

# PLATAFORMA HW/SW PARA EL DISPARO DE FUEGOS ARTIFICIALES

JESÚS MARTÍN ALONSO

MÁSTER EN INGENIERÍA INFORMÁTICA, FACULTAD DE INFORMÁTICA,  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



Trabajo Fin Máster en Ingeniería Informática

Curso 2015-2016

Convocatoria junio 2016

Calificación obtenida: 9,5

Director:

Alberto del Barrio García

## **Autorización de Difusión**

Jesús Martín Alonso  
20/06/2016

El abajo firmante, matriculado en el Máster en Ingeniería Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Máster: “Plataforma HW/SW para el disparo de fuegos artificiales”, realizado durante el curso académico 2015-2016 bajo la dirección de Alberto del Barrio García en el Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

## **Resumen**

Desde la invención de la pólvora en China en torno al siglo IX, los fuegos artificiales han evolucionado de manera notable. En la actualidad, son habituales los espectáculos de fuegos artificiales de gran magnitud, en los que la sincronización y coordinación entre los distintos artificios pirotécnicos es prácticamente perfecta. Esto es posible gracias al desarrollo de sistemas de disparo eléctricos que permiten la automatización de estos espectáculos. Sin embargo, su precio es bastante elevado.

En este trabajo se propone el desarrollo de una plataforma hardware / software capaz de realizar todas las funciones de un sistema de disparo profesional con un coste mucho más reducido. El prototipo presentado está compuesto de dos módulos, a los que se pueden conectar 24 artificios pirotécnicos a cada uno. Estos módulos son controlados por un ordenador central que ejecuta el software diseñado capaz de programar y ejecutar espectáculos pirotécnicos. La comunicación entre el ordenador central y los módulos se realiza de forma inalámbrica mediante la creación de una red WiFi.

## **Palabras clave**

Fuegos artificiales, ESP8266, WiFi, Sistema de disparo, pirotecnia.

## **Abstract**

Since the invention of powder in China around the IXth century, fireworks have notably evolved. Nowadays, large-scale fireworks shows are very common, in which synchronization and coordination among the different pyrotechnic devices is almost perfect. This is possible thanks to the development of electric firing systems, which enables the automation of these shows. However, their price is quite high.

In this paper, the development of a hardware /software distributed platform able to perform all the functionalities of a professional firing system is proposed. Besides, this has been achieved at a noticeably lower cost than that of the systems available in the market. The presented prototype is composed of two modules, each of which can deal with 24 pyrotechnic devices. These modules are controlled by a central computer that runs the developed software able to schedule and run fireworks shows. Communication between central computer and modules is done via wireless by creating a WiFi network.

## **Keywords**

Fireworks, ESP8266, WiFi, Firing System, Pyrotechnics.

# Índice de contenidos

Autorización de Difusión.....	ii
Resumen .....	iii
Palabras clave .....	iii
Abstract.....	iv
Keywords .....	iv
Índice de contenidos.....	1
Agradecimientos .....	3
1.- Introducción .....	4
1.1.- Motivación.....	4
1.2.- Objetivos.....	4
1.3.- Estructura.....	5
1.- Introduction.....	6
1.1- Motivation .....	6
1.2- Goals.....	6
1.3- Structure .....	7
2.- Conceptos básicos.....	8
2.1.- Orígenes.....	8
2.2.- Fundamentos.....	9
2.3.- Espectáculos de fuegos artificiales.....	12
2.3.1- Mascletás .....	12
2.3.2- Castillos de fuegos artificiales.....	13
2.3.3- Piromusicales.....	13
2.4.- Estado del arte .....	14
2.4.1- Inflamadores .....	14
2.4.2- Sistemas de disparo .....	15
3.- Desarrollo hardware del Sistema .....	24
3.1.- Solución propuesta .....	24
3.2.- Estados del sistema.....	26
3.3.- ESP8266 .....	28
3.4.- Circuito.....	31

3.4.1- Circuito de disparo.....	33
3.4.2- Circuito de test.....	41
3.5.- Fabricación del circuito .....	43
3.6.- Alimentación de los módulos .....	45
3.7.- Encapsulamiento exterior .....	47
4.- Desarrollo del software de control del Sistema.....	49
4.1.- Software de los slaves .....	49
4.2.- Software del máster .....	50
4.2.1- Control manual del sistema .....	52
4.2.2- Programación y control automático del sistema.....	54
4.3.- Tramas de información intercambiadas.....	57
4.3.1- Máster .....	57
4.3.2- Slave .....	57
4.4.- Configuración del router.....	57
5.- Experimentos y resultados .....	60
5.1.- Análisis del coste del producto final .....	60
5.2.- Pruebas realizadas en la fase de diseño .....	61
5.3.- Pruebas realizadas con el producto final .....	64
5.3.1- Modo manual .....	65
5.3.2- Modo automático o programado.....	66
6.- Conclusiones .....	69
6.- Conclusions .....	71
Bibliografía .....	73

## **Agradecimientos**

A mi director Alberto del Barrio García, por confiar en mí en todo momento y darme la oportunidad de desarrollar el presente trabajo sobre una de mis aficiones: la pirotecnia. Agradecer también su disponibilidad mostrada en todo momento ante cualquier duda o dificultad.

A todos mis compañeros de la Facultad, por todos los momentos, tanto buenos como difíciles, que hemos compartido juntos durante la realización del Máster.

Mi más especial agradecimiento a mi familia, cuyo apoyo, cariño y esfuerzo han sido fundamentales para la finalización de todos mis estudios.

# 1.- Introducción

## 1.1.- Motivación

En la actualidad es habitual encontrarse con espectáculos de fuegos artificiales que acompañan la celebración de cualquier tipo de evento: fiestas locales, fin de año, eventos deportivos, etc. Al contrario que en el pasado, en el que los pirotécnicos disparaban cada artificio de forma manual, actualmente la mayoría de espectáculos son disparados de forma controlada por sistemas tecnológicos que permiten disparar de forma remota todos los artificios. En el mercado se pueden encontrar gran variedad de sistemas de disparo, pero su precio es bastante elevado, llegando a costar varios miles de euros, para controlar solamente una decena de artificios. En este escenario surge la necesidad de desarrollar un sistema de disparo con las mismas funciones, pero reduciendo el coste del producto final de manera notable.

## 1.2.- Objetivos

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) tiene los siguientes objetivos:

- Diseño y construcción de una arquitectura Máster-Slave capaz de enviar e interpretar órdenes de disparo y test de forma segura.
- Diseño del hardware de los módulos encargados de recibir las órdenes de disparo y encender los artificios pirotécnicos conectados, reduciendo el coste lo máximo posible.
- Implementación de un prototipo de los módulos siguiendo el diseño previamente realizado.
- Diseñar y desarrollar un software de control que permita el diseño de espectáculos pirotécnicos, así como su ejecución manual o automática en los módulos desarrollados.

- Realizar pruebas del sistema con dispositivos de encendido de fuegos artificiales (inflamadores).

### **1.3.- Estructura**

El resto de la memoria está organizada en 5 capítulos con la estructura que se comenta a continuación.

En el capítulo 2 se realiza una introducción a los fuegos artificiales, explicando el funcionamiento de los sistemas de disparo, así como explorando algunos de los sistemas existentes en el mercado.

En el capítulo 3 se introduce la solución propuesta, dando una visión general de la arquitectura del sistema y explicando en detalle el diseño hardware propuesto.

En el capítulo 4 se desarrolla todo lo relativo al software desarrollado para el control del hardware diseñado y la creación y ejecución de espectáculos pirotécnicos.

El capítulo 5 presenta los experimentos realizados con el sistema, así como los resultados obtenidos.

El capítulo 6 muestra las principales conclusiones de este trabajo.

# 1.- Introduction

## 1.1- Motivation

Nowadays, it is very common to find fireworks shows that accompany the celebration of any kind of event: local festivities, New Year's eve, sports events, etc. Unlike the past, in which the pyrotechnicians fired every device manually, currently most shows are shot in a controlled manner thanks to technological systems that allow to remotely shoot all the devices. A wide variety of firing systems can be found in the market, but their price is quite high, ranging from hundreds to thousands of euros to just control a dozen of devices. In this scenario, the need to develop a firing system with the same functionalities arises, but significantly decreasing the cost of the final product.

## 1.2- Goals

This MSc Thesis has the following goals:

- Design and construction of a master-slave architecture capable of securely sending and interpreting testing and firing commands.
- Design of hardware modules responsible for receiving testing/firing commands and lighting connected pyrotechnic devices, reducing the cost as much as possible.
- Implementation of a prototype of the modules following the aforementioned design.
- Design and develop a control software that deals with the design of pyrotechnic shows as well as its manual or automatic execution in the developed modules.
- Testing the system with real fireworks ignition devices (e-matches)

### **1.3- Structure**

The rest of the paper is organized in 5 chapters with the following structure

In Chapter 2, an introduction of the fireworks state of the art is made, explaining the operation of firing systems, as well as exploring some of the existing systems in the market

In Chapter 3, the proposed hardware solution is described in depth, providing both an overview of the system architecture as well as the components that integrate each module.

In Chapter 4, the software developed for controlling the hardware as well as the creation and execution of fireworks shows is described.

Chapter 5 presents the experiments performed to evaluate the system and then the obtained results are discussed.

Finally, Chapter 6 gives the final remarks of this work and formulates some possible directions for future work.

## 2.- Conceptos básicos

Este capítulo realiza una introducción a los fuegos artificiales, repasando algunos de sus conceptos básicos, al ser un sector no muy conocido por el público en general.

Puesto que el objetivo de este trabajo es construir un sistema de disparo en su totalidad, se explica el funcionamiento de los sistemas de disparo profesionales, desde el encendido de un simple artificio pirotécnico, al diseño de los grandes espectáculos.

Por otra parte, se realiza un breve recorrido por algunos de los sistemas de disparo existentes en el mercado.

### 2.1.- Orígenes

Para encontrar el origen de los fuegos artificiales tenemos que remontarnos sobre el siglo VIII D.C. momento en el que se sitúa el descubrimiento de la pólvora en China. Los alquimistas chinos, en su búsqueda del elixir de la vida, realizaban numerosos brebajes que contenían todo tipo de sustancias, como aceites, miel, etc. aunque los más importantes para el futuro de los fuegos artificiales serían el azufre y el salitre. En uno de esos experimentos, la mezcla de miel, azufre y salitre, hizo que, al calentarse, provocara una gran llamarada. Por casualidad, habían dado con las proporciones necesarias de lo que se conoce como una “reacción exotérmica”, una reacción química que desprende energía. Dos de esos componentes (azufre y salitre) han sido usados desde entonces, ininterrumpidamente, en lo que es, sin duda, la herramienta más importante de los pirotécnicos: la pólvora. [1]

Los primeros fuegos artificiales, fueron desarrollados también en China a partir del siglo XI D.C., momento en el que aparecen en el mercado distintos tipos de artificios pirotécnicos, así como los primeros espectáculos de fuegos artificiales.

La llegada de los fuegos artificiales en Europa, comienza en Italia, a finales del siglo XV, principios del siglo XVI aproximadamente, quienes promovieron su uso en ocasiones públicas antes de que fueran adoptados por países vecinos como Francia y Alemania.

A partir del siglo XVII, el desarrollo de los fuegos artificiales y los grandes espectáculos en Europa, empieza a ser considerable. De esta manera, los espectáculos pirotécnicos en las

distintas cortes reales europeas eran comunes para mostrar la grandeza del rey y celebrar acontecimientos importantes. [2]

Desde entonces la evolución de los artificios pirotécnicos no ha dejado de crecer. Los nuevos avances en química, hacen posible la aparición de múltiples variedades de efectos que dan color a los espectáculos de fuegos artificiales como los conocemos hoy en día.

## 2.2.- Fundamentos

Como es bien conocido por todos, la pólvora es la base de todos los fuegos artificiales. El tipo de pólvora más conocido es la pólvora negra. Su fórmula contiene una mezcla de tres componentes: nitrato de potasio, carbón y azufre. Los porcentajes de cada componente han variado a lo largo del tiempo. La fórmula más extendida actualmente, del año 1781, contiene un 75% de nitrato de potasio, un 15% de carbón y un 10% de azufre [1].

Los distintos efectos, así como diferentes colores que se aprecian en los espectáculos pirotécnicos se consiguen variando los porcentajes de la fórmula descrita, así como variando los componentes que la componen, añadiendo nuevos componentes químicos que producen los efectos resultantes.

Otro tipo de pólvora de uso común en la pirotecnia es la llamada pólvora *flash*. Antiguamente era usada en los *flashes* de las cámaras fotográficas, de ahí su nombre. Este tipo de pólvora se compone de una mezcla de combustibles, oxidantes y otros aditivos [1]. Se caracteriza por su poder de detonación, que se acompaña de una intensa luz blanca. Estas características hacen que sea usada en artificios pirotécnicos donde se pretenda conseguir una gran detonación o un nivel sonoro elevado.

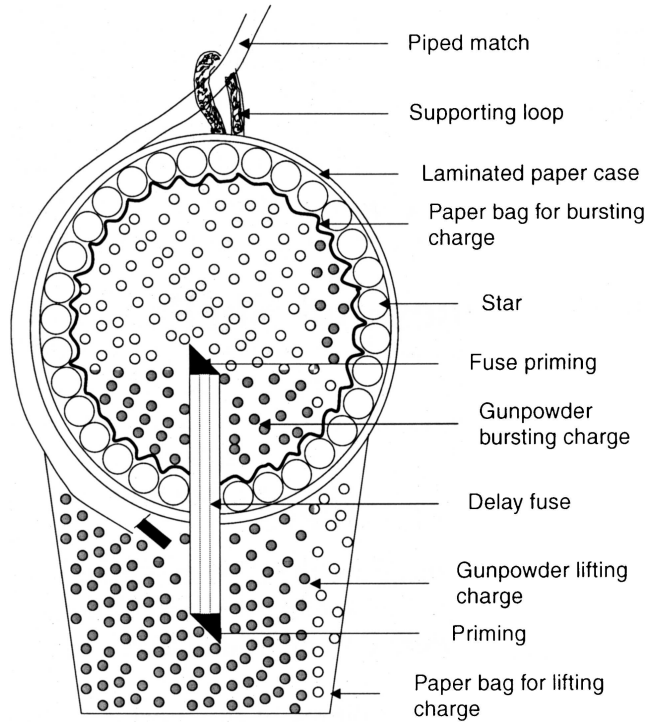
Como se puede imaginar, existen gran variedad de artificios pirotécnicos, como cohetes, fuentes... Sin embargo, los artificios pirotécnicos más usados en los medianos y grandes espectáculos pirotécnicos son las llamadas carcasas (“Shells” en inglés), cuyo efecto se puede apreciar en la Figura 1.



**FIGURA 1 .- Imagen de una carcasa ya explotada en el cielo.**

Como se puede apreciar en la Figura 2, la carcasa se divide en dos partes. Por un lado, la parte inferior contiene la pólvora que hará impulsar el artificio hasta la altura adecuada, llamada pólvora de impulso. La parte superior, por su parte contiene la carga explosiva necesaria para hacer estallar la carcasa y encender las distintas bolas de pólvora que generaran el efecto deseado.

Ambas partes están conectadas a través de una mecha, con una duración estudiada, para que la carcasa realice explosión cuando haya alcanzado la altura máxima.



**FIGURA 2.- Esquema de una carcasa - [1]**

Aunque el esquema de construcción es similar para la mayoría de las carcasas, estas varían en el diseño de la parte superior, responsable de generar el efecto final. En los espectáculos se combinan distintos tipos de carcasas con diferentes efectos y con diferentes tamaños, que normalmente van, desde 50mm hasta unos 300 mm de diámetro.

Para ser disparadas, las carcasas se introducen en morteros, tubos hechos de aluminio o fibra de vidrio, cuya apariencia se puede apreciar en la Figura 3. Los morteros tienen el diámetro justo para introducir la carcasa. Al encender la carcasa, los gases generados por la pólvora de impulso hacen que esta salga disparada hacia el cielo.



**FIGURA 3.- Fotografía de baterías de morteros de 250 mm de diámetros preparados para un espectáculo pirotécnico [3]**

### **2.3.- Espectáculos de fuegos artificiales**

En la actualidad, podemos encontrarnos con distintos tipos de espectáculos pirotécnicos o de fuegos artificiales, que podemos resumir en los tipos que se mencionan en las subsecciones siguientes.

#### **2.3.1- Mascletás**

La mascletá es un espectáculo pirotécnico, con más énfasis en el sonido que en lo visual, que se realiza normalmente durante el día.

Las mascletás consisten en una sucesión de truenos (petardos de gran potencia), combinados frecuentemente con efectos aéreos. El nivel de intensidad sonora, en una mascletá siempre va en aumento, hasta llegar al denominado *terremoto*, momento en el que se disparan

una gran cantidad de truenos en un tiempo muy reducido. La mascletá termina con la descarga de una gran cantidad de truenos aéreos de gran potencia.

El termino mascletá tienen su origen en la palabra Valencia *Masclét*. Las mascletás son típicas de la Comunidad Valenciana. En especial, son particularmente conocidas las disparadas en la Plaza del ayuntamiento de Valencia del 1 al 19 de marzo, con motivo de la celebración de la fiesta de las Fallas.

En la actualidad, son habituales la realización de rápidas secuencias de truenos y otros artefactos, consiguiendo ritmos musicales muy vistosos.

### **2.3.2- Castillos de fuegos artificiales**

Los castillos de fuegos artificiales son los espectáculos pirotécnicos más conocidos y habituales. Son espectáculos nocturnos, en los que se combinan gran variedad de artificios pirotécnicos con el fin de crear llamativos y bellos efectos en el cielo.

En este tipo de espectáculos, la imaginación y la creatividad del pirotécnico a la hora de diseñar los espectáculos es clave para conseguir las fachadas más impresionantes durante la ejecución del castillo.

El pirotécnico debe tener en cuenta la distancia y la posición a la que se situará el público, para poder elegir con acierto los artificios pirotécnicos, tanto por seguridad como por motivos estéticos.

La duración de este tipo de espectáculos suele estar entre los 10 y 30 minutos. La calidad y la magnitud del espectáculo viene ligada al presupuesto económico del espectáculo, que puede ir desde unos pocos miles de euros hasta más de 100.000€.

### **2.3.3- Piromusicales**

Los piromusicales son espectáculos pirotécnicos que combinan sonido y fuegos artificiales. En ellos los pirotécnicos tratan de conseguir que los fuegos artificiales estén completamente sincronizados con el ritmo de la música.

La necesidad de sincronizar el lanzamiento de los artificios pirotécnicos con el ritmo de la música, ha hecho que la aparición de este tipo de espectáculos sea relativamente reciente, al no existir la tecnología necesaria que lo permitiera.

Puesto que en numerosas ocasiones la explosión de los fuegos artificiales es muy sonora, se requiere de un equipo de sonido muy potente, para que la música pueda escucharse con claridad.

En los piromusicales los pirotécnicos suelen combinar distintas piezas musicales y su duración no suele ser muy elevada, siendo normalmente inferior a los 20 minutos.

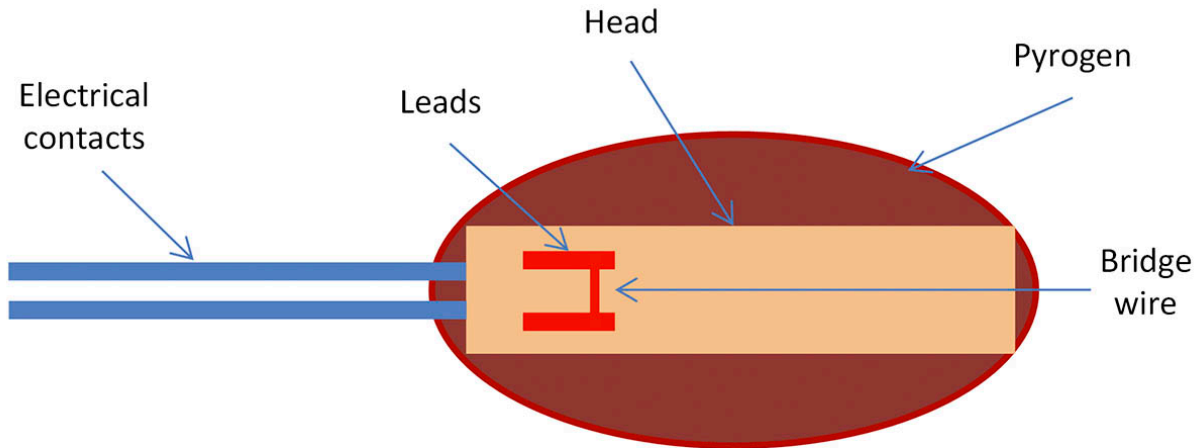
## **2.4.- Estado del arte**

A continuación, se describen los detalles de la tecnología empleada en el escenario de la pirotécnica.

### **2.4.1- Inflamadores**

En estos nuevos sistemas, los encargados de encender cada artificio pirotécnico son los llamados inflamadores (*electric matches o e-matches*). Estos se componen de dos cables que terminan en la cabeza del inflamador. En ella, un hilo conductor de un diámetro realmente pequeño une los dos cables y está recubierta de una mezcla inflamable.

El principio de funcionamiento de los inflamadores es sencillo. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica por el inflamador el pequeño hilo conductor adquiere gran temperatura, lo que provoca que la mezcla inflamable se encienda, causando una intensa llamarada similar al encendido de una cerilla tradicional.



**FIGURA 4.- Esquema de la construcción de un inflamador**

La corriente necesaria para encender un inflamador varía en función de cada fabricante, que proporciona al pirotécnico las especificaciones. Normalmente, se necesita un mínimo de 0.4 amperios, para que se disparen, aunque se recomienda que la batería/sistema utilizado pueda proporcionar 1 amperio para asegurarse del encendido. Cuando un inflamador es disparado, queda inutilizado. Es decir, no se pueden reutilizar de una vez para otra.

El precio de cada unidad varía, de la misma forma que las especificaciones. De esta manera, en el mercado se pueden encontrar inflamadores con un precio por unidad de 0.20€ hasta inflamadores con un precio superior a un euro. Estos últimos proporcionan una fiabilidad superior, lo que hace que sean usados en los grandes espectáculos en los que los pirotécnicos tratan de reducir la posibilidad de fallo al mínimo.

#### **2.4.2- Sistemas de disparo**

Los sistemas de disparo son aquellos sistemas encargados de accionar de manera eléctrica los inflamadores, y por lo tanto, los artificios pirotécnicos.

En la definición anterior se engloban gran variedad de sistemas muy distintos entre sí. Las principales características que diferencian a los sistemas de disparo se muestran en la Tabla 1:

Característica	Subtipos	Descripción
Posibilidad de Test	Sin posibilidad	No permite conocer el estado de las salidas
	En módulo esclavo	Permite conocer el estado de las salidas en los módulos donde se conectan los inflamadores
	En módulo máster	Permite conocer el estado de las salidas en el módulo desde donde se dan las órdenes de disparo
Comunicación	Directa	La orden se ejecuta de manera directa, a través de un botón.
	Cableada	La orden se transmite por cable desde un módulo máster a un módulo esclavo, que interpreta la orden y acciona la salida correspondiente
	Inalámbrica	La orden se transmite de forma inalámbrica desde un módulo máster a un módulo esclavo, que interpreta la orden y acciona la salida correspondiente
Posibilidad de programación	No programables	No permiten ser programadas
	Secuenciales	Permiten realizar secuencias, activando cada salida en un intervalo fijado
	Línea de tiempo	Permite programar de manera totalmente libre la "línea de tiempo" del espectáculo

Característica	Subtipos	Descripción
Precio		El precio es, en ocasiones, un factor diferenciador entre los distintos sistemas de disparo

**TABLA 1.- Principales características diferenciadoras entre los distintos tipos de sistemas de disparo**

A modo de resumen, podemos agrupar los sistemas de disparo en dos categorías:

### Sistemas de disparo simples o manuales

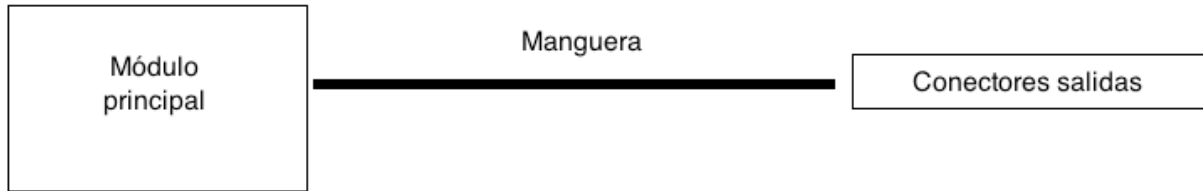
Permiten al pirotécnico accionar cada salida manualmente mediante la pulsación de un botón asociado a dicha salida.

Dentro de esta modalidad de sistemas de disparo encontramos distintos tipos. Uno de los más comunes está formado por un simple módulo que contiene, en la misma caja, los conectores de las salidas y los botones asociados a dichas salidas. Un ejemplo de este tipo se puede apreciar en la Figura 5. De esta manera, la forma de comunicación es directa, y/o en algunos casos, inalámbrica, mediante el uso de un mando a distancia.

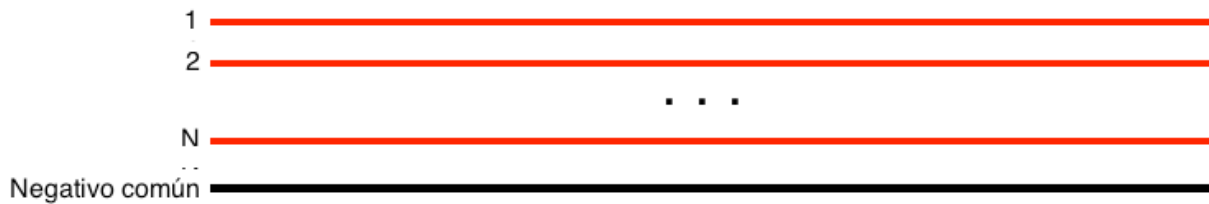


**FIGURA 5.- Sistema de disparo Peroky M-10A - startecnia.com**

Algunos sistemas ofrecen mangueras de cable, que conectan el módulo principal con otras cajas en las que se encuentran solo las salidas, tal y como muestra la Figura 6. Estas mangueras contienen internamente un cable o hilo por cada salida y suelen compartir un negativo común, como se puede apreciar en la Figura 7.



**FIGURA 6 .- Esquema de conexión entre el módulo principal y los conectores de las salidas mediante el uso de mangueras.**



**FIGURA 7 .- Esquema del interior de una manguera.**

Otro tipo dentro de esta modularidad son sistemas que constan de distintos módulos con un número de salidas limitado y que son controlados mediante un simple mando a distancia o un módulo central. En la Figura 8 podemos observar un claro ejemplo. La mayoría de ellos ofrece la funcionalidad de test en cada módulo, reflejando el estado de cada salida mediante un led situado en cada una de ellas. Sin embargo, no es posible conocer el estado en el mando o módulo central.



**FIGURA 8 .- Visión general del sistema de disparo *SparkFire***

La principal ventaja de estos tipos de sistemas, es su reducido coste. Podemos encontrarlos desde menos de 50€ para unas pocas salidas (<10) hasta 300-500€. Además, la fiabilidad de estos módulos es bastante elevada, ya que la comunicación es directa.

Como se explica anteriormente, algunos de estos equipos permiten el control de los módulos mediante comunicación inalámbrica. Sin embargo, este tipo de comunicación se realiza con módulos de radio en la frecuencia de 433 Mhz, una frecuencia común en juguetes como coches radio control y que además no ofrece ningún tipo de seguridad o encriptación.

De esta manera, este tipo de sistemas no debería ser usado por ninguna empresa pirotécnica profesional, limitando su uso al uso recreativo por aficionados o entusiastas.

Ocasionalmente, este tipo de sistemas también permite programar una secuencia con un intervalo fijo (ej. 0.1 segundos) y disparar todas las salidas del módulo siguiendo esa secuencia pulsando un botón habilitado al respecto.

### **Sistemas de disparo programables.**

Entendemos por sistemas de disparo programables, aquellos que permiten al pirotécnico la programación total de las salidas de los módulos que componen el sistema, de tal manera, que se pueda ejecutar de manera totalmente automatizada los espectáculos pirotécnicos. Además, como es lógico, permiten la activación manual de las salidas.

Normalmente, estos sistemas constan de un módulo central o *máster*, que es el que contiene la programación o secuencia del espectáculo, y se encarga de enviar las órdenes de disparo pertinentes al resto de módulos o *slaves*.

La comunicación entre el *máster* y los *slaves* se realiza de manera cableada o de manera inalámbrica, dependiendo del sistema. Los sistemas que emplean comunicación cableada, suelen comunicarse al módulo principal y luego la comunicación se va haciendo entre *slaves*. Su principal ventaja, radica, como se ha explicado antes, en la fiabilidad y seguridad.

Los sistemas que emplean comunicación inalámbrica suelen confiar en la banda de 2.4 Ghz. Su principal ventaja es la facilidad de despliegue de los espectáculos, así como el ahorro en gasto de metros de cable.

Por su parte la programación de la línea de tiempo del espectáculo se realiza, normalmente, mediante un software que proporciona el fabricante o programas profesionales que permiten la creación visual de espectáculos, así como la exportación de los mismos para múltiples sistemas de disparo. La carga del programa en el módulo principal o *máster* se realiza de manera distinta según el sistema de disparo, aunque esta suele realizarse mediante USB o mediante tarjetas de memoria.

Todos los sistemas programados permiten la realización de test. Además, suelen permitir conocer el estado de cada salida en el módulo principal o *máster*, de tal manera que el pirotécnico tiene toda la información en un mismo punto.

A continuación, se exponen de manera ilustrativa dos de los sistemas de disparo profesionales más usados (uno de ellos inalámbrico y otro cableado).

## **Pyrodigit**

Sistema de disparo profesional, fabricado por la empresa italiana *PyroDigit*, con más de 30 años de experiencia en el campo de la electrónica aplicada a la pirotecnia [4].

La principal característica de este sistema de disparo es su arquitectura. Esta se basa en un módulo *máster* que controla una serie de unidades, llamadas AFC, que a su vez controlan los módulos finales a los que se conectan los artificios pirotécnicos (AFS). De esta manera, el sistema consta de dos redes de comunicación. La principal conecta el *máster* con las AFC. La

secundaria conecta las AFS con los módulos finales AFC. En la Figura 9, se pueden observar los componentes del sistema.



**FIGURA 9.- Vista general del sistema pyrodigit: En la parte superior izquierda, unidad máster, en la parte superior derecha unidad AFC, y en la parte inferior, unidad AFS (conectores)**

La comunicación en ambas redes se realiza de forma cableada mediante la interfaz RS-485. También permiten la posibilidad de sustituir el cableado de la red principal por un módem de radio.

Algunas de otras características destacables de este sistema son las siguientes:

- Tasa de disparo: 1/100 s.
- Función de test.

- Posibilidad de conectar un sistema de sonido para la realización de piromusicales.

El precio del sistema, en su configuración mínima inicial tiene un precio superior a los 2000€, ofreciendo 30 salidas repartidas en 2 módulos (15 salidas por módulo).

## Cobra

El sistema de disparo Cobra, es un sistema de disparo profesional, desarrollado por *Cobra Firing Systems*, compañía norteamericana fundada en el año 2009 [5].

Las principales características por las que destaca este sistema es por su razonable relación calidad/precio, así como por ser un sistema totalmente inalámbrico. Como se puede ver en la Figura 10, el sistema se basa en un pequeño módulo máster, encargado de enviar las órdenes de manera inalámbrica a los módulos esclavos (18 salidas/módulo)

Como se indica, la comunicación se realiza de forma inalámbrica. En particular, utiliza la frecuencia 2.4Ghz mediante el protocolo IEEE 802.15.4.



**FIGURA 10 .-** Vista general del sistema cobra. A la izquierda módulo "máster" y a la derecha módulo *slave*.

En cuanto a algunas de sus características que se pueden destacar son:

- Gran alcance inalámbrico: > 500 metros.
- Función de test.
- Posibilidad de conectar un sistema de sonido para la realización de piromusicales.

En cuanto al precio del sistema, en su configuración básica con programación desde el ordenador, asciende a \$650 para 18 salidas. A dicho precio, hay que sumarle \$300 por cada módulo extra de 18 salidas que se quiera añadir.

## 3.- Desarrollo hardware del Sistema

En este capítulo se explica en profundidad todo lo relativo al diseño y desarrollo hardware del sistema. Para ello, en primer lugar, se expone la arquitectura de la solución propuesta.

En un segundo lugar, se detalla la máquina de estados que define el comportamiento de cada módulo

En un tercer lugar, se expone el chip elegido como controlador de cada módulo, mencionando sus características principales y su funcionamiento general.

A continuación, se detalla el circuito diseñado, explicando la elección y la utilidad de cada componente en la solución propuesta.

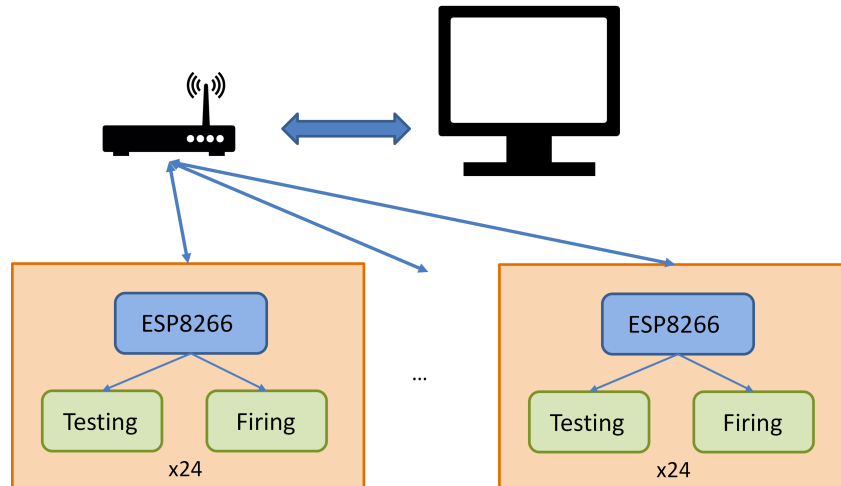
Finalmente, se explica cómo se proporciona la energía necesaria a los módulos, así como los materiales y componentes utilizados para su encapsulamiento.

### 3.1.- Solución propuesta

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema de disparo completo, que incluya tanto software como hardware. Las principales características de la solución propuesta son las siguientes:

- **Bajo coste.** La mayoría de los sistemas de disparo disponibles en el mercado constan de un precio bastante elevado, por lo que en este proyecto se propone una solución económica.
- **Comunicación inalámbrica.** El sistema propuesto realiza la comunicación entre los módulos y el ordenador principal de manera inalámbrica, con el fin de facilitar el uso del sistema y el despliegue de los espectáculos.
- **Disparo.** El sistema permitirá accionar de manera remota las distintas salidas del sistema.

- **Test de continuidad.** El sistema será capaz de indicar el estado de los inflamadores conectados en el sistema, con el fin de evitar malas conexiones que resulten en fallos en el disparo del espectáculo.
- **Seguridad.** El sistema propuesto proporcionará las medidas de seguridad necesarias, para que la comunicación entre los distintos componentes se haga de manera segura.



**FIGURA 11 .- Vista general de la arquitectura de la solución propuesta [1]**

En la Figura 11 se puede apreciar un esquema general de la plataforma propuesta. El sistema se compone de un ordenador central, un router, así como varios módulos. Los módulos se conectan al router mediante conexión WiFi, mientras que el ordenador central se conecta vía *Ethernet*. De esta manera, el ordenador central es el responsable de enviar las órdenes pertinentes a los módulos, a través de la red inalámbrica creada por el router. Los módulos, por su parte reciben las órdenes, las interpretan y ejecutan según corresponda.

Cada módulo se compone de un circuito capaz de disparar y testear 24 salidas. El corazón de este bloque es un chip WiFi ESP8266 [7]. Este chip es el encargado de comunicarse con el *máster*, recibiendo y ejecutando las órdenes y enviando la información pertinente.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento de la solución propuesta, se fabricaron dos slaves de 24 salidas, sobre los cuales se ejecutarían las pruebas pertinentes.

### 3.2.- Estados del sistema

En la Figura 12 se muestra el diagrama de estados que resume el funcionamiento de cada slave.

El primer estado al que transita el módulo al encenderse, es el de conexión con la red WiFi del Sistema creada por el router. En este estado permanece hasta que consigue conectarse y obtener la dirección IP del módulo.

Una vez conectado, el módulo inicia un servidor en el puerto 80 y espera la conexión del máster. Cuando esto ocurre, se transita al siguiente estado (“Esperando órdenes”), estado en el que el módulo espera recibir las órdenes del máster, interpretarlas y ejecutarlas. Si estando en este estado, el máster se desconecta, se volvería al estado anterior.

Además, si en algún momento se pierde la conexión con la red WiFi, se regresaría al primer estado, intentando establecer conexión de nuevo.

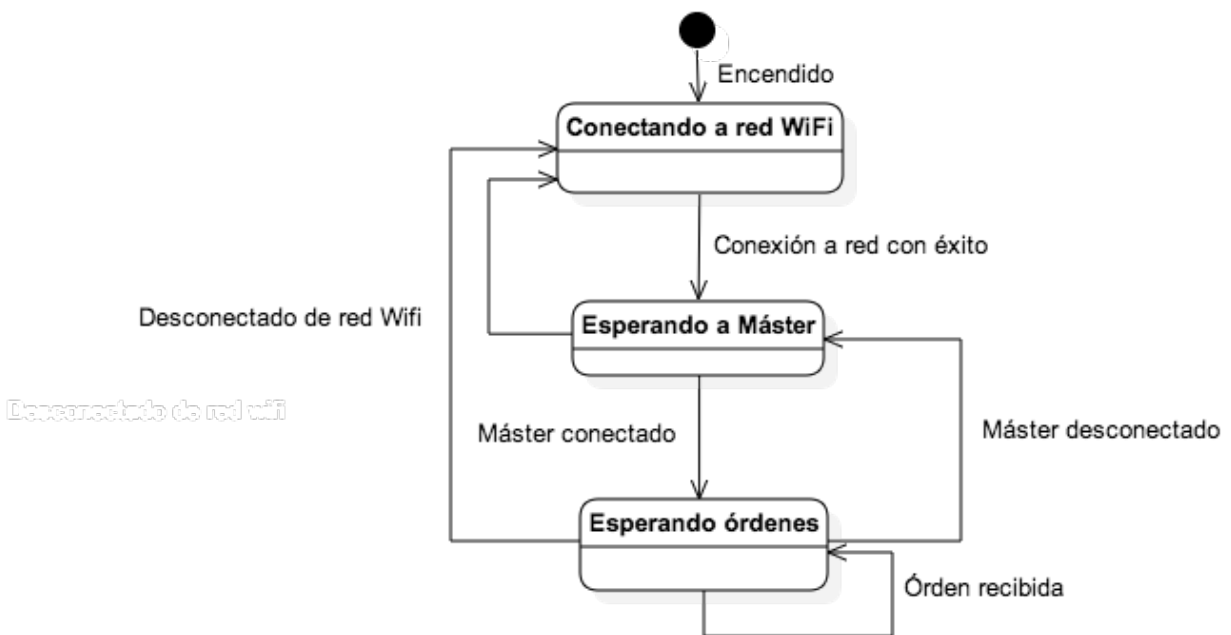


FIGURA 12 .- Máquina de estados de los slaves

En la Figura 13 se muestra el diagrama de estados que resume el funcionamiento del máster.

El comportamiento varía en función del modo que elija el pirotécnico: manual o automático. En el modo manual el pirotécnico se encarga personalmente de añadir los slaves al software, para posteriormente conectar con ellos y finalmente enviarles órdenes. Por otra parte, en el modo automático el pirotécnico procede a cargar un programa previamente diseñado con la secuencia de órdenes a ejecutar. Una vez realizado este paso, procederá a conectar con los módulos para finalmente indicar al software que ejecute el programa.

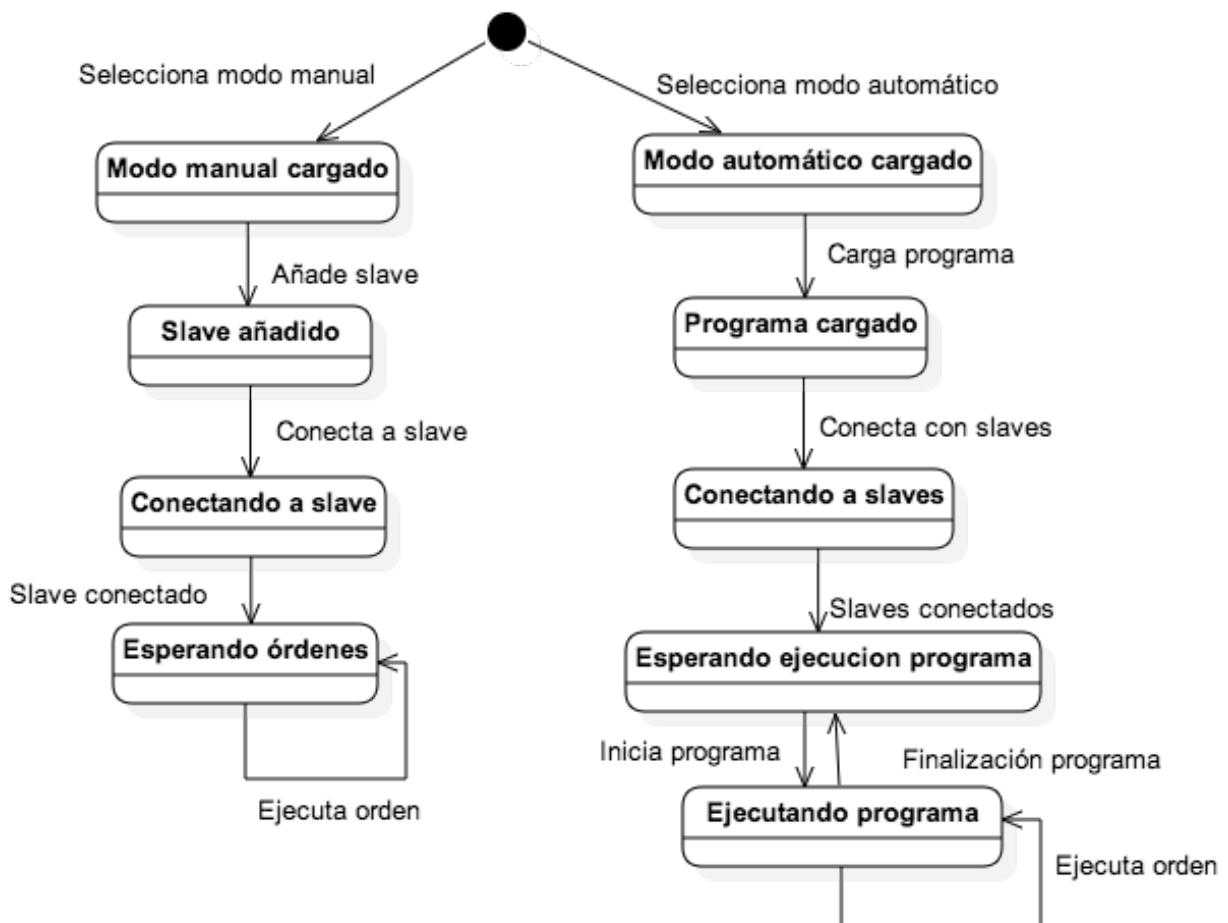


FIGURA 13 .- Máquina de estados del máster

### 3.3.- ESP8266

Uno de los elementos clave en el sistema, y más en particular en los módulos, es el microcontrolador.

En la primera fase del proyecto, se decidió utilizar como controlador de cada slave, una placa Arduino [8] y módulos xBee [9] conectados a la misma, que proporcionarían conectividad inalámbrica a cada módulo. Sin embargo, el coste de los módulos xBee es bastante elevado (>25€), algo que encarecería el coste final de los módulos, por lo que se descartó su elección. Además, el alcance de la versión básica de estos módulos es bastante limitado.

En consecuencia, se realizó una investigación con el fin de encontrar un módulo inalámbrico que fuera compatible con Arduino y que cumpliera con los siguientes requisitos:

- **Seguridad.** Al ser comunicación inalámbrica, es necesario que el módulo proporcione algún tipo de medida de seguridad, que evite posibles ataques maliciosos.
- **Alcance.** El alcance debe ser lo suficientemente elevado (> 50m) para que el pirotécnico pueda situarse a una distancia segura de los módulos, y por lo tanto, de los artificios pirotécnicos
- **Precio.** El requisito más importante que debe cumplir el módulo es que su coste no sea muy elevado, con el fin de no encarecer el producto final.



**FIGURA 14 .- Vista de varios (5) chips ESP8266**

Finalmente, se decidió utilizar el chip WIFI ES8266, cuyo aspecto exterior se puede observar en la Figura 14, Este *System on Chip (SoC)* presenta las siguientes características principales:

- Pila TCP integrada. Soporta el estándar IEEE802.11 b/g/n.
- Precio muy reducido: ~5\$.
- Hasta 17 pines GPIO, aunque las placas de desarrollo existentes en el mercado proporcionan hasta un máximo de 11 programables.
- Microcontrolador Tensilica L106 de 32 bit con frecuencia de 80MHz.
- Programable en C.

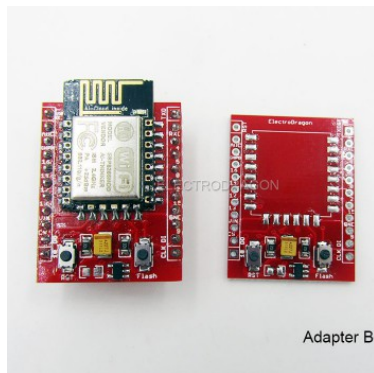
Este chip fue diseñado y desarrollado por la empresa *Espressif Systems*, afincada en Shanghai (China), y su lanzamiento se produjo en el año 2014. En el mercado existe una gran variedad de placas de desarrollo que integran este chip, antena y los pines de salida necesarios para programarlo. Una de las placas de desarrollo más sofisticadas es la ESP-12F, que incluye 11 pines GPIO programables (incluyendo puerto serie), así como una antena integrada en la placa,

tal y como se puede apreciar en la Figura 15, así como 4MB de Flash para poder programarla [10].



**FIGURA 15 .- Fotografía del módulo ESP-12F**

Esta fue precisamente la placa elegida como controlador de los módulos. Puesto que la placa es SMD (montaje superficial) se adquirió una placa adaptadora, mostrada en la Figura 16, con el fin de facilitar la conexión de los pines y la programación de la placa.



**FIGURA 16 .- Fotografía del adaptador SMD para el módulo ESP-12F**

El chip ESP8266 ofrece la posibilidad de ser controlado usando comandos AT a través del puerto serie, así como ser programada directamente en C, cargando el programa a través del puerto serie.

En un primer momento, se pensó en utilizar la placa ESP8266, conectada a la placa Arduino, que sería la encargada de controlarla. Sin embargo, tras realizar las pertinentes investigaciones, se decidió utilizar la placa ESP8266 de manera aislada.

La razón de esta decisión se encuentra en que se encontró un paquete para el IDE de Arduino [11], que permite desarrollar *sketches* (programas) usando las librerías y funciones Arduino y subir el código a la placa ESP8266, de tal manera que pueda funcionar como si se tratara de una placa Arduino. Esto, facilita mucho la labor de programación, ya que Arduino es un lenguaje muy fácil de utilizar (basado en C/C++) y con gran cantidad de documentación en la red.

### **3.4.- Circuito**

El circuito diseñado se compone de dos partes:

- El circuito de disparo, encargado de proporcionar la corriente necesaria a cada salida para encender el inflamador conectado a ella.
- El circuito de test, encargado de comprobar si los inflamadores conectados a las salidas están correctamente conectados y, por lo tanto, son capaces de ser encendidos

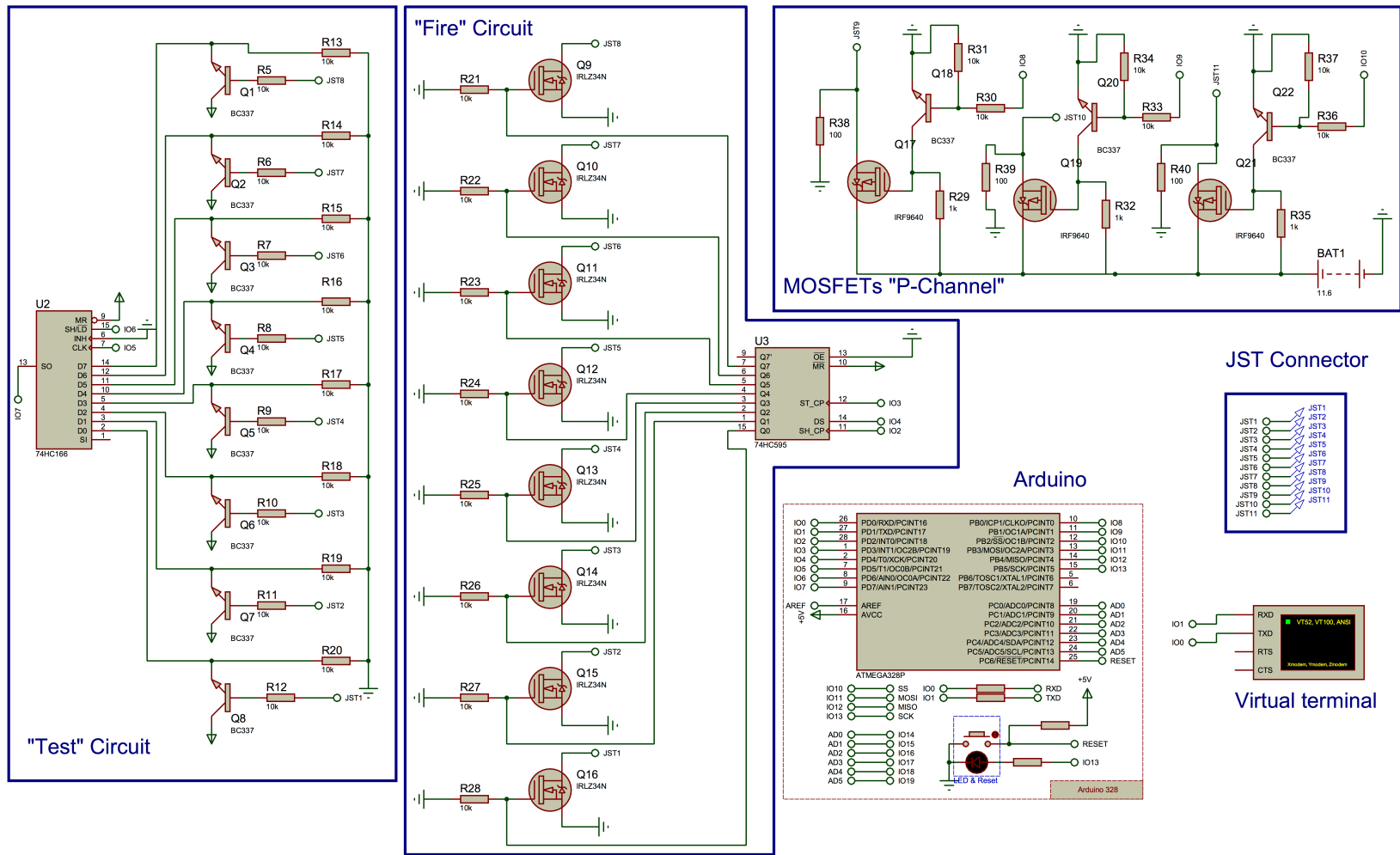


FIGURA 17.- Esquemático del circuito diseñado. [6]

En la Figura 17 se puede ver una vista general del esquemático del circuito, diseñado con el software *Proteus* [12]. *Proteus* es una suite de utilidades software, que permite tanto el diseño de *esquemáticos* hardware como de la PCBs asociadas a dichos circuitos. Su principal característica es que permite la simulación en tiempo real de los diseños, permitiendo interactuar con ellos y ser probados antes de proceder a su fabricación. De esta manera, se incluyó en el esquemático una placa Arduino que simulara el comportamiento del chip ESP8266 finalmente utilizado, así como un *Virtual terminal* que hiciera lo mismo para el *máster* responsable de mandar las órdenes al módulo.

### 3.4.1- Circuito de disparo

Como se ha comentado anteriormente, el circuito de disparo es el encargado de encender los inflamadores. Así, los componentes que integran el circuito deben cumplir una serie de requisitos que se exponen a continuación:

- **Velocidad de conmutación.** Los componentes deben activarse en el menor tiempo posible para conseguir la mayor precisión posible en el disparo de los fuegos artificiales.
- **Intensidad de corriente.** Como se indica en la sección 2.4.1, para disparar un inflamador con seguridad se requiere de una corriente superior a un amperio. De esta manera, los componentes deben poder soportar grandes intensidades.
- **Fiabilidad.** Los componentes del circuito deben ser robustos y con una vida útil lo más extensa posible.
- **Precio.** Puesto que una de las características principales de la solución propuesta en este trabajo es el bajo coste del producto final, los componentes deben ser lo más baratos posibles.

De esta forma, durante la fase de diseño del circuito se realizó una investigación en profundidad sobre los distintos componentes que podían cumplir los requisitos previamente expuestos. Los distintos componentes que se barajaron como candidatos fueron los siguientes:

- **Transistores bipolares NPN.** Son muy económicos, pero, no son capaces de soportar intensidades elevadas ( $< 1$  amp).
- **Relés.** Son componentes electromagnéticos que permiten controlar abrir/cerrar un circuito externo aplicándole una determinada tensión. Como ventajas se encuentran su facilidad de uso y la gran corriente que pueden soportar. Sin embargo, al ser componentes mecánicos el tiempo de conmutación es bastante elevado que los transistores.
- **Transistores MOSFET.** Permiten operar con tensiones e intensidades muy elevadas. Además, su tiempo de conmutación es muy reducido.

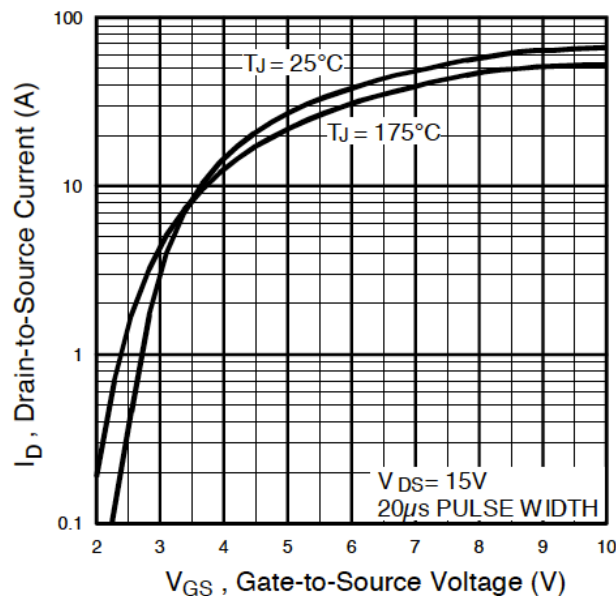
Finalmente, se decidió utilizar transistores MOSFET, al adaptarse mejor que las otras opciones a los requisitos previamente descritos.

Los transistores MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) [13], son componentes electrónicos semiconductores cuyas principales aplicaciones son la ampliación de señales y la conmutación.

En la Figura 18, se puede apreciar la estructura de un transistor MOSFET canal-n. Estos consisten en un sustrato de tipo *p o n*, que conforma el canal de inversión (Channel), sobre el que se sitúan dos islas de sustrato de tipo opuesto. De esta manera, los MOSFET constan de tres terminales: las dos islas de sustrato opuesto: fuente (Source) y drenador (Drain), y, por otra parte, la puerta (Gate).

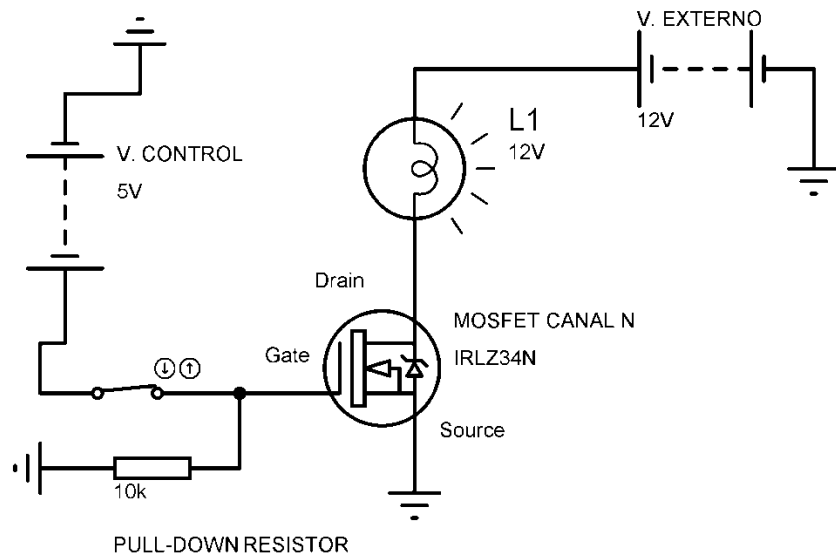


El funcionamiento de un MOSFET es sencillo. Para que circule corriente entre el drenador y la fuente es necesario crear un canal de tipo N entre sus terminales (un canal P, en el caso de un MOSFET canal-p). Para ello se debe imponer una diferencia de potencial positiva (negativa en el caso del tipo P) en la puerta, que deberá ser mayor que la llamada tensión de umbral. Así, cuanto más elevada sea la tensión aplicada a la puerta, más enriquecido quedará el canal y más corriente podrá circular entre los terminales D y S. Esto viene representado en las curvas características que proporciona el fabricante del MOSFET, como se puede apreciar en la Figura 20.



**FIGURA 20 .- Curva característica de  $V_{GS}$  frente  $I_D$  del MOSFET IRLZ24N**

De esta manera un MOSFET puede utilizarse como si fuera un interruptor, pudiendo controlar un circuito externo aplicando o no una tensión reducida al terminal G. Este es uno de los usos principales del MOSFET, utilizado en gran cantidad de circuitos electrónicos. En la Figura 21 podemos ver un circuito básico que controla una bombilla. Como se puede observar, con un voltaje de 5V podemos controlar un circuito externo de 12V. Al aplicar los 5V sobre la puerta (Gate) se crea el canal, que hace que el circuito externo conduzca y, por lo tanto, se encienda la bombilla. Sobre el terminal G, se añade una resistencia *pull-down* con el fin de evitar que el transistor quede en un estado flotante.



**FIGURA 21 .- Circuito básico de control de un elemento externo (bombilla) mediante el uso de un transistor MOSFET canal-n**

Una vez decidida la utilización de MOSFET como elemento de conmutación, se procedió a investigar qué modelo elegir. En el mercado existe una gran cantidad de modelos diferentes, cada uno de ellos con características diversas. Finalmente, se eligió el transistor IRLZ24N [14], cuyas características principales son las siguientes:

- MOSFET de potencia. Es un MOSFET diseñado para controlar corrientes muy elevadas.
- Nivel lógico. Se trata de un MOSFET diseñado para trabajar con circuitos digitales, por lo que la tensión necesaria para crear un canal es muy reducida. Este aspecto es fundamental, ya que, como se explicará más adelante, los MOSFET del circuito se controlan con una tensión de 3.3V. Como se puede ver en la figura 20, con 3.3v se pueden conseguir corrientes de unos 8 Amperios, cifra más que suficiente.
- Tensión máxima entre D y S: 55 V.
- Corriente máxima entre D y S: 18 A.

Estas características junto a su reducido precio (~0.55€) lo hacen ideal para su aplicación en el circuito de disparo.

Como se ha indicado anteriormente, unos de los principales objetivos del sistema es reducir el coste final. Una de las peculiaridades de los sistemas de disparo es que, normalmente, el programa de disparo de artificios se realiza de manera secuencial e individual (un disparo en cada momento). Siguiendo esta premisa, es posible construir una matriz de transistores MOSFET que genere las salidas pretendidas. Así, en lugar de utilizar  $k$  transistores MOSFET canal- $n$ , uno por cada salida, se propone utilizar  $r + q$  MOSFETs, siendo  $k = r * q$ . Concretamente, para el caso de  $n = 24$  salidas,  $q = 8$  MOSFETs canal- $n$  se encargarían de controlar las filas, mientras que  $r = 3$  MOSFETs canal- $p$  controlarían las columnas de la matriz.

	MOSFET canal-p 0	MOSFET canal-p 1	MOSFET canal-p 2
MOSFET canal-n 0	Salida 0	Salida 8	Salida 16
MOSFET canal-n 1	Salida 1	Salida 9	Salida 17
MOSFET canal-n 2	Salida 2	Salida 10	Salida 18
MOSFET canal-n 3	Salida 3	Salida 11	Salida 19
MOSFET canal-n 4	Salida 4	Salida 12	Salida 20
MOSFET canal-n 5	Salida 5	Salida 13	Salida 21
MOSFET canal-n 6	Salida 6	Salida 14	Salida 22
MOSFET canal-n 7	Salida 7	Salida 15	Salida 23

**TABLA 2.-** Tabla que representa la matriz de 24 salidas generada por el circuito de disparo

En la Tabla 2 se puede observar la matriz de 24 salidas generada para los módulos diseñados. Los MOSFET canal- $n$  se encargan de cerrar el circuito y activar la salida correspondiente. Estos son compartidos por tres salidas (una por cada columna). Para saber qué

MOSFET canal-n se tiene que activar para una determinada salida, se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$\text{Numero\_MOSFETN\_a\_activar} = \text{numeroSalida mod } 8$$

Como modelo de MOSFET canal-p se utilizó el IRF9640 [15], MOSFET de potencia que permite tensiones de hasta 200V y corrientes de hasta 11A.

Cada MOSFET canal-p se encarga de conectar la alimentación (11.1V) a una columna. Así, cuando queremos disparar una salida activaremos el MOSFET canal-p correspondiente a la columna en la que se encuentra la salida y desactivaremos los otros dos, disparándose solo la salida pretendida.

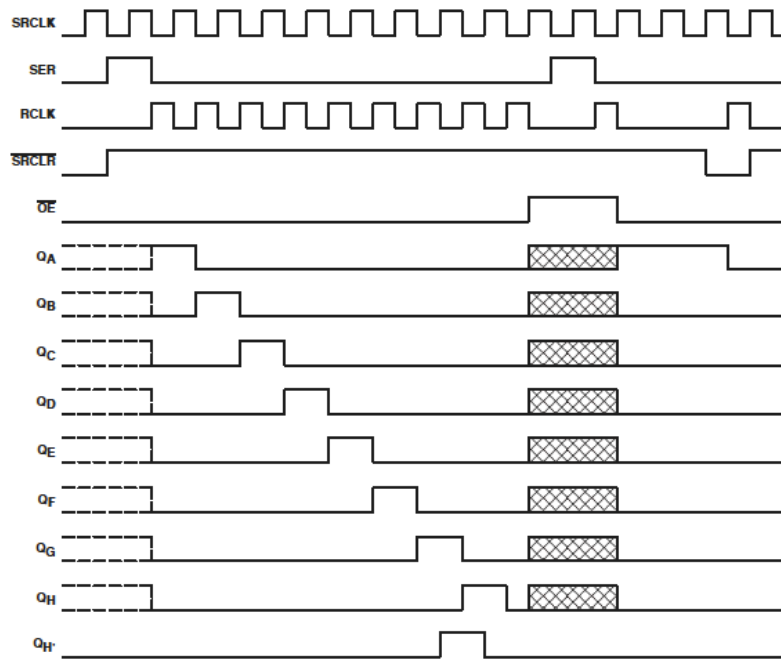
El transistor MOSFET a activar viene dado por la siguiente fórmula:

$$\text{Numero\_MosfetP\_a\_activar} = \text{numeroSalida } / 8$$

De esta manera, solo se necesitan 11 pines del microcontrolador para poder controlar todos los transistores (8 canal-n, 3 canal-p). Sin embargo, la placa ESP-12F dispone únicamente de 11 pines GPIO, de tal forma que no quedarían pines restantes para controlar el circuito de test, por lo que es necesario reducir aún más el número de pines necesarios. Para solucionar este inconveniente se recurrió a la utilización de un registro de desplazamiento de entrada en serie y salida en paralelo. El modelo concreto fue el 74HC595 [16], de 8-bits. La idea es simple: en primer lugar, se introducen los 8 bits en serie en el registro y en un segundo paso se cargan en las salidas en paralelo. Esto permite controlar 8 salidas con tan solo 3 pines de control (pin de introducción de datos en serie, reloj y latch). Así, en el circuito de disparo el registro de desplazamiento controla los 8 MOSFET canal-n. Por su parte, cada MOSFET canal-p es controlado directamente por un pin GPIO de la placa ESP8266.

Para controlar de manera correcta el registro de desplazamiento 74HC595 por parte de la placa, fue necesario acudir a la hoja de características del mismo, y estudiar el diagrama de tiempo, con el fin de saber cómo se realizaba el proceso de carga y qué valores tenían que tomar los pines (serie, clock y latch) para cargar los valores deseados. En la Figura 22, se muestra el diagrama de tiempo, que ejemplifica la carga de 8 unos ("11111111") en el registro 74HC595. La carga de los valores se realiza en serie, de tal manera que, en cada ciclo de reloj (SRCLK), se

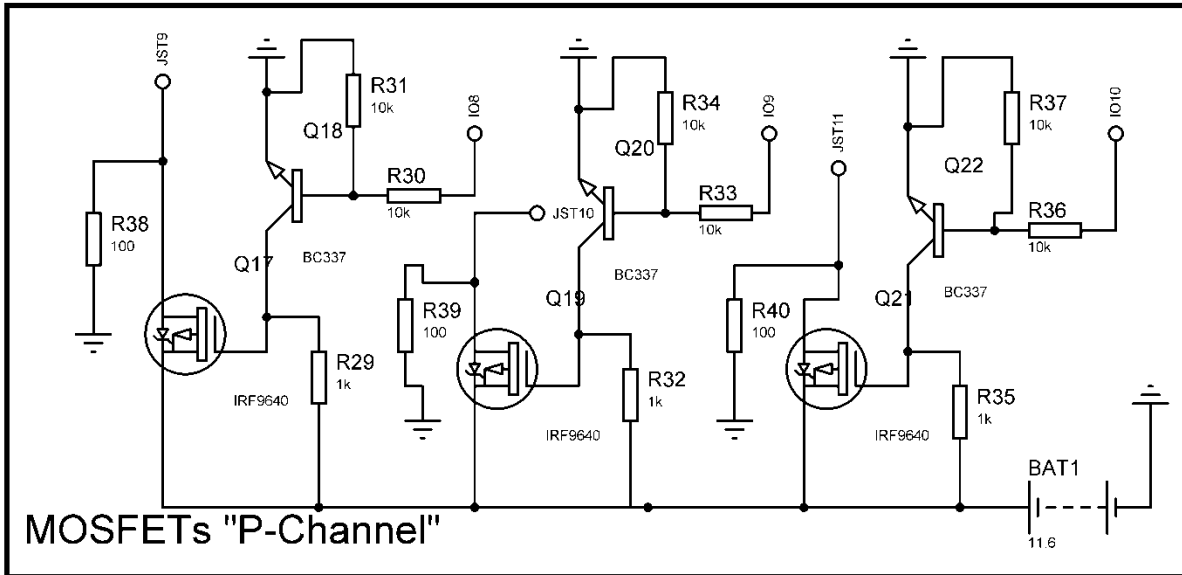
carga el valor correspondiente leyendo del pin de introducción de datos en serie (SER). Cuando se han introducido los 8 valores, se procede a su almacenamiento activando el pin de latch (RCLK) y haciendo disponibles los valores en las 8 salidas.



**FIGURA 22 .- Diagrama de tiempo ilustrativo de la hoja de características del registro de desplazamiento 74HC595**

El problema de utilizar un mismo MOSFET canal-n para varias salidas distintas (3 en nuestro caso), es que las columnas están comunicadas entre sí. De esta manera se pueden llegar a activar salidas no deseadas. Para solucionar dicho problema, en cada salida se añade un diodo rectificador (1N5404) [17], que solo permite la circulación de la corriente en el sentido deseado. De esta manera se aísla cada columna de las demás.

En la Figura 23 se puede apreciar que los transistores MOSFET canal-p llevan asociados a ellos un transistor adicional BJT NPN, concretamente el BC337. El modelo de MOSFET canal-p elegido (IRF9640) no es de nivel lógico. Estos transistores BJT se añaden para poder aplicar una tensión elevada a la puerta del MOSFET cuando entran en su región activa, y como se explica anteriormente conseguir una mayor corriente entre los terminales D y S .



**FIGURA 23.- Vista de los transistores MOSFETs canal-p, utilizados en el circuito de disparo.**

El pin de control va conectado a la base del transistor BJT (Pines IO8 - IO10), que a su vez va conectado la puerta del MOSFET, a través del colector y a tierra (GND) a través del emisor. Cuando se aplica la tensión necesaria en la base del transistor BJT, se conecta la puerta del MOSFET canal-p a tierra consiguiendo que se active la columna asociada a él. (Pines JST9 - 11).

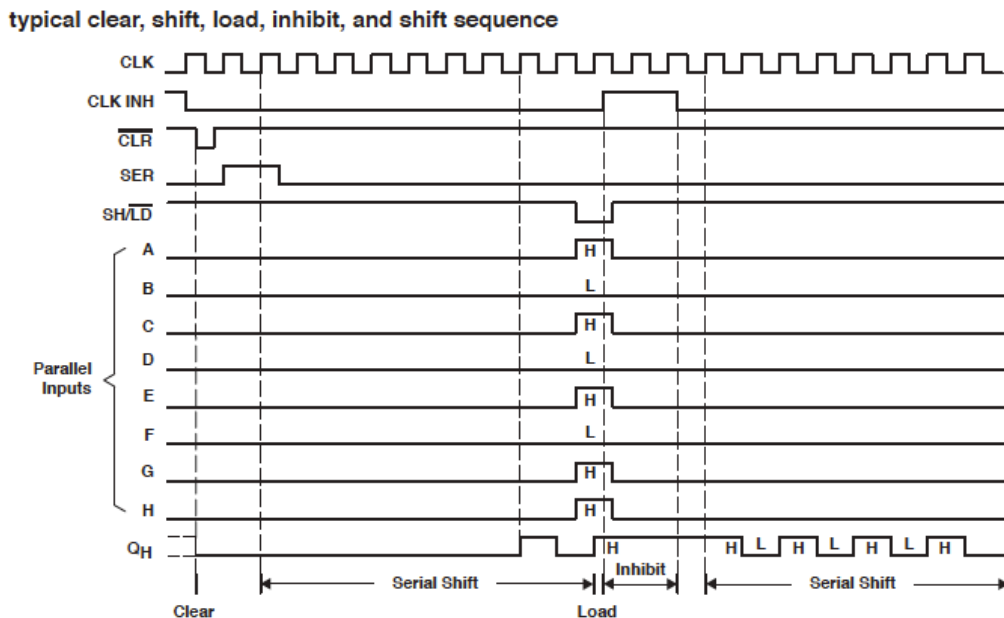
### 3.4.2- Circuito de test

La función de test consiste en comprobar que los inflamadores estén conectados correctamente y así sean capaces de ser disparados. El procedimiento para comprobar si están conectados consiste en realizar un simple test de continuidad, haciendo pasar una pequeña corriente por ellos.

Para ello se hace uso de los ya mencionados transistores bipolares BC337. La salida se conecta a la base del transistor, el colector se conecta a 5V y el emisor se conecta al pin de lectura. Cuando una salida está conectada, proporciona la corriente necesaria a la base para que el transistor quede en estado de saturación y por lo tanto obtener 5V en el pin de lectura ('1' lógico), lo que nos indica que la salida está conectada.

Para leer el estado de las 24 salidas se cuenta con el registro de desplazamiento y con los MOSFET canal-p explicados anteriormente, encargados de generar las 3 columnas.

Al contrario que en el circuito de disparo, en el que se empleaba un registro de desplazamiento entrada en serie y salida en paralelo, se emplea un registro de entrada o carga en paralelo y salida en serie. En concreto, el modelo elegido fue el 74HC166 [18]. Es un registro de 8 bits, al igual que el 74HC595 utilizado en el circuito de disparo. Este registro se utiliza para obtener el estado (conectado o no conectado) de las 8 salidas de cada columna, leyendo los valores del emisor de cada transistor bipolar. Para saber cómo controlar el registro se procedió al estudio de la hoja de características, y en concreto del diagrama de tiempo de ejemplo proporcionado mostrado en la Figura 24, que indica cómo realizar la carga de los valores en paralelo y su lectura en serie. Para cargar los valores, el pin de latch (SH/LD) se desactiva, habilitándose la carga de los valores en paralelo. Para transmitir los valores en serie, el pin de latch (SH/LD) se activa, lo que habilita la salida en serie (SER), proporcionando los 8 valores cargados secuencialmente.



**FIGURA 24 .- Diagrama de tiempo ilustrativo de la hoja de características del registro de desplazamiento 74HC166**

El procedimiento para conseguir el estado de las 24 salidas se realiza en 3 pasos:

1. Se activa la primera columna de la matriz (MOSFET canal-p 1), y se procede a la lectura en el registro de desplazamiento de las 8 salidas (filas) correspondientes a dicha columna.
2. Se activa la segunda columna de la matriz (MOSFET canal-p 2), y se procede a la lectura en el registro de desplazamiento de las 8 salidas (filas) correspondientes a dicha columna.
3. Se activa la tercera columna de la matriz (MOSFET canal-p 3), y se procede a la lectura en el registro de desplazamiento de las 8 salidas (filas) correspondientes a dicha columna.

Es necesario recalcar que la activación de las columnas (MOSFETs canal-p) durante la realización del procedimiento de test se realiza de manera excluyente. Es decir, no pueden existir dos columnas activas simultáneamente.

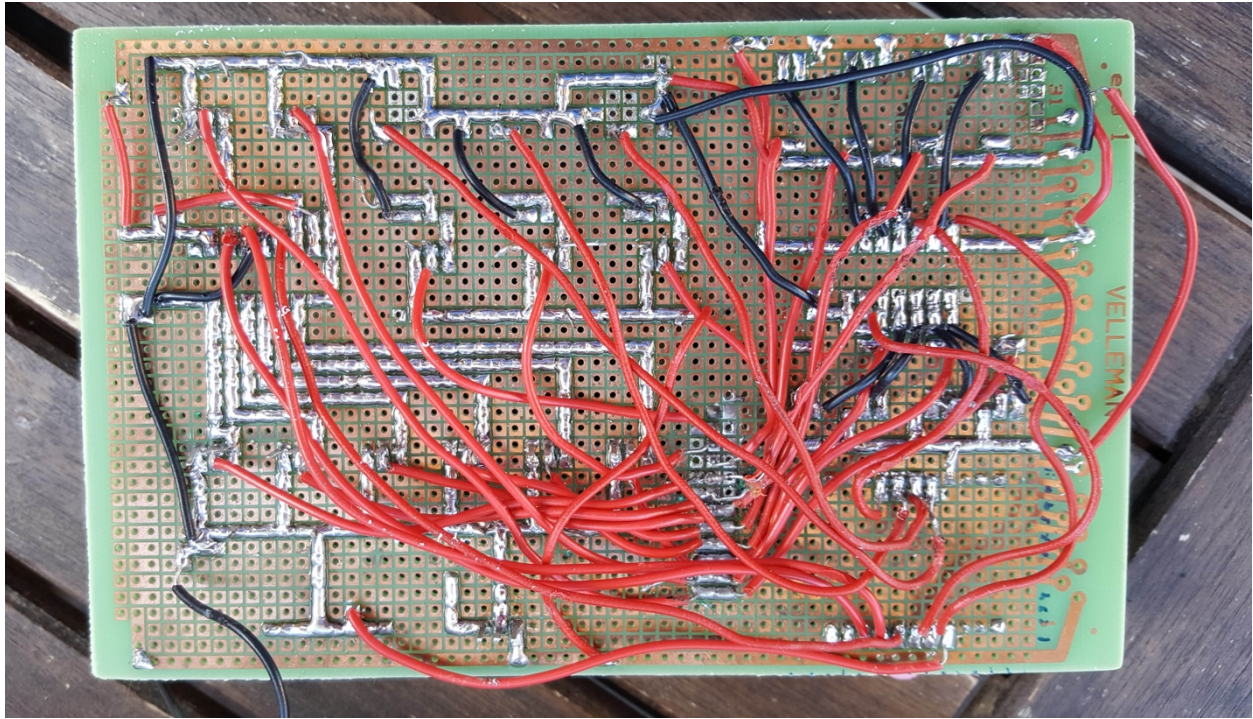
De esta manera, se consigue obtener el estado de las 24 salidas del slave utilizando tan solo 3 pines de control del chip ESP8266.

### **3.5.- Fabricación del circuito**

La fabricación del circuito se realizó sobre una placa de circuito impreso perforada con dimensiones de 150 x 100 mm. Como su nombre indica, la placa está perforada formando una matriz de agujeros separados a la distancia 2.54mm entre sí. En una de las caras cada agujero se rodea de un cuadrado de cobre, que facilita la soldadura y la interconexión de los componentes.

El proceso de fabricación se realizó en tres pasos:

1. En primer lugar, se procedió a colocar y soldar los componentes del circuito en la placa.
2. En segundo lugar, se procedió a realizar conexiones mediante pistas de estaño entre los componentes más cercanos
3. Por último, se realizaron las conexiones más complejas, mediante pequeños cables soldados.



**FIGURA 25 .- Vista de la parte inferior de la placa perforada con el circuito finalizado.**

En la Figura 25 se muestra la vista inferior de la placa, donde se puede apreciar la gran cantidad de conexiones y la complejidad de las mismas. Por otra parte, en la Figura 26 se observa la parte superior de la placa, donde se aprecian todos los componentes del circuito, incluida la placa ESP-12F.

Como se indica al principio del capítulo, se fabricaron un total de 2 módulos, por lo que se realizaron dos placas del circuito de slave.

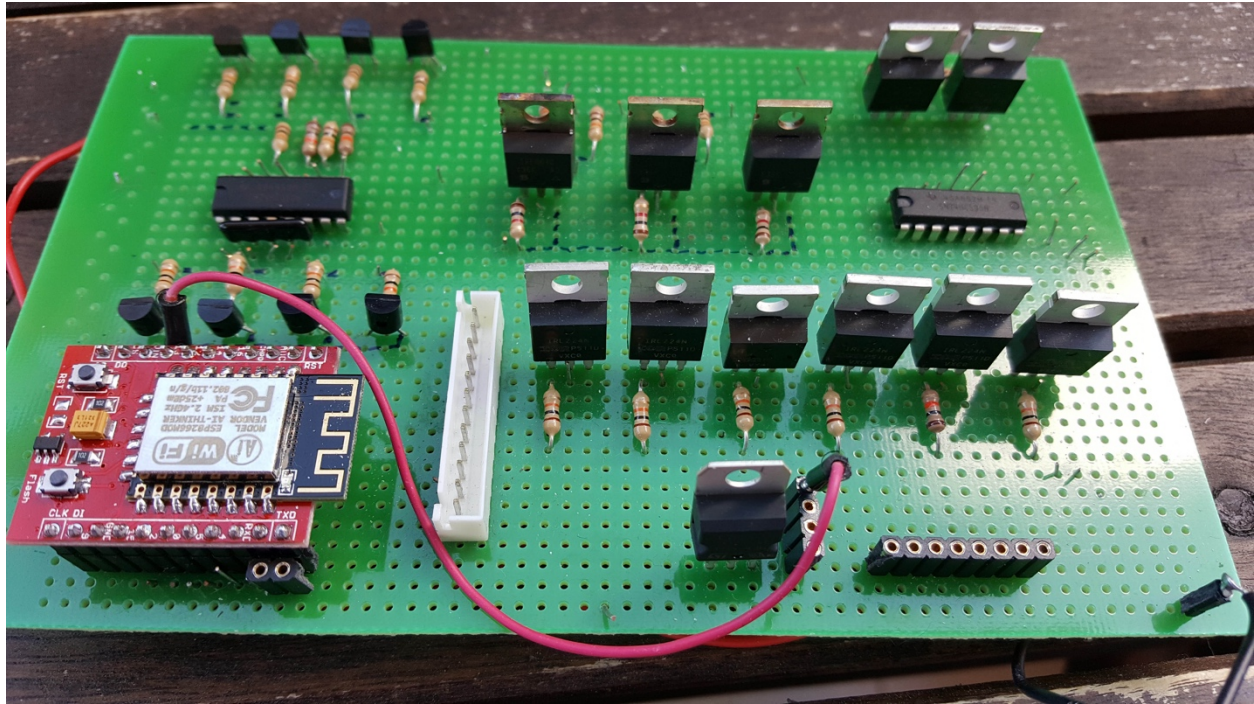


FIGURA 26 .- Vista de la parte superior de la placa perforada con el circuito finalizado.

### 3.6.- Alimentación de los módulos

Puesto que los módulos son totalmente independientes, es necesario añadirles una batería que proporcione la energía necesaria tanto al chip WiFi como al circuito y a los inflamadores que encenderán los artificios pirotécnicos.

El principal requisito que debía cumplir la batería era ser capaz de proporcionar la corriente necesaria para encender los inflamadores, por lo que debe generar picos de corrientes elevadas. Otros requisitos a tener en cuenta son los siguientes:

- **Precio.** Debe ser lo más asequible posible.
- **Dimensiones.** Las dimensiones de la batería no deben ser muy grandes para que pueda ser alojada dentro del módulo.
- **Peso.** Aunque menos importante, es deseable que el peso sea reducido.

De esta manera, se barajaron dos tipos de baterías:

- Baterías de plomo-ácido VRLA (Valve Regulated Lead-Acid Battery) [19]. Las baterías de plomo-ácido, son conocidas principalmente por su utilización en

vehículos. Las baterías VRLA, son una variedad de las baterías de plomo-acido que no requieren ningún tipo de mantenimiento. Sus principales ventajas son la capacidad de proporcionar intensidades de corriente elevadas, y su bajo coste. Su principal inconveniente es el peso elevado, así como unas dimensiones no muy reducidas.

- Baterías de polímero de iones de litio (LiPo) [19]. Las baterías LiPo, son un tipo de baterías de litio, cuyas principales ventajas son la gran capacidad de almacenamiento, su ligereza y pequeño tamaño y la capacidad para proporcionar intensidades de corrientes elevadas. Estas características hacen que sean las baterías más usadas en aeromodelismo y radio control. Sus principales desventajas son su coste ligeramente superior a las baterías de plomo-ácido y su vida útil algo inferior.

Finalmente, se decidió utilizar baterías LiPO, debido, sobre todo, a sus pequeñas dimensiones que permiten a la batería ser alojada en el interior del módulo. En la Figura 27, se muestra el modelo finalmente utilizado: una batería de 11.1V y 2200 mAh de capacidad.



**FIGURA 27 .- Batería LiPo de 11.1v y 2200mAh utilizada en los módulos.**

Puesto que las tensiones lógicas a las que trabaja el circuito (3.3-5V) son muy inferiores a la proporcionada por la batería, se añadió un regulador de tensión a 5V (L7805 [20]) que alimenta a todos los componentes electrónicos del circuito.

### 3.7.- Encapsulamiento exterior

Una vez diseñado y desarrollado el circuito de los slaves, se procedió al diseño del encapsulamiento de los mismos. En la Figura 28 se puede ver una vista general del módulo ya construido.

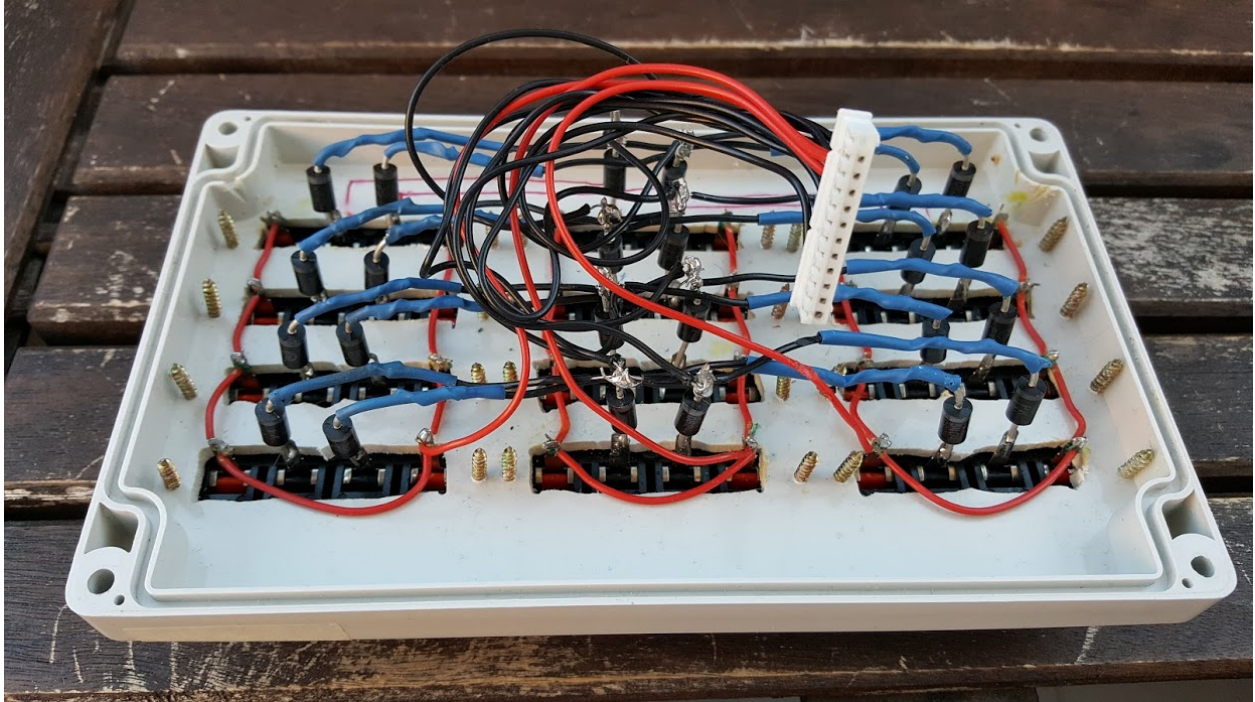


**FIGURA 28 .- Vista general del módulo desarrollado.**

Como encapsulamiento se eligió un modelo de caja de plástico ABS, de dimensiones 200 x 120 x 75 mm, suficientes para alojar en su interior todo el circuito diseñado.

En la parte superior de la tapa de la caja, se sitúa la matriz de salidas donde se conectan los inflamadores. La matriz de salidas está formada por conectores conocidos como *speaker terminals*, usados normalmente para conectar equipos de audio, pero también muy usados en sistemas de disparo.

En la parte inferior de la tapa se sitúan los diodos soldados a cada una de las salidas, así como las conexiones de la matriz de salidas al circuito, como se puede ver en la Figura 29. Esta conexión se realiza mediante un conector macho *JST XH* de 12 pines (XHP-12) [21]. Este conector permite independizar el circuito de la matriz de salidas, lo que facilita las operaciones de mantenimiento del módulo.



**FIGURA 29 .- Vista de la parte inferior de la tapa, con los diodos soldados a cada salida y el conector JST de 12 pines**

El interruptor encargado de encender o apagar el módulo se encuentra en el lateral derecho de la caja. En este caso, se trata de un interruptor de llave de dos posiciones (encendido-apagado). Esto permite que solo la persona autorizada sea capaz de encender o apagar cada módulo.

Por último, en la parte central, se añade una pantalla OLED de 0.96 pulgadas conectada al chip ESP8266, con el fin de proporcionar información sobre el estado del módulo (Conectando a red WiFi, esperando a máster, etc) al pirotécnico.

## 4.- Desarrollo del software de control del Sistema

En este capítulo se explica en profundidad todo lo relativo al diseño y desarrollo software del sistema.

En primer lugar, se describe el software desarrollado para el controlador de los módulos (ESP8266).

En segundo lugar, se detalla el software desarrollado para el máster, comentando el entorno de desarrollo utilizado y las librerías y componentes de terceros utilizados. Además, se explica el funcionamiento y comportamiento de las interfaces gráficas desarrolladas.

Finalmente, se muestran las configuraciones realizadas en el router para el correcto funcionamiento del sistema.

### 4.1.- Software de los slaves

Como se explica en el capítulo 3, el chip WiFi ESP8266, encargado de gobernar cada módulo, permite la posibilidad de ser programado como si de una placa Arduino se tratara. De esta manera, el entorno de desarrollo utilizado para programar el ESP8266, fue el IDE oficial de Arduino, en su versión 1.6.5 para MacOS.

Desde la versión 1.6.4, Arduino permite la instalación de paquetes de terceros. Así, para poder trabajar con la placa ESP8266, fue necesaria la instalación de un gestor de placas creado específicamente por la comunidad para dicho chip [11].

Una vez realizadas estas configuraciones iniciales, se procedió a realizar las primeras pruebas con la placa ESP-12F.

Para poder utilizar la funcionalidad WiFi de la placa, es necesario añadir la librería ESP8266WiFi, incluida en el gestor de la placa previamente instalado, y que proporciona prácticamente la misma funcionalidad que la librería oficial de Arduino para el *WiFi Shield* [22] [23]

Como se indica en la sección 3.6, en el encapsulamiento del módulo se añade una pequeña pantalla OLED en la que se muestra el estado del módulo. Para poder mostrar

mensajes en dicha pantalla se recurrió a una librería diseñada para esa pantalla y el módulo ESP8266, que proporciona diversas funciones para mostrar información en ella [24].

Todo programa Arduino consta de dos funciones: *setup()* y *loop()*:

- La función *setup()* se ejecuta cuando el *sketch* comienza, y es utilizada para hacer las configuraciones iniciales sobre el hardware.
- La función *loop()* se ejecuta inmediatamente después de la ejecución de la función *setup()* y hace precisamente lo que su nombre sugiere, ejecutándose en bucle continuamente.

En la función *setup()* del programa desarrollado, se configuran los pines GPIO de la placa, así como la pantalla OLED. Además, se procede a realizar la conexión con la red WiFi del sistema, y una vez conectado, iniciar un servidor TCP en el puerto 80.

En cuanto a la función *loop()*, se espera a la conexión del máster. Una vez establecida la conexión, se espera la recepción de órdenes. Al recibir una, se procede a su interpretación y a su inmediata ejecución.

## 4.2.- Software del máster

En el sistema de disparo propuesto el papel de máster puede ser desempeñado por cualquier ordenador que ejecute el software diseñado para dicha labor.

Como lenguaje de programación para desarrollar la herramienta, se decidió utilizar Java. La razón principal de su elección es la portabilidad del software, que permite su utilización en cualquier sistema operativo. Además, es un lenguaje muy utilizado, por lo que existen gran cantidad de proyectos y documentación en la red.

El entorno de desarrollo elegido fue Eclipse [25], un IDE gratuito, de código abierto y multiplataforma, que permite desarrollar en múltiples lenguajes de programación, entre los que se encuentra Java. Además, permite la extensión de su funcionalidad mediante la instalación de *plugins* a través de Eclipse Marketplace [26]. En particular, la versión elegida fue Eclipse Mars (4.5.2) para Java y sistema operativo MacOS.

Para la configuración del proyecto y la gestión de todas sus dependencias se utilizó Maven [27], una herramienta para la gestión de proyectos Java, facilitando la integración de librerías, así como la compilación del proyecto.

Como se explica anteriormente, la conexión entre el máster y los módulos se realiza mediante WiFi. En particular, esta conexión se establece mediante la creación de sockets TCP. TCP es un protocolo orientado a conexión, por lo que requiere el establecimiento de la conexión antes del comienzo de transmisión de datos. Además, es fiable, lo que significa que se garantiza la transmisión correcta de todos los datos al receptor [28]. Estas características le hacen ideal para su aplicación en la solución propuesta.

Al tratarse de un sistema distribuido, el máster debe poseer la capacidad de conectarse con múltiples módulos simultáneamente. Esto implica, en la práctica, mantener tantas conexiones (sockets) como módulos desplegados. Puesto que la gestión de estas conexiones no es trivial, se decidió utilizar Netty [29], un framework que facilita el desarrollo de aplicaciones de red, simplificando la programación de sockets.

Un punto clave en el software del máster, es la interfaz gráfica de usuario (GUI). Esta será el elemento mediante la que el pirotécnico interactúe con el sistema, por lo que debe ser intuitiva y clara, para que sea fácil de utilizar y evite cometer errores al usuario.

Para este cometido, se utilizó JavaFX, una serie de paquetes de gráficos que permite a los desarrolladores diseñar y crear aplicaciones gráficas que operen consistentemente en distintas plataformas [30]. Una de las principales ventajas de JavaFX es que permite crear interfaces de manera gráfica y fácil mediante el software Scene Builder. Además, los componentes gráficos que ofrece son fácilmente personalizables mediante el uso de CSS.

Como complemento adicional a JavaFX, se utilizó la librería JFoenix [31], que proporciona una serie de componentes con un diseño más visual y atractivo.

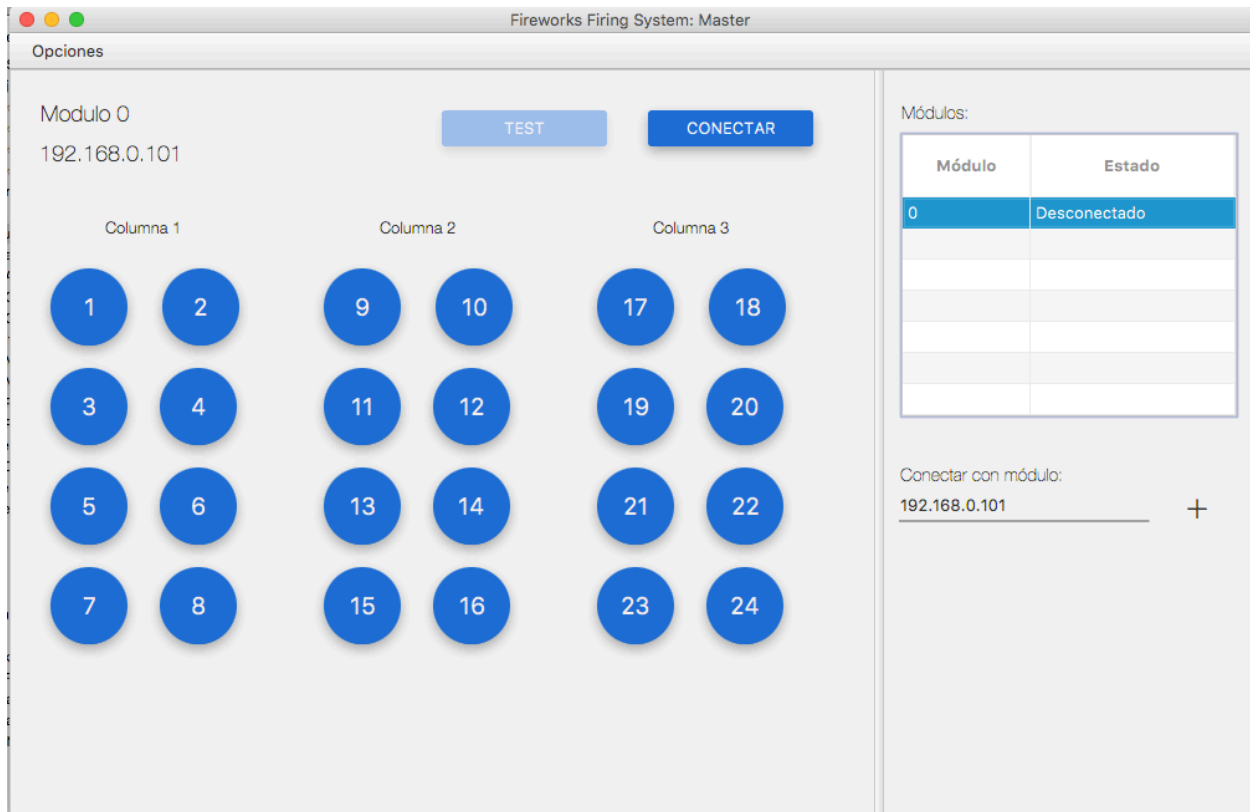
En el software diseñado se diferencian claramente dos pantallas: la pantalla de control manual del sistema y la de control automático del mismo. Al iniciar el software, el pirotécnico elige en que vista trabajar, tal y como se puede observar en la Figura 30:



**FIGURA 30 .- Vista inicial del software del máster**

#### **4.2.1- Control manual del sistema**

La pantalla de control manual del sistema permite al pirotécnico accionar las salidas de los módulos de forma manual, así como poder testearlas comprobando si los inflamadores están conectados o no.



**FIGURA 31 .- Captura de pantalla de la pantalla de control manual.**

En la Figura 31, se puede observar la pantalla diseñada. En la parte derecha de la misma, se muestra un campo de texto mediante el que se puede añadir un nuevo módulo introduciendo la dirección IP del mismo. Además, se añade una tabla con los módulos añadidos y su estado (Conectado / No Conectado), mediante la cual se puede seleccionar el módulo al que mandarle órdenes.

La parte izquierda de la pantalla permite realizar acciones sobre el módulo seleccionado dividiéndose en dos partes: en la parte superior se muestra la información del módulo, así como un botón para realizar el test y otro para conectar con el módulo en caso de que no esté conectado. En la parte inferior, se encuentra la matriz de botones que permiten accionar las 24 salidas del módulo.

La información del test realizado se muestra de manera gráfica en la matriz. Si una determinada salida está conectada, el color de fondo del botón cambia a color verde, si por el contrario no está conectada, cambia a color gris. En la Figura 32 se muestra el estado de la

interfaz de control manual tras realizar un test. En este caso las salidas en color verde (1,2,3,4,15,20) indicarían que están conectadas y las que están en gris desconectadas.

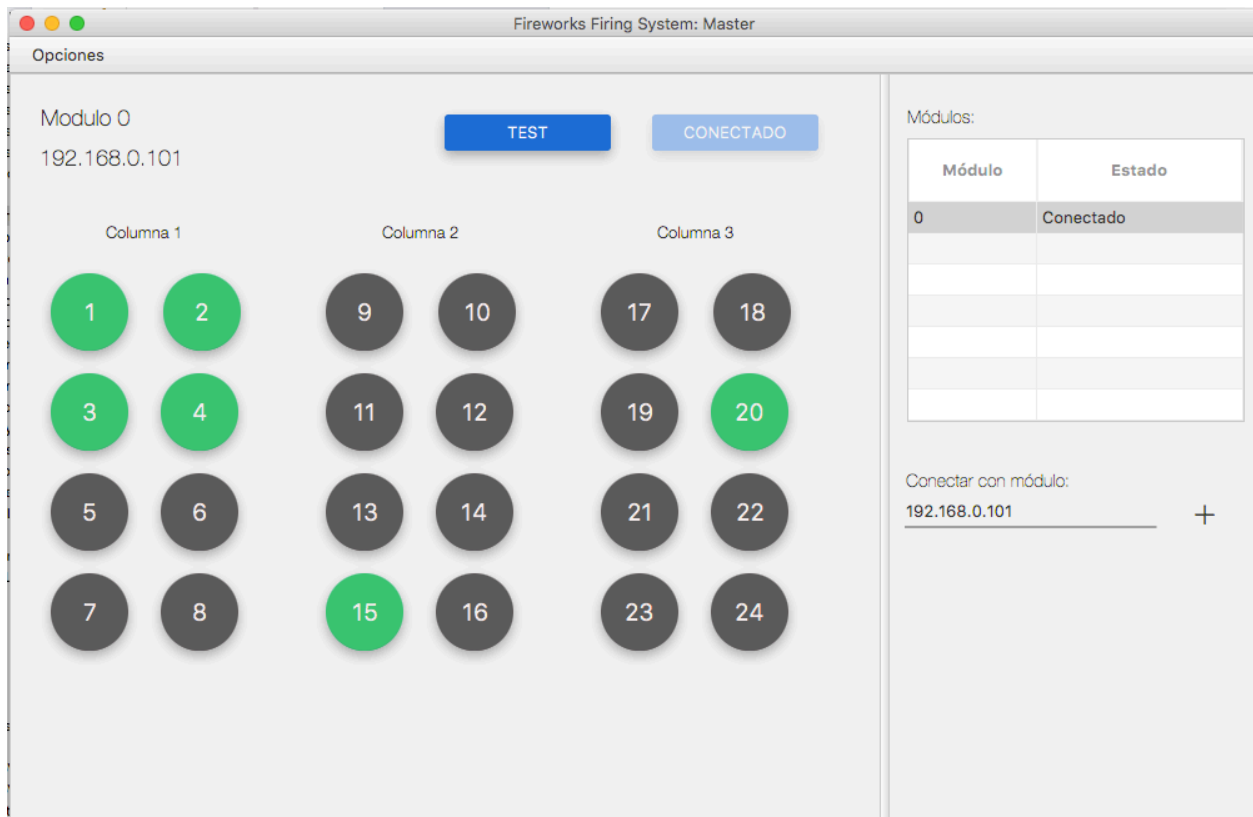
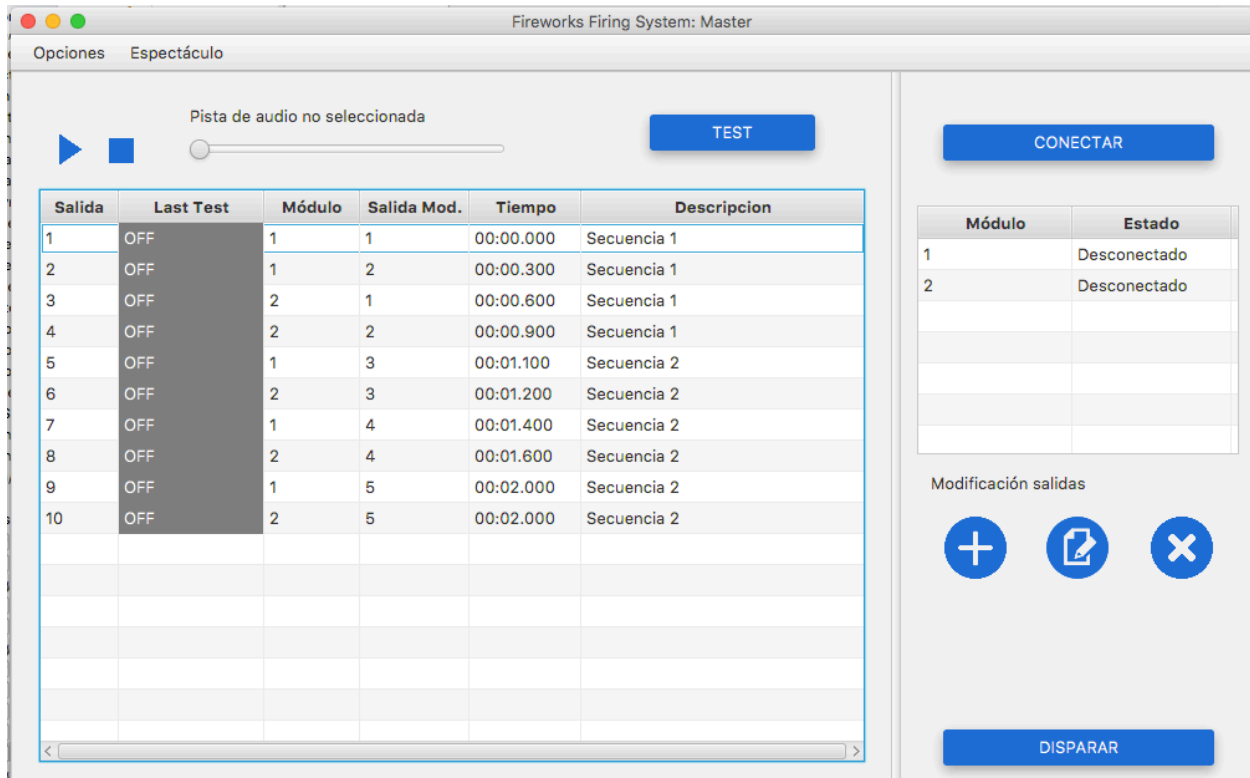


FIGURA 32.- Captura de pantalla realizada tras realizar test a un slave

#### 4.2.2- Programación y control automático del sistema

La pantalla de control automático del sistema permite crear y ejecutar espectáculos, mediante la programación de las salidas de los módulos que componen el sistema.



**FIGURA 33 .- Captura de pantalla de la pantalla de control automático**

En la Figura 33 se puede observar la pantalla diseñada. En la parte derecha, se muestra la tabla con los módulos que componen el espectáculo, mostrando su estado. Justo por debajo, se sitúan los controles para la edición del programa del espectáculo. Así mismo, se añaden dos botones: uno situado en la parte superior, para conectar con todos los módulos y otro en la parte inferior para iniciar el espectáculo.

Por otro lado, la parte izquierda de la pantalla se encuentra la tabla que contiene el programa o la línea de tiempo del espectáculo. Cada entrada de la tabla contiene la siguiente información:

- Número de salida contando con todos los módulos que componen el espectáculo.
- Resultado del último test realizado para dicha salida.
- Número del módulo.
- Número de salida dentro del módulo.
- Descripción del artificio pirotécnico asociado a dicha salida.

Además, en la parte superior se añade un botón para poder realizar test de todas las salidas, así como controles para poder reproducir una pista de audio para espectáculos piromusicales.

El funcionamiento de la herramienta se puede resumir en tres pasos:

En primer lugar, se procede a la generación del espectáculo. El pirotécnico puede cargar un programa ya creado, eligiendo el archivo CSV con la información del mismo, o proceder a su diseño mediante los controles que ofrece la pantalla.

El segundo paso se produce cuando el pirotécnico pulsa el botón de conectar. En ese momento, se procede a realizar la conexión, de manera asíncrona con todos los módulos que compongan el espectáculo.

Una vez realizada la conexión, el software realizará, de forma automática, un test de los módulos en intervalos de 10 segundos. Esto proporciona la seguridad al pirotécnico de que las salidas están conectadas y es una forma de comprobar que la conexión con todos los módulos sigue activa, y si no es así, volver a conectar con el/los módulo/s desconectados.

El último paso consiste en la ejecución del espectáculo programado. Para ello, el pirotécnico no tiene más que pulsar el botón "Disparar". Una vez pulsado, el software inicia un cronómetro y va disparando las salidas en el instante justo en el que han sido programadas, enviando las órdenes pertinentes a los módulos.

La información del espectáculo se almacena en un fichero de valores separados por comas (CSV). Cada línea del fichero contiene una entrada de la tabla (exceptuando la información del último test) anteriormente explicada. El pirotécnico puede crear nuevos espectáculos a través del mismo software del máster, o directamente creando el .CSV manualmente, en programas como Excel.

En el caso de que el espectáculo contenga audio, la información de la ruta del fichero se almacena en la primera línea del archivo .CSV.

Por último, es destacable que la carga de las direcciones IP de los módulos se hace de manera automática, asignando a cada módulo una dirección IP en función del número de módulo. En nuestro caso utilizamos *la IP 192.168.0.1XX*, donde XX es el número de módulo.

### **4.3.- Tramas de información intercambiadas**

Además de las tramas estándar pertenecientes al protocolo TCP, se definieron una serie de tramas para que el máster y los slaves se comunicaran correctamente.

#### **4.3.1- Máster**

El máster es el encargado de enviar las órdenes de disparo. Estas se codifican en un solo byte encapsulándose en un datagrama TCP, que se envía a través del socket. De esta manera distinguimos dos tipos de órdenes:

- **Envío de orden de disparo.** Consiste en enviar al módulo el número de salida que se quiere activar. Por ejemplo, para activar la salida 1, se enviará 0x1.
- **Envío de orden de test.** La orden de test se codifica en hexadecimal como 0X1E

#### **4.3.2- Slave**

El slave se encarga de recibir, interpretar y ejecutar las órdenes recibidas por el máster. La única información del sistema que se manda al máster es la información de test. Esta se envía como una cadena de texto de 24 caracteres, uno por cada salida. Si una determinada salida está conectada, se enviará el carácter '1', y en caso contrario '0'.

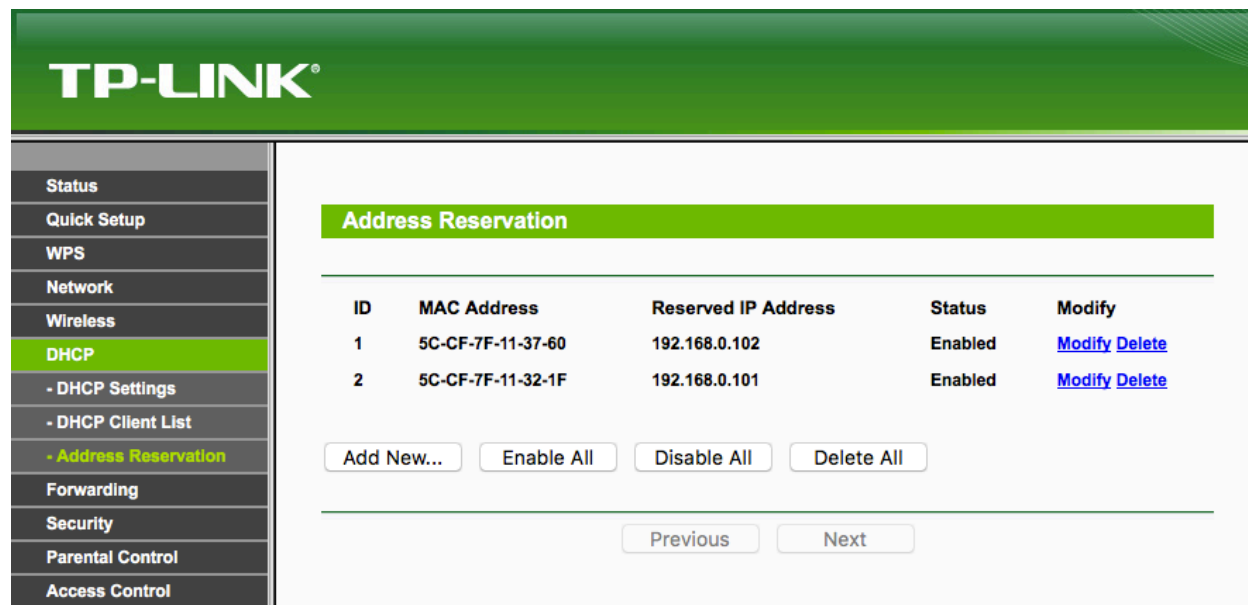
### **4.4.- Configuración del router**

Para que el sistema funcione correctamente es necesario realizar una serie de configuraciones en el router. La mayoría de estas configuraciones está orientada a aumentar la seguridad de la plataforma.

Para añadir un nuevo slave al sistema es necesario realizar una serie de operaciones en la página de administración del router.

El primer paso a realizar es conseguir una IP fija para el nuevo slave. Para ello se procede a reservar la nueva dirección IP del slave mediante la dirección MAC del mismo. En la

Figura 34, se puede apreciar las reservas de IPs realizadas para dos módulos. En este caso al slave 1, se le asigna la dirección 192.168.0.101 y al slave 2 la 192.168.0.102.



**FIGURA 34 .- Configuración de la reserva de direcciones IP para los slaves 1 y 2**

Como se indica anteriormente, uno de los objetivos del sistema diseñado es que proporcione las medidas necesarias para que la comunicación sea segura. El router es el elemento fundamental para conseguirlo. La primera medida que se aplica es el filtrado de direcciones MACs, consistente en permitir solo la conexión a aquellos dispositivos cuya dirección MAC se encuentre en la lista. De esta manera, al añadir un nuevo módulo, además de reservar su IP, se procede a añadir su dirección MAC a la lista de acceso.

La medida más efectiva y utilizada para proteger una red WiFi, es la activación de protocolos de seguridad mediante el establecimiento de contraseña. De esta manera, para proteger la red del sistema, activando el protocolo WPA 2 Personal con encriptación AES, y estableciendo una contraseña generada de manera aleatoria con la máxima longitud permitida. En la Figura 35 se puede observar la configuración realizada en la página de administración del router.

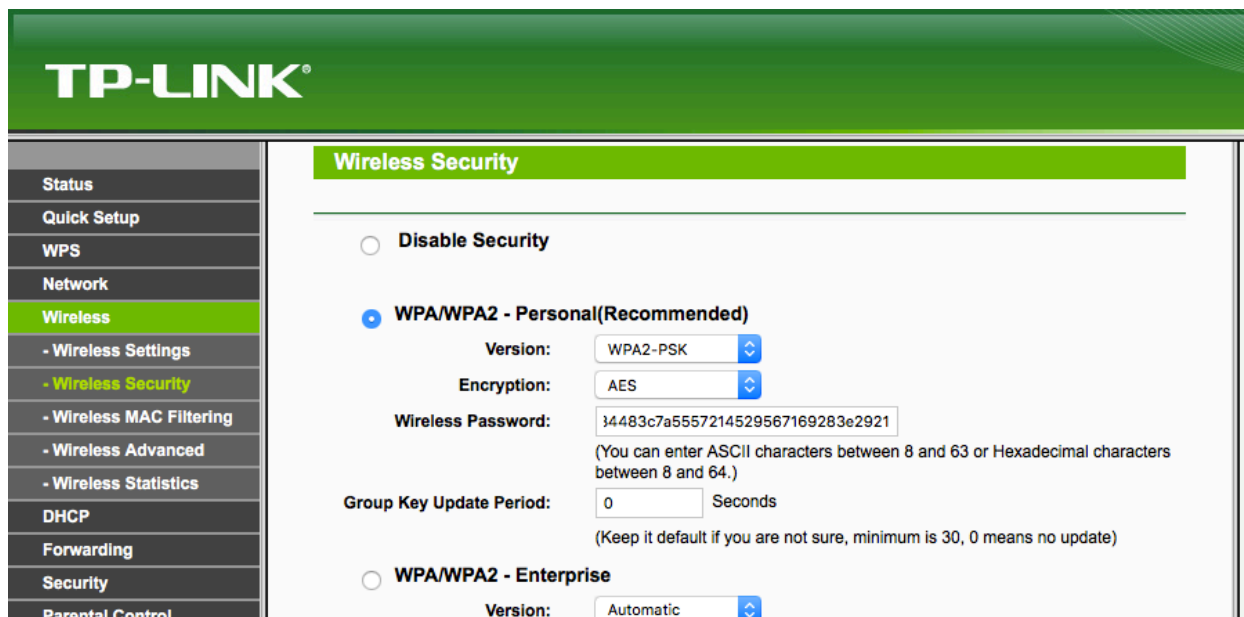


FIGURA 35 .- Configuración de la seguridad inalámbrica de la red

Además, como medida de seguridad adicional, se procedió a ocultar el SSID de la red, de tal manera que la red no sea visible al público.

## 5.- Experimentos y resultados

En este capítulo se detallan todos los experimentos y pruebas realizadas con el sistema desarrollado, así como los resultados obtenidos.

En primer lugar, se muestra un análisis del precio final del sistema, incidiendo en el precio de cada módulo.

En segundo lugar, se muestran las pruebas realizadas en la fase de diseño, simulando el comportamiento del sistema con el software Proteus, así como los resultados obtenidos.

En tercer lugar, se detallan las pruebas realizadas con el sistema real, primero con diodos LEDs conectados a las salidas de los módulos y después con inflamadores reales.

### 5.1.- Análisis del coste del producto final

En el sistema propuesto el coste del máster es cero, al no requerir de un hardware específico, pudiendo ejecutarse en cualquier ordenador. De esta manera, la mayor parte del coste del sistema recae en los slaves.

Componente	Cantidad	Precio ud.	Total
Placa perforada	1	7,85 €	7,85
Registro desplazamiento 74HC595	1	0,35 €	0,35
Registro desplazamiento 74HC166	1	0,25 €	0,25
Resistencia 10k	26	0,02 €	0,52
Resistencia 1k	3	0,02 €	0,06
Transistor MOSFET Canal N IRLZ24N	8	0,55 €	4,4
Transistor MOSFET Canal P IRF9640	3	1,10 €	3,3
Conector Macho JST 12 Pines	1	0,25 €	0,25
Array resistencias 4 en 1 SIL 10k	1	0,15 €	0,15
Transistor NPN BC337	11	0,05 €	0,55
Caja de montaje	1	7,20 €	7,2
Terminales Rojo/Negro	12	0,45 €	5,4
Conector Hembra JST 12 Pines	1	0,25 €	0,25

Componente	Cantidad	Precio ud.	Total
Batería LiPo	1	10,5€	10,5
Diodos 1N5400	24	0,10 €	2,4
Terminales JST	11	0,05 €	0,55
ESP8266	1	5€	5
Pantalla OLED	1	5€	5
Interruptor llave	1	1.25€	1.25
Regulador de tensión LM7805	1	0.20€	0.2
<b>Total</b>			55.43€

**TABLA 3.- Lista de los componentes que integran un módulo junto a su coste en euros.**

En la Tabla 3 se detallan todos los componentes que integran un módulo, junto a su precio y el coste final del sistema. Como se puede observar, el coste total para un slave de 24 salidas es aproximadamente 55€.

Por otra parte, para completar el sistema es necesario utilizar un router. El precio del router varía en función de su alcance y potencia. De cualquier modo, en el mercado se pueden encontrar routers de entre 20 y 50 €, capaces de proporcionar el alcance pretendido.

De esta manera, el coste total para un sistema con N nodos, sería  $20€ + 55*N$  euros. Así, este precio es claramente más competitivo que el de los sistemas presentados en la sección 2.4.

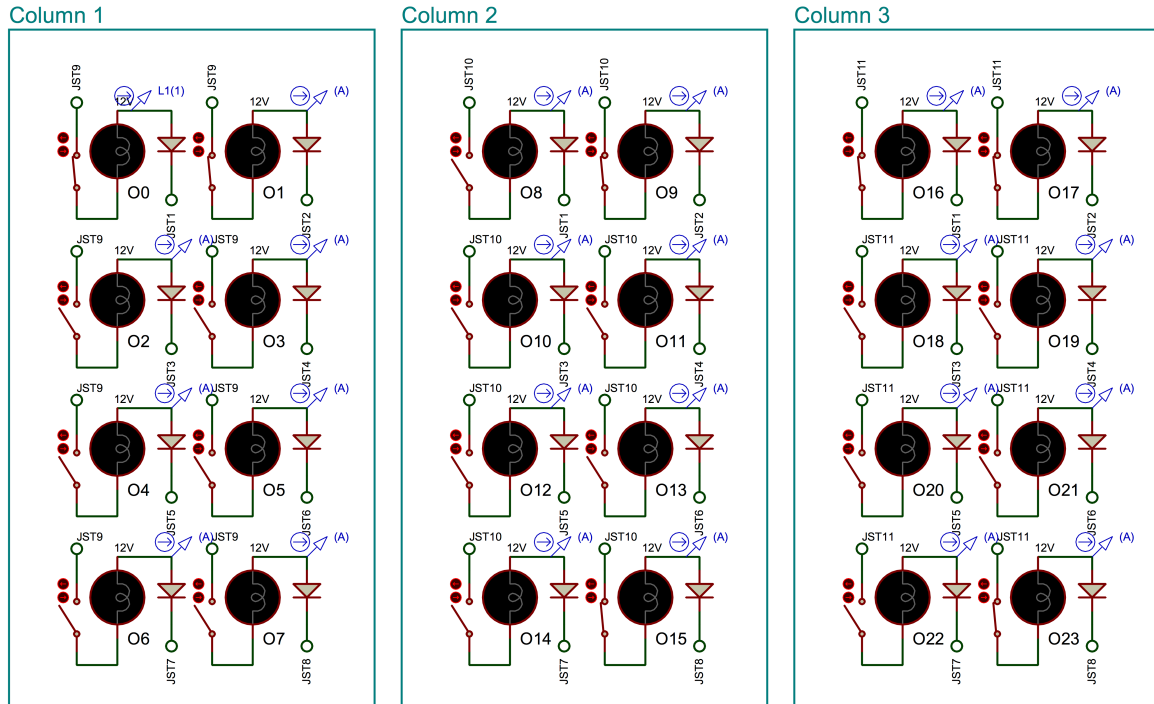
## 5.2.- Pruebas realizadas en la fase de diseño

Antes de proceder a la construcción de los módulos, se realizaron pruebas de simulación para verificar el correcto funcionamiento del sistema. Como se explica en la sección 3.4, el software elegido para llevar a cabo esta tarea fue Proteus.

Como se detalla en la sección 3.3 y 4.1, la programación del chip ESP8266 se realiza mediante Arduino. Proteus incluye Arduino entre sus componentes electrónicos, por lo que se añadió una placa Arduino para simular el comportamiento del ESP8266.

Además, Proteus permite la posibilidad de añadir el compilador Arduino, por lo que se puede incluir el código fuente del programa y simular su comportamiento.

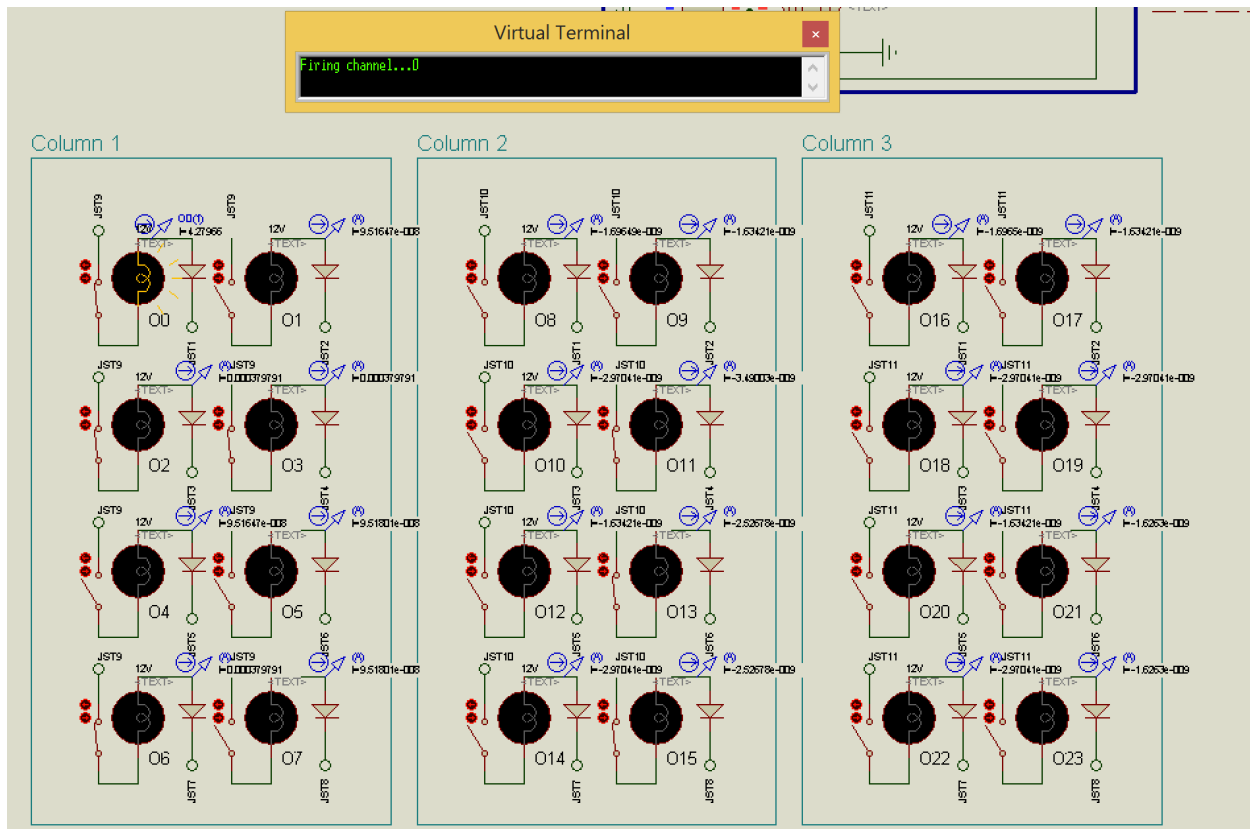
La simulación de la comunicación entre el máster y el módulo se realiza mediante el envío de comandos por comunicación serie. Para ello, se añadió al proyecto el componente Virtual Terminal conectándolo a la placa Arduino.



**FIGURA 36 .- Simulación de la matriz de salidas realizada en Proteus**

En la Figura 36 se muestra la matriz de salidas del módulo. Cada salida consta de una bombilla, un interruptor y un diodo. La bombilla simula lo que realmente sería el inflamador. El interruptor se incluyó para simular si una salida está o no conectada. Por último, el diodo consigue aislar las columnas entre sí.

La Figura 37 muestra la simulación de disparo. Como se puede observar, cuando se envía el comando para disparar la salida número 0, la correspondiente bombilla se enciende.



**FIGURA 37 .- Simulación de la funcionalidad de disparo.**

Por otra parte, en la Figura 38 se muestra la simulación de test. Aquellas salidas cuyo interruptor esté conectado, se considerarán como conectadas, produciendo un '1' en la salida del Virtual Terminal y un '0' en caso contrario.

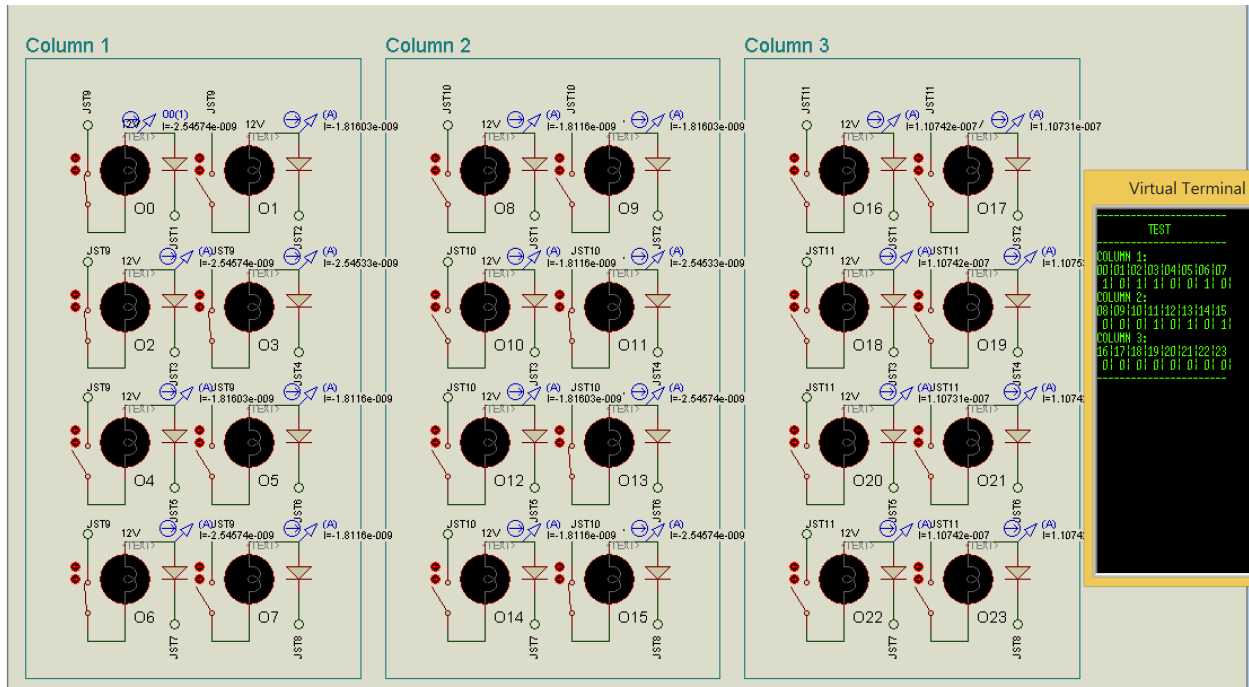


FIGURA 38 .- Simulación de la funcionalidad de test

### 5.3.- Pruebas realizadas con el producto final

Una vez terminada la fabricación de un primer módulo se procedió a realizar las pruebas pertinentes para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Como elementos conectados a las salidas de los módulos se emplearon LEDs e inflamadores:

- **LEDs.** Se emplearon LEDs de color verde, a los que se le soldó una resistencia de  $500 \Omega$  para que circule por ellos la corriente adecuada. Permiten comprobar visualmente que una salida ha sido activada, así como ser utilizados un número ilimitado de veces.
- **Inflamadores.** Se emplearon inflamadores para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, comprobando que el sistema sea capaz de proporcionar la corriente necesaria para encender el inflamador.

### 5.3.1- Modo manual

Las primeras pruebas al sistema finalizado se realizaron en el modo manual. El objetivo de estas pruebas era comprobar el correcto funcionamiento del software ejecutado en el ordenador que actúe como máster, así como verificar el correcto funcionamiento de los módulos.

En primer lugar, se realizaron pruebas con los LEDs descritos anteriormente, consistentes en los casos que se describen en la Tabla 4. [32]

<b>Caso de prueba</b>	<b>Objetivo</b>
<b>Conexión del máster con un solo modulo con varios leds conectados</b>	Comprobar que la conexión se realiza de manera satisfactoria
<b>Realización de test</b>	Comprobar que la información reflejada en el máster es correcta, y que los LEDs permanecen apagados.
<b>Disparo de las salidas conectadas</b>	Comprobar que cada salida se enciende adecuadamente y que el resto permanecen apagadas.
<b>Desconexión de una salida y realización de segundo test</b>	Comprobar que, tras desconectar una salida (LED), la realización de un nuevo test, refleja el cambio adecuadamente

**TABLA 4.- Descripción de casos de prueba realizados con LEDs para comprobar el funcionamiento del control manual.**

En segundo lugar, se realizaron las pruebas con inflamadores mostradas en la Tabla 5 [33].

Caso de prueba	Objetivo
<b>Conexión del máster con un solo modulo con 3 inflamadores conectados</b>	Comprobar que la conexión se realiza de manera satisfactoria
<b>Realización de test</b>	Comprobar que la información reflejada en el máster es correcta, y que los inflamadores permanecen apagados.
<b>Disparo de los infamadores conectados</b>	Comprobar que cada inflamador se enciende adecuadamente y que el resto permanecen apagados.

**TABLA 5.- Descripción de casos de prueba realizados con inflamadores para comprobar el funcionamiento del control manual.**

### **5.3.2- Modo automático o programado**

Una vez comprobado el funcionamiento adecuado del sistema en modo manual, se procedió a realizar las pruebas del modo automático o programado. Para ello, se programó un pequeño espectáculo que incluyera dos módulos, de tal manera que se pudiera comprobar el correcto funcionamiento de la plataforma.

En la Tabla 6, se puede observar la información de dicho programa. Como se puede apreciar el programa empieza con la una primera secuencia que acciona las dos primeras salidas del primer módulo, siguiendo con las del segundo. A continuación, se inicia otra secuencia que alterna los slaves en el accionamiento de las salidas. Finalmente, se realiza un disparo simultáneo de una salida en ambos módulos [34] [35].

Salida	Módulo	Salida Mod.	Tiempo	Descripción
1	1	1	00:00.000	Secuencia 1
2	1	2	00:00.300	Secuencia 1
3	2	1	00:00.600	Secuencia 1
4	2	2	00:00.900	Secuencia 1
5	1	3	00:01.100	Secuencia 2
6	2	3	00:01.200	Secuencia 2
7	1	4	00:01.400	Secuencia 2
8	2	4	00:01.600	Secuencia 2
9	1	5	00:02.500	Simultaneas
10	2	5	00:02.500	Simultaneas

**TABLA 6.- Programa realizado para comprobar el funcionamiento del modo automático**

En la Tabla 7 se detallan los casos de prueba realizados para comprobar el funcionamiento del modo automático. En primer lugar, se ejecutaron con LEDs en múltiples ocasiones [34]. Tras comprobar el correcto funcionamiento, se realizó una última prueba con inflamadores, para confirmar los resultados obtenidos [35].

<b>Caso de prueba</b>	<b>Objetivo</b>
<b>Encendido de módulos</b>	Comprobar que los módulos se encienden correctamente y se conectan a la red WiFi con éxito
<b>Conexión de máster con los módulos</b>	Comprobar que la conexión con los módulos se realiza con éxito.
<b>Realización de test automático</b>	Comprobar que la información reflejada en el máster es correcta, y que los leds /inflamadores permanecen apagados.
<b>Ejecución del espectáculo</b>	Comprobar que los leds/inflamadores se encienden en el momento en el que habían sido programados

**TABLA 7.- Descripción de casos de prueba realizados con LEDs/Inflamadores para comprobar el funcionamiento del control automático.**

## 6.- Conclusiones

Después de analizar el trabajo realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El avance en la tecnología afecta a todos los ámbitos de la sociedad. Esto incluye la pirotecnia, donde la introducción de la tecnología mediante los sistemas de disparo posibilita la realización de nuevos espectáculos pirotécnicos, impensables hasta hace unos años. Todo ello elevando los niveles de seguridad y optimizando el trabajo de los profesionales pirotécnicos.
2. Es posible reducir el coste de los sistemas de disparo profesionales, mediante el empleo de componentes electrónicos comunes en cualquier tienda de electrónica, y de modernos SoC avanzados y de bajo coste, como es el caso del ESP8266. De esta manera, el coste de los slaves diseñados, alrededor de 55 €, es muy inferior al de otras soluciones estudiadas (2000 € / 30 salidas Pyrodigit , 300 \$ / 18 salidas Cobra).
3. Tras la realización de las distintas pruebas realizadas al sistema, se puede concluir que el sistema desarrollado es capaz de realizar con solvencia las funciones ofrecidas por los sistemas de disparo profesionales existentes en el mercado.

Como líneas de trabajo futuro se pueden plantear las siguientes:

- El diseño del circuito eléctrico del slave en placa de circuito impreso (PCB), mediante el software de diseño Proteus. El objetivo de este punto es reducir aún más el coste del sistema, tanto en horas de fabricación como en coste de materiales. Además, abre la puerta a la fabricación en serie de los slaves, y su posible comercialización.
- El desarrollo de una aplicación móvil para los principales sistemas operativos móviles (Android e iOS) mediante la cual se permita al pirotécnico controlar el sistema en su totalidad. De esta forma, se aumenta la movilidad del pirotécnico, pudiendo comprobar la conexión de las salidas “in situ” (test), así como ejecutar los espectáculos sin necesidad de un ordenador.

Por último, destacar que el presente trabajo fue presentado el 5 de mayo de 2016 al Premio “Silvia Del Pino” de diseño hardware en su edición de 2016, organizado por la Facultad de Informática de la Universidad Complutense de Madrid, obteniendo dicho galardón.

Además, durante la realización de este trabajo se envió la publicación “A Distributed HW/SW Platform for Fireworks”, al congreso “Summer Simulation Multi-Conference” (SummerSim '16), ubicada en el Core B., admitido por los revisores del mismo con fecha de 16 de mayo de 2016.

## 6.- Conclusions

After analyzing this work, the following conclusions can be drawn:

1. The advancement in technology affects to all the areas of the society. This includes pyrotechnics, where the introduction of technology in firing systems makes it possible the creation of novel fully automated fireworks shows, unthinkable a few years ago. The introduction of embedded devices has allowed raising the security levels and optimizing the work of pyrotechnic professionals.
2. It is possible to reduce the cost of professional firing systems, by using conventional electronic components such as transistors or resistors, as well as modern embedded and low cost SoCs, such as the ESP8266. Thus, the cost of the designed slaves, around 55 €, is much lower in comparison with other solutions available in the market (2000 € / 30 outputs Pyrodigit, 300 \$ / 18 outputs Cobra).
3. After the completion of the different tests, it can be concluded that the developed system is able to efficiently perform the functionalities implemented by existing professional firing systems in the market.

In the future, the following lines of work can be considered to complement this work:

- Implementing the slave controlling circuit applying the Printed Circuit Board (PCB) technology, thanks to the schematics developed in Proteus. The goal is to further reduce the system cost, both in manufacturing/testing and materials. It also opens the door to mass production of the slaves, and thus their possible commercialization.
- The development of a mobile application for the principal mobile operating systems (Android and iOS). With such application the pyrotechnicians would be allowed to control the whole system, but increasing their mobility. Thus, they would be able to check the connection of the outputs "on-site" (test) as well as run the shows without a computer.

Finally, note that this project was presented on May 5<sup>th</sup>, 2016 to the "Silvia Del Pino" hardware design context, organized by the Computer Science Faculty at UCM, obtaining this award.

In addition, during the developing of this work, the publication "A Distributed HW / SW Platform for Fireworks" was sent to the "Summer Simulation Multi-Conference" (SummerSim '16), located in the Core B, being accepted by reviewers in May 16<sup>th</sup> , 2016.

## Bibliografía

- [1] Michael S. Russel . The Chemistry of Fireworks. 2009
- [2] Alan St. Hill Brock. Pyrothecnics: The History And Art Of Firework Making. 1922
- [3] Galería del montaje y disparo de los fuegos artificiales de las fiestas populares de Villaviciosa de Odón 2015 - Madrid. [www.pirofan.com](http://www.pirofan.com).
- [4] Pyrodigit Proffesional Firing System. [www.pyrodigit.it/en](http://www.pyrodigit.it/en)
- [5] Cobra Firing Systems. [www.cobrafiringsystems.com](http://www.cobrafiringsystems.com)
- [6] Jesús Martín Alonso, Alberto A. Del Barrio. A Distributed HW-SW Platform for Fireworks. 2016
- [7] Espressif Systems. ESP8266X Datasheet
- [8] Arduino. <https://www.arduino.cc>
- [9] Digi. Xbee. <http://www.digi.com/lp/xbee>
- [10] Hoja de características de la placa de desarrollo ESP8266, ESP-12F. [http://www.electrodragon.com/w/ESP-12F\\_ESP8266\\_Wifi\\_Board](http://www.electrodragon.com/w/ESP-12F_ESP8266_Wifi_Board)
- [11] Arduino Core for ESP8266 WiFi Chip, <https://github.com/esp8266/Arduino>
- [12] LabCenter Electronics. Proteus Design Suite. [www.labcenter.com/products/vsm/vsm\\_overview.cfm](http://www.labcenter.com/products/vsm/vsm_overview.cfm)
- [13] Richard C. Dorf . The Electrical Engineering Handbook. 2000. Capítulo 24.3.
- [14] Infineon. IRLZ24N HEXFET Power Mosfet Datasheet.
- [15] Vishay. IRF9640/SiHF9640 Power MOSFET Datasheet.
- [16] Texas Instruments, SN74HC595 8-Bit Shift Registers With 3-State Output Registers Datasheet.
- [17] Diodes Incorporated, 1N5400 - 1N5408 Datasheet.
- [18] Texas Instruments, SN74HC166 8-Bit Parallel-Load Shif Registers Datasheet.
- [19] David Linden, Thomas B. Reddy. Handbook of Batteries.
- [20] Texas Instruments.  $\mu$ A7800 Series Positive-Voltage Regulators Datasheet.
- [21] JST-MFG.com. Hoja de características de los conectores serie XH. <http://www.jst-mfg.com/product/pdf/eng/eXH.pdf>

- [22] Arduino. WiFi Library. <https://www.arduino.cc/en/Reference/WiFi>
- [23] Arduino. Arduino WiFi Shield. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoWiFiShield>
- [24] GitHub. ESP8266-OLED-SSD1306. <https://github.com/squix78/esp8266-oled-ssd1306>
- [25] Eclipse. Eclipse Desktop IDEs. <https://eclipse.org/ide/>
- [26] Eclipse Marketplace. <https://marketplace.eclipse.org/>
- [27] Apache Maven. <https://maven.apache.org/>
- [28] Internet Engineering Task Force (IETF). RFC 793, Transmission Control Protocol. <https://tools.ietf.org/html/rfc793>
- [29] Netty project. <http://netty.io/>
- [30] Oracle. JavaFX: Getting Started with JavaFx. [docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfx-overview.htm](https://docs.oracle.com/javase/8/javafx/get-started-tutorial/jfx-overview.htm)
- [31] JFoenix JavaFX Material Design Library. <http://www.jfoenix.com/>
- [32] Video de las pruebas realizadas con LEDs para el modo manual. [https://www.youtube.com/watch?v=TeyBe\\_PIXEk](https://www.youtube.com/watch?v=TeyBe_PIXEk)
- [33] Video de las pruebas realizadas con inflamadores para el modo manual. [https://www.youtube.com/watch?v=GdY\\_UuEVCrA](https://www.youtube.com/watch?v=GdY_UuEVCrA)
- [34] Video de las pruebas realizadas con LEDs para el modo automático. <https://www.youtube.com/watch?v=LDkKb9OqS88>
- [35] Video de las pruebas realizadas con inflamadores para el modo automático. <https://www.youtube.com/watch?v=gnhHLmtjhs>