

*ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



***Trabajo Fin de Grado***

**Análisis espectral de  
lámparas prehistóricas**  
(Spectral analysis of prehistoric lamps)

Para acceder al Título de

Graduado en  
*Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación*

Autor: Pablo Roldán Varona

Julio - 2017



**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**  
**CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO**

*Realizado por:* Pablo Roldán Varona  
*Director del TFG:* Luis Rodríguez Cobo  
*Título:* "Análisis espectral de lámparas prehistóricas"  
*Title:* "Spectral analysis of prehistoric lamps"

**Presentado a examen el día: 5 de Julio de 2017**

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Bravo Sánchez, Laura María  
Secretario (Apellidos, Nombre): Rodríguez Cobo, Luis  
Vocal (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, María Ángeles

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de: .....

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG  
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº  
(a asignar por Secretaría)

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

# Análisis espectral de lámparas prehistóricas

Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

ETS de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación

Grupo de Ingeniería Fotónica (GIF)

por *Pablo Roldán Varona*

## Resumen

**R**esulta incontestable que la fotónica comienza a ser enormemente relevante en la sociedad, como manifiesta su presencia en los diseños tecnológicos más avanzados de la actualidad. Estas circunstancias han derivado en su inclusión, por parte de la Unión Europea, como una de las cinco tecnologías clave de futuro. Entre sus innumerables aplicaciones, el control óptimo de las condiciones de iluminación permite incrementar el rendimiento de múltiples sistemas que emplean técnicas de detección y medida basadas en la luz. En este marco, las tareas de captura y síntesis de una determinada iluminación pueden ser facilitadas a partir de métodos que permitan caracterizar dichas condiciones lumínicas.

El presente trabajo se enmarca en dicha cuestión, en tanto en cuanto conocer las condiciones de iluminación existentes en la prehistoria posibilita simplificar la comprensión del comportamiento humano de la época, la interpretación de los diferentes vestigios de población humana, así como una optimización en la conservación del arte rupestre de cavidades y abrigos, dentro de la extraordinaria complejidad que dichos aspectos presentan. En primer lugar, se elaborará y caracterizará la lámpara prehistórica que reproduzca la metodología de iluminación de los grupos humanos para, posteriormente, sintetizar espectralmente el rango visible de las mismas, al ser la región relevante de cara a la interpretación humana. Finalmente, se culminará el proyecto con la implementación de una fuente de luz sintética adaptable que, mediante tecnología LED, simulará el comportamiento espectral de las lámparas originales, limitando los potenciales efectos adversos que la radiación ocasiona tanto sobre los órganos biológicos, como sobre las pinturas rupestres, sin que se vea comprometida la calidad cromática percibida.

**Palabras clave** – Síntesis espectral, LED, Espectroscopía, Optimización, Lámpara de tuétano, Cueva de *Altamira*, Luz sintética, *Arduino*, *Pulse Width Modulation* (PWM), *Printed Circuit Board* (PCB)

UNIVERSITY OF CANTABRIA

# Spectral analysis of prehistoric lamps

Bachelor's Degree in Telecommunication Technologies Engineering

Superior Technical School of Industrial and Telecommunication Engineers

Photonics Engineering Group

by *Pablo Roldán Varona*

## Abstract

**I**t turns out to be undeniable that photonic begins to be enormously relevant in society, as it shows its presence in the most advanced technological designs at present. These circumstances have led to their inclusion by the European Union as one of the five Key Enabling Technologies (KETs) of the future. Among its innumerable applications, optimum control of lighting conditions allows increasing the performance of multiple systems employing light-based detection and measurement techniques. In this context, the tasks of capture and synthesis of a certain lighting can be facilitated from methods that allow to characterize the above-mentioned light conditions.

The present work is framed in the above-mentioned question, as long as the knowledge of the prehistoric conditions of illumination makes possible to simplify the understanding of the human behavior of the time, the interpretation of the different traces of human population, as well as an optimization in conservation of the rupestrian art of cavities and coats, within the extraordinary complexity that these aspects present. First of all, the prehistoric lamp that reproduces the methodology of illumination of the human groups will be elaborated and characterized to later, spectrally synthesize the visible range of the same, being the relevant region in the face of human interpretation. Finally, the project will culminate with the implementation of an adaptable synthetic light source that, using LED technology, will simulate the spectral behaviour of the original lamps, limiting the potential adverse effects that radiation causes on both biological organs and on rupestrian paints, without being compromised the perceived chromatic quality.

**Key words** – Spectral synthesis, LED, Spectroscopy, Optimization, Marrow lamp, Altamira Cave, Synthetic light, *Arduino*, Pulse Width Modulation (PWM), Printed Circuit Board (PCB)

## Agradecimientos

**E**n primer lugar, me gustaría manifestar mi más sincero agradecimiento a *Luis*, el artífice de los resultados cosechados. Por su ayuda, por su disponibilidad, por su tiempo, por sus innumerables consejos durante este año, y por amenizar los días en el departamento. Más aún por llenarme medio escritorio con iconos de nuevos programas y, cómo no, por hablar más de ciclismo que de espectros. Es un verdadero privilegio trabajar con una enciclopedia humana.

A los integrantes del *Grupo de Ingeniería Fotónica*, por darme la oportunidad de realizar el presente trabajo, así como por prestarme ayuda en las numerosas ocasiones en que la he necesitado. No es fácil encontrar ambientes de trabajo tan agradables como este, y estoy seguro que una de las claves del éxito en los resultados cosechados por el grupo recae en dicho aspecto.

Por último, pero no por ello menos importante, a mi familia, a *Nuria* y a mis amigos, por el apoyo y la confianza mostrada durante este tiempo y, en definitiva, por formar parte de mi día a día.

**Gracias a todos vosotros.**

# Índice general

|  |            |
|--|------------|
| <b>Índice general</b>  | <b>I</b>   |
| <b>Índice de figuras</b>                                       | <b>III</b> |
| <b>Índice de tablas</b>  | <b>V</b>   |
| <b>Acrónimos</b>   | <b>VI</b>  |
| <b>1 Introducción</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Objetivos . . . . .  | 1          |
| 1.2 Estructura del documento . . . . .                         | 2          |
| <b>2 Caracterización espectral de la fuente</b>                | <b>4</b>   |
| 2.1 Cueva de Altamira . . . . .                                | 5          |
| 2.1.1 Contexto histórico-artístico . . . . .                   | 5          |
| 2.1.2 Iluminación de las pinturas rupestres . . . . .          | 6          |
| 2.2 Fundamentos de espectroscopía . . . . .                    | 8          |
| 2.2.1 Principios básicos . . . . .                             | 8          |
| 2.2.2 Análisis, tratamiento y medida . . . . .                 | 10         |
| 2.2.3 Instrumentación . . . . .                                | 11         |
| 2.3 Medición espectral de la fuente . . . . .                  | 13         |
| 2.3.1 Reproducción de lámparas prehistóricas . . . . .         | 13         |
| 2.3.2 Obtención de medidas . . . . .                           | 14         |
| 2.4 Compensación espectral . . . . .                           | 16         |
| 2.4.1 Consideraciones previas . . . . .                        | 16         |
| 2.4.2 Respuesta espectral de los elementos de medida . . . . . | 17         |
| 2.4.3 Respuesta espectral de la fuente de interés . . . . .    | 21         |
| <b>3 Síntesis espectral</b>                                    | <b>22</b>  |
| 3.1 Efectos de la luz sobre la materia . . . . .               | 23         |
| 3.1.1 Interacción entre luz y materia . . . . .                | 23         |
| 3.1.2 Riesgos fotobiológicos . . . . .                         | 25         |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.1.3    | Protección y conservación del arte rupestre . . . . .  | 30        |
| 3.1.4    | Tecnología a emplear . . . . .                         | 31        |
| 3.2      | Algoritmo de síntesis espectral . . . . .              | 32        |
| 3.2.1    | Descripción del problema . . . . .                     | 32        |
| 3.2.2    | Desarrollo del algoritmo . . . . .                     | 34        |
| 3.2.3    | Implementación del algoritmo . . . . .                 | 37        |
| 3.3      | Especificación de elementos del sintetizador . . . . . | 39        |
| 3.3.1    | Selección de fuentes LED . . . . .                     | 39        |
| 3.3.2    | Caracterización de fuentes LED . . . . .               | 47        |
| <b>4</b> | <b>Implementación de la fuente óptica</b>              | <b>49</b> |
| 4.1      | Montaje físico . . . . .                               | 49        |
| 4.1.1    | Diseño del sintetizador óptico . . . . .               | 50        |
| 4.1.2    | Diseño del control remoto . . . . .                    | 55        |
| 4.1.3    | Realización de circuitos impresos . . . . .            | 59        |
| 4.2      | Ajuste en potencia y verificación final . . . . .      | 62        |
| 4.2.1    | Regulación de los LEDs . . . . .                       | 63        |
| 4.2.2    | Verificación espectral del sintetizador . . . . .      | 69        |
| <b>5</b> | <b>Conclusiones y líneas futuras</b>                   | <b>71</b> |
| 5.1      | Líneas de trabajo futuras . . . . .                    | 71        |
|          | <b>Bibliografía</b>                                    | <b>73</b> |
|          | <b>Anexo I</b>   | <b>76</b> |

# Índice de figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Aparición de lámparas prehistóricas . . . . .  | 7  |
| 2.2  | Espectro electromagnético en función de la longitud de onda . . . . .                            | 8  |
| 2.3  | Transiciones electrónicas y espectros UV-visible . . . . .                                       | 9  |
| 2.4  | Espectrómetro HR2000CG UV-NIR . . . . .  | 12 |
| 2.5  | Lámpara de tuétano . . . . .   | 14 |
| 2.6  | Estado de la llama en el proceso de realización de medidas . . . . .                             | 15 |
| 2.7  | Respuesta espectral de la medida sobre la lámpara de tuétano . . . . .                           | 15 |
| 2.8  | Contribuciones presentes en la medida . . . . .  | 16 |
| 2.9  | Punto de partida . . . . .   | 17 |
| 2.10 | Caracterización de elementos de medida . . . . .   | 17 |
| 2.11 | Espectro de emisión asociado a la fuente supercontinua SuperK Compact . . . . .                  | 18 |
| 2.12 | Medición en reflexión con patrón de reflectancia difusa . . . . .                                | 19 |
| 2.13 | Espectro de la medida obtenida con la fuente supercontinua . . . . .                             | 20 |
| 2.14 | Respuesta espectral de los elementos de medida . . . . .   | 20 |
| 2.15 | Esquemático y espectro de emisión resultante de la lámpara de tuétano . . . . .                  | 21 |
|      |  |    |
| 3.1  | Situación física de las células fotosensibles y respuesta espectral . . . . .                    | 26 |
| 3.2  | Efecto <i>Purkinje</i> . Funciones de luminosidad fotópica y escotópica. . . . .                 | 27 |
| 3.3  | Estructura ocular y absorción por tejido . . . . .   | 27 |
| 3.4  | Estructura de la piel y absorción por tejido . . . . .   | 29 |
| 3.5  | Combinación lineal de LEDs . . . . .   | 32 |
| 3.6  | $f_{error}$ como el área de la diferencia entre las curvas $f(\lambda)$ y $g(\lambda)$ . . . . . | 33 |
| 3.7  | Diagrama de flujo de la implementación del algoritmo TRM . . . . .                               | 37 |
| 3.8  | Proceso iterativo del ejemplo práctico . . . . .   | 38 |
| 3.9  | Solución óptima del ejemplo práctico . . . . .   | 39 |
| 3.10 | Temperatura de color del blanco . . . . .  | 41 |
| 3.11 | Síntesis espectral de las distintas alternativas . . . . .                                       | 45 |
| 3.12 | Síntesis espectral definitiva (con espectros escalados de cada LED) . . . . .                    | 48 |
|      |  |    |
| 4.1  | Diagrama electrónico del sintetizador óptico . . . . .   | 50 |
| 4.2  | NMOS como interruptor de potencia . . . . .  | 52 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.3  | Característica $I_D - V_{DS}$ del NMOS empleado . . . . .                        | 53 |
| 4.4  | Placa de circuito impreso asociada al sintetizador óptico . . . . .              | 54 |
| 4.5  | Diagrama electrónico del control remoto . . . . .                                | 55 |
| 4.6  | Funcionamiento del NE555 como multivibrador astable . . . . .                    | 56 |
| 4.7  | Placa de circuito impreso asociada al control remoto . . . . .                   | 58 |
| 4.8  | Proceso de fabricación de circuitos impresos . . . . .                           | 59 |
| 4.9  | Placa fotosensible tras el proceso de insolación . . . . .                       | 61 |
| 4.10 | Placa fotosensible tras el proceso de revelado . . . . .                         | 61 |
| 4.11 | Placa fotosensible tras el proceso de atacado químico . . . . .                  | 61 |
| 4.12 | Placa fotosensible tras el proceso de taladrado y limpieza . . . . .             | 62 |
| 4.13 | Modulación PWM . . . . .   | 63 |
| 4.14 | Comparador PWM . . . . .   | 64 |
| 4.15 | Diagrama temporal de señales $m(t)$ , $c(t)$ y $v(t)$ . . . . .                  | 64 |
| 4.16 | Modos PWM: <i>Fast</i> y <i>Phase Correct</i> . . . . .                          | 65 |
| 4.17 | Control secuencial de las señales PWM asociadas a cada LED . . . . .             | 67 |
| 4.18 | Control remoto y sintetizador . . . . .  | 69 |
| 4.19 | Disposición dinámica en la emisión de luz ( <i>flickering</i> ) . . . . .        | 70 |
| 4.20 | Verificación espectral del sintetizador óptico . . . . .                         | 70 |
| A.1  | Característica espectral de emisión de diversas lámparas de tuétano . . . . .    | 76 |
| A.2  | Síntesis espectral asociada a lámparas de diferentes especies animales . . . . . | 77 |
| A.3  | Síntesis espectral conjunta de diversas lámparas de tuétano . . . . .            | 77 |

# Índice de tablas

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Técnicas artísticas asociadas a periodos del Paleolítico Superior . . . . .                | 6  |
| 2.2  | Especificaciones técnicas del espectrómetro HR2000CG UV-NIR . . . . .                      | 11 |
| 2.3  | Especificaciones técnicas de la fuente supercontinua SuperK Compact G4 . . . . .           | 18 |
| 3.1  | $\lambda$ 's asociadas a energías de enlace de tejidos biológicos . . . . .                | 24 |
| 3.2  | Relación aproximada entre colores y longitudes de onda . . . . .                           | 26 |
| 3.3  | Dispositivos comerciales - <i>Alternativa 1</i> . . . . .                                  | 42 |
| 3.4  | Especificaciones técnicas - <i>Alternativa 1</i> . . . . .                                 | 42 |
| 3.5  | Dispositivos comerciales - <i>Alternativa 2</i> . . . . .                                  | 43 |
| 3.6  | Especificaciones técnicas - <i>Alternativa 2</i> . . . . .                                 | 43 |
| 3.7  | Dispositivos comerciales - <i>Alternativa 3</i> . . . . .                                  | 44 |
| 3.8  | Especificaciones técnicas - <i>Alternativa 3</i> . . . . .                                 | 44 |
| 3.9  | Información sobre el proceso de optimización . . . . .                                     | 46 |
| 3.10 | Coef. de escala de los LEDs de la <i>Alternativa 3</i> en el proceso de síntesis . . . . . | 47 |
| 4.1  | Magnitudes de los componentes pasivos del sintetizador . . . . .                           | 51 |
| 4.2  | Tensión directa típica y máxima de los LEDs empleados . . . . .                            | 53 |
| 4.3  | Tabla de funcionamiento del biestable RS . . . . .   | 56 |
| 4.4  | Magnitudes de los componentes pasivos del control remoto . . . . .                         | 58 |
| 4.5  | Asociación entre <i>timer</i> , modo PWM, factores de pre-escalado y salidas . . . . .     | 65 |
| 4.6  | Factores de pre-escalado correspondientes a cada <i>timer</i> . . . . .                    | 66 |
| 4.7  | Valores de <i>duty cycle</i> para la regulación óptica de los LEDs . . . . .               | 68 |

# Acrónimos

|               |   |
|---------------|---|
| <b>CCD</b>    | Charge-Coupled Device                             |
| <b>CRI</b>    | Color Rendering Index                             |
| <b>CGM</b>    | Conjugate Gradient Method                         |
| <b>DAC</b>    | Digital to Analog Converter                       |
| <b>DRS</b>    | Diffuse Reflectance Spectroscopy                  |
| <b>IR</b>     | Infrared radiation                                |
| <b>FWHM</b>   | Full Width at Half Maximum                        |
| <b>LED</b>    | Light Emitting Diode                              |
| <b>MOSFET</b> | Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor |
| <b>NMOS</b>   | Negative-Channel Metal-Oxide Semiconductor        |
| <b>NIR</b>    | Near-Infrared                                     |
| <b>OSA</b>    | Optical Spectrum Analyzer                         |
| <b>PAR</b>    | Photosynthetically Active Radiation               |
| <b>PCB</b>    | Printed Circuit Board                             |
| <b>PCG</b>    | Preconditioned Conjugate Gradient                 |
| <b>PWM</b>    | Pulse Width Modulation                            |
| <b>SBW</b>    | Spectral BandWidth                                |
| <b>SDP</b>    | Simétrica Definida Positiva                       |
| <b>SMD</b>    | Surface Mount Device                              |
| <b>SNR</b>    | Signal-to-Noise Ratio                             |
| <b>SPST</b>   | Single-Pole Single-Throw                          |
| <b>THT</b>    | Through Hole Technology                           |
| <b>TRM</b>    | Trust Region Method                               |
| <b>TTL</b>    | Transistor-Transistor Logic                       |
| <b>UV</b>     | Ultraviolet radiation                             |

# Introducción

Dentro de las técnicas de detección y medida basadas en fotónica, el controlar las condiciones óptimas de iluminación es determinante para diversas técnicas de análisis de imagen. Las condiciones lumínicas son claves a la hora de mejorar el rendimiento de numerosos sistemas, desde el análisis artístico o el estudio cromático propio de aplicaciones con una finalidad estética o de optimización cualitativa de la imagen, hasta sistemas con un carácter más científico como son reconocimiento de imagen, imagen hiper-espectral o imagen 3D.

La luz, como un tipo de radiación electromagnética, presenta una característica espectral que precisa la integración y combinación de técnicas de espectroscopía y procesado de imagen para su análisis. Por ello, el tener un método que permita la caracterización pormenorizada de las condiciones de iluminación puede facilitar los subsiguientes trabajos de síntesis y captura de la misma, habilitando nuevas técnicas de medida y análisis, e incrementando su valor.

Concretamente, más allá de la investigación orientada a mejorar las técnicas de medida y análisis empleadas hasta la fecha, conocer las condiciones de iluminación de las que se disponía en la prehistoria puede ofrecer un gran valor añadido de cara a la interpretación y conservación del arte rupestre hallado en cavidades y abrigos de la época, vestigios de población humana encontrados hasta el momento. A partir de estudios espectrales de las lámparas empleadas en el contexto de las sociedades que las generaron, se pueden diseñar estrategias que permitan obtener las mismas condiciones espectrales con técnicas modernas, aplicando metodologías precisas de síntesis de luz, basadas en tecnología LED.

## 1.1. Objetivos

Una vez determinados contexto y motivación del proyecto, se define el objetivo de este Trabajo Fin de Grado como el desarrollo e implementación de un sistema de iluminación que reproduzca de forma fiel las condiciones lumínicas que proporcionaban las lámparas de tuétano existentes en la prehistoria, mediante el uso de tecnologías de iluminación controladas, reproducibles y eficientes.

Centrando la atención en la iluminación de cavernas prehistóricas, y más concretamente en el ejemplo de la Cueva de Altamira, el proyecto abarca el estudio y la reproducción de lámparas de tuétano. Las lámparas de tuétano son comunmente aceptadas como las fuentes de luz disponibles en el marco referente a las pinturas de cavidades y abrigos prehistóricos, aproximadamente desde hace 40.000 años (periodo *Auriñaciense*) hasta unos 6.500 años antes del presente, coincidiendo, por ejemplo, con el arte levantino postpaleolítico. En consecuencia, la mayor parte de los vestigios de actividades gráficas<sup>1</sup> se concentran en el periodo Paleolítico [1, 2].

El presente trabajo analiza el espectro visible de dichas lámparas con vistas a su reproducción, al ser la parte relevante de cara a la interpretación humana y artística (frente a los rangos UV e IR), así como de cara a la conservación de las pinturas, cuya interacción con la luz es fuertemente dependiente de la longitud de onda que caracterice dicha radiación.

La optimización de espectros sintéticos a partir de una cuidada combinación de LEDs cuyas características espectrales sean adecuadas para la aplicación en que se enmarca el proyecto, permitirá concebir una estrategia de implementación que posibilite la obtención de luz sintética adaptable a diferentes requisitos de iluminación, con especial énfasis en las condiciones lumínicas propias de las cuevas prehistóricas.

En definitiva, si bien el objetivo preeminente es claro y conciso, como se ha expuesto con anterioridad, este puede ser dividido fundamentalmente en dos cometidos principales, siendo prioritarios para el presente trabajo. Estos son los siguientes:

- Determinar y analizar las características espectrales de emisión de lámparas de tuétano prehistóricas, prestando especial atención a las longitudes de onda que comprenden el rango visible del espectro.
- Diseñar e implementar fuentes de luz sintética que permitan reproducir diferentes condiciones de iluminación, adaptándose a la respuesta espectral que caracterice dicha radiación lumínica. Se hará especial énfasis en la respuesta óptica característica de la iluminación que se utilizaba en cuevas prehistóricas.

## 1.2. Estructura del documento

A continuación se detalla la estructura y el contenido de cada uno de los capítulos que conforman el documento. El trabajo está formado por tres grandes bloques que comprenden el proceso de medida, síntesis e implementación física; por lo que con objeto de organizar el documento de forma sencilla y modular, cada bloque mencionado constituirá un capítulo. La estructura del trabajo es la siguiente:

- **Capítulo 1. Introducción**

El actual capítulo, acondicionado como preámbulo, presenta la importancia del proyecto sobre el que se sustenta el trabajo, exponiendo aspectos clave como son la

---

<sup>1</sup>La dificultad en determinar la finalidad que presentan determinadas actividades gráficas rehúye la calificación de las mismas como arte rupestre.

motivación y el contexto en el que se enmarca el mismo, así como los principales objetivos que caracterizan el proyecto.

◦ **Capítulo 2. Caracterización espectral de la fuente**

El segundo capítulo aborda la caracterización y el análisis espectral pormenorizado de las lámparas de tuétano prehistóricas, discriminando las posibles variaciones que puedan introducir los elementos con los que se realizarán las mediciones. El objetivo del capítulo es obtener la respuesta espectral característica de la fuente de luz original para, posteriormente, sintetizar (Capítulo 3) e implementar (Capítulo 4) una fuente óptica artificial que simule el comportamiento de la lámparas primitivas.

◦ **Capítulo 3. Síntesis espectral**

El tercer capítulo comprende la selección de fuentes LED adecuadas para la iluminación de la Cueva de Altamira, así como para conformar espectralmente de forma precisa la característica determinada en el Capítulo 2, especificando la importancia relativa de cada LED en la fuente global. Para ello, se razonará la región espectral de síntesis y se emplearán técnicas de optimización sobre el problema presentado, que se modelará matemáticamente.

◦ **Capítulo 4. Implementación de la fuente óptica**

El Capítulo 4 contiene el último de los tres grandes bloques que constituyen el trabajo. En él, una vez caracterizados los LEDs, junto con los pesos relativos individualizados, se implementará físicamente el sintetizador que conformará la fuente óptica final. Así pues, se realizará el diseño de los circuitos electrónicos requeridos, para su posterior integración *hardware*.

◦ **Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras**

El capítulo final contiene las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo, así como posibles líneas futuras de investigación que surgen a raíz del mismo.

Adicionalmente, se anexiona al presente documento un conjunto de gráficas que representan los procesos de caracterización y síntesis espectral sobre lámparas de tuétano caracterizadas por especies animales diferentes a la empleada durante el desarrollo del mismo, de carácter bovino. Concretamente se analizarán las características ópticas del tuétano perteneciente a las especies caballar y porcino, finalizando con una confrontación gráfica de los resultados relativos a cada una de las tres especies examinadas, a modo de desenlace.

## Caracterización espectral de la fuente

Este primer bloque del trabajo consiste en determinar de manera exacta el espectro de emisión óptico de las fuentes de iluminación, en este caso naturales, que empleaban las poblaciones que habitaban las cavidades y abrigos rocosos en épocas prehistóricas, lo cual permitirá posteriormente sintetizar dicha respuesta espectral a partir de fuentes LED (Capítulo 3). Todo ello derivará finalmente en la implementación física de la fuente óptica artificial (Capítulo 4).

La Sección 2.1 del presente capítulo expone el contexto histórico-artístico en el que se sitúa la Cueva de Altamira, especificando razonadamente el conjunto de periodos que caracterizan el arte rupestre. Esto permitirá concluir la posición cronológica en que se sitúa la temática trabajada. Asimismo, se centrará la atención en la metodología de iluminación utilizada por los grupos humanos, simbolizada principalmente por las lámparas de tuétano, que se analizarán exhaustivamente con objeto de caracterizar la fuente óptica natural que posteriormente se intentará reproducir.

Por su parte, la Sección 2.2 comprende una breve introducción acerca de los fundamentos básicos de espectroscopía, haciendo especial énfasis en la espectroscopía UV-visible, al ser fundamentalmente este el rango espectral en que se desarrollará el trabajo. Adicionalmente a principios básicos de dicho campo, y conceptos fundamentales de tratamiento y medida, se detallará el funcionamiento del espectrómetro empleado en las dos secciones posteriores para la caracterización espectral.

A continuación, en la Sección 2.3 se engloba lo alusivo al proceso de medidas sobre lámparas prehistóricas, reproducidas rigurosamente en base a lo descrito en la primera sección. Dicha fase de medidas comprende la determinación de las componentes espectrales del espectro óptico asociado a la fuente natural. Si bien la síntesis únicamente englobará el rango visible, el espectro se caracterizará parcialmente también en el rango IR (longitudes de onda cubiertas por el espectrómetro), dada la relevancia que presenta conocer el comportamiento espectral en dicha región.

Por último, la Sección 2.4 pretende inferir la respuesta espectral propia de la combustión del tuétano, distinguiendo, dentro del espectro medido en la sección precedente, las componentes referidas a los elementos de medida (espectrómetro y fibra óptica), y a la fuente de emisión en sí; siendo esta última la contribución sustancial, y sobre la cual se efectuará la síntesis espectral y la implementación física en los capítulos 3 y 4, respectivamente.

## 2.1. Cueva de Altamira

El arte rupestre paleolítico es una de las primeras muestras simbólicas de comportamiento humano. Sin embargo, la dificultad en la obtención de datos fiables implica que el hecho de situar cronológicamente este conjunto de muestras primitivas sea, aún en la actualidad, un proceso de enorme dificultad. No obstante, aunque la exactitud temporal sea limitada, es conveniente introducir brevemente una aproximación cronológica que ponga en contexto la temática del presente trabajo, para posteriormente evaluar exhaustivamente la metodología de iluminación empleada.

### 2.1.1. Contexto histórico-artístico

Las pinturas rupestres de cavidades y abrigos referentes al Paleolítico Superior son uno de los primeros ejemplos históricos de arte y presencia humana. Aunque actualmente aún no existen evidencias científicas respecto al comienzo histórico de dichas pinturas rupestres, o a los estilos artísticos a los que hacían referencia, sí que es comúnmente aceptado que las pinturas presentes en cavidades como la Cueva de Altamira surgen con las primeras poblaciones de humanos anatómicamente modernos (*Homo sapiens*), no descartando, incluso, que sean producto de una interacción previa con Neandertales (*Homo neanderthalensis*) [3].

Como se ha mencionado previamente, la tradición de decorar cavidades se extiende a hace 35-40 miles de años, coincidiendo con el comienzo del periodo *Auriñaciense*. Centrando la atención en la Cueva de Altamira, la cronología de su arte rupestre ha sido objeto de estudio desde su descubrimiento, diferenciándose numerosas fases artísticas en las 10 zonas de la cueva que presentan un mayor número de grabados. Acorde a un estudio exhaustivo, es posible revelar que sus pinturas y grabados pertenecen principalmente a los períodos *Magdalenense* y *Solutrense*. Sin embargo, también hay indicios de presencia humana en la cueva en los periodos *Gravetiense*, así como en el comienzo del *Auriñaciense*, este último descubierto mediante la utilización de series de uranio sobre pigmentos en grabados del *Techo de los Polícromos*, que datan de 35.600 años de antigüedad [1]. La cueva, por tanto, fue habitada durante varios periodos, hasta hace aproximadamente 13.000 años, coincidiendo con el derrumbe de la entrada superior de la cueva.

Por otra parte, el desenlace del arte rupestre en la península ibérica se puede ubicar en el arco mediterráneo, siendo especialmente relevante el arte levantino post-paleolítico [4], cuya extensión cronológica se puede ubicar contemporánea al Arte Esquemático ibérico, en la transición entre Paleolítico y Neolítico, extendiéndose hasta el *Calcolítico* (primeros objetos de cobre), en torno al 4.500 a.C. De esta forma, si bien los comienzos de dicho arte no se pueden situar en periodos tan arcaicos como los presentes en la región cantábrica, con indicios de arte rupestre de carácter humano 40.000 años antes del presente, la expansión a nivel peninsular abarca una extensión histórica, coincidente con el Paleolítico Superior, que posibilita comprender la importancia del arte rupestre y, por ende, la relación que esta presenta con la evolución humana.

## Arte rupestre

Se reconocen diferentes fases en el arte rupestre, en función de la técnica, tema o estilo, entre otros; habiendo confusión en cómo estas fases evolucionaron, o si se solaparon entre ellas. Dado que los grabados artísticos están estrechamente ligados a las diferentes fases del arte rupestre, a continuación se abordará de forma breve esta temática, introduciendo aspectos clave que permitan corroborar con relativa exactitud la situación cronológica de las pinturas aquí mostrada. Las técnicas artísticas empleadas según el periodo se detallan seguidamente (ver *Tabla 2.1*) [5].

| Fase                              | Técnicas utilizadas  |
|-----------------------------------|--|
| <i>Auriñaciense</i>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Manchas y restos de figuras rojas</li> <li>○ Pinturas rojas. Signos claviformes</li> <li>○ Animales en tintas rojas parcialmente grabados</li> <li>○ Manos positivas rojas</li> </ul> |
| <i>Solutrense y Magdaleniense</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Figuras negras lineales</li> <li>○ Cabezas de ciervas estriadas</li> </ul>  |
| <i>Magdaleniense</i>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Figuras negras muy modeladas</li> </ul>   |
| <i>Magdaleniense Superior</i>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Polícromos incipientes</li> <li>○ Grandes polícromos parcialmente grabados</li> </ul>   |

**Tabla 2.1.** Técnicas artísticas asociadas a periodos del Paleolítico Superior

Como se puede observar, las técnicas artísticas asociadas a las pinturas rupestres existentes en Altamira se adecúan cronológicamente con lo enunciado anteriormente. El arte rupestre ha sido siempre un forma de expresión del hombre, siendo inherente al ser humano como característica de comunicación, esto es, como una forma de plasmar mensajes de significado variado, si bien la motivación oculta asociada al arte no guarda una relación clara con aspectos de su vida cotidiana.

No obstante, se cree que el arte rupestre puede ser un elemento compartido por diferentes grupos humanos, como consecuencia de las relaciones sociales existentes. La existencia de pinturas prácticamente idénticas a más de 1000 km de distancia sugiere pensar que los grupos humanos eran muy móviles, existiendo una alta difusión de ideas. Cuando el arte reduce su presencia en el registro es debido, junto a otra serie de argumentos, a que los grupos humanos son menos móviles, con un menor contacto entre ellos [6].

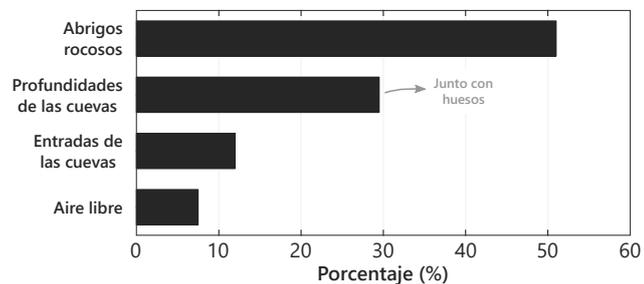
### 2.1.2. Iluminación de las pinturas rupestres

La exploración de las cuevas susceptibles de ser habitadas era uno de los objetivos más importantes de los antepasados que vivieron durante el Paleolítico Superior. La luz natural únicamente podía llegar hasta las partes más cercanas a la entrada de las cuevas, por lo que a medida que aumentaba la profundidad, la oscuridad era absoluta. Hay evidencias arqueológicas que ofrecen la posibilidad de conocer los sistemas de iluminación empleados por los grupos humanos de la época para la exploración de dichas cuevas, y sin los cuáles les hubiera sido imposible acceder a ciertos lugares recónditos.

En función de dichas evidencias, se puede distinguir entre dos métodos de iluminación: iluminación fija e iluminación móvil, siendo esta última sobre la que se desarrolla el trabajo. La iluminación móvil hace referencia a las lámparas portátiles empleadas por las sociedades de cazadores-recolectores, pudiendo ser de dos tipos:

- ▷ Lámparas → típicamente realizadas con piedra o madera, empleado grasa animal como combustible<sup>1</sup>. Estas a su vez, pueden ser de dos tipos:
  - Circuito abierto: el combustible se puede derramar por aberturas del soporte, con las desventajas asociadas. Son lámparas improvisadas o de emergencia.
  - Circuito cerrado: pueden tener o no tener mango, pero se caracterizan porque el combustible queda en su totalidad dentro del soporte.
- ▷ Antorchas → su capacidad de iluminación es superior a la lámpara, pero su manejabilidad y duración es notablemente inferior. Adicionalmente, desprenden humo, factor restrictivo en la decoración rupestre.

El trabajo, dentro de la iluminación móvil, centra la atención en las lámparas portátiles, al ser las empleadas, comúnmente, en la realización de pinturas rupestres. La mayoría de las lámparas de las que se tienen constancia han aparecido en Francia, aunque también existen evidencias de lámparas en la Península Ibérica. Los lugares donde han sido halladas son varios [8] (ver *Figura 2.1*): el 51 % aparecieron en abrigos rocosos, el 29.5 % en las profundidades de las cuevas, el 12 % en las entradas de las mismas, y el 7.5 % en campamentos al aire libre.



**Figura 2.1.** Aparición de lámparas prehistóricas

Se debe agregar que esta estadística ofrece gran cantidad de información relevante, ya que el hecho de que aparecieran al aire libre o en entradas de las cuevas, y no sólo en las partes profundas, puede indicar que su uso fue más generalizado y común del que se cree. Asimismo, la localización de huesos en las profundidades de las cuevas junto a las lámparas, pone en relación la extracción del tuétano para su utilización como combustible. Estas últimas, han sido encontradas en zonas profundas donde se adivinaba la presencia de pinturas rupestres, siendo por tanto incuestionable la relación iluminación portátil – arte.

Dentro de los múltiples combustibles empleados, el tuétano fue quizá el más destacado. Si bien es difícil datar cronológicamente la lámpara de tuétano, se sabe que durante el Paleolítico Superior (periodo detallado en la sección anterior) fue utilizada como ayuda para ejecutar muchas de las pinturas rupestres encontradas en cuevas prehistóricas, con la pretensión de no oscurecer con el humo las paredes decoradas, como revela la ausencia de marcas de hollín en las mismas.

<sup>1</sup>La cera de abeja también fue un elemento recurrente para su empleo como combustible, especialmente en cuevas malagueñas [7].

## 2.2. Fundamentos de espectroscopía

En este punto, se abordarán aspectos básicos sobre espectroscopía, haciendo especial énfasis en la región de estudio, con objeto de comprender la subsiguiente caracterización espectral de la lámpara de tuétano. De esta forma, se detallarán fundamentos teóricos de la espectroscopía UV-visible, así como la instrumentación óptica que se empleará posteriormente.

### 2.2.1. Principios básicos

Se define la espectroscopía como el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, basándose en la detección de absorción o emisión<sup>1</sup> de radiación a determinadas longitudes de onda, en relación con los niveles de energía implicados en una transición cuántica:

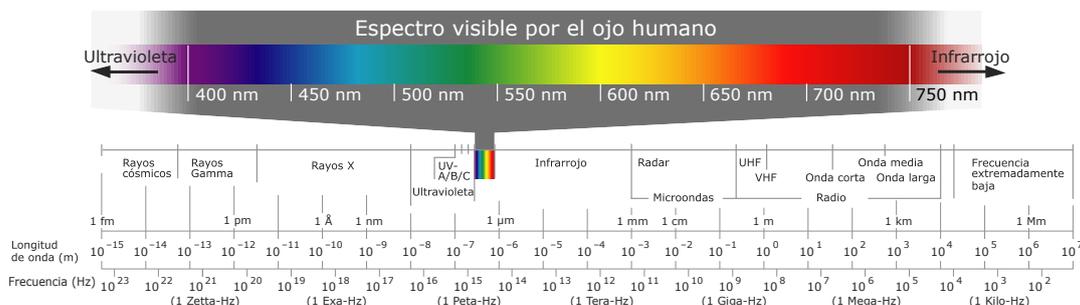
$$\Delta E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

siendo  $h$  la constante de *Planck*,  $f$  la frecuencia del haz de luz (carácter ondulatorio en propagación),  $\lambda$  la longitud de onda asociada,  $c$  la velocidad de la luz en el vacío ( $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ) y  $\Delta E$  la diferencia de energía (carácter corpuscular en interacción).

Los átomos y moléculas, sólo absorben y emiten radiación a determinadas frecuencias, lo que implica la cuantización de sus niveles de energía. Estas diferencias de energía entre estados cuánticos dependen de la estructura molecular de la materia, por lo que estudiando la absorción que presentan los átomos que la componen a radiaciones caracterizadas por diferentes longitudes de onda, es posible conocer la distribución de intensidad espectral, representativa del material en cuestión.

### Origen de los espectros UV-visible

Dentro del presente proyecto, dado el interés en reproducir y caracterizar la radiación correspondiente al rango visible (ver *Figura 2.2*), únicamente se centrará la atención en la espectroscopía que cubre dicha porción espectral, es decir, la espectroscopía UV-visible.



**Figura 2.2.** Espectro electromagnético en función de la longitud de onda

<sup>1</sup>Las moléculas son previamente excitadas, analizándose a continuación la radiación que estas emiten al retornar a su estado fundamental.

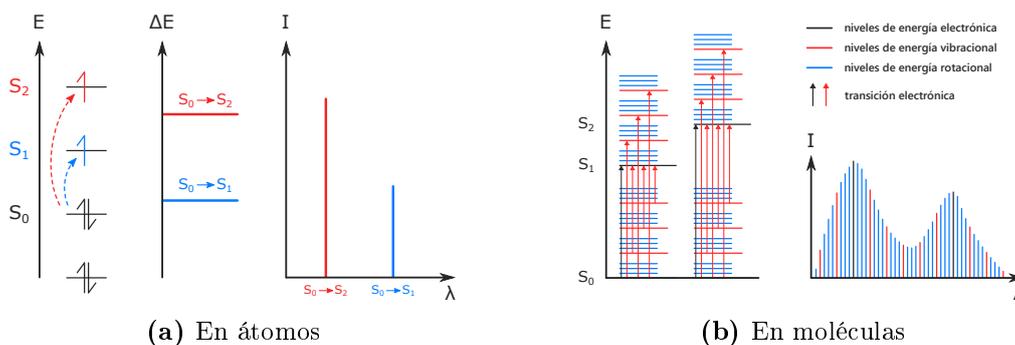
Aunque se desarrollará en profundidad en el siguiente capítulo, es preciso introducir que los principales fenómenos que se originan cuando la radiación interactúa con la materia son reflexión, dispersión (*scattering*), absorción<sup>1</sup> y transmisión, que en conjunto, representan la totalidad de la energía incidente sobre la materia ( $I_o = I_{ref} + I_{disp} + I_{abs} + I_{tx}$ ).

Típicamente, cuando se miden espectros UV-visible, únicamente es deseable que ocurra absorbancia. Como se ha desarrollado, la luz es una forma de energía, por lo que la absorción de los fotones que componen la radiación ocasiona la transferencia de una cantidad fija de energía, aumentando de esta forma la energía potencial total de las moléculas (o átomos), la cual integra, a su vez, tres tipos de energía<sup>2</sup> [9]:

$$E_{total} = E_{electronica} + E_{vibracional} + E_{rotacional}$$

En determinados átomos y moléculas, los fotones que componen la luz ultravioleta y visible tienen suficiente energía como para ocasionar transiciones electrónicas entre los diferentes niveles energéticos. La longitud de onda de la luz absorbida es aquella que tiene asociada la energía requerida para desplazar un electrón desde un nivel inferior de energía a uno superior.

Estas transiciones deben resultar en bandas de absorbancia muy estrechas, a longitudes de onda características de la diferencia entre los niveles energéticos [10]. Sin embargo, esto es cierto únicamente para los átomos (ver *Figura 2.3a*). En las moléculas, los niveles de energía vibracional y rotacional están superpuestos sobre los niveles de energía electrónica. Como pueden ocurrir muchas transiciones con diferentes energías, las bandas se ensanchan, dando lugar a un espectro característico del material (ver *Figura 2.3b*).



**Figura 2.3.** Transiciones electrónicas y espectros UV-visible

Cuando la luz atraviesa la muestra, la cantidad de luz absorbida es la diferencia entre la radiación incidente ( $I_o$ ) y la transmitida ( $I_{tx}$ ), considerando despreciables la reflexión y la dispersión sobre el material. Esta se puede expresar como transmitancia ( $T$ ) o absorbancia ( $A$ ), siendo esta última la utilizada en la mayoría de aplicaciones.

$$A = -\log(T) = -\log\left(\frac{I_{tx}}{I_o}\right) \quad (2.1)$$

<sup>1</sup>Fluorescencia/fosforescencia si tras la absorción se produce una reemisión. Reacción fotoquímica en caso de que la absorción origine rotura de enlaces moleculares.

<sup>2</sup>Las diferencias de energía siguen el orden:  $E_{electronica} > E_{vibracional} > E_{rotacional}$

### 2.2.2. Análisis, tratamiento y medida

La espectroscopía UV-visible puede utilizarse para determinar muchas características físico-químicas de los materiales, aunque en el caso que nos ocupa la finalidad es proporcionar información identificativa de la lámpara prehistórica como puede ser, entre otros, el espectro óptico de emisión, ligado estrechamente con el color, siendo esta una propiedad importante del material, y que está relacionado con su absorbanza o reflectancia, en tanto en cuanto el ojo humano percibe el color complementario al que se absorbe (subsección 3.1.2 *Riesgos fotobiológicos*).

A la hora de realizar la medida de un espectro, es esencial conocer el grado de interacción del material con la radiación, ya sea a través de su transmitancia o absorbanza, lo cual se determina midiendo la intensidad de la radiación incidente ( $I_o$ ) y la intensidad transmitida ( $I_{tx}$ ) para, posteriormente, aplicar la ecuación (2.1). La cantidad de luz absorbida, según la *Ley de Lambert-Beer* (relación empírica), depende de las propiedades físico-químicas del material, específicamente del número de moléculas sobre el que incide la radiación, así como la energía y frecuencia de la misma [11].

Seguidamente, se especifican algunos parámetros clave en el proceso de medición, que pueden afectar a la exactitud y precisión de los valores detectados:

- ▷ Resolución espectral → medida de la capacidad de un instrumento para diferenciar entre dos longitudes de onda adyacentes. Está relacionada con la anchura de banda espectral instrumental (SBW, *Spectral BandWidth*), así como con la capacidad de muestreo del espectrómetro (convertidor A/D).
- ▷ Exactitud y precisión de longitud de onda → están ligados al instrumento. En nuestro caso, al emplear un único espectrómetro, se puede considerar un aspecto invariable.
- ▷ Exactitud y precisión fotométrica → son dos los factores que influyen y que se han de limitar: la luz dispersa y el ruido. La luz dispersa se define como la luz detectada de cualquier longitud de onda, que cae fuera de la anchura de banda de la longitud de onda seleccionada. El ruido, por su parte, presente dos componentes: *shot* y térmico, los cuales pueden reducirse con las técnicas presentadas a continuación.

De manera adicional, existen típicamente dos técnicas para corregir una baja sensibilidad en la medida, o simplemente para mejorar inexactitudes en las mismas.

- Promedio de tiempo → haciendo una media de los datos se reduce el ruido según la raíz cuadrada del número de puntos promediados. De esta forma, con un aumento en el tiempo de integración se consigue mejorar la relación SNR de forma significativa. Cabe destacar que ampliar el tiempo de integración mejorará la sensibilidad, pero únicamente hasta que otros efectos, como la deriva<sup>1</sup>, sean dominantes.
- Promedio de longitud de onda → en caso de disponer de datos de todas las longitudes de onda, pueden incluirse en la media valores adicionales a ambos lados de cada componente espectral. De esta forma, la reducción del ruido es similar al promediado temporal, esto es, equivalente a la raíz cuadrada del número de puntos. Sin embargo, añadir gran cantidad de datos espectrales puede tener un efecto negativo sobre la señal. La deriva también es un potencial problema en esta técnica.

---

<sup>1</sup>Error fotométrico ocasionado por variaciones de intensidad entre las medidas de  $I_o$  y  $I_{tx}$ .

### 2.2.3. Instrumentación

El espectrómetro (también llamado espectroscopio o espectrógrafo) es el instrumento óptico que se emplea para descomponer la luz en su espectro electromagnético<sup>1</sup>, ya sea a través de un retículo de difracción o de un prisma. De esta forma, se reproducen líneas espectrales que cuantifican, típicamente, la intensidad de luz asociada a cada longitud de onda. Como se ha mencionado, la dispersión del haz de luz se puede realizar según dos tipos de propiedades ópticas:

- ◇ Refracción → espectroscopio de prisma
- ◇ Difracción → espectroscopio de red

Cabe señalar que el rango de longitudes de onda en que opera cada espectrómetro es relativamente estrecho, puesto que cada porción espectral precisa una determinada técnica para caracterizar la luz, como se especificó con anterioridad. Seguidamente, se detalla el funcionamiento del espectrómetro empleado para la realización de medidas espectrales, estando basado en redes de difracción.

#### Espectrómetro HR2000CG UV-NIR

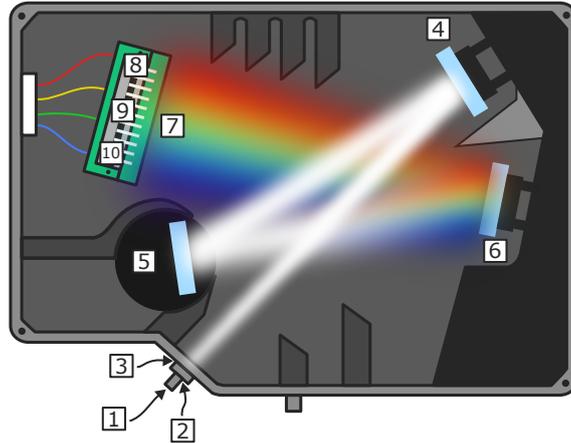
El espectrómetro empleado para caracterizar la luz emitida por la fuente lumínica de tuétano está basado en el efecto de la difracción, empleando un *grating* HC-1 que, junto con la ranura de entrada y el filtro OFLV adecuados, permite discriminar longitudes de onda entre 200 – 1100 nm, garantizando, por tanto, una gran anchura espectral (ultravioleta, visible e infrarrojo cercano), a la vez que asegura que únicamente la luz del orden deseado alcanza el detector. Las especificaciones técnicas del espectrómetro óptico se muestran a continuación (ver *Tabla 2.2*).

| Detector                         |   |
|----------------------------------|---|
| Detector                         | Sony ILX511B CCD array                              |
| Rango de detección               | 200 – 1100 nm                                       |
| Pixeles                          | 2048 (14 $\mu\text{m}$ $\times$ 200 $\mu\text{m}$ ) |
| Características ópticas          |   |
| Rendija entrada                  | 5 $\mu\text{m}$                                     |
| Grating                          | HC-1  |
| Filtro OFLV                      | OFLV-200-1100                                       |
| Mejora detector                  | Cristal de cuarzo UV2                               |
| Conector fibra óptica            | SMA 905 (A.N.= 0.22)                                |
| Características espectroscópicas |   |
| Resolución                       | 1 nm (FWHM)   |
| SNR                              | 250:1   |
| Resolución A/D                   | 14 bits   |
| Tiempo de integración            | 1 ms – 65 seg.                                      |

**Tabla 2.2.** Especificaciones técnicas del espectrómetro HR2000CG UV-NIR

<sup>1</sup>Si la región de interés está restringida a un rango cercano al espectro visible, como es el caso, el estudio se llama espectrofotometría.

Con la finalidad de facilitar la comprensión del proceso de medición y obtención del espectro óptico asociado a una determinada radiación, se muestra el conjunto de etapas que rigen el funcionamiento del espectrómetro utilizado, cuyo esquemático, con referencias de cada etapa, se muestra en la imagen adjunta (ver *Figura 2.4*).



**Figura 2.4.** Espectrómetro HR2000CG UV-NIR

- (1) La luz captada por la fibra entra en el banco óptico del espectrómetro a través del **conector SMA 905**, con un cono de aceptación definido por una apertura numérica de 0.22, esto es, un ángulo de salida de  $12.7^\circ$  respecto a las paredes de la fibra.
- (2) La luz, tras el conector, atraviesa una **rendija fija (slit)** con un ancho de  $5 \mu\text{m}$  (gran resolución óptica), cuya función es transmitir selectivamente una estrecha banda de la luz policromática recibida por la fibra.
- (3) Tras la rendija, se coloca un **filtro absorbente** con el fin de limitar el ancho de banda de la luz que entra al espectrómetro (transmite luz por encima de  $305 \text{ nm}$ ), así como para equilibrar el color y eliminar efectos de  $2^\circ$  y  $3^\text{er}$  orden de la luz.
- (4) Una vez la luz atraviesa los elementos de entrada, llega a un **espejo de colimación** adaptado a la apertura numérica de la fibra óptica (0.22), el cual refleja la luz, como un haz colimado, en dirección al *grating*.
- (5) La luz colimada llega al **grating**, que contiene estrechas hendiduras, realizadas a través de un proceso óptico holográfico, las cuales reflejan la luz incidente en diferentes ángulos, dependiendo de la longitud de onda. Dicha red de difracción produce una dispersión angular lineal con  $\lambda$ , siendo insensible a la temperatura. No obstante, en la práctica, se refleja luz de diferentes órdenes, que se solapan. Razón por la cual se han de colocar elementos ópticos que aseguren que únicamente la luz de  $1^\text{er}$  orden alcanza el detector.
- (6) La luz recibida de la red de difracción alcanza el **espejo de enfoque**, cuyo cometido es focalizar la luz de primer orden sobre el plano de detección con la mínima dispersión posible.
- (7) La radiación alcanza la **lente cilíndrica L2**, fijada al detector. Su función es asegurar un funcionamiento libre de aberraciones<sup>1</sup> y una reducción de la luz dispersa, aumentando la eficiencia en la recolección lumínica.

<sup>1</sup>La aberración cromática en una lente hace referencia a la incapacidad de reunir, en un mismo punto espacial, luz de distintas longitudes de onda.

- (8) Un **filtro OFLV** (*Variable Longpass Order-sorting Filter*), como es el OFLV-200-1100, bloquea la luz de segundo y tercer orden en el rango 200–1100 nm antes de alcanzar el detector.
- (9) Como mejora, se reemplaza el vidrio óptico BK7 del detector por un **crystal de cuarzo UV2**, que transmite en el rango UV y, en consecuencia, optimiza la respuesta espectral del espectrómetro por debajo de 360 nm.
- (10) El **detector** está compuesto por un *array* de 2048 elementos CCD Sony ILX511B (200–1100 nm), en el que cada pixel responde a la longitud de onda que recibe. Cada dispositivo CCD convierte una señal luminosa en una señal eléctrica: la luz que incide sobre el material semiconductor permite que los electrones fluyan a su través, reduciendo la carga de un condensador conectado a él. El espectro de intensidad se obtiene midiendo la variación de intensidad de luz ( $\sim$  carga) sobre el rango completo de longitud de onda, esto es, sobre el *array* de dispositivos CCD. El *software* posterior es el que recompone el espectro completo.

## 2.3. Medición espectral de la fuente

Avanzando en el desarrollo del primer bloque del trabajo, y una vez detallados el contexto histórico del mismo, con especial énfasis en la Cueva de Altamira, así como los fundamentos básicos acerca de la espectroscopía UV-visible, se procederá a realizar el primer conjunto de medidas espectrales sobre la fuente de luz original, implementada de forma artesanal con objeto de reproducir rigurosamente las lámparas que representaban la metodología de iluminación de la época, analizada exhaustivamente en la sección inicial del capítulo.

El siguiente punto será obtener el espectro óptico representativo de las medidas realizadas sobre la lámpara, empleando para ello el espectrómetro HR2000CG UV-NIR, cuyo funcionamiento ha sido detallado, junto con parámetros clave de análisis y medida, en la sección previa.

### 2.3.1. Reproducción de lámparas prehistóricas

La importancia de la lámpara de tuétano deriva de que en gran cantidad de las cuevas en que hay muestras de arte parietal, las pinturas son localizadas en las profundidades de las mismas, alejadas de la luz natural. Las sociedades prehistóricas tenían que llevar a cabo cierto alumbrado para poder pintar, y para ello se servían fundamentalmente de lámparas de tuétano, cuyo combustible procede de grasas animales que no desprenden humo y, consecuentemente, las pinturas no se veían afectadas. El proceso para la obtención de dichas lámparas es el que se muestra a continuación.

En primer lugar, es necesario disponer de un soporte que facilite la elaboración de la lámpara. A pesar de que típicamente se trata de una piedra o madera de un tamaño similar a la mano (facilita su transporte), la única imposición que se precisa es que dicho soporte presente una cierta cavidad en la cual el combustible no tenga

la capacidad de derramarse, esto es, una lámpara de circuito cerrado. Consecuentemente, dado que el interés únicamente reside en caracterizar la luz emitida por la lámpara, y no en hacer de la misma un elemento portable, se utilizará el propio hueso como soporte, siendo el combustible el tuétano localizado en su interior.

El siguiente paso es determinar la mecha para la lámpara. Análisis de los residuos de las lámparas han puesto de manifiesto que las mechas estaban compuestas por restos de coníferas, enebro, hierba, y residuos no leñosos como líquen o musgo, por lo que un trenzado de  $\sim 4.5$  cm de las fibras vegetales nombradas será la mecha de la lámpara a elaborar. A continuación, se hundirá



**Figura 2.5.** Lámpara de tuétano

la misma en el tuétano, dejando que sobresalga alrededor de 2 cm. Con todo ello, ya está dispuesta la lámpara de tuétano (ver *Figura 2.5*), la cual reproduce de forma rigurosa las condiciones de iluminación existentes en las cuevas prehistóricas.

### 2.3.2. Obtención de medidas

Al encender la mecha de la lámpara, enseguida se puede observar cómo se empieza a fundir la grasa del tuétano que actúa como combustible, la cual por capilaridad irá subiendo por la mecha para transformarse finalmente en gas, que entra en combustión con el oxígeno del aire, liberando luz y calor. El resultado obtenido es una luz cálida, intensa, de duración prolongada, y sin humo ni olor, lo cual origina una iluminación perfecta para la ejecución de pinturas en las profundidades de las cuevas.

Para la caracterización de las medidas, se ha tomado el promedio espectral de 5 lámparas de tuétano artesanales, de carácter bovino, en diferentes fases de combustión, esto es, siguiendo una evolución temporal del estado de la llama (ver *Figura 2.6*). Las mediciones se han llevado a cabo en tres momentos temporales concretos:

- (1) Tras el encendido de la mecha de la lámpara.
- (2) Transcurridos 2 minutos desde el inicio de emisión de luz.
- (3) Transcurridos 5 minutos de combustión. De forma empírica se ha comprobado que esta fase tiene asociada la ignición del hueso que actúa como soporte.

Cada medida global implica el promedio de 100 medidas parciales, espaciadas el tiempo de integración de cada medida, lo cual supone la adquisición espectral de 2048 puntos entre 200 y 1100 nm (píxeles en el rango de detección del espectrómetro HR2000CG UV-NIR). A través de este promediado temporal, es posible reducir el ruido en un factor  $\sqrt{100}$ , esto es, obtener una relación SNR un orden de magnitud superior (subsección 2.2.2 *Análisis, tratamiento y medida*). Asimismo, el tiempo de integración para el proceso de medición se ha definido en 1000 ms, siendo este el óptimo para una adquisición correcta de los datos, evitando de esta forma un exceso o déficit de potencia.



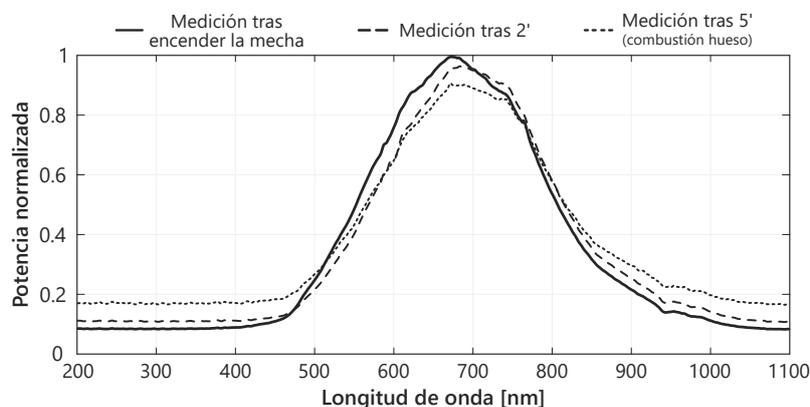
(a) Combustión tras encendido de la mecha      (b) Combustión tras 5' (ignición del hueso)

**Figura 2.6.** Estado de la llama en el proceso de realización de medidas

Como resultado del proceso de medición completado sobre la totalidad de lámparas, se concluye la característica espectral media específica de cada uno de los tres momentos temporales de adquisición de datos (ver *Figura 2.7*). Si bien el espectro representativo sobre el que se basará el posterior desarrollo del proyecto es el promedio de las tres curvas, representar la respuesta espectral asociada a cada instante temporal de forma individualizada posibilita el análisis y la comprensión del estado evolutivo de la llama asociada a la lámpara de tuétano.

En primer lugar, es conveniente destacar que, para los espectros representativos de cada instante temporal de muestreo, la forma de los mismos presenta una notoria similitud. Se debe agregar igualmente una característica asociada a la evolución de la llama, como es el aumento de potencia óptica en los rangos infrarrojo y ultravioleta respecto al rango visible. A pesar de que la medición tras 2 minutos ya infiere la particularidad señalada, es el estado de la llama tras 5 minutos, con el inicio de combustión ósea, lo que incrementa de forma notable (hasta en un factor  $\times 2$ ) la emisión óptica por debajo de 500 nm, así como por encima de 900 nm.

Sin embargo, a diferencia de lo que pueda sugerir la respuesta espectral del proceso de medida, no es el rango visible la zona espectral que presenta una mayor potencia óptica emitida, hecho que se mostrará al final capítulo. Esto es debido al error que introducen los elementos con que han sido realizadas las medidas, los cuales han de ser discriminados a fin de obtener la característica espectral de emisión propia de la fuente óptica analizada, hecho que se solventa en la siguiente sección.



**Figura 2.7.** Respuesta espectral de la medida sobre la lámpara de tuétano

## 2.4. Compensación espectral

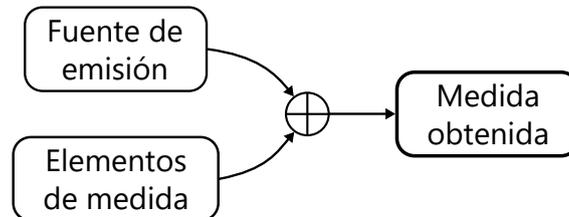
En este punto, se puede considerar conocida la respuesta espectral de la medida realizada con el espectrómetro en la anterior sección. Ahora bien, dicha característica no es representativa de la fuente de luz examinada, en tanto en cuanto los elementos con los que ha sido realizada la medida, como pueden ser el propio espectrómetro óptico, así como la fibra de captación de luz y los distintos conectores asociados, introducen un determinado error o alteración respecto al espectro óptico que se pretende conseguir, siendo este el relativo a la fuente de luz natural.

El objetivo fundamental de este primer bloque del trabajo, como se ha mencionado al comienzo del capítulo, se basa en determinar la respuesta espectral de la fuente que se pretende simular artificialmente, representativa de los grupos humanos prehistóricos.

### 2.4.1. Consideraciones previas

Para caracterizar la lámpara de tuétano en sí, fuente óptica de interés, se ha de tener en cuenta que los resultados obtenidos durante el proceso de medida (Sección 2.3) presentan dos contribuciones principales (ver *Figura 2.8*):

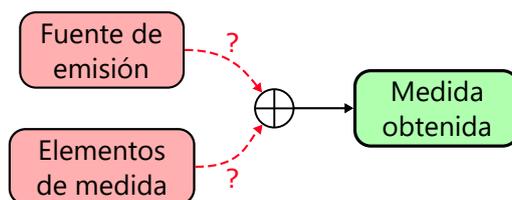
- ◊ Respuesta espectral de emisión propia de la **fuente original**
- ◊ Respuesta espectral de los **elementos de medida** (espectrómetro y fibra)



**Figura 2.8.** Contribuciones presentes en la medida

Esta sección, y el capítulo por extensión, pretende discernir las respuestas espectrales de ambos elementos, con el fin de seleccionar aquella que está asociada con la fuente de luz original que se pretende sintetizar. Sin embargo, para ello, se han de tener caracterizadas la medida que se obtiene con el espectrómetro, así como la respuesta del mismo como elemento de medida. De esta forma, caracterizados sendos elementos, es posible obtener el espectro de emisión de la fuente, interrogante que se pretende averiguar.

Inicialmente se dispone únicamente de la respuesta espectral asociada al conjunto de medidas, realizadas en la sección precedente. Así pues, son dos las incógnitas presentes en el sistema (ver *Figura 2.9*), debido al desconocimiento de las dos componentes que contribuyen a dicha medida. En esta situación, no es posible caracterizar espectralmente la componente que se pretende determinar, esto es, la fuente de emisión.



**Figura 2.9.** Punto de partida

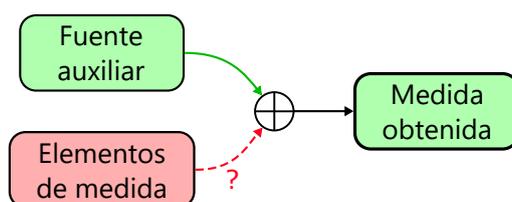
Por consiguiente, para poder acometer la resolución de la característica espectral asociada a la lámpara de tuétano, es necesario determinar la respuesta conjunta de espectrómetro, fibra óptica y conectores, elementos que intervienen en el proceso de obtención de medidas espectrales. Por tanto, de forma previa se empleará una fuente de luz auxiliar cuyo espectro óptico de emisión sea conocido; de tal forma que sea posible obtener de manera simple la respuesta del espectrómetro. Esto permitirá, posteriormente, abordar la caracterización del espectro de emisión de la fuente óptica de interés. Los pasos a seguir son, por tanto, los siguientes:

- (1) Caracterización de los elementos de medida (Sección 2.4.2)
  - ▷ Seleccionar una fuente auxiliar cuyo espectro de emisión sea conocido
  - ▷ Realizar medidas de dicha fuente con el espectrómetro
  - ▷ Determinar la respuesta del espectrómetro
- (2) Obtención del espectro de emisión de la fuente óptica original (Sección 2.4.3)

### 2.4.2. Respuesta espectral de los elementos de medida

Como se ha determinado anteriormente, el paso previo a la consecución del espectro óptico de las fuentes artesanales de tuétano, es la determinación de la respuesta que presentan conjuntamente el conjunto de componentes que han sido empleados para la obtención de las medidas, como son el espectrómetro óptico HR2000CG UV-NIR, la fibra óptica que efectúa la captación de luz, o los conectores y terminaciones ópticas de ambos elementos, entre otros.

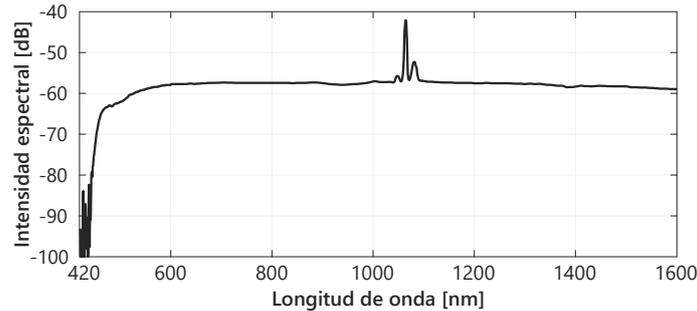
En primer lugar, se ha de seleccionar una fuente de luz auxiliar, cuya respuesta espectral de emisión sea conocida para, posteriormente, realizar medidas sobre dicha fuente, de manera que sea viable determinar la característica espectral asociada a los distintos elementos empleados en el proceso de medición (ver *Figura 2.10*).



**Figura 2.10.** Caracterización de elementos de medida

### Selección de una fuente óptica auxiliar

En primer lugar, para caracterizar los elementos que intervienen en el proceso de medición, se utilizará la fuente supercontinua SuperK Compact G4, cuyo espectro de emisión es conocido, abarcando las longitudes de onda comprendidas entre 450 y 2400 nm, y presentando una potencia óptica relativamente plana en el rango mencionado<sup>1</sup>.



**Figura 2.11.** Espectro de emisión asociado a la fuente supercontinua SuperK Compact

La caracterización espectral de dicha fuente ha sido realizada a través de un OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) auxiliar en el visible e IR cercano (NIR, *Near-Infrared*), por lo que únicamente se tiene conocimiento del espectro entre 450 y 1600 nm (ver *Figura 2.11*), dadas las evidentes limitaciones en la instrumentación y sistema de detección que presenta un analizador de espectros óptico como el empleado, en longitudes de onda situadas fuera del rango mencionado. Cabe destacar que, aunque únicamente sea representativa la región visible de cara a la interpretación humana, también se realizará una caracterización espectral parcial de la lámpara en las longitudes de onda asociadas al infrarrojo cercano.

En lo referente a las especificaciones técnicas de la fuente de luz (ver *Tabla 2.3*), es importante indicar que presenta como terminación un colimador de banda ancha en el extremo de la fibra óptica monomodo de emisión óptica, lo cual permite obtener a la salida un haz de luz no polarizada cuyo patrón de radiación es gaussiano.

| Parámetro                       | Valor         |
|---------------------------------|---------------|
| Terminación                     | Colimado      |
| Longitud del cable de fibra     | 1.6 m         |
| Rango de longitudes de onda     | 450 – 2400 nm |
| Frecuencia máxima de repetición | 21 kHz        |
| Potencia óptica total           | 125.9 mW      |
| Potencia óptica rango visible   | 25.4 mW       |
| <i>Jitter</i> de salida         | 0.44 $\mu$ s  |
| Anchura de pulso de salida      | < 2 ns        |
| Patrón del haz de salida        | Gaussiano     |

**Tabla 2.3.** Especificaciones técnicas de la fuente supercontinua SuperK Compact G4

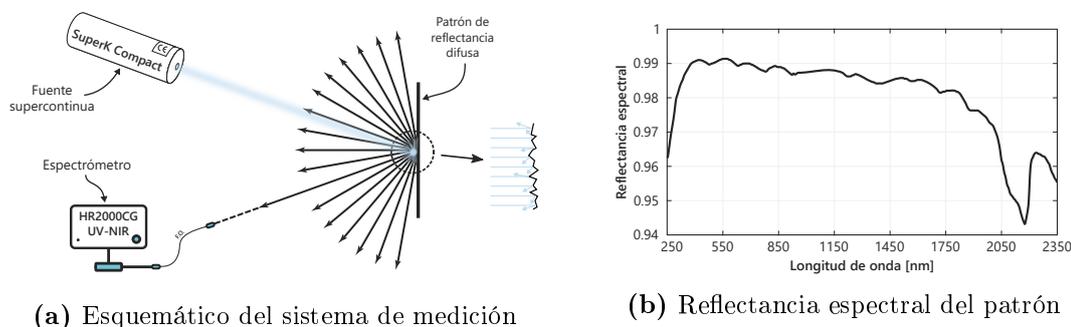
<sup>1</sup>La forma espectral de la fuente en emisión es independiente de la frecuencia de repetición.

## Medida espectral de la fuente supercontinua

Estando especificada la fuente óptica auxiliar, con la respuesta espectral de emisión asociada, es necesario realizar medidas sobre la misma con el espectrómetro, con objeto de introducir los elementos de medida en el proceso y, posteriormente, poder discriminar de forma específica su contribución en la medida.

El proceso de medida, sin embargo, no es trivial, en tanto en cuanto la fuente supercontinua presenta una salida difícil de acoplar al espectrómetro. En consecuencia, se utiliza el patrón de reflectancia SRS-99 con objeto de obtener un frente plano más difuso a la entrada de la fibra del espectrómetro. Dicho patrón posibilita la realización de medidas en reflexión, debido a su característica espectral plana en el rango visible, con un coeficiente de reflexión cercano al 99% en dicha zona del espectro (ver *Figura 2.12b*).

De esta forma, la adquisición de medidas se realiza a través de DRS (*Diffuse Reflectance Spectroscopy*) de una forma relativamente sencilla, como se muestra seguidamente (ver *Figura 2.12a*). La fuente supercontinua detallada previamente emite el haz de luz sobre la superficie de reflexión, de forma que la radiación reflejada se difunde en múltiples direcciones, posibilitando que la fibra del espectrómetro pueda captar la luz y realizar esta la medida espectral. Notar que el haz óptico captado por el espectrómetro permanece espectralmente invariable (en forma) tras la reflexión.



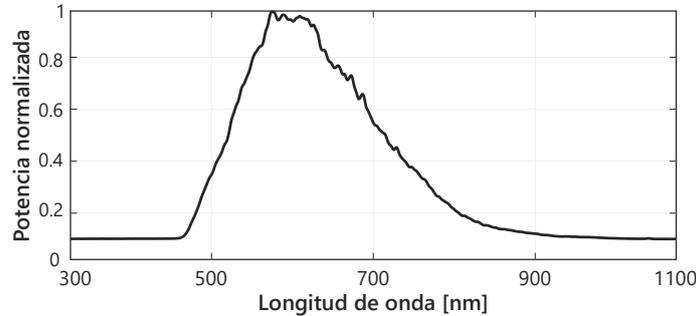
**Figura 2.12.** Medición en reflexión con patrón de reflectancia difusa

El fundamento teórico se detalla a continuación:

- ◇ La reflexión difusa tiene lugar cuando el haz de radiación choca con la superficie del patrón de reflectancia, que está compuesto por un polvo finamente dividido.
- ◇ En cada superficie plana de dicho polvo tiene lugar una reflexión especular.
- ◇ La presencia de numerosas superficies planas y la aleatoriedad en su orientación posibilita que la radiación se refleje prácticamente en todas las direcciones.

Se empleará una frecuencia de repetición de 6 kHz y una potencia de salida máxima, de tal forma que los datos obtenidos sean fiables, en tanto en cuanto la potencia captada por la fibra del espectrómetro es muy inferior a la emitida por la fuente, como consecuencia de la reflexión difusa. Las posibles saturaciones en potencia del espectrómetro serán controladas a través del tiempo de integración del mismo (1 seg).

Conforme a la regulación de la fuente detallada, el espectro obtenido como resultado del proceso de medición se muestra en la imagen adjunta (ver *Figura 2.13*).

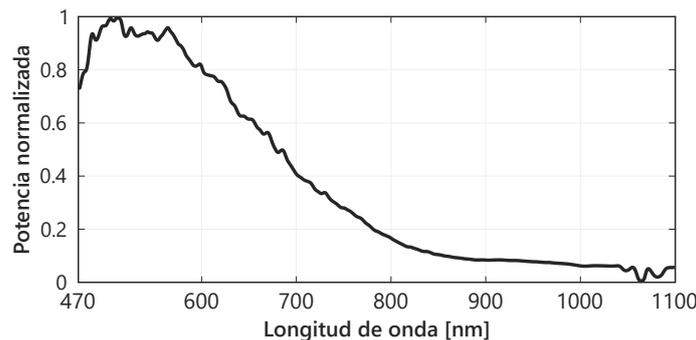


**Figura 2.13.** Espectro de la medida obtenida con la fuente supercontinua

### Caracterización de los elementos de medida

Llegados a este punto, se encuentran determinados tanto el espectro de emisión de la fuente supercontinua, como el obtenido a partir de medidas con el espectrómetro, por lo que únicamente resta conocer la respuesta espectral conjunta correspondiente a los elementos con los que se han llevado a cabo las medidas (espectrómetro, fibra óptica, conectores, elementos intermedios, ...).

Se infiere, por tanto, que debido al conocimiento de dos de los tres elementos que intervienen en el sistema, a diferencia del punto de partida (donde únicamente se conocía la medida), es posible determinar la incógnita relativa a la respuesta espectral del espectrómetro (ver *Figura 2.14*) sin más que dividir el espectro resultante de las mediciones entre el espectro de emisión de la fuente supercontinua.

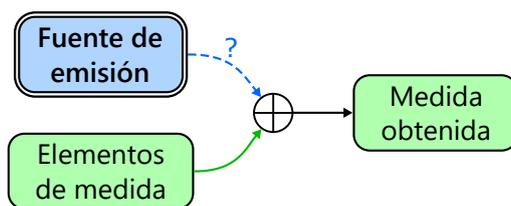


**Figura 2.14.** Respuesta espectral de los elementos de medida

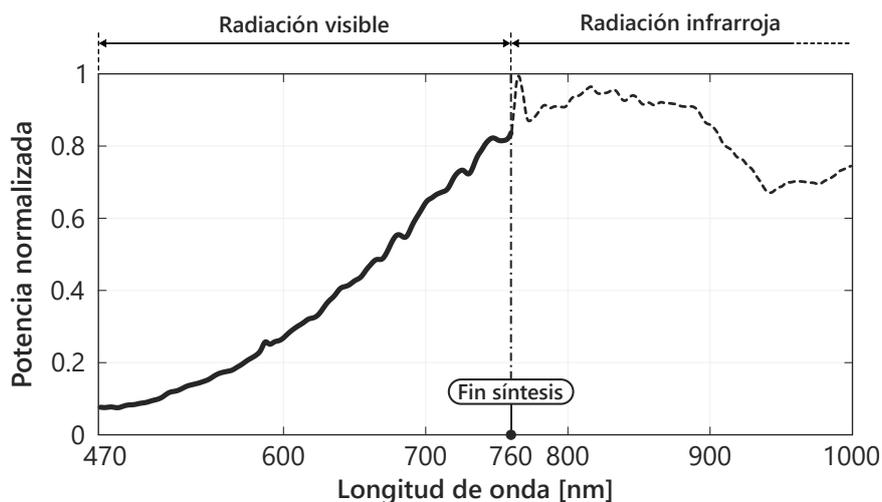
Con respecto a dicha respuesta, cabe destacar la presencia de componentes espectrales relativamente significativas en potencia en la parte baja del espectro visible, reduciendo su importancia conforme aumenta la longitud de onda. De esta forma, se puede deducir que, en la medida espectral realizada sobre la lámpara de tuétano, la contribución de la propia fuente de emisión es notablemente superior en el rango visible asociado al rojo que en la gama de los azules, debido a la distorsión que introducen los elementos de medida en el rango espectral de medición.

### 2.4.3. Respuesta espectral de la fuente de interés

En síntesis, la finalidad del presente capítulo, relativo al primero de los tres bloques que conforman el trabajo, consiste en la caracterización espectral de las lámparas de tuétano analizadas anteriormente<sup>1</sup>. En contraste con el sistema precedente, la incógnita actual pasaría a ser el espectro de emisión propio de la lámpara, cuya relevancia es notable, al ser la base sobre la que se realizará la síntesis espectral en el capítulo posterior. De manera análoga a lo sucedido en la caracterización del espectrómetro, son dos los elementos conocidos en el sistema (ver *Figura 2.15a*).



(a) Esquemático del sistema final



(b) Espectro de emisión de la fuente de interés

**Figura 2.15.** Esquemático y espectro de emisión resultante de la lámpara de tuétano

Una vez caracterizada la fuente de luz natural (ver *Figura 2.15b*) empleada por grupos humanos prehistóricos en cavidades y abrigos, como la Cueva de Altamira; se centrará la atención en la región espectral comprendida entre 470 nm y 760 nm, siendo esta la zona donde se realizará posteriormente la síntesis, dada la presencia de componentes espectrales visibles en dicho rango. Debido a que la aplicación del trabajo se centra en reproducir las condiciones de iluminación, sintetizar la parte infrarroja del espectro electromagnético no presenta trascendencia alguna, en tanto en cuanto son longitudes de onda invisibles al ojo humano<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>La lámpara artesanal desarrollada es de carácter bovino. Para observar la característica espectral asociada a otras especies animales, ver *Anexo I*.

<sup>2</sup>No obstante, es importante conocer el comportamiento de la fuente óptica en la región IR, con objeto de limitar los riesgos fotobiológicos asociados a dichas longitudes de onda.

## Síntesis espectral

El siguiente paso del trabajo se centra en la especificación de las fuentes ópticas *artificiales* que permitan simular conjuntamente de manera exacta la fuente óptica *natural*. Para ello se hará uso de la respuesta espectral de la fuente óptica que se pretende sintetizar, obtenida en el capítulo anterior. Esto permitirá posteriormente implementar físicamente el sintetizador de luz, objetivo primordial del proyecto, que se llevará a cabo en el Capítulo 4.

Las primera sección del capítulo plantea un conjunto de consideraciones previas que pretenden dotar de mayor realismo y calidad al trabajo. Se estudiarán los efectos ocasionados por la radiación óptica en su interacción con la materia, para posteriormente acometer una breve exposición del ojo en seres humanos detallando el proceso de captación de luz y su interpretación cromática en el cerebro. Con ello, se evaluarán los posibles daños que la radiación provoca tanto en el ojo como en la piel. De igual forma, se abordarán aspectos distintivos del caso en que nos encontramos, como es la iluminación de cuevas prehistóricas en general, y más en particular, de la Cueva de Altamira, haciendo especial énfasis en la preservación de las pinturas rupestres. Finalmente, se concluirá con un conjunto de medidas preventivas que, aplicadas en el proceso de síntesis, limitarán los potenciales efectos nocivos presentados.

Tras ello, la Sección 3.2 describe el modelado matemático del problema que se plantea, desarrollando posteriormente el algoritmo de optimización que determina el “peso” a dar a cada fuente óptica individual (seleccionadas en la Sección 3.3) con objeto de que la respuesta espectral conjunta sea lo más precisa posible. Asimismo, se analizará y desarrollará un ejemplo práctico para la correcta comprensión del algoritmo empleado.

Por último, en la Sección 3.3 se realizará la selección de las fuentes ópticas idóneas para una adecuación precisa de la combinación de dichas fuentes con la fuente óptica de partida, mediante la utilización del algoritmo de optimización detallado en la sección anterior. Para acometer dicha tarea, se evaluarán diversas características de las fuentes ópticas que permitan obtener tanto una composición espectral adecuada como un resultado final óptimo en lo que a iluminación se refiere. Se evaluarán diferentes alternativas y tecnologías.

### 3.1. Efectos de la luz sobre la materia

Es cierto que el proyecto se basa única y exclusivamente en la iluminación de la Cueva de Altamira de forma que replique de manera inequívoca las lámparas artesanales hechas por los habitantes de la época, en el Paleolítico Superior. Sin embargo, es apropiado estudiar y aplicar los efectos ocasionados por la radiación lumínica sobre un material, ya sea orgánico o no, de tal forma que se puedan eliminar o limitar los potenciales daños que pueda ocasionar la iluminación tanto sobre tejidos biológicos como sobre las pinturas rupestres presentes en la cueva, siendo este un aspecto esencial en la preservación del patrimonio cultural. Por tanto, la iluminación debe ser tal que combine una visión correcta de la cueva, así como una limitación en el deterioro de los dos componentes mencionados.

Esta sección pretende dotar al presente proyecto de un valor añadido, como es la acotación de los potenciales riesgos derivados de la iluminación a la hora de llevar a cabo el proceso de síntesis del espectro original. En primer lugar, se evaluarán los efectos que surgen cuando interacciona un material con cualquier tipo de radiación electromagnética, prestando especial atención a los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo. Posteriormente, se realizará un estudio aplicado de los mismos sobre los órganos humanos más afectados por la luz, como son el ojo y la piel; para continuar con un análisis de dichos efectos sobre el arte rupestre. Se finalizará con una conclusión basada en medidas preventivas de carácter eminentemente espectral, las cuales presentarán una relevante consideración en la posterior síntesis.

#### 3.1.1. Interacción entre luz y materia

La luz que incide sobre un material, ya sea biológico o no, sufrirá una serie de fenómenos que deben tenerse en cuenta a fin de evaluar su potencial peligrosidad, y que son principalmente los que se muestran seguidamente:

- ◊ **Reflexión** → cambios bruscos del índice de refracción, dados en la separación entre dos medios físicos, ocasionan reflexión de Fresnel.
- ◊ **Scattering** → dispersión espacial propia de medios no homogéneos. Los tejidos biológicos lo son, al estar formados por células. De igual forma, las pinturas rupestres están situadas sobre un medio material dispersivo como son las paredes rocosas.
- ◊ **Absorción** → la luz es captada por la materia, esto es, la energía de los fotones es tomada por los electrones que conforman el material. Se denomina material opaco al que absorbe toda la radiación, siendo transparente en el caso opuesto.

Únicamente la radiación absorbida puede ocasionar daños en un material, los cuales pueden ser irreversibles si los fotones captados contienen, entre otros factores, la energía necesaria<sup>1</sup>. El efecto producido por la absorción puede ser muy variado, distinguiéndose tres tipos: efecto térmico, efecto fotoacústico y efecto fotoquímico [12].

---

<sup>1</sup>La energía asociada a un fotón,  $E_{foton} = h \cdot f$ , es proporcional a su frecuencia (dualidad onda-partícula).

El **efecto térmico**, también conocido como efecto calorífico radiante, es originado por la simple transmisión de energía al medio, tratándose de un efecto inherente a la propia iluminación. Se presenta en forma de calor, provocando un aumento local de la temperatura, y depende fundamentalmente del nivel de exposición ( $\frac{J}{m^2}$ ), magnitud que presenta una relación proporcional con los posibles efectos nocivos sobre la materia, y que se puede descomponer en tres elementos (*Ley de Bunsen-Roscoe*):

- Irradiancia: potencia incidente por unidad de superficie ( $\frac{W}{m^2}$ ).
- Tiempo de exposición a la radiación (seg).
- Distribución espectral de la energía que contiene la radiación.

El efecto térmico en tejidos biológicos tiene diferentes consecuencias en función del aumento de temperatura [13]. Ante un incremento mínimo pueden aparecer cambios en el metabolismo debido a la diferente velocidad de las reacciones químicas, pudiendo ser estos inocuos. Si el incremento es mayor puede producirse la desnaturalización de las proteínas, la vaporización del agua o la carbonización del tejido en el caso extremo. En el contexto de aplicación en que se enmarca el trabajo, se puede restar importancia al efecto térmico, ya que en condiciones normales de iluminancia el aumento de temperatura es mínimo (entre 1 y 1.5 °C).

El **efecto fotoacústico** se produce únicamente por la incidencia de luz procedente de fuentes pulsadas, caracterizadas por pulsos de extraordinaria energía y muy corta duración (no aplica en el presente proyecto). En estas condiciones, se puede generar una onda de presión (acústica) capaz de romper el material. En el caso de tejidos biológicos, por ejemplo, la incidencia de radiación sobre la retina con un láser pulsado provocará un desgarro de la misma (deshendidamiento de retina).

El **efecto fotoquímico** difiere de los dos anteriores en la no necesidad de elevadas intensidades luminosas para ocasionar un daño significativo en el material. Un fotón, considerado individualmente, tiene la capacidad de romper un enlace químico si su energía coincide con la energía de dicho enlace, siendo esta la condición para la absorción del fotón. De esta forma, los átomos que forman las moléculas se disgregan, estableciéndose un cambio químico con potenciales efectos nocivos.

Este efecto es dependiente del nivel de exposición, al igual que el efecto térmico, pero fundamentalmente de la responsividad del material, que representa la sensibilidad a las variaciones que la radiación pueda ocasionar en dicho material, de acuerdo a su distribución de absorbancia espectral. Seguidamente se muestran las longitudes de onda asociadas a energías de enlace típicas en tejidos vivos, compuestos principalmente por Carbono, Oxígeno, Hidrógeno y Nitrógeno (ver *Tabla 3.1*).

| Enlace | Longitud de onda |
|--------|------------------|
| O-H    | 257 nm           |
| N-H    | 307 nm           |
| C-O    | 332 nm           |
| C-C    | 344 nm           |

**Tabla 3.1.**  $\lambda$ 's asociadas a energías de enlace de tejidos biológicos

Se puede observar como son las radiaciones ultravioleta las que se asocian con el efecto fotoquímico. Debido a que cada fotón absorbido en estas longitudes de onda produce un cambio químico irreversible, este fenómeno es acumulativo o crónico, incrementándose el daño producido ante nuevas exposiciones a la radiación.

### 3.1.2. Riesgos fotobiológicos

Una vez desarrollados los efectos que ocasiona la radiación óptica al interactuar con un material, es conveniente aplicar dichos conceptos específicamente sobre tejidos biológicos, haciendo especial énfasis sobre piel y ojos, al ser estos los órganos que, estadísticamente, son más propensos a sufrir una lesión derivada de la exposición a radiación luminosa.

Se realizará una breve desarrollo de las células encargadas de la detección y captación de luz, detallando el proceso mediante el cual percibimos los colores [14], aspecto esencial en la síntesis espectral que se realizará posteriormente y en la evaluación de los potenciales riesgos que puede presentar el ojo ante la exposición lumínica. De igual forma, se introducirán brevemente potenciales trastornos en la piel.

#### Percepción del color

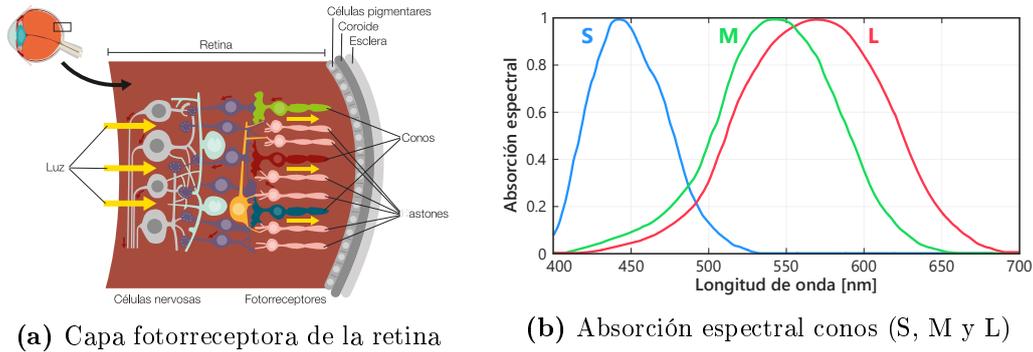
Antes de entrar en materia, es conveniente clarificar que los colores no son más que una percepción generada en el cerebro al recoger las señales nerviosas (impulsos electroquímicos) que son enviadas por las células presentes en la capa fotorreceptora de la retina del ojo a través del nervio óptico. Estas células, encargadas de transformar los impulsos luminosos en dichas señales eléctricas, pueden ser:

- **Bastones** → responsables de la visión en baja luminosidad. Presentan una gran sensibilidad a la luz (máximo en 507 nm), pudiendo detectar la energía de un sólo fotón. No son capaces de distinguir los colores.
- **Conos** → células fotosensibles responsables de la detección de colores. Son menos sensibles a la luz que los bastones, y tienen su máximo de sensibilidad desplazado a 555 nm. Pueden ser de 3 tipos:
  - ◊ Tipo S (sensibles a longitudes de onda corta): sensibles a la luz azul.
  - ◊ Tipo M (sensibles a longitudes de onda media): sensibles a la luz verde.
  - ◊ Tipo L (sensibles a longitudes de onda larga): sensibles a la luz roja.

Los conos cubren por completo el rango visible del espectro electromagnético (400 nm–750 nm aprox.<sup>1</sup>), y es el cerebro el que determina el color de la radiación (percepción monocromática) mediante la comparación de la intensidad de las tres señales estimuladas en cada tipo de cono por la luz incidente (ver *Figura 3.1*).

---

<sup>1</sup>En personas jóvenes, dada la mayor transparencia del cristalino, se pueden percibir longitudes de onda desde 380 nm hasta 780 nm.



(a) Capa fotorreceptora de la retina (b) Absorción espectral conos (S, M y L)

**Figura 3.1.** Situación física de las células fotosensibles y respuesta espectral

Ahora bien, la percepción visual no es única, sino que varía dinámicamente en las longitudes de onda del espectro visible en función del nivel de iluminación presente [15]. Esto modifica también la recepción de luz en la retina dada la presencia de dos tipos de células fotorreceptoras distintas (conos y bastones). De este modo se pueden distinguir tres tipos de visión:

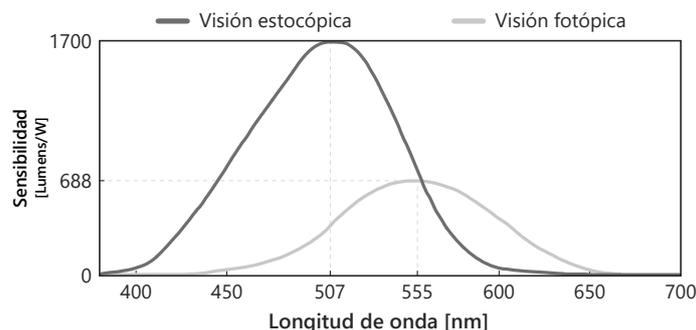
- (1) Visión fotópica → se produce con niveles de iluminación diurnos y permite la captación de colores. La recepción de luz es principalmente con los conos.
- (2) Visión escotópica → se produce con niveles muy bajos de iluminación. La recepción de luz es principalmente con los bastones de la retina.
- (3) Visión mesópica → se produce en condiciones intermedias de iluminación donde entran en juego tanto los conos como los bastones de la retina.

Una vez abordados estos aspectos, se puede establecer una relación aproximada entre colores y longitudes de onda de radiación incidente, que es la que se muestra a continuación (ver *Tabla 3.2*).

| Color    | Rango de $\lambda$ 's |
|----------|-----------------------|
| Violeta  | ~ 400 – 450 nm        |
| Azul     | ~ 450 – 495 nm        |
| Verde    | ~ 495 – 570 nm        |
| Amarillo | ~ 570 – 590 nm        |
| Naranja  | ~ 590 – 625 nm        |
| Rojo     | ~ 625 – 750 nm        |

**Tabla 3.2.** Relación aproximada entre colores y longitudes de onda

La sensibilidad del ojo, por tanto, no presenta una respuesta estática. Como se ha detallado anteriormente, el máximo de sensibilidad entre conos y bastones es diferente, 555 nm y 507 nm respectivamente. Por tanto, con altos niveles de luminosidad (visión fotópica), al ser los conos los que captan de la luz, se tiene una mayor sensibilidad a longitudes de onda largas (tonos rojos). Sin embargo, a medida que se pierde luminosidad (visión escotópica) son los bastones los encargados de captar la radiación luminosa, que pese a no distinguir colores, causan una mayor sensibilidad en longitudes de onda cortas. Esto se denomina efecto *Purkinje* (ver *Figura 3.2*).



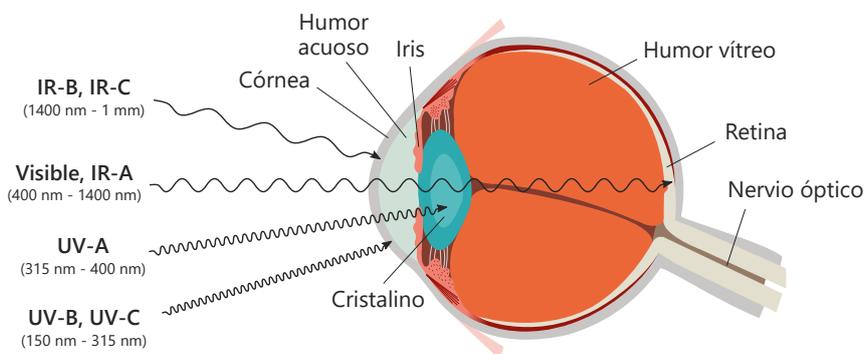
**Figura 3.2.** Efecto *Purkinje*. Funciones de luminosidad fotópica y estocópica.

El tipo de visión que se dará en la cueva (luz artificial) podemos considerarlo en el rango **mesópico**, que sin llegar a ser oscuridad total, tampoco se corresponde con la luz de un día soleado. En consecuencia, la actuación conjunta de conos y bastones origina una sensibilidad que comprende conjuntamente la existente en la visión fotópica y estocópica. La curva de sensibilidad del ojo, junto con la distribución de energía espectral de las pinturas, determinará el color percibido de las mismas.

### Efectos nocivos de la luz sobre el ojo

El ojo es, con diferencia, el órgano sobre el que mayor número de lesiones se producen como consecuencia de exposición a radiación lumínica. Para comprender los trastornos que puedan surgir, es importante analizar la estructura ocular, con los diferentes tejidos que atraviesa un haz de luz que incida sobre el ojo, así como la interacción que presentan los mismos a radiaciones de diferente longitud de onda. El haz incidente es focalizado en primera instancia por la córnea, que presenta un gran poder de refracción, para posteriormente atravesar el humor acuoso, y el iris a través de la pupila. Cuando el haz llega al cristalino, es nuevamente focalizado, y llega finalmente a la retina tras recorrer el humor vítreo intermedio.

A continuación se presenta la estructura de los tejidos oculares, junto con la absorción que presentan los mismos a la radiación incidente según sea la longitud de onda que la caracterice (ver *Figura 3.3*) [16].



**Figura 3.3.** Estructura ocular y absorción por tejido

Como se puede observar, el comportamiento que presentan los tejidos ante la radiación incidente depende fuertemente de la longitud de onda, por lo que han de evaluarse los posibles daños en cada tejido atendiendo específicamente a cada zona espectral.

El ojo incluye dos lentes, la córnea y el cristalino, que focalizan la luz sobre la retina, con un poder de focalización de 100.000, esto es, el área que ocupa el haz de luz a la entrada del ojo se reduce en ese mismo factor cuando alcanza la retina, siendo la luz focalizada sobre dicho tejido la que presenta una mayor peligrosidad. Aunque las células fotosensibles encargadas de la visión únicamente cubren el espectro visible, también la radiación correspondiente al infrarrojo cercano es susceptible de alcanzar la retina [17]. El resultado de la sobreexposición a esta radiación puede ser una quemadura a nivel macular (zona de la retina donde se enfoca la luz) que cause daños fotoquímicos en los fotorreceptores, ocasionando la denominada degeneración macular.

El resto de longitudes de ondas (ultravioleta e infrarrojo lejano) son absorbidas previamente por córnea y cristalino, pero el riesgo es menor debido a la ausencia de focalización. Los daños en la córnea se recuperan fácilmente, mientras que el cristalino se daña de forma permanente, siendo una amenaza para la retina, que está normalmente protegida de la radiación UV por el poder de filtración del cristalino. Las radiaciones UV inhiben la formación de la sustancia química que las células de la retina necesitan para transportar oxígeno a los fotorreceptores, y sin oxígeno algunas de estas células mueren, por lo que es esencial una protección que asegure una correcta preservación del cristalino.

Existen principalmente dos mecanismos de protección ante radiaciones intensas, si bien únicamente la luz visible activa estos reflejos protectores:

- ▷ Reflejo parpebral dirigido por el cerebro al detectar una radiación visible muy intensa. El tiempo de reacción es aproximadamente 200 ms.
- ▷ Cierre parcial del iris en 20 ms aprox. (el diámetro máximo de la pupila es 7 mm).

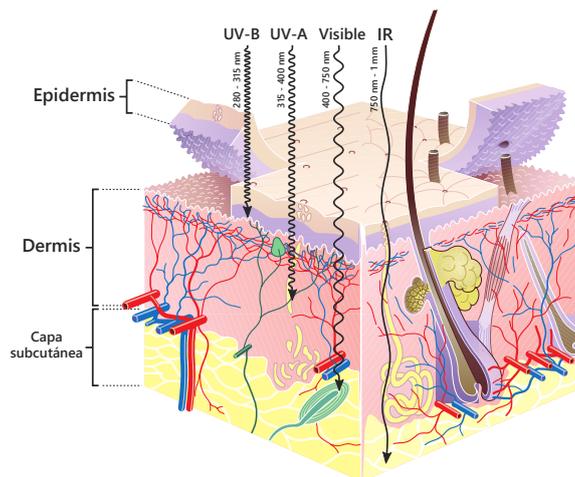
Asimismo, la retina, expuesta constantemente a la luz, favorece la oxidación de las membranas celulares que la componen (estrés oxidativo celular). Al ser el tejido que proporcionalmente consume más oxígeno, cuenta con mecanismos de defensa antioxidante que reducen las reacciones de oxidación. Sin embargo, la luz azul (atendiendo únicamente al rango visible) origina la pérdida de equilibrio entre los mecanismos oxidativos y los sistemas fisiológicos antioxidantes.

Como se constató previamente, la fototoxicidad retiniana correspondiente a las células fotosensibles a la luz azul (conos de tipo S) alcanza su valor máximo en torno a 440 nm (ver *Figura 3.1b*). La notable sensibilidad en dicho rango espectral hace que la emisión de luz azul de manera continuada sea un potencial riesgo para el ojo [18], aun manteniendo reducidas potencias de emisión.

Se ha determinado, mediante evidencias científicas, que la exposición crónica a luz azul es una de las causas que genera mayor cantidad de especies reactivas al oxígeno, lo cual ocasiona las siguientes patologías oculares: DMAE (degeneración macular asociada a la edad), retinopatía diabética, glaucoma y cataratas.

## Efectos nocivos de la luz sobre la piel

La piel, al recubrir prácticamente la totalidad del cuerpo humano, tiene una gran probabilidad de recibir radiación potencialmente dañina. Al igual que con el ojo, la piel esta compuesta por varios tejidos, por lo que es conveniente conocer su disposición física, así como su interacción con la radiación óptica en función de su longitud de onda (ver *Figura 3.4*) [19].



**Figura 3.4.** Estructura de la piel y absorción por tejido

La radiación infrarroja está caracterizada por un bajo coeficiente de absorción y, por tanto, una mayor penetración en el tejido<sup>1</sup>, pudiendo alcanzar la capa subcutánea. Dada la menor energía asociada a este tipo de radiación, así como la ausencia de focalización, únicamente es posible dañar la piel mediante radiación IR con elevadas intensidades luminosas (por efecto térmico). Los efectos fisiológicos de la radiación infrarroja pueden considerarse en el ámbito local o general como una forma de calentamiento por absorción de fotones [20].

Sin embargo, la radiación ultravioleta, como se mencionó anteriormente, presenta longitudes de onda cuya energía de fotón asociada es capaz de romper enlaces químicos propios de tejidos biológicos, por lo que una exposición continuada en este rango espectral puede causar alteraciones dermatológicas irreversibles [19] [21].

- La radiación UV-B (280 – 315 nm) tiene ligadas energías de fotón muy elevadas, capaces de ionizar átomos, por lo que una exposición prolongada (evolución lenta) puede provocar trastornos como eritemas, quemaduras, ampollas o reacciones alérgicas. Sin embargo, en los casos más graves puede dañar el sistema inmunitario al disminuir el número de células de *Langerhans*, desencadenando melanomas.
- La radiación UV-A (315–400 nm), aún teniendo una mayor capacidad de penetrar en el tejido, es absorbida fundamentalmente por la melanina, encargada de la protección frente a radiación óptica. Aunque tiene la capacidad de potenciar los trastornos ocasionados por la radiación UV-B, los principales efectos adversos que tiene son el envejecimiento de la piel, manchas, arrugas o pérdida de elasticidad.

<sup>1</sup>Penetración exponencial.  $i(d) = i_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$ , siendo  $i$  el número de fotones y  $d$  la profundidad.

Cabe destacar que la radiación infrarroja, además del efecto térmico mencionado, también puede potenciar los efectos negativos de los rayos UV-A y UV-B (aunque no se ha demostrado un vínculo con el cáncer de piel) e influir en el envejecimiento cutáneo provocando pérdida de firmeza y elasticidad.

### 3.1.3. Protección y conservación del arte rupestre

La conservación de las pinturas depende de características físicas como la temperatura, humedad relativa del aire, ventilación o existencia de insectos; efectos derivados de la acción del hombre, como incendios; pero también depende de la iluminación, aspecto que centra nuestra atención, en tanto en cuanto la luz puede causar daños en el arte rupestre como pérdida de saturación, modificación de los tonos originales (variación cromática asociada a una modificación de la distribución de reflectancia espectral), decoloración, endurecimiento o agrietamiento de las superficies. Es por eso que aunque el propósito sea lograr una iluminación adecuada para la correcta percepción de los colores y las pinturas de la cueva por parte del público, también es interesante limitar en la medida de lo posible el daño producido por la radiación a la que están sometidas dichas pinturas [22, 23].

Para ello, se puede actuar sobre determinados parámetros, permaneciendo otros inamovibles o sobre los cuales no es posible intervenir. Entre estos últimos se pueden destacar el régimen hídrico de la zona, con la presencia de aguas circulantes subterráneas derivadas del tramo bajo del río *Saja*, cuya relevancia se puede considerar limitada actualmente; así como principalmente el régimen climático de la cueva, con unas condiciones extremadamente singulares y desfavorables para la preservación del arte rupestre, dada su temperatura de  $13.5 - 14.5$  °C y, sobre todo, una humedad comprendida entre el 94 % – 97 %. Aún siendo aspectos desfavorables, es el perfecto equilibrio entre temperatura y una ligera capa de humedad sobre las pinturas la que ha posibilitado la preservación de las mismas durante más de 22.000 años.

La simple respiración humana aumenta estos dos factores climáticos, lo que facilita la condensación del agua del aire, con presencia de bacterias, sobre las pinturas, aumentando las probabilidades de daño sobre las mismas. Adicionalmente, el tiempo de exposición comprenderá el horario de visitas de la cueva (9:30–20:00), por lo que se puede considerar también un parámetro inamovible, así como la responsividad de las pinturas, cuya distribución de absorbancia espectral es constante con el material.

La iluminación que minimizaría el deterioro sería aquella que discriminase el espectro que absorbe el material, de forma que la radiación emitida tendría la máxima eficiencia en cuanto a sensación cromática percibida, a la vez que disminuiría la absorción fotónica y, con ello, el deterioro de las pinturas. Sin embargo, no es este el cometido del trabajo, ya que el espectro será el que replique de manera exacta las lámparas artesanales de la época, y no el que minimice el deterioro del arte rupestre<sup>1</sup>. Por tanto, de los 4 factores mencionados: responsividad, tiempo de exposición, irradiancia y distribución energético-espectral de la radiación, se podrá actuar exclusivamente sobre los dos últimos.

<sup>1</sup>No obstante, la emisión exclusiva en el visible contribuye a limitar notablemente este aspecto.

### 3.1.4. Tecnología a emplear

Con objeto de minimizar los potenciales efectos nocivos sobre tejidos y pinturas rupestres, se reducirán los efectos térmico y fotoquímico ocasionados por la propia iluminación<sup>1</sup> aplicando los conceptos detallados en la presente sección del capítulo.

En primer lugar, es importante recordar que los daños son proporcionales al nivel de exposición de la fuente. Teniendo en cuenta que el tiempo de exposición se puede considerar constante, se actuará sobre la irradiancia minimizando su valor. Para ello, se emplearán fuentes ópticas no coherentes, caracterizadas por una gran apertura lumínica (ángulo de exposición  $\geq 120^\circ$ ) que ocasione una radiación difusa y, por tanto, una reducción de la cantidad fotométrica asociada a la concentración de luz sobre el ojo, mitigando el impacto sobre las células fotosensibles de la retina. Como resultado, **se emplearán fuentes LED** en la síntesis espectral, lo cual posibilitará un mayor control sobre los rangos ópticos de emisión de la fuente a implementar.

En lo referente a la distribución espectral de emisión de la fuente óptica, es importante tener en consideración los riesgos asociados a las distintos rangos ópticos del espectro, con objeto de minimizar la influencia de las longitudes de onda asociadas. Tal y como se ha comentado anteriormente, la radiación IR es potencialmente peligrosa para la piel (fundamentalmente por efecto térmico) dada su mayor penetración en el tejido, presentando los efectos fisiológicos ya mencionados. Sin embargo, es el ojo el que presenta los mayores riesgos, ya que aunque el IR mediano y lejano son absorbidos por la córnea, el IR cercano es susceptible de alcanzar la retina, careciendo de la protección referente a reflejo parpebral o cierre parcial del iris (únicamente activados por radiación visible). Consecuentemente, la fuente óptica a implementar no presentará radiación óptica por encima de 760 nm.

De igual forma, las patologías derivadas de la radiación UV, tanto en tejidos biológicos como en pinturas rupestres, presentan una importancia relativa superior. Aunque la retina está protegida por córnea y cristalino, transparencias en este último pueden favorecer la presencia de radiación UV en la mácula, con los daños irreversibles que ello conlleva. En lo referente a la piel, aunque su penetración no es elevada (epidermis y dermis), puede ocasionar trastornos graves como melanomas. Las longitudes de onda asociadas al UV favorecen el efecto fotoquímico en tejidos, por lo que se eliminará cualquier tipo de emisión por debajo de 400 nm.

En lo relativo al rango visible, es importante destacar que la respuesta espectral a sintetizar, caracterizada en el capítulo anterior, presenta una importancia relativamente exigua en la gama de azules y violetas, parte baja del espectro visible. Asimismo, como se ha detallado anteriormente, las componentes espectrales correspondientes a la parte baja del rango visible son potencialmente peligrosas por efecto fotoquímico, siendo conveniente limitar su influencia. Estos dos aspectos permiten despreciar la contribución espectral en longitudes de onda inferiores a 470 nm.

Estas tres restricciones permiten centrar la atención únicamente en las **longitudes de onda comprendidas entre 470 nm y 760 nm**, procediendo a sintetizar el espectro original exclusivamente en dicha región.

---

<sup>1</sup>La no utilización de fuentes ópticas pulsadas permite despreciar el efecto fotoacústico.

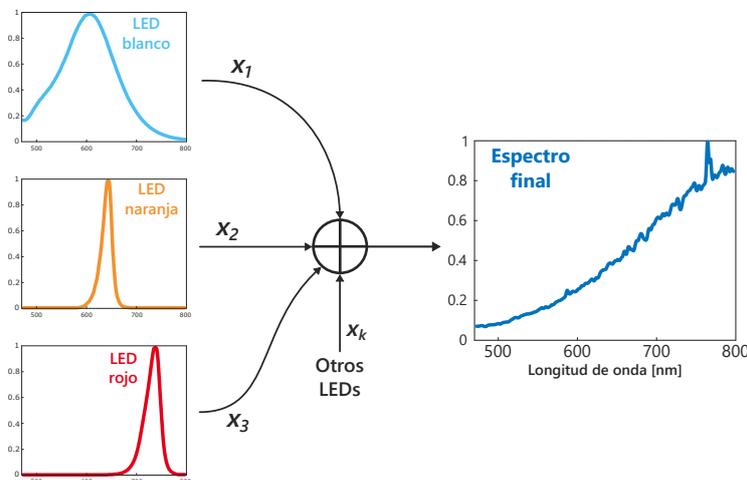
## 3.2. Algoritmo de síntesis espectral

Una vez detallados los aspectos teóricos relativos a los riesgos que eventualmente presenta la radiación de fuentes ópticas sobre tejidos biológicos y pinturas rupestres, y habiendo indicado las soluciones que limitan el problema dentro de las posibilidades de actuación que permite el proyecto, ya sea referentes al rango espectral de emisión o a las características tanto físicas como electro-ópticas de la fuente a implementar, es necesario conocer el funcionamiento individualizado de los LEDs que conformarán el sintetizador, de tal forma que su comportamiento conjunto reproduzca fielmente las condiciones lumínicas requeridas, esto es, la respuesta espectral original.

Para ello, en esta sección se desarrolla un algoritmo de optimización que proporciona el peso específico de cada posible LED en el sintetizador, siendo dicho peso óptimo para la adecuación espectral con la fuente original. En primer lugar se describe el problema presentado junto con el modelo matemático asociado, para posteriormente efectuar un desarrollo teórico del algoritmo empleado. Asimismo, se especificará una implementación práctica con objeto de favorecer la comprensión del conjunto de métodos utilizados. Por último, ya al final del capítulo, se aplicará el algoritmo sobre el conjunto de LEDs que conformará definitivamente el sintetizador.

### 3.2.1. Descripción del problema

Desde un punto de vista teórico-práctico, el primer gran objetivo del capítulo comprende el desarrollo de un algoritmo de optimización que determine la respuesta de la fuente óptica a implementar tal que minimice una función error, que comprende esencialmente la diferencia absoluta entre los espectros original y sintetizado a partir de LEDs. Dicho algoritmo obtendrá los coeficientes de escalado que se han de aplicar a cada LED con objeto de que su combinación genere como resultado el espectro que reproduzca de forma más precisa la fuente óptica que se pretende simular (ver *Figura 3.5*). Estos coeficientes representan, de manera proporcional, la intensidad (o tensión) que ha de regular el funcionamiento de cada diodo LED.



**Figura 3.5.** Combinación lineal de LEDs

## Modelado

El problema planteado está formado, en primer lugar, por una función a minimizar, acompañada de un conjunto de condiciones o restricciones que la solución obtenida ha de verificar. Todo ello, de manera conjunta, comprende la formulación del problema, que se presenta a continuación:

$$\min_x f_{error}(x)$$

con

$$f_{error}(x) = \int_{\lambda} \left| f(\lambda) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot g_i(\lambda) \right| d\lambda, \quad \forall \lambda(\text{nm}) \in [470 \dots 760] \quad (3.1)$$

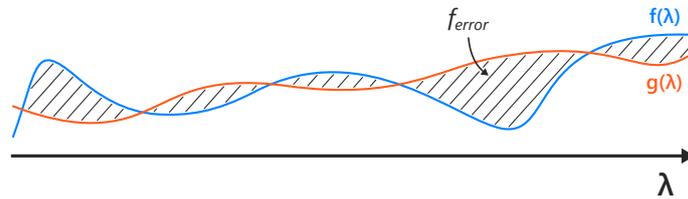
sujeto a

$$g(\lambda) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot g_i(\lambda) \leq 1.05 \cdot f(\lambda), \quad \forall \lambda(\text{nm}) \in [470 \dots 760] \quad (3.2)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad \forall i \in \{1 \dots n\} \quad (3.3)$$

donde  $f(\lambda)$  y  $g_i(\lambda)$  representan el espectro real de la fuente óptica que se pretende simular, y el espectro correspondiente al LED  $i$  del sintetizador, respectivamente. Por otro lado,  $x_i$  (variable a optimizar) representa el coeficiente de escalado que se ha de aplicar al LED  $i$  para simular de manera correcta la fuente óptica. Finalmente,  $g(\lambda)$  se corresponde con la respuesta espectral de la fuente óptica a implementar, es decir, la suma ponderada (según  $x_i$ ) del conjunto de LEDs.

La igualdad (3.1) hace referencia a la función que el algoritmo ha de minimizar, siendo esta la función error, definida como la integral a lo largo del espectro visible del valor absoluto de la diferencia entre el espectro real y la suma de las respuestas espectrales de cada LED escaladas un factor  $x_i$ , actuando sobre dichas variables  $x_i$  en la optimización; esto es, el área de la diferencia entre las curvas  $f(\lambda)$  y  $g(\lambda)$  ha de ser mínimo en la región sobre la que se efectuará la síntesis espectral (ver *Figura 3.6*).



**Figura 3.6.**  $f_{error}$  como el área de la diferencia entre las curvas  $f(\lambda)$  y  $g(\lambda)$

En cuanto a las restricciones presentes en la formulación del problema, (3.2) establece que la síntesis implementada mediante LEDs no debe superar en ningún caso el 105 % del espectro real (5 % de exceso permitido → valor fijado empíricamente), con objeto de no desvirtuar la característica espectral a sintetizar en la implementación final. Por último, (3.3) acota los factores de escalado a optimizar en el rango comprendido entre 0 y 1, debido a que tanto el espectro real como los correspondientes a las fuentes LED están normalizados en potencia a la unidad. De esta forma también se evitan valores negativos, carentes de sentido físico.

### 3.2.2. Desarrollo del algoritmo

Una vez sentadas las bases relativas a la formulación del problema mediante la especificación de las características y condiciones del mismo, se procederá a hacer un desarrollo exhaustivo del algoritmo en cuestión, a fin de determinar de forma precisa la solución del problema planteado inicialmente, lo cual permitirá posteriormente realizar un análisis que pueda constatar la veracidad del resultado obtenido. El algoritmo de optimización que se presentará seguidamente, dentro de la familia de los de gran escala<sup>1</sup> (*Large-Scale*), realiza la optimización de funciones no lineales multivariable sujetas a restricciones.

Para ello se emplea un método iterativo basado en regiones de confianza o *Trust-Region Method* (TRM) [24], apoyándose en el método PCG (*Preconditionated Conjugate Gradient method*) [25] para la resolución de los subproblemas asociados a cada iteración. Los aspectos relevantes de ambos métodos numéricos se determinan a continuación.

#### Método basado en regiones de confianza (TRM)

En primer lugar se dispone de una función objetivo  $f(x)$  que se ha de minimizar. En nuestro caso se corresponde con  $f_{error}(x)$ , que toma un argumento de entrada vectorial compuesto por los factores de escalado de cada LED ( $x \in \mathfrak{R}^n$  siendo  $n$  el número de LEDs  $\rightarrow x$ : variable a optimizar), y retorna como salida un escalar, que se corresponde con el error detallado en la formulación del problema.

Suponiendo que inicialmente nos encontramos en un punto  $x_0$ , el objetivo es pasar a un punto con un valor de función inferior. Sin embargo, y es aquí donde reside la mejora de este tipo de métodos, la minimización no se realiza globalmente sobre  $f$ , sino sobre una aproximación “confiable”  $q$  que, siendo más simple, refleja un comportamiento muy similar a  $f$  en un vecindario  $\mathcal{N}$  alrededor del punto de partida, siendo  $\mathcal{N}$  la región de confianza<sup>2</sup>. El subproblema que resulta es la búsqueda de un incremento tentativo  $s$  sobre  $\mathcal{N}$  que minimice la función auxiliar  $q$ :

$$\min_s q(s) \quad \text{con } s \in \mathcal{N}$$

Pueden darse dos resultados derivados de la resolución del subproblema [26]:

- (1) La aproximación es buena si  $f(x+s) < f(x)$ . El nuevo punto es actualizado y la región de confianza se incrementa para la siguiente iteración.
- (2) La aproximación es mala si  $f(x+s) \geq f(x)$ . El punto no varía y la región de confianza se reduce para la siguiente iteración.

La convergencia de la solución depende del tamaño de la región de confianza en cada iteración, que es consecuencia de la bondad de las anteriores aproximaciones

---

<sup>1</sup>Utilización de matrices dispersas o *sparse* (mayor parte de sus elementos son 0) sobre álgebra lineal. Requieren una menor cantidad de memoria y tiempo de procesado frente a algoritmos *medium-scale*, caracterizados por matrices densas o *dense*.

<sup>2</sup>Típicamente, la región de confianza de la iteración  $k$  se define como una  $n$ -esfera de radio  $\Delta_k$  centrada en  $x_{k-1}$ .

realizadas. El énfasis cambia ahora de encontrar direcciones de descenso a realizar aproximaciones confiables de  $f$  en regiones de confianza. Típicamente,  $q$  es una aproximación cuadrática definida por los dos primeros términos de la serie de Taylor  $F(x)$  sobre  $x_{k-1}$ , para la iteración  $k$ . Matemáticamente, el subproblema asociado queda redefinido como sigue:

$$\min_s \quad \frac{1}{2} s^T H_k s + s^T g_k \quad \text{tal que} \quad \|s\|_2 \leq \Delta_k \quad (3.4)$$

siendo  $g_k = \nabla f(x_{k-1})$  el gradiente en la iteración  $k$ ,  $H_k$  una matriz simétrica<sup>1</sup>  $n \times n$  que aproxima el Hessiano de  $f(x)$  y  $\Delta_k > 0$  el radio de la región de confianza.

La resolución exacta de la ecuación (3.4) precisa una complejidad muy elevada, por lo que comúnmente se emplean técnicas heurísticas o estrategias de aproximación para la obtención de una solución con la suficiente precisión. Por consiguiente, se emplea un procedimiento, conocido como método PCG (se estudiará seguidamente), que restringe el subproblema asociado a la selección de la región de confianza a un subespacio bidimensional  $\mathcal{S}$  [28], haciendo trivial la resolución de (3.4) incluso si fuera necesario hallar la totalidad de vectores y valores propios del sistema.

Dicho subespacio está definido por dos vectores  $\mathcal{S} = \langle s_1, s_2 \rangle$ , estando  $s_1$  en la dirección del gradiente  $g$ , y  $s_2$  pudiendo tomar dos posibles direcciones: la dirección de Newton ( $H \cdot s_2 = -g$ ) o una dirección con curvatura negativa ( $s_2^T \cdot H \cdot s_2 < 0$ ). Esta elección del subespacio  $\mathcal{S}$  pretende la consecución de dos propósitos trascendentales:

- ▷ Forzar una convergencia global (independientemente del punto inicial  $x_0$ ) a través de la dirección de máximo descenso (gradiente negativo) o de curvatura negativa.
- ▷ Lograr una convergencia local extraordinariamente veloz en la dirección de Newton, si existe. Se requiere un punto de partida cercano a un punto estacionario<sup>2</sup>.

A continuación se detalla el pseudocódigo del método TRM presentado.

---

#### Algoritmo 1: Trust-Region Method

---

**Entrada:**  $f, x, \epsilon$   
**Salida:**  $x_k$  ( $x$  que minimiza  $f$  con un error inferior a  $\epsilon$ )

```

1 while  $|x_k - x_{k-1}| > \epsilon$  and  $\Delta \Downarrow$  do
2   PCG Method  $\rightarrow$  Formular subespacio  $\mathcal{S} = \langle s_1, s_2 \rangle$ 
3    $s_1 \propto g$ 
4    $H \cdot s_2 = -g$  ó  $s_2^T \cdot H \cdot s_2 < 0$ 
5   Resolución de la ecuación (3.4)  $\rightarrow$  Hallar  $s$ 
6   if  $f(x + s) < f(x)$  then
7      $x = x + s$ 
8     Incrementar  $\Delta$ 
9   else
10    Decrementar  $\Delta$ 
11  end
12 end

```

---

<sup>1</sup>Se deriva del Teorema de *Schwarz* [27]. Sea  $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ ,  $A$  un conjunto abierto tal que existen segundas derivadas parciales y son continuas en  $A$ , se cumple que  $\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$ .

<sup>2</sup>Cabe destacar que un punto estacionario no implica un mínimo global, ya que la derivada contiene únicamente información local.

### Método de gradientes conjugados preconditionado (PCG)

Como se ha mencionado anteriormente, la definición del subespacio bidimensional  $\mathcal{S}$  requiere la obtención de los vectores  $\langle s_1, s_2 \rangle$ . Si bien hallar  $s_1$  es trivial,  $s_2$  precisa la resolución del sistema  $H \cdot s_2 = -g$ , que en la mayoría de los casos suele estar mal condicionado<sup>1</sup>. Por consiguiente, para mejorar la convergencia del método iterativo se resuelve un sistema equivalente (precondicionado) con una matriz con menor número de condición.

Sea una matriz  $M$  (precondicionador) con  $k_2(M^{-1}H \simeq 1)$ , el sistema preconditionado equivalente es el siguiente:

$$(M^{-1}H) \cdot p = M^{-1} \cdot (-g)$$

No obstante, no es esta la transformación utilizada en el método PCG, ya que, aunque  $M$  y  $H$  sean simétricas y definidas positivas (SDP), no es simétrica la matriz resultante del producto  $M^{-1}H$ , siendo inviable la aplicación del presente método. El preconditionamiento del sistema ha de hacerse de tal forma que la matriz producto siga siendo SDP, considerando para ello un preconditionador  $M$ , de manera que es posible tomar su matriz raíz cuadrada<sup>2</sup>  $M^{\frac{1}{2}}$  [29], obteniendo el sistema equivalente

$$\underbrace{M^{-\frac{1}{2}} \cdot H \cdot M^{-\frac{1}{2}}}_{\tilde{H}} \cdot \underbrace{M^{\frac{1}{2}} \cdot p}_{\tilde{p}} = \underbrace{M^{-\frac{1}{2}} \cdot (-g)}_{-\tilde{g}} \quad (3.5)$$

Se puede obtener la solución resolviendo el sistema preconditionado  $\tilde{H} \cdot \tilde{p} = -\tilde{g}$  y calculando  $p = M^{-\frac{1}{2}} \cdot \tilde{p}$  de acuerdo a los cambios de variable mostrados en (3.5). Así pues, son dos los aspectos que restan para la conclusión teórico-práctica del método descrito.

- Elección del preconditionador  $M$ . La velocidad de convergencia se acelera si  $M \simeq H$ , al reducirse el número de condición de  $\tilde{H}$ . Aunque existen varias posibilidades para la elección de  $M$ , los más populares son el preconditionador diagonal  $M = D_H$ , y las factorizaciones incompletas  $M = L \cdot L^T$ , que mantienen bajo el llenado de la factorización, así como el tiempo de CPU.
- Resolución del sistema lineal equivalente. Típicamente se emplea el método de los gradientes conjugados (CGM), siendo también válidos el método de *Richardson* (convergencia restrictiva), el método de *Jacobi* (descomposición aditiva de la matriz), el método de *Gauss-Seidel* (utiliza información de todas las iteraciones anteriores) o el método de sobrerelajaciones sucesivas (introducción de un parámetro que optimiza el cálculo). No obstante, la resolución del sistema equivalente se puede considerar trivial.

<sup>1</sup>Se dice que una matriz  $A$  está mal condicionada (aplicando la norma 2) si su número de condición  $k_2(A) \gg 1$ . Por otra parte,  $A$  está bien condicionada ssi  $k_2(A) \simeq 1$ .

<sup>2</sup>Dada una matriz  $M$  d.p.,  $M^{\frac{1}{2}}$  es una matriz que cumple  $M = M^{\frac{1}{2}} \cdot M^{\frac{1}{2}}$ . Si  $M$  diagonaliza como  $M = S \cdot D \cdot S^{-1}$ , la matriz raíz cuadrada se calcula como  $M^{\frac{1}{2}} = S \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot S^{-1}$ , donde  $D^{\frac{1}{2}}$  se obtiene calculando  $\sqrt{d_{ii}}$ .

### 3.2.3. Implementación del algoritmo

A fin de un mejor entendimiento por parte del lector del presente trabajo en lo referente al funcionamiento del algoritmo, y extrapolando los aspectos más relevantes relativos a los métodos TRM y PCG presentados, se mostrará una disposición esquemática de los pasos o fases que derivan en la resolución óptima del algoritmo para, posteriormente, aplicar el mismo sobre un sencillo caso práctico.

La representación esquemática del algoritmo, mostrada en el siguiente diagrama de flujo (ver *Figura 3.7*), pretende facilitar la comprensión del conjunto de etapas que componen dicho algoritmo, así como el flujo de datos asociado, que se encuentra implícito en la secuencia de operaciones.

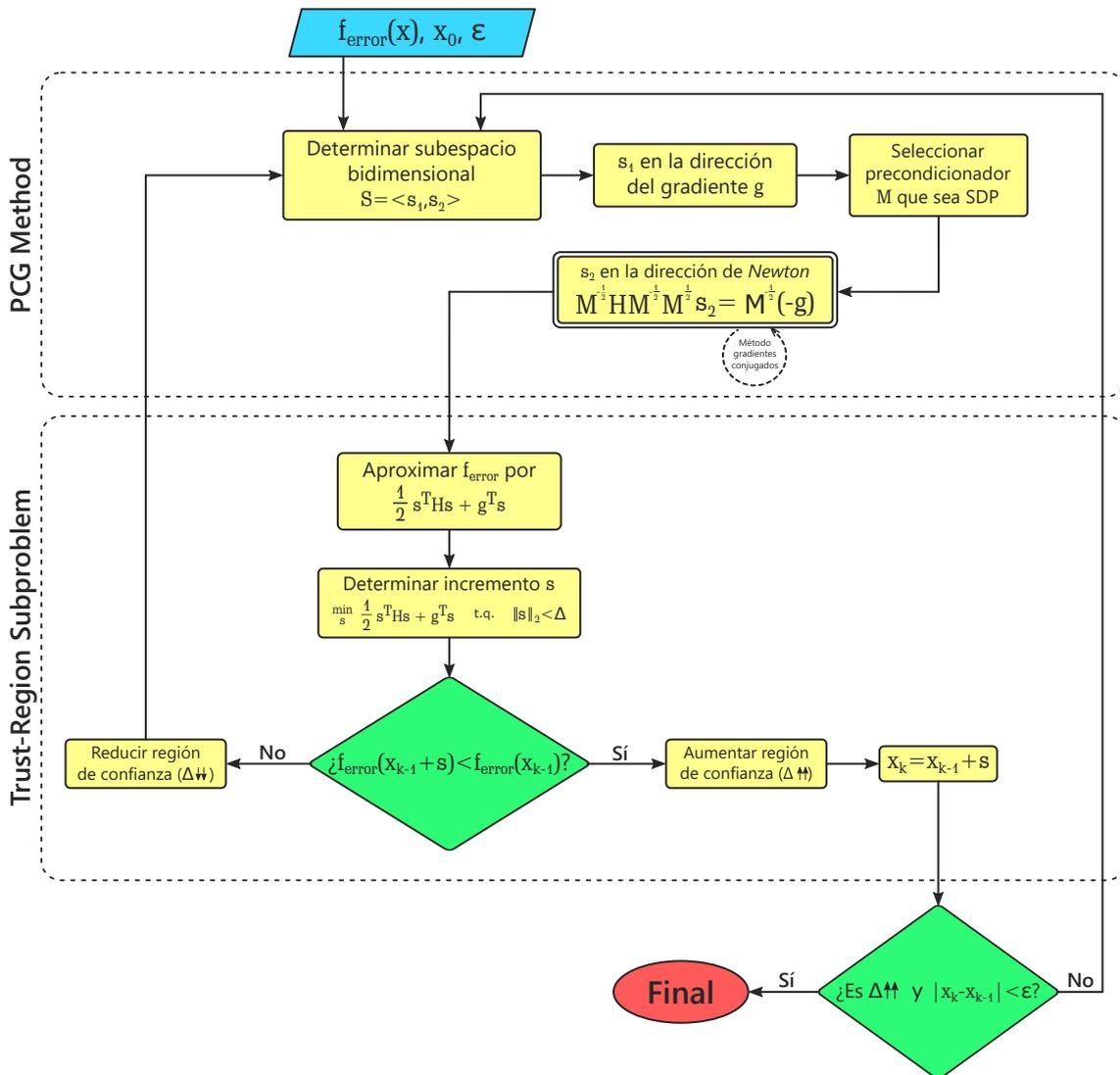
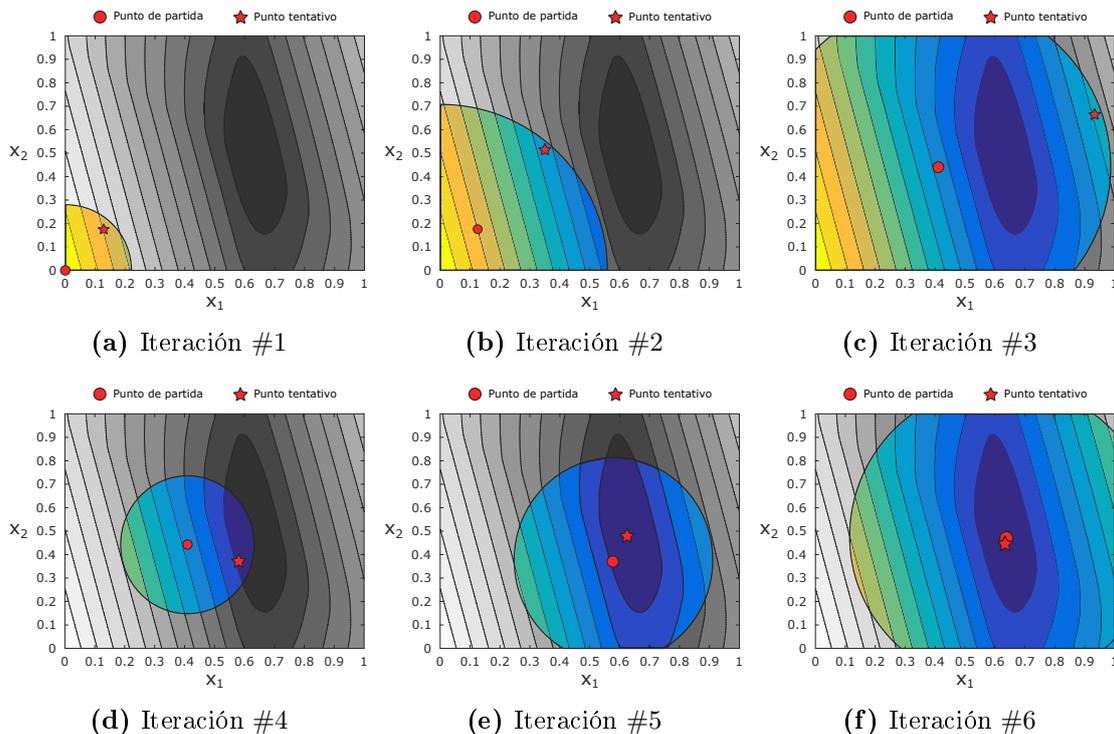


Figura 3.7. Diagrama de flujo de la implementación del algoritmo TRM

## Resolución de un caso práctico

Seguidamente, se muestra la aplicación del método *Trust-Region Method* sobre un ejemplo práctico relativo al presente trabajo. Aunque más tarde se llevará a cabo la síntesis espectral completa, en este ejemplo se sintetiza el espectro original en el rango 470 – 650 nm mediante dos LEDs dados. De esta forma, al optimizar únicamente dos variables, visualmente es posible observar la evolución del algoritmo sobre un plano bidimensional, facilitando la comprensión del proceso. Con dicho fin, se detalla el conjunto de iteraciones relativas a la resolución del ejemplo, con la representación gráfica asociada (ver *Figura 3.8*).

- (1) El punto inicial es  $x_0 = (0,0)$ . Se identifica la región de confianza (área de color), y se aproxima  $f_{error}(x_1, x_2)$  por una función  $q(s)$  que refleje su comportamiento en dicha región. Se determina un punto susceptible de minimizar la función.
- (2) El punto obtenido minimiza  $f_{error}$ , que pasa a ser el punto de partida de la segunda iteración. Dado que la aproximación anterior ha sido muy favorable, la región de confianza se incrementa de forma notable ( $\Delta \uparrow$ ).
- (3) El punto tentativo de la anterior iteración minimiza igualmente la función objetivo, por lo que pasa a ser el punto de partida de esta tercera iteración. De igual forma, la región de confianza se ve aumentada.
- (4) La aproximación obtenida no minimiza  $f_{error}$ , por lo que se parte del mismo punto que la iteración anterior, a la vez que se reduce la región de confianza ( $\Delta \downarrow$ ).
- (5) Aproximación exitosa. Nuevo punto de partida y aumento de la región de confianza.
- (6) Tras esta iteración, la diferencia espacial de los puntos es desdeñable, a la vez que la región de confianza se puede considerar lo suficientemente elevada como para garantizar la convergencia del método.



**Figura 3.8.** Proceso iterativo del ejemplo práctico

Para ilustrar lo recientemente expuesto, se muestra la conformación espectral que resulta de la combinación de ambos LEDs escalados 0.63 ( $\lambda$ 's bajas) y 0.48 ( $\lambda$ 's altas), en comparación con el espectro original (ver *Figura 3.9*). La adecuación espectral resultante responde a la minimización de  $f_{error}(x_1, x_2)$  llevada a cabo con el algoritmo descrito, que concluye un óptimo en  $x = (0.63, 0.48)$ .

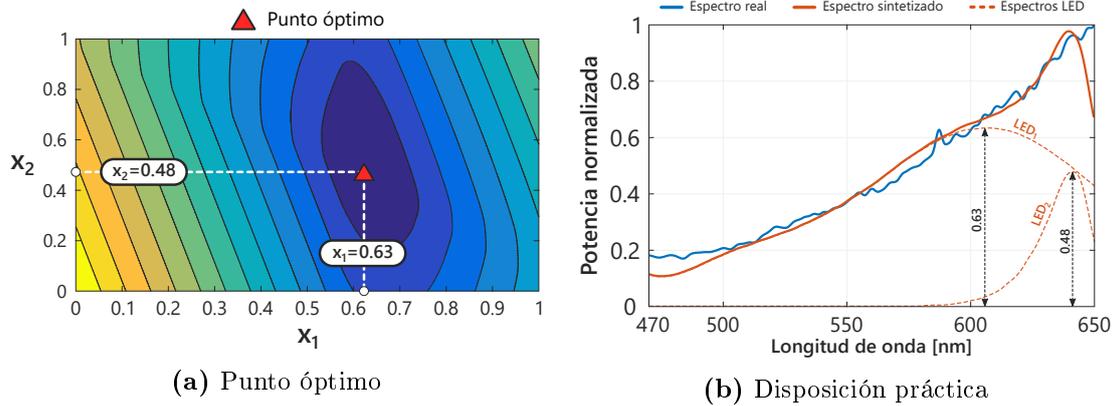


Figura 3.9. Solución óptima del ejemplo práctico

### 3.3. Especificación de elementos del sintetizador

Tras realizar el modelado y detallado teórico del algoritmo a emplear, y como último paso antes de abordar la implementación física del sintetizador, se determinarán las fuentes LED que conformarán el mismo, y sobre las cuales se realizará la síntesis espectral. Para ello, se tendrán en consideración diferentes alternativas, todas ellas aptas para acometer correctamente el objetivo propuesto. Seguidamente, se seleccionará la opción más atractiva en función de diversos parámetros, para finalizar hallando los coeficientes de escalado o pesos relativos de cada LED en la fuente óptica global, resultado del algoritmo sobre el problema en cuestión.

#### 3.3.1. Selección de fuentes LED

En este apartado se abordará la selección de los LEDs que conformarán globalmente la fuente óptica que se ha de implementar, evaluando los parámetros de interés que aseguren un funcionamiento óptimo para el caso que nos ocupa. Para ello, se han de tener presente los aspectos detallados anteriormente en relación a la percepción cromática, con objeto de seleccionar LEDs con las tonalidades cromáticas adecuadas para la respuesta espectral a conformar.

Como se determinó en el primer capítulo, la mayor parte de la potencia óptica de la fuente está situada en las longitudes de onda correspondientes al rojo, por lo que serán LEDs de dicho color, situados en el rango espectral comprendido entre 625 nm y 760 nm, los elementos principales de la fuente óptica final.

La zona baja-media del rango visible puede ser sintetizada utilizando principalmente dos estrategias:

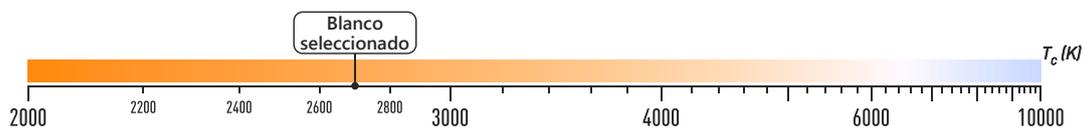
- ▷ Combinación de fuentes verdes, amarillas y naranjas.
- ▷ Utilización de una fuente blanca de gran anchura espectral.

Si bien es cierto que con la primera opción se consigue un control más preciso en lo que a regulación óptica se refiere, con la segunda se puede limitar el uso de LEDs en el diseño, así como tener un control de potencia prácticamente dependiente de dicha fuente blanca, dada su gran anchura espectral. El cometido del proyecto no precisa una regulación espectral dinámica<sup>1</sup>, debido a que una vez sintetizada la respuesta de la fuente, esta no va a ser modificada. En consecuencia, se empleará una fuente LED blanca como base óptica del sistema, evitando de esta forma la complejidad asociada al control óptico de un gran número de LEDs.

Ahora bien, una fuente blanca no tiene una respuesta espectral única, sino que hay un amplio abanico de posibilidades en función de su temperatura de color<sup>2</sup>, la cual se puede modificar variando el proceso de fabricación y los compuestos químicos que conforman la unión PN (Galio, Indio,...). En el blanco, se definen 3 grupos de temperatura de color [30]:

- Blanco frío → presentan tonos cercanos al azul. Equivale a la luz de un día muy soleado o nublado. Su principal ventaja es que con la misma intensidad genera una percepción mayor de luminosidad (mayor cantidad de *lumens*). Temperatura de color por encima de 6000 °K.
- Blanco neutro → presentan tonos más cercanos al blanco como tal. Temperatura de color entre 3500 y 6000 °K.
- Blanco cálido → presentan tonos cercanos al rojo. Equivale a la luz de lámparas incandescentes y halógenas. Temperatura de color inferior a 3500 °K.

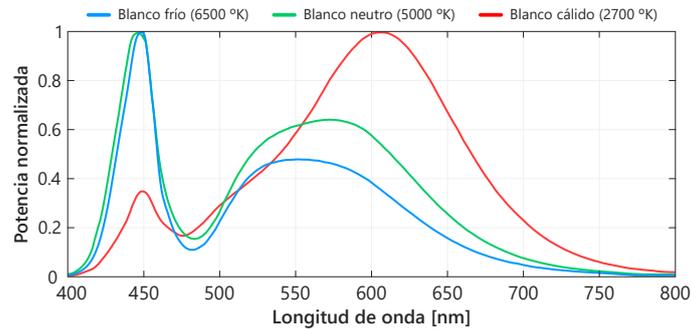
El blanco frío tiene, por tanto, una mayor importancia espectral en la parte baja del rango visible (400 – 490 nm) frente al blanco cálido, que comprende una mayor potencia óptica en las longitudes de onda del naranja-rojo (590 – 760 nm). El blanco neutro a su vez, tiene un comportamiento intermedio, con una distribución de potencia más uniforme a lo largo del espectro visible.



(a) Escala de temperatura de color del blanco

<sup>1</sup>Para fuentes de luz sintética de regulación variable, especialmente en la parte baja del rango visible, la primera opción puede ser más interesante.

<sup>2</sup>Medida del color de la luz (en *kelvins*). Se define comparando su color dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a dicha temperatura.



(b) Comparación espectral entre blanco cálido, neutro y frío

**Figura 3.10.** Temperatura de color del blanco

En consecuencia, se utilizará un blanco cálido con una temperatura de color en torno a 2700 °K (similar al mostrado en la *Figura 3.10*) como base de nuestra fuente óptica, dado el mayor peso de los tonos rojos en la misma. Con dicha fuente, podemos reproducir de manera precisa la respuesta espectral de las lámparas hasta aproximadamente 600 nm, con ausencia de radiación ultravioleta y escasa importancia de las componentes espectrales correspondientes al azul, limitando de esta forma los daños provocados por la acción fotoquímica tanto en las pinturas rupestres como en la retina, aspecto detallado anteriormente.

A partir de dicha longitud de onda, aunque la fuente blanca genera potencia, esta no es suficiente para reproducir de forma rigurosa la respuesta espectral, siendo necesario superponer fuentes adicionales cuya combinación origine el resultado requerido. Estas fuentes estarán situadas en las longitudes de onda del rojo (> 600 nm), siendo necesario el empleo de varias, dada su escasa anchura espectral en comparación con la fuente blanca. Consecuentemente, se disponen LEDs cada  $\sim 20$  nm hasta alcanzar los 760 nm, con objeto de cubrir el rango visible en personas capaces de percibir longitudes de onda ligeramente superiores a 750 nm<sup>1</sup>.

Teniendo en cuenta lo detallado anteriormente, podemos desarrollar y analizar principalmente 3 alternativas, en base a las siguientes especificaciones técnicas:

- (1) FWHM  $\rightarrow$  anchura espectral a altura mitad. Interesan valores elevados con objeto de reducir el número de fuentes LED.
- (2) Ángulo de exposición  $\rightarrow$  ángulo de apertura centrado en el eje central del LED donde la intensidad lumínica es el 50% del valor pico. Una gran apertura lumínica facilita la combinación cromática de las distintas fuentes ópticas.
- (3) Flujo luminoso  $\rightarrow$  potencia luminosa percibida. Se obtiene ponderando la potencia para cada longitud de onda con la función de luminosidad, que representa la sensibilidad del ojo, caracterizada en la subsección 3.1.2 *Riesgos fotobiológicos*.
- (4) Tensión directa máxima
- (5) Corriente DC directa máxima

<sup>1</sup>Como se detalló en la subsección 3.1.2 *Riesgos fotobiológicos*, se pueden captar longitudes de onda de incluso 780 nm, pero la cercanía al infrarrojo cercano incrementaría el deterioro ocasionado por la acción térmica. La síntesis espectral comprenderá, por tanto, la región 470 – 760 nm.

### Alternativa 1

La primera opción conlleva la utilización de 5 LEDs (ver *Tabla 3.3*), 4 de ellos del fabricante *OSRAM* y de tecnología de montaje superficial (SMD), y el LED restante del fabricante *Bivar*, y de tecnología de orificio pasante (THT). Al ser dispositivos de diferente tecnología, su regulación electrónica en el proceso de síntesis pasa a ser un aspecto complejo, debido a la dificultad que conlleva adecuar la corriente de polarización apropiada en componentes de distinta tecnología.

| #             | Fabricante   | Serie                   | Referencia   | Encapsulado | Precio/unidad |
|---------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------|---------------|
| 1             | <i>OSRAM</i> | OSLON Black             | LCW H9GP     | SMD         | 1.83 €        |
| 2             | <i>OSRAM</i> | OSLON SSL 150           | LR CPDP      | SMD         | 1.90 €        |
| 3             | <i>OSRAM</i> | OSLON SSL 150           | LH CPDP      | SMD         | 2.84 €        |
| 4             | <i>OSRAM</i> | OSLON SSL 150           | GF CSHPM1.24 | SMD         | 3.06 €        |
| 5             | <i>Bivar</i> | <i>Through hole</i> 5mm | 5RC          | THT         | 0.053 €       |
| <b>Total:</b> |              |                         |              |             | <b>9.68 €</b> |

**Tabla 3.3.** Dispositivos comerciales - *Alternativa 1*

La ausencia de LEDs del fabricante *OSRAM* en longitudes de onda cercanas a 700 nm hace necesario recurrir al LED de alta potencia de tecnología de orificio pasante (*through hole*), con un encapsulado de 5 mm (T-1 3/4), y una anchura espectral elevada en dicha región. Se podría cubrir dicha zona espectral mediante el uso de LEDs SMD, posibilidad contemplada en la tercera alternativa.

El LED blanco LCW H9GP presenta una temperatura de color de 2700 °K, y un CRI<sup>1</sup> o índice de reproducción cromática de 80. En cuanto a las características técnicas de los dispositivos (ver *Tabla 3.4*), se puede observar como los componentes de tecnología SMD presentan unas características óptimas en cuanto a potencia ( $\propto$  corriente), flujo luminoso y apertura lumínica; mientras que el LED de encapsulado de 5 mm, aun con una gran anchura espectral, presenta un flujo luminoso muy reducido, y su ínfimo ángulo de exposición obliga a la colocación de varios con una determinada disposición angular que asegure una apertura de luz similar al resto de LEDs.

| # | Longitud de onda de pico | FWHM  | Ángulo de exposición | Flujo luminoso | Tensión | Corriente |
|---|--------------------------|-------|----------------------|----------------|---------|-----------|
| 1 | —                        | —     | 90°                  | 97 lm          | <3.75 V | <1000 mA  |
| 2 | 634 nm                   | 18 nm | 135°                 | 65 lm          | <2.6 V  | <1000 mA  |
| 3 | 660 nm                   | 25 nm | 150°                 | 350 lm         | <2.6 V  | <1000 mA  |
| 4 | 730 nm                   | 30 nm | 150°                 | 250 lm         | <2.3 V  | <1000 mA  |
| 5 | 700 nm                   | 80 nm | 35°                  | 2 lm           | <2.8 V  | <80 mA    |

**Tabla 3.4.** Especificaciones técnicas - *Alternativa 1*

<sup>1</sup>Medida de la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de objetos en comparación con una fuente de luz natural o ideal. Su valor varía entre 0 y 100 (valor perfecto).

## Alternativa 2

La segunda posibilidad está caracterizada por el empleo de únicamente 3 LEDs, todos ellos del fabricante *Bivar*, y de encapsulado SMD (ver *Tabla 3.5*).

| #             | Fabricante   | Serie            | Referencia    | Encapsulado | Precio/unidad |
|---------------|--------------|------------------|---------------|-------------|---------------|
| 1             | <i>Bivar</i> | <i>Mid-Power</i> | SME2014UWDW05 | SMD         | 2.73 €        |
| 2             | <i>Bivar</i> | 1206             | SM1206U0C     | SMD         | 1.44 €        |
| 3             | <i>Bivar</i> | 1206             | SM1206RC      | SMD         | 1.54 €        |
| <b>Total:</b> |              |                  |               |             | <b>5.71 €</b> |

**Tabla 3.5.** Dispositivos comerciales - *Alternativa 2*

La presencia íntegra de dispositivos de montaje superficial facilita su integración en placas de circuito impreso, dado que los componentes son significativamente menores en tamaño, y no han de atravesar la placa de un lado a otro, como sí sucede con la tecnología de agujeros pasantes, presente en la primera opción. Adicionalmente, el consumo de energía y la temperatura de operación se ven reducidas.

Otro aspecto positivo de esta alternativa reside en la simplicidad que presenta el control óptico, todo ello derivado de la utilización de únicamente tres LEDs para realizar la síntesis espectral del rango visible. Como se ha mencionado anteriormente, no se necesita controlar de forma adaptable la luz emitida, sino reproducir estáticamente el espectro visible de las lámparas. De esta forma, el empleo de un número tan reducido de LEDs no es necesariamente un inconveniente, dados los requerimientos del proyecto.

El LED blanco SME2014UWDW05 presenta una temperatura de color de 3045 °K y un CRI de 80. Con respecto a las características sobre las que se realiza la valoración de los distintos LED (ver *Tabla 3.6*), se puede observar cómo el ángulo de exposición que presentan las tres fuentes ópticas es significativamente elevado, así como la anchura espectral de las mismas. Sin embargo, sus valores de luminosidad, así como de potencia emitida (0.54 W, 78 mW y 78 mW respectivamente) son insuficientes para aplicaciones de iluminación.

| # | Longitud de onda de pico | FWHM   | Ángulo de exposición | Flujo luminoso | Tensión | Corriente |
|---|--------------------------|--------|----------------------|----------------|---------|-----------|
| 1 | —                        | —      | 110°                 | 48 lm          | <3.6 V  | <150 mA   |
| 2 | 630 nm                   | 20 nm  | 140°                 | 80 lm          | <2.6 V  | <30 mA    |
| 3 | 700 nm                   | 100 nm | 140°                 | 0.9 lm         | <2.6 V  | <30 mA    |

**Tabla 3.6.** Especificaciones técnicas - *Alternativa 2*

### Alternativa 3

Esta última alternativa está caracterizada por el empleo de 8 LEDs (ver *Tabla 3.7*), siendo 3 del fabricante *Lumileds*, y otros 5 del fabricante *Roithner Lasertechnik*, que nos proporciona un amplio abanico de productos de diferentes longitudes de onda de pico. Aunque se podrían usar íntegramente productos de este último fabricante para realizar la síntesis, su elevado coste hace recomendable la combinación de ambas marcas, de características similares; si bien es cierto que, aun así, es la alternativa que conlleva un mayor gasto económico.

| #             | Fabricante                   | Serie    | Referencia  | Encapsulado | Precio/unidad  |
|---------------|------------------------------|----------|-------------|-------------|----------------|
| 1             | <i>Lumileds</i>              | Luxeon C | L1C1-2780   | SMD         | 1.43 €         |
| 2             | <i>Lumileds</i>              | Luxeon C | L1C1-RED    | SMD         | 1.65 €         |
| 3             | <i>Lumileds</i>              | Luxeon C | L1C1-FRD    | SMD         | 2.39 €         |
| 4             | <i>Roithner Lasertechnik</i> | SMB1N    | SMB1N-D660N | SMD         | 9.11 €         |
| 5             | <i>Roithner Lasertechnik</i> | SMB1N    | SMB1N-680   | SMD         | 10.69 €        |
| 6             | <i>Roithner Lasertechnik</i> | SMB1N    | SMB1N-700   | SMD         | 10.69 €        |
| 7             | <i>Roithner Lasertechnik</i> | SMB1N    | SMB1N-720   | SMD         | 10.69 €        |
| 8             | <i>Roithner Lasertechnik</i> | SMB1N    | SMB1N-760D  | SMD         | 10.44 €        |
| <b>Total:</b> |                              |          |             |             | <b>57.09 €</b> |

**Tabla 3.7.** Dispositivos comerciales - *Alternativa 3*

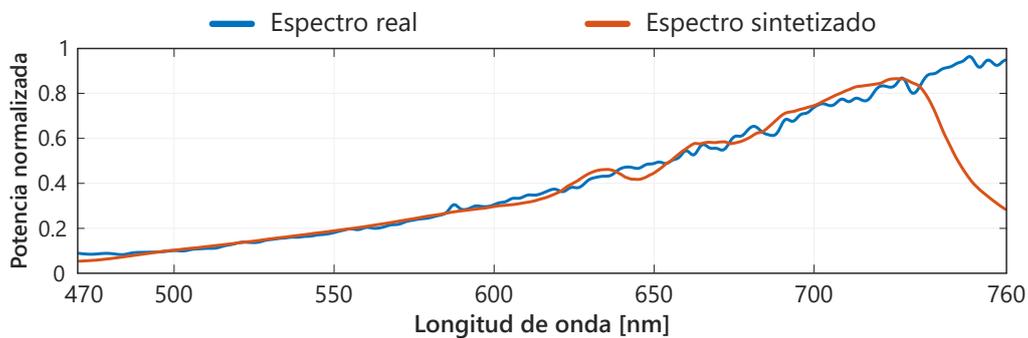
En este caso, el LED blanco L1C1-2780 presenta una temperatura de color de 2700 °K, con un CRI de 80. Como sucede en la primera opción, la regulación de los LEDs con tensiones inferiores a 5 V y corrientes con valores cercanos a 1 A los hace adecuados para un sencillo diseño en *hardware*, a la vez que proporcionan una potencia óptica de salida apropiada para aplicaciones de iluminación, con un importante flujo luminoso. Otro aspecto fundamental es el relacionado con la apertura lumínica de las fuentes ópticas, las cuales presentan patrones de radiación caracterizados por elevados ángulos de exposición ( $> 120^\circ$ ), un factor fundamental para mezclar cromáticamente las radiaciones ópticas generadas por cada una de las fuentes. Las características electro-ópticas de los dispositivos se muestran seguidamente (ver *Tabla 3.8*).

| # | Longitud de onda de pico | FWHM  | Ángulo de exposición | Flujo luminoso | Tensión | Corriente |
|---|--------------------------|-------|----------------------|----------------|---------|-----------|
| 1 | —                        | —     | 150°                 | 94 lm          | <3.5 V  | <1225 mA  |
| 2 | 640 nm                   | 20 nm | 162°                 | 39 lm          | <2.5 V  | <1050 mA  |
| 3 | 735 nm                   | 20 nm | 162°                 | 230 lm         | <2.3 V  | <700 mA   |
| 4 | 660 nm                   | 16 nm | 124°                 | 250 lm         | <3 V    | <500 mA   |
| 5 | 680 nm                   | 25 nm | 124°                 | 170 lm         | <2.5 V  | <600 mA   |
| 6 | 700 nm                   | 21 nm | 128°                 | 120 lm         | <2.7 V  | <500 mA   |
| 7 | 720 nm                   | 24 nm | 126°                 | 170 lm         | <2.8 V  | <600 mA   |
| 8 | 760 nm                   | 26 nm | 128°                 | 400 lm         | <2.5 V  | <800 mA   |

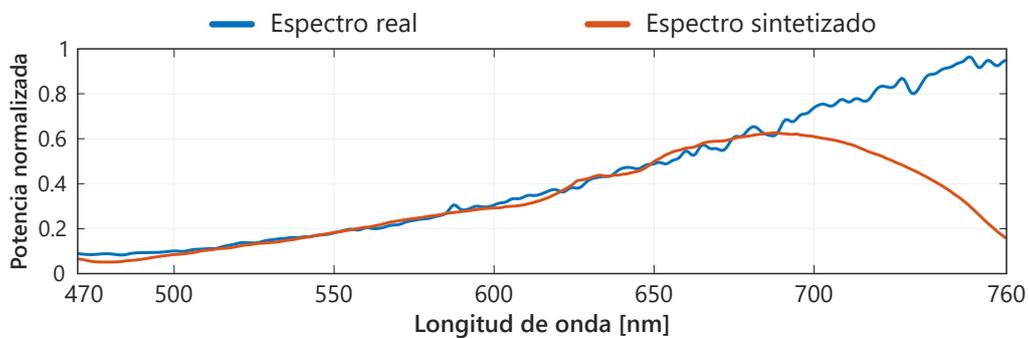
**Tabla 3.8.** Especificaciones técnicas - *Alternativa 3*

### Selección de la alternativa óptima

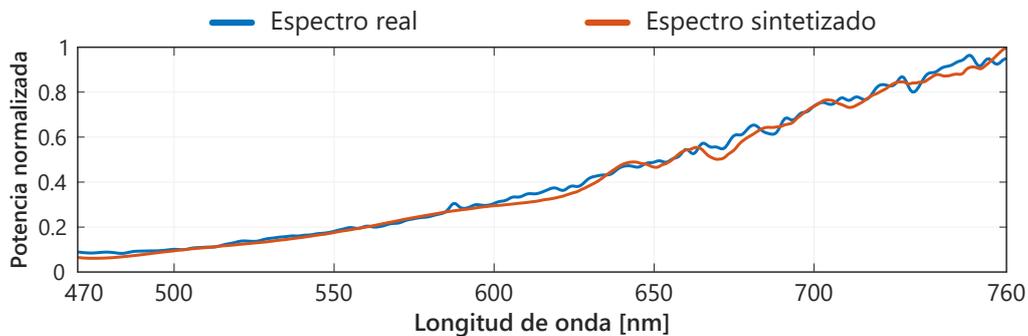
Una vez desarrolladas y analizadas las características técnicas de los LEDs que componen cada alternativa, el siguiente paso consiste en la determinación de la opción más adecuada para el caso que nos ocupa. Antes de realizar la selección de fuentes LED, se muestra a continuación el resultado de aplicar el algoritmo de optimización sobre cada una de las alternativas recientemente detalladas (ver *Figura 3.11*), con objeto de disponer de un parámetro crucial sobre el que realizar posteriormente la valoración final, como es la adecuación espectral de la fuente. La síntesis comprende el rango espectral 470 – 760 nm.



(a) Síntesis espectral correspondiente a la *Alternativa 1*



(b) Síntesis espectral correspondiente a la *Alternativa 2*



(c) Síntesis espectral correspondiente a la *Alternativa 3*

**Figura 3.11.** Síntesis espectral de las distintas alternativas

Con objeto de evaluar la exactitud del proceso de síntesis, se muestra el valor de la función a minimizar, definida como  $f_{error}$ <sup>1</sup> en el modelado del problema (sección 3.2 *Algoritmo de síntesis espectral*), que resulta de ejecutar el algoritmo de optimización sobre las fuentes ópticas que componen cada alternativa. Adicionalmente, se exponen a modo informativo el número de iteraciones, así como el error absoluto máximo cometido en la aproximación, tomando el promedio de 10 ejecuciones del algoritmo (ver *Tabla 3.9*).

| Alternativa | $f_{error}$    | #iteraciones | $\epsilon_{absoluto}$ |
|-------------|----------------|--------------|-----------------------|
| 1           | <b>29.3945</b> | 114          | $9.54 \cdot 10^{-11}$ |
| 2           | <b>53.8805</b> | 64           | $2.99 \cdot 10^{-4}$  |
| 3           | <b>9.3358</b>  | 142          | $9.16 \cdot 10^{-11}$ |

**Tabla 3.9.** Información sobre el proceso de optimización

Finalmente, se evaluarán las ventajas e inconvenientes de cada una de las posibles elecciones, para posteriormente seleccionar el conjunto de LEDs que conformarán la fuente óptica final.

#### (1) ALTERNATIVA 1

##### ✓ VENTAJAS

- Número de LEDs limitado → control de potencia sencillo
- Flujo luminoso y potencia óptica elevados
- Coste económico reducido

##### × INCONVENIENTES

- Síntesis espectral cubierta únicamente hasta  $\sim 730$  nm
- Utilización de diferentes tecnologías → regulación compleja
- Fuentes ópticas con diferente apertura lumínica

#### (2) ALTERNATIVA 2

##### ✓ VENTAJAS

- Empleo de tecnología SMD
- Utilización de únicamente 3 LEDs → control de potencia asequible
- Ángulo de exposición elevado en todas la fuentes ópticas
- Coste económico insignificante

##### × INCONVENIENTES

- Síntesis espectral hasta  $\sim 700$  nm →  $\epsilon_{absoluto}$  muy elevado
- Luminosidad y potencia óptica muy limitadas

---

<sup>1</sup> $f_{error} = \int_{\lambda} |\text{espectro}_{real}(\lambda) - \text{espectro}_{sintetizado}(\lambda)| d\lambda, \quad \forall \lambda(\text{nm}) \in [470 \dots 760]$

**(3) ALTERNATIVA 3**

## ✓ VENTAJAS

- Síntesis espectral hasta  $\sim 760$  nm  $\rightarrow \epsilon_{absoluto}$  despreciable
- Flujo luminoso y potencia óptica elevadas
- Gran apertura lumínica
- Empleo de tecnología *SMD*

## × INCONVENIENTES

- Empleo de un gran número de LEDs  $\rightarrow$  control de potencia complejo
- Coste económico significativo

Una vez valoradas cada una de las alternativas planteadas, podemos asegurar que la opción óptima corresponde a la *Alternativa 3*, en tanto en cuanto es la única que asegura una precisa adecuación del espectro sintetizado con el real hasta longitudes de onda cercanas a 760 nm, minimizando el error absoluto cometido en el proceso de síntesis. La íntegra utilización de fuentes ópticas de tecnología de montaje superficial, junto con la elevada luminosidad en altos ángulos de exposición, elementos esenciales en aplicaciones de iluminación, presentan una mayor importancia frente a la complejidad ocasionada por la utilización de 8 LEDs y el mayor coste que el resto de opciones presentadas, que pasan a ser aspectos secundarios.

**3.3.2. Caracterización de fuentes LED**

Por último, se especificarán los coeficientes de escalado de cada uno de los LEDs que conforman la *Alternativa 3* seleccionada previamente, de tal forma que queden caracterizados por completo los mismos antes de realizar la implementación física del sintetizador en el próximo capítulo.

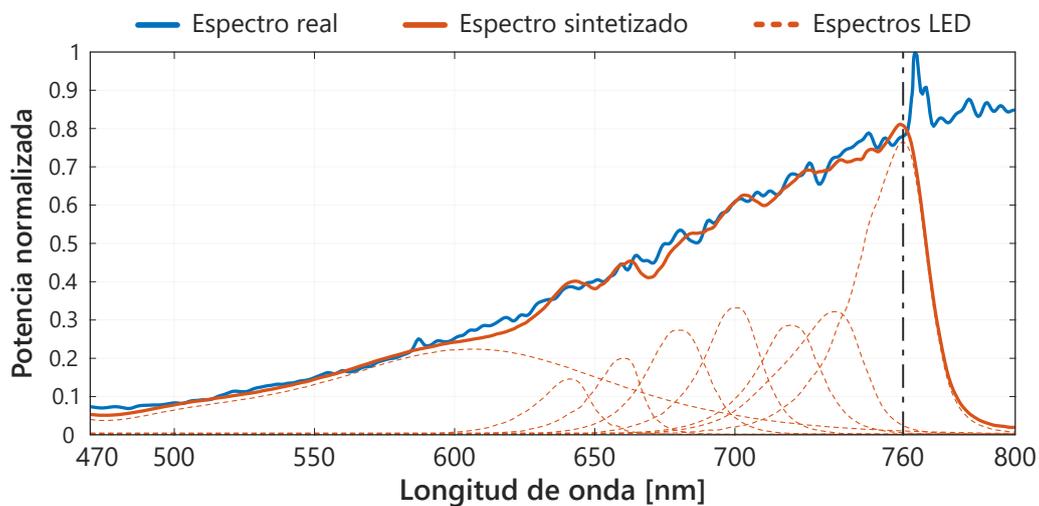
Los coeficientes de escalado que aseguran en el proceso de síntesis una mayor exactitud entre los espectros real y sintetizado (minimizando el error entre ambas curvas) para las fuentes ópticas correspondientes a la *Alternativa 3*, son los que se muestran a continuación (ver *Tabla 3.10*).

| #     | 1             | 2             | 3             | 4             | 5             | 6             | 7             | 8             |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Ref.  | L1C1-2780     | L1C1-RED      | L1C1-FRD      | SMB1N-D660N   | SMB1N-680     | SMB1N-700     | SMB1N-720     | SMB1N-760D    |
| Coef. | <b>0.2241</b> | <b>0.1462</b> | <b>0.3222</b> | <b>0.1999</b> | <b>0.2737</b> | <b>0.3320</b> | <b>0.2867</b> | <b>0.7659</b> |

**Tabla 3.10.** Coef. de escala de los LEDs de la *Alternativa 3* en el proceso de síntesis

La respuesta espectral de cada LED está normalizada entre 0 y 1, por lo que el peso relativo que caracterizará cada fuente estará comprendido entre dichos valores, tal y como se detalló en el modelado del problema de optimización. Estos coeficientes de escalado representan proporcionalmente la potencia óptica que ha de generar cada diodo LED con objeto de componer, conjuntamente con el resto de fuentes, la característica espectral buscada. Debido a ello, estos coeficientes especifican de manera relativa la tensión o corriente con que se ha de polarizar cada diodo.

En la siguiente imagen (ver *Figura 3.12*) se puede observar el proceso de síntesis asociado a la *Alternativa 3*, con las curvas correspondientes al espectro real de la fuente óptica natural, así como la característica espectral de la fuente de luz que se sintetizará<sup>1</sup> artificialmente en el próximo capítulo, tal y como se detalló previamente. Asimismo, se incluyen las respuestas espectrales, ya escaladas, de cada uno de los LEDs que componen la alternativa elegida, estando ordenadas de izquierda a derecha como sigue: 1, 2, 4, 5, 6, 7, 3, 8; siendo estos los dígitos que aluden al identificador que presenta cada uno de los LEDs que conformarán posteriormente el sintetizador, cuya referencia y factor de escala se pueden observar en la *Tabla 3.10*.



**Figura 3.12.** Síntesis espectral definitiva (con espectros escalados de cada LED)

Se observa como la síntesis espectral es optimizada hasta la longitud de onda de 760 nm, como se justificó con anterioridad, viéndose disminuida la potencia óptica en componentes espectrales superiores. Se puede considerar despreciable la potencia óptica generada a partir de 780 nm, lo cual indica la práctica ausencia de radiación luminosa en el rango infrarrojo, que se une a la ínfima aportación energética en los rangos ultravioleta y parte baja del visible. De este modo, quedan significativamente reducidos los efectos adversos que la radiación lumínica origina sobre las pinturas rupestres, así como sobre órganos biológicos como son los ojos y la piel.

<sup>1</sup>El proceso de síntesis espectral desarrollado en el presente capítulo es sobre una lámpara de tuétano de naturaleza bovina. Para caracterizar y sintetizar espectralmente lámparas asociadas a otro tipo de especies animales, ver *Anexo I*.

## Implementación de la fuente óptica

El último bloque del trabajo abarca la implementación física de la fuente óptica global, que posibilita obtener luz sintética adaptable a diferentes requisitos de iluminación, dados en nuestro caso por las condiciones lumínicas presentes en cuevas prehistóricas. La estrategia de implementación comprende el uso de las fuentes LED detalladas en el capítulo previo, con los factores de escalado correspondientes, con objeto de reproducir de forma precisa la respuesta espectral original.

Utilizando *Arduino Mega* como plataforma *open source* para el control de los distintos componentes, la Sección 4.1 comprende el montaje físico en sí, con el diseño electrónico tanto del sintetizador, como de un mando de control remoto auxiliar sobre el cual controlar el estado *on/off* de dicho sintetizador. Para ello, se requiere la edición del esquemático de ambos circuitos electrónicos, para continuar con el diseño de las PCB atendiendo a la colocación de los distintos componentes según sus dimensiones, así como de las pistas de unión de componentes. Asimismo, se efectúa físicamente el circuito impreso del sintetizador y del mando de control remoto según el diseño elaborado. Se detallará exhaustivamente el conjunto de etapas que definen el proceso de fabricación de una PCB.

Posteriormente, la sección 4.2 aborda el ajuste en potencia de los LEDs del sintetizador en base a los coeficientes de escalado obtenidos en la síntesis espectral. Para acometer la regulación de potencia de dichos LED se emplea la técnica conocida como PWM o modulación por ancho de pulsos, que se analizará en profundidad. Una vez realizado el ajuste en potencia, y como último punto previo a la conclusión del proyecto, se verificará la idoneidad espectral de la fuente óptica implementada.

### 4.1. Montaje físico

Como se ha mencionado, esta primera sección del capítulo comprende el diseño tanto esquemático como físico del sintetizador de luz, así como del control remoto asociado. El control de los mismos se efectuará a través de la plataforma *Arduino Mega 2560*, gobernada por el microcontrolador *ATMega2560*. Como punto adicional, se indica el proceso de fabricación de placas de circuito impreso, indicando el conjunto de etapas a seguir para la consecución de las PCBs diseñadas.

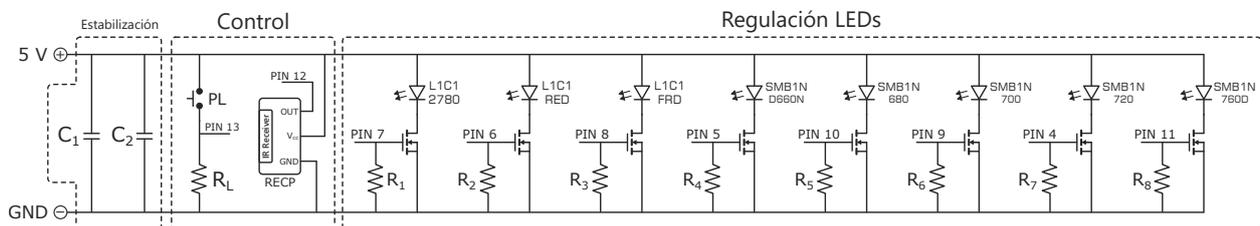
### 4.1.1. Diseño del sintetizador óptico

Este apartado aborda el diseño e implementación de la fuente óptica sintética a partir de la selección de fuentes LED realizada en el capítulo anterior que, junto con elementos auxiliares de estabilización y control (integración del control remoto desarrollado posteriormente), garantizará un correcto funcionamiento, y posibilitará el posterior ajuste óptico de los componentes fotónicos.

Consecuentemente, se puede considerar este punto como crítico del presente capítulo y, extrapolando su trascendencia al trabajo completo, como un elemento de vital importancia en la consecución del objetivo final: la simulación de condiciones lumínicas concretas (lámparas arcaicas de tuétano) empleando una fuente de luz sintética adaptable.

#### Descripción del circuito electrónico

El circuito electrónico característico del sintetizador (ver *Figura 4.1*), sobre el cual se realizará un análisis exhaustivo a continuación, presenta tres bloques relevantes cuyas funciones, si bien se encuentran conexas entre sí, pueden estudiarse de forma individualizada. Dichos bloques, estabilización, control y regulación, garantizan, conjuntamente, un óptimo funcionamiento del circuito presentado.



**Figura 4.1.** Diagrama electrónico del sintetizador óptico

El circuito de **estabilización** no es más que un sencillo sistema de desacople general constituido por dos condensadores conectados entre alimentación y tierra, en paralelo. Las pistas del circuito, que contienen inductancias parásitas, provocan que cuando se requiera una intensidad importante como consecuencia de la rápida conmutación de señales en circuitos digitales, como el presentado, exista un retardo en el suministro de dicha intensidad y, por tanto, una significativa caída de tensión en la alimentación. Es por eso que la presencia de LEDs con altos requerimientos de potencia y, por extensión, de corriente, hace que la estabilización de los valores de tensión en las líneas de alimentación y masa sea un aspecto básico para una correcta regulación óptica, siendo necesaria la colocación de condensadores de desacople.

La existencia de dos condensadores de distinta capacidad (ver *Tabla 4.1*) radica en el hecho de poder filtrar ruido de alta y baja frecuencia.  $C_1$ , con una capacidad de 100 nF, presenta una impedancia<sup>1</sup> muy baja, por lo que el ruido de alta frecuencia se ve necesariamente conducido a masa antes de llegar a los distintos componentes

<sup>1</sup>La impedancia de un condensador,  $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ , decrece al aumentar la frecuencia ( $\omega = 2\pi f$ ).

electrónicos. Por otra parte,  $C_2$ , al presentar una capacidad más elevada, presenta una impedancia mayor, limitando el ruido a frecuencias menores.

| Componente      | Magnitud     |
|-----------------|--------------|
| $R_1 \dots R_8$ | 1 k $\Omega$ |
| $R_L$           | 220 $\Omega$ |
| $C_1$           | 100 nF       |
| $C_2$           | 10 $\mu$ F   |

**Tabla 4.1.** Magnitudes de los componentes pasivos del sintetizador

Por su parte, el circuito de **control** tiene como objetivo el poder gobernar el estado *on/off* del sintetizador óptico. Para ello, intervienen dos elementos: un pulsador y un receptor IR, que posibilitan conmutar el estado de la fuente óptica tanto *in situ* como de forma remota, respectivamente. El receptor IR, de acuerdo a la conexión lógica ligada, ofrecerá un valor lógico alto como entrada al pin correspondiente del *Arduino* cuando no detecte la señal asociada al control remoto, mientras que un '0' lógico indicará la detección de dicha señal. Por el contrario, la entrada digital referente al pulsador presentará un estado lógico alto cuando se mantenga presionado, permaneciendo a nivel bajo cuando dicho pulsador no se encuentre pulsado, debido a la presencia de la resistencia  $R_L$  de *pull-down*<sup>1</sup>. Estas consideraciones relativas al voltaje de ambas entradas han de tenerse en cuenta para la programación *software* que origine un funcionamiento óptimo del sistema.

El último bloque hace referencia a la **regulación óptica** de los LEDs, siendo, por tanto, el más importante de los tres bloques que conforman el circuito electrónico asociado al sintetizador óptico. Está compuesto por ocho subcircuitos independientes con idéntico conexionado, lo cual posibilita una regulación específica para cada dispositivo LED. Estos subcircuitos son *drivers* o controladores de iluminación LED, que tienen por objetivo estabilizar la corriente que rige el comportamiento eléctrico de cada dispositivo óptico [31]. De esta forma, además de proporcionar protección térmica, adaptan el voltaje de salida a las necesidades de cada LED, manteniendo constante el flujo lumínico (intensidad y color), y limitando las pérdidas de energía en el circuito<sup>2</sup>. Este último factor es un aspecto esencial del *driver*, en tanto en cuanto asegurar un factor de potencia cercano a la unidad incrementa el aprovechamiento eléctrico del circuito, elevando, por tanto, su eficiencia.

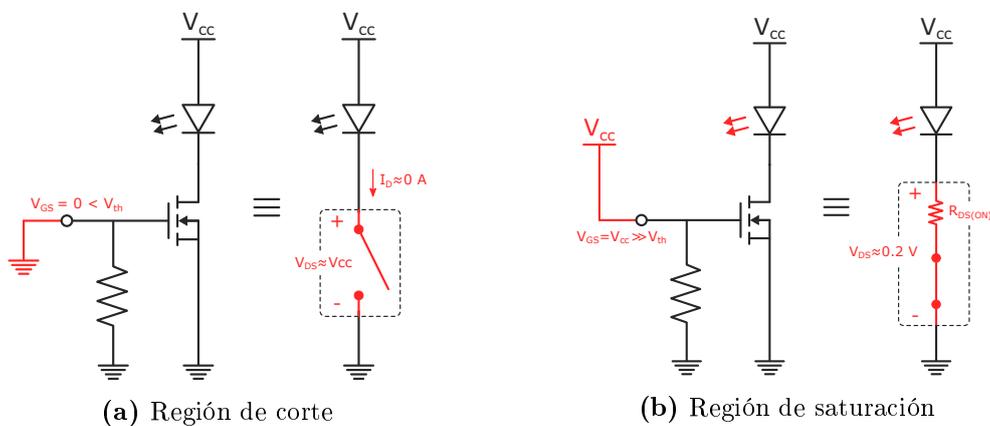
El funcionamiento de cada subcircuito está gobernado por un transistor de efecto campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET) de enriquecimiento, y de canal N. Se basan en la creación de un canal de portadores minoritarios (electrones) entre drenador y fuente, al aplicar una tensión en la puerta. De esta forma se consigue una región con dopado opuesto al que tenía el sustrato originalmente (región de inversión). Al ser un dispositivo controlado por tensión, la velocidad de conmutación que presenta es muy elevada, en torno a 15 ns.

<sup>1</sup>Las resistencias *pull-down* tienen como objetivo evitar dejar una entrada flotante o en alta impedancia que ocasione un estado indeterminado. A través de un conexionado entre GND y la entrada digital, esta se mantendrá al potencial de GND en condiciones normales de operación.

<sup>2</sup>La ausencia de elementos resistivos o inductivos en la polarización de cada subcircuito pretende limitar la disipación de potencia en elementos electrónicos que no sean los propios dispositivos LED.

Un transistor MOSFET puede presentar tres modos de operación: corte, saturación y lineal; en función de las tensiones entre sus terminales. Sin embargo, los NMOS de enriquecimiento que conforman cada *driver* del circuito de regulación trabajarán únicamente en las regiones de corte y saturación, dado su funcionamiento como interruptor de potencia.

- ▷ Región de corte → tiene lugar cuando la tensión entre la puerta y el surtidor es menor que la tensión umbral del transistor ( $V_{GS} < V_{th}$ ). El transistor empleado presenta como tensión umbral  $V_{th} \simeq 1$  V, lo cual implica que, para tensiones de puerta inferiores, el transistor tenga un comportamiento similar a un interruptor abierto (ver *Figura 4.2a*), con una conducción prácticamente nula entre fuente y drenador ( $I_{DSS} \leq 1 \mu\text{A}$ ). De esta forma, ya que el potencial al que se encuentra el cátodo del LED es  $V_{cc}$  voltios, la tensión entre sus terminales es nula. En consecuencia, el LED no emite potencia óptica.
- ▷ Región de saturación → tiene lugar cuando la tensión entre puerta y surtidor es muy superior a la tensión umbral del transistor ( $V_{GS} \gg V_{th}$ ). Idealmente, en la región de saturación, el transistor actuaría como un cortocircuito ( $V_{DS} = 0$  V). No obstante, en la práctica aparece una resistencia de canal  $R_{DS(ON)}$  (ver *Figura 4.2b*), cuyo valor típico según las especificaciones del fabricante es 50 m $\Omega$ . Conforme aumenta  $V_{GS}$ , la resistencia de canal ve reducido su valor, aumentando de esta forma la corriente que circula por el drenador. La tensión drenador-surtidor,  $V_{DS} = I_D \cdot R_{DS(ON)}$ , dada la presencia de la resistencia de canal, suele tomar valores típicos cercanos a los 0.2 voltios. Con el MOSFET operando en saturación, el LED emitirá potencia óptica.

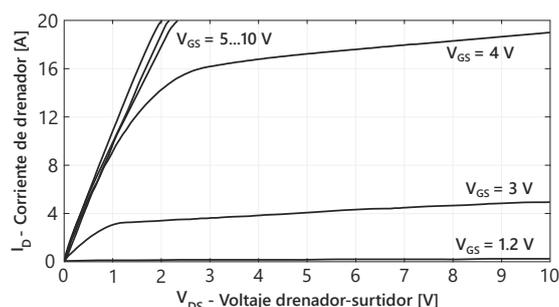


**Figura 4.2.** NMOS como interruptor de potencia

Cabe destacar que, para la regulación de los LEDs y, por tanto, de los transistores asociados a cada *driver*, se emplea una técnica conocida como PWM o modulación por ancho de pulsos, que se describirá exhaustivamente en la Sección 4.2 (*Ajuste en potencia y verificación final*). Como punto previo, se especifica que se emplearán únicamente como tensiones de puerta, 0 o 5 voltios. Consecuentemente, este procedimiento digital en el control conlleva que el MOSFET se comporte típicamente como un interruptor SPST (*Single-Pole Single-Throw*), conmutando periódicamente entre corte ( $\sim$  circuito abierto) y saturación ( $\sim$  cortocircuito) [32].

Según lo descrito, las propiedades que presenta el circuito cuando se sitúa en corte el transistor que regula su funcionamiento son claras:  $I_{LED} \simeq 0 \rightarrow V_{LED} \simeq 0$ ,

garantizando la ausencia de emisión de luz. Ahora bien, en la región de saturación, la corriente que circula por el LED<sup>1</sup> se puede considerar prácticamente constante, viniendo dada por las especificaciones técnicas del fabricante (ver *Figura 4.3*). Como se puede observar, para tensiones de puerta de 5 V, la corriente que circulará por el circuito será realmente elevada (tener presente la disposición en paralelo del conjunto de LEDs), ocasionando un significativo consumo de potencia.



**Figura 4.3.** Característica  $I_D - V_{DS}$  del NMOS empleado

Los dispositivos LED, cuando se encuentren en conducción, presentarán una diferencia de potencial en bornes que, si bien puede variar ligeramente, vendrá determinada por la tensión umbral o de codo a la que haga referencia la característica I-V asociada a cada uno de ellos (ver *Tabla 4.2*). Se puede percibir que las tensiones directas máximas son, para la totalidad de LEDs, inferiores al voltaje que presentarán en su estado de conducción. Sin embargo, esta sobreoperación de los componentes tendrá lugar en periodos temporales ínfimos, no afectando a su integridad.

| LED         | $V_F$ (V) |        |
|-------------|-----------|--------|
|             | Típica    | Máxima |
| L1C1-2780   | 2.75      | 3.5    |
| L1C1-RED    | 2         | 2.5    |
| L1C1-FRD    | 1.73      | 2.3    |
| SMB1N-D660N | 2.3       | 3      |
| SMB1N-680   | 2.3       | 2.5    |
| SMB1N-700   | 2.1       | 2.7    |
| SMB1N-720   | 2.2       | 2.8    |
| SMB1N-760D  | 2         | 2.5    |

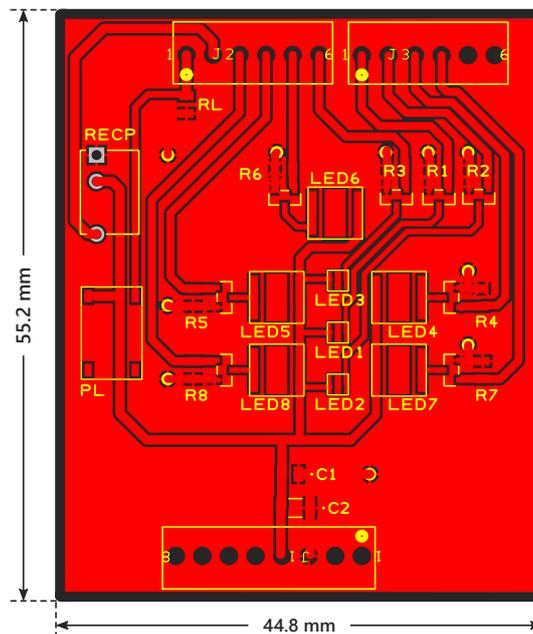
**Tabla 4.2.** Tensión directa típica y máxima de los LEDs empleados

Por último, como punto diferencial, es importante atender a las consecuencias que tendrá la adecuación de las tensiones directas asociadas a cada LED cuando estos se encuentren en conducción. Al situarse en paralelo los diferentes subcircuitos, el conjunto de ellos estará limitado en tensión por la rama que contenga el LED con menor voltaje entre ánodo y cátodo. Este aspecto es fundamental para la consecución de un funcionamiento óptimo del sintetizador, ya que en caso contrario se desvirtuará el control individualizado de cada fuente LED según la técnica de modulación PWM. Aunque se analizará detalladamente en la Sección 4.2, la solución se fundamenta en emplear un control secuencial en *software* para cada LED.

<sup>1</sup>De acuerdo al conexionado lógico que presenta cada *driver*:  $I_{LED} = I_D$ .

## Diseño de PCB

Así pues, se procede al diseño de la PCB relativa al circuito electrónico anteriormente presentado que, en este caso, está caracterizada por la presencia de dos capas conductoras: la superior (ver *Figura 4.4*), donde se situarán la totalidad de componentes, así como el ruteo físico<sup>1</sup> entre los mismos; y la inferior, que comprende un plano de masa que pretende dotar de conectividad a las tensiones de tierra que se encuentren aisladas en el plano superior. Ambas capas (respectivos planos de GND) se conectarán a través de vías.



**Figura 4.4.** Placa de circuito impreso asociada al sintetizador óptico

En este diseño, a diferencia del que presentará el control remoto, es importante atender a las dimensiones de la placa, en tanto en cuanto dicha PCB estará integrada físicamente sobre la plataforma *Arduino Mega 2560* a través de los conectores situados en la parte superior (pines de control y LEDs) e inferior (pines de alimentación), siendo necesario, por tanto, que la disposición de los mismos sobre la placa esté en concordancia con los terminales presentes en *Arduino*.

Asimismo, la colocación de los componentes es un punto esencial, especialmente en los dispositivos LED, de forma que su distribución física favorezca una acoplamiento lumínico óptimo. Para ello se establecerá una disposición simétrica de los mismos, a la vez que se sitúan con la máxima proximidad posible entre ellos. De igual forma, también se precisa que los elementos de control, como son receptor IR y pulsador, se sitúen accesibles a control remoto e individuo, respectivamente.

Por último, cabe destacar que todos los componentes que conforman la placa son de tecnología SMD, con la única excepción del receptor infrarrojo y de los conectores macho que se acoplarán en *Arduino*, que son de orificio pasante.

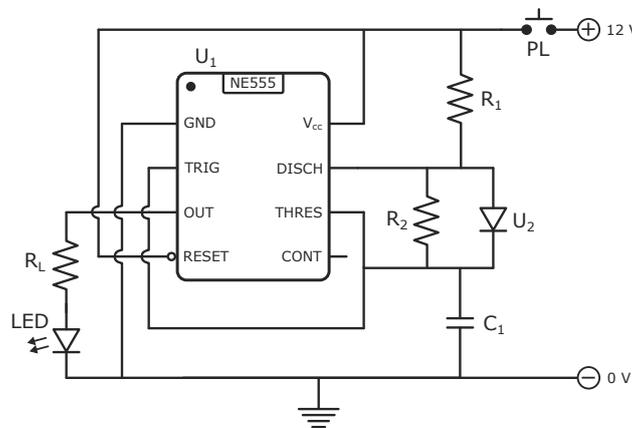
<sup>1</sup>La elevadas corrientes que presentará el circuito hacen recomendable establecer anchuras de pista elevadas, en torno a 0.75 mm, con objeto de limitar los efectos parásitos resistivo e inductivo.

### 4.1.2. Diseño del control remoto

Como punto complementario al desarrollo de la fuente de luz sintética, se ha optado por el diseño y la fabricación de un mando a distancia, con el propósito de controlar remotamente el sintetizador óptico. Si bien la fuente óptica, como se ha detallado anteriormente, incorpora un pulsador que permite administrar su estado *on/off*; la presencia de un elemento electrónico de estas características complementa dicha función con un mayor dinamismo e interactividad, a la vez que dota al sistema de una redundancia que incrementa la fiabilidad y la tolerancia ante posibles fallos.

#### Descripción del circuito electrónico

El control remoto es fundamentalmente un generador de señal de onda cuadrada que emplea un diodo LED de emisión en el infrarrojo cercano (950 nm) para, a una frecuencia determinada (38 kHz), garantizar el sincronismo con el receptor situado en el sintetizador, que es capaz de detectar señales a dicha frecuencia. El diseño del oscilador se fundamenta en un temporizador integrado (*timer*), como es el 555, operando como multivibrador astable, esto es, ofreciendo como salida una onda rectangular (preferiblemente cuadrada) continua a la frecuencia requerida. El circuito electrónico diseñado (ver *Figura 4.5*) se analizará seguidamente.



**Figura 4.5.** Diagrama electrónico del control remoto

En una configuración típica del 555 como multivibrador astable [33], no suele estar presente el diodo que se encuentra en paralelo con  $R_2$ , de forma que  $C_1$  se carga a través de  $R_1$  y  $R_2$ , mientras que se descarga únicamente mediante  $R_2$ . De esta forma se puede prever que a la salida los tiempos en estado *on* y *off* serán diferentes ( $t_{on} \neq t_{off}$ ). Dado que los requerimientos del diseño exigen unos tiempos de carga y descarga idénticos o, en su defecto, muy similares; se ha incluido el diodo de conmutación anteriormente aludido, que posibilita la obtención de una onda cuadrada caracterizada por un ciclo de trabajo próximo al 50 %.

Antes de plantear un análisis exhaustivo del circuito presentado, es importante detallar los componentes que conforman la estructura interna del *timer* NE555, dada la relevancia del mismo en el circuito.

- Comparadores: ofrecen a su salida dos estados perfectamente diferenciados (alto y bajo) en función de las tensiones aplicadas en sus entradas (+ y -), de tal forma que si  $V(+) > V(-)$ , la salida toma un nivel alto, mientras que si  $V(+) < V(-)$ , la salida se sitúa a estado lógico bajo.
- Biestable RS: circuito secuencial asíncrono (sin sincronismo por reloj) que ofrece dos estados permanentes en sus salidas  $Q$  y  $\bar{Q}$ , en función de sus dos entradas de activación  $R$  y  $S$ , así como de su entrada adicional RESET (ver *Tabla 4.3*).

| RESET | $S$ | $R$ | $Q$   | $\bar{Q}$   |
|-------|-----|-----|-------|-------------|
| 0     | -   | -   | 0     | 1           |
| 1     | 0   | 0   | $Q_0$ | $\bar{Q}_0$ |
| 1     | 0   | 1   | 0     | 1           |
| 1     | 1   | 0   | 1     | 0           |
| 1     | 1   | 1   | N.D.  | N.D.        |

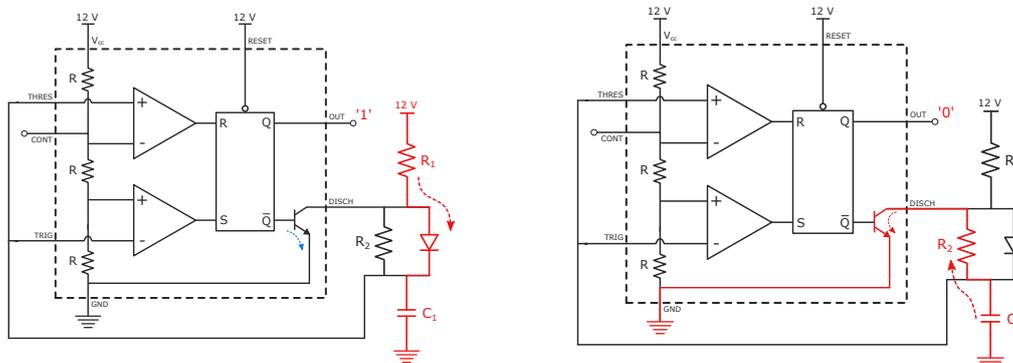
- (1)  $Q_0 \rightarrow$  Estado anterior
- (2) N.D.  $\rightarrow$  Estado no deseado

**Tabla 4.3.** Tabla de funcionamiento del biestable RS

- Descarga: lo constituye un transistor que es gobernado por la salida del biestable y que, como posteriormente veremos, sirve para ofrecer un camino de descarga al condensador que determine la constante RC de temporización.

Las tres resistencias  $R$  internas conectadas entre  $V_{cc}$  y masa, ofrecen valores exactamente iguales (típicamente  $5\text{ k}\Omega$ ), lo que implica que entre sus puntos de unión y masa existan exactamente  $\frac{2}{3}V_{cc}$  y  $\frac{1}{3}V_{cc}$ , respectivamente.

Al estar unidas las entradas *threshold* y *trigger*, ambos puntos se encuentran a idéntica tensión, de forma que, al conectar la alimentación y suponiendo que el condensador  $C_1$  se encuentra inicialmente descargado, ambos terminales se situarán al potencial de masa. El comparador superior ofrecerá una salida baja mientras que el inferior situará su salida a estado lógico alto. Consecuentemente, el biestable realizará un *set*, situando la salida OUT del circuito a un 1 lógico. El transistor de descarga, por su parte, estará en corte, y  $C_1$  se cargará únicamente a través de  $R_1$ , ya que la intensidad circulará a través del diodo (ver *Figura 4.6a*).



(a) Carga de  $C_1$  ( $OUT = '1'$ )

(b) Descarga de  $C_1$  ( $OUT = '0'$ )

**Figura 4.6.** Funcionamiento del NE555 como multivibrador astable

Cuando en extremos de  $C_1$  el voltaje sea  $\frac{1}{3}V_{cc}$ , la entrada  $S$  del biestable pasará a nivel bajo, pero la salida del mismo no conmutará a ese estado lógico hasta que su entrada  $R$  no pase a nivel alto, hecho que tendrá lugar cuando la tensión de  $C_1$  sea superior a  $\frac{2}{3}V_{cc}$ . En ese momento,  $\bar{Q}$ , a nivel alto, situará el transistor de descarga en estado de saturación ofreciendo a  $C_1$  un camino de descarga a través de  $R_2$  (ver *Figura 4.6b*). Inmediatamente, la entrada  $R$  del biestable pasará a nivel bajo, pero no afectará a su salida, por lo que continuará su descarga hasta que la tensión en sus extremos sea  $\frac{1}{3}V_{cc}$ , momento en el que la entrada  $S$  pasará a nivel alto y el biestable conmutará su salida, estando en disposición de iniciar un nuevo ciclo.

Una vez detallado el funcionamiento del circuito, es conveniente caracterizar el mismo desde el punto de vista de la evolución temporal (o frecuencial) de la señal de salida. Teniendo en cuenta que la ecuación de carga de un condensador se puede representar como sigue

$$V(t) = V_f \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

la aplicación de la misma a las condiciones del circuito presentado es la siguiente

$$\begin{aligned} \frac{2}{3}V_{cc} &= V_{cc} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t'_1}{R_1C_1}}\right) \longrightarrow t'_1 = \ln(3) \cdot R_1C_1 \\ \frac{1}{3}V_{cc} &= V_{cc} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t''_1}{R_1C_1}}\right) \longrightarrow t''_1 = (\ln(3) - \ln(2)) \cdot R_1C_1 \\ t_1 &= t'_1 - t''_1 = \ln(2) \cdot R_1C_1 \end{aligned} \quad (4.1)$$

De igual forma, sabiendo que la ecuación de descarga de un condensador es

$$V(t) = V_i \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

y aplicando la misma sobre las condiciones del circuito, obtenemos

$$\frac{1}{3}V_{cc} = \frac{2}{3}V_{cc} \cdot e^{-\frac{t_2}{R_2C_1}} \longrightarrow t_2 = \ln(2) \cdot R_2C_1 \quad (4.2)$$

Se puede deducir, por tanto, la frecuencia de oscilación de la señal de salida a partir de (4.1) y (4.2)

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\ln(2) \cdot C_1 \cdot (R_1 + R_2)} \quad (4.3)$$

Para obtener el ciclo de trabajo (*duty cycle*) de la señal se procede como sigue

$$D_{cycle} = \frac{t_1}{T} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{\ln(2) \cdot C_1 \cdot R_1}{\ln(2) \cdot C_1 \cdot (R_1 + R_2)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4.4)$$

Acorde con las características del receptor, diseñado para detectar señales de 38 kHz, se obtendrán los valores precisos de  $R_1$  y  $R_2$  (siendo  $R_1 = R_2$ , con el fin de generar una onda cuadrada con  $D_{cycle} = 0.5$  de acuerdo a (4.4)) para originar una oscilación a la frecuencia mencionada según (4.3), suponiendo que  $C_1$  presenta una capacidad de 10 nF (ver *Tabla 4.4*).  $R_L$  es una resistencia de polarización cuyo objetivo es limitar la intensidad del diodo LED de emisión IR.

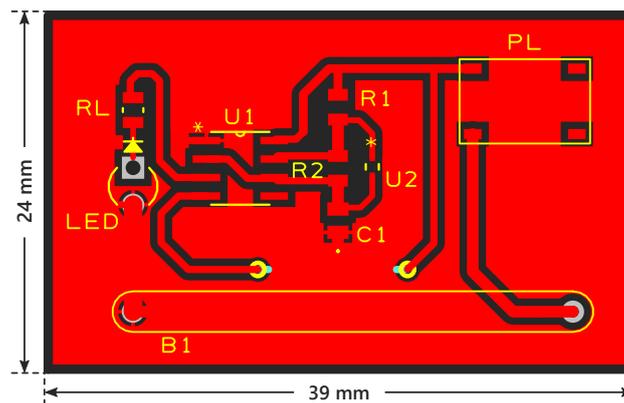
| Componente | Magnitud        |
|------------|-----------------|
| $R_1$      | 1.91 k $\Omega$ |
| $R_2$      | 1.91 k $\Omega$ |
| $R_L$      | 100 $\Omega$    |
| $C_1$      | 10 nF           |

**Tabla 4.4.** Magnitudes de los componentes pasivos del control remoto

## Diseño de PCB

Una vez abordado el diseño esquemático del circuito electrónico relativo al control remoto, es conveniente acometer la edición de la placa de circuito impreso (PCB), la cual estará caracterizada por la disposición física final de los distintos dispositivos que la conforman, tanto electrónicos como fónicos. Para su diseño, al igual que en el caso del sintetizador, se empleará la herramienta *software DesignSpark PCB*, que posibilita la adecuación de componentes, vías y pistas de material conductor, haciendo especial énfasis en la longitud y/o superficie de las mismas, dada la relevancia que presentará el desarrollo físico asociado al diseño.

La placa impresa del control remoto (ver *Figura 4.7*) está caracterizada por una única capa conductora en su posterior fabricación (a diferencia del sintetizador), con las dimensiones indicadas, de forma que la totalidad de componentes y pistas se encuentran sobre un único plano. Empleando el diseño circuital efectuado anteriormente, se realiza el conexionado y ruteo correcto de las distintas pistas, para a continuación aplicar un plano de masa (GND) que permite tener una referencia a tierra distribuida, blindando el resto de pistas y, esencialmente, mejorando la respuesta al ruido del circuito.

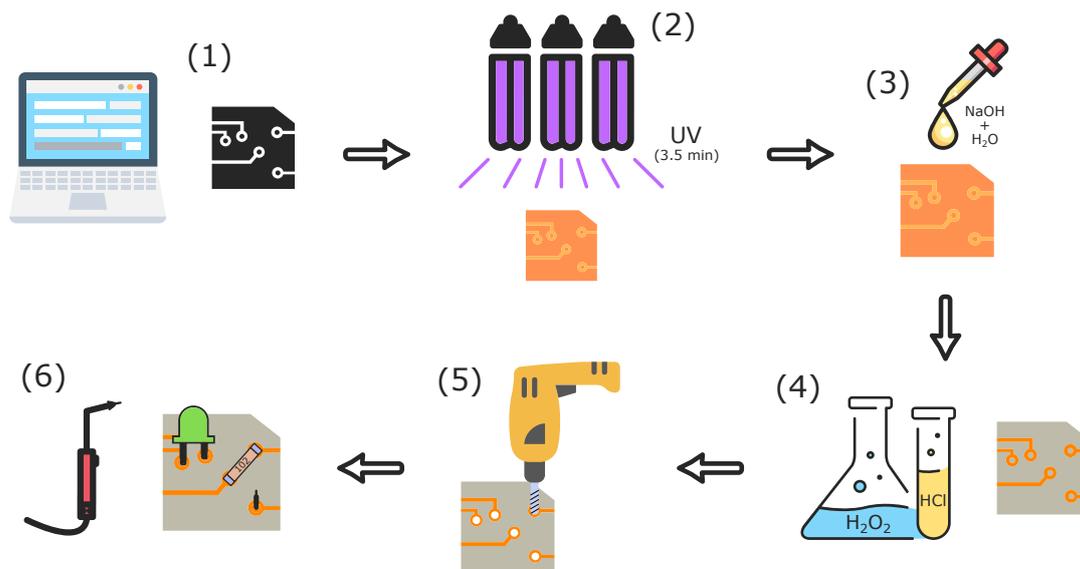


**Figura 4.7.** Placa de circuito impreso asociada al control remoto

Una consideración importante es el encapsulado de los componentes, de acuerdo a su tecnología de construcción. Las resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_L$ , el condensador  $C_1$ , el pulsador  $PL$ , el *timer* 555  $U_1$ , así como el diodo de conmutación 1N4148 referenciado como  $U_2$ , son dispositivos de montaje superficial o SMD; mientras que el LED, y el soporte  $B_1$  donde se encontrará la pila que alimentará el circuito con 12 V, son componentes de orificio pasante o *through hole*.

### 4.1.3. Realización de circuitos impresos

Una vez desarrollados los diseños electrónicos de control remoto y sintetizador, tanto en su forma esquemática como atendiendo a su disposición física como circuito impreso, se procederá a la fabricación de las PCB que caracterizan ambos elementos. Este proceso está dirigido por una serie de etapas que, con mayor o menor concreción, se pueden identificar con el esquema mostrado en la figura adjunta (ver *Figura 4.8*).



**Figura 4.8.** Proceso de fabricación de circuitos impresos

Este conjunto de etapas, las cuales se analizarán exhaustivamente, se pueden asociar como se muestra seguidamente:

- (1) Edición
- (2) Insolación
- (3) Revelado
- (4) Atacado químico
- (5) Taladrado y limpieza
- (6) Soldadura

#### Edición

La edición del circuito impreso es la primera etapa del proceso. Consiste en el diseño, a través de *software* especializado (*DesignSpark PCB*), de la superficie sobre la que se localizarán los componentes, vías o pistas de material conductor, siendo la guía para su posterior adecuación física. Debe abordar una exactitud sustancial en lo referente a las dimensiones de componentes y pistas, tanto en longitud como en superficie, en tanto en cuanto se ha de tener en cuenta que las etapas (5) y (6), así como la posible colocación de la PCB sobre otras plataformas (como *Arduino* en el caso del sintetizador), dependen en gran medida de un diseño óptimo en esta etapa.

La complejidad del diseño está supeditada a la cantidad de componentes que presente el circuito, así como a la dificultad asociada al ruteo<sup>1</sup> de los mismos. Típicamente, dicha complejidad está ligada al número de capas que presente el circuito impreso (entre 1 y 16), las cuales pueden conectarse mediante orificios denominados vías.

Esta etapa ya se ha desarrollado en los dos puntos inmediatamente precedentes del trabajo. Los circuitos impresos diseñados de control remoto y sintetizador presentan 1 y 2 capas, respectivamente.

## Insolación

Antes de continuar con la descripción de las distintas etapas, es conveniente clarificar la constitución de los materiales que se emplearán para la creación de circuitos impresos, con objeto de analizar la evolución que sufren los mismos a lo largo del proceso, dada la presencia de reacciones químicas en los materiales. Dichos materiales son los siguientes:

- **Fotolito** → soporte transparente sobre el que se aplica una capa opaca con la forma del diseño de PCB. La imagen del diseño ha de estar invertida a fin de que la capa opaca esté en contacto con la placa fotosensible<sup>2</sup>.
- **Placa fotosensible** → compuesta por 3 capas:
  - ◇ Capa base → material denominado FR-4 (*Flame Retardant 4*), compuesto por fibra de vidrio junto con una resina epoxi termoestable.
  - ◇ Capa de cobre → capa fina de cobre colocada por electrólisis sobre la que se crearán las pistas del circuito impreso.
  - ◇ Capa fotosensible → esmalte fotosensible que cambia sus características químicas al contacto con la luz ultravioleta.

Detallados los materiales que actúan en el proceso de fabricación, se centrará la atención en la presente etapa. La insolación está basada en la exposición de la capa fotosensible de la placa a luz ultravioleta, con la excepción de las partes de la PCB que se deseen proteger, esto es, la parte opaca del fotolito, que se colocará contra la capa fotosensible durante la insolación.

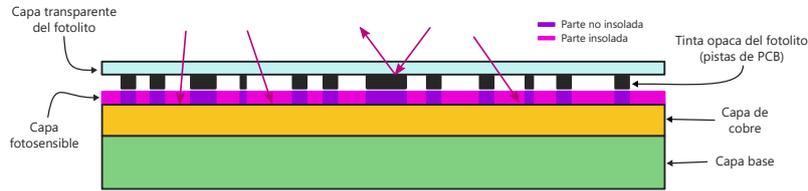
La luz más adecuada es aquella que tenga un mayor contenido espectral en las regiones UV-A (315 – 400 nm) y UV-B (280 – 315 nm), siendo necesario un menor tiempo de insolación (las PCBs diseñadas requieren un tiempo de insolación aproximado de 3 minutos y medio). Los haces de luz que inciden sobre la capa fotosensible (parte transparente del fotolito) provocan una reacción química en la zona, haciéndola sensible al líquido revelador, que la disolverá.

---

<sup>1</sup>Establecimiento de pistas conductoras, sobre el sustrato, para la conexión de dispositivos electrónicos y fotónicos.

<sup>2</sup>De esta forma se consigue limitar el efecto de refracción en la etapa de insolación, y con ello, defectos en la fabricación.

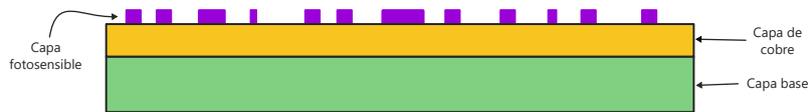
A continuación se puede observar esquemáticamente el estado de la placa fotosensible tras el proceso de insolación (ver *Figura 4.9*).



**Figura 4.9.** Placa fotosensible tras el proceso de insolación

## Revelado

Durante esta etapa, se hace reaccionar la parte de la capa fotosensible que fue insolada, eliminando de la misma la parte que reaccionó previamente con la luz UV (no cubierta por el fotolito), dejando al descubierto la capa de cobre (ver *Figura 4.10*). Para ello se emplea un líquido revelador, constituido por una disolución diluida de sosa cáustica (NaOH) y agua (H<sub>2</sub>O) con una concentración aproximada de  $\frac{7 \text{ gr NaOH}}{1000 \text{ gr H}_2\text{O}}$ .

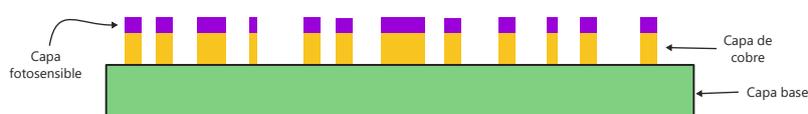


**Figura 4.10.** Placa fotosensible tras el proceso de revelado

## Atacado químico

El ataque químico consiste en la eliminación del cobre que ha quedado expuesto tras el revelado, mediante la utilización de un producto ácido. Dado que la capa fotosensible es resistente al ácido, únicamente será atacada la parte inicialmente insolada con luz UV, esto es, la capa transparente del fotolito (ver *Figura 4.11*). El producto ácido empleado es un atacador rápido líquido con la siguiente composición:

- ▷ 200 ml de HCl al 35 % (Ácido clorhídrico)
- ▷ 30 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 20 % (Agua oxigenada)
- ▷ 770 ml de H<sub>2</sub>O



**Figura 4.11.** Placa fotosensible tras el proceso de atacado químico

## Taladrado y limpieza

Tras la fase de atacado químico, el ruteo del circuito impreso se puede considerar completo, siendo necesario exclusivamente realizar una limpieza de la placa, mediante cualquier líquido disolvente, con objeto de eliminar la capa fotosensible restante que se encuentra situada en la zona no expuesta inicialmente a la luz ultravioleta. Tras ello, se procede al taladrado de las zonas requeridas de la placa (ver *Figura 4.12*), ya sea para la posterior colocación en una plataforma auxiliar (1 mm), para la adecuación de componentes de tipo *Through Hole Technology* (0.8 mm) o para la conexión de distintas capas a través de vías (0.5 mm).



**Figura 4.12.** Placa fotosensible tras el proceso de taladrado y limpieza

## Soldadura

Finalmente, como última etapa del proceso de fabricación, únicamente resta efectuar la soldadura de los distintos componentes que conforman tanto el control remoto como, fundamentalmente, el sintetizador de luz. Para integrar los dispositivos se hará uso de una resina conocida como *flux*, la cual, aplicada sobre las pistas de cobre sobre las que se desea realizar la soldadura, permite disolver y eliminar los óxidos que puedan formarse, así como favorecer la distribución del estaño por la pista. Una vez incluidos todos los elementos en la placa, es conveniente eliminar los posibles restos de *flux*, dando por finalizado el proceso de fabricación de una PCB.

## 4.2. Ajuste en potencia y verificación final

Dispuestas físicamente las placas de circuito impreso definitivas correspondientes al control remoto y al sintetizador, se ha de regular electrónicamente el funcionamiento de esta última asignando a cada uno de los seis LEDs<sup>1</sup> que la componen el peso específico individualizado que se deriva de la respuesta espectral detallada en la síntesis correspondiente al Capítulo 3. Mediante estos factores de escalado, cada LED emitirá la potencia óptica adecuada, obteniendo de esta forma una fuente óptica de luz sintética que simulará las condiciones lumínicas de cuevas prehistóricas.

Una vez implementado el sintetizador adaptado a los requisitos del proyecto, se finalizará el trabajo verificando que la característica espectral de la luz sintética emitida se corresponde con la que se pretendía obtener, esto es, con la respuesta espectral obtenida teóricamente en el proceso de síntesis y, en definitiva, con la respuesta proporcionada por las lámparas de tuétano originales.

<sup>1</sup>La no disponibilidad en *stock* de los LEDs #7 y #8, con  $\lambda$ 's de pico de 720 y 760 nm respectivamente, imposibilita la adecuación espectral exacta en la parte alta del rango visible.

### 4.2.1. Regulación de los LEDs

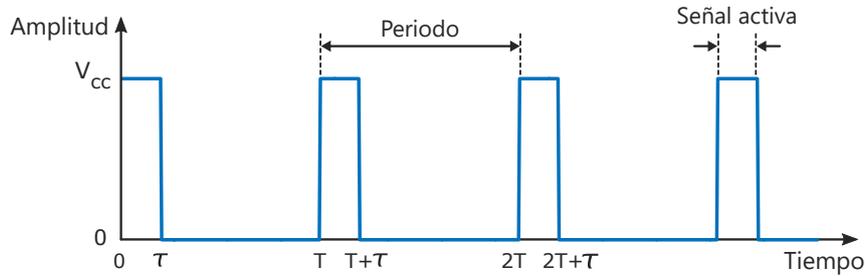
El sintetizador ha de presentar una potencia óptica de salida que se adecúe con la representativa de la fuente de luz original, y esto se consigue con el funcionamiento conjunto de todos los LEDs de acuerdo a una polarización individualizada que represente el factor de escala que rige la potencia a emitir por cada fuente LED. Para llevar a cabo dicha polarización se empleará la técnica conocida como modulación por ancho de pulsos o PWM, a través de la cual se regulará de forma específica la tensión de puerta de los transistores MOSFET que controlan cada LED.

#### Modulación por ancho de pulsos (PWM)

*Arduino Mega* permite modular la potencia en la salida mediante la técnica PWM (*Pulse Width Modulation*), empleando para ello pines digitales<sup>1</sup>. Es importante incidir en el hecho de que una salida PWM es digital, y no analógica. La modulación por ancho de pulsos es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal (ver *Figura 4.13*), esto es, se varía la proporción del tiempo que está activa la señal respecto al periodo, relación conocida como ciclo de trabajo o *duty cycle* [34].

$$D_{cycle} = \frac{\tau}{T}$$

siendo  $\tau$  el tiempo en que la señal está activa,  $T$  el periodo de la señal, y  $D_{cycle}$  el ciclo de trabajo (*duty cycle*).



**Figura 4.13.** Modulación PWM

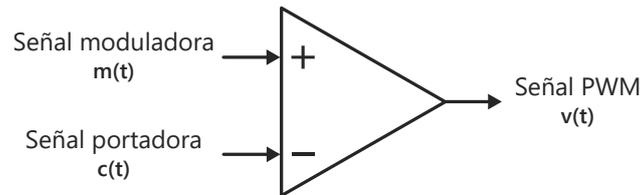
De esta forma, a través de la modulación de la potencia de salida, es posible simular una señal analógica, cuyo valor se corresponde con el promedio de la tensión de salida, el cual, considerando tecnología TTL<sup>2</sup> (tecnología empleada en *Arduino Mega*), es el que se muestra a continuación:

$$v_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} V_{cc} \cdot dt = \frac{V_{cc}}{T} \int_0^{\tau} dt = V_{cc} \cdot \frac{\tau}{T} = V_{cc} \cdot D_{cycle} \quad (4.5)$$

<sup>1</sup> *Arduino Due* implementa, adicionalmente a PWM, dos salidas analógicas discretizadas a través de conversores digital-analógico (DAC).

<sup>2</sup> '0'  $\mapsto$  0 voltios, '1'  $\mapsto$   $V_{cc}$  voltios con  $V_{cc} = 5$  voltios típicamente.

Sin embargo, los microcontroladores no son capaces de generar un conjunto infinito de valores de tensión. *Arduino Mega* implementa por *hardware* salidas PWM de 8 bits, lo cual permite originar  $2^8$  posibles señales de diferente valor promedio, estando este comprendido entre 0 y  $V_{cc}$  voltios. Extrapolando este hecho al valor medio de una señal PWM obtenido en (4.5), se deduce que *Arduino Mega* permite generar 256 valores de *duty cycle*.



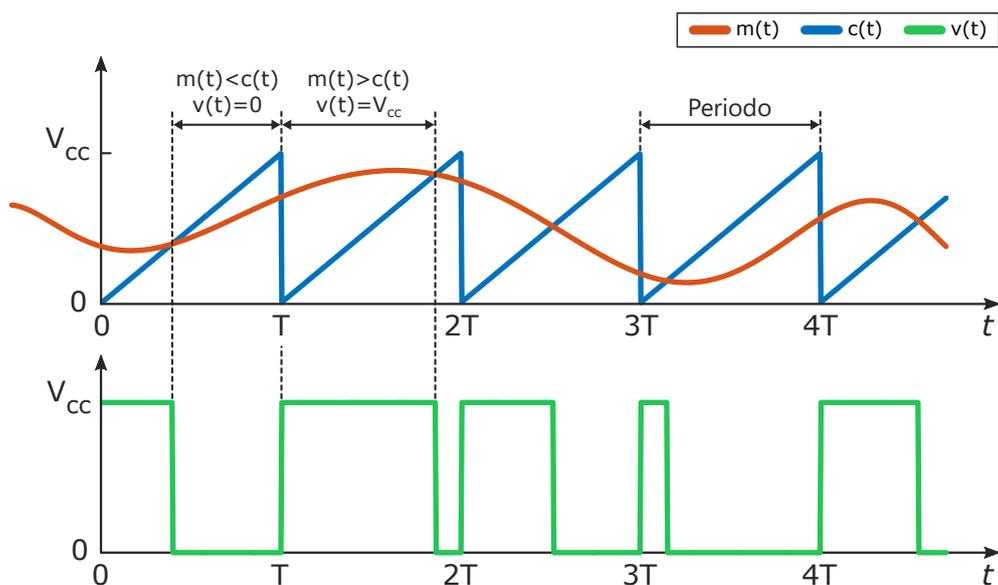
**Figura 4.14.** Comparador PWM

Los circuitos electrónicos para la obtención de una señal modulada por ancho de pulsos se implementan generalmente mediante un comparador de dos entradas y una salida (ver *Figura 4.14*) [35]. Las entradas se corresponden con la señal moduladora  $m(t)$ , aquella que contiene la información útil; y la señal portadora  $c(t)$ , onda periódica tomada como referencia en la modulación. La señal de salida  $v(t)$  constituye la señal digital modulada, con las siguientes características:

▷ **Ciclo de trabajo** → determinado por la señal moduladora (ver *Figura 4.15*):

$$m(t) > c(t) \Rightarrow v(t) = V_{cc}$$

$$m(t) < c(t) \Rightarrow v(t) = 0$$



**Figura 4.15.** Diagrama temporal de señales  $m(t)$ ,  $c(t)$  y  $v(t)$

- ▷ **Frecuencia** → se corresponde con la frecuencia de la señal portadora ( $f_v = f_c$ ), que depende del oscilador del sistema, un temporizador, y del registro de pre-escalado asociado a él. *Arduino Mega* dispone de 6 temporizadores, con diferentes valores de pre-escalado, que generan la frecuencia de cada una de las 15 salidas *hardware* PWM que contiene el microcontrolador (1 temporizador da servicio a 2 o 3 salidas). La asociación correspondiente se muestra a continuación (ver *Tabla 4.5*).

| Temporizador  | Modo PWM             | Pre-escalados                 | Salidas    |
|---------------|----------------------|-------------------------------|------------|
| <i>Timer0</i> | <i>Fast</i>          | 1, 8, 64, 256 ó 1024          | 4, 13      |
| <i>Timer1</i> | <i>Phase Correct</i> | 1, 8, 64, 256 ó 1024          | 11, 12     |
| <i>Timer2</i> | <i>Phase Correct</i> | 1, 8, 32, 64, 128, 256 ó 1024 | 9, 10      |
| <i>Timer3</i> | <i>Phase Correct</i> | 1, 8, 64, 256 ó 1024          | 2, 3, 5    |
| <i>Timer4</i> | <i>Phase Correct</i> | 1, 8, 64, 256 ó 1024          | 6, 7, 8    |
| <i>Timer5</i> | <i>Phase Correct</i> | 1, 8, 64, 256 ó 1024          | 44, 45, 46 |

**Tabla 4.5.** Asociación entre *timer*, modo PWM, factores de pre-escalado y salidas

Se ha añadido un concepto nuevo, como es el referente al modo de modulación [34, 35]. Los temporizadores de *Arduino Mega* están implementados mediante contadores de 8 bits<sup>1</sup>, que son los que determinan la frecuencia de la señal de salida. En el modo *Fast PWM* el temporizador cuenta hasta alcanzar el valor 255 y luego desborda retornando a 0 (analogía con onda diente de sierra) (ver *Figura 4.16a*), exponiendo un periodo de 256 ciclos de reloj. En el modo *Phase Correct PWM* el temporizador alcanza el valor 255 pero no desborda, cambia de dirección y decrece el contador hasta 0 (analogía con onda triangular) (ver *Figura 4.16b*), mostrando un periodo de 510 ciclos de reloj. Conforme a lo descrito, las máximas frecuencias<sup>1</sup> de la señal PWM en ambos modos serían:

$$f_{fast} = \frac{f_{osc}}{\#estados} = \frac{16 \text{ MHz}}{256} = 62.5 \text{ kHz}$$

$$f_{phase-correct} = \frac{f_{osc}}{\#estados} = \frac{16 \text{ MHz}}{510} \approx 31.37 \text{ kHz}$$



**Figura 4.16.** Modos PWM: *Fast* y *Phase Correct*

Los valores de pre-escalado se encuentran almacenados en los 3 bits menos significativos del registro de cada temporizador: [CSi2, CSi1, CSi0] con *i* el número del *timer*. Las combinaciones de valores de estos 3 bits originan los distintos valores de pre-escala (ver *Tabla 4.6*).

<sup>1</sup>Los *timers* 1, 3, 4 y 5 permiten una resolución de 16 bits, por lo que se podrían variar las frecuencias por defecto. Sin embargo, las librerías de *Arduino* solo permiten 8 bits de resolución, siendo suficiente para el cometido del proyecto.

| CSi2 & CSi1 & CSi0 | Factores de pre-escala |         |
|--------------------|------------------------|---------|
|                    | Timers 0,1,3,4,5       | Timer 2 |
| 001                | 1                      | 1       |
| 010                | 8                      | 8       |
| 011                | 64                     | 32      |
| 100                | 256                    | 64      |
| 101                | 1024                   | 128     |
| 110                | —                      | 256     |
| 111                | —                      | 1024    |

**Tabla 4.6.** Factores de pre-escalado correspondientes a cada *timer*

Según esto, la frecuencia de la señal portadora, y por tanto, la frecuencia de la señal modulada PWM<sup>1</sup> utilizando una salida  $j$  correspondiente al temporizador  $i$  sería:

$$f_j = \frac{f_{osc}}{\#estados|_i \cdot C_{esc}} \quad \text{con} \quad C_{esc} = \text{coeficiente de pre-escala}$$

Aunque la salida únicamente está activa durante un porcentaje del tiempo del periodo de la señal, es suficiente para emular una señal analógica en gran variedad de aplicaciones, como es el caso de la iluminación con fuentes LED. Dicho LED se activa y se desactiva un gran número de veces por segundo; sin embargo, la frecuencia de conmutación es tan elevada que el ojo no es capaz de apreciarlo. Como consecuencia, la sensación percibida es una menor luminosidad del LED.

### Ajuste electrónico de potencia

Llegados a este punto, únicamente resta regular la intensidad de polarización de cada diodo LED para finalizar la implementación física del sintetizador. Con el fin de disponer electrónicamente la corriente adecuada a cada dispositivo óptico individual, se empleará la técnica PWM desarrollada en la presente sección. Seguidamente se detallan algunas consideraciones al respecto [36], las cuales se han de tener en consideración a la hora de realizar la regulación óptica del sintetizador.

Como se indicó anteriormente, la disposición en paralelo de los *drivers* asociados a cada fuente LED conlleva un aspecto que se ha de tener en cuenta para disponer una fuente de luz sintética adaptable a las condiciones lumínicas requeridas. Dicho aspecto, de vital importancia, alude al voltaje que presentarán los LEDs cuando se activen simultáneamente, el cual será idéntico para todos ellos, viniendo proporcionado por aquel que presente una menor tensión entre sus terminales, ya que los transistores NMOS empleados son idénticos. Así pues, una activación concurrente ocasionaría una regulación errónea del sintetizador, al no disponer de independencia en el control específico de cada LED. En consecuencia, se deduce que la solución que garantiza una regulación independiente está basada en una activación secuencial de las señales PWM asociadas a cada LED (ver *Figura 4.17*).

<sup>1</sup>Por defecto, el factor de pre-escalado es 64, por lo que las frecuencias por defecto son 976.56 Hz para el *Timer0* y 490.2 Hz para el resto.

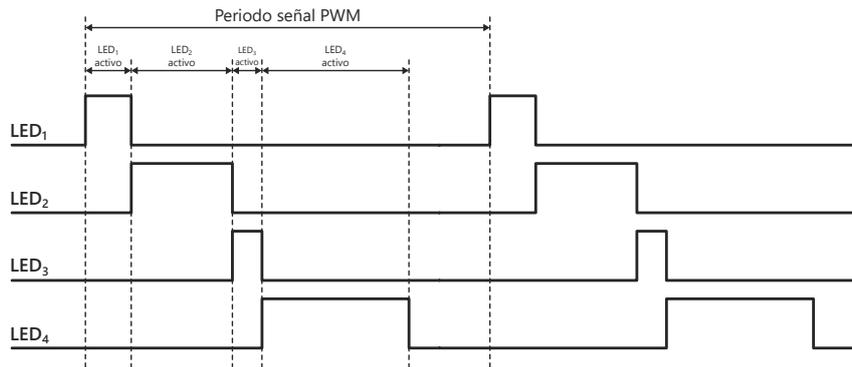


Figura 4.17. Control secuencial de las señales PWM asociadas a cada LED

El objetivo perseguido es que en cada instante temporal únicamente un LED emita potencia óptica, evitando que el resto de ramas limiten la tensión de control del elemento en cuestión. Asimismo, al estar el resto de ramas en cortocircuito, debido al estado de corte en que se encuentra el transistor que regula su funcionamiento, los requerimientos de intensidad se ven claramente reducidos, y por extensión, también disminuye la demanda de potencia a la fuente de alimentación. La regulación secuencial de las señales PWM se realizará por programación *software*, mediante el control alternativo del desplazamiento de fase (*phase shift*) asociado a los *timers* que regulan el funcionamiento de cada salida PWM [34].

Cabe destacar que, siempre que los temporizadores asociados a las salidas PWM oscilen a la misma frecuencia, los seis LEDs han de activarse secuencialmente dentro del periodo asociado a los *timers*, es decir, la suma de los tiempos activos de cada LED debe estar por debajo del periodo que establecen los temporizadores<sup>1</sup>.

Con objeto de facilitar la comprensión y dotar de validez a lo recién expuesto, se establecerá una única frecuencia de operación para los *timers* asociados a las salidas PWM que regulan los LEDs, siendo estos:

- *timer3* → Pin 5 (SMB1N D660N).
- *timer4* → Pin 6 (L1C1 RED), Pin 7 (L1C1 2780) y Pin 8 (L1C1 FRD).
- *timer2* → Pin 9 (SMB1N 700) y Pin 10 (SMB1N 680).

Dicha frecuencia se fijará a 122.55 Hz, o lo que es lo mismo, un coeficiente de pre-escala de 256 para el modo *phase correct* que emplean los temporizadores en cuestión (periodo de 510 estados). Dicho factor de pre-escala se obtiene almacenando en los 3 bits menos significativos del registro de cada *timer* los siguientes valores:

- *timer3* → [CS32, CS31, CS30] = 100
- *timer4* → [CS42, CS41, CS40] = 100
- *timer2* → [CS22, CS21, CS20] = 110

<sup>1</sup>En caso de no cumplir dicha condición necesaria, es posible aumentar la tensión de alimentación del circuito, reduciéndose de esta forma los valores de *duty cycle* requeridos.

En base a los coeficientes de los espectros sintetizados, se aportan los valores individuales de *duty cycle* que, de forma experimental para el conjunto de LEDs, posibilitan la obtención de la polarización correcta para una óptima iluminación y adecuación espectral (ver *Tabla 4.7*).

| #                  | 1         | 2        | 3        | 4           | 5         | 6         |
|--------------------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|
| Ref.               | L1C1-2780 | L1C1-RED | L1C1-FRD | SMB1N-D660N | SMB1N-680 | SMB1N-700 |
| <i>Duty</i> (%)    | 12.2 %    | 4.3 %    | 8.2 %    | 6.7 %       | 25.1 %    | 35.3 %    |
| <i>Duty</i> (cont) | (31)      | (11)     | (21)     | (17)        | (64)      | (90)      |

**Tabla 4.7.** Valores de *duty cycle* para la regulación óptica de los LEDs

Finalmente, se muestra a continuación el pseudocódigo funcional básico del *software* que, sobre la plataforma *Arduino*, realiza tanto la regulación óptica del sintetizador, como el control del estado *on/off* del mismo.

---

### Programa 1 Arduino-Sintetizador

---

```
//Declaración de puertos (correspondencia con pines Arduino)
#define LED_WHITE 7
...
#define RECP 12
#define PULS 13

//Variable estado sintetizador ('0' -> OFF; '1' -> ON)
unsigned char state = 0;

void setup(){
  //Declaraciones de puertos (OUTPUT o INPUT)
  pinMode(LED_WHITE, OUTPUT);
  ...
  pinMode(PULS, INPUT);
  pinMode(RECP, INPUT);

  //Inicialización de LEDs a '0'
  digitalWrite(LED_WHITE, LOW);
  ...

  //Cambiar frecuencia de timer2, timer3 y timer4 a 122.55 Hz
  TCCR2B = (TCCR2B & 0xF8) | 0x06;
  TCCR3B = (TCCR3B & 0xF8) | 0x04;
  ...
}

void loop(){
  //Determinar cambios de estado (en receptor o pulsador)
  if(digitalRead(RECP) == LOW || digitalRead(PULS) == HIGH){
    state = 1 - state;
  }

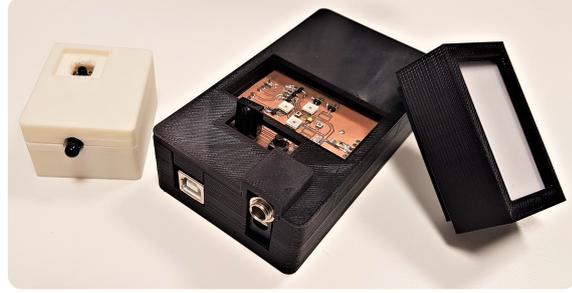
  if(state == 1){ //LEDs activos con PWM
    analogWrite(LED_WHITE, 26);
    ...
  } else { //LEDs desactivados
    digitalWrite(LED_WHITE, LOW);
    ...
  }
}
```

---

### 4.2.2. Verificación espectral del sintetizador

En este punto del trabajo, la fuente de luz sintética ya ha sido físicamente implementada, con la regulación óptica pertinente. Esto garantiza una óptima adecuación espectral con la lámpara de tuétano, fuente de luz original; a la vez que limita en la medida de lo posible los potenciales riesgos fotobiológicos asociados a la emisión de radiación óptica, así como los daños que dicha radiación ocasiona sobre las pinturas rupestres, favoreciendo de esta forma su conservación.

Con objeto de fomentar la combinación lumínica de los diferentes LEDs, se dispondrá un difusor de luz por encima del sintetizador (ver *Figura 4.18*), situándose a una altura ( $\sim 3.5$  cm) tal que el propio acoplamiento de la radiación emitida por cada fuente LED sea realmente significativo antes de alcanzar el difusor. Razón por la cual, una vez la luz atraviesa dicho difusor, la uniformidad lumínica obtenida es realmente apreciable, hecho que acrecenta la calidad cromática percibida por el ser humano, puesto que observa únicamente un color. Por consiguiente, el sintetizador es percibido como una fuente de luz en sí, y no como un conjunto de dispositivos ópticos individuales.



**Figura 4.18.** Control remoto y sintetizador

Asimismo, se introduce como característica de valor añadido la simulación del movimiento de la llama de las lámparas de tuétano, generalmente asociado a la crepitación de la misma. Si bien esta singularidad se puede obtener a partir de movimientos físicos controlados de la placa de LEDs, variaciones de potencia efímeras en la emisión óptica posibilitan simular la oscilación o *flickering* de la llama de forma relativamente correcta. Con objeto de no alterar la forma espectral significativamente, únicamente serán los LEDs correspondientes al blanco (L1C1-2780) y al rojo lejano (L1C1-FRD) los que presentarán una emisión óptica dinámica, al ser aquellos que presentan una mayor anchura espectral y, por tanto, originan una mayor percepción de alteración lumínica con mínimas modificaciones en su regulación óptica.

Ambos LEDs presentarán una variación en torno a su ajuste óptimo de potencia de  $\pm 10$  niveles de *duty cycle* de acuerdo a la modulación PWM de 8 bits que presenta *Arduino Mega*. Esto se traduce en una modificación de  $\pm 3.9\%$  respecto a la potencia óptima de emisión de los LEDs, la cual se realizará siguiendo una distribución de probabilidad uniforme (discreta) en dicho rango. La característica espectral definitiva de la fuente óptica se encuentra definida en (4.6), la cual presenta un comportamiento final ligeramente dinámico<sup>1</sup> (ver *Figura 4.19*).

$$g(\lambda, t) = X_1(t) \cdot g_1(\lambda) + X_3(t) \cdot g_3(\lambda) + \sum_{i=\{2,4,5,6,7,8\}} x_i \cdot g_i(\lambda), \quad \forall \lambda(\text{nm}) \in [470 \dots 760] \quad (4.6)$$

<sup>1</sup>El reajuste de potencia para cada LED (blanco y rojo lejano) se realiza cada  $\sim 600$  ms.

donde  $g(\lambda)$  y  $g_i(\lambda)$  representan el espectro real de la fuente óptica implementada, y el espectro correspondiente al LED  $i$  del sintetizador, respectivamente. Por otro lado,  $x_i$  representa el coeficiente de escalado que se ha de aplicar al LED  $i$  para simular de manera correcta la fuente óptica. Finalmente,  $X_1(t)$  y  $X_3(t)$  hacen referencia a las secuencias estocásticas (sucesos y espacio de tiempos discretos) que rigen de forma independiente la regulación de dichos LEDs, esto es, la evolución de la variable aleatoria uniforme discreta definida en (4.7) a lo largo del tiempo.

$$f_{X_i}(x) = \sum_{j=-10}^{10} p \cdot \delta\left(x - \eta - \frac{j}{255}\right), \quad \forall i = \{1, 3\}, \quad p = \frac{1}{21}, \quad \eta = \text{valor}_{\text{óptimo}} \quad (4.7)$$

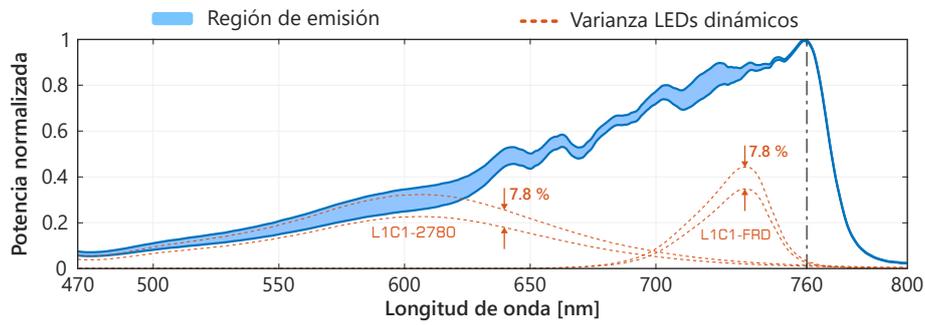


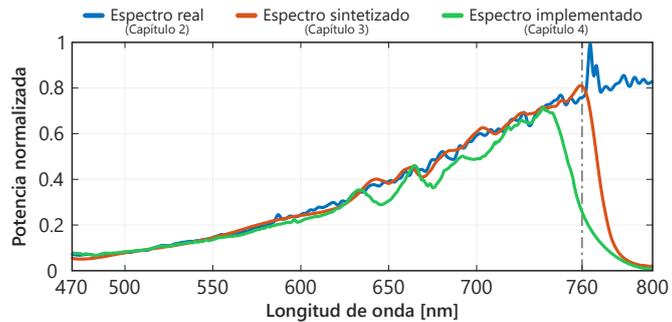
Figura 4.19. Disposición dinámica en la emisión de luz (*flickering*)

Por último, únicamente resta conocer el espectro en régimen estático asociado a la fuente óptica implementada y verificar su correcta adecuación con el espectro sintetizado en el Capítulo 3, representativo de la respuesta espectral original, obtenida en el Capítulo 2. Realizando medidas con el espectrómetro HR2000CG UV-NIR sobre el sintetizador, y discriminando la contribución que agregan los elementos de medida, se puede obtener la característica espectral propia del sintetizador elaborado.

Confrontando dicho espectro con los mencionados (ver Figura 4.20), es posible determinar que la adecuación espectral es excelente en la parte baja del espectro visible ( $< 600$  nm), rango sintetizado por el LED blanco. Por otra parte, si bien la ausencia del LED con  $\lambda_{\text{pico}} = 760$  nm limita la síntesis en el límite con el infrarrojo cercano, se puede considerar igualmente que la adecuación del espectro final con el original es realmente rigurosa en el rango óptico de los tonos rojos ( $> 600$  nm).



(a) Emisión de luz



(b) Caracterización espectral de la fuente implementada

Figura 4.20. Verificación espectral del sintetizador óptico

## Conclusiones y líneas futuras

Como se ha visto a lo largo del documento, los resultados obtenidos se han determinado a partir de unos requerimientos iniciales concretos, fundamentalmente basados en la reproducción de la iluminación existente en cuevas prehistóricas, siendo este el contexto dentro del cual se enmarca el proyecto. Conforme a lo descrito, se ha comenzado situando la temática, haciendo especial énfasis, evidentemente, en la metodología de iluminación empleada primitivamente. Con el propósito de examinar las propiedades específicas de las lámparas utilizadas por los grupos humanos, se han caracterizado espectralmente las mismas, mostrando una acentuada relevancia en las componentes espectrales más altas del rango visible (tonos rojos), así como en el IR cercano. De igual forma, cabe destacar su exigua aportación en la zona correspondiente al ultravioleta, razón por la cual se infiere la escasa importancia del efecto fotoquímico en los pigmentos presentes en paredes rocosas y, por tanto, la mejor conservación que estos han presentado hasta la actualidad.

Seguidamente, se han seleccionado los LEDs óptimos de esta aplicación para, posteriormente, modelar matemáticamente el problema, con objeto de poder aplicarlo a un algoritmo de optimización que maximice la similitud con el espectro original. La síntesis espectral que otorga dicho método iterativo posibilita la aplicación de los coeficientes de escala sobre los LEDs implementados físicamente de manera conjunta sobre una placa de circuito impreso. La combinación óptica de los mismos genera como resultado el espectro original, o en su defecto, una respuesta relativamente similar. Se ha podido comprobar como, considerando únicamente la fuente en régimen estático, la adecuación espectral con la respuesta original presenta una exactitud notoria. Asimismo, la introducción de dinamismo en la emisión y la limitación de radiación óptica en los rangos IR y UV son características que, si bien no eran especificaciones de partida, permiten dotar al sistema de un mayor realismo, al mismo tiempo que limita posibles riesgos derivados de la exposición a la luz tanto sobre órganos biológicos como sobre las pinturas rupestres.

### 5.1. Líneas de trabajo futuras

A través de la realización del proyecto recogido en la presente memoria, pueden surgir diversas líneas de trabajo en el futuro, bien sea para una continuación y

mejora de los resultados aquí reportados, o para abrir líneas de investigación en temáticas de diferente índole. A pesar de que se seguirá una línea continuista, no sería oportuno pasar por alto algunas de las aplicaciones en las que el control de las condiciones de iluminación se presenta como un aspecto de enorme trascendencia.

La capacidad de sintetizar luz artificial con un total control sobre la distribución energética a lo largo del espectro electromagnético (con especial énfasis en el visible), permite adecuar respuestas espectrales distintivas de diversas aplicaciones, como pueden ser simular la característica espectral del sol con objeto de maximizar la eficiencia de células fotovoltaicas, componer el espectro de absorción fotosintético favoreciendo así el crecimiento y desarrollo de plantas (PAR, *Photosynthetically Active Radiation*) [37], o simplemente confeccionar una fuente blanca ideal, con las ventajas que ello conlleva. Todavía cabe señalar la mejora en el rendimiento que presentan sistemas de reconocimiento de imagen o imagen hiper-espectral [38,39], al disponer de métodos que permitan una caracterización óptima de las condiciones lumínicas. De esta forma, los procesos de captura de imagen, síntesis y post-procesado ven aumentada su eficiencia de manera notable.

Seguidamente, se procederá a detallar algunas mejoras derivadas del proyecto desarrollado, con la intención de continuar la línea y temática relativas a la iluminación de cuevas prehistóricas. Si bien se ha logrado culminar una fuente óptica con las características pretendidas, el sistema aún permite perfeccionar determinados aspectos. Algunas de las metodologías que derivan en una mejora de los resultados cosechados son las que se indican a continuación.

En referencia a la propia implementación, parece más interesante operar con lámparas de marcado despliegue comercial, con 3 o 4 LEDs incorporados típicamente, de tal forma que, aunque no sea posible sintetizar la respuesta espectral asociada a las lámparas de tuétano de forma tan rigurosa como en este proyecto, en el que los LEDs han sido elegidos para tal propósito, sí que permite disponer de unas fuentes más funcionales, con un control significativamente más sencillo, un coste de implementación bastante reducido, y un acoplamiento óptico prácticamente perfecto como consecuencia de la cercanía de los dispositivos en fabricación; factores que implican que su implantación a gran escala en cuevas prehistóricas sea más accesible.

Otro aspecto a destacar recae en el control de potencia asociado a los *drivers* que rigen el funcionamiento de cada dispositivo LED. A partir de lo implementado, la innovación que posibilita este punto se adivina realmente importante, en tanto en cuanto no es ilógico pensar en mantener un control de la temperatura de operación de los dispositivos fotónicos, y en base a ello modificar el punto de polarización de los mismos. A partir de la correlación que pueden mantener la potencia óptica emitida y la temperatura de operación, es factible efectuar una sobre-operación electrónica controlada de los distintos dispositivos.

Finalmente, acorde a lo sugerido durante la implantación del *flickering* (disposición dinámica de la luz emitida) sobre de la fuente óptica desarrollada, esta característica puede ser implementada de una forma más correcta mediante el movimiento físico controlado del propio sintetizador, cuya percepción de oscilación siempre será más firme que no a través de una regulación variable de los dispositivos LEDs.

# Bibliografía

- [1] Alistair WG Pike, Dirk L Hoffmann, Marcos Garcia-Diez, Paul B Pettitt, Jose Alcolea, Rodrigo De Balbin, César González-Sainz, Carmen de las Heras, Jose A Lasheras, Ramón Montes, et al. U-series dating of Paleolithic art in 11 caves in Spain. *Science*, 336(6087):1409–1413, 2012.
- [2] C. González-Sainz, A. Ruiz-Redondo, D. Garate-Maidagan, and E. Iriarte-Avilés. Not only Chauvet: Dating Aurignacian rock art in Altxerri B Cave (northern Spain). *Journal of Human Evolution*, 65(4):457 – 464, 2013.
- [3] Giampaolo Dalmeri and Alberto Broglio. *Pitture paleolitiche nelle Prealpi venete: grotta di Fumane e riparo Dalmeri*, volume 9, pages 89–99. Museo Civico di Storia Naturale di Verona, 2005.
- [4] Mauro S Hernández Pérez, Bernat Martí Oliver, et al. El arte rupestre de la fachada mediterránea: entre la tradición epipaleolítica y la expansión neolítica. 2001.
- [5] Henri Breuil and Hugo Obermaier. *The Cave of Altamira at Santillana del Mar, Spain*. Tipogr. de Archivos, 1935.
- [6] Patricia C Rice and Ann L Paterson. Cave art and bones: exploring the inter-relationships. *American Anthropologist*, 87(1):94–100, 1985.
- [7] Estefanía Pérez Martín and David Muñoz Domínguez. Los combustibles en las lámparas del paleolítico superior. *Boletín de Arqueología Experimental*, (10), 2016.
- [8] A Sophie and White Randall. Ice Age Lamps. *Scientific American Monthly*, 266(3):108–113, 1993.
- [9] Heinz-Helmut Perkampus, Heide-Charlotte Grinter, and TL Threlfall. *UV-VIS Spectroscopy and its Applications*. Springer, 1992.
- [10] HH Perkampus. 8 Evaluation of UV-VIS Spectral Bands. 1992.
- [11] Thomas G Mayerhöfer, Harald Mutschke, and Jürgen Popp. Employing theories far beyond their limits – The case of the (Boguer-) Beer-Lambert Law. *ChemPhysChem*, 17(13):1948–1955, 2016.

- [12] Peter Hess. *Photoacoustic, Photothermal and Photochemical Processes at Surfaces and in Thin Films*, chapter Photothermal Analysis of Thin Films, pages 129–138. Springer Science & Business Media, 2012.
- [13] C.C. Johnson and A.W. Guy. Nonionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems. *IEEE*, 60(6):692–718, June 2005.
- [14] David H. Hubel. *Ojo, cerebro y visión*, chapter Visión del color, pages 159–177. EDITUM, 2 edition, February 2000.
- [15] J.A. Veitch, G. van den Beld, G. Brainard, and G. Brainard. Ocular lighting effects on human physiology and behaviour. Technical report, CIE, 2003.
- [16] Alfio V. Parisi, Adele Green, and Michael G. Kimlin. Diffuse solar UV radiation and implications for preventing human eye damage. *American Society for Photobiology*, 73(2):135–139, February 2001.
- [17] William T. Ham Jr, John J. Ruffolo Jr, Harold A. Mueller, and DuPont Guerry III. The nature of retinal radiation damage: Dependence on wavelength, power level and exposure time. *Vision Research*, 20(12):1105–1111, March 2003.
- [18] M.A. Mainster. Violet and blue light blocking intraocular lenses: photoprotection versus photoreception. *British Medical Journal*, 90(6), June 2006.
- [19] Thomas G Polefka, Thomas A Meyer, Patricia P Agin, and Robert J Bianchini. Effects of Solar Radiation on the Skin. *Journal of Cosmetic Dermatology*, June 2012.
- [20] Soyun Cho, Mi Hee Shin, Yeon Kyung Kim, Jo-Eun Seo, Young Mee Lee, Chi-Hyun Park, and Jin Ho Chung. Effects of Infrared Radiation and heat on human skin aging in vivo. *Journal of Investigative Dermatology Symposium Proceedings*, 14(1):15–19, August 2009.
- [21] Susanne Grether-Beck, Alessandra Marini, Thomas Jaenicke, and Jean Krutmann. Photoprotection of human skin beyond ultraviolet radiation. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 30(2-3):167–174, 2014.
- [22] Christopher Cuttle. Damage to museum objects due to light exposure. *International Journal of Lighting Research and Technology*, 28(1):1–9, 1996.
- [23] Christopher Cuttle. Lighting works of art for exhibition and conservation. *Lighting Research & Technology*, 20(2):43–53, 1988.
- [24] Jorge J Moré and Danny C Sorensen. Computing a trust region step. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 4(3):553–572, 1983.
- [25] Thomas F Coleman and Arun Verma. A preconditioned conjugate gradient approach to linear equality constrained minimization. *Computational Optimization and Applications*, 20(1):61–72, 2001.

- [26] D. C. Sorensen. Minimization of a Large-Scale Quadratic Function Subject to a Spherical Constraint. *SIAM J. on Optimization*, 7(1):141–161, January 1997.
- [27] José María García Lafuente. Propiedades de simetría en funciones. 1976.
- [28] Richard H. Byrd, Robert B. Schnabel, and Gerald A. Shultz. Approximate solution of the trust region problem by minimization over two-dimensional subspaces. *Mathematical Programming*, 40(1):247–263, 1988.
- [29] Mary Ann Branch, Thomas F. Coleman, and Yuying Li. A subspace, interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale bound-constrained minimization problems. *SIAM J. Sci. Comput.*, 21(1):1–23, August 1999.
- [30] Yoshi Ohno, Mira Fein, and Cameron Miller. Vision experiment on chroma saturation for color quality preference. *28th CIE Session*, 2015.
- [31] Steve Winder. *Power supplies for LED driving*. Newnes, 2011.
- [32] Jaber Hasan and Simon S Ang. A high-efficiency digitally controlled RGB driver for LED pixels. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(6):2422–2429, 2011.
- [33] Mosfiqur Rahaman, Shahariar Khan Anik, Provakar Mondal, Sheikh Sharif, and Md Tanvir Ahad. Analysis & design of different astable multivibrator circuits for various applications in communication system. *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology*, 4(3), 2015.
- [34] D Grahame Holmes and Thomas A Lipo. *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*, volume 18. John Wiley & Sons, 2003.
- [35] Marian K Kazimierczuk. *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. John Wiley & Sons, 2015.
- [36] Martin Hartmann and Christoph Platzer. Operation of an LED luminaire having a variable spectrum, February 28 2017. US Patent 9,585,220.
- [37] Camila C Almeida, Pedro S Almeida, Milena F Pinto, Rodolfo L Valle, Carlos HN Martins, and Henrique AC Braga. A fast dynamics and PWM-dimmable LED driver for accurate control of illumination in plants physiology experiments. In *Industry Applications (INDUSCON), 2014 11th IEEE/IAS International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2014.
- [38] Kurt C Lawrence, P Bosoon, Gerald Heitschmidt, and William R Windham. LED lightning for use in multispectral and hyperspectral imaging. *ASAE, St. Joseph, Paper*, (053073), 2005.
- [39] D Manea and MA Calin. Hyperspectral imaging in different light conditions. *The Imaging Science Journal*, 63(4):214–219, 2015.

# Anexo I

La finalidad de este anexo es proporcionar un conjunto de aportaciones adicionales respecto al propio desarrollo del trabajo. De esta forma, si bien este apéndice adjunto se presenta como una parte accesoria del presente documento, no siendo necesario para la correcta comprensión del mismo, permite complementar el segmento fotónico alusivo al estudio y análisis espectral de lámparas artesanales de tuétano.

El desarrollo de esta memoria se ha cimentado, desde el Capítulo 2, en lámparas prehistóricas cuyo combustible estaba constituido por tuétano de origen animal, y de naturaleza bovina/vacuna, para ser más específicos. No obstante, el disponer de un conjunto más heterogéneo de fuentes de combustible para la simulación de lámparas primitivas, posibilita, técnicamente, obtener fuentes de luz con diferentes propiedades. Esto favorece el estudio y análisis, de forma más precisa, de las diferentes características espectrales de emisión asociadas a cada tipo de lámpara. En suma, esta parte del trabajo presenta las características espectrales de emisión y síntesis asociadas a lámparas con tuétano de origen caballar y porcino, que serán enfrentadas entre sí, así como con la utilizada durante el documento (origen bovino).

En la imagen adjunta (ver *Figura A.1*), se pueden visualizar las respuestas espectrales referentes a la emisión de luz de fuentes constituidas por un combustible caracterizado por tuétano de origen bovino, caballar y porcino, siendo el primero de ellos el utilizado para el núcleo propio del desarrollo del trabajo. Los resultados cosechados han sido normalizados respecto a la unidad, tomando el espectro de naturaleza bovina como punto de referencia. Se adivinan varios aspectos a destacar.

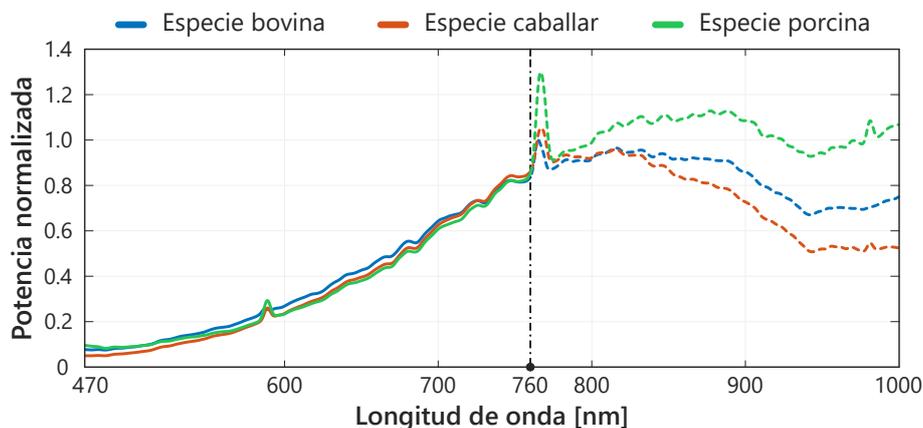
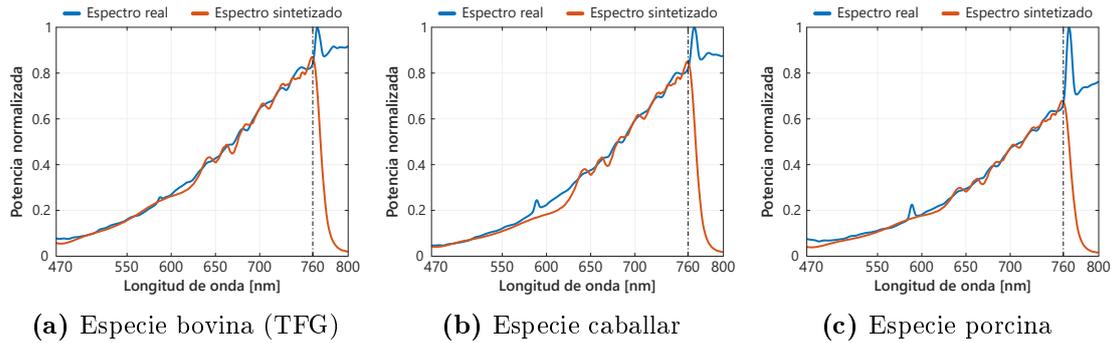


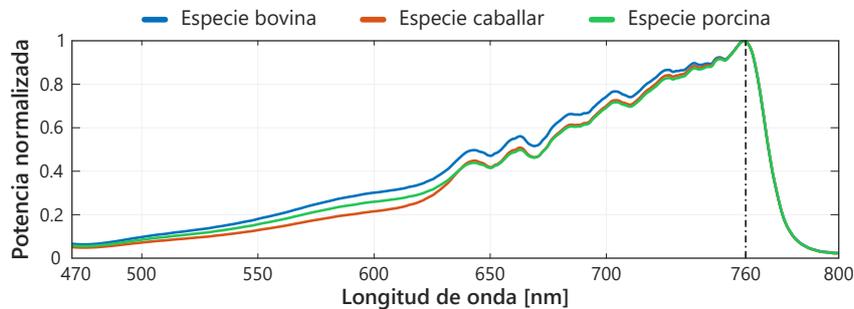
Figura A.1. Característica espectral de emisión de diversas lámparas de tuétano

En primer lugar, resulta realmente llamativa la perfecta adecuación que presentan los tres espectros en la región caracterizada por la radiación visible, en contraposición con lo que ocurre en el rango IR que, aunque exhiben tendencias similares, sus niveles de potencia comienzan a diferir notablemente por encima de 760 nm, longitud de onda a partir de la cual no se efectúa la síntesis del espectro. Igualmente, destaca la presencia de un pico espectral de anchura relativamente estrecha en torno a 766 nm, cuya importancia es notoria en el tuétano porcino<sup>1</sup> (ver *Figura A.2c*).



**Figura A.2.** Síntesis espectral asociada a lámparas de diferentes especies animales

En lo que concierne a la síntesis espectral (470 – 760 nm), no es de extrañar que, empleando los mismos LEDs que los detallados durante el trabajo, la similitud de las respuestas simuladas sea prácticamente idéntica en los tres casos (ver *Figura A.3*), al presentar las fuentes de luz originales componentes espectrales visibles de potencia análoga. Es por eso, que la implementación física en el sintetizador de las condiciones lumínicas asociadas a cada lámpara se puede considerar prácticamente idéntica en los tres casos, en tanto en cuanto las ínfimas variaciones que puedan darse en la regulación de los LEDs son imperceptibles para el ser humano desde el punto de vista cromático. Por otra parte, si lo que se requiere es una adecuación óptima entre espectro sintetizado y espectro original (ver *Figura A.2*), es la lámpara de tuétano bovino la que presenta mejores prestaciones en relación a la minimización de la función  $f_{error}^2$ , con un valor de 9.3358, frente a los valores 10.2506 y 11.0147 de las lámparas de tuétano porcino y caballo, respectivamente.



**Figura A.3.** Síntesis espectral conjunta de diversas lámparas de tuétano

<sup>1</sup>Se ha observado empíricamente que dicho pico espectral mantiene constante su potencia incluso cuando la lámpara se encuentra en su fase final, con una potencia óptica emitida muy reducida.

<sup>2</sup> $f_{error} = \int_{\lambda} |\text{espectro}_{real}(\lambda) - \text{espectro}_{sintetizado}(\lambda)| d\lambda, \quad \forall \lambda \text{ (nm)} \in [470 \dots 760]$