



Universidad  
Carlos III de Madrid  
[www.uc3m.es](http://www.uc3m.es)

## **Desarrollo de una ayuda técnica para alumnos del Colegio San Rafael (13): Sistema de Iluminación Interactivo para sala Snoezelen**

---

**Autor:** Lorena Sanz Landivar

**Titulación:** Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**Profesor Tutor:** Ricardo Vergaz Benito (Departamento de Tecnología Electrónica)

**Fecha:** 24 de Septiembre de 2014



Universidad  
Carlos III de Madrid  
[www.uc3m.es](http://www.uc3m.es)

## Resumen

El C.E.E San Rafael de Madrid con la colaboración del Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF) del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III, ha creado una sala Snoezelen. Este espacio ha sido pensado para mejorar las capacidades físicas y cognitivas de niños con severas dificultades. En concreto, este Trabajo Fin de Grado, busca desarrollar una herramienta útil en el aprendizaje con la que mejorar el bienestar físico y emocional, la autoestima y la calidad de vida de los alumnos. Para ello, el Sistema de Iluminación Interactivo fomenta la relación causa-efecto y estimula a los niños con efectos audiovisuales.

El proyecto consta de un sistema de iluminación de tres focos y una alfombra roja, una raqueta receptora y un interfaz de usuario con grabación/reproducción de audio. Cada foco incluye una lámpara de color (azul, amarillo y verde) y un puntero láser de imágenes.

El juego comienza con las lámparas de colores iluminadas. El alumno al situar la raqueta bajo la lámpara, se reproduce un sonido (previamente grabado en el interfaz de usuario) y el láser proyecta una imagen (una luna, un sol...) sobre la raqueta. El juego consiste en que el niño vaya repitiendo esta acción en todos los focos, y descubra los efectos audiovisuales que esconden cada uno de ellos. Los cuidadores del centro pueden seleccionar tanto los sonidos como las imágenes.

Cada uno de los láseres está modulado a una frecuencia diferente. Cuando los fotodiodos (repartidos uniformemente por la raqueta) detectan la luz del láser, dicha frecuencia se transforma en un valor de continua que identifica a cada foco. El interfaz de usuario recibe la información por radiofrecuencia y el microcontrolador se encarga de activar el dispositivo de grabación/reproducción de audio.

## Abstract

Interactive Lighting System came from an idea in September 2003, and today, we can say that it has become a reality.

The EEC San Rafael de Madrid with the collaboration of the Group Displays and Photonics Applications (GDAF) of the Carlos III University, for creating a Snoezelen room. This space has been designed to improve the physical and cognitive abilities of children with severe difficulties. Specifically, this Final Project seeks to develop a useful learning tool with which to improve physical and emotional well-being, self-esteem and quality of life of students. For this, the Interactive Lighting System promotes cause and effect and encourages children with visual effects.

The project consists of three colored lights (blue, yellow and green), a platform to anchor them to the ceiling, three lasers with RED footage, a receiving racquet and a user interface with recording / playback audio. I want to mention, that each lamp is coupled with a laser, both forming a single structure, hereinafter refer to as focus.

The game begins with only the lamps lighted colors. When students place the racket under the lamp, it plays a sound (previously recorded in the user interface) and laser projects an image (a moon, a sun ...) on the racket. The game is that the child will repeat this action on all the lights, and discover the hidden visual effects each. Carers center can select both sounds and images.

The complete system has been tested by the students of Colegio San Rafael with satisfactory results.

# Capítulo 1. Introducción y objetivos

## 1.1 Introducción

### 1.1.1 El Diseño para todos

El Diseño para Todos es una filosofía de diseño encaminada a desarrollar productos, entornos, programas y servicios “por y para todos”.

Aunque este término nace ligado a facilitar la accesibilidad a personas con discapacidad, va mucho más allá. Representa una firme apuesta por la que todos, independientemente de nuestra edad, situación económica o personal, podamos disfrutar de las mismas oportunidades.

A continuación, se enumeran los 7 principios en los se sustenta este método.

**1er Principio: Uso equiparable.** El diseño es útil y vendible a personas con diversas capacidades.



**2º Principio: Uso flexible.** El diseño se acomoda a un amplio rango de preferencias y habilidades individuales.



**3º Principio: Simple e intuitivo.** El uso del diseño es fácil de entender atendiendo a la experiencia, conocimientos, habilidades lingüísticas o grado de concentración actual del usuario.



**4º Principio: Información perceptible.** El diseño comunica de manera eficaz la información necesaria para el usuario, atendiendo a las condiciones ambientales o a las capacidades sensoriales del usuario.



**5º Principio: Con tolerancia al error.** El diseño minimiza los riesgos y las consecuencias adversas de acciones involuntarias o accidentales.



**6º Principio: Que exija poco esfuerzo físico.** El diseño puede ser usado eficaz, confortablemente y con un mínimo de fatiga.



**7º Principio: Tamaño y espacio para el acceso y uso.** Que proporcione un tamaño y espacio apropiados para el acceso, alcance, manipulación y uso, atendiendo al tamaño del cuerpo, la postura o la movilidad del usuario.



Desde que en el año 2004 la Unión Europea ratificara y matizara esta filosofía de diseño, se han llevado a cabo muchas iniciativas para promover el Diseño para Todos en distintos ámbitos, entre ellos, la ingeniería.

Con este proyecto se pretende poner un granito de arena, para conseguir que el desarrollo tecnológico se enfoque hacia toda la sociedad sin ningún tipo de exclusión social. El Sistema de Iluminación Interactivo se ha diseñado partiendo de los 7 estándares del Diseño para Todos.

Para poder diseñar un sistema que cumpla con todas las características enumeradas anteriormente, es imprescindible contar con el usuario final. Por ello, el Colegio San Rafael ha estado implicado desde el comienzo del proyecto, y sin su compromiso y colaboración, no hubiera sido posible el diseño y desarrollo de este TFG.

### 1.1.2 El colegio San Rafael. Presentación

El C.E.E Hospital San Rafael (véase Fig. 1), concertado con la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid, pertenece a la Orden de Hermanos de San Juan de Dios. El centro lleva desde 1976 ayudando a personas con discapacidades motoras y psíquicas en aspectos pedagógicos, motrices, de comunicación, psicológicas, salud, alimentación, aseo e higiene.



Fig. 1. C.E.E. San Rafael

Actualmente, el colegio acoge a 35 alumnos repartidos en 7 clases. Su programa se divide en tres etapas educativas:

- Educación Infantil (3-6 años)
- Educación Básica Obligatoria (6-16 años)
- Transición a la Vida Adulta (16-21 años)

El principal objetivo del centro es proporcionar una atención integral a sus alumnos, promoviendo su máximo desarrollo mediante una intervención transdisciplinar:

- Diseñando situaciones de enseñanza-aprendizaje que permitan al alumno obtener el mayor grado de desarrollo posible.
- Encaminando su actuación a incrementar su bienestar físico y su calidad de vida.

Para cumplir con estos objetivos, el colegio dispone de personal altamente cualificado (fisioterapeutas, psicólogos, profesores de educación especial...) y los medios materiales necesarios para ello (taller de juego, taller de cuentos, taller de ocio autónomo...).

El año pasado, el personal del centro quiso reforzar su oferta educativa con una sala Snozelen (véase Fig. 2). Con esta sala de estimulación se pretende crear ambientes con estímulos controlados, que favorezcan el “despertar sensorial” de sus alumnos, facilitando así los aprendizajes básicos.

Las salas Snozelen disponen de equipos que facilitan la estimulación, a través de olores, luces, sonidos, movimientos vibratorios.... El inconveniente de estos sistemas es su elevado precio, que unido a la falta de medios económicos del colegio, hace muy complicada su implantación.



Fig. 2. Sala Snozelen del Colegio San Rafael

Como solución a esta problemática, varios alumnos de la Universidad Carlos III han dedicado su Trabajo Fin de Grado (TFG) a poner en marcha esta sala de estimulación. El Colegio San Rafael ya cuenta con un Coche Teledirigido, un Panel Multisensorial, y ahora, con el Sistema de Iluminación Interactivo que conforma el presente TFG.

### 1.1.3 Ayudas técnicas en el mercado similares a la desarrollada

El proyecto se va a ubicar dentro de una sala Snozelen. En el mercado hay numerosos productos enfocados a salas de estimulación, entre ellos, el Sistema de Iluminación Interactivo ROMPA [1]. Recibe el mismo nombre que el proyecto que nos ocupa porque fue un referente al comienzo de este TFG y describe perfectamente la funcionalidad del sistema (el usuario interactúa con luces de colores).

El Sistema de Iluminación Interactivo ROMPA (véase Fig. 3) incluye un PC, 4 haces de luz de colores (rojo, amarillo, verde y rosa), un software, dos raquetas reflectantes y una alfombra reflectante.

Cuando se corta un haz de luz con la raqueta, se reproduce un sonido que se puede seleccionar con el software de entre: notas musicales, canciones populares o efectos y ritmos. El precio de este producto en el mercado es aproximadamente 9.100 €.



Fig. 3. Sistema de Iluminación Interactivo ROMPA

Otro fabricante, Oi Designs, ofrece productos de estimulación visual similares a las lámparas usadas en este trabajo, por ejemplo, fluorescentes de luz negra (véase Fig. 4) [2]. Su precio es 118,45 €.



Fig. 4. Fluorescente de luz negra

También se pueden adquirir proyectores (véase Fig. 5) semejantes a los punteros láseres: Bolas de espejo (Oi Designs) [3], Proyector de efectos acuáticos (ROMPA) [4] o Proyector láser (ROMPA) [5] entre otros. Estos sistemas de iluminación cuestan 124,32 €; 281,87 € y 205,69 € respectivamente.

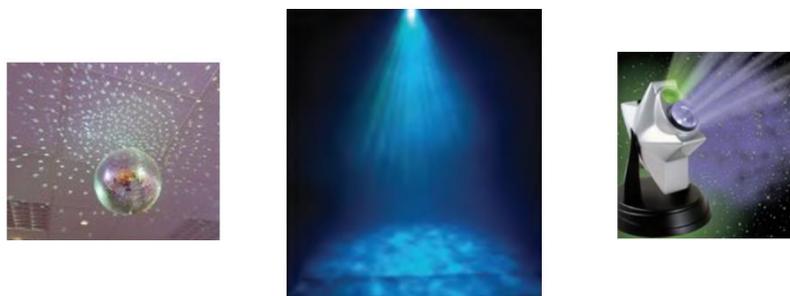


Fig. 5. Bola de espejo, Proyector de efectos acuáticos y Proyector Láser (de izquierda a derecha)

Todos estos productos son fundamentales para el desarrollo de personas con discapacidad pero excesivamente caros.

Con este TFG se pretende seleccionar lo mejor de cada uno de ellos y aunarlos en un solo sistema mucho más económico.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este TFG es desarrollar un producto que fomente la relación causa-efecto con luces y sonidos (estimulación audiovisual). Además, se ha comprobado que juegos con similares características, ayudan a mejorar la coordinación óculo-manual, la interacción, la motricidad, y las habilidades musicales y de escucha.

Para alcanzar estos objetivos, se va a diseñar (búsqueda de componentes electrónicos, selección de bloques funcionales...) e implementar un sistema de juego que conste de tres focos de colores, una raqueta receptora y un interfaz de usuario con reproducción/grabación de audio.

Se pretende que el Sistema de Iluminación Interactivo sea fácil de utilizar, eficaz en el aprendizaje de la relación causa-efecto y que su coste de fabricación no supere los 500 €.

## 1.3 Especificaciones del Sistema

Como ya se ha comentado en el apartado [1.1.3 Ayudas técnicas en el mercado similares a la desarrollada](#), el Sistema de Iluminación Interactivo ROMPA fue el punto de partida. Por ello, las especificaciones iniciales se marcaron en relación a este sistema.

En este capítulo de la memoria, se explica únicamente las premisas de las que se partió al comienzo del proyecto. En posteriores apartados, se comentará como se ha ido mejorando y adaptando el sistema a nuevas necesidades, sin renunciar a las especificaciones iniciales.

### 1.3.1 Especificaciones físicas

**Tamaño.** Los focos deben de llamar la atención de los niños, para ello, el diámetro de cada haz de luz debe ser mayor o igual que 30 cm.

**Color.** Cada foco deberá de ser de un color diferente así los niños podrán identificarlos claramente.

**Peso.** En el Colegio San Rafael disponen de falso techo, el cual no está diseñado para soportar grandes cargas, por lo que es importante que el sistema de iluminación no exceda los 5 Kg.

**Distancia entre focos.** Para que puedan participar en el juego dos o más niños en silla de ruedas, la distancia mínima entre focos deberá ser de 1 m.

**Número de focos.** Se comenzó trabajando con un diseño de cuatro focos aunque finalmente el colegio redujo su número a tan solo tres. Si el sistema dispusiera de un número elevado de focos, podría suponer un exceso de información para los alumnos del Colegio San Rafael, y por tanto, un perjuicio para ellos.

**Ligereza y robustez.** Puesto que la raqueta la van a utilizar niños no debe pesar más de 500 gr. Por otro lado, debido a las destrezas motoras limitadas de un buen número de los usuarios finales, el sistema tiene que ser capaz de aguantar impactos.

**Adaptabilidad.** En el Colegio San Rafael hay alumnos que pueden agarrar objetos, y otros, que no. Para adaptar la raqueta a todos ellos, debe de tener un diseño que permita un agarre y una sujeción (incluyendo fijación a silla de ruedas) fácil.

**Apariencia.** El sistema tiene que resultar atractivo para los alumnos del colegio.

### 1.3.2 Especificaciones eléctricas

**Instalación.** Los cuidadores del colegio quieren que el Sistema de Iluminación Interactivo se pueda usar en diferentes salas o aulas. Por ello, ningún dispositivo precisará de instalación eléctrica.

**Corriente.** Por motivos de seguridad, la corriente máxima de cada sistema será de 300 mA.

**Consumo.** El sistema completo no consumirá más de 1.5 W.

**Autonomía.** El Sistema de Iluminación Interactivo tendrá una autonomía de más de 5 horas.

## 1.4 Fases del proyecto

Las fases por las que fue atravesando el proyecto durante su diseño y construcción, quedan recogidas en la siguiente figura (Fig.6) que muestra el diagrama de Gantt del mismo.

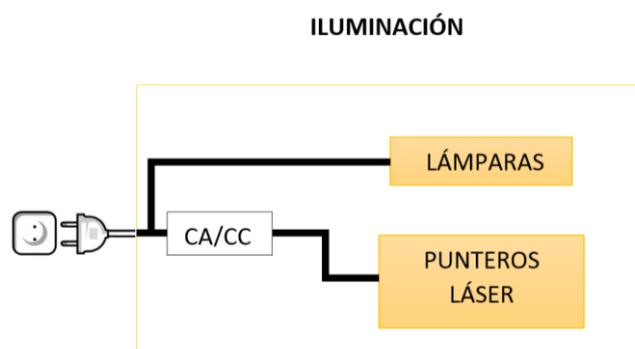


Fig. 6. aki va el diagrama de Gantt



## 1.5 Medios utilizados

El Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF) del Departamento de Tecnología Electrónica ha puesto a disposición todos los medios para que se pudiera desarrollar este TFG.

### Electrónica

Se han utilizado todo tipo de componentes electrónicos, desde los más básicos (resistencias, condensadores, leds, pulsadores...), hasta algunos más complejos, como el emisor y receptor de RF o el CI de grabación/reproducción de audio.

Las pruebas iniciales se realizaron en varias placas de pruebas, y posteriormente, toda la electrónica se pasó a seis placas de circuito impreso.

### Equipos electrónicos

Para comprobar el correcto montaje y funcionamiento de la electrónica del proyecto, se ha utilizado: fuente de alimentación, osciloscopio, generador de funciones y multímetro.

### Materiales/elementos de montaje y decoración

A continuación, se va a enumerar todo lo que se ha usado para construir el Sistema de Iluminación Interactivo:

- Lámina de madera
- Lámparas de papel
- Soportes para lámpara de techo
- Punteros láser
- Lámina de chapa
- Raqueta de playa
- Caja de madera
- Cajas para circuitos eléctricos/electrónicos de diferentes tamaños
- Tubos para cables
- Cable bipolar y unifilar
- Tornillos
- Clemas
- Abrazaderas
- Grapas para cable
- Láminas de goma eva de diferentes colores

### Herramientas y equipos de montaje

Para el ensamblado y montaje se han utilizado:

- Útiles de corte comunes (tijeras, alicates...)
- Regla y calibre
- Soldador
- Taladradora mano y de mesa.

- Tijeras para chapa
- Lima para chapa
- Lija para madera

### **Software**

Multisim de National Instrument. Para realizar todas las simulaciones previas al montaje.

Filter Pro de Texas Instrument. Herramienta de ayuda en el diseño de filtros electrónicos.

Orcad de Cadence. Programa de diseño de las placas de circuito impreso (esquemáticos y layouts).

## Capítulo 2. Diseño del sistema.

### 2.1 Diseño del sistema completo: visión general

El proyecto se divide en tres grandes bloques: sistema de iluminación, raqueta e interfaz de usuario.

#### Sistema de Iluminación

El bloque de iluminación consta de tres lámparas de luz: azul, verde y amarilla. La parte inferior de cada una de estas lámparas consta de una superficie de chapa a la que se ha unido un puntero láser. Al conjunto de cada lámpara con su láser se le va a llamar foco.

A su vez, los focos (véase Fig. 7) van unidos a una plataforma de madera sujeta al techo.

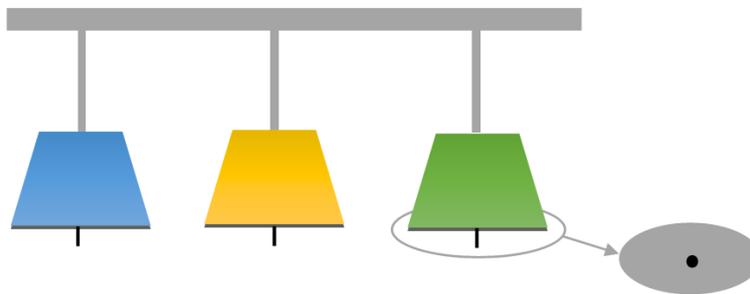


Fig. 7. Focos de colores

Además, el sistema incluye una alfombra roja para que las imágenes de los láseres (del mismo color que la alfombra) no se vean hasta que el niño coloque la raqueta bajo alguno de los focos.

#### Raqueta e Interfaz de Usuario

El bloque formado por la raqueta dispone de fotodiodos (véase Fig. 8) para detectar la luz de los láseres.

Por último, el interfaz de usuario consta de una caja a la que se le ha añadido todos los dispositivos necesarios para grabar/reproducir e informar del estado del sistema (un display, un pulsador azul, un pulsador amarillo, un pulsador verde, dos interruptores, un micrófono y dos altavoces).

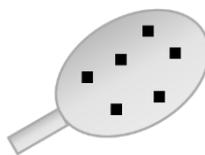


Fig. 8. Raqueta con fotodiodo

## Relación entre bloques

El bloque de iluminación se comunica ópticamente con el de la raqueta, y a su vez, la raqueta transmite la información al interfaz de usuario por radiofrecuencia (véase Fig. 9). El flujo de información es unidireccional.

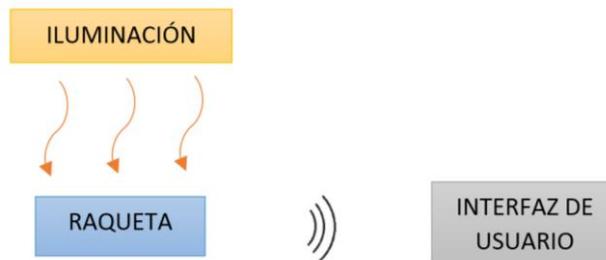


Fig. 9. Comunicaciones entre bloques

## Conexiones eléctricas

Mientras que la iluminación y el interfaz de usuario van conectados a la red eléctrica, la raqueta se alimenta con una batería (véase Fig. 10).



Fig. 10. Alimentación de cada bloque

### 2.1.1 Ejemplo de funcionamiento previsto

En el interfaz de usuario se podrá seleccionar entre dos modos de funcionamiento: grabación y reproducción.

#### Grabación

En este modo se grabarán las palabras, frases, canciones...que más tarde sonarán durante el juego.

Para realizar la grabación simplemente habrá que seleccionar con un interruptor este modo de funcionamiento y mantener pulsado el botón cuyo color se corresponda con el del foco que se desea grabar. Por ejemplo, si se quisiera que en el foco verde se escuchará la frase *“el sol nos alumbra por el día”*, se deberá apretar el pulsador verde mientras decimos esta frase.

## Reproducción

El Modo Reproducción consiste en que los alumnos del Colegio San Rafael al acercarse a cada uno de los focos, vayan descubriendo los efectos audiovisuales “que esconden”.

A continuación, se explica paso a paso un caso práctico:

- El juego comenzará con las tres lámparas de colores iluminadas (Fig. 11).

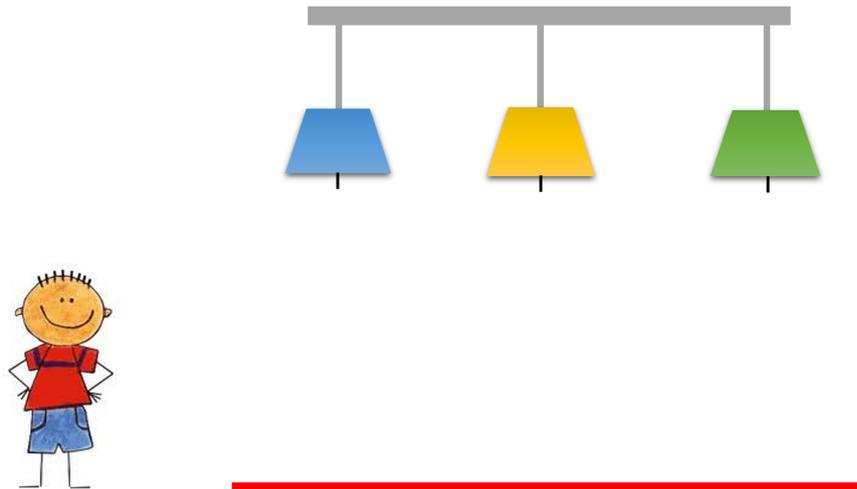


Fig. 11. Inicio Modo Reproducción

- El niño alentado por sus llamativos colores, se aproximará con la raqueta hacia una de las lámparas, por ejemplo, la azul.
- En el momento en que el niño sitúe la raqueta bajo la lámpara, se reproducirá un sonido (que previamente ha sido grabado por los cuidadores o incluso por los propios niños) y se proyectará (con un láser) una imagen sobre la raqueta (Fig. 12).

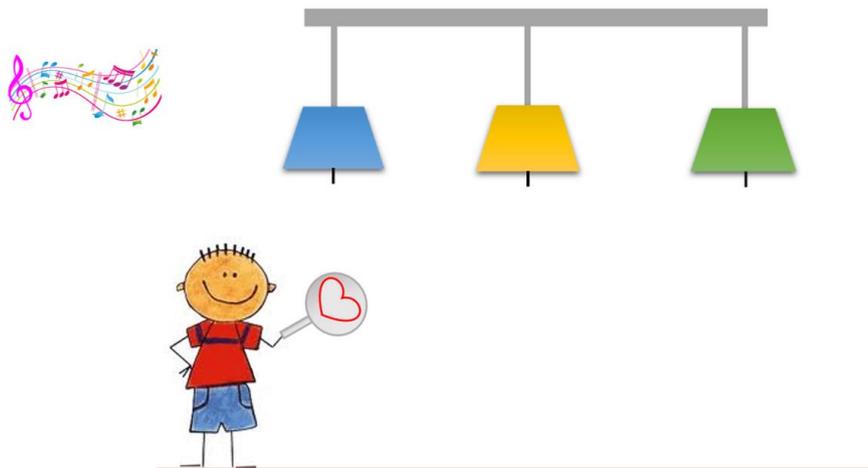


Fig. 12. Efectos audiovisuales del foco azul

- Cuando el niño retire la raqueta, cesarán los efectos audiovisuales aunque la grabación para el foco azul no haya terminado de reproducirse (Fig. 13).

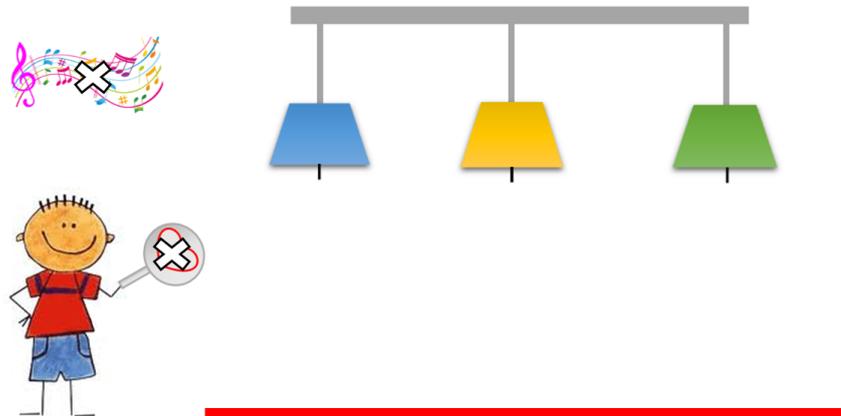


Fig. 13. Cese de los efectos audiovisuales

- Este mismo proceso se repetirá en los otros dos focos (Fig. 14 y Fig. 15). Tanto el audio como las imágenes son totalmente seleccionables y diferentes en cada foco.



Fig. 14. Efectos audiovisuales del foco amarillo



Fig. 15. Efectos audiovisuales del foco verde

Por último, aclarar dos posibles situaciones durante el juego:

- 1) Si la grabación finalizara pero el niño continuase bajo el foco, la canción comenzaría a reproducirse de nuevo desde el principio.
- 2) Si el niño estuviera en el foco verde (o en cualquier otro), se retirara y volviera de nuevo al mismo foco, el sistema funcionaría perfectamente. Es decir, no hay ninguna secuencia de colores que no se pueda ejecutar.

## 2.2 Diseño del sistema de iluminación

El sistema de iluminación está dividido en dos bloques: lámparas y proyectores láser. Aunque ambos se encargan de los efectos visuales del sistema, en lo que se refiere a la electrónica, son totalmente independientes (véase Fig. 16).

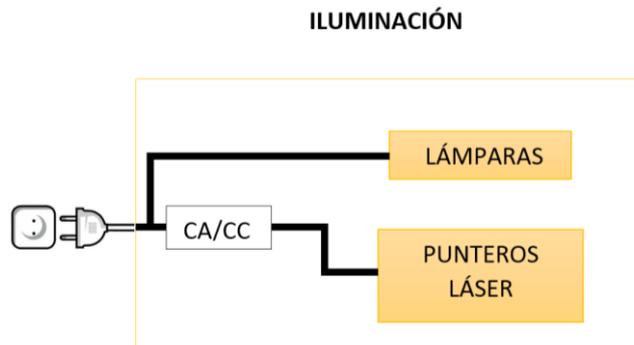


Fig. 16. Bloques del sistema de iluminación

## Elección de los bloques del Sistema de Iluminación

El Sistema de Iluminación Interactivo ROMPA ([véase apartado 1.1.3](#)) cuenta con focos de colores que proyectan haces de luz de gran tamaño. Durante mucho tiempo ([véase apartado 1.4](#)) se busco equipos de iluminación con los que crear un efecto parecido, pero no se encontró ninguno que se adaptase a las especificaciones requeridas. A continuación se enumeran los inconvenientes que presentaban dichos equipos:

- Debido a la altura de los techos del Colegio San Rafael se dispersaba mucha luz ([6], [7], [8], [9]).
- No emitían suficiente luz como para llamar la atención de los niños ([10], [11], [12], [13]).
- Su potencia óptica era tan elevada que se podía poner en riesgo la salud de los usuarios ([14]).
- Su precio rondaba alrededor de los 1000 € por foco y estaban destinados a otro tipo de aplicaciones ([15], [16], [17]).

Finalmente, los haces de luz se sustituyeron por lámparas de colores y punteros láser por los siguientes motivos: su coste económico era mucho más bajo, el sistema era atractivo para los usuarios, y además, se había conseguido añadir un efecto visual (imágenes láser) respecto al diseño original.

### Bombillas de colores

En el sistema de iluminación se utilizan tres bombillas de colores de bajo consumo (véase Fig. 17). Sus características más importantes son:

- Alimentación a 220-240 V/ 50 Hz.
- Consumo de 11 W.
- Duración de 5000 horas.
- Casquillo de rosca grande (E27).
- Bombilla clase A.
- Cumple con la normativa EN60968.

Los motivos por los que se han seleccionado estas bombillas son: su reducido consumo y porque, al tratarse de bombillas muy comunes, no será complicado encontrar recambios cuando se fundan.



Fig. 17. Bombillas de colores

## Punteros láser

Se han escogido los punteros láser cuyas imágenes (seleccionables con una ruleta) son más nítidas y fáciles de identificar para los niños (véase Fig. 18). Los diodos láser que incluyen son rojos, ya que los verdes y los violetas emiten demasiada potencia óptica y podrían dañar la vista de los niños.



Fig. 18. Punteros láser

### 2.2.1 Subsistema de control de láseres

Desde el punto de vista del diseño electrónico, en este bloque se envía información sobre si el niño estaba o no bajo el foco, y la mejor opción para ello, es modular la luz.

Se decidió modular la luz de los láseres, y no la de las lámparas, principalmente por tres motivos:

- Los láseres permiten reducir el área de envío de información justo a la zona por debajo del foco (muy importante en la fase de recepción).
- Facilitan la recepción porque emiten mucha potencia óptica.
- Es más fácil la modulación de un láser que la de una serie de lámparas.

Para generar la señal cuadrada que modula a los láseres se utiliza un LM555 en modo astable. Antes de explicar este modo de funcionamiento, se va a nombrar brevemente el patillaje del 555 (Fig. 19):

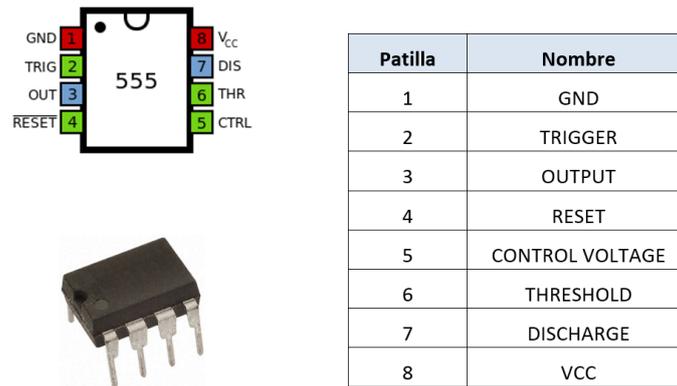


Fig. 19. Patillaje del 555

### LM555 en modo estable

El funcionamiento del 555 en modo estable depende de la carga y descarga del condensador  $C_1$  (véase Fig. 20). Cuando la tensión en la patilla 7-6 crece desde  $\frac{1}{3}V_{CC}$  hasta  $\frac{2}{3}V_{CC}$ , el condensador se carga a través de  $R_1$  y  $R_2$ . Por el contrario, cuando la tensión decrece de  $\frac{2}{3}V_{CC}$  a  $\frac{1}{3}V_{CC}$ ,  $C_1$  se descarga mediante  $R_2$ .

De este comportamiento deducimos que:

- La frecuencia de la señal cuadrada varía con  $R_1$ ,  $R_2$  y  $C_1$ .

$$T_{ON} = 0.693(R_1 + R_2)C_1$$

$$T_{OFF} = 0.693 R_2 C_1$$

$$T = T_{ON} + T_{OFF} = 0.693(R_1 + 2R_2)C_1$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

- El ciclo de trabajo de la salida depende de la relación entre  $R_1$  y  $R_2$ .

$$d = \frac{T_{ON}}{T} = \frac{0.693(R_1 + R_2)C_1}{0.693(R_1 + 2R_2)C_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}$$

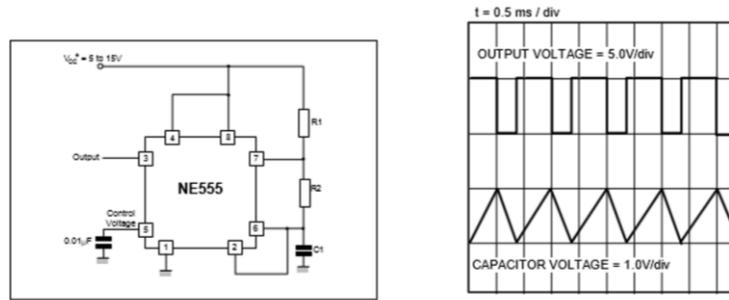


Fig. 20. Esquemático y señales del 555 modo astable (datasheet)

### Frecuencias de modulación

Las frecuencias de modulación permiten que la raqueta identifique a cada láser. Durante el diseño del sistema, las frecuencias se han ido modificando para obtener los mejores resultados posibles en la recepción. A continuación, se muestra una tabla (Tabla 1.) con las frecuencias definitivas:

Color del foco	Frecuencia de modulación (kHz)
Azul	2.5
Amarillo	4.5
Verde	6.5

Tabla 1. Asignación de frecuencias de modulación

Lo primero que se decidió es que el ciclo de trabajo fuera de aproximadamente el 60%, como este parámetro de la señal se modifica al llegar a la raqueta, no convenía que fuera ni muy grande ni muy pequeño. El ciclo de trabajo depende solo de  $R_1$  y  $R_2$ , así que se impuso que  $R_1$  valiese 1 K $\Omega$ :

$$0.6 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}$$

$$R_1 + R_2 = 0.6 (R_1 + 2R_2)$$

$$R_1 - 0.6R_1 = 1.2R_2 - R_2$$

$$R_2 = \frac{0.4}{0.2} R_1 = \frac{0.4}{0.2} \cdot 1 \text{ K}\Omega = 2 \text{ K}\Omega$$

Al no existir resistencias comerciales de 2 K $\Omega$ , se ha utilizado una de 1.8 K $\Omega$  (ver Tabla 2.)

Resistencia (KΩ)	Ciclo de trabajo (%)
1.8	61%
2.2	59%

Tabla 2. Relación entre R2 y el ciclo de trabajo

Una vez fijados los valores de  $R_1$  y  $R_2$ , las frecuencias de modulación dependen solo de  $C_1$ :

- Frecuencia de 2.5 kHz

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

$$C_1 = \frac{1.44}{(1000 + 2 \cdot 1800) f}$$

$$C_1 = \frac{1.44}{(1000 + 2 \cdot 1800) 2500} = 125 \text{ nF}$$

- Frecuencia de 4.5 kHz

$$C_1 = \frac{1.44}{(1000 + 2 \cdot 1800) 4500} = 69 \text{ nF}$$

- Frecuencia de 6.5 kHz

$$C_1 = \frac{1.44}{(1000 + 2 \cdot 1800) 6500} = 48 \text{ nF}$$

Al igual que se hizo en el caso de las resistencias, se buscaron los valores comerciales que más se acercaban a los calculados teóricamente. En la siguiente tabla (Tabla 3.) se muestran las frecuencias de modulación definitivas de los láseres:

Frecuencia requerida (kHz)	Valor teórico de C1 (nF)	Valor comercial de C1 más cercano (nF)	Frecuencia definitiva con los valores comerciales (KHz)
2.5	125	120	2.6
4.5	69	68	4.6
6.5	48	47	6.6

Tabla 3. Relación entre C1 y las frecuencias de modulación

## Simulaciones

En las siguientes figuras (Fig. 21, Fig. 22 y Fig. 23) se muestran los resultados de las simulaciones obtenidos con Multisim 12 para los tres valores seleccionados de  $C_1$ . Aclarar, que en adelante todos los resultados que tengan que ver con las simulaciones se harán con 2.5 kHz, 4.5 kHz y 6.5 kHz, y los experimentales, con 2.6 kHz, 4.6 kHz y 6.6 kHz. Esto se debe a que las simulaciones se realizaron antes de ir al laboratorio.

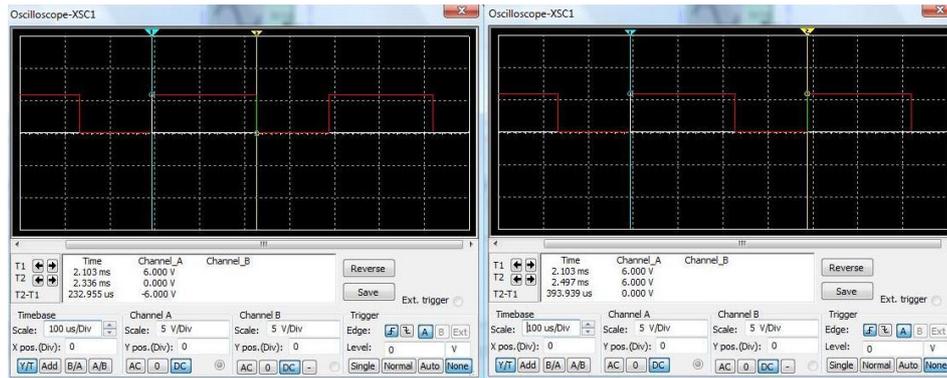


Fig. 21. Salida del 555 en modo astable con  $C_1 = 120$  nF (simulación)

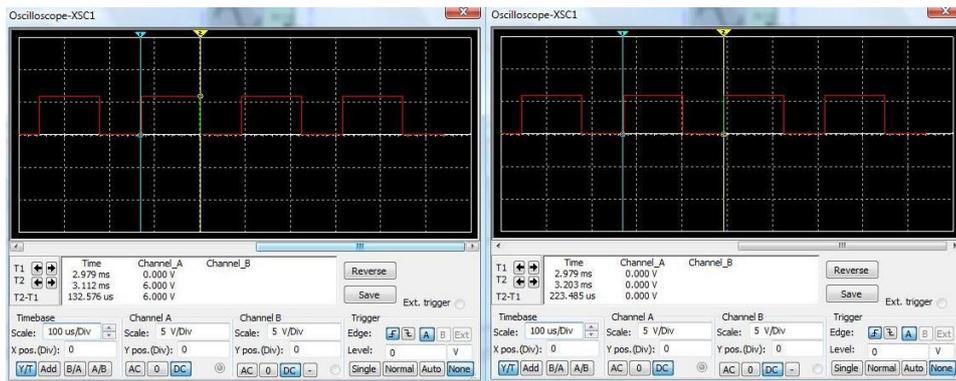


Fig. 22. Salida del 555 en modo astable con  $C_1 = 68$  nF (simulación)



Fig. 23. Salida del 555 en modo astable con  $C_1 = 47$  nF (simulación)

Con las medidas de  $T_{ON}$  y  $T$  que dan los cursores en Fig. 21, Fig. 22 y Fig. 23, se ha comprobado que el ciclo de trabajo (d) y la frecuencia (f) coinciden con los calculados teóricamente (véase Tabla 4.). Las diferencias que se observan se deben a la posición de los cursores.

	Resultados de las simulaciones		Cálculo del ciclo de trabajo y la frecuencia (valores de las simulaciones)		Valores teóricos	
	Ton (us)	T (us)	d= Ton/T	f=1/T (kHz)	d	f (kHz)
C1=120 nF	232.955	393.939	0.59	2.5	0.61	2.6
C1= 68 nF	132.576	223.485	0.59	4.5	0.61	4.6
C1= 47 nF	94.697	157.197	0.61	6.4	0.61	6.6

Tabla 4. Comparativa entre los valores teóricos y los obtenidos de las simulaciones

### Laboratorio

En las siguientes figuras se muestran las salidas del 555 para  $C_1=120$  nF (Fig. 24),  $C_1=68$  nF (Fig. 25) y  $C_1=47$  nF (Fig. 26).

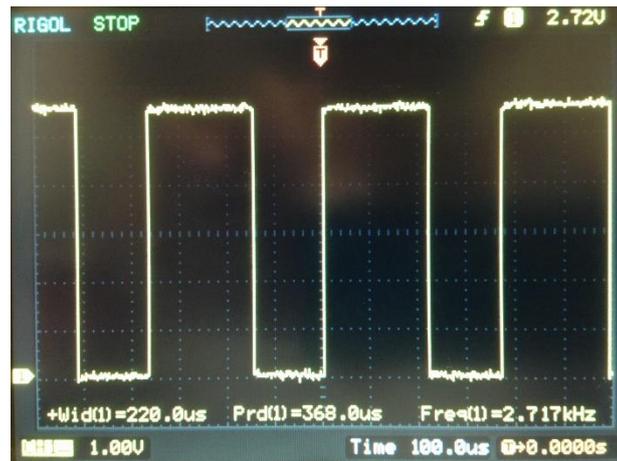


Fig. 24. Salida del 555 en modo astable con  $C_1=120$  nF (laboratorio)

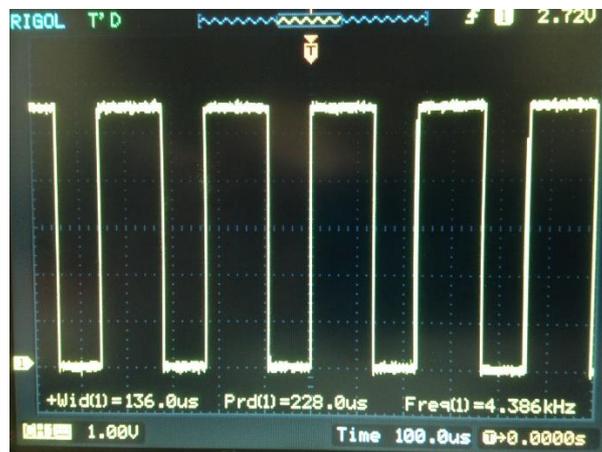


Fig. 25. Salida del 555 en modo astable con  $C_1=68$  nF (laboratorio)

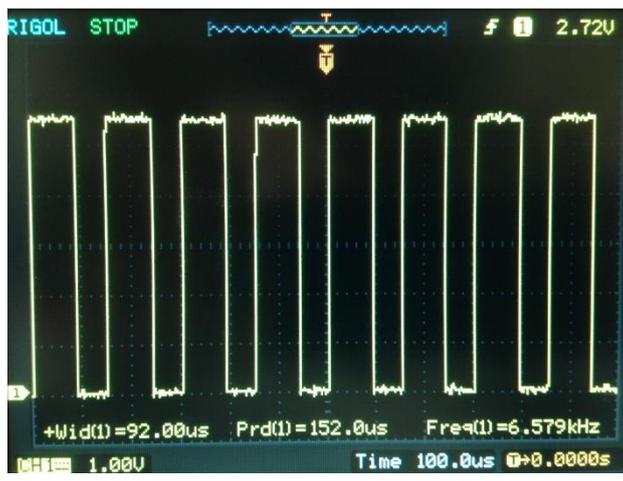


Fig. 26. Salida del 555 en modo astable con C1= 47 nF (laboratorio)

**Alternativas de diseño**

Se podría haber generado la onda cuadrada utilizando otro circuito, como por ejemplo, un oscilador de relajación (multivibrador astable) con un comparador. En este caso, al igual que con el 555, su funcionamiento también depende de la carga y descarga de un condensador (C en Fig. 27):

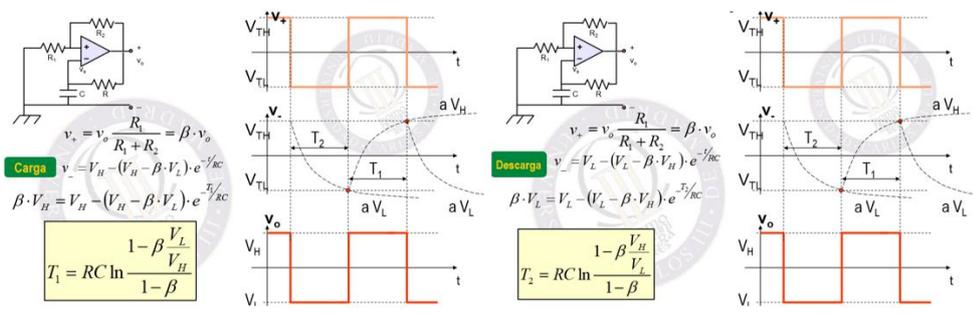


Fig. 27. Oscilador de relajación .

Finalmente se optó por el 555 porque es un temporizador, y por tanto, su función está más enfocada a nuestra aplicación. Además, el 555 es un CI muy común, de coste económico reducido, bajo consumo, un amplio rango de tensiones de alimentación y una corriente de salida relativamente alta (es importante porque va a alimentar a un láser). En la Tabla 5. se muestran las características más importantes del LM555.

Tensión de alimentación (V)		Consumo con $V_{cc}=5V$ y $R_L=\infty$ (mA)		Corriente de salida máxima (mA)
Mín.	Máx.	Typ.	Máx.	
4.5	16	3	6	200

Tabla 5. Características del LM555

## 2.2.2 Polarización del láser

El puntero láser se adquirió tal y como se ha mostrado en Fig. 18, y por tanto, se tuvo que desmontar la estructura completa para saber cómo funcionaba mecánicamente y cómo estaba polarizado el diodo láser.

El circuito electrónico que gobierna el funcionamiento del puntero consta únicamente de una resistencia de  $56 \Omega$ , y lógicamente, el diodo láser. La resistencia se utiliza simplemente para regular la corriente que circula por el láser, y por tanto, la cantidad de luz que emite. En la siguiente figura (Fig. 28), podemos ver dos gráficas de cómo funciona un láser en términos generales:

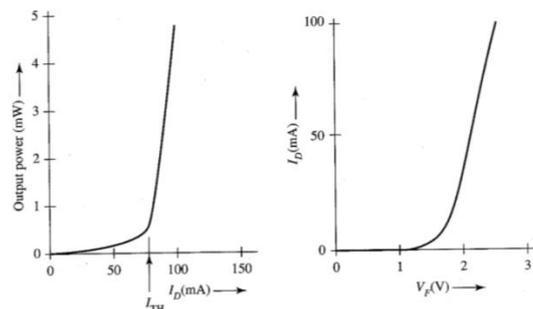


Fig. 28. Funcionamiento de un diodo láser

En la imagen izquierda de Fig. 28 se observa que con corrientes pequeñas el láser se comporta como un led. La potencia óptica crece linealmente con la corriente pero la pendiente de la recta (denominada responsividad en los led) no es muy grande. En cambio, a partir de un determinado nivel de intensidad eléctrica ( $I_{TH}$  = corriente umbral del láser), la emisión de luz se dispara y deja de depender de la corriente.

Por otro lado, en la imagen derecha se ve que es necesario un nivel mínimo de tensión para que el diodo láser funcione. Una vez superado este umbral, al aumentar la tensión se incrementará la corriente, primero tímidamente y luego de una manera más brusca.

Por tanto, para obtener la máxima potencia óptica, hay que alimentar el láser con una tensión lo suficientemente alta como para que la corriente supere  $I_{TH}$  (corriente umbral).

Como se ha modulado cada láser su funcionamiento es el siguiente:

- Cuando la salida del 555 esté a nivel bajo, la tensión y la corriente en el láser será cero, y por tanto, no estará emitiendo.

- Cuando la salida del 555 esté activa a nivel alto, la tensión en el láser será todo lo grande que se necesite para que  $I_D \geq I_{TH}$ , y por tanto, el láser emitirá la máxima potencia óptica.

### Alternativas de diseño

El circuito de polarización de los láseres es el más sencillo posible, si bien es cierto que otros más complejos tienen mejores características, para esta aplicación basta con una sola resistencia para que el sistema funcione perfectamente. En la tabla subyacente se incluyen los esquemáticos y características más relevantes de otros circuitos de polarización:

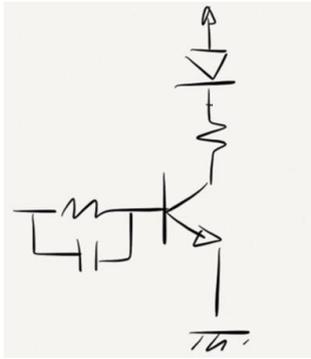
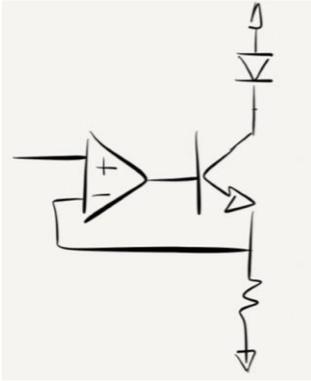
Nombre	Esquemático	Características
Driver con un transistor		<p>La resistencia de la base permite controlar la corriente por la base, y por tanto, por el láser.</p> <p>Podemos forzar al transistor a trabajar en saturación con la resistencia del colector.</p> <p>El funcionamiento del circuito es independiente de la <math>\beta</math> del transistor.</p> <p>El sistema es lento, pero con el condensador de la entrada podemos mejorarlo.</p>
Driver con un amplificador operacional		<p>El amplificador operacional fija la tensión de su entrada no inversora en la resistencia.</p> <p>El transistor permite llevar más corriente al láser, ya que la corriente de salida del A.O. es muy baja.</p>

Tabla 6. Posibles circuitos de polarización del diodo láser

### 2.2.3 Sistema de alimentación

Como se vio al comienzo de este apartado, las bombillas están alimentadas en alterna y los láseres en continua.

Para poder trabajar con estos dos tipos de tensión se ha utilizado un cargador de ordenador de 65 W de la marca Trust. La entrada de dicho convertidor se conecta directamente a las bombillas, y la salida, a un regulador de tensión. De la tensión de salida de este regulador y de las características del diodo láser depende la cantidad de luz emitida (véase Fig. 18).

En el caso desarrollado, como no se tenía ningún dato sobre el diodo láser, se determinó experimentalmente la tensión a partir de la cual se emitía la máxima potencia óptica. En el laboratorio se comprobó que a partir de 5.5 V se producía un pico de luz en el láser, y además, se midió su intensidad (utilizando una resistencia de senseo de 10  $\Omega$ ) para distintos valores de tensión. Con estas medidas se confirmó que a 5.5 V la corriente en el láser coincide con su valor umbral ( $I_{TH}$ ):

- De 5 a 5.4 V la corriente en el láser crece tímidamente (véase Fig. 29)

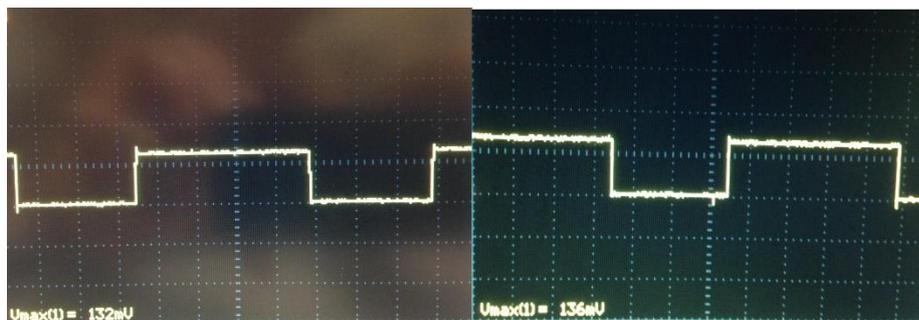


Fig. 29. Tensión en la resistencia de senseo con 5 V y 5.4 V de alimentación (de izquierda a derecha)

- En 5.5 V la intensidad la intensidad se duplica (véase Fig. 30)



Fig. 30. Tensión en la resistencia de senseo con 5.5 V de alimentación

Conocido este dato, se puede determinar las características que debería tener el regulador de tensión:

- Tensión de entrada de 18 V (tensión de salida del convertidor CA/CC)
- Tensión de salida de 6 V (con 5.5 V estamos justo en límite entre los dos modos de funcionamiento del láser)
- Corriente mínima de salida de 200 mA (consumo del sistema de iluminación)

El valor de la tensión de salida supuso un problema a la hora de seleccionar el regulador, ya que normalmente dan 5 ó 6.5 V, pero no 6 V. Además, una de las características que se quiso que tuviera el regulador es que fuera conmutado, porque son más eficientes y disipan menos calor.



Fig. 31. Regulador de tensión conmutado TSRN 1-24 50 SM

El regulador conmutado que se ha seleccionado es el TSRN 1- 2450 SM (véase Fig. 31) . A continuación, se muestra una tabla (Tabla 7) con las características más relevantes del dispositivo:

Rango de tensión de entrada (V)	Tensión de salida (V)		Corriente máxima de salida (A)	Eficiencia (%)		Tipo de montaje
	Nominal	Rango de ajuste		Vin (mín.)	Vin (máx.)	
6.5-42	5	2.5- 8	1.0	91.5	83	SMD

Tabla 7. Características del TSRN 1- 2450 SM

En Fig. 32 se muestra el esquema de conexión del regulador para obtener 5 V (tensión nominal). En el circuito desarrollado la tensión de entrada no supera los 36 V y no es necesario utilizar el condensador  $C_1$ . La patilla de On/Off se ha dejado libre para que el TSRN 1- 2450 SM siempre este activo.



Fig. 32. Esquema de conexión del TSRN 1-2450 SM (datasheet)

Tal y como se ve en Fig.33, la tensión es ajustable. Para modificar la salida solo se tiene que añadir una resistencia entre la patilla 6 y la 7,9 . El valor de dicha resistencia se puede calcular a partir de la tabla que se muestra a continuación:

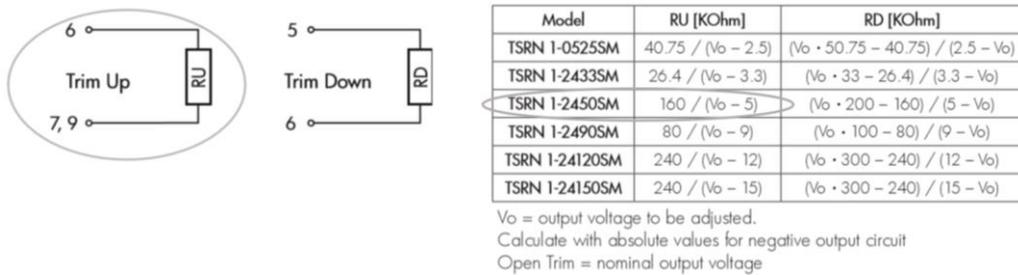


Fig. 33. Conexión y tabla de valores para ajustar la tensión de salida (datasheet)

$$RU (K\Omega) = \frac{160}{(V_o - 5)} = \frac{160}{(6 - 5)} = 160 K\Omega \approx 150 K\Omega$$

### Resultados en el laboratorio.

Para proteger el bloque de iluminación se ha incluido a la entrada del convertidor CA/CC un fusible de acción rápida 0034.1508 de Schurter. Además, ha sido necesario añadir a la salida del regulador un condensador de 100 µF para eliminar picos de tensión en la salida de los LM555 (véase Fig. 34).



Fig. 34. Picos de tensión en la salida del 555

## 2.3 Diseño de la raqueta.

La raqueta es la encargada de recibir e interpretar la información procedente del Sistema de Iluminación.

Del apartado anterior se sabe que a la raqueta le llegan tres señales cuadradas (una por cada foco) a diferentes frecuencias, ahora toca determinar qué hacer con ellas.

La raqueta consta de 6 bloques (véase Fig. 35) que permiten convertir estas señales en un valor de continua que identifique a cada foco:

- Sensado y acondicionamiento de la señal
- Filtrado
- Comparador
- Conformador de pulsos
- Monoestable
- Integrador
- Comparador triple
- Transmisor de radiofrecuencia
- Detector de batería baja

Todo el conjunto está alimentado por cuatro pilas de 1.5 V y tres reguladores de tensión de tensión que nos dan +5 V,- 5V y 3.3 V

#### BLOQUE RECEPTOR

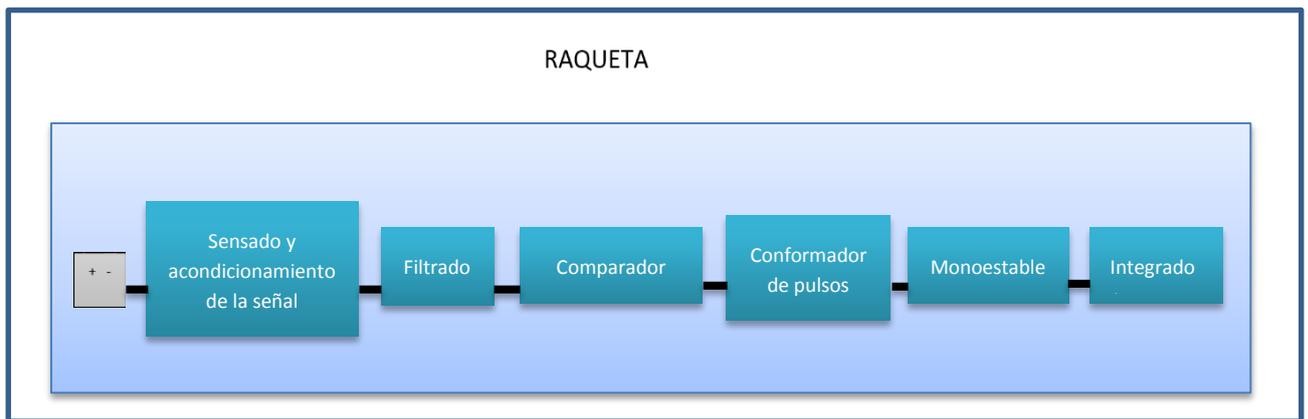


Fig. 35. Diagrama de bloques de la raqueta

### 2.3.1 Sensado y acondicionamiento de la señal

Este primer bloque es el encargado de recibir la luz y transformarla en una magnitud eléctrica.

Cuando la luz incide sobre el fotodiodo BPW34 (polarizado en inversa), éste genera una corriente de cátodo a ánodo proporcional a la luz recibida. Dicha corriente la transformamos en tensión con un convertidor corriente-tensión.

En la siguiente figura (Fig. 36), se observa que el amplificador operacional está realimentado negativamente, lo que implica que  $V^+ = V^-$  e  $I^+ = I^- = 0$ . Partiendo de estos datos, se sabe cómo varía la tensión de salida en función de la corriente fotogenerada:

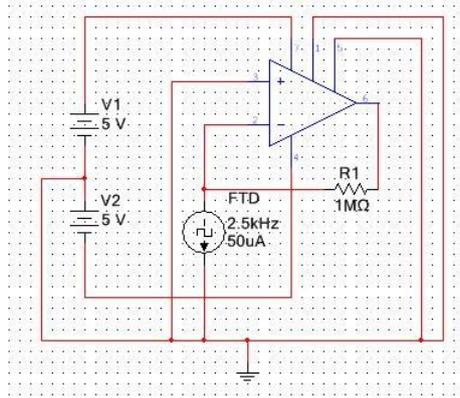


Fig. 36. Esquemático del convertidor corriente tensión

$$I_{foto} = -\frac{V^+ - V_0}{R_1} = -\frac{V^- - V_0}{R_1} = -\frac{0 - V_0}{R_1} = \frac{V_0}{R_1}$$

$$V_0 = I_{foto} \cdot R_1$$

De la ecuación anterior, se deduce que la relación entre  $V_0$  y  $I_{foto}$  depende exclusivamente del valor de  $R_1$ , lo que permite ajustar muy fácilmente la ganancia del circuito:

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta I_{foto}} = R_1$$

## Simulaciones

En la siguiente figura (Fig. 37) se muestra la salida del convertidor corriente tensión en el caso en el que se detectara el láser modulado a 2.5 kHz. Para ello, se tuvo que sustituir el fotodiodo por una fuente de corriente y seleccionar una ganancia:  $I_{foto} = 50 \mu\text{A}$  y  $R_1 = 1 \text{M}\Omega$  (véase Fig. 36).

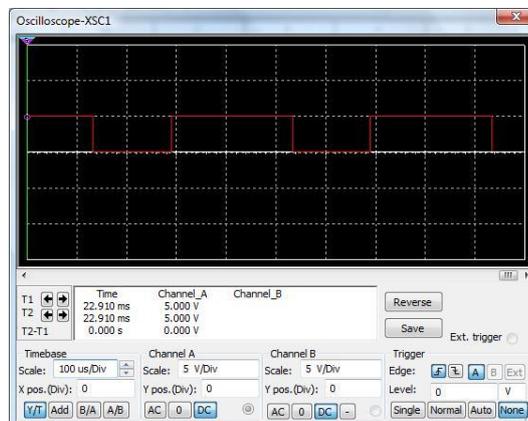


Fig. 37. Salida del convertidor corriente tensión para 2.5 kHz

En la figura anterior se puede observar que la tensión en la salida es  $10^6$  veces la corriente de entrada (ganancia  $R_1$ ).

### Laboratorio

En la primera prueba en el laboratorio, como en las simulaciones, se utilizó un único fotodiodo. Desde el primer momento se identificó que en la luz ambiente había una fuerte componente continua y sinusoidal a 100 Hz (véase Fig. 38).

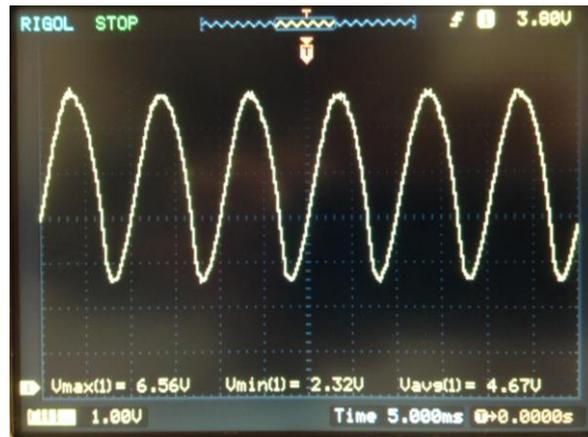


Fig. 38. Luz ambiente detectada en el laboratorio por un fotodiodo

Como la luz ambiente (ruido) no podía tener una magnitud mayor a la de la señal de los láseres, se añadió un condensador de desacoplo de 100 nF para minimizar los efectos de la “luz dominante”.

Por otro lado, para seleccionar el número de fotodiodos, se comprobó el efecto de uno solo de ellos en distintas ubicaciones de la raqueta. Con estas pruebas (véase Fig. 39) se determinó que cada BPW34 cubría un área de detección de aproximadamente 10 cm de diámetro y que aquellos situados en el centro de la raqueta detectaban menos la luz (debido a la forma de las imágenes de los láser). Finalmente, se han utilizado 16 fotodiodos conectados en paralelo para sumar la corriente fotogenerada por cada uno de ellos.



Fig. 39. Pruebas en el laboratorio para determinar el número de fotodiodos

En la Fig. 40 se muestra como, incluso con todos los fotodiodos, el condensador desacoplo elimina la señal continua y atenúa la alterna de los fluorescentes.

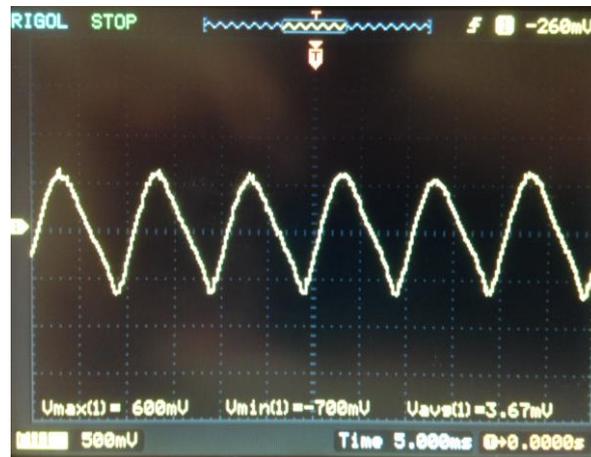


Fig. 40. Efecto del condensador de desacoplo

Las siguientes figuras (Fig. 41, Fig. 42 y Fig. 43) se corresponden con la salida del convertidor corriente tensión (incluyendo el condensador y todos los fotodiodos) cuando la raqueta se sitúa bajo el foco azul (2.6 kHz), el amarillo (4.6 kHz) o el verde (6.6 kHz).



Fig. 41. Salida del convertidor corriente tensión (2.6 kHz)



Fig. 42. Salida del convertidor corriente tensión (4.5 kHz)

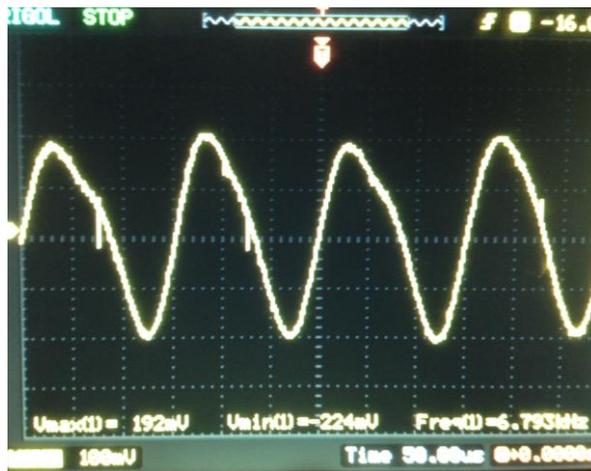


Fig. 43. Salida del convertidor corriente tensión (6.6 kHz)

Las señales anteriores están muy deformadas debido al efecto de la luz ambiente. Estas señales se han utilizado para demostrar que siempre que la frecuencia permanezca intacta, el sistema funciona correctamente.

Por último, indicar que no se pretende que este bloque sea de filtrado, solo se han eliminado las frecuencias por debajo de los 100 Hz para acondicionar la señal que le llega a la raqueta.

### Selección del fotodiodo

La eficiencia de los fotodiodos está relacionada con su responsividad, es decir, con la corriente eléctrica que entregan a la salida en relación con la potencia óptica de entrada. Lógicamente, cuanto mayor sea su responsividad, el fotodiodo será más sensible a la luz. Se debe tener en cuenta que la responsividad depende de la longitud de onda de la luz, es decir, puede ser que un fotodiodo detecte muy bien la luz azul, pero que no funcione bien con el láser seleccionado (luz roja). Algo parecido ocurrió con el fotodiodo RGB S7505-01 de Hamamatsu, que se presumía que iba a funcionar muy bien porque dispone de una salida sólo para medir la luz roja, pero resultó que con el BPW34 (fotodiodo común) se obtuvieron mejores resultados en el laboratorio.

La siguiente figura (Fig. 44) incluye todos los datos necesarios para calcular la responsividad del BPW34.



**FEATURES**

- Package type: leaded
- Package form: top view
- Dimensions (L x W x H in mm): 5.4 x 4.3 x 3.2
- Radiant sensitive area (in mm<sup>2</sup>): 7.5
- High photo sensitivity
- High radiant sensitivity
- Suitable for visible and near infrared radiation
- Fast response times
- Angle of half sensitivity:  $\varphi = \pm 65^\circ$
- Lead (Pb)-free component in accordance with RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



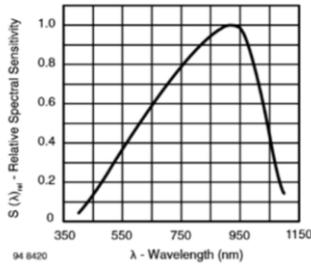
BASIC CHARACTERISTICS						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Breakdown voltage	$I_R = 100 \mu A, E = 0$	$V_{(BR)}$	60			V
Reverse dark current	$V_R = 10 V, E = 0$	$I_{r0}$		2	30	nA
Diode capacitance	$V_R = 0 V, f = 1 MHz, E = 0$	$C_D$		70		pF
Open circuit voltage	$V_R = 3 V, f = 1 MHz, E = 0$	$V_o$		25	40	pF
Temperature coefficient of $V_o$	$E_e = 1 mW/cm^2, \lambda = 950 nm$	$TK_{V_o}$		350		mV/K
Short circuit current	$E_e = 1 mW/cm^2, \lambda = 950 nm$	$I_{sc}$		-2.6		mV/K
Temperature coefficient of $I_{sc}$	$E_A = 1 kV$	$TK_{I_{sc}}$		70		$\mu A$
Reverse light current	$E_e = 1 mW/cm^2, \lambda = 950 nm$	$I_{ra}$		47		$\mu A$
Angle of half sensitivity	$E_A = 1 mW/cm^2, \lambda = 950 nm$	$\varphi$		0.1		%/K
Wavelength of peak sensitivity	$E_A = 1 kV, V_R = 5 V$	$\lambda_p$		75		$\mu A$
Range of spectral bandwidth	$E_e = 1 mW/cm^2, \lambda = 950 nm, V_R = 5 V$	$\lambda_{0.1}$		40	50	$\mu A$
Noise equivalent power		NEP		$\pm 65$		deg
Rise time	$V_R = 10 V, R_L = 1 k\Omega, \lambda = 820 nm$	$t_r$		900		nm
Fall time	$V_R = 10 V, R_L = 1 k\Omega, \lambda = 820 nm$	$t_f$		430 to 1100		nm

Fig. 44. Datos para calcular la responsividad del BPW34 (datasheet)

$$R = \frac{I_{foto}}{E_e \cdot A_d}$$

$$R = \frac{50 (\mu A)}{1 (mW/cm^2) \cdot 7.5 (mm^2)} = 0.67 (A/W)$$

Este valor se corresponde con una longitud de onda de 950 nm (responsividad máxima), pero el color rojo va desde 610 a los 780 nm. A partir de la Fig. 45 se calculó la responsividad mínima y máxima con la que se iba a trabajar:



Longitud de onda (nm)	Responsividad (%)	Responsividad (A/W)
610	0.5	$0.5 \cdot 0.67 = 0.34$ (Responsividad mínima)
980	0.88	$0.88 \cdot 0.67 = 0.59$ (Responsividad máxima)

Fig. 45. Responsividad máxima y mínima

**Selección del amplificador operacional**

Al escoger el amplificador operacional se tuvo en cuenta su slew rate y su rango de tensiones de alimentación.

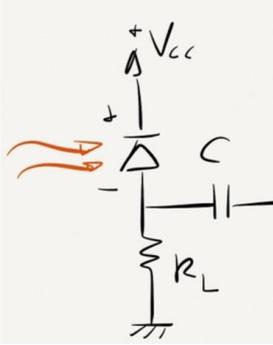
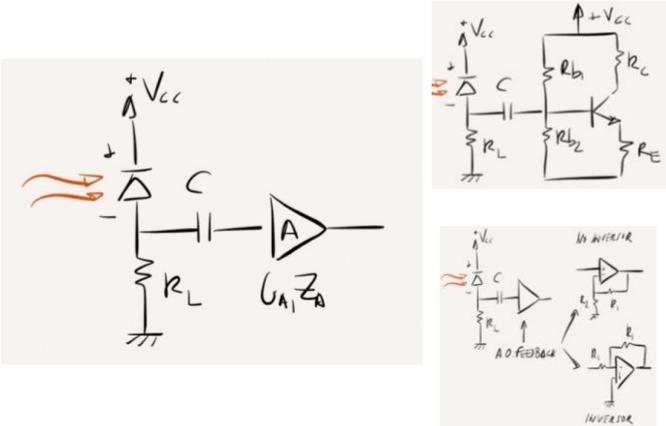
Buscando el dispositivo que mejor cumpliera estas características, se descubrieron los amplificadores operaciones "rail to rail", que son capaces de entregar a la salida la misma tensión que la de alimentación (importante cuando se trabaja con tensiones pequeñas). Se

probó el amplificador “rail to rail” LMC648 en el laboratorio, y efectivamente, con una alimentación de 5 V se obtenía a la salida exactamente 5 V. Pero al añadir el condensador de desacoplo, se eliminó el nivel de continua de la señal del fotodiodo, y como este tipo de amplificadores no tienen alimentación doble no se pudo utilizar.

Finalmente, se optó por el TL081.

### Alternativas de diseño

A continuación, se muestran algunas de las alternativas de diseño que se plantearon para este bloque:

Nombre	Esquemático	Características
Receptor sin preamplificación		<p>Circuito sencillo.</p> <p>Fotodiodo polarizado en inversa.</p> <p>Necesita condensador de desacoplo que afecta a la frecuencia de corte inferior.</p> <p>Si la ganancia es grande (<math>R_L</math> alta), el ancho de banda es muy bajo.</p>
Receptor con preamplificación		<p>Circuito sencillo.</p> <p>Fotodiodo polarizado en inversa.</p> <p>Amplio rango dinámico si <math>R_L</math> y <math>G_A</math> son moderada. Alta ganancia neta si <math>R_L</math> o <math>G_A</math> son altas.</p> <p>Ancho de banda moderado.</p> <p>Bajo ruido.</p>

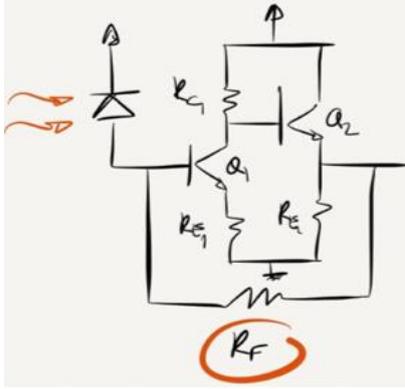
<p>Receptor con etapa de transimpedancia: Emisor común + Colector común</p>		<p>Circuito complicado. Fotodiodo polarizado en inversa.</p> <p>Ganancia fijada con RF. Amplio rango dinámico. Alta ganancia neta.</p> <p>Alto ancho de banda, incluso con una ganancia elevada.</p> <p>Bajo ruido.</p>
---	--	---

Fig. 46. Posibles circuitos de polarización del fotodiodo BPW34

### 2.3.2 Filtrado

Con este bloque se pretende eliminar todas las señales que detectan los fotodiodos, y que no provienen de los láseres modulados. Este apartado, junto con el de bloque integrador, son los que han marcado la selección de las frecuencias de modulación.

#### Diseño del filtro y selección de las frecuencias de modulación.

Lógicamente, antes de diseñar el filtro, había que determinar las frecuencias del sistema de iluminación. Dichas frecuencias debían de cumplir dos requisitos:

- 1) Como en el Colegio San Rafael hay niños que sufren ataques epilépticos, debían ser bastante altas para que las luces no parpadearan.
- 2) Como se iban a utilizar para identificar a cada foco, debían estar lo más separadas posibles para que no hubiera solapamiento de información.

Se intentó diseñar teóricamente un filtro pasobanda [18], pero las frecuencias que se habían seleccionado inicialmente (10 kHz, 20 kHz y 30 kHz) estaban demasiado separadas y el filtro no funcionaba (ni en las simulaciones ni en el laboratorio) porque no se podía implementar físicamente. Esto se averiguó con Filterpro, un software de National Instruments para diseñar filtros.

El funcionamiento de FilterPro es muy sencillo, simplemente hay que seleccionar el tipo de filtro, sus especificaciones, su respuesta frecuencial y la topología. Con la ayuda de esta herramienta se llegaron a las siguientes conclusiones:

- 1) Según se aumenta la frecuencia central de la banda de paso, disminuye el ancho de banda.
- 2) Al aumentar la ganancia se reduce el ancho de banda, y como el filtro tiene que dejar pasar tres frecuencias, no tiene sentido trabajar con  $K_0 > 1$  (lo que se gana con la ganancia, lo atenúa el filtro por el ancho de banda).

Con estos datos, y tras realizar numerosas pruebas, se determinó que las frecuencias de modulación de los láseres fueran 2.5 kHz, 4.5 kHz y 6.5 kHz, que en la práctica son de 2.6 kHz, 4.6 kHz y 6.6 kHz ( véase Tabla 3.).

#### Filtro de orden 4

Este bloque esta formado por un filtro paso banda de orden 4. Sus parámetros de diseño, el diagrama de bode y su esquemático se muestran en la siguiente figura (Fig. 47.). En el diagrama de Bode se puede ver como las frecuencias de modulación de los láser coinciden con la banda de paso del filtro (ganancia unidad).

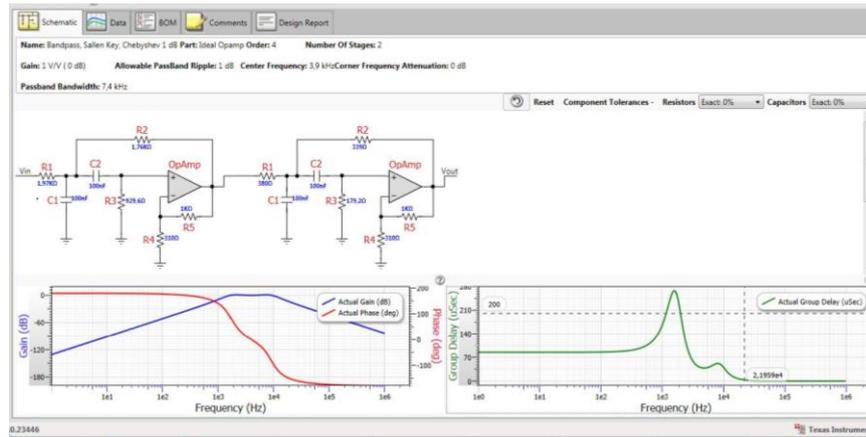


Fig. 47. Esquemático y características del filtro de orden 4

En el diseño que propone el software (Fig. 47.), las resistencias no coinciden con valores comerciales, y el utilizarlos, se comprobó que afecta a su respuesta en frecuencia. Por ello, para implementar el sistema se han utilizado resistencias y condensadores en serie con una tolerancia del 1 % (véase Tabla 8. y Tabla 9.)

#### PRIMERA ETAPA DEL FILTRO

Componente Pasivo	Valor	Asociación en serie
$R_1$	1,71K $\Omega$	1,69 K $\Omega$ +20 $\Omega$
$R_2$	1,66k $\Omega$	1,65k $\Omega$ +10 $\Omega$
$R_3$	841,9 $\Omega$	845 $\Omega$ +16,9 $\Omega$
$R_4$	351,6 $\Omega$	348 $\Omega$ +3,6 $\Omega$
$R_5$	1k $\Omega$	-
$C_1$	100nF	-
$C_2$	100nF	-

Tabla 8. Componentes pasivos del filtro de orden 4 (primera etapa)

## SEGUNDA ETAPA DEL FILTRO

Componente Pasivo	Valor	Asociación en serie
$R_1$	400,8 $\Omega$	402 $\Omega$
$R_2$	390,6 $\Omega$	383 $\Omega$ +2 $\Omega$ +5,6 $\Omega$
$R_3$	197,8 $\Omega$	196 $\Omega$ +1,8 $\Omega$
$R_4$	351,6 $\Omega$	348 $\Omega$ +3,6 $\Omega$
$R_5$	1k $\Omega$	-
$C_1$	100nF	-
$C_2$	100nF	-

Tabla 9. Componentes pasivos del filtro de orden 4 (segunda etapa)

### Simulaciones

Las siguientes figuras (Fig. 48, Fig. 49 y Fig.50) muestran la salida del filtro suponiendo que a la entrada hay una tensión cuadrada de 3 V a 2.5 kHz, 4.5 kHz y 6.5 khz (respectivamente), más una señal sinusoidal de 100 hz con la misma amplitud (simulando el efecto de los fluorescente).

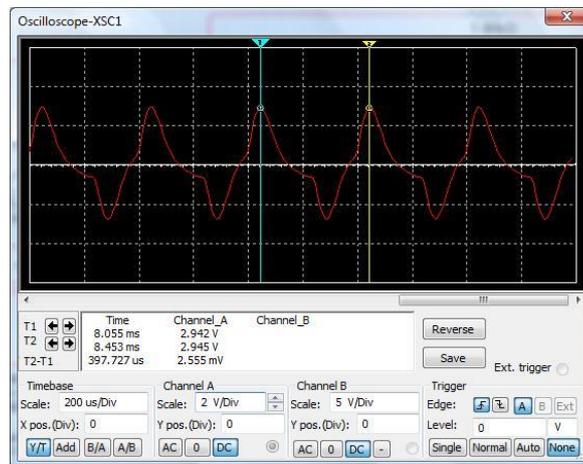


Fig. 48. Salida del filtro de orden 4. Simulación a 2.5 kHz

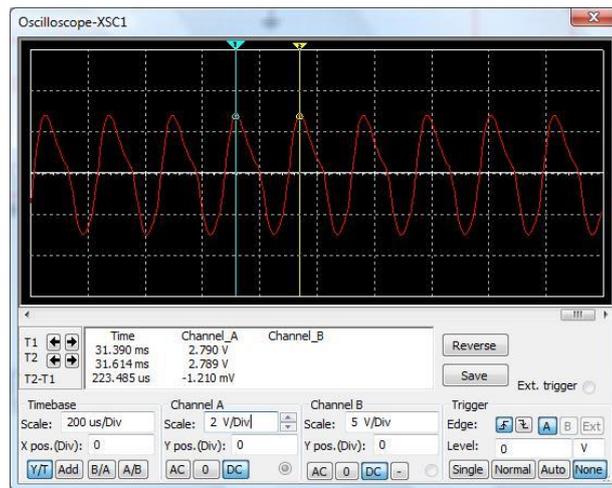


Fig. 49. Salida del filtro de orden 4. Simulación a 4.5 kHz

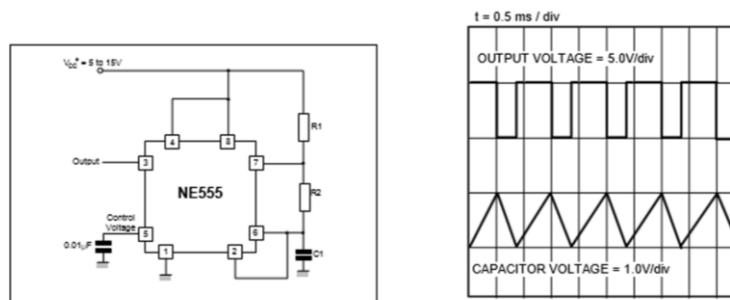


Fig. 50. Salida del filtro de orden 4. Simulación a 6.5 khz

Con los resultados de las simulaciones se comprobó que, tal y como se había diseñado, para las frecuencias de trabajo de los láseres el filtro no atenúa prácticamente la señal y eliminaba las fuentes de luz del ambiente.

### Laboratorio

Las imágenes (Fig.51, Fig. 52 y Fig. 53) que se muestran a continuación se corresponden con la salida de este bloque cuando se sitúa la raqueta bajo el foco azul, amarillo o verde (situación real de funcionamiento). En la práctica, el filtro sí elimina las fuentes de ruido del ambiente aunque atenúa más de lo que se esperaba la señal del láser.

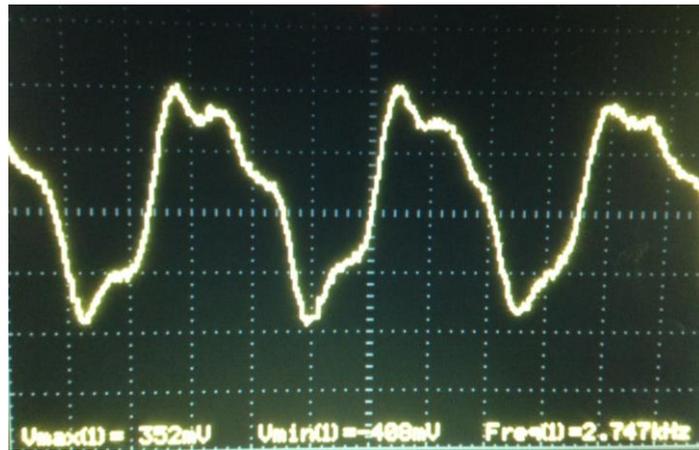


Fig. 51. Salida del filtro para el foco azul

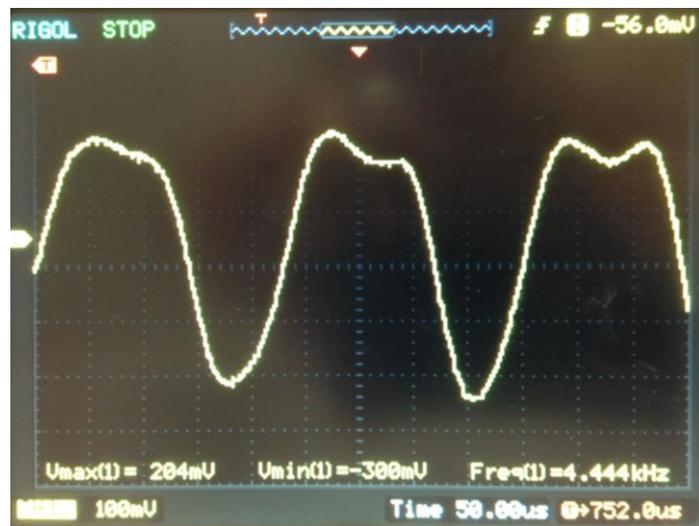


Fig. 52. Salida del filtro para el foco amarillo



Fig. 53. Salida del filtro para el foco verde

### 2.3.3 Comparador

A este bloque ya solo llegarían las señales procedentes del láser, y por tanto, es ahora cuando se debe incrementar su potencia. Con un comparador se consigue que la salida del filtro, que en ocasiones no supera los 500 mV, pase a valer 5 V sin modificar la frecuencia. Además, en los posteriores bloques se va a necesitar esta señal cuadrada.

#### Simulaciones

En la Fig. 54 se muestra el esquemático que se simuló antes de ir al laboratorio.

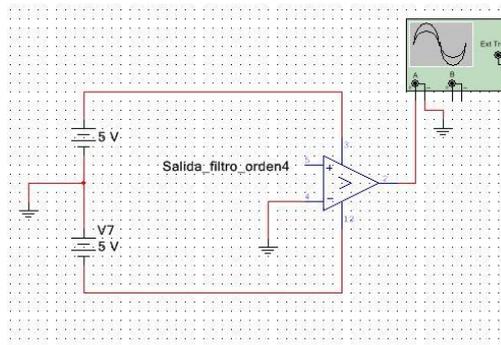


Fig. 54. Esquemático del comparador (simulación)

Cuando en la entrada  $V^+$  del CI hay una tensión positiva, la salida del amplificador operacional vale 5 V (tensión de alimentación). En cambio, cuando  $V^+ \leq 0$ , la salida es de 0 V.

#### Laboratorio

En la práctica es muy arriesgado comparar respecto a tierra, porque cualquier pequeño pico de tensión en  $V^+$  se transforma en 5 V. Por eso, se ha añadido a la entrada  $V^-$  un divisor de tensión que permite comparar con unos 100 mV. Este valor de comparación sigue siendo bajo, pero como las amplitudes de las señales de los láseres también son pequeñas, se podría perjudicar el funcionamiento de la raqueta al aumentarlo.

El divisor de tensión se ha implementado con dos resistencias, una de 270  $\Omega$  (conectada a tierra) y otra de 12 k $\Omega$  (conectada a alimentación). En las siguientes imágenes (Fig. 54, Fig. 55 y Fig. 56) se muestra la salida del comparador cuando la raqueta detecta la luz de alguno de los focos.



Fig. 55. Salida del comparador cuando se detecta el foco azul

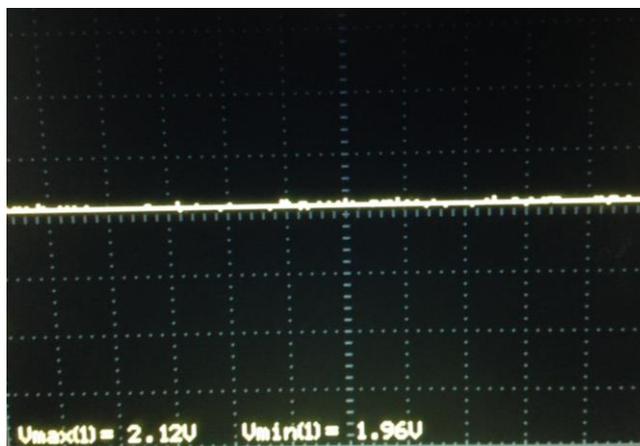


Fig. 56. Salida del comparador cuando se detecta el foco amarillo

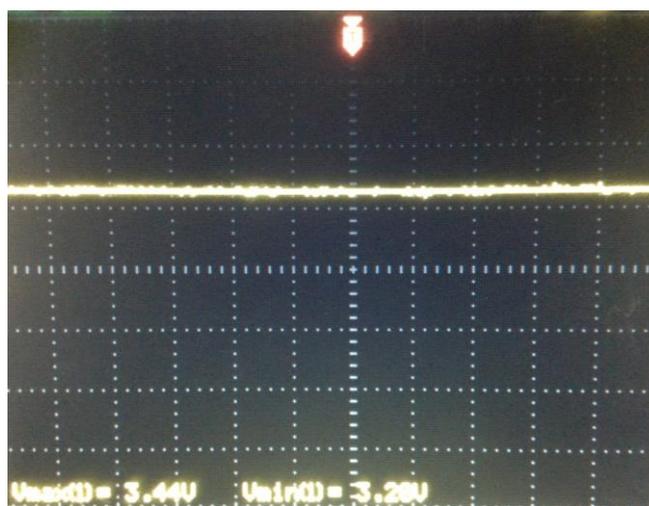


Fig. 57. Salida del comparador cuando se detecta el foco verde

## Selección del dispositivo de comparación

Los comparadores son circuitos integrados diseñados específicamente para comparar valores de tensión, así que se pensó en utilizar el LM339 para este bloque. Pero la salida del bloque integrador es peor con un comparador que con un amplificador operacional (véase Fig 58.)

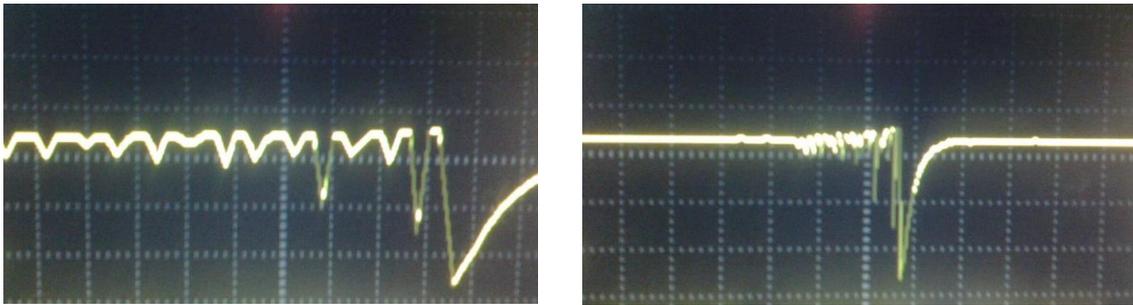


Fig. 58. Salida del integrador con el LM339 (izquierda) y el TL081 (derecha)

Como la calidad de la señal del integrador es mucho más relevante para el funcionamiento del sistema, se decidió utilizar el amplificador operacional TL081 para comparar.

## Alternativas de diseño

Para este bloque se podría haber utilizado un comparador de histéresis. Con este diseño, las salidas no cambian de un estado a otro si no superan un umbral de tensión positivo y negativo. Si se diseña un comparador con una histéresis de 100 mV, hasta que la entrada no supere este valor la salida no estará activa a nivel alto, y de igual manera, no pasará a nivel bajo hasta que la entrada no alcance los -100 mV.

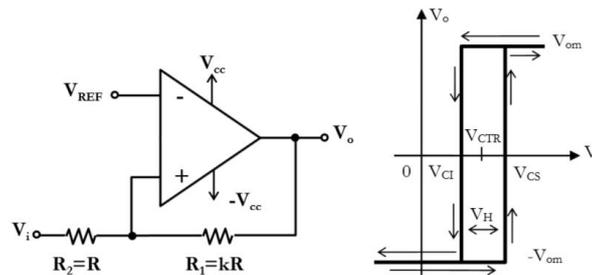


Fig. 59. Esquemático del comparador con histéresis y gráfica de funcionamiento

El problema de esta configuración es que la señal de entrada supere los 100 mV, pero no los -100 mV, de hecho a la salida del filtro la tensión positiva suele ser más grande que la negativa.

## 2.3.4 Conformador de pulsos.

Este bloque nos sirve para transformarlo que tenemos (señal cuadrada) en lo que necesitamos (pulsos negativos muy rápidos que exciten el bloque monoestable). El circuito,

denominado *speakin*, consta únicamente de dos resistencias y condensador (véase Fig. 60) . Su función es obtener la derivada de la señal de entrada.

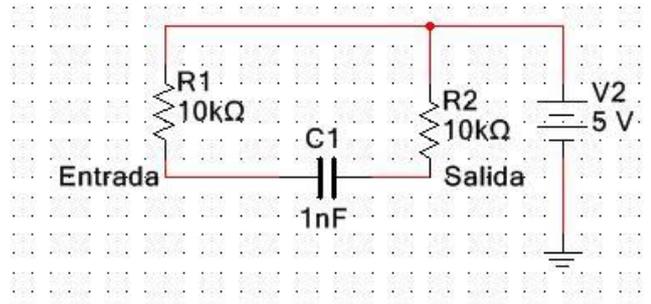


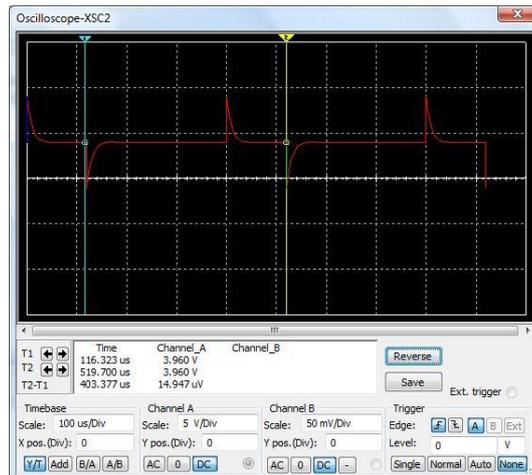
Fig. 60. Esquemático del circuito derivador

Cuando la salida del comparador es “1”, la salida del derivador es de 0 V. De igual manera, cuando valga “0”, la salida también será de 0 V.

Pero lo interesante es lo que ocurre en las transiciones entre “0” - “1” y “1” - “0”. Los flancos son rectas de pendiente infinita cuya derivada es infinito, así que la salida del derivador busca un valor muy grande (flanco positivo) o muy pequeño (flanco negativo) hasta que la salida del comparador vuelve a cero.

### Simulaciones

El resultado de este bloque con resistencias de 10 KΩ y un condensador de 1nF es el que se muestra en la Fig. 61. En este caso, como la salida es la misma para los tres focos (excepto por la frecuencia) en la imagen se muestra la salida del derivador solo a 2.5 kHz.



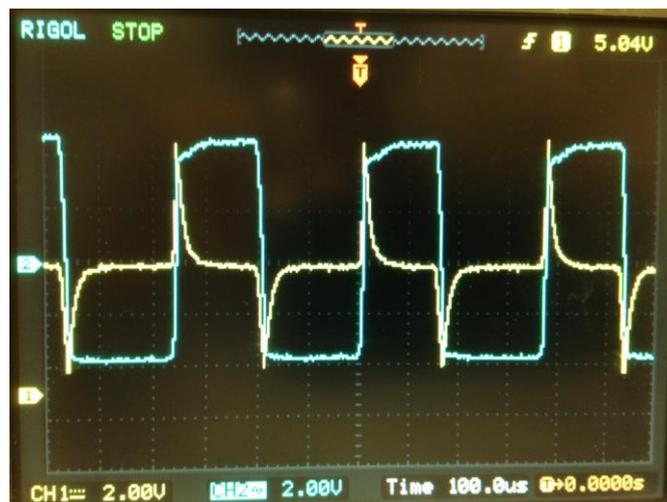
*Fig. 61. Salida del circuito derivador (2.5 kHz)*

El ancho de los pulsos depende de la constante de tiempo del circuito, y por tanto, de los valores de las resistencias y el condensador. Cuanto mayor sea el condensador a lo resistencia, los pulsos serán menos rápidos.

Como para el bloque monoestable solo nos interesan los pulsos negativos, hemos eliminado los positivos añadiendo un diodo en paralelo con la resistencia de salida.

### Laboratorio

En las siguiente imagen (Fig. 62) se puede ver la salida del derivador junto a la del comparador. Tal y como se ha dicho, en cada flanco negativo del comparador se produce un pulso negativo muy rápido.



*Fig. 62. Salida del comparador y el derivador*

A continuación se muestra la salida del derivador, añadiendo el diodo para eliminar los flancos positivos:



Fig. 63. Salida del derivador + diodo (2.6 kHz)



Fig. 64. Salida del derivador + diodo (4.6 kHz)



Fig. 65. Salida del derivador + diodo (6.6 kHz)

### 2.3.5 Monoestable

Al comienzo del capítulo del Bloque Receptor se explicó que el propósito de la raqueta era transformar la frecuencia de los láseres en un valor de continua. Sin contar el circuito derivador (adaptación para el presente bloque) hasta ahora lo que se ha hecho ha sido:

- Detectar la luz de los láseres y transformarlas en tensión.
- Eliminar todas las señales que no procedieran de la luz del láser.
- Aumentar su magnitud y transformarla en una señal “estándar” (señal cuadrada)

Como se tiene una señal cuadrada, podría plantearse la cuestión de porque no se obtiene ya el valor de continua. El motivo es que la señal cuadrada tiene la misma frecuencia con la que modulamos uno de los láseres, pero el ciclo de trabajo no es el mismo. No se puede controlar el  $T_{ON}$  de esta señal porque varía en función de la amplitud en bloque comparador, y por tanto, depende de la iluminación del ambiente, la distancia entre el sistema de iluminación y la raqueta,...

## LM555 en modo monoestable.

Para fijar el  $T_{ON}$  de la señal hemos utilizado el temporizador LM555 en modo monoestable. Su funcionamiento es sencillo.

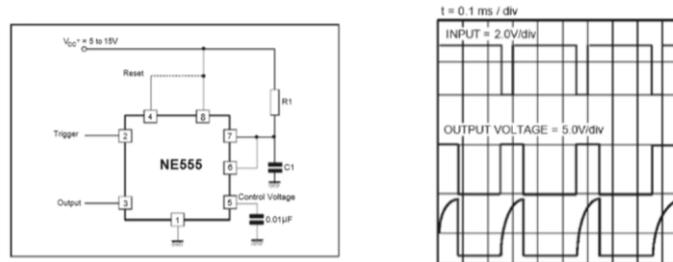


Fig. 66. Esquemático y señales en el LM555 en modo monoestable (datasheet)

En condiciones de reposo  $C_1$  se encuentra inicialmente descargado, de esta forma la salida está a nivel bajo, ya que la entrada de disparo se ha de encontrar a un nivel superior a  $\frac{1}{3} V_{CC}$ . Cuando la tensión en la patilla 2 (por efecto de un pulso negativo) cae por debajo de dicho nivel, la salida pasa a nivel alto y  $C_1$  se comienza a cargar a través de  $R_1$ . El proceso de carga se interrumpe cuando la tensión en dicho condensador (patilla 6) supera los  $\frac{2}{3} V_{CC}$ , en ese momento, la salida cambia de estado. Por lo tanto, se deduce que:

- El  $T_{ON}$  de la salida depende de la carga del condensador, y en consecuencia, del valor de  $R_1$  y  $C_1$ .

$$T_{ON} = 1.1R_1C_1$$

- El periodo (o la frecuencia) de la salida coincide con la del trigger. En el caso desarrollado el diseño del trigger es la salida del derivador, la frecuencia coincide con la de la luz del láser que se haya detectado.

En este bloque se ha fijado que  $T_{ON}$  sea  $132 \mu s$ , y para ello, se ha seleccionado  $R_1 = 1.2 k\Omega$  y  $C_1 = 100 nF$ . Este parámetro de la señal ha sido escogido en relación al valor medio que se obtiene en el bloque integrador (apartado 2.3.6).

## Resultados en el laboratorio

En las siguientes figuras (Fig. 66, Fig. 67 y Fig. 68) se muestra la salida del 555 en modo monoestable. En las imágenes se puede comprobar, que la salida tiene un  $T_{ON}$  constante ( $132 \mu s$ ) y que el período varía en función del foco azul, amarillo o verde.

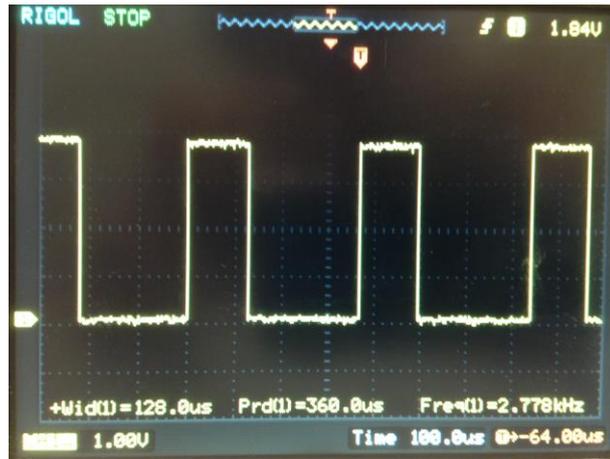


Fig. 66. Salida del 555 en modo monoestable 2.5 kHz



Fig. 67. Salida del 555 en modo monoestable 4.5 kHz

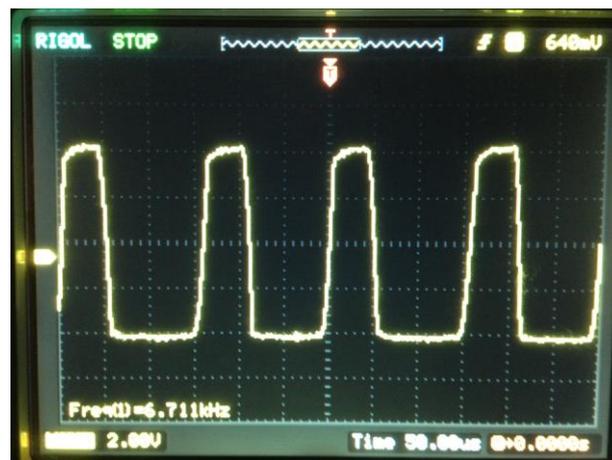


Fig. 68. Salida del 555 en modo monoestable 6.5 kHz

## Alternativas de diseño

Existen circuitos integrados, como el LM331, con los que se puede obtener directamente un valor de continua sin necesidad de utilizar ni este bloque monoestable, ni el bloque derivador. Pero su precio es bastante elevado en comparación con el 555 y necesitan prácticamente el mismo número de componentes pasivos para funcionar.

### 2.3.6 Derivador.

En este bloque se calcula el valor de continua de la señal de salida del 555. Como en dicha señal el  $T_{ON}$  no varía, el valor medio depende exclusivamente de la frecuencia (que coincide con la emitida por los láseres).

Para obtener el valor medio se ha implementado un filtro paso bajo Sallen Key con una frecuencia de corte de 200 Hz. En la siguiente figura (Fig. 68) se muestra su diagrama de Bode y su esquemático.

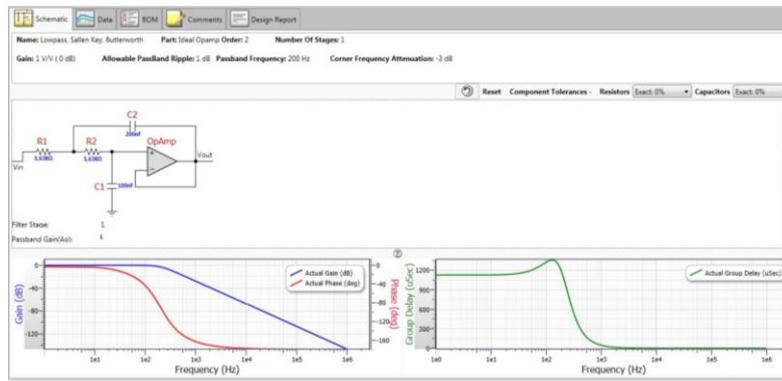


Fig. 69. Esquemático y diagrama de bode del bloque derivador

## Resultados en el laboratorio

Según los valores medios obtenidos para cada frecuencia (véase Fig. 70., Fig. 71 y Fig. 72) se ve que para el láser azul la salida es de 1.2 V, para el amarillo de 2.2 V, y para el verde de 3.2 V. Para que estos valores estén separados por aproximadamente 1 V, y así, poder identificar de un modo más fácil el foco que se ha detectado, se tuvo que realizar numerosas pruebas de simulación para determinar el valor de  $T_{ON}$  más apropiado (bloque monoestable).



Fig. 70. Salida del derivador cuando se detecta el foco azul

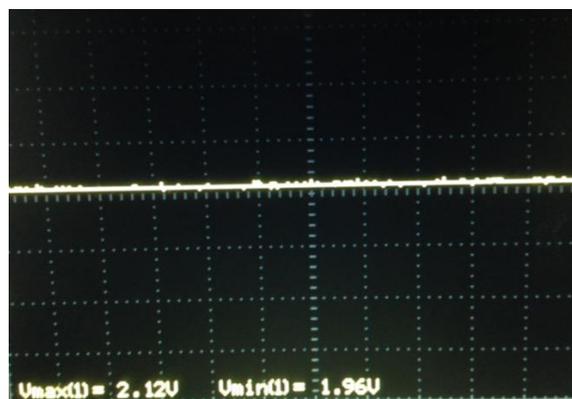


Fig. 71. Salida del derivador cuando se detecta el foco amarillo

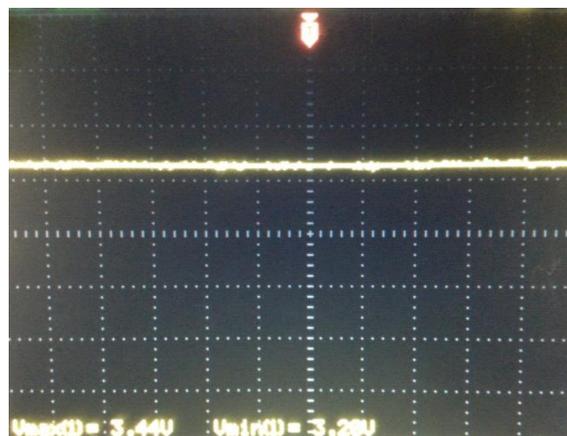


Fig. 72. Salida del derivador cuando se detecta el foco verde

### Alternativas de diseño

En vez de haber implementado el filtro con una estructura Sallen Key, se podría haber utilizado un filtro RC, el diseño hubiera sido más simple, pero en las simulaciones se comprueba que su respuesta era más lenta y la señal tenía más rizado.

### 2.3.7 Comparador triple.

La entrada de este bloque es un valor de continua, que todavía no se puede relacionar con ninguno de los focos. Para poder hacerlo, se utiliza tres comparadores. En la entrada positiva los tres tienen conectada la salida del derivador, y en la entrada inversora un divisor resistivo diferente en cada caso.

Si la tensión en  $V^+ > 1$  (V) la raqueta ha detectado el foco azul, si  $V^+ > 2$  (V) al amarillo y si  $V^+ > 3$  (V) el verde. A continuación se muestra una tabla de las salidas de los comparadores en función de los focos:

Color del foco detectado	Salida del primer comparador	Salida del segundo comparador	Salida del tercer comparador
Azul	1	0	0
Amarillo	1	1	0
Verde	1	1	1
Ninguno	0	0	0

Tabla 10. Relación entre los focos y las salidas de los comparadores

#### Cálculo del primer divisor resistivo

$$V_{2,1} = V_{CC} \frac{R_{2,1}}{R_{2,1} + R_{1,1}}$$

$$\text{Con } R_{2,1} = 1.8 \text{ k}\Omega \text{ y } R_{1,1} = 1 \text{ k}\Omega \rightarrow V_{2,1} = 1.17 \text{ V} \approx 1 \text{ V}$$

#### Cálculo del segundo divisor resistivo

$$V_{2,2} = V_{CC} \frac{R_{2,2}}{R_{2,2} + R_{1,2}}$$

$$\text{Con } R_{2,2} = 680 \Omega \text{ y } R_{1,2} = 1 \text{ k}\Omega \rightarrow V_{2,2} = 1.96 \text{ V} \approx 2 \text{ V}$$

#### Cálculo del tercer divisor resistivo

$$V_{2,3} = V_{CC} \frac{R_{2,3}}{R_{2,3} + R_{1,3}}$$

$$\text{Con } R_{2,3} = 100 \Omega \text{ y } R_{1,3} = 1 \text{ k}\Omega \rightarrow V_{2,3} = 3 \text{ V}$$

Comentar, que los valores de las resistencias se han calculado con  $V_{CC} = 3.3 \text{ V}$  y suponiendo que  $R_{1,x}$  vale  $1 \text{ k}\Omega$  en todos los casos.

### Pruebas en el laboratorio

En las siguientes figuras (Fig. 73, Fig. 74 y Fig. 75) se compara el valor de los tres divisores resistivos con la salida del derivador cuando se detecta la luz de alguno de los focos . En las imágenes se puede ver que hemos ajustado los valores del divisor resistivo para que la mínima tensión en  $V^+$  sea mayor que la tensión máxima en  $V^-$  (para evitar problemas de funcionamiento).

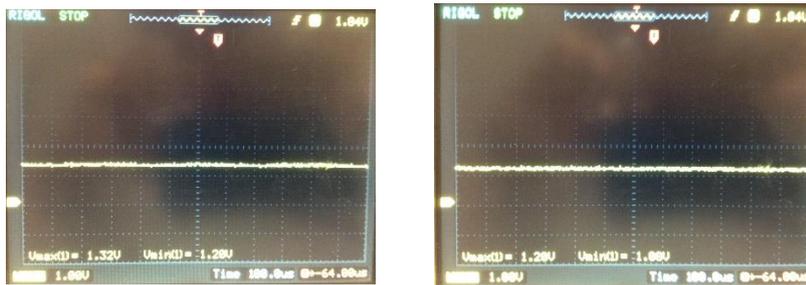


Fig. 73. Comparativa entre el comparador triple y el divisor de tensión (de izquierda a derecha) para 2.6 kHz

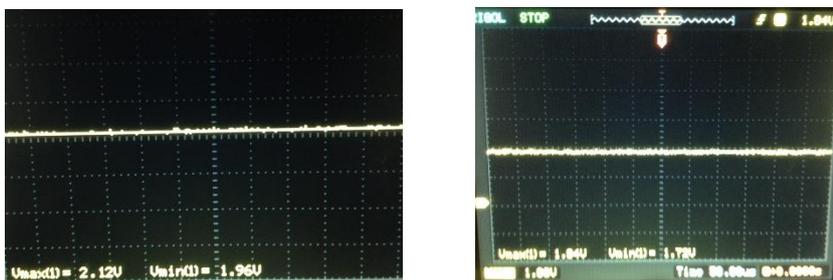


Fig. 74. Comparativa entre el comparador triple y el divisor de tensión (de izquierda a derecha) para 4.6 kHz

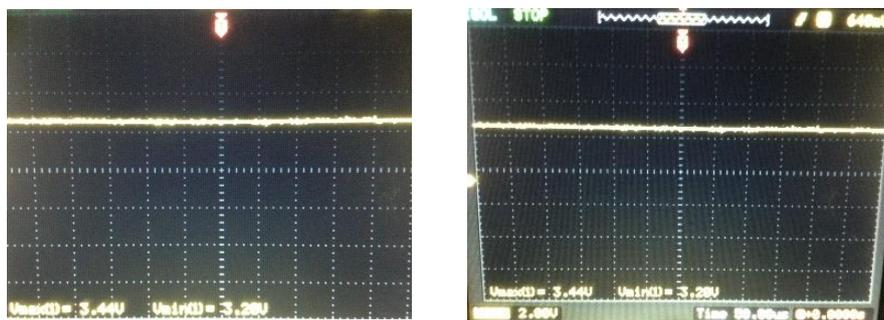


Fig. 75. Comparativa entre el comparador triple y el divisor de tensión (de izquierda a derecha) para 6.6 kHz

## Selección del circuito integrado

Al igual que ocurrió en el Bloque Comparador, ha habido problemas al utilizar el LM339. En el laboratorio se comprobó que el tercer comparador no funcionaba a no ser que la patilla  $V^-$  fuera menor o igual a 2.7 V, lo que implicaba que  $R_5$  no podía ser menor de 4.7 K $\Omega$  (con  $R_6 = 10$  K $\Omega$ ) o que  $R_6$  no podía superar los 10 K $\Omega$  (con  $R_5 = 4.7$  K $\Omega$ ).

En definitiva, que el LM339 no funcionaba con ningún grupo de resistencia que permitiera obtener los 3 V que se necesitaba para comparar. Esto es debido a que el LM339 no puede trabajar con una tensión de entrada superior a 2.7 V (alimentado a 3.3 V).

Finalmente, el comparador triple se ha implementado con el amplificador operacional "rail to rail" LMC648.

## Alternativas de diseño

Este bloque no hubiera sido necesario utilizando una entrada analógica de un microprocesador y programando un convertidor A/D.

Inicialmente el sistema completo iba a estar formado solo por el bloque de iluminación (lámparas y láseres) y la raqueta, y por tanto, la placa de evaluación STM32L-Discovery iba a ir incluido dentro de la raqueta.

### 2.3.8 Emisión de radiofrecuencia

Como se acaba de comentar en las Alternativas de diseño del bloque de Comparación triple, en un primer momento solo iba a ver dos bloques, y todo lo que tenía que ver con la grabación y reproducción de audio iba a estar incluido dentro de la raqueta. Para evitar que los pulsadores, el micrófono, el display,... estuvieran al alcance de los niños se decidió añadir un tercer bloque y comunicarlo mediante radiofrecuencia con la raqueta.

## Encoder

El encoder RF600E de RF Solutions (véase Fig. 76) es el dispositivo que se encarga transformar los valores de las salidas de los tres comparadores y de un detector de batería baja (se explicará más adelante), en un tipo de dato que el transmisor sea capaz de interpretar y enviar por radiofrecuencia. Para ello, utiliza una codificación Manchester basada en la auto-sincronización de la señal de datos y el reloj. Tras la codificación y la fijación de datos, se realiza un chequeo CRC.

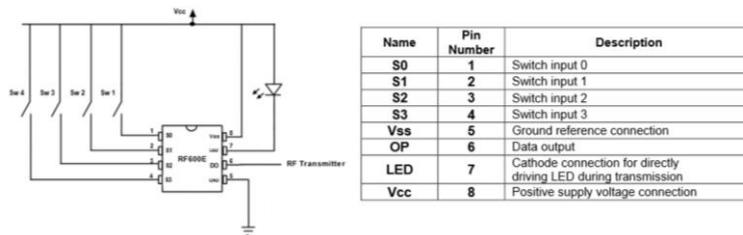


Fig. 76. Esquemático y pines del RF600E (datasheet)

Tal y como se muestra en la figura anterior, el encoder dispone de cuatro pines de entrada de datos. En el sistema estudiado, S0 está conectada a la salida del primer comparador del bloque anterior, S1 al segundo, S2 al tercero, y S3 a la salida del detector de batería baja.

*Salida del comparador del foco azul → S0*

*Salida del comparador del foco amarillo → S1*

*Salida del comparador del foco verde → S2*

*Salida del detector de batería baja → S3*

El RF600E permanecerá en reposo hasta que algunas de sus entradas se activen con un "1". Cuando la batería de la raqueta se esté agotando S3 valdrá "1", de lo contrario, permanecerá a "0". Si se detecta la frecuencia correspondiente al foco azul se impondrá un "1" en S0, si es la del foco amarillo se impondrá en S0 y S1, y si es la del foco verde en S0, S1 y S2.

### Transmisor

El transmisor FM-RTFQ1-868 de RF Solutions utiliza modulación en frecuencia (FM) para enviar señales de información de cualquier estándar CMOS o TTL.

Este componente se encarga de modular la señal que le llega vía serie desde el encoder, la cual se enviará mediante generación de una onda electromagnética en espectro de radiofrecuencia. Para ello, dispone de cuatro patillas: alimentación (1), GND (2), antena (3) y entrada de datos (4).

El siguiente esquemático recoge el conexionado entre el RF600E y el módulo FM-RTFQ1-868 (ver Fig. 77). Al modular en FM, en el datasheet del encoder se especifica que es necesario incluir un transistor entre su salida y la entrada del transmisor. Por otro lado, el led que aparece conectado a la patilla 6 del encoder sirve para conocer el estado de la transmisión

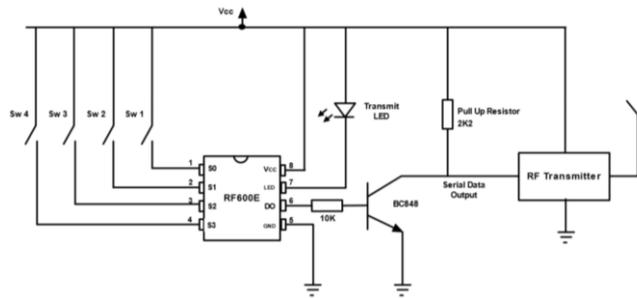


Fig. 77. Conexión entre el encoder y el transmisor (datasheet)

Tras realizar pruebas de distancia entre el transmisor y el receptor se determinó que no era necesario utilizar antena. Por último, comentar que para que se pudieran comunicar el bloque de transmisión y el de recepción, previamente se ha tenido que ejecutar un proceso de aprendizaje. Dicho proceso no se va a explicar puesto que ya viene detallado en el datasheet del encoder/decoder.

### Selección de los dispositivos de RF

Los equipos de radiofrecuencia que se han seleccionado para este bloque trabajan en una frecuencia de 868.35 MHz en FM.

Se decidió utilizar una modulación FM, frente a una AM, porque es la más inmune al ruido y la que mejor funciona con distancias grandes. Cuando se buscó un emisor/receptor de RF se vio que la mayoría trabajaban a 453 kHz, así que se decidió seleccionar una mayor frecuencia y evitar interferencias con otros equipos.

Muchos dispositivos cumplían con estos requisitos, pero los que más llamaron la atención fueron el transmisor FM-RTFQ1-868 y el receptor FM-RRFQ1-868 de RF Solutions. El encoder y el decoder son los que se recomiendan en su datasheet, el RF600E y el RF600D, respectivamente. Las características por las que se seleccionaron son: su bajo consumo (7 mA), su baja tensión de alimentación (2.1 a 4 V), la elevada distancia de trabajo (superior a 250 m) y la sencillez de sus conexiones. Además, unos compañeros ya habían trabajado con sus homólogos en AM (AM-RT4-433 y AM-RR4-433) y habían obtenido muy buenos resultados.

### 2.3.9 Detector de batería baja

La raqueta tiene tres reguladores de tensión conmutados de +5 V, -5V y 3.3 V (ver [apartado 2.3.10](#)). Lógicamente, los que van a marcar el estado de batería baja son los dos de mayor tensión (alimentación doble). En la hoja de características de dichos reguladores se indica que solo se garantiza que funcionen correctamente cuando haya en la entrada un mínimo de 0.5 V más de lo que queremos a la salida, por tanto, nuestro estado de batería baja es de 5.5 V.

El circuito que se ha seleccionado para determinar el estado de la batería es un comparador. Como ya se ha explicado en el [apartado 2.3.8](#), para que se envíe un dato es necesario que en la entrada del encoder haya un "1", y en consecuencia, que la salida del circuito de batería baja este activa a nivel alto.

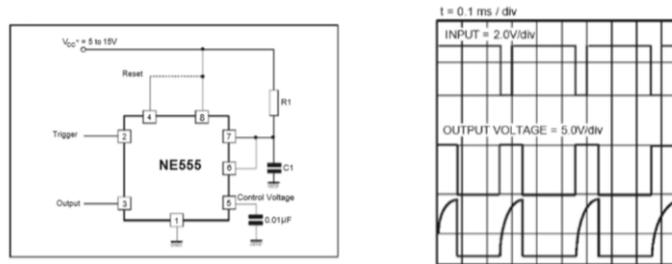


Fig. 78. Esquema del detector de batería baja

En la figura anterior (Fig.78) la entrada inversora del amplificador operacional está conectada a un divisor de tensión, y  $V^+$ , a un diodo zener polarizado en inversa. La tensión en la entrada no inversora está fija a 2.4 V (tensión zener), en cambio, la del divisor de tensión va bajando a medida que se van gastando las pilas. La clave del diseño está en encontrar un conjunto de resistencias que impongan una tensión en  $V^-$  igual o menor a 2.4 V, cuando la tensión en la batería sea de 5.5 V. A continuación se explica cómo se han calculado  $R_1$  y  $R_2$  (véase Fig. 78):

$$V^+ = V_{bat} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$2.4(V) = 5.5(V) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Si imponemos que  $R_2 = 1.2 (K\Omega)$

$$R_1 = \frac{5.5 (V) \cdot 1.2 (K\Omega)}{2.4 (V)} - 1.2 (K\Omega) = 1.5 (K\Omega)$$

El valor de  $R_2$  ha sido seleccionado para que  $R_1$  coincidiera con un valor comercial, y no fuera necesario asociar resistencias.

Aclarar, que aunque el circuito se ha calculado para que se detecte batería baja justo en el umbral de funcionamiento del regulador, en el laboratorio se ha comprobado que funciona perfectamente hasta que la tensión de las pilas es de 5 V.

### Alternativas de diseño

En el [apartado 2.3.8](#) no se ha explicado, pero el RF600E (encoder), mide constantemente la tensión a la que está alimentado y envía información sobre el estado de la batería. Puesto que el propio encoder ya incluye la opción de batería baja, la primera opción fue utilizarlo para saber cuándo hay que cambiar las pilas.

El problema es que el encoder identifica que el estado de la batería no es bueno cuando la alimentación es menor o igual a 3.8 V, y a esa tensión, la mayor parte de los circuitos integrados de la raqueta ya no funcionan.

### 2.3.10 Sistema de alimentación

En este bloque se han utilizado tres reguladores de tensión conmutados. Dos de ellos para obtener  $\pm 5V$ , y el tercero, para 3.3 V. A partir del bloque del comparador triple todo tiene que estar alimentado a 3.3 V por restricciones de los datasheet de los componentes.

Los reguladores conmutados empleados para obtener la alimentación doble son los TSRN 1-2450 SM de TracoPower (también utilizado para el sistema de iluminación). A continuación se muestra el esquema de conexión que aparece en su datasheet:



Fig. 79. Conexiones del TSRN 1-2450 para obtener una tensión positiva (imagen izquierda) o negativa (imagen derecha)

Respecto al conexionado, la única diferencia es que no se ha conectado el condensador  $C_1$  del circuito de la alimentación positiva (imagen de la izquierda) porque solo es necesario cuando la tensión de entrada supera los 36 V.

El regulador de 3.3 V es el TSRN 1-2433 de TracoPower. Pertenece a la misma familia que le TSRN 1-2450 SM y sus características son similares, entre ellas destaca la eficiencia (87%) y la elevada corriente de salida (1 A). Ambos también pueden ser configurados para obtener una tensión positiva o negativa, aunque el TSRN 1-2433 (Fig.80) no tiene la posibilidad de ajustar la tensión de salida (no lo necesitamos) y su montaje es de taladro pasante.



Fig. 80. Regulador de tensión conmutado TSRN 1-2433

#### Selección de la batería

Los niños van a moverse de un foco a otro durante el juego, y que la raqueta estuviera conectada a un enchufe hubiera sido muy engorroso, así que se decidió que la raqueta fuera inalámbrica.

La raqueta está alimentada por cuatro pilas alcalinas de 1.5 V y 2.2 Ah de GP Ultra (Fig. 81). Como el consumo de pico de la raqueta es de tan solo 30 mA, se garantiza una autonomía de más de 70 horas. Las pilas se han conectado en serie para dar 6 V.



Fig. 81. Pilas alcalinas

## 2.4 Diseño del interfaz de usuario

El interfaz de usuario permite la grabación/reproducción del audio e informa del estado del sistema (batería baja, modo de funcionamiento...). Su funcionamiento es muy sencillo, y para que los niños también participen en el proceso de grabación, se le ha dotado de un diseño atractivo para ellos.

El interfaz de usuario consta de tres bloques de electrónica :

- Receptor de radiofrecuencia
- Microprocesador
- Grabación/ reproducción de audio

Todo el conjunto va alimentado a la red eléctrica.

### 2.4.1 Receptor de RF

El último bloque de la raqueta era el emisor de RF, y por tanto, el primero del interfaz de usuario tenía que ser el receptor de radiofrecuencia.

#### Receptor

El receptor es el FM-RRQ1-868 de RF Solutions. Como su propio nombre indica, su función es la de recibir la información procedente de la raqueta (si se ha detectado algún foco, batería baja,...)

En la siguiente figura (Fig. 82) se muestra la imagen del dispositivo y una tabla con la función de cada patilla:



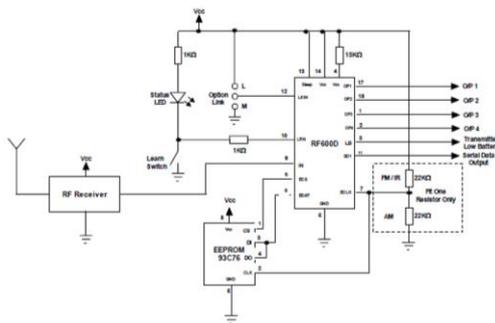
RTFO1	RTFO2	Name	Description
1	N/A	En	Enable (active high)
2	5	IN	Data input
3	1	GND	Ground, Connect to RF earth return path
4	3	Vcc	Supply Voltage
5	4	GND	Ground, Connect to RF earth return path
6	2	EA	External Antenna

Fig. 82. Patillaje del FM-RRQ1-868

#### Decoder

El decoder RF600D transforma y muestra la información del receptor, de modo que se lea de manera fácil. Seguidamente se va a mostrar su esquema general de conexión con el FM-

RRQ1-868 y una breve descripción de su patillaje (Fig.83) , para más tarde pasar a explicar sus patillas más relevantes:



Pin Number	Name	Input / Output?	Description
1	OP3	Out	Data Output 3 (S2)
2	OP4	Out	Data Output 4 (S3)
3	LB	Out	Low Battery, goes Low when Low Battery Valid
4	Vcc	In	Positive supply voltage connection
5	Vss	In	Connect to GND
6	ECS	Out	Connects to EEPROM 'CS' pin
7	ECLK	Out	Connects to EEPROM 'CLK' pin. Also sets data mark.
8	EDAT	In / Out	Connects to EEPROM 'Data' pin
9	IN	In	RF / IR Data input
10	LRN	In	Learn / Erase Switch Input & Status LED Drive
11	SD1	Out	Serial Data output
12	LKIN	In	Option Link Input for Momentary or Latched outputs
13	SLEEP	In	High = Run, Low = Sleep Mode
14	Vcc	In	Positive supply voltage connection
15	Unused	N/A	No Connection
16	Unused	N/A	No Connection
17	OP1	Out	Data Output 1 (S0)
18	OP2	Out	Data Output 2 (S1)

Fig. 83. Conexiones y patillas del FM-RRQ1-868

### OP4, OP3, OP2 y OP1

OP4, OP3, OP2 y OP1 son las salidas del RF600E que se corresponden con S3, S2, S1 y S0 del encoder. Estas salidas toman justo el valor contrario al de las entradas del RF600E, por ejemplo, si se detecta que el nivel de la batería es bajo, S3="1" y OP4="0".

### LB

El encoder está midiendo constantemente su tensión de alimentación. Cuando el RF600E mide más de 3.8 V, LB valdrá "1", si por el contrario es menor a dicha tensión, será 0. Como se justificó en [apartado 2.3.9](#) no se puede utilizar esta patilla para medir el nivel de la batería en la raqueta.

### ECS / ECLK / EDAT

El decoder tiene capacidad para almacenar información de un máximo de 7 encoder (EEPROM interna). En el caso de que esto no fuera suficiente, se podría añadir una memoria externa aumentando su capacidad de aprendizaje hasta un total de 48 encoder.

En nuestro diseño, las patillas ECS y EDAT se quedan libres y ECLK se conecta a una resistencia push up de 22 kΩ (véase Fig.83)

### LRN

Esta patilla nos permite que el decoder aprenda (almacene en su memoria) al RF600E.

### SD1

SD1 es una salida serie de caracteres ASCII, que se activará siempre que se reciba un paquete válido. Cada cadena está formada por 10 caracteres con el siguiente formato (Fig. 84):

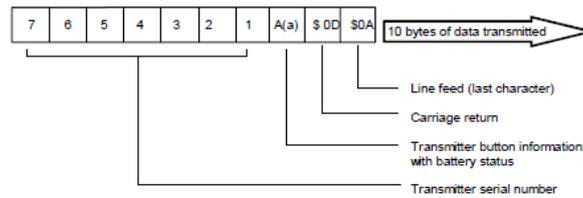


Fig. 84. Formato de la cadena de caracteres de SD1

No se ha utilizado esta salida porque resulta mucho más sencillo y rápido al programar poder tratar cada bit de forma individual (OP4, OP3, OP2, OP1).

### LKIN

LKIN es una entrada de alta impedancia que permite configurar las salidas en acción *Momentary* o *Latching*. En *Momentary* las salidas permanecerán activas mientras que se esté transmitiendo, y en *Latching*, la salida cambia de estado al comienzo de una nueva transmisión. Como el interfaz de usuario necesita saber lo que está ocurriendo en tiempo real, se han configurado las salidas como *Momentary* (LKIN conectado a la alimentación).

### LRN

Esta entrada permite conocer el estado de las comunicaciones mediante el led de estado (véase Fig. 83). Mientras que el FM-RTQ1-868 esté emitiendo y el FM-RRQ1-868 reciba dicha señal, tanto este led como el del transmisor permanecerán encendidos.

## 2.4.2 Microcontrolador

El microcontrolador es el encargado de leer las salidas del encoder, y en función de su estado, decidir qué es lo que debe de sonar, aparecer en el LCD... En definitiva, es el dispositivo que marca el funcionamiento del Sistema de Iluminación Interactivo al completo.

### Microcontrolador STM32L152RBT6

El micro STM32L152RBT6 que se ha utilizado incluye:

- CPU ARM Cortex M3
- 128 KB de memoria Flash
- 16 KB de RAM estática
- Diversos periféricos integrados, entre ellos:
  - Pines de I/O de propósito general
  - Temporizadores de 32 bits (Timers) y uno de 24 (Systick)
  - Convertidor ADC de 12 bits
  - Convertidor DAC de 12 bits
  - Controlador de interrupciones Vectorizadas NVIC
  - Entradas de IRQ externa con disparo por nivel o flanco
  - Puertos Serie Asíncronos y Síncronos (USART, I<sup>2</sup>, SPI etc)
  - Reloj en Tiempo Real

- Varios canales DMA
- 7 modos de bajo consumo
- Múltiples fuentes de reloj (internas y externas)
- Comparador analógico
- Circuito de Watch Dog...

Cada pin del microcontrolador es multiusos y puede configurarse como GPIO o como función alternativa (ADC y Timers). Los pines GPIO se organizan en tres puertos (A, B y C) de 16 líneas cada uno (más PD2, PH0 y PH1, en total 51). En la siguiente tabla (Tabla 11.) se puede ver los pines que se han utilizado, su configuración y dónde han sido conectados.

Nombre de la patilla	Configuración	Conectada a
PA5	Entrada	Salida OP1 del RF600D
PA11	Entrada	Salida OP2 del RF600D
PA12	Entrada	Salida OP3 del RF600D
PA0	Entrada	Salida OP4 del RF600D
PA4	Entrada	Salida LED del ISD1964
PB6	Salida	Entrada M1 del ISD1964
PB7	Salida	Entrada M2 del ISD1964
PC12	Salida	Entrada M3 del ISD1964
PB2	Entrada	Entrada R/P del ISD1964

*Tabla 11. Asignación de las patillas del micro*

### **Placa STM32L-Discovery**

Para poder programar y probar el funcionamiento del micro se ha utilizado la placa de desarrollo STM32L-Discovery (Fig. 85.), que además del micro, dispone de los siguientes elementos:

- Mecanismo de depuración con el sistema ST-LINK/V2 integrado en la propia placa
- Alimentación a través del cable de conexión USB a PC o batería de 3.3V o 5 V
- Display LCD de 6 caracteres
- 4 leds, dos de ellos programables por el usuario
- Dos pulsadores (User y Reset)
- Conectores de expansión de I/O a placa externa



Fig. 85. Placa de evaluación STM32L-Discovery

En la entrada PA0 del micro (salida OP4 del decoder) se ha conectado el cátodo de un led rojo, para que permanezca encendido en el interfaz de usuario siempre que la batería en la raqueta este baja.

### Alternativas de diseño

La misma función que hace el microcontrolador se podría haber implementado con puertas lógicas y un temporizador, pero el circuito hubiera sido más grande y complejo.

### 2.4.3 Reproducción/grabación de audio

El Sistema de Iluminación Interactivo cuenta con dos modos de funcionamiento que se configuran desde el interfaz de usuario: grabación o reproducción. Los usuarios (cuidadores/niños) pueden grabar ellos mismos los sonidos que se van a reproducir durante el juego, y para ello, se ha necesitado un único circuito integrado.

### ISD1964

El ISD1964 es un dispositivo de grabación y reproducción de mensajes de audio.

Este circuito integrado nos permite seleccionar la frecuencia de muestreo (4 kHz- 12 kHz) y el modo de funcionamiento del dispositivo. El ISD1964 dispone de dos modos de funcionamiento: *Address Mode* y *Direct Mode*. En la siguiente figura (Fig. 86) se muestra el diagrama de bloques y el patillaje del dispositivo:

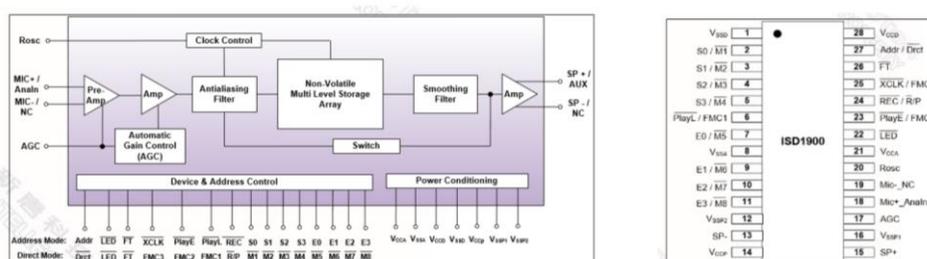


Fig. 86. Diagrama de bloques y patillaje del ISD1964

### Modos de funcionamiento

En *Adress Mode* se pueden grabar mensajes de diferentes duraciones. Para indicar el tiempo de grabación se utiliza una dirección de inicio ( $S3, S2, S1, S0$ ) y una dirección final ( $E3, E2, E1, E0$ ).

En *Direct Mode* se pueden grabar hasta 8 mensajes de audio de una duración similar (dependiendo del número de mensajes). Con  $FCM1, FCM2$  y  $FCM3$  se selecciona el número de mensajes, y con  $M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8$ , el mensaje que se va a grabar/reproducir (el primero, el segundo...)

### Selección del modo de funcionamiento

Inicialmente se pensó en utilizar el ISD1964 en *Adress Mode*, pero este modo de funcionamiento obligaba a los cuidadores a tener que indicar manualmente (mediante pulsadores) el tamaño de los mensajes en cada proceso de grabación. Finalmente, el personal del Colegio San Rafael decidió que lo mejor era trabajar en *Direct Mode* y simplificar el uso del sistema.

### Direct Mode

En la siguiente figura (Fig. 87) se muestran los diagramas de funcionamiento del dispositivo en modo grabación (imagen izquierda) y reproducción (imagen derecha).

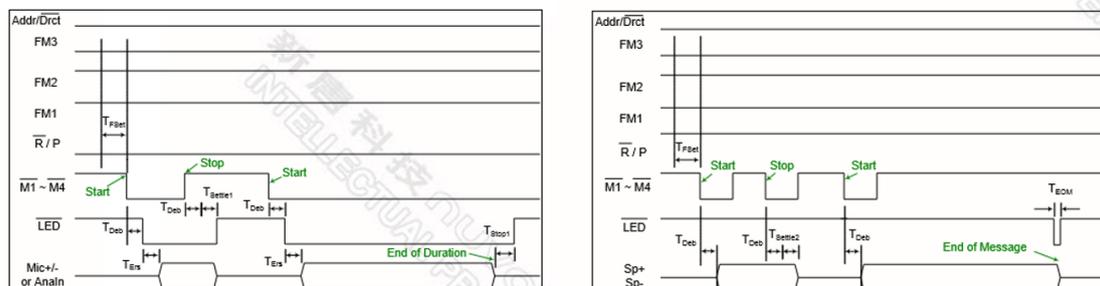


Fig. 87. Diagramas de funcionamiento del ISD1964

Como se puede observar en la imagen de la izquierda, durante la grabación las entradas (M1, M2, M3...) deben permanecer a "0". En cambio, la reproducción (imagen derecha) comienza y acaba con un flanco negativo.

En el diseño estudiado se han utilizado dos ISD1964, uno para los sonidos de los focos, y el otro, como apoyo al LCD en el interfaz de usuario. Se ha decidido dividir en dos partes las funciones de reproducción/grabación de audio para no restar tiempo de grabación al juego (21 s por foco aproximadamente).

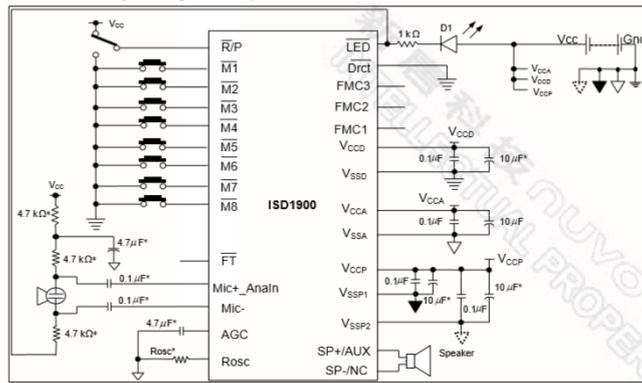


Fig. 88. Esquema de conexiones en el ISD1964 en Direct Mode

### Sonido de los focos

Partiendo del esquema de conexiones que aparece en el datasheet del ISD1964 (Fig. 88), se debe aclarar que:

- En el diseño estudiado, las entradas M1, M2 y M3 están conectadas a pulsadores externos y a tres salidas del micro (PB6, PB7 y PC12). Esto se debe a que durante la grabación se utilizan los pulsadores, pero las salidas del micro son las que controlan la reproducción. En un primer momento se pensó utilizar tres multiplexores para que en el modo de grabación solo se conectaran los pulsadores a las entradas M1, M2 y M3, y en modo de reproducción, solo las salidas del microprocesador. Con esta configuración los cuidadores no podrían escuchar las grabaciones a no ser que utilizaran la raqueta, así que se decidió eliminar los multiplexores para que seleccionando el modo de reproducción y utilizando los pulsadores, los cuidadores pudieran escuchar las grabaciones antes de comenzar el juego.
- La resistencia de la patilla 20 (Rosc) sirve para determinar la frecuencia de muestreo. En nuestro diseño se ha utilizado una de 56 kΩ, para muestrear la señal procedente del micrófono a aproximadamente 12 kHz. La siguiente figura (Fig. 89) muestra la relación entre estos parámetros para tres modelos de la serie ISD1900.

Sampling Frequency	12 kHz	8 kHz	6.4 kHz	5.3 kHz	4 kHz
Rosc	53.3 KΩ	80 KΩ	100 KΩ	120 KΩ	160 KΩ
ISD1916	10.6 sec	16 sec	20 sec	24 sec	32 sec
ISD1932	21.3 sec	32 sec	40 sec	48 sec	64 sec
ISD1964	42.6 sec	64 sec	80 sec	96 sec	128 sec

Fig. 89. Relación entre Rosc y la frecuencia de muestreo

- Como se quiere grabar/reproducir tres mensajes de audio (uno por cada foco), se ha conectado FMC3 y FMC1 a tierra, y FMC2 a la alimentación (véase Fig. 90).

FMC3	FMC2	FMC1	# of fixed messages <sup>[1]</sup>
0	0	0	1
0	0	1	2
0	1	0	3
0	1	1	4
1	0	0	5
1	0	1	6
1	1	0	7
1	1	1	8

Fig. 90. Relación entre los valores de FMC3, FMC2 y FMC1 y el número de mensajes

- Cuando la salida LED valga "0" (durante la grabación o el final de la reproducción), el led estará polarizado en directa y lucirá. Para realizar la programación se ha necesitado utilizar esta salida como una entrada del micro.
- En la patilla R/P se ha conectado un conmutador deslizante que permite seleccionar el modo de funcionamiento del Sistema de Iluminación Interactivo entre grabación o reproducción.

### Sonido del Interfaz de usuario

El segundo ISD1964 que se ha utilizado está configurado solo para reproducir (patilla 24 conectada a la alimentación), ya que el audio ha sido grabado previamente. Los sonidos son un mensaje de bienvenida cuando se enciende el sistema y un mensaje de alarma en el estado de batería baja.

Comentarios sobre las conexiones:

- Para comenzar las reproducciones se necesita un "0" en alguna de las entradas, y como el mensaje de bienvenida debe sonar cuando se encienda el sistema, se ha conectado la salida de un inversor (cuya entrada es la alimentación) directamente a M0.
- La otra entrada disponible (M1) va unida a la salida del microprocesador, que es el dispositivo que decide cuando informar del estado de las pilas, y por tanto, cuando debe sonar el mensaje de alarma.

### **Alternativas de diseño**

Una alternativa de diseño hubiera sido eliminar este bloque y utilizar la opción PWM del microcontrolador para generar señales (triangular, cuadrada...) que reprodujeran diferentes sonidos. Aunque esta fue la primera idea, se decidió buscar otras alternativas más profesionales y que resultaran más atractivas para los niños.

## **2.4.4 Sistema de alimentación**

El interfaz de usuario va conectado a la red eléctrica, pero como el circuito tiene que estar alimentado en continua, se ha tenido que utilizar un cargador para ordenador de Trust (el mismo que para las lámparas).

Para alimentar al interfaz de usuario también se ha necesitado utilizar un regulador de tensión conmutado de 5 V, el TSRN 1-2450.

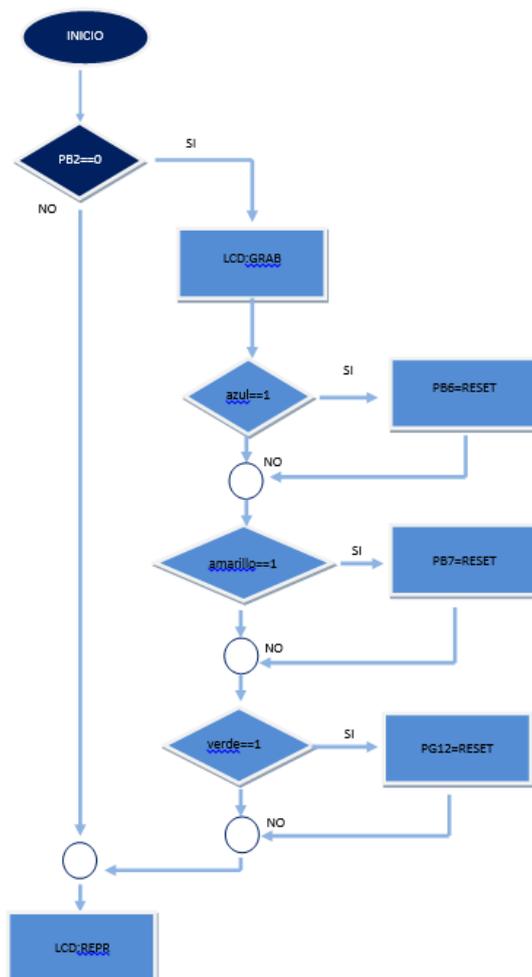
## Capítulo 3. Implementación y pruebas

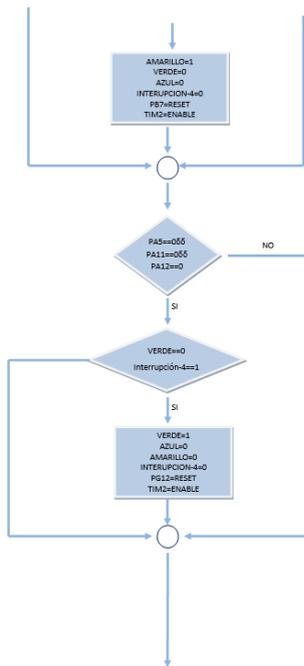
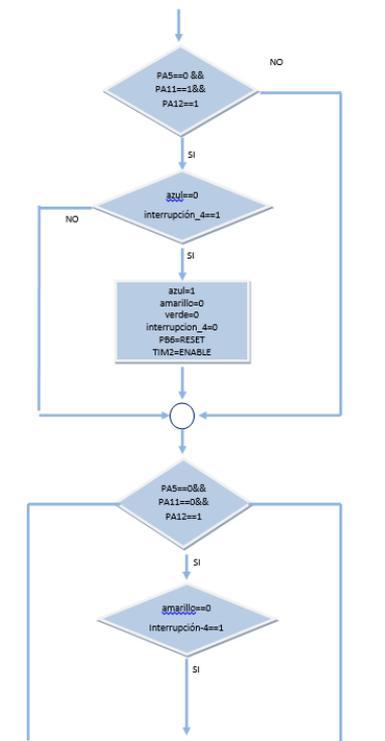
### 3.1. Software del microcontrolador

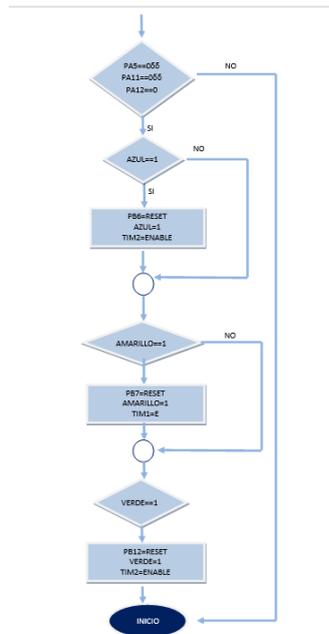
El programa del microcontrolador ha sido diseñado para leer y gestionar el estado de la batería y los modos de funcionamiento de grabación y reproducción. En este apartado, se van a detallar los diagramas de flujo de la función principal main(), la interrupción de PA0 y la interrupción de un timer.

La siguiente figura (Fig. 91) se corresponde con el diagrama de flujo de la función principal main. En él, se evalúa constantemente si el sistema está en modo grabación (azul más oscuro en el diagrama) o en modo reproducción (azul clarito). En términos generales se han programado 3 situaciones para el modo de reproducción:

- Parar el sonido cuando dejas un foco o cambias de modo.
- Que comience a sonar de nuevo si permaneces en un foco pero la grabación se ha acabado.
- Que no haya ninguna secuencia de focos que no se pueda ejecutar.







El estado de la batería se gestiona con una interrupción, de modo que tiene prioridad sobre cualquier otra situación. Para evitar falsas alarmas, el estado de batería baja y de batería óptima se comprueba 8 veces. En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de la interrupción relacionada con PA0.

El último diagrama de flujo se corresponde con la interrupción del timer 2. Para poder parar las grabaciones se tiene que simular el funcionamiento de un pulsador (véase Fig. 87), y para ello, se ha utilizado un temporizador.

### 3.2. Construcción mecánica e instalación del sistema

La construcción mecánica e instalación del sistema se divide en tres bloques: el sistema de iluminación, la raqueta y el interfaz de usuario.

#### El sistema de iluminación

La construcción mecánica e instalación del sistema de iluminación comenzó con la realización de tres taladros (sobre una madera de 240 x 11.7 cm) en la posición en la que se iban a ubicar los focos (para poder pasar los cables de arriba hacia debajo de la estructura). Desde la posición de cada lámpara salen dos cables con corriente alterna, uno que alimenta a la lámpara de esa posición, y otro hacia la siguiente lámpara.

La tensión continua del convertidor CA/CC, se conecta directamente al circuito que controla la emisión de los láseres, y desde ese circuito se reparten las tres señales de modulación hacia cada uno de los focos.

Cada conexión eléctrica está cubierta con una caja estanca y los cables pasan por la plataforma a través de un tubo.

Tras realizar las conexiones eléctricas se montó la estructura de papel que cubre las lámparas y se le añadió un soporte de chapa para sujetar al puntero láser. En la siguiente figura

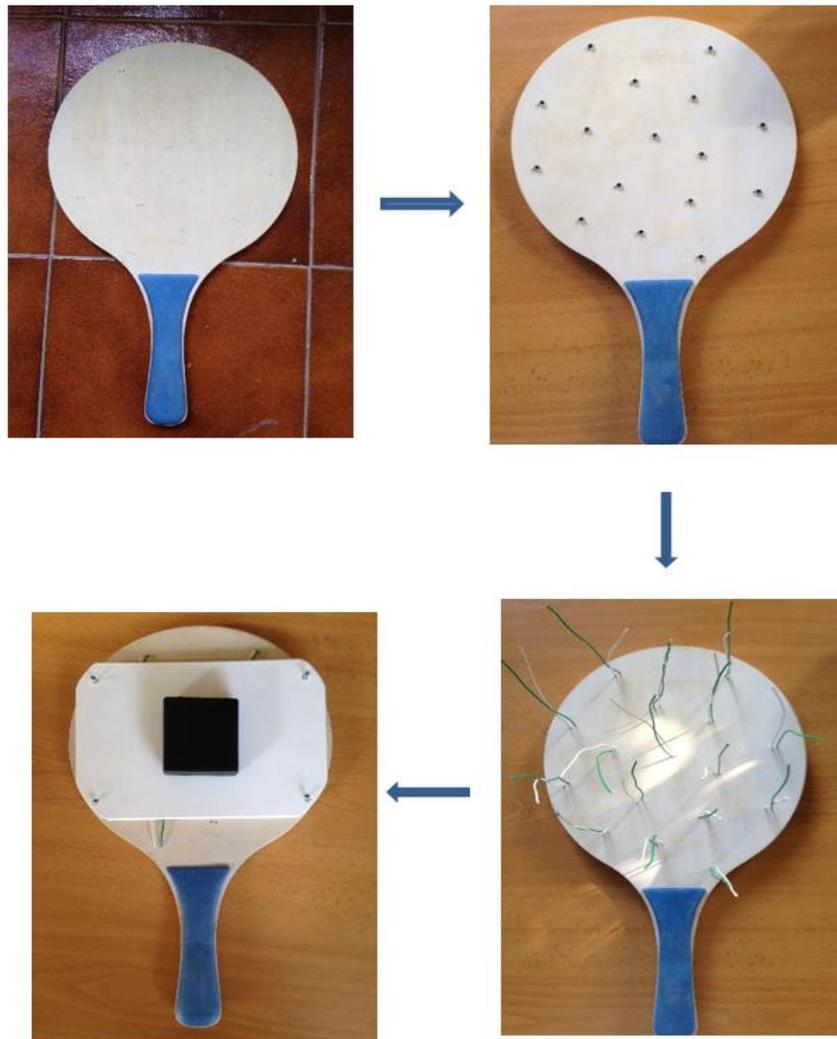
(Fig. 94) se muestra paso a paso como se realizó la instalación eléctrica y construcción de las lámparas.



*Fig. 94. Construcción e instalación del sistema de iluminación*

Es necesario que los fotodiodos estén en la cara superior de la raqueta para poder detectar la luz. Por ello, se han hecho 32 taladros milimétricos (una por cada pata) y se han insertado los fotodiodos sobre la superficie de la raqueta. Cada pata del fotodiodo tiene soldado un cable para poder conectarlos con el resto de componentes electrónicos.

Las placas de circuito impreso están selladas y protegidas con una tapadera atornillada, sobre la cual se ha pegado el portapilas. En la siguiente figura (Fig. 95) se muestra la construcción de la raqueta.



*Fig. 95. Construcción de la raqueta*

### **Interfaz de usuario**

El interfaz de usuario está construido a partir de una caja de madera. Sobre dicha caja se han realizado doce taladros: para el LCD, los tres pulsadores de colores, el conmutador para seleccionar el modo de funcionamiento, el conmutador de on/off, los dos altavoces, el micrófono, el led rojo para indicar un estado de batería baja, y el último, para pasar el cable de alimentación. La colocación de estos componentes se ha realizado de tal manera que recuerde

al dibujo de una cara y a los niños le llame la atención. En la siguiente figura (Fig. 96) se muestra el resultado final tras los mecanizados.



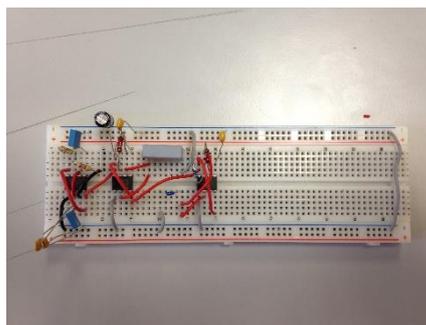
*Fig. 96. Interfaz de usuario*

### 3.3. Implementación de la electrónica

#### Placas protoboards

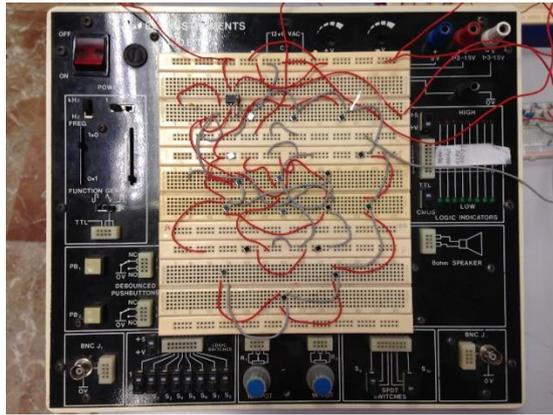
Después de los cálculos teóricos y las simulaciones, todos los circuitos se montaron en placas de pruebas. Los montajes se realizaron de menos a más, es decir, primero se probó cada bloque de forma individual y poco a poco se fueron integrando en el conjunto. Los bloques del sistema se han montado en un total de 7 protoboard.

- Placa de pruebas 1: tres LM555 en modo astable, uno por cada señal de modulación del láseres (Fig.97).



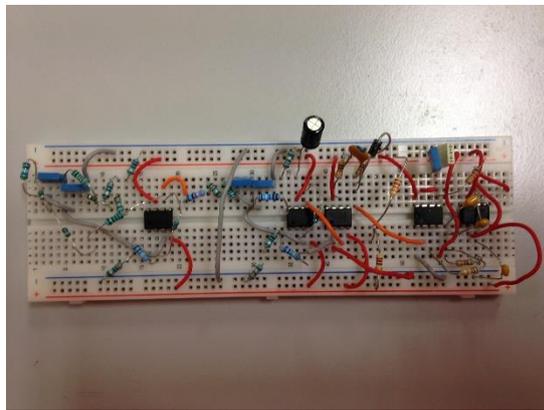
*Fig. 97. Placa de pruebas 1*

- Placa de pruebas 2: convertidor corriente tensión con los fotodiodos conectados en paralelo (Fig. 98).



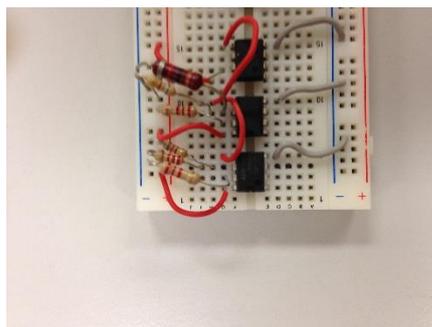
*Fig. 98. Placa de pruebas 2.*

- Placa de pruebas 3: filtro de orden 4, comparador, conformador de pulsos, Lm555 en modo monoestable y derivador (Fig. 99)



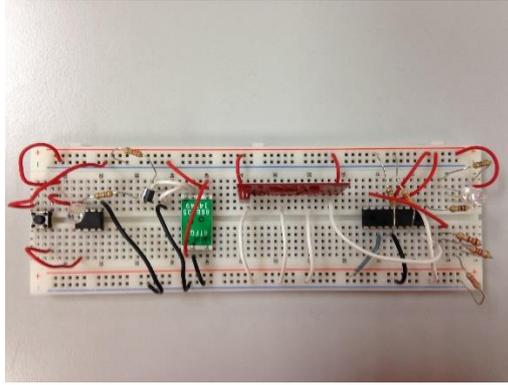
*Fig.99. Placa de pruebas 3.*

- Placa de pruebas 4: comparador triple (Fig. 100)



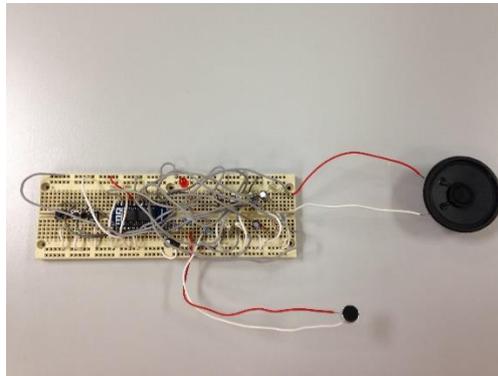
*Fig. 100. Placa de pruebas 4*

- Placa de pruebas 5: emisor y receptor de radiofrecuencia (Fig. 101)



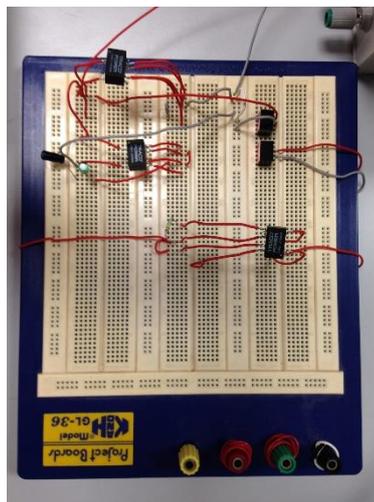
*Fig. 101. Placa de pruebas 5.*

- Placa de pruebas 6: grabación/reproducción de audio (Fig. 102)



*Fig. 102. Placa de pruebas 6.*

- Placa de pruebas 7 : alimentación de todos los bloques (Fig. 103)

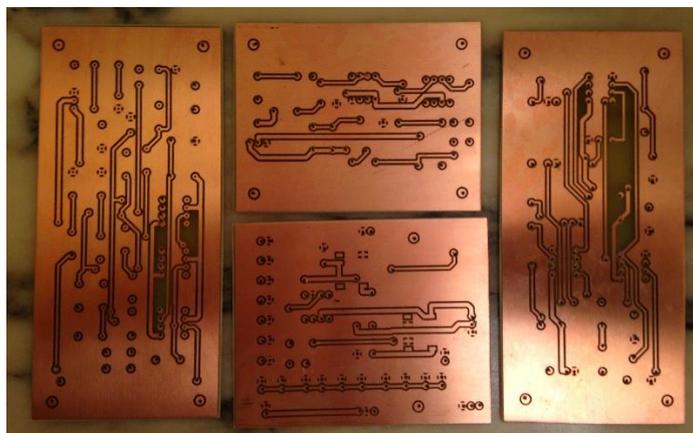


*Fig. 103. Alimentación de todos los bloques*

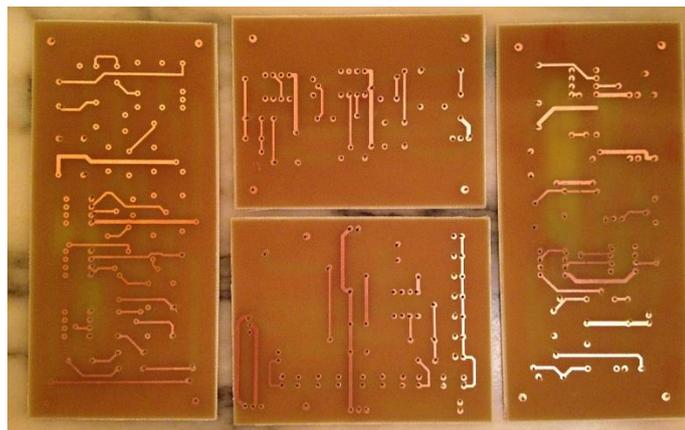
## Placas de circuito impreso

Por problemas en el diseño de las placas de circuito impreso, no están fabricadas a tiempo todas las placas del Sistema de Iluminación Interactivo. En las figuras 104 y 105 se muestran las cuatro PCBs que sí están fabricadas (diseño electrónico de la raqueta) y prácticamente taladradas. Por último, comentar que puesto que la mayoría de los circuitos integrados de este proyecto no son comunes, se ha tenido que dibujar todos los componentes (en el esquemático) y sus respectivos footprints (en el layout) para diseñar las placas de circuito impreso.

Todas las placas están fabricadas a dos caras e incluyen un plano de masa. Por lo complejo del diseño, la electrónica de la raqueta se ha dividido en cuatro placas.



*Fig. 104. Placas de circuito impreso de la raqueta (cara top)*



*Fig. 105. Placas de circuito impreso de la raqueta (cara bottom)*

## 3.4. Pruebas de comunicación correcta entre bloques

Antes de realizar el montaje del Sistema de Iluminación Interactivo hemos realizado pruebas de comunicación en el laboratorio entre los distintos bloques. Para ello, se ha necesitado simular una situación real de funcionamiento:

- La distancia vertical entre los focos y la raqueta se recreó con dos mesas separadas entre sí.
- El foco fue sustituido por un soporte para dispositivos ópticos, y la raqueta, por un entrenador con fotodiodos conectados en paralelo (véase Fig.106 y 107)



*Fig. 106. Estructura para dispositivos ópticos*



*Fig. 107. Entrenador con fotodiodos conectados en paralelo*

- En el sistema real el foco está fijo en el techo y es la raqueta la que se mueve, pero como la estructura que sujetaba el láser nos permitía girarlo, en las pruebas del laboratorio ocurría justamente lo contrario.

En el VIDEO 1 se puede ver qué cuando “el foco” está alineado con “la raqueta” se reproduce el sonido que se ha grabado (“prueba tres”), y por tanto, que el entrenador de pruebas recibe correctamente la luz procedente del láser.

En el video, el circuito de la raqueta y del interfaz de usuario están prácticamente juntos. Las pruebas de comunicación (a diferentes distancias) entre ambos se van a explicar en el apartado 4.1.2. Medidas de alcance y pruebas de iluminación.

## Capítulo 4. Resultados e implementación final

### 4.1 Funcionamiento satisfactorio del sistema

En el video se muestra como el Sistema de Iluminación Interactivo funciona según nos marcamos al comienzo de este TFG (véase 2.1.1).

### 4.2 Medidas de alcance y pruebas de iluminación

#### 4.2.1 Sistema de iluminación – raqueta

##### Pruebas de distancia

El sistema ha sido probado en el laboratorio a una distancia (entre el puntero láser y el entrenador) de 2.3 m, 1.6 m y 1.2 m. Estas distancias se corresponden con tres situaciones posibles de uso:

- Persona tumbada
- Persona en silla de ruedas
- Persona de pie

Para calcular estas distancias se ha tenido en cuenta que la altura de los techos en el Colegio San Rafael es de 3.5 m y que las lámparas cuelgan aproximadamente 70 cm.

En la Figura x. se muestra las salidas del convertidor corriente-tensión a estas distancias. Como se puede ver, la amplitud de la señal prácticamente no varía a las distancias de funcionamiento del sistema. Con el osciloscopio se vio como a 2,3 m; si la luz del puntero coincide justo con un fotodiodo, se detecta mayor luz que a menor distancia.

##### Pruebas de iluminación

Cuando hay mucha luz ambiente, como por ejemplo, en el laboratorio con todos los fluorescentes encendidos, el sistema no funciona. Esto no es debido a un problema en la raqueta, es simplemente porque la potencia óptica del láser es inferior a la del entorno y la luz ambiente “absorbe” la imagen del puntero.

En un ambiente tenue tanto las lámparas de colores como las imágenes del puntero láser pueden ser perfectamente identificadas por los niños.

Quiero aclarar que el Sistema de Iluminación Interactivo sí funciona con luz ambiente, y de hecho, ha sido diseñado para que así sea. Pero cuando no se puede ver la imagen del puntero láser, ni funciona el sistema ni tiene sentido utilizarlo.

#### 4.2.2 Raqueta- Interfaz de usuario

##### Pruebas de distancia

Las comunicaciones por radiofrecuencia entre la raqueta y el interfaz de usuario se han comprobado que funcionan correctamente sin antena a más de 10 m. No se han realizado

pruebas a mayores distancias porque en el interfaz de usuario es donde se reproduce el audio y no tiene sentido que este alejado de la raqueta (los niños no escucharían los sonidos).

### 4.3 Pruebas de resistencia de uso

La raqueta es el único elemento del Sistema de Iluminación Interactivo que está en contacto directo con los niños, y por tanto, es el más susceptible de recibir golpes. Para comprobar la resistencia de la raqueta se han realizado dos pruebas:

- Con la mitad de la raqueta apoyada sobre una mesa y la otra mitad en el aire, se ejerce una fuerza en dirección perpendicular al plano del suelo.
- Se lanza con fuerza la raqueta contra el suelo en repetidas ocasiones

### 4.4 Presupuesto

La siguiente tabla muestra el coste total del sistema dividido en los bloques funcionales:

Código	Unidades	Descripción	Medición	Precio Unitario	Precio Total
<b>Sistema de iluminación</b>					
<b>Capítulo 1. Materiales y construcción mecánica</b>					
01.01	1	<b>Listón de madera de 240 x 11.7 cm</b> Listón cepillado de abeto de 240 x 11.7 cm y 2.7 cm de espesor	Ud.	15,65€	15,65€
01.02	4	<b>Pantalla para lámpara de techo</b> Pantalla para lámpara de techo de 46 cm de diámetro y 31 cm de altura	Ud.	6,5€	26€
01.03	3	<b>Montura para lámpara de techo</b> Montura blanca para lámpara de techo	Ud.	2,5€	7,5€
01.04	1	<b>Lámina de chapa</b> Lámina de chapa de 1000 x 500 x 0.5 mm	Ud.	7,95€	7,95€
01.05	1	<b>Adhesivo</b> Cola adhesiva "No más clavos" de Pattex	Ud.	11,75€	11,75€
01.06	1	<b>Papel de lija para madera</b> Papel de lija básico de grano 90	Ud.	0,35€	0,35€
01.07	20	<b>Tornillos</b> Tornillo avellanado de 4 cm con cabeza de estrella	Ud.	0,16€	3,2€
01.08	3	<b>Caja pequeña para circuito eléctrico/electrónico</b> Caja estanca 7 conos de 83x 83 x 50 mm	Ud.	1,49€	4,47€
01.09	2	<b>Caja grande para circuito eléctrico/electrónico</b> Caja estanca 10 conos de 166x 116x 70 mm	Ud.	3,80€	7,6€
01.10	1	<b>Tubo para cables</b>	Ud.	1,79€	1,79€

		Tubo rígido de PVC			
01.11	1	<b>Grapa de sujeción</b> Paquete de 10 grapas de 20 mm	Ud.	3,55€	3,55€
01.12	3	<b>Bombillas de colores</b> Bombilla de colores 220 V/50 Hz	Ud.	3,75€	11,25€
01.13	3	<b>Punteros láser</b> Puntero láser con diferentes imágenes	Ud.	2 €	6 €
<b>Capítulo 2. Componentes e implementación electrónica</b>					
02.01	1	<b>Conectores</b> Regleta 2,54mm pin torneado hembra recta corta de 40 contactos	Ud.	1,32€	1,32€
02.02	6	<b>Condensadores sin polaridad</b> Condensadores sin polaridad de diferentes valores	Ud.	0,16€	0,96€
02.03	1	<b>Condensador electrolítico</b> Condensador electrolítico de 100 µF	Ud.	0,22€	0,22€
02.04	3	<b>Circuito integrado LM555</b> Temporizador LM555	Ud.	0,84€	2,52€
02.05	7	<b>Resistencias de ¼ W</b> Resistencias de valores varios	Ud.	0,04€	0,28€
02.06	1	<b>Conector Jack</b> Conector Jack 3.5 mm aéreo hembra de 3 polos	Ud.	0,66€	0,66€
02.07	1	<b>Regulador de tensión conmutado 5 V</b> Regulador de tensión conmutado TSNR 1-2450 SM (tensión ajustable)	Ud.	10,20€	10,20€
02.08	2	<b>Clema</b> Clema de 2.54 mm con una entrada y una salida.	Ud.	0,2€	0,4€
02.09	1	<b>Convertidor CA/CC</b> Cargador de ordenador de la marca Trust (3.5 A y 18 V de salida)	Ud.	24,99€	24,99€
02.10	1	<b>Fusible</b> Fusible de acción rápida 0034.1508 de Schurter	Ud.	0,04€	0,04€
<b>Raqueta</b>					
<b>Capítulo 1. Materiales y construcción mecánica</b>					
01.01	1	<b>Raqueta</b> Raqueta de playa	Ud.	2,2€	2,2€
01.02	1	<b>Portapilas</b> Carcasa portapilas para 4 pilas AA cableada y con interruptor	Ud.	1,85€	1,85€
01.03	1	<b>Caja grande para circuito eléctrico/ electrónico</b> Caja estanca 12 conos de 220x 170x 80 mm	Ud.	5,7€	5,7€
01.04	18	<b>Tornillos</b>	Ud.	0,16€	2,88€

		Tornillo avellanado de 4 cm con cabeza de estrella			
<b>Capítulo 2. Componentes e implementación electrónica</b>					
02.01	1	<b>Conectores</b> Regleta 2,54mm pin torneado hembra recta corta de 40 contactos	Ud.	1,32€	1,32€
02.02	7	<b>Condensadores sin polaridad</b> Condensadores sin polaridad de diferentes valores	Ud.	0,16€	1,12€
02.03	3	<b>Condensador electrolítico</b> Condensador electrolítico de diferentes valores	Ud.	0,22€	0,66€
02.04	16	<b>Resistencias de ¼ W</b> Resistencias de diferentes valores	Ud.	0,04€	0,64€
02.05	4	<b>Condensadores 1% de tolerancia</b> Condensadores 1% de tolerancia de diferentes valores	Ud.	0,2€	0,8€
02.06	21	<b>Resistencias 1% de tolerancia</b> Resistencias 1% de tolerancia de diferentes valores	Ud.	0,06€	1,26€
02.07	4	<b>Amplificador operacional</b> Amplificador operacional TL081	Ud.	0,31€	1,24€
02.08	1	<b>Diodo</b> Diodo 1N4001-T	Ud.	0,1€	0,1€
02.09	1	<b>Diodo zener de 2.4 V</b> Diodo zener de 2.4 V 1N5221B	Ud.	0,1€	0,1€
02.10	1	<b>Diodo led de luz blanca</b> Diodo led de luz blanca de 3 mm	Ud.	0,65€	0,65€
02.11	1	<b>Circuito integrado LM55</b> Temporizador LM555	Ud.	0,84€	0,84€
02.12	2	<b>Amplificador operacional rail to rail</b> Amplificador operacional rail to rail LMC6482	Ud.	2,13€	4,26€
02.13	1	<b>Encoder</b> Encoder RF600E	Ud.	3,56€	3,56€
02.14	1	<b>Transmisor de radiofrecuencia</b> Transmisor de radiofrecuencia FM-RTFQ1-868	Ud.	12,73€	12,73€
02.15	1	<b>Transistor NPN</b> Transistor de radiofrecuencia BC848	Ud.	0,1€	0,1€
02.16	16	<b>Fotodiodos</b> Fotodiodo BPW34	Ud.	0,81€	12,96€
02.17	2	<b>Regulador de tensión conmutado +5 V/-5 V</b> Regulador de tensión conmutado TSRN 1-2450 SM	Ud.	10,20€	20,40€

02.18	1	<b>Regulador de tensión conmutado 3.3 V</b> Regulador de tensión conmutado TSR 1-2433	Ud.	7,40€	7,40€
02.19	1	<b>Pilas alcalinas 1.5 V</b> Paquete de 4 pilas GP Plus tipo AA (2.2 Ah)	Ud.	3,46€	3,46€
<b>Interfaz de usuario</b>					
<b>Capítulo 1. Materiales y construcción mecánica</b>					
01.01	1	<b>Caja</b> Caja de madera de 240x 170x 90 mm	Ud.	6,95€	6,95€
01.02	5	<b>Láminas de goma eva</b> Láminas de goma eva de varios colores (40 x 60 cm)	Ud.	1,25€	6,25€
<b>Capítulo 2. Componentes e implementación electrónica</b>					
02.01	1	<b>Conectores</b> Regleta 2,54mm pin torneado hembra recta corta de 40 contactos	Ud.	1,32€	1,32€
02.02	16	<b>Condensadores sin polaridad</b> Condensadores sin polaridad de diferentes valores	Ud.	0,16€	2,56€
02.03	8	<b>Condensador electrolítico</b> Condensador electrolítico de diferentes valores	Ud.	0,22€	1,76€
02.04	15	<b>Resistencias de ¼ W</b> Resistencias de diferentes valores	Ud.	0,04€	0,6€
02.05	4	<b>Condensadores 1% de tolerancia</b> Condensadores 1% de tolerancia de diferentes valores	Ud.	0,2€	0,8€
02.06	21	<b>Resistencias 1% de tolerancia</b> Resistencias 1% de tolerancia de diferentes valores	Ud.	0,06€	1,26€
02.07	1	<b>Diodo led rojo</b> Diodo led rojo de 3mm	Ud.	0,47€	0,47€
02.08	3	<b>Pulsador de colores</b> Pulsador de panel con rosca	Ud.	1,9€	5,7€
02.09	1	<b>Micrófono electret</b> Micrófono omnidireccional con respuesta de 50Hz-16000Hz de 6mm de la marca PRO SIGNAL	Ud.	0,91€	0,91€
02.10	2	<b>Altavoz</b> Altavoz 8 Ω y 57 mm	Ud.	2,8€	5,6€
02.11	2	<b>Conmutador</b> Conmutador deslizante dos posiciones	Ud.	1,3€	2,6€
02.12	1	<b>Placa de evaluación</b> Placa de evaluación STM32-L Discovery	Ud.	10,12€	10,12€
02.13	1	<b>Decoder</b> Decoder RF600D	Ud.	5,3€	5,3€

02.14	1	<b>Receptor de radiofrecuencia</b> Transmisor de radiofrecuencia FM-RRFQ1-868	Ud.	20,54€	20,54€
02.15	2	<b>Circuito integrado de grabación/reproducción de audio</b> Circuito integrado ISD1964	Ud.	5,6€	11,2€
02.16	1	<b>Inversor CMOS</b> Inversor CD4069	Ud.	0,56€	0,56€
02.17	1	<b>Regulador de tensión conmutado 5 V</b> Regulador de tensión conmutado TSR 1-2450	Ud.	5,7€	5,7€
02.09	1	<b>Convertidor CA/CC</b> Cargador de ordenador de la marca Trust (3.5 A y 18 V de salida)	Ud.	24,99€	24,99€
02.10	1	<b>Fusible</b> Fusible de acción rápida 0034.1508 de Schurter	Ud.	0,04€	0,04€
<b>Precio de fabricación del Sistema de Iluminación Interactivo</b>					<b>334,05€</b>

## Capítulo 5. Conclusiones y posibles líneas futuras

### 5.1 Conclusiones

A término de este proyecto se puede concluir que se han cumplido todos los objetivos.

Tras probar el funcionamiento del Sistema de Iluminación Interactivo, se pudo comprobar que satisfacía plenamente el objetivo de fomentar la relación causa-efecto, y se pudo apreciar también, que se establecía dicha relación fijándose tanto en los focos como en la raqueta, entendiendo la labor de cada uno y actuando en consecuencia. En definitiva, jugando.

Por otra parte también se cumplió el objetivo de diseñar y construir el sistema con el menor coste posible, que finalmente ascendió a 328.51€ muy por debajo de productos similares en el mercado como los que se describen en apartados anteriores que rondaban los 4600€ [3].

Desde el punto de vista académico, se han adquirido conocimientos en ámbitos de la electrónica en los que nunca antes se había trabajado, como la radiofrecuencia, el audio o el diseño de placas de circuito impreso.

A nivel profesional, este TFG me ha permitido desarrollar un proyecto de ingeniería que partió de una idea hace un año, y que hoy, se puede decir que se ha convertido en una realidad. El haber realizado el proyecto por encargo del colegio, no hace sino acrecentar la sensación de trabajar en algo real, tangible y que, además, va a ser útil para gente que lo necesita, lo que da sentido a todo el trabajo que haya podido conllevar.

## 5.2 Líneas futuras

Aun siendo un proyecto bastante cerrado y poco dado a admitir futuras ampliaciones, podrían considerarse ciertas mejoras.

Respecto a la parte mecánica, se podría haber obtenido un sistema con mejores acabados, más compacto y resistente, diseñando e imprimiendo las piezas de la raqueta y el interfaz de usuario con una impresora 3D. En el momento en el que se iba a proceder al montaje del sistema, la impresora 3D (incluir marca) del GDAF estaba estropeada.

Además, me hubiera gustado que la plataforma del sistema de iluminación tuviera raíles para poder desplazar los focos.

Respecto a la parte electrónica, el sistema de audio se podría completar con una etapa extra de filtrado y amplificación. Esta mejora se intentó desarrollar en el laboratorio con el amplificador de estéreo TDA2009, pero aunque se consiguió aumentar el volumen de reproducción, el ruido empeoró. Por falta de tiempo, no se pudo mejorar su funcionamiento y se decidió eliminar este bloque del diseño del interfaz de usuario.

En relación a la implementación de la electrónica, en este TFG ha sido la primera vez que he diseñado una PCB y soy consciente de que se podría haber reducido el tamaño de las placas, mejorando el proceso de emplazamiento y enrutado.

Respecto al funcionamiento, el Sistema de Iluminación interactivo podría incluir un aplicación software para seleccionar canciones, por ejemplo, descargadas desde internet, realizar las grabaciones con un micrófono conectado al ordenador, saber el estado de la batería,... Esta ampliación está fuera de los límites de este proyecto, pero otros alumnos de la Universidad Carlos III podrían desarrollarla para el Colegio San Rafael de Madrid.

## Bibliografía

[1] <http://www.rompa.com/rompa-interactive-lighting-system-8-beam-system.html>

Última vez consultada: 22/09/2014

[2] <http://www.oillusions.com/es/13-luz-negra>

Última vez consultada: 21/09/2014

[3] <http://www.oillusions.com/es/bolas-de-espejos-y-focos/8-bola-de-espejos-motor-de-05-rpm.html>

Última vez consultada: 19/09/2014

[4] <http://www.rompa.com/water-effects-projector.html>

Última vez consultada: 23/09/2014

[5] <http://www.rompa.com/laser-sky-projector.html>

Última vez consultada: 17/09/2014

[6] <http://djmania.es/dune-dun-7041-foco-para-exteri-p-7873.html>

Última vez consultada: 14/09/2014

[7] <http://djmania.es/par-36-76-5mm-leds-abs-p-5417.html>

Última vez consultada: 22/09/2014

[8] <http://djmania.es/foco-led-par36-12-led-rgb-p-26801.html>

Última vez consultada: 20/09/2014

[9] <http://djmania.es/foco-par64-corto-leds-183-p-4977.html>

Última vez consultada: 21/09/2014

[10] <http://es.rs-online.com/web/p/lamparas-multiled/0497079/>

Última vez consultada: 12/09/2014

[11] <http://es.rs-online.com/web/p/lamparas-multiled/3106757/>

Última vez consultada: 08/09/2014

[12] <http://es.rs-online.com/web/p/lamparas-multiled/7646278/>

Última vez consultada: 22/09/2014

[13] [http://www.miniinthebox.com/es/foco-rgb-tipo-candelabro-led-a-control-remoto-e27-2w-85-265v\\_p489927.html?pos=ultimately\\_buy\\_8?pos=ultimately\\_buy\\_8#prod\\_description](http://www.miniinthebox.com/es/foco-rgb-tipo-candelabro-led-a-control-remoto-e27-2w-85-265v_p489927.html?pos=ultimately_buy_8?pos=ultimately_buy_8#prod_description)

Última vez consultada: 22/09/2014

[14] <http://www.milanuncios.com/equipos-hi-fi/laser-nicols-4-cabezas-rgb-rainbow-106745275.htm>

Última vez consultada: 22/09/2014

[15] <http://raydextech.com/led-collimation-optics.html>

Última vez consultada: 21/09/2014

[16] [http://www.mightexsystems.com/family\\_info.php?cPath=&categories\\_id=147](http://www.mightexsystems.com/family_info.php?cPath=&categories_id=147)

Última vez consultada: 20/09/2014

[17] <http://www.telecentric-company.com/iluminadores-telecentricos.html>

Última vez consultada: 22/09/2014

[18] Libro: Instrumentación Electrónica. Autores: Miguel A. Pérez García, Juan C. Álvarez Antón, Juan C. Camo Rodríguez, Fco. Javier Ferrero Martín, Gustavo J. Grillo Ortega. Editorial Paraninfo.

Última vez consultado: 20/09/2014

## Índice de acrónimos

**AM** Amplitud modulada

**CI** Circuito Integrados

**FM** Frecuencia Modulada

**LED** Light-Emitting Diode (Diodo emisor de luz)

**PCB** Printed Circuit Board

**PCI** Placa de Circuito Impreso

**RGB** (Red Green Blue): Hace referencia a LEDs especiales capaces de generar por modulación cualquier color a partir de la mezcla de primarios.

**RF** Radio Frecuencia

**TFG** Trabajo Fin de Grado

## **Anexos**