSHIBA

TLP351H,TLP351HF

12. Switching Characteristics (Note)
(Unless otherwise specified, $T_a = -40$ to 125 °C)

Characteristics	Symbol	Note	Test Circuit	Test Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Propagation delay time (L/H)	t_{pLH}	(Note 1)	Fig. 13.1.7	$I_F = 0 \rightarrow 5$ mA, $V_{CC} = 30$ V, $R_g = 47$ Ω , $C_g = 3$ nF	30	—	700	ns
Propagation delay time (H/L)	t_{pHL}	(Note 1)		$I_F = 5 \rightarrow 0$ mA, $V_{CC} = 30$ V, $R_g = 47$ Ω , $C_g = 3$ nF	30	—	700	
Rise time	t_r	(Note 1)		$I_F = 0 \rightarrow 5$ mA, $V_{CC} = 30$ V, $R_g = 47$ Ω , $C_g = 3$ nF	—	50	—	
Fall time	t_f	(Note 1)		$I_F = 5 \rightarrow 0$ mA, $V_{CC} = 30$ V, $R_g = 47$ Ω , $C_g = 3$ nF	—	50	—	
Pulse width distortion	$ t_{pHL} - t_{pLH} $	(Note 1)		$I_F = 0 \leftrightarrow 5$ mA, $V_{CC} = 30$ V, $R_g = 47$ Ω , $C_g = 3$ nF	—	—	500	
Common-mode transient immunity at output high	CM_H	(Note 2)	Fig. 13.1.8	$V_{CM} = 1000$ V _{p-p} , $I_F = 5$ mA, $V_{CC} = 30$ V, $T_a = 25$ °C, $V_{O(min)} = 26$ V	± 20	± 25	—	kV/ μ s
Common-mode transient immunity at output low	CM_L	(Note 3)		$V_{CM} = 1000$ V _{p-p} , $I_F = 0$ mA, $V_{CC} = 30$ V, $T_a = 25$ °C, $V_{O(max)} = 1$ V	± 20	± 25	—	

Note: All typical values are at $T_a = 25$ °C.Note 1: $f = 25$ kHz, duty = 50 %, input current $t_r = t_f = 5$ ns, C_L is approximately 15 pF which includes probe and stray wiring capacitance.Note 2: CM_H is the maximum rate of fall of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the logic high state ($V_O > 26$ V).Note 3: CM_L is the maximum rate of rise of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the logic low state ($V_O < 1$ V).

13. Test Circuits and Characteristics Curves

13.1. Test Circuits

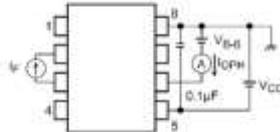


Fig. 13.1.1 I_{OPH} Test Circuit

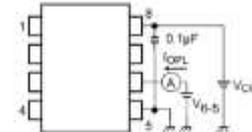


Fig. 13.1.2 I_{OPL} Test Circuit

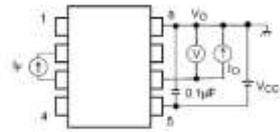


Fig. 13.1.3 V_{OH} Test Circuit
 $V_{OH} = V_{CC} - V_O$

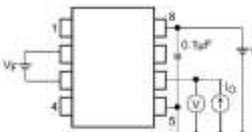


Fig. 13.1.4 V_{OL} Test Circuit

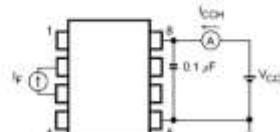


Fig. 13.1.5 I_{CCH} Test Circuit

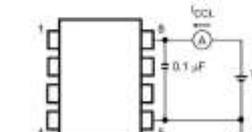


Fig. 13.1.6 I_{CCL} Test Circuit

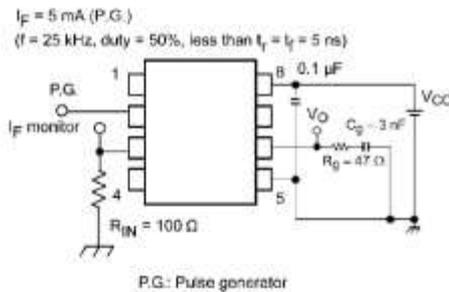
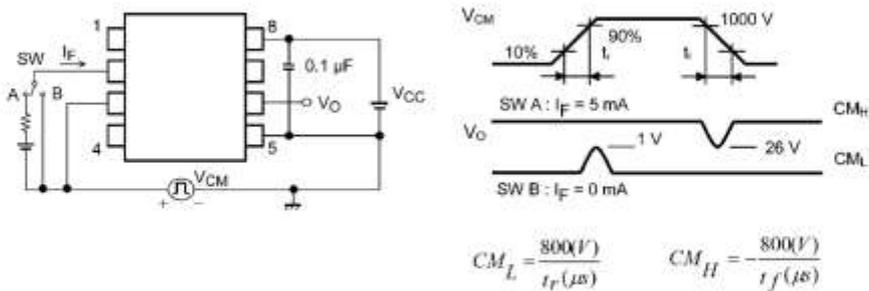


Fig. 13.1.7 Switching Time Test Circuit and Waveform



CM_L (CM_H) is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

Fig. 13.1.8 Common-Mode Transient Immunity and Waveform

13.2. Characteristics Curves (Note)

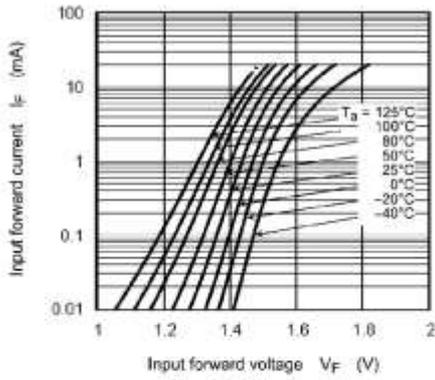


Fig. 13.2.1 $I_F - V_F$

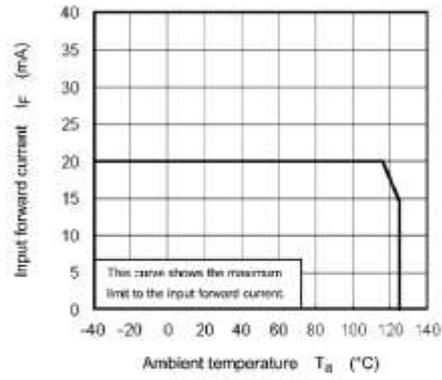


Fig. 13.2.2 $I_F - T_a$

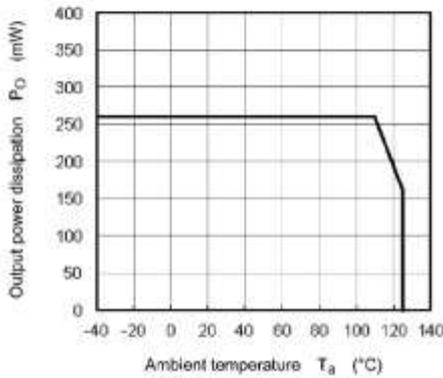


Fig. 13.2.3 $P_O - T_a$

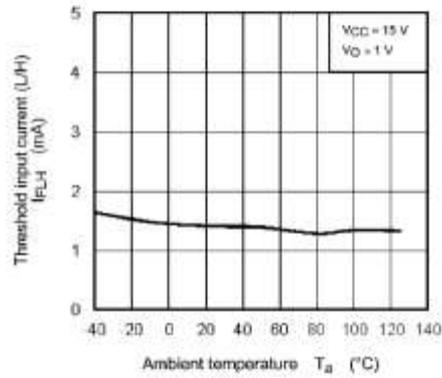


Fig. 13.2.4 $I_{FLH} - T_a$

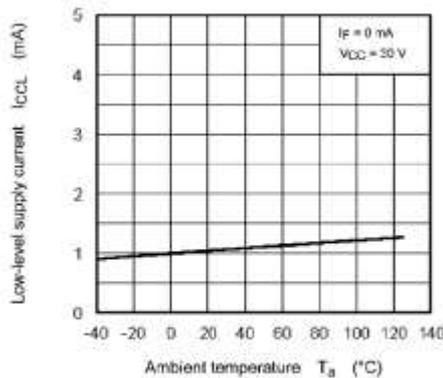


Fig. 13.2.5 $I_{CCL} - T_a$

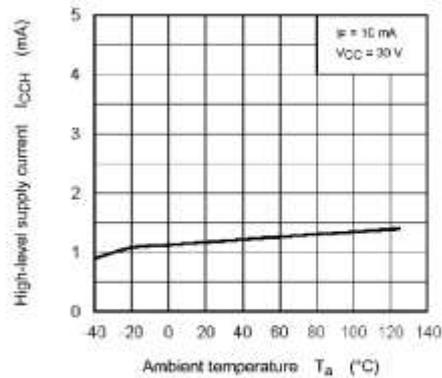


Fig. 13.2.6 $I_{CCH} - T_a$

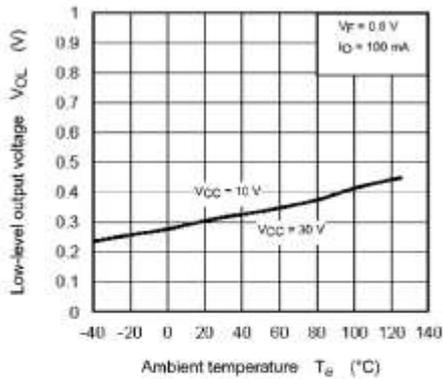


Fig. 13.2.7 $V_{OL} - T_a$

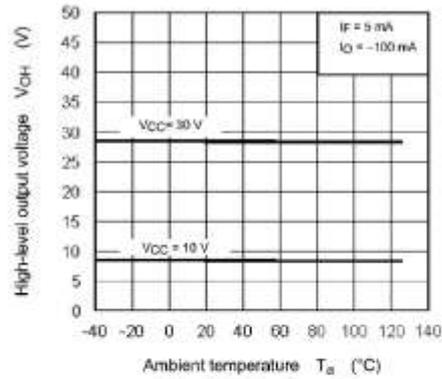


Fig. 13.2.8 $V_{OH} - T_a$

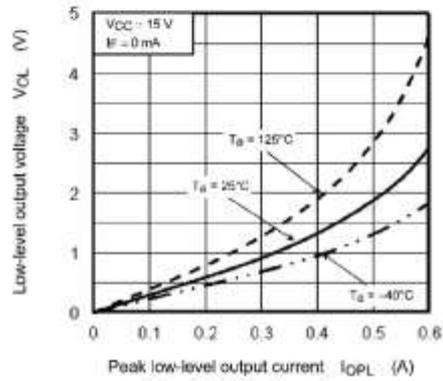


Fig. 13.2.9 $V_{OL} - I_{OPL}$

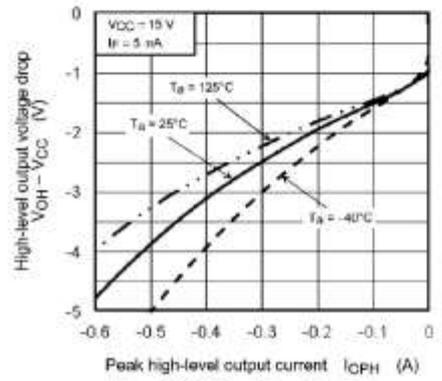


Fig. 13.2.10 $(V_{OH} - V_{CC}) - I_{OPH}$

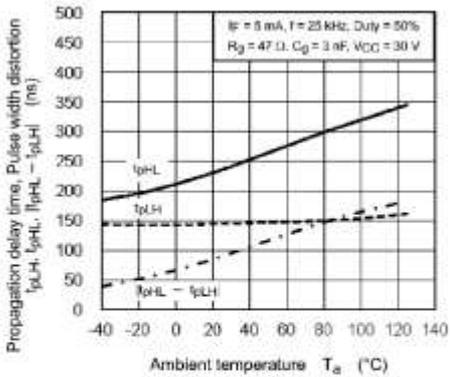


Fig. 13.2.11 $t_{pHL}, t_{pLH}, |t_{pHL} - t_{pLH}| - T_a$

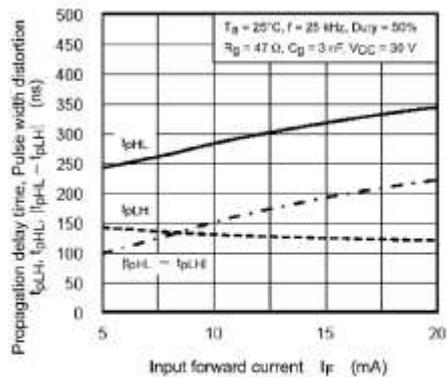


Fig. 13.2.12 $t_{pHL}, t_{pLH}, |t_{pHL} - t_{pLH}| - I_F$

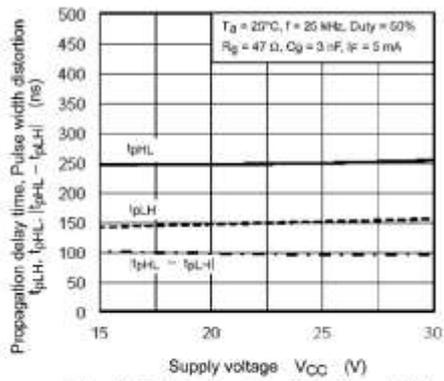


Fig. 13.2.13 $t_{PLH}, t_{PHL}, |t_{PHL} - t_{PLH}| - V_{CC}$

NOTE: The above characteristics curves are presented for reference only and not guaranteed by production test, unless otherwise noted.

14. Soldering and Storage**14.1. Precautions for Soldering**

The soldering temperature should be controlled as closely as possible to the conditions shown below, irrespective of whether a soldering iron or a reflow soldering method is used.

- When using soldering reflow.

The soldering temperature profile is based on the package surface temperature.

(See the figure shown below, which is based on the package surface temperature.)

Reflow soldering must be performed once or twice.

The mounting should be completed with the interval from the first to the last mountings being 2 weeks.

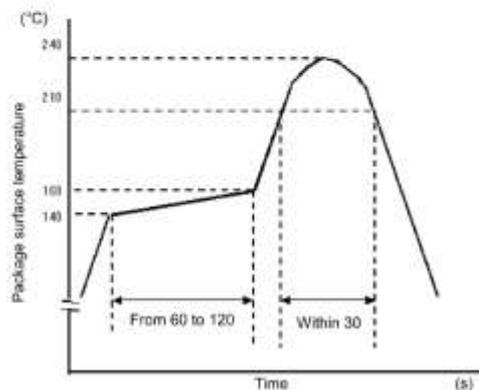


Fig. 14.1.1 An Example of a Temperature Profile When Sn-Pb Eutectic Solder Is Used

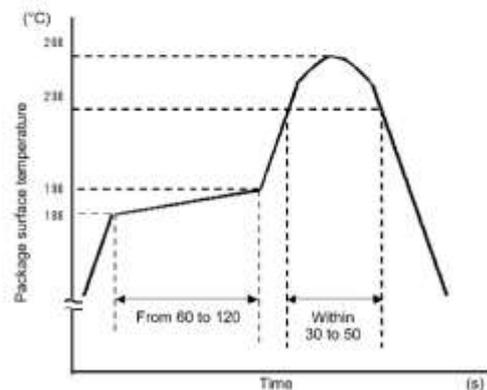


Fig. 14.1.2 An Example of a Temperature Profile When Lead(Pb)-free Solder Is Used

- When using soldering flow (Applicable to both eutectic solder and Lead(Pb)-Free solder)

Preheat the device at a temperature of 150 °C (package surface temperature) for 60 to 120 seconds.

Mounting condition of 260 °C within 10 seconds is recommended.

Flow soldering must be performed once.

- When using soldering Iron

Complete soldering within 10 seconds for lead temperature not exceeding 260 °C or within 3 seconds not exceeding 350 °C

Heating by soldering iron must be done only once per lead.

14.2. Precautions for General Storage

- Avoid storage locations where devices may be exposed to moisture or direct sunlight.
- Follow the precautions printed on the packing label of the device for transportation and storage.
- Keep the storage location temperature and humidity within a range of 5 °C to 35 °C and 45 % to 75 %, respectively.
- Do not store the products in locations with poisonous gases (especially corrosive gases) or in dusty conditions.
- Store the products in locations with minimal temperature fluctuations. Rapid temperature changes during storage can cause condensation, resulting in lead oxidation or corrosion, which will deteriorate the solderability of the leads.
- When restoring devices after removal from their packing, use anti-static containers.
- Do not allow loads to be applied directly to devices while they are in storage.
- If devices have been stored for more than two years under normal storage conditions, it is recommended that you check the leads for ease of soldering prior to use.

15. Land Pattern Dimensions for Reference Only

Unit: mm

TLP351H

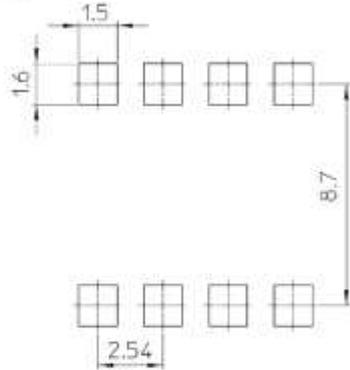


Fig. 15.1 Lead forming and taping option (LF1), (TP1), (LF5), (TP5)

TLP351HF

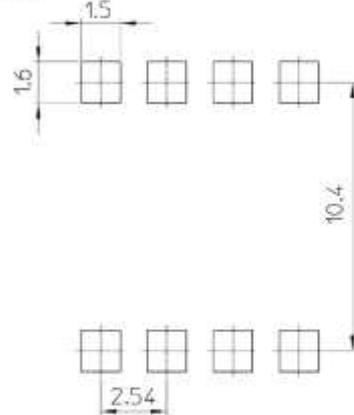
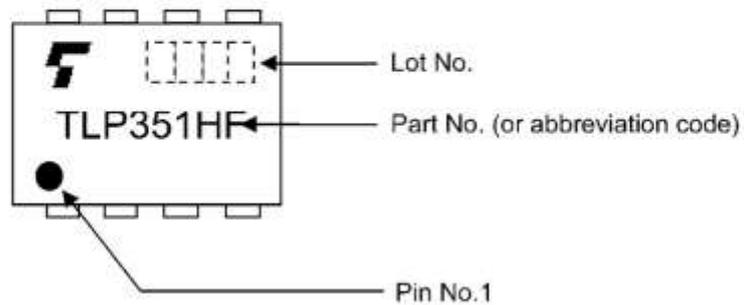
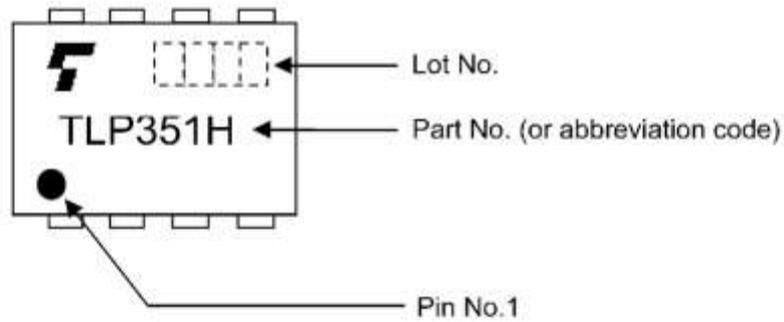


Fig. 15.2 Lead forming and taping option (LF4), (TP4)

16. Marking



17. EN60747-5-5 Option (D4) Specification

- Part number: TLP351H, TLP351HF (Note 1)
- The following part naming conventions are used for the devices that have been qualified according to option (D4) of EN60747.
 Example: TLP351H(D4-TP1, F)
 D4: EN60747 option
 TP: Tape type
 F: [[G]]/RoHS COMPATIBLE (Note 2)

Note 1: Use TOSHIBA standard type number for safety standard application.
 e.g., TLP351H(D4-TP1,F) → TLP351H

Note 2: Please contact your Toshiba sales representative for details on environmental information such as the product's RoHS compatibility.
 RoHS is the Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronics equipment.

Description		Symbol	Rating	Unit
Application classification			I-IV I-III	—
for rated mains voltage ≤ 300 Vrms for rated mains voltage ≤ 600 Vrms				
Climatic classification			40 / 125 / 21	—
Pollution degree			2	—
Maximum operating insulation voltage	TLPxxx type	V _{IORM}	890	V _{peak}
	TLPxxxF type		1140	
Input to output test voltage, Method A V _{pr} = 1.6 × V _{IORM} , type and sample test t _p = 10 s, partial discharge < 5 pC	TLPxxx type	V _{pr}	1424	V _{peak}
	TLPxxxF type		1824	
Input to output test voltage, Method B V _{pr} = 1.875 × V _{IORM} , 100 % production test t _p = 1 s, partial discharge < 5 pC	TLPxxx type	V _{pr}	1670	V _{peak}
	TLPxxxF type		2140	
Highest permissible overvoltage (transient overvoltage, t _{pr} = 60 s)		V _{TR}	8000	V _{peak}
Safety limiting values (max. permissible ratings in case of fault, also refer to thermal derating curve)				
current (input current I _F , P _{SO} = 0)		I _{SI}	100	mA
power (output or total power dissipation)		P _{SO}	800	mW
temperature		T _S	150	°C
Insulation resistance	V _{IO} = 500 V, T _a = 25 °C	R _{SI}	≥ 10 ¹²	Ω
	V _{IO} = 500 V, T _a = 100 °C		≥ 10 ¹¹	
	V _{IO} = 500 V, T _a = T _S		≥ 10 ⁹	

Fig. 17.1 EN60747 Isolation Characteristics

		 7.62 mm pitch TLPxxx type	 10.16 mm pitch TLPxxx type
Minimum creepage distance	Cr	7.0 mm	8.0 mm
Minimum clearance	Cl	7.0 mm	8.0 mm
Minimum insulation thickness	ti	0.4 mm	
Comparative tracking index	CTI	175	

Fig. 17.2 Insulation Related Specifications (Note)

Note: If a printed circuit is incorporated, the creepage distance and clearance may be reduced below this value. (e. g., at a standard distance between soldering eye centers of 7.5 mm). If this is not permissible, the user shall take suitable measures.

Note: This photocoupler is suitable for **safe electrical isolation** only within the safety limit data. Maintenance of the safety data shall be ensured by means of protective circuits.

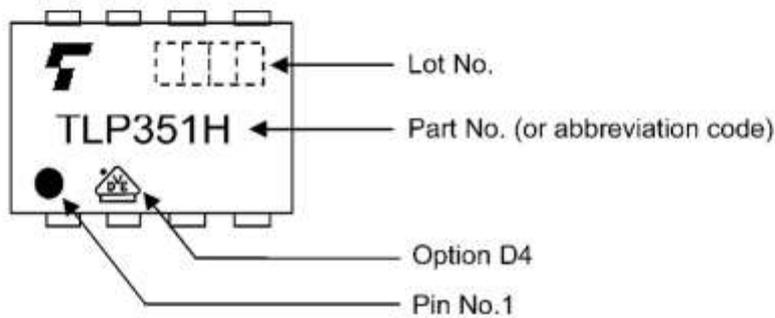


Fig. 17.3 Marking Example (Note)

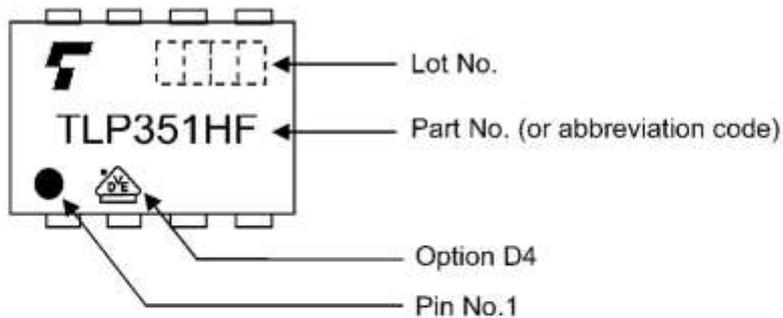


Fig. 17.4 Marking Example (Note)

Note: The above marking is applied to the photocouplers that have been qualified according to option (D4) of EN60747.

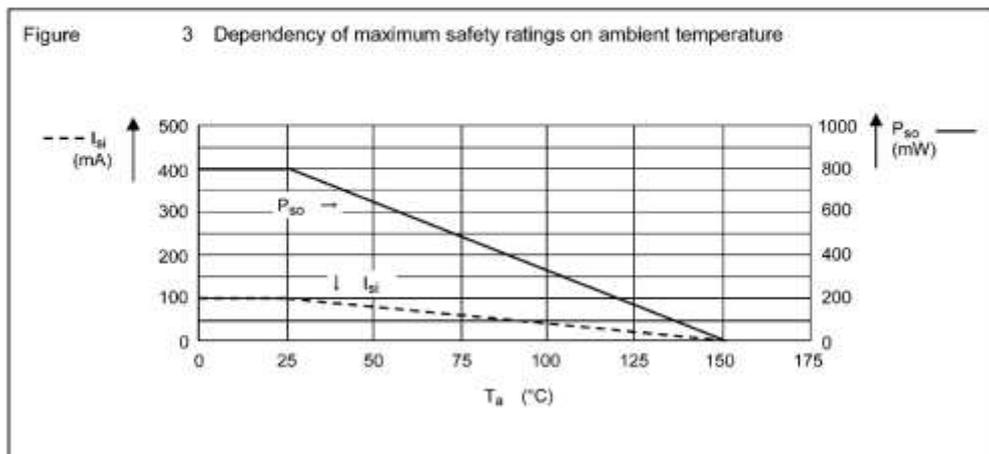
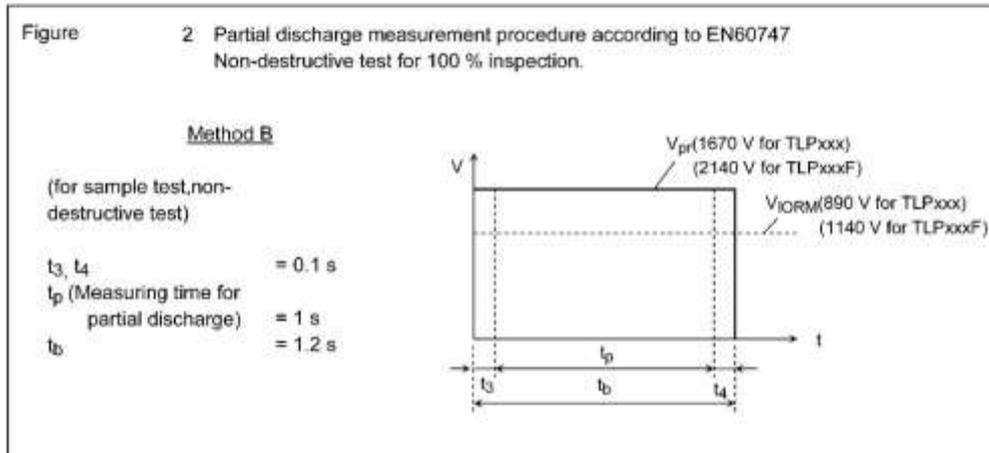
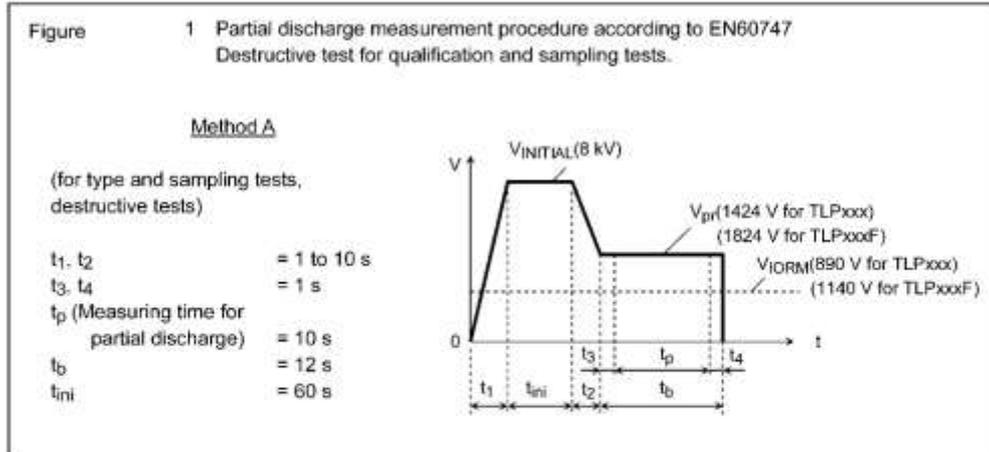


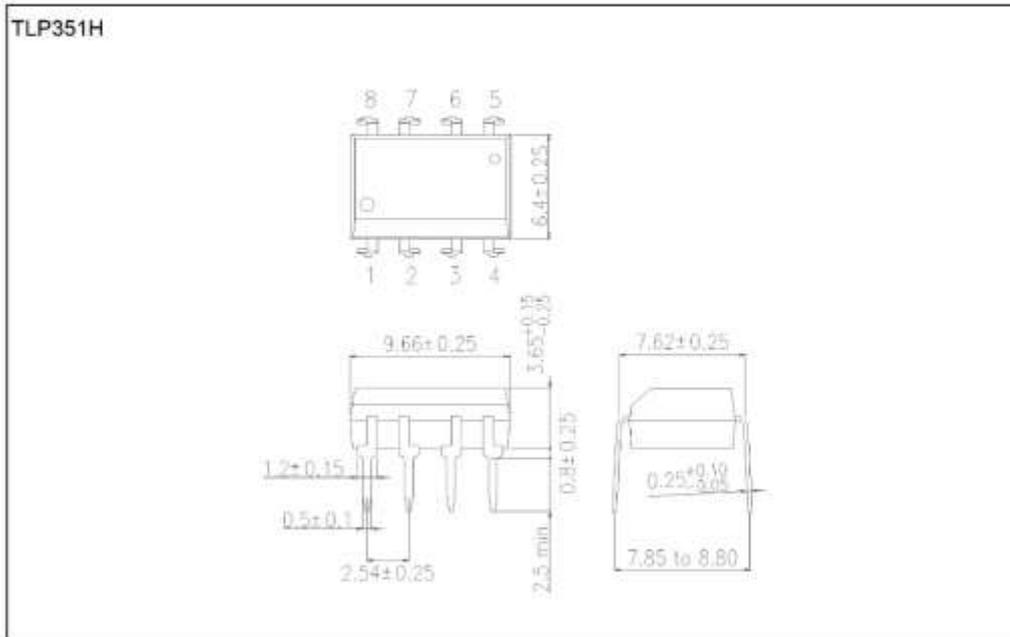
Fig. 17.5 Measurement Procedure

TOSHIBA

TLP351H, TLP351HF

Package Dimensions

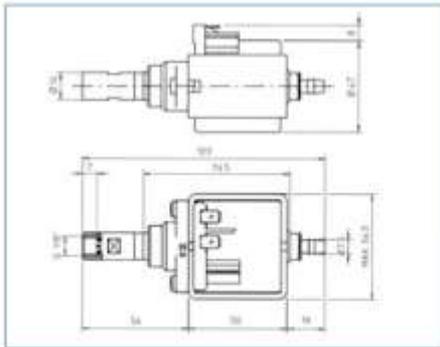
Unit: mm



Weight: 0.54 g (typ.)

Package Name(s)
TOSHIBA: 11-10C4S

4. Hoja de características ULKA



EP USCITA IN PLASTICA
PLASTIC OUTLET

EX USCITA IN OTTONE
BRASS OUTLET

Models	E4	E4R	E5	E5D	EK	EK2	E7	E77	E8	E8S	E8R	E8LT
Average Pressure (Bar)	20	9	15	15	16	15,5	7	4	2,5	2,5	2,2	2
Average Flow Rate (cc/min)	450	350	650	300	700	650	1000	900	1200	1200	650	1100
Noise [dB(A)] at p=0 Bar/20cm	58	60	64,5	60	67,2	67,2	67,8	65,8	60	73	58	55,5

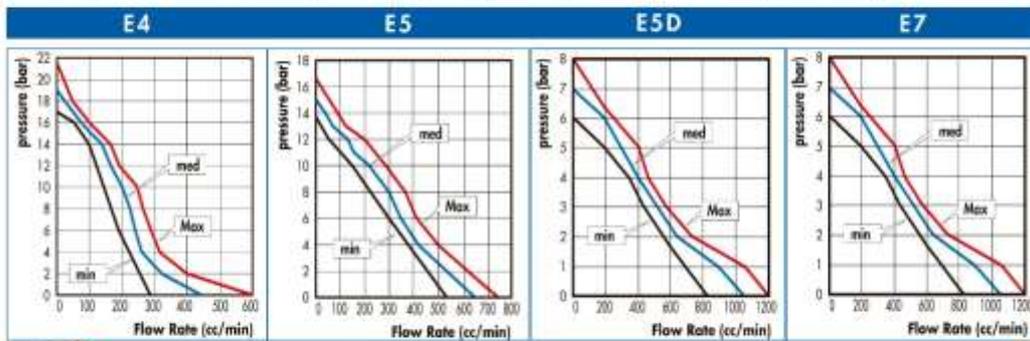
POMPA EVOLUZIONE	EVOLUTION PUMP
Corrente alternata	Alternating current
Fluido ideale: acqua	Ideal fluid: water
Autoinnescante a pressione 0	Self-priming at 0 bar
Non idonea all'utilizzo a secco tranne che per i normali interventi di innescamento	Suitable to dry-use only during priming
Diode integrato	Integrated diode
Faston 6,3 x 0,8	Electrical connections: 6,3 x 0,8
Raccordo uscita snodato	A joint making the pump independent from the hydraulic connection at the delivery is provided
Tasca per termoprotettore	Thermal cutout pocket
Produzione e collaudo automatizzati e computerizzati	Computer-based production and inspection
Test elettrici e idraulici al 100%	Full detailed electrical and hydraulic inspection

5. Anexos



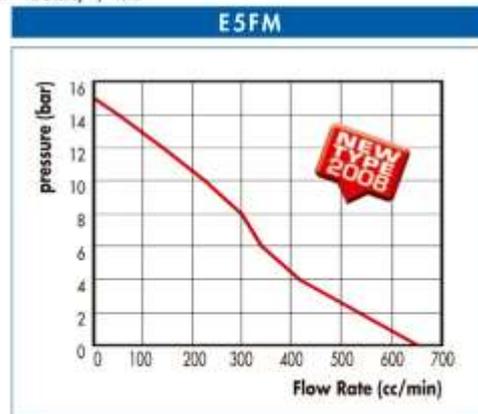
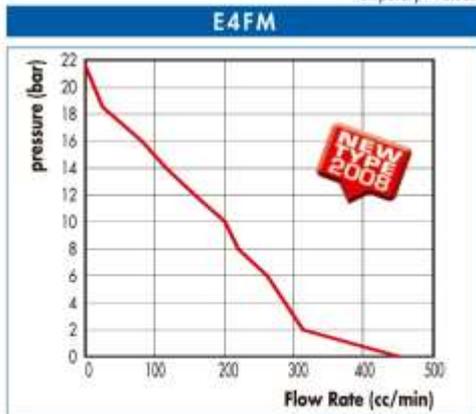
Prestazione a bobina fredda V=Vn	Cold coil performances V=Vn
Temperatura ambiente 25°C	Room temperature at 25°C
Fluido: acqua a 20°C	Fluid: water at 20°C

Models		Voltage	ON/OFF (min)	Class	W	Certificates
EP4, EP5, EP7, EP5 D	EX4, EX5, EX7, EX5 D	240V~50Hz	2/1	F	48	IMQ
		230V~50Hz	2/1	F	48	IMQ/VDE
		220V~50Hz	2/1	F	48	IMQ
EAP4, EAP5, EAP7, EAP5 D	EAX4, EAX5, EAX7, EAX5 D	220V~60Hz	1/2	A	64	c-UL
EP4, EP5, EP7, EP5 D	EX4, EX5, EX7, EX5D	200V~50-60Hz	2/1	F	48	-
		120V~60Hz	1/1	A	41	c-UL
EAP4, EAP5, EAP7, EAP5 D	EAX4, EAX5, EAX7, EAX5 D	120V~60Hz	1/1,5	A	52	c-UL
EP4, EP5, EP7, EP5 D	EX4, EX5, EX7, EX5 D	120V~60Hz	2/1	F	52	c-UL
EP4, EP5, EP7, EP5 D	EX4, EX5, EX7, EP5 D	100V~50-60Hz	2/1	F	55	-
		24V~50-60Hz	2/1	F	48	-



Models	Voltage	ON/OFF (min)	Class	W	Certificates
EP4FM-EP5FM	230V~50Hz	2/1	F	40	VDE
EP4FM-EP5FM	120V~60Hz	2/1	F	46	c-UL

Temporary - Values to be set up - Tolerancy +/- 15%



5. Hoja de características ASCO



SOLENOID VALVES

direct operated
1/8 - 1/4

NC 

U 

NO 

3/2
Series
356

FEATURES

- Compact design for the control of single-acting actuators or filling and draining cycles
- Wide range of flow and pressure ratings
- Quick disassembly of core tube for easy maintenance of internal parts
- Standard disc seal made of FPM suitable for a wide range of operating temperatures and compatible with many fluids
- Standard manual operator allows an easy installation
- AC/DC interchangeability of the solenoid without disassembly of the valve
- Compliance with UL and CSA standards (coil 4/6,9 W)
- Compact and low weight valve
- The solenoid valves satisfy all relevant EU directives

GENERAL

Differential pressure See -SPECIFICATIONS- [1 bar = 100 kPa]
 Maximum viscosity 40 cSt (mm²/s)
 Response time 5 - 10 ms

fluids (*)	temperature range (TS)	seal materials (*)
air, inert gas, water, oil	-10°C to +100°C	FPM (fluoroelastomer)

MATERIALS IN CONTACT WITH FLUID

(*) Ensure that the compatibility of the fluids in contact with the materials is verified

	Brass body	Stainless steel body
Body	Brass	AISI 316
Core tube	Stainless steel	Stainless steel
Core and plugnut	Stainless steel	Stainless steel
Springs	Stainless steel	Stainless steel
Seat	Brass	Stainless steel
Seals	FPM	FPM
Disc	FPM	FPM
Shading coil	Copper	Copper

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Coil insulation class F
 Connector Spade plug (cable Ø 6-8 mm or Ø 6-10 mm)
 Connector specification DIN 43650, 11 mm, industry standard B (type 01) or ISO 4400 / EN 175301-803, form A (type 02)
 Electrical safety IEC 335
 Electrical enclosure protection Moulded IP65 (EN 60529)
 Standard voltages DC (-): 24V - 48V
 AC (-): 24V - 48V - 115V - 230V / 50 Hz
 (Other voltages and 60 Hz on request)

prefix option	power ratings				operator ambient temperature range (TS) (°C)	replacement coil		type ⁽¹⁾
	inrush - (VA)	holding - (VA)	hot/coil = (W)	holding = (W)		- 230 V/50 Hz	= 24 V DC	
SC	12	6	4	5 / 6,9	-10 to +60	400127-197	400127-142	01
	15	7	5	4 / 5	-10 to +60	400727-117	400727-185	02

⁽¹⁾ Refer to the dimensional drawings on the following page.

SPECIFICATIONS

pipe size	orifice size	flow coefficient Kv				operating pressure differential (bar)				power coil (W)		catalogue number		options		
		2→1		3→1		min.	max. (PS)		-	=	-	=	brass	stainless steel	EPDM	
		(m ³ /h)	(l/min)	(m ³ /h)	(l/min)		air, water, oil (*)	air, water, oil (*)								
G	(mm)	(m ³ /h)	(l/min)	(m ³ /h)	(l/min)							brass	stainless steel			
NC - Normally closed																
1/8"	1,2	0,05	0,8	0,05	0,8	0	15	15	4	6,9		SCG356B001VMS	SCG356B013VMS	E	-	
	1,6	0,08	1,33	0,05	0,8	0	10	10	4	6,9		SCG356B002VMS	SCG356B014VMS	E	-	
	2,0	0,1	1,86	0,05	0,8	0	5	5	4	6,9		SCG356B003VMS	SCG356B015VMS	E	-	
	2,4	0,13	2,1	0,05	0,8	0	4	4	4	6,9		SCG356B004VMS	SCG356B016VMS	E	-	
1/4"	1,6	0,09	1,33	0,05	0,8	0	10	10	5	5		SCG356B466VMS	SCG356B434VMS	-	-	
	2,4	0,16	2,67	0,05	0,8	0	4	4	5	5		SCG356B470VMS	SCG356B436VMS	-	-	
U - Universal																
1/8"	1,8	0,06	1	0,05	0,8	0	4,5	4,5	4	6,9		SCG356B010VMS	SCG356B022VMS	E	-	
	2,0	0,08	1,33	0,05	0,8	0	3	3	4	6,9		SCG356B011VMS	SCG356B023VMS	E	-	
	2,4	0,09	1,5	0,05	0,8	0	2	2	4	6,9		SCG356B012VMS	SCG356B024VMS	E	-	
NO - Normally open																
1/8"	1,6	0,096	1,6	0,05	0,8	0	8,5	8,5	4	6,9		SCG356B006VMS	SCG356B018VMS	E	-	

⁽¹⁾ Pipe size port 3: M5 (Orifice size = 1,2 mm).

05007208-2016/1901
Availability, design and specifications are subject to change without notice. All rights reserved.

All leaflets are available on: www.asco.com

Solenoid valves (3/2) - 23

SOLENOID VALVES

direct operated
1/8 - 1/4

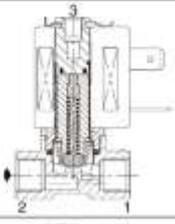
NC 

U 

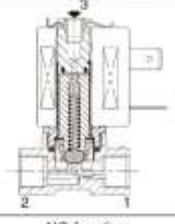
NO 

3/2
Series
356





NC function



NO function

Página 32 de 37

5. Anexos



SOLENOID VALVES SERIES 356

OPTIONS

- Valves can also be supplied with EPDM (ethylene-propylene) seals and discs. Use the appropriate optional suffix letter for identification (1/8 version only)
- Explosionproof enclosures for use in zones 1/21-2/22, categories 2-3 to ATEX Directive 2014/34/EU (see "Explosionproof solenoids" section)
- Flying leads coil, use prefix L (e.g.: LG356B001VMS) (4 W/6,9 W coil only)
- Oxygen service with seals and disc in FPM, suffix NV, example: SCG356B001NVMS
- Solenoid valves integrated on manifold, orifice sizes 1,2 - 1,6 - 2 - 2,4 mm (See V591)
- French sanitary conformity approval ACS for potable water applications, suffix FW (1/8 NC only)
- Without manual operator, on request
- Other pipe connections are available on request
- Plug with visual indication and peak voltage suppression or with cable length of 2 m (see Solenoids, Coils & Accessories section)

INSTALLATION

- The solenoid valves can be mounted in any position without affecting operation
- Solenoid valves have 2 mounting holes in body
- Pipe connection identifier is G = G (ISO 228/1)
- Installation/maintenance instructions are included with each valve

ORDERING EXAMPLES:

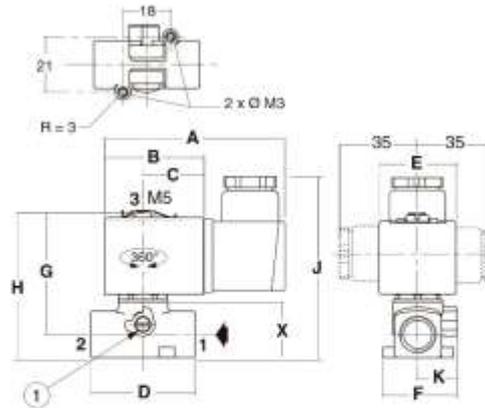
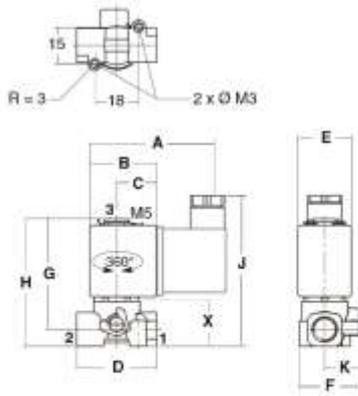
SC	G	356	B	001	VMS	230V / 50 Hz
SC	G	356	B	002	EMS	115V / 50 Hz
SC	G	356	B	014	NVMS	24V / DC
SC	G	356	B	001	FWMS	24V / DC
SC	G	356	B	456	VMS	230V / 50 Hz
SC	G	356	B	006	VMS	230V / 50 Hz

prefix: SC
 pipe thread: G
 basic number: 356 B 001
 voltage: 230V / 50 Hz
 suffix: VMS

DIMENSIONS (mm), WEIGHT (kg)

TYPE 01
 Prefix "SC" Solenoid
 Epoxy moulded
 IEC 335 / DIN 43650
 IP65
 NC/NO/U (1/8): All 1/8 catalogue numbers

TYPE 02
 Prefix "SC" Solenoid
 Epoxy moulded
 IEC 335 / ISO 4400
 IP65
 NC (1/4): SCG356B434VMS/436VMS/466VMS/470VMS/471V/472V



type	prefix option	pipe size	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	X	weight (1)	
														brass	stainless steel
01	SC	1/8	60,5	27,5	16,5	33	22	25,5	46	53	69	15	18,6	0,156	0,138
02	SC	1/4	76	38	23,3	40	29,7	28,5	48	57	79	15	23,4	0,232	0,229

(1) including coil and connector.

All leaflets are available on: www.asco.com

24 - Solenoid valves (3/2)

00007065-2016/R07
 Availability, design and specifications are subject to change without notice. All rights reserved.

6. Código completo

```

/*DONE:
 * Find out what the bits in the registers mean
 * Set up with overflow interruption
 * Find out how to change prescale
 * See the range available
 * Change from overflow to compare point
 * Make a void function that given a frequency changes the compare point
 * Added another compare point to change the duty cycle.
 * Set up external interrupt
 * On rising: save micros()
 * On rising 2nd time: save micros() - last micros.
 * On loop, use delta T to calculate
 * F=7.5 * Q (Q in L/min F in Hz) -> Q= 1/(T*7.5)
 * Remember that T is in microseconds, we need it in min.
 * Comment somewhere that micros() overflow every 70 min. Maybe a problem here?
 */
const uint8_t PIN_POS=13,PIN_WATERSENSOR=3,
PIN_VALVE1 = 9, PIN_VALVE2 = 10, PIN_VALVE3 = 11, PIN_VALVE4 = 12;
volatile unsigned long deltaT, previousT; //microseconds between each rising pulse of the
water sensor. AKA period.
volatile double A = 10.0, B = 1, C = 0, uk = 0, uk1 = 0, ek = 0, ek1 = 0, ek2 = 0;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(PIN_POS, OUTPUT);
  pinMode(PIN_WATERSENSOR, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_WATERSENSOR), interrupt_WS, RISING);
  configTimer();
  setSquareWave(50.0, 50);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  _delay_ms(500);

  Serial.print(getFlow(), DEC); //Prints the flow in L/min
  Serial.print(" flow L/min\r\n"); //Prints "L/min" and returns a new line
  //setFlow(0.6);
  //Serial.print(uk, DEC); //Prints the flow in L/min
  //Serial.print(" uk L/min\r\n"); //Prints "L/min" and returns a new line
}

```

5. Anexos

```

void configTimer() {
    // initialize Timer3
    cli();
    // disable global interrupts
    //A
    //COM3A1 , COM3A0 , COM3B1 , COM3B0 , COM3C1 , COM3C0 , WGM31 , WGM30
    //Bits 7-2: comparator modes. Bits 1-0: Waveform generation.

    TCCR3A = 0;          // set register TCCR3A to 0, normal modes. Table 17-3 and 17-2
                        //B
                        //ICNC3 , ICES3 , - , WGM33 , WGM32 , CS32 , CS31 , CS30
                        //See 17.11.6 for bits 7-3
                        //Bits 2-0 adjust prescaler

    TCCR3B = 0;          // set register TCCR3B to 0, normal modes.
                        // Adjust prescale according to Table 17-6
                        //timer resolution w/o prescaler 1/16M
                        //timer resolution w/ prescaler (1/16M) * prescaler
                        //(number of counts + 1) = (desired period) / (timer resolution)
                        //number of counts = ((1/frequency) / ((1/16M) * prescaler)) - 1
                        //
                        //Possible frecuencies with different prescales:
                        //period = (number of counts + 1) * (timer resolution)
                        //period = (number of counts + 1) * ((1/16M) * prescaler)
                        //the maximum number of counts is 2^16 - 1 = 65535
                        //Prescaler      Minimum(Hz)      Maximum(Hz)
                        //1              244,14          16000000,00
                        //8              30,52           2000000,00
                        //64             3,81            250000,00
                        //256            0,95            62500,00
                        //1024           0,24            15625,00

                        //Guessing a signal control not higher than 100 Hz, a prescaler of 256 can be used
                        // Set the timer to Clear Timer on Compare Match (CTC) Mode (Mode 4) Table 17-2
    TCCR3B |= (1 << WGM32) | (1 << CS32) | (0 << CS31) | (0 << CS30);

    // enable Timer3 compare interrupt at point A:
    //TIMSK3 = (1 << OCIE3A);
    // enable global interrupts:
    sei();
}

```

5. Anexos

```

void setFlow(double desiredFlow) {
    //PID
    //A=K+(K·Td)/To
    //B=K·To·Ki - K - 2·K·Td/To
    //C=K·Td/To
    //Where A>0, (A-C)>0, A>(2A+B), (A+B+C)>0

    //If PI then Td=0, A>0, A+B>0

    //u(k)=u(k-1)+A·e(k)+B·e(k-1)+C·e(k-2)
    //uk=uk1+A*ek+B*ek1+C*ek2 //PID
    //uk=uk1+A*ek+B*ek1 //PI

    //desiredFlow is the reference
    //so error = desiredFlow - getFlow()
    ek = desiredFlow - getFlow();

    uk = uk1 + A*ek + B*ek1; //PI

    if(uk>60) uk=60;
    else if(uk<40) uk=40;
    setSquareWave(uk, 50);
    uk1 = uk;
    ek2 = ek1;
    ek1 = ek;
}
void setSquareWave(double frequency, uint8_t dutycycle) {
    //frequency in Hz, dutycycle from 0 to 100.
    //
    //timer resolution w/o prescaler 1/16M
    //timer resolution w/ prescaler (1/16M) * prescaler
    //(number of counts + 1) = (desired period) / (timer resolution)
    //number of counts = ((1/frequency) / ((1/16M) * prescaler)) - 1
    //
    //Possible frecuencies with different prescales:
    //period = (number of counts + 1) * (timer resolution)
    //period = (number of counts + 1) * ((1/16M) * prescaler)
    //the maximum number of counts is 2^16 - 1 = 65535
    //
    // 244,14 16000000,00
    // 30, 52 2000000, 00
    // 3, 81 250000, 00
    // 0, 95 62500, 00
    // 0, 24 15625, 00
    //
    //OCR3A = ((1/frequency)/((1/16*10^6)*256))-1;
    //OCR3A = ((1/frequency)/(1.6E-5))-1;
    OCR3A = (uint16_t)((1.0 / frequency) / (1.6E-5)) - 1;
    //reset happens in point A, so point B has to be lower than point A
    if (dutycycle < 100) OCR3B = (uint16_t)(OCR3A *(dutycycle / 100.0));
    else OCR3B = OCR3A;

    //Serial.print("\n");
    //Serial.print(OCR3A);
    //Serial.print("\n");
    //Serial.print(OCR3B);
    //Serial.print("\n");

    //Activate both compare points
    TIMSK3 = (1 << OCIE3B) | (1 << OCIE3A);
}

```

5. Anexos

```
void stopTimer() {
    TIMSK3 = 0;
    digitalWrite(PIN_POS, LOW);
    //detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_WATERSENSOR));
}
double getFlow() {
    if (micros() - previousT > deltaT * 10) return 0.0; //if deltaT is 10 times the
    magnitude order than expected, no Q is flowing
    else return (1 / (1993.0 * deltaT / (1000.0 * 1000.0 * 60.0)));
}
ISR(TIMER3_COMPA_vect)
{
    //Pin will be at low level until it reaches point A
    digitalWrite(PIN_POS, HIGH);
}
ISR(TIMER3_COMPB_vect)
{
    //Pin will be at high level until it reaches point B
    digitalWrite(PIN_POS, LOW);
}
void interrupt_WS() {
    deltaT = micros()-previousT;
    previousT = micros();
}
```