



Universidad de Valladolid

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Física

Calibración de un sistema electrónico para la caracterización óptica de diodos emisores de luz.

Autor:

Mónica Vara Lubiano

Tutor:

Iván Santos Tejido

Fecha:

26 de Julio de 2017

Resumen

El objetivo de este trabajo es la calibración de un sistema electrónico capaz de automatizar la obtención de espectros de emisión de fuentes de luz. Se trata de obtener una medida de la irradiancia de la fuente, es decir, potencia suministrada por la misma por unidad de superficie y para cada longitud de onda.

En primer lugar se calibró la medida de la longitud de onda. Éste proceso consistió en la comparación directa del espectro obtenido por el sistema con el valor conocido de las longitudes de onda de emisión de distintas fuentes. Dicha comparación mostró un error sistemático de desplazamiento del espectro hacia longitudes de onda mayores.

En segundo lugar se procedió a la calibración de la potencia emitida por la fuente. Para ello, se comparó el espectro emitido por dos filamentos de tungsteno con el de radiación de cuerpo negro a la misma temperatura. La relación entre ambos espectros, teórico y experimental, vendría dada por una constante, que debería ser la misma para todas las longitudes de onda y para ambos filamentos. Del ajuste de ambos espectros se vio que la constante presentaba una tendencia característica frente a la temperatura, pero no era un valor único.

Índice general

Resumen	III
1. Introducción	1
1.1. Motivación: ¿por qué es importante la calibración?	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo principal	2
1.2.2. Método utilizado	2
1.3. Estructura del trabajo	3
2. Fundamentos	5
2.1. Descripción del sistema	5
2.2. Operaciones que realiza el sistema	5
2.3. Microcontrolador	6
2.4. Monocromador	7
2.4.1. Motor paso a paso	8
2.4.2. Red de difracción	9
2.4.3. Difracción	9
2.4.4. Redes de difracción	10
2.4.5. Dispersión cromática en las redes de difracción	10
2.4.6. Poder resolutivo espectral de una red.	11
2.4.7. Red de difracción utilizada	11
2.5. Detección de luz: fotodiodo	11
2.5.1. Funcionamiento	12
2.5.2. Fotodiodo utilizado en el sistema	14
2.5.3. Etapas de ganancia a lo largo del sistema	15
2.6. Fuentes de luz	17
2.6.1. Diodo LED	17
2.6.2. Lámparas incandescente y halógena	17
2.6.3. Lámparas espectroscópicas de descarga	19

3. Calibración del eje X: longitud de onda	21
3.1. Introducción	21
3.2. LEDs	21
3.3. Lámparas espectroscópicas	22
3.3.1. Lámpara de Sodio	22
3.3.2. Lámpara de Mercurio	23
3.3.3. Líneas no identificadas	24
3.4. Desviación en el eje X	25
4. Calibración del eje Y: intensidad de la radiación	27
4.1. Introducción	27
4.2. Método propuesto	27
4.3. Cálculo de la temperatura del filamento	28
4.4. Cálculo de la constante M	31
4.5. Cálculo de M con la potencia óptica	32
4.6. ¿Es M realmente constante?	37
5. Conclusiones y trabajo futuro	41
5.1. Trabajo futuro	41
5.1.1. LDs	42
5.1.2. Módulo RGB	42
5.1.3. Irradiancia solar	42
5.1.4. Calibración con el Grupo de Óptica Atmosférica	42
5.2. Aplicaciones del sistema	43
5.2.1. Astronomía	43
5.2.2. Aplicaciones del sistema: estudio de la emisión de una fuente en función de la distancia	44
A. Ajuste de datos previo	45
A.1. Ajuste con Gnuplot a la temperatura fija	45
A.2. Ajuste con Gnuplot usando parámetros libres	49
B. Programas en Octave	53
B.1. Cálculo del valor del factor M en función de la longitud de onda	53
B.2. Cálculo del porcentaje de área del espectro de cuerpo negro	54
Bibliografía	57

Índice de tablas

3.1. Tabla que contiene las longitudes de emisión máxima de los LEDs comparadas con su longitud de onda teórica.	22
3.2. Comparación de las longitudes de onda obtenidas para la lámpara de sodio con las experimentales del NIST [8][10]	23
3.3. Comparación de las longitudes de onda obtenidas para la lámpara de Mercurio con las experimentales del NIST[9][10]	24
4.1. Valores de Z(273.16K) y Z(314K) según [11].	29
4.2. Valor medio de las resistencias de las bombillas incandescente y halógena a temperatura ambiente, junto con su desviación estándar.	29
4.3. Tabla con los pasos seguidos para calcular la temperatura del filamento de tungsteno de la lámpara incandescente en cada barrido.	30
4.4. Tabla con los pasos seguidos para calcular la temperatura del filamento de tungsteno de la lámpara halógena en cada barrido.	31
4.5. Ajustes para la potencia óptica de la bombilla incandescente, con la temperatura fija.	32
4.6. Ajustes para la potencia óptica de la bombilla halógena, con la temperatura fija.	32
4.7. Ajustes para la potencia óptica de la bombilla incandescente, con la temperatura como parámetro libre.	35
4.8. Ajustes para la potencia óptica de la bombilla halógena, con la temperatura como parámetro libre.	35
4.9. Relación entre el área de cuerpo negro entre 600 y 980 nm aportada por el sistema y el área total, a distintas temperaturas, para la bombilla incandescente.	37
4.10. Relación entre el área de cuerpo negro entre 600 y 980 nm aportada por el sistema y el área total, a distintas temperaturas, para la bombilla halógena.	38
A.1. Tabla que presenta los valores obtenidos de M para la lámpara incandescente, utilizando la temperatura fija.	48
A.2. Tabla que presenta los valores obtenidos de M para la lámpara halógena, utilizando la temperatura fija.	48
A.3. Tabla que presenta los valores obtenidos de M y T para la lámpara incandescente, ajustando ambos como parámetros libres.	49

A.4. Tabla que presenta los valores obtenidos de M y T para la lámpara halógena, ajustando ambos parámetros como libres	52
---	----

Índice de figuras

2.1. Sistema completo. En la imagen se pueden ver: 1) soporte para la fuente de luz, 2) monocromador, 3) fotodiodo, 4) microcontrolador, 5) ordenador y 6) placa para montar el circuito que alimenta a la fuente radiante.	6
2.2. Ejemplo del resultado de realizar un barrido, en este caso, de un LED amarillo. . .	7
2.3. Esquema del recorrido de la luz a su paso por el monocromador. Imagen sacada de la hoja de especificaciones del MonoSpec10.	8
2.4. Comportamiento de un frente de onda que se difracta según el principio de Huygens. . .	9
2.5. Red de difracción, cuyas rendijas están separadas una distancia $2d$	10
2.6. Fotodiodo operando en cortocircuito ($V=0$). La corriente es la fotogenerada, I_{ph} , que depende del flujo de fotones incidente [6].	13
2.7. Fotodiodo en polarización inversa, sin resistencia de carga y con ella [6].	13
2.8. Respuesta espectral del fotodiodo en función de la longitud de onda. Figura 6 de la hoja de especificaciones del fotodiodo.	14
2.9. Corriente inversa frente a la irradiancia. Figura 3 de la hoja de especificaciones del fotodiodo.	15
2.10. Corriente inversa frente a la tensión inversa. Figura 4 de la hoja de especificaciones del fotodiodo.	16
2.11. Esquema de las etapas de ganancia.	16
2.12. Espectro de cuerpo negro. Imagen: www.quimicafisica.com	18
3.1. Esquema del circuito.	22
3.2. Espectro de la lámpara de sodio obtenido con el sistema.	23
3.3. Espectro de la lámpara de mercurio obtenido con el sistema.	24
3.4. Comparación de las longitudes de onda obtenidas con el sistema frente a las teóricas para cada fuente estudiada.	25
4.1. Esquema del circuito.	29
4.2. Representación de la temperatura en función del valor de Z , según [11].	30
4.3. Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	33

4.4.	Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	34
4.5.	Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, con la temperatura libre. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	34
4.6.	Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, con la temperatura libre. Como en las anteriores, se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	36
4.7.	Parámetro M frente a la temperatura, en todos los casos, calculado con la potencia óptica. Ver texto para más detalles.	36
4.8.	Factor de corrección M frente a la longitud de onda, para distintas temperaturas de la bombilla incandescente.	39
5.1.	Imagen del sistema durante la medición del espectro del Sol con el GOA.	43
A.1.	Barridos realizados para la bombilla incandescente, en un rango de 500 a 1100nm.	46
A.2.	Barridos realizados para la bombilla halógena, en un rango de 500 a 1100nm.	46
A.3.	Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	47
A.4.	Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	47
A.5.	Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, usando la temperatura libre. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	50
A.6.	Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, usando la temperatura libre. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.	50
A.7.	Representación del valor de M en función de la temperatura, para todos los casos. El eje de ordenadas está en escala logarítmica.	51
A.8.	Relación entre las temperaturas fija y libre para cada bombilla.	51

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la calibración de un sistema electrónico diseñado para la obtención automática del espectro de emisión de LEDs (diodos emisores de luz) u otras fuentes de luz, con el fin de poder utilizarlo para caracterizar LEDs en asignaturas relacionadas con la Electrónica, como la optativa de Dispositivos Optoelectrónicos del 4º curso del Grado en Física.

El sistema fue diseñado y fabricado por Jorge Fernández Lucas en su Trabajo de Fin de Grado [1] del Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación, y en el presente trabajo se ha tratado de calibrar el sistema, continuando con la línea que se propuso durante su fabricación.

1.1. Motivación: ¿por qué es importante la calibración?

La calibración [2] es un proceso de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que “debiera indicar” de acuerdo a un patrón de referencia de valor conocido. Consta de dos fases:

- Primero establece una relación entre la medida proporcionada por el patrón de referencia y las correspondientes indicaciones del objeto a calibrar.
- Segundo, utiliza esa comparación para obtener una medida en función de las indicaciones.

Un aspecto importante de la calibración es la documentación de las desviaciones detectadas, para poder asegurar medidas precisas y fiables. No calibrar un aparato de medición podría suponer un malgasto de recursos y tiempo, tanto en investigación científica como en el ámbito industrial. Los cambios de temperatura, el estrés mecánico al que están sometidos los equipos o el envejecimiento de sus componentes deteriora poco a poco sus funciones. Por ello, la calibración es un procedimiento que debe llevarse a cabo, no sólo cuando un aparato es nuevo o ha sufrido una modificación, sino de forma periódica para asegurar el buen funcionamiento del sistema.

Se distinguen dos tipos de procesos de calibración [3]: directos e indirectos. Los procesos de calibración directos son aquellos en los que se compara el valor conocido o de referencia con el que aporta el sistema a calibrar, y de la comparación se obtiene una corrección para la indicación del

sistema. En los procesos de calibración indirectos, la magnitud que mide el sistema a calibrar no coincide con la del patrón de referencia.

Tanto si la calibración es directa como indirecta, los métodos de clasificación se pueden clasificar en:

- Comparación directa con un patrón: se comparan los valores proporcionados por el sistema a calibrar al medir patrones de referencia cuyo valor de la magnitud deseada es conocido. Ejemplo: calibración de una balanza.
- Método de punto cero: se utiliza un detector de punto cero, que indica la igualdad entre el valor del patrón y el del sistema. Ejemplo: calibración de una balanza de brazos con pesas patrón.
- Método de sustitución: se utiliza un instrumento auxiliar, con el que inicialmente se mide al patrón y luego al equipo sujeto a calibración. Ejemplo: calibración de una balanza mediante otra balanza calibrada (instrumento auxiliar) con pesas patrón.
- Método de reproducción de la definición de la magnitud: se reproduce la magnitud que indica el sistema a calibrar a través de patrones en los que se calcula el valor de la magnitud deseada por medio de los valores de otras magnitudes. Ejemplo: calibración de volúmenes mediante pesada y utilización de la densidad.
- Método de reproducción del sistema de medida: se utilizan medidores de las magnitudes internas que requiere el sistema a calibrar para obtener su indicación. Ejemplo: calibración de un caudalímetro de diafragma con medidor de presión diferencial y sección.

En este trabajo se utilizó el primer método para la calibración en longitud de onda, y el cuarto método para la calibración de la intensidad de radiación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo principal

El objetivo principal del trabajo es calibrar el sistema de medición. Para ello se requiere:

- Dar unidades a la longitud de onda medida (el sistema ya proporciona la longitud de onda en Ångströms, falta ajustar el valor exacto).
- Dar unidades y magnitud a la intensidad de radiación medida.

1.2.2. Método utilizado

Se siguieron dos líneas de trabajo distintas a la hora de hacer la calibración. Por un lado, la longitud de onda se ajustó por comparación directa con fuentes conocidas (LEDs y lámparas espectroscópicas).

Por otro lado, la calibración de la intensidad de luz emitida se hizo por comparación con un espectro teórico conocido: el espectro de cuerpo negro. Se ajustaron los datos experimentales obtenidos de bombillas con filamentos de tungsteno a los de cuerpo negro para diferentes temperaturas.

1.3. Estructura del trabajo

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado se ha estructurado en cinco capítulos más un apéndice.

El presente capítulo ha servido como introducción al trabajo, en el que se ha hablado de la importancia de la calibración de un aparato de medida, además de haberse presentado el método llevado a cabo para calibrar el sistema.

El segundo capítulo se centra en los aspectos teóricos previos que deben conocerse para entender el trabajo realizado. En él también se hace una revisión de todos los elementos de que consta el sistema, su funcionamiento y distintos aspectos a tener en cuenta a la hora de calibrar.

Los dos capítulos siguientes (tercero y cuarto) tratan la calibración del sistema: en el tercero se expone el método para la calibración en longitud de onda, así como los resultados obtenidos. En el cuarto, se trabaja la calibración en intensidad de la radiación, exponiendo el método seguido y los resultados que derivaron del mismo.

Parte de los resultados obtenidos durante la calibración en intensidad de la radiación se muestran en el apéndice A, al final del documento.

Finalmente, en el capítulo quinto se recogen las conclusiones del trabajo, así como ideas de trabajo futuro.

Capítulo 2

Fundamentos

En el presente capítulo se van a describir los elementos que componen el sistema a calibrar, incluyendo aspectos teóricos sobre difracción y el principio de funcionamiento de un fotodiodo, así como las operaciones que se pueden realizar.

También se incluye información sobre las fuentes de luz utilizadas durante el trabajo.

2.1. Descripción del sistema

En la imagen 2.1 pueden verse los distintos componentes que constituyen el sistema completo. Se trata de un monocromador(2) en cuya entrada hay una placa diseñada para acoplar LEDs de 5 mm de diámetro, y en cuya salida se encuentra acoplado un fotodiodo(3). La luz atraviesa el monocromador y llega hasta el fotodiodo, generando en este una señal en forma de corriente. Esta señal es procesada por un microcontrolador(4), que le aplica una serie de ganancias. La señal final se muestra en un ordenador(5), a través del cual se puede manejar el sistema completo.

En adelante se referirá a “el sistema” como el conjunto completo de todos los componentes integrantes, salvo la fuente de luz.

2.2. Operaciones que realiza el sistema

El sistema puede controlarse con el ordenador, a través de un ejecutable diseñado para Linux, que se arranca desde una terminal, a través de la cual el usuario puede realizar las distintas tareas disponibles.

El programa ofrece cuatro opciones iniciales:

- Salir de la aplicación.
- Ir a una longitud de onda.
- Seleccionar una ganancia para el fotodiodo.
- Realizar un barrido en longitud de onda.

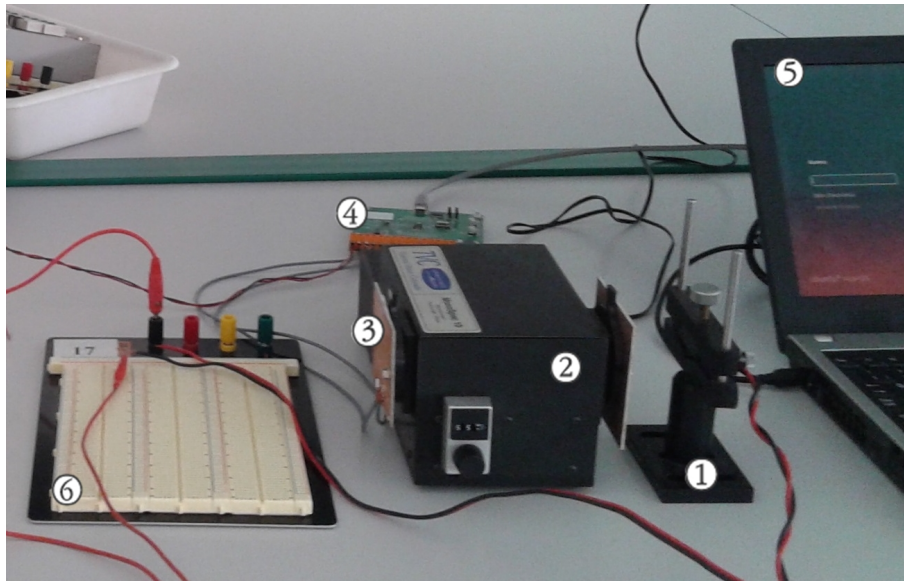


Figura 2.1: Sistema completo. En la imagen se pueden ver: 1) soporte para la fuente de luz, 2) monocrómator, 3) fotodiodo, 4) microcontrolador, 5) ordenador y 6) placa para montar el circuito que alimenta a la fuente radiante.

En el presente trabajo sólo se utilizó la opción de realizar un barrido, esto es, seleccionar un rango de longitudes de onda y obtener la intensidad de luz emitida para cada una de ellas en ese rango.

La terminal pide al usuario las longitudes de onda inicial y final entre las que se desea realizar el barrido, que deberán introducirse en Ångströms. También se debe seleccionar la resolución deseada para el barrido (ver sección 2.4.1) y la ganancia que quiere aplicarse en la etapa de acondicionamiento del fotodiodo (ver sección 2.5.3), pudiendo elegir para ambas entre cuatro opciones distintas.

Al realizar un barrido se generan dos archivos: el primero es una gráfica que presenta la señal obtenida en función de la longitud de onda (espectro). Pueden verse un ejemplo en la imagen 2.2. El segundo es un fichero de datos que contiene información relevante del barrido hecho, como por ejemplo la longitud de onda medida, la respuesta espectral del fotodiodo para esa longitud de onda, y la lectura dada por el convertidor analógico/digital del microcontrolador.

Para entender mejor las operaciones que es capaz de realizar el sistema, a continuación se describen los detalles más relevantes de los componentes del sistema.

2.3. Microcontrolador

Se trata de un circuito integrado que posee toda la arquitectura de un PC. Un microcontrolador de fábrica no realiza ninguna tarea, por lo que debe ser programado. En este caso, el microcontrolador fue ya programado en el trabajo de Jorge Fernández Lucas [1] para encargarse del control del

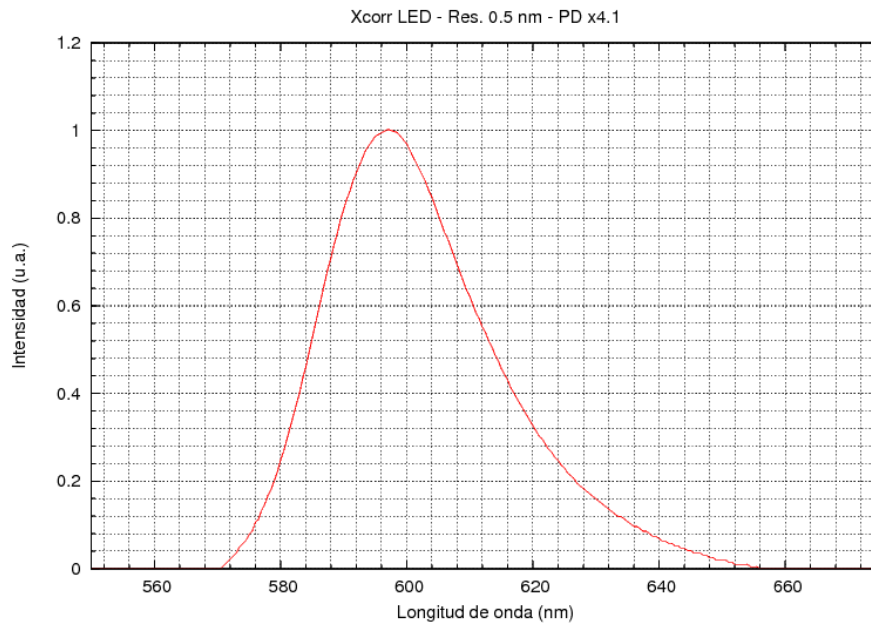


Figura 2.2: Ejemplo del resultado de realizar un barrido, en este caso, de un LED amarillo.

motor paso a paso, del encendido y apagado del LED, y de interpretar la señal analógica procedente del fotodiodo y seleccionar una ganancia para la misma.

2.4. Monocromador

Un monocromador es un aparato óptico que mecánicamente selecciona y transmite a su salida una estrecha banda de longitudes de onda de luz u otra radiación fuente colocada a la entrada del mismo, de entre todas las longitudes de onda que emite dicha fuente, permitiendo así realizar un barrido en el espectro. En este trabajo se utilizó un monocromador MonoSpec10, que consta de los siguientes componentes:

- Rendija de entrada. En este caso, la entrada consistía en una apertura de 5 mm de diámetro diseñada para acoplar LEDs de este tamaño.
- Espejo que refleja el haz de entrada hacia la red de difracción.
- Red de difracción (“gratting”) de 600 líneas/mm, que dispersa la radiación en sus longitudes de onda constituyentes, y las envía hacia el espejo de salida.
- Espejo de salida, alineado de tal manera que refleja la luz difractada a través de la rendija de salida del detector.
- Rendija de salida que aísla la banda espectral seleccionada. En la salida del sistema hay colocado un fotodiodo.

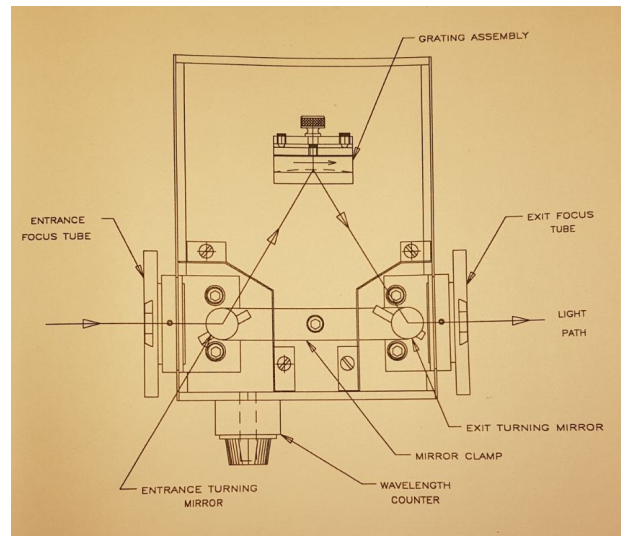


Figura 2.3: Esquema del recorrido de la luz a su paso por el monocromador. Imagen sacada de la hoja de especificaciones del MonoSpec10.

- Motor paso a paso para controlar el movimiento de la red y seleccionar la banda de longitudes de onda que se desea estudiar.

El comportamiento de la luz a través del monocromador es el siguiente (figura 2.3): la luz entra a través de una rendija al monocromador, e incide en un espejo. Éste la refleja hacia una red de difracción, que difracta la luz (ver sección 2.4.4), separándola en sus longitudes de onda constituyentes. La red de difracción es movida por un motor paso a paso; al mover la red de difracción con el motor paso a paso se selecciona qué longitud de onda es dirigida a la salida. Una vez que la luz ha sido “dividida” en sus longitudes de onda constituyentes, se envía de nuevo hacia un segundo espejo que la refleja sobre una rendija de salida. En esta rendija de salida hay colocado un fotodiodo, que generará una señal de respuesta en función de la cantidad de luz que le llegue.

2.4.1. Motor paso a paso

Un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos. Esto permite avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control. De esta manera, se encarga de mover la red de difracción, pudiendo elegir la resolución del sistema entre las siguientes: 2,5 Å, 5 Å, 10 Å y 20 Å.

Si desea realizarse un barrido rápido, se seleccionará una resolución de 20Å, mientras que para un barrido con mayor resolución, deberá elegirse la de 2,5Å.

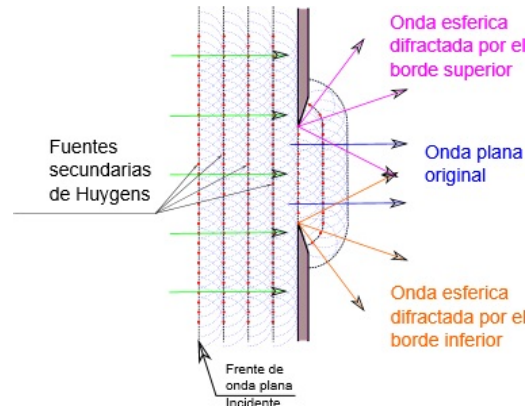


Figura 2.4: Comportamiento de un frente de onda que se difracta según el principio de Huygens.

2.4.2. Red de difracción

2.4.3. Difracción

Los espectrómetros ópticos muestran la intensidad de radiación en función de la longitud de onda (o frecuencia). Estos sistemas utilizan el fenómeno de la dispersión óptica para separar las longitudes de onda constituyentes de una radiación. Para ello necesitan desviar la luz, bien con un prisma que la refracte, bien con una red de difracción.

La difracción es un fenómeno que ocurre cuando un frente de onda se topa en su propagación con un obstáculo opaco o un diafragma, y que se acentúa a medida que el obstáculo se hace más pequeño en relación con la longitud de onda de la radiación incidente [4].

Huygens propuso que un frente de onda progresa como si cada uno de sus puntos emitiera ondas esféricas elementales (figura 2.4) con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente inicial, siendo la posición del frente de onda al cabo del tiempo la envolvente de dichas ondas elementales. Añadió que estas ondas secundarias sólo tenían efectividad en los puntos de contacto con su envolvente, es decir, viajan sólo "hacia adelante".

Young explicó el fenómeno de las interferencias tras enunciar el principio de superposición, y con este principio y la propagación de Huygens, Fresnel dio la primera explicación plausible de la difracción. Añadió la suposición de que las ondas secundarias de Huygens podían propagar la perturbación en todas las direcciones, pero con una amplitud que debería ser máxima en la dirección normal a la envolvente, y disminuir hasta hacerse nula para direcciones tangentes al frente de onda primario, y para ángulos mayores a $\frac{\pi}{2}$ respecto a la normal. La formulación matemática correcta fue hecha por Kirchhoff tras la teoría electromagnética de la luz.

Si el obstáculo consiste en múltiples aberturas próximas entre sí, el resultado es un patrón de interferencia, debido a la adición de distintas ondas que viajan a través de distintos caminos, por lo que pueden estar en fase o no. El ángulo de incidencia, la longitud de onda de la radiación incidente y la distancia entre obstáculos influyen en la dispersión y eficiencia de la red.

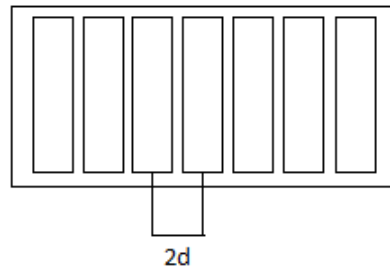


Figura 2.5: Red de difracción, cuyas rendijas están separadas una distancia $2d$.

2.4.4. Redes de difracción

Una red de difracción es un elemento óptico consistente en un conjunto repetitivo de elementos difractores equiespaciados (aberturas u obstáculos), que separan la radiación policromática incidente en sus longitudes de onda constituyentes [4].

Supóngase una serie de N rendijas iguales y paralelas, equiespaciadas con sus centros a distancias $2d$ (figura 2.5). Para un haz plano que incide normalmente, la difracción se produce a unos ángulos θ_m tales que:

$$2d \sin \theta_m = m\lambda \quad (2.1)$$

Siendo m el modo de difracción, y θ_m el ángulo de difracción correspondiente al modo m . Ésta expresión se conoce como “ecuación de la red”. El primer miembro de la ecuación representa la diferencia de caminos entre dos rayos homólogos de dos rendijas consecutivas. Si la onda plana incide con un ángulo arbitrario θ_i , la ecuación de la red queda de la forma:

$$2d |\sin \theta_m + \sin \theta_i| = m\lambda \quad (2.2)$$

La luz que se transmite directamente se dice que es la de orden cero, y se corresponde con $m = 0$. Dado que m puede tomar valores tanto positivos como negativos, habrá difracción a ambos lados del orden cero.

2.4.5. Dispersión cromática en las redes de difracción

Al hacer el estudio de la posición de los máximos y mínimos de difracción, se ve que ésta depende de la longitud de onda del haz. Si se trata de radiación policromática, con dos longitudes de onda constituyentes λ_1 y λ_2 , en la pantalla colectora aparecerán dos máximos para ángulos θ_1 y θ_2 tales que

$$\sin \theta_1 = \frac{m\lambda_1}{2d} \quad , \quad \sin \theta_2 = \frac{m\lambda_2}{2d} \quad (2.3)$$

lo que implica una dispersión en la luz difractada, ya que los máximos del mismo orden (m) para los distintos colores (λ_1 y λ_2) no coincidirán, apareciendo separados. Esto permite usar estos dispositivos para la obtención de espectros.

Si las longitudes de onda constituyentes son λ y $\lambda + \delta\lambda$, el máximo principal de orden m aparecerá bajo un ángulo θ tal que

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} \quad (2.4)$$

y el desplazamiento angular de dicho máximo al variar la longitud de onda en $\delta\lambda$ será

$$\cos \theta \delta\theta = \frac{m\delta\lambda}{2d}, \quad \text{o bien,} \quad \frac{\delta\theta}{\delta\lambda} = \frac{m}{2d \cos \theta} \quad (2.5)$$

La expresión $\delta\theta/\delta\lambda$ es la dispersión angular de la red, que depende del orden m y disminuye al aumentar el espaciado de la red, $2d$ [4].

2.4.6. Poder resolutivo espectral de una red.

Si entre dos longitudes de onda existe una diferencia $\delta\lambda$ muy pequeña, los máximos de orden m de ambas podrían confundirse y no aparecerán como líneas espectrales separadas. Dos líneas espectrales se verán separadas si el centro del máximo de una coincide con el primer mínimo de la otra (criterio de Rayleigh). El poder resolutivo de la red viene dado por:

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = Nm \quad (2.6)$$

siendo en este caso $\delta\lambda$ la diferencia mínima entre dos longitudes de onda que la red es capaz de resolver en el máximo de orden m [4]. Depende por tanto del número de rendijas (N) y del orden del máximo, m .

2.4.7. Red de difracción utilizada

En el presente trabajo se utilizó una red de difracción de 600 g/mm (es decir, 600 ranuras por milímetro), ya que permitía realizar barridos desde 400 hasta 1600nm. De la ecuación 2.6 se obtuvo que la resolución para el primer orden de difracción era de $Nm = 600$. Es decir, que una longitud de onda de 400 nm podría verse separada de otra que se diferenciara de ella en 0,7 nm, mientras que para una longitud de onda de 1000 nm la menor diferencia con otra para que se distingan es de 1,7 nm. Por ello, en el rango que se está considerando, para longitudes de onda bajas puede utilizarse la resolución de 5 Å (ver sección 2.4.1) para ver todos los picos del espectro, mientras que para longitudes de onda grandes deberá usarse la resolución de 10 Å.

2.5. Detección de luz: fotodiodo

Para poder caracterizar completamente la emisión de un LED, no sólo es necesario un monocromador capaz de seleccionar la longitud de onda, sino además un dispositivo capaz de medir la potencia óptica emitida a dicha longitud de onda. El sistema cuenta para ello con un fotodiodo, cuyo funcionamiento se explica en esta sección.

El fotodiodo se encuentra a la salida del monocromador, alineado con la ranura de salida mediante una placa PCB (del mismo modo en que el LED se acopla a la ranura de entrada), la

cual no sólo acopla el fotodiodo, sino que lo aísla de la luz exterior para evitar la intrusión de ruido en el sistema.

En este apartado se explica de forma breve el comportamiento físico de un fotodiodo. Para ello se introducirán algunos conceptos básicos en la teoría de los semiconductores, para posteriormente describir el comportamiento del fotodiodo como unión p-n y algunas de sus características como dispositivo electrónico.

2.5.1. Funcionamiento

Fotodiodo p-n

Un fotodiodo es un dispositivo cuyo funcionamiento se basa en las variaciones de las características tensión-corriente (I-V) de una unión p-n bajo la acción de una radiación electromagnética [5]. La influencia de la radiación sobre las características depende de factores tales como la intensidad y longitud de onda de la radiación incidente, de las dimensiones y parámetros físicos de la unión, así como de la dirección de incidencia de la radiación respecto al plano de la unión.

Cuando un fotón llega al fotodiodo, un electrón de la banda de valencia podría absorberlo y pasar a la banda de conducción, generándose así un par electrón-hueco. Si esto ocurre en el entorno de la ZCE, el campo eléctrico generado arrastrará al electrón hacia el cátodo y el hueco hacia el ánodo, dando lugar a una fotocorriente.

Característica I-V

En un fotodiodo, la corriente total viene dada por la ecuación 2.7:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{V}{\eta V_T} \right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (2.7)$$

siendo $-I_{ph}$ la corriente fotogenerada en el dispositivo, que es proporcional al flujo de fotones incidente. El signo negativo indica que la corriente va del lado p al lado n de la unión. Si el fotodiodo opera en circuito cerrado ($V = 0$), la corriente de cortocircuito es la fotogenerada (figura 2.6).

Cuando un fotodiodo trabaja en modo fotoconductor, debe conectarse en polarización inversa, es decir, con el cátodo polarizado positivamente respecto al ánodo. Si se conecta a una tensión V_B , la corriente que atraviesa el circuito es $i = -(i_0 + i_{ph})$. En la figura 2.7 puede verse el punto de operación del fotodiodo, tanto cuando está solo como cuando se conecta una resistencia de carga en serie. En ausencia de luz, un fotodiodo genera una pequeña corriente conocida como “corriente de oscuridad”. Cuanto menor sea esta corriente, mayor será la sensibilidad del fotodiodo.

La corriente fotogenerada es proporcional a la potencia óptica incidente (ecuación 2.8). La constante de proporcionalidad se denomina *responsividad*, y se denota por la letra \mathfrak{R} , y sus unidades son A/W .

$$I_{ph} \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}} = P_{opt} \quad (2.8)$$

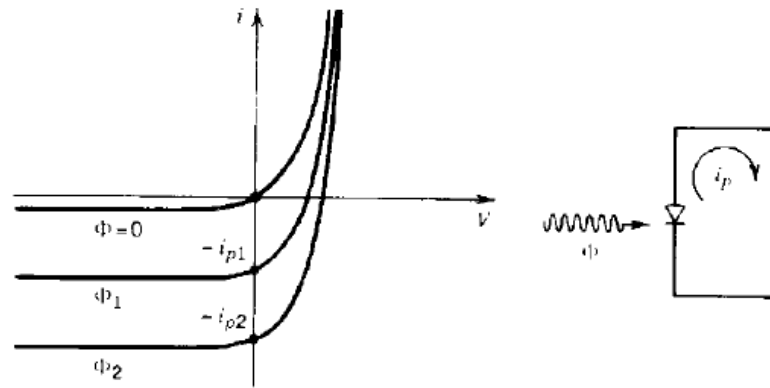


Figura 2.6: Fotodiodo operando en cortocircuito ($V=0$). La corriente es la fotogenerada, I_{ph} , que depende del flujo de fotones incidente [6].

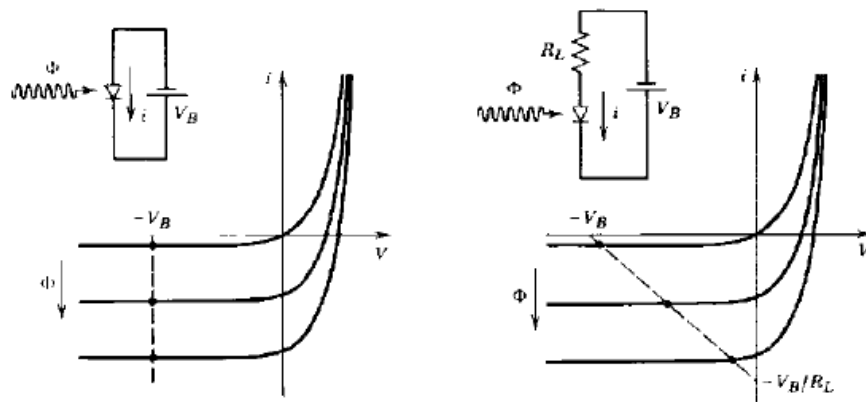


Figura 2.7: Fotodiodo en polarización inversa, sin resistencia de carga y con ella [6].

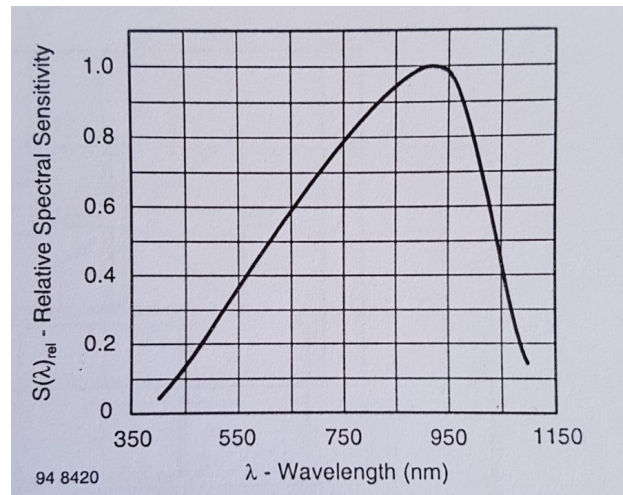


Figura 2.8: Respuesta espectral del fotodiodo en función de la longitud de onda. Figura 6 de la hoja de especificaciones del fotodiodo.

Representa la capacidad del fotodiodo de generar pares electrón-hueco por la incidencia de una señal óptica, y depende de la longitud de onda incidente.

2.5.2. Fotodiodo utilizado en el sistema

El fotodiodo que se encuentra acoplado a la salida del sistema es un fotodiodo de silicio de tipo PIN, modelo TEMD5010X01. Cuenta con un área sensible de detección de $7,5\text{mm}^2$, y detecta longitudes de onda en el rango visible e infrarrojo cercano.

En la figura 2.8 se puede ver la responsividad del fotodiodo en función de la longitud de onda, aportada por el fabricante. La responsividad viene dada en unidades relativas, por lo que hay que calcular las unidades absolutas. Este cálculo se verá en la siguiente subsección.

Cálculo de la responsividad del fotodiodo

La señal de respuesta que ofrece el fotodiodo viene dada en forma de corriente. Para poder conocer la potencia óptica que recibía el fotodiodo, fue necesario calcular la responsividad del mismo, y utilizar este factor para obtener la potencia óptica en función de la corriente fotogenerada.

El fotodiodo no es igual de sensible a todas las longitudes de onda, sino que la señal que se obtiene con el sistema está modificada por un factor que depende de la longitud de onda. El fabricante ofrece la respuesta espectral relativa frente a la longitud de onda (figura 2.8), en la que se ve que el máximo corresponde a una longitud de onda de 950nm. Es decir, si se multiplica el valor de la responsividad para 950nm (ecuación 2.10) por la respuesta espectral del fotodiodo, se obtendrá la responsividad absoluta para cada longitud de onda.

Para calcular la responsividad del fotodiodo se recurrió a la hoja de especificaciones del mismo. El fabricante aportaba una gráfica que representaba la corriente inversa frente a la irradiancia (figura 2.9), para una tensión inversa de 5V y una longitud de onda de 950nm. Pero el fotodiodo

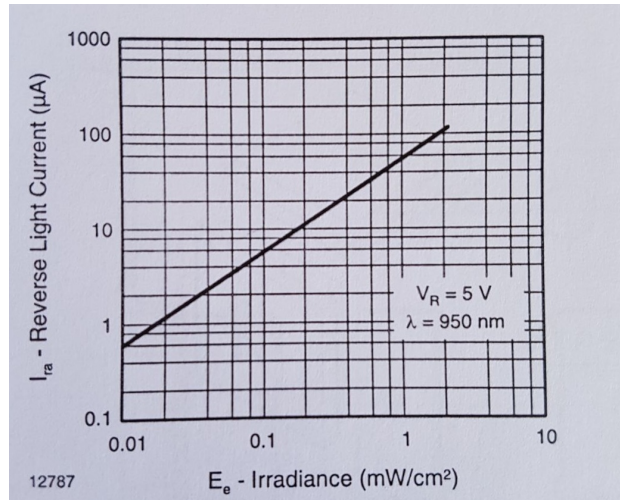


Figura 2.9: Corriente inversa frente a la irradiancia. Figura 3 de la hoja de especificaciones del fotodiodo.

del sistema no está conectado a una tensión inversa, sino que trabaja en modo fotoconductorivo ($V = 0V$). Para solucionar esto, se recurrió a una segunda gráfica aportada por el fabricante, en la que se representaba la corriente inversa en función de la tensión inversa, para una longitud de onda de 950nm (figura 2.10). Se vio que era prácticamente constante con V_R , por lo que se pudo continuar trabajando con la primera gráfica.

Al trabajar en modo fotoconductorivo ($V = 0$), la corriente total inversa es igual a la fotogenerada. De este modo, se puede suponer que la gráfica 2.9 representa la corriente fotogenerada en función de la irradiancia.

La irradiancia es igual a la potencia óptica por unidad de área (ecuación 2.9):

$$E_e = \frac{P_{opt}}{A} \quad (2.9)$$

por lo que, si se multiplica la irradiancia por el área del fotodiodo ($7,5mm^2$), se obtendrá la corriente fotogenerada en función de la potencia óptica. La pendiente de dicha función será la responsividad del fotodiodo, en este caso, para 950nm y una tensión inversa de 5V (aplicable, como ya se ha comentado, a 0V).

La pendiente de la gráfica 2.9 se consiguió tomando dos puntos, obteniendo un valor para la responsividad de:

$$\mathfrak{R} = \frac{I_{ph1} - I_{ph0}}{P_{opt1} - P_{opt0}} = \frac{(6 - 0,6)\mu A}{(0,1 - 0,01)mW/cm^2 \cdot 0,075cm^2} = 0,8A/W \quad (2.10)$$

2.5.3. Etapas de ganancia a lo largo del sistema

Como se ha comentado, la potencia óptica incidente da lugar a una corriente fotogenerada en el fotodiodo, según el valor de la responsividad. Esta corriente fotogenerada pasa por una primera etapa de ganancia $G1$ (equivalente a $2 \cdot 4,7M\Omega$) que la convierte en tensión ($V_{ph} = G1 \cdot I_{ph}$). Esta

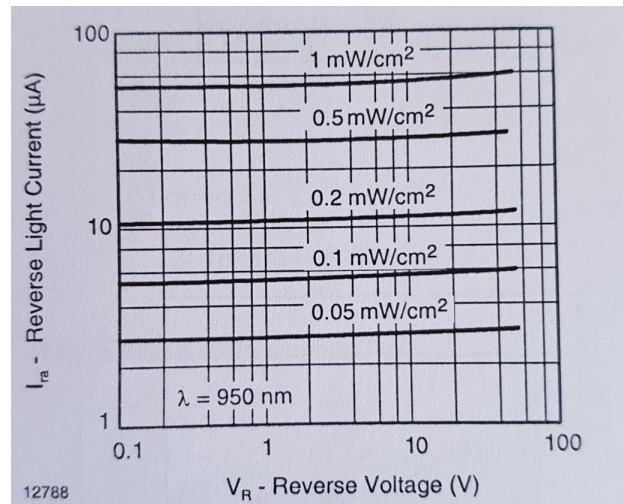


Figura 2.10: Corriente inversa frente a la tensión inversa. Figura 4 de la hoja de especificaciones del fotodiodo.

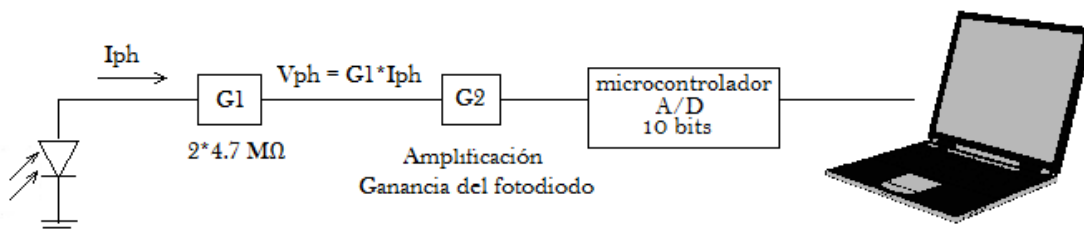


Figura 2.11: Esquema de las etapas de ganancia.

tensión V_{ph} pasa por una etapa de amplificación cuyo valor será el asignado como ganancia del fotodiodo (ver subsección 2.2), G_2 , el cual podría tomar cuatro valores: $x1$, $x4.1$, $x16$ y $x66.13$. Esta señal es la que llega al microcontrolador. El convertidor A/D del microcontrolador de 10 bits tiene un rango de medidas entre 0 V y 3,3 V, que divide en 1024 niveles. Estos niveles son los que aparecen en pantalla a medida que se realiza el barrido. Puede verse el esquema de forma gráfica en la figura 2.11.

En forma de ecuación, la señal que da el microcontrolador es la siguiente:

$$S_{\mu C} = I_{ph} \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot \frac{1024}{3,3V} \quad (2.11)$$

Cálculo de la potencia óptica

A continuación se puede ver, en modo esquemático, los pasos que se realizaron para transformar las cuentas digitales que daba el microcontrolador de nuevo en potencia óptica que llega al fotodiodo. Primero se calculó I_{ph} siguiendo la ecuación 2.12:

$$I_{ph} = S_{\mu C} \cdot \frac{3,3}{1024} \cdot \frac{1}{G2} \cdot \frac{1}{G1} \quad (2.12)$$

para después calcular la potencia óptica según la ecuación 2.13:

$$P_{opt} = I_{ph} \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}} \quad (2.13)$$

Las ganancias G1 y G2 son conocidas, y ya se ha mostrado cómo se calculó la responsividad para cada longitud de onda.

2.6. Fuentes de luz

En el presente trabajo se ha trabajado con espectros de emisión, ya fuera de LEDs, lámparas espectroscópicas o de cuerpos incandescentes (filamentos). A continuación se expone una breve explicación del espectro de emisión de cada uno de ellos.

2.6.1. Diodo LED

Un diodo emisor de luz (“light emitting diode”, LED) es un diodo capaz de emitir luz cuando conduce la corriente eléctrica [6]. Para que un LED ilumine, debe estar polarizado en directa, es decir, con el polo positivo de la fuente de alimentación conectado al ánodo y el polo negativo conectado al cátodo. Además, la fuente de alimentación debe suministrarle una tensión superior a su tensión umbral para que luzca.

Cuando se polariza el diodo en directa se producen desplazamientos de carga entre los electrodos conectados a diferentes voltajes; estos desplazamientos de cargas constituyen la corriente que circula por el diodo. Cuando un electrón y un hueco están en la misma región, pueden recombinarse; es decir, el electrón decae a un nivel energético inferior más estable, liberando energía en forma de fotón. La energía del fotón emitido ($E = h\nu$) coincide con la energía del gap del material que forma la unión p-n. Por ello, diferentes materiales darán lugar a fotones con distinta frecuencia, lo que se traduce en luz emitida de distintos colores.

2.6.2. Lámparas incandescente y halógena

Cuando un cuerpo alcanza temperaturas superiores a 600°C, sus átomos pueden excitarse a niveles energéticos superiores, con la subsiguiente desexcitación y producción de radiación de un espectro continuo. Éste fenómeno se conoce con el nombre de *incandescencia* [7]. En el caso de una lámpara de filamento, la incandescencia es causada por el calentamiento debido al paso de una corriente eléctrica (efecto Joule).

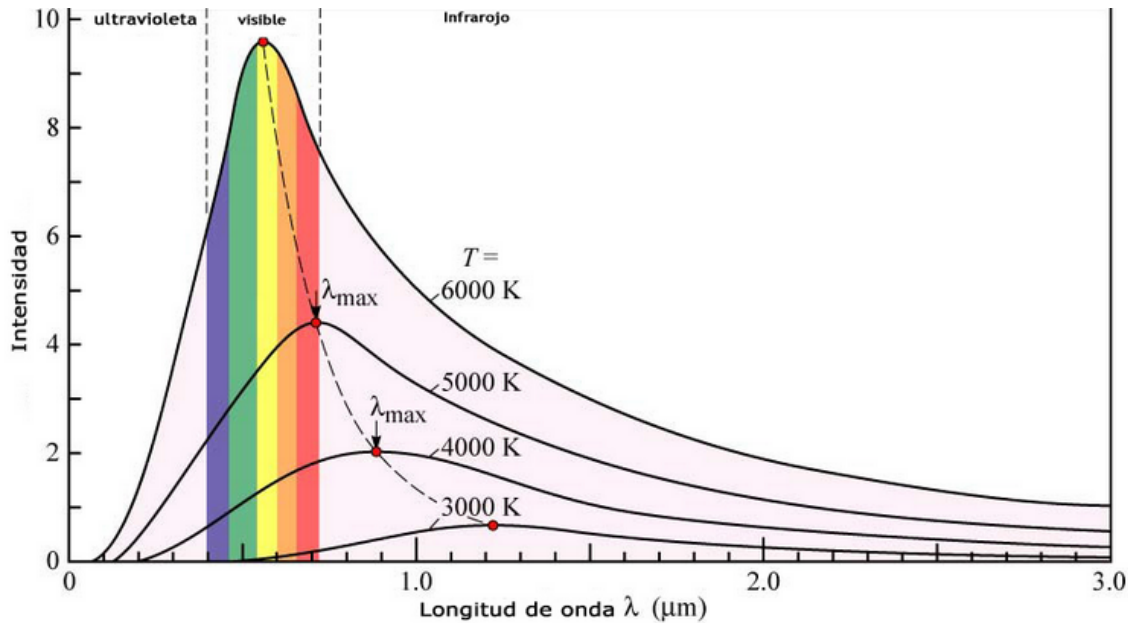


Figura 2.12: Espectro de cuerpo negro. Imagen: www.quimicafisica.com

El espectro de incandescencia se describe a través de las propiedades macroscópicas de un cuerpo negro o radiador perfecto. Se trata de un sistema ideal que absorbe toda la radiación electromagnética que incide sobre él, independientemente de la frecuencia o ángulo de incidencia. En equilibrio termodinámico, el espectro de emisión de un cuerpo negro es continuo en frecuencia y depende sólo de la temperatura del mismo, no de su composición o forma. Además, emite la misma radiación en todas direcciones (emisión isotrópica).

El espectro de emisión de cuerpo negro viene determinado por la ley de Planck (ecuación 2.14):

$$W = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2.14)$$

donde W es la densidad de radiancia espectral (para cada ν y en función de la temperatura), h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío, k es la constante de Boltzmann, ν es la frecuencia de la radiación y T la temperatura absoluta del cuerpo [7].

Este espectro presenta un pico a una frecuencia determinada; este pico se desplaza hacia frecuencias más altas (o longitudes de onda más bajas) a medida que sube la temperatura, según la ley de Wien (ecuación 2.15).

$$\lambda_{m\acute{a}x}T = b \quad (2.15)$$

donde b es la constante de desplazamiento de Wien, y equivale a $2,8977729 \times 10^{-3} K \cdot m$ [7].

Lámparas incandescentes

Cuanto mayor sea la temperatura del filamento de una lámpara incandescente, mayor es la proporción de energía radiada dentro del espectro visible [7]. Sin embargo, cuanto más se acerque la temperatura de operación a la de fusión del filamento, mayor será la velocidad de evaporación del mismo en vacío. El tungsteno, debido a su baja presión de vapor y alto punto de fusión, permite operar a altas temperaturas, por lo que suele ser el material elegido para la fabricación de filamentos.

El material del filamento evaporado puede difundirse a través del gas de relleno de la lámpara y depositarse en la superficie del bulbo, formando una capa metálica que absorbe la radiación emitida, reduciendo la eficacia de la lámpara. Si se llena el bulbo con un gas noble de baja conductividad de calor, se reduce la evaporación del filamento.

Lámparas incandescentes halógenas

La relación eficacia-vida de las lámparas incandescentes se vio mejorada mediante la incorporación de un gas haluro aditivo (Br, Cl, F, I), que produce un ciclo regenerativo del filamento (ciclo halógeno). El vapor de tungsteno se combina con el halógeno para formar un compuesto que permanece en estado gaseoso, en lugar de depositarse en el bulbo. Cuando una molécula de este compuesto se acerca al filamento caliente, se descompone depositando el tungsteno sobre el filamento, reiniciándose el ciclo.

Las lámparas halógenas soportan temperaturas mayores de funcionamiento, que además son necesarias para mantener el ciclo halógeno [7].

2.6.3. Lámparas espectroscópicas de descarga

Si sobre un gas ionizado, confinado en un tubo de descarga con dos electrodos, se aplica un campo eléctrico, se producirá un flujo de iones hacia el cátodo y de electrones hacia el ánodo a través del gas [7].

Cuando un electrón libre es emitido por el cátodo, puede chocar con un átomo del gas, y pueden ocurrir tres cosas:

- se produce un choque elástico y el electrón pierde energía produciendo un incremento de la temperatura del gas. El electrón que ha perdido velocidad en el impacto puede continuar excitando o ionizando otros átomos, para finalmente recombinarse con un átomo ionizado o ser colectado por el ánodo.
- el electrón libre excita un átomo del gas, haciendo que sus electrones de valencia asciendan a un nivel energético superior. Cuando un electrón de valencia retorna a su estado energético normal, emite un fotón.
- el electrón ioniza uno de los átomos del gas.

El campo eléctrico aplicado suministra la energía necesaria para que los electrones libres mantengan la descarga.

En este trabajo se midieron lámparas espectroscópicas de sodio y de mercurio, las cuales fueron prestadas por el profesor Marco Antonio Gigoso, del departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica de la Universidad de Valladolid.

Lámpara de sodio de baja presión

Estas lámparas contienen un vapor de sodio a baja presión donde se produce el arco de descarga. Para facilitar el arranque se agrega un gas noble, normalmente neón con una cierta cantidad de argón. Una vez que se ha encendido y el gas se ha ionizado, la descarga inicial se produce en el neón, de ahí su color rojo. Cuando la lámpara se estabiliza, la emisión es casi monocromática, relativa al doblete del sodio (589,0 nm y 589,6 nm).

La lámpara de sodio con la que se trabajó es una lámpara OSRAM NA/10.

Lámpara de mercurio

Se trata de una lámpara de descarga de alta intensidad. Estas lámparas producen luz mediante una descarga eléctrica de arco en un bulbo interior (o tubo de descarga) que a su vez está dentro de un bulbo exterior. El tubo de descarga contiene electrodos sellados en cada extremo, y encierra un gas inerte (argón), fácil de ionizar a baja presión y temperatura ambiente, y una cantidad de mercurio. El arco inicial se establece por la ionización del argón. Una vez establecido el arco, el calor generado vaporiza el mercurio líquido del tubo de descarga.

La lámpara de mercurio que se midió fue una lámpara OSRAM HG100.

Capítulo 3

Calibración del eje X: longitud de onda

3.1. Introducción

Como se ha comentado anteriormente, el sistema ofrece un espectro digitalizado de la luz incidente, mostrando una serie de picos a diferentes alturas, correspondientes a las longitudes de onda constituyentes de la radiación y a sus diferentes intensidades. En este capítulo se detalla el método que se llevó a cabo para calibrar el eje de abscisas, es decir, aquel en el que se indica la longitud de onda de cada pico del espectro.

La calibración del eje X se hizo por comparación directa con distintos patrones, cuya longitud (o longitudes) de onda emitidas eran conocidas, bien por información dada por el fabricante o por información del espectro de emisión del gas constituyente. Se eligieron como patrones las siguientes fuentes:

- LEDs (IR, rojo, amarillo y verde)
- Lámpara de sodio
- Lámpara de mercurio

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los espectros realizados con nuestro sistema y la comparación con las longitudes de onda teóricas, además de los procedimientos que se siguieron a tal efecto.

3.2. LEDs

Los LEDs son fuentes de luz bastante monocromática, si bien presentan un ancho de banda considerable entorno a la longitud de onda central.

En la tabla 3.1 se exponen los resultados de los barridos realizados, comparados con las longitudes máximas de emisión de los LEDs aportadas por sus respectivas hojas de especificaciones.

LED	λ_{medida} (nm)	$\lambda_{datasheet}$ (nm)	Diferencia (nm)
IR	962.5	950	12.5
Rojo	651.0	635	16
Amarillo	597.0	583	14
Verde	580.5	565	15.5

Tabla 3.1: Tabla que contiene las longitudes de emisión máxima de los LEDs comparadas con su longitud de onda teórica.

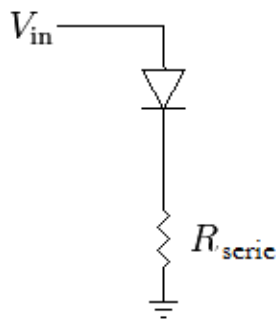


Figura 3.1: Esquema del circuito.

En el caso del LED infrarrojo se vio que incluso con la ganancia más pequeña la medida saturaba. Por ello se incluyó en el circuito una resistencia teórica de $1k\Omega$ (medidos 989Ω) detrás del propio LED (figura 3.1), de forma que la caída de tensión en éste fuera de 1V aproximadamente. Se realizó un barrido de prueba seguido de otros dos barridos posteriores, en los que se redujo la tensión para que el LED emitiera menos y se pudiese subir la ganancia.

Como resultado para los LEDs, se puede ver que existe un ligero error de desplazamiento (+14,5 nm de media) del espectro hacia longitudes de onda mayores.

3.3. Lámparas espectroscópicas

3.3.1. Lámpara de Sodio

Tras un primer barrido se vio que se obtenían 6 picos (figura 3.2), siendo el primero mucho más alto que los otros cinco, por lo que se realizaron barridos por separado para resolver cada uno, obteniendo las longitudes de ondas mostradas en la tabla 3.2. En la tabla también se muestran los valores correspondientes de cada longitud de onda de emisión del Sodio aportados por el NIST [8][10].

En la tabla se ha señalado con un asterisco la longitud de onda teórica de 819,4824 nm. Esto se debe a que no está clara la correspondencia entre ambos picos, ya que el error de desplazamiento es inferior a 2 nm, si bien están próximos en longitud de onda y su intensidad corresponde a 0.1 veces la intensidad máxima (tanto en el espectro obtenido con el monocromador como el espectro del NIST[8][10]).

En el espectro aparecen una serie de picos para $\lambda > 600nm$ que no tienen correspondencia con los datos del NIST. En la sección 3.3.3 se comenta su posible origen.

De la tabla 3.2 se puede ver que hay un error de desplazamiento del espectro hacia la derecha en longitudes de onda (9,9563 nm de media, sin contar el pico de 821,25 nm).

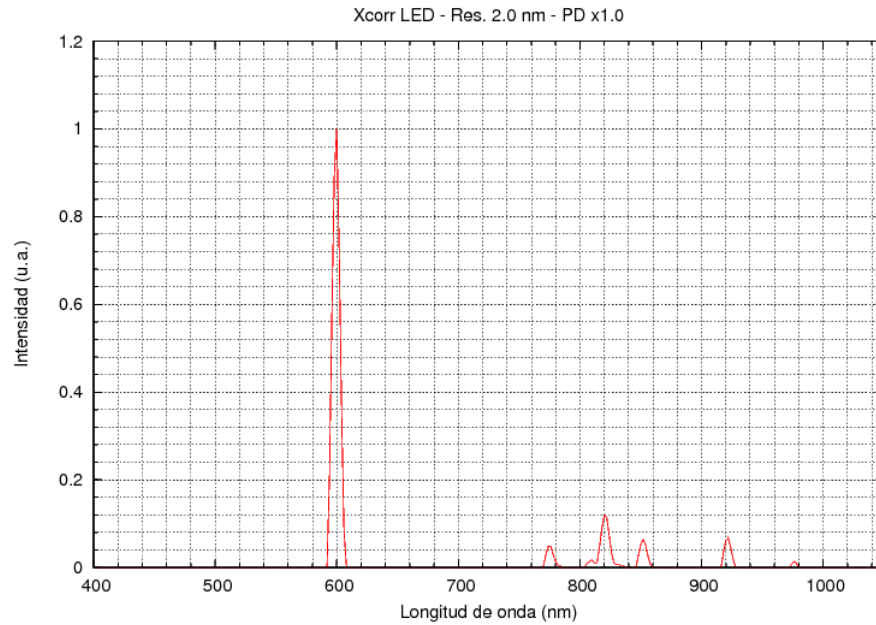


Figura 3.2: Espectro de la lámpara de sodio obtenido con el sistema.

λ obtenida (nm)	λ NIST (nm)	Diferencia (nm)
599.25	588.9950	10.255
	589.5924	9.6576
706.00		
715,50		
737,00		
747,75		
761,50		
774,50		
821,25	819.4824 *	1.77

Tabla 3.2: Comparación de las longitudes de onda obtenidas para la lámpara de sodio con las experimentales del NIST [8][10]

3.3.2. Lámpara de Mercurio

En la figura 3.3 puede verse el espectro que se obtuvo de la lámpara de mercurio. En la tabla 3.3 se muestran las longitudes de onda obtenidas para cada pico, y las correspondientes longitudes de onda de emisión del mercurio aportadas por el NIST [9][10]. El posible origen de los picos no identificados se discute en 3.3.3.

El error de desplazamiento obtenido para el espectro de la lámpara de Mercurio es de 8.6778 nm de media.

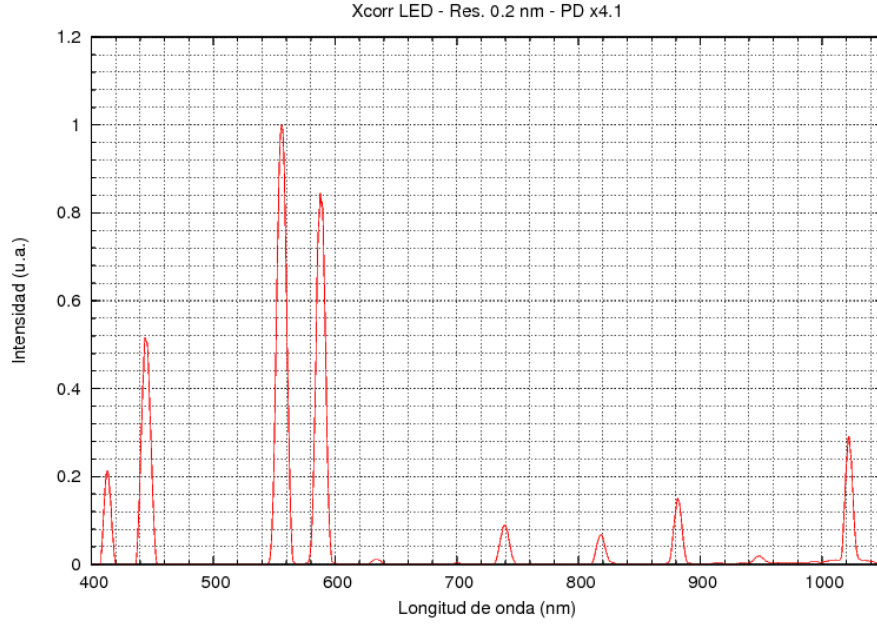


Figura 3.3: Espectro de la lámpara de mercurio obtenido con el sistema.

λ obtenida (nm)	λ NIST (nm)	Error (nm)
413.00	404.6563	8.3437
444.00	435.8328	8.1672
556.25	546.0735	10.1765
587.75		
881.25		
1022.00	1013.976	8.024

Tabla 3.3: Comparación de las longitudes de onda obtenidas para la lámpara de Mercurio con las experimentales del NIST[9][10]

3.3.3. Líneas no identificadas

Al comparar los resultados obtenidos con los espectros teóricos de las lámparas espectroscópicas de Sodio y Mercurio aportados por el NIST [8] [9] [10], se vio que aparecían líneas que no estaban identificadas. Por ello, se contactó con Verónica González, del Laboratorio de Espectroscopía Láser de la Universidad de Valladolid, para poder obtener el espectro de las lámparas de trabajo con un sistema ya calibrado. En efecto se comprobó que las nuevas líneas no eran causadas por un error en nuestro sistema, sino que aparecían en el espectro de la lámpara, pero no pudo obtenerse el valor de la longitud de onda correspondiente debido a un problema con la calibración del monocromador. Sin embargo, se pensó que tales líneas podrían corresponder al espectro de emisión del gas noble que utilizan este tipo de lámparas para iniciar la descarga, como podría ser el Xenón o el Argón.

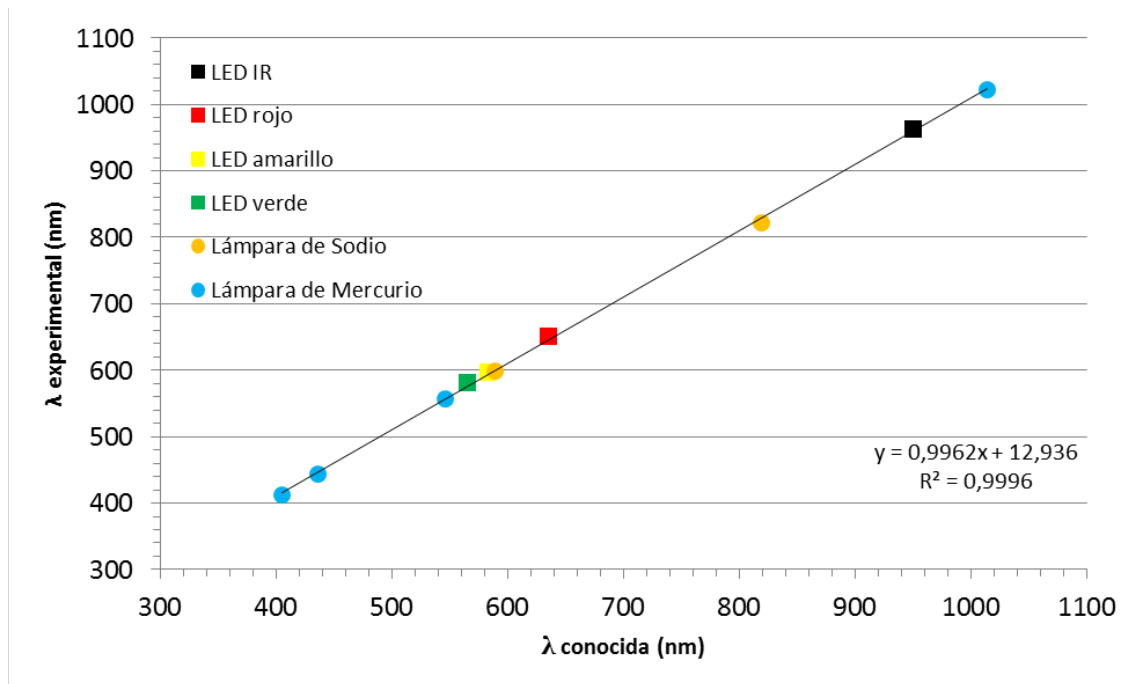


Figura 3.4: Comparación de las longitudes de onda obtenidas con el sistema frente a las teóricas para cada fuente estudiada.

3.4. Desviación en el eje X

En la gráfica 3.4 se muestra la relación entre la longitud de onda obtenida y la longitud de onda teórica de todos los picos estudiados.

La tendencia lineal de la gráfica deja clara la correspondencia entre la longitud de onda medida y la conocida para todas las fuentes. Se ve que hay un error de desplazamiento en el espectro de aproximadamente 13 nm hacia longitudes de onda mayores, lo que puede ser corregido mediante código.

Para la gráfica 3.4, se ajustaron los valores a una expresión lineal de tipo $\lambda_{experimental} = a \cdot \lambda_{teorica} + b$, donde $a = 0,996 \pm 0,007$ y $b = 13 \pm 5$.

Capítulo 4

Calibración del eje Y: intensidad de la radiación

4.1. Introducción

Para la caracterización óptica de una fuente de luz es necesario conocer, no sólo la longitud de onda de emisión, sino la magnitud de la intensidad emitida para cada longitud de onda. Esta intensidad se va a ver afectada por una serie de factores que deben corregirse, a saber:

- Ruido introducido en la señal por la luz ambiente.
- Ruido debido a la corriente de oscuridad del fotodiodo, traducido como el valor que da el convertidor A/D sin ninguna fuente de luz.
- Respuesta espectral del fotodiodo. Esto hace que el fotodiodo sea más sensible a unas longitudes de onda que a otras.
- La magnitud de la intensidad emitida por la fuente de luz es desconocida, ya que el convertidor A/D sólo ofrece un valor entre 0 y 1023.

El nivel de ruido introducido y la respuesta espectral del fotodiodo ya se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar el programa de obtención de los espectros [1], por lo que el presente trabajo se centró en el último punto de la lista: dar magnitud a la intensidad emitida por el LED. Como se ha mencionado, el convertidor A/D sólo ofrece un valor entre 0 y 1023, pero en el trabajo de Jorge Fernández se normalizó esa señal. En el presente capítulo se expondrá el trabajo llevado a cabo para darle a la intensidad magnitudes absolutas.

4.2. Método propuesto

Con la intención de asignarle una magnitud a la intensidad emitida por la fuente radiante, se recurrió a un espectro cuya emisión era conocida: el espectro de radiación de un cuerpo negro.

Se compararon los espectros de radiación de dos filamentos de tungsteno diferentes (bombillas halógena e incandescente) con el espectro de emisión de un cuerpo negro a la misma temperatura, con la suposición de serían proporcionales según una constante, a la que se llamó M .

$$PD = M \cdot W \quad (4.1)$$

siendo PD la señal proporcionada por el fotodiodo y W el espectro de radiación de cuerpo negro a la misma temperatura. El valor de W viene dado por la expresión 4.2.

$$W = \frac{3,744 \cdot 10^{-16}}{x^5 \cdot [\exp(0,0144/(x \cdot T)) - 1]} \quad (4.2)$$

donde x representa la longitud de onda en metros. Esta expresión es análoga a la que se vio en la sección 2.6.2, pero esta vez sustituyendo las constantes por su valor numérico en unidades del Sistema Internacional.

Primero se realizaron diferentes barridos para obtener varios espectros de cada uno de los dos filamentos a distintas temperaturas. Para poder medir a diferentes temperaturas, se fue incrementando progresivamente la corriente que circulaba por las bombillas, asociando después el valor de la resistencia ofrecida por el filamento con la temperatura del mismo [11].

Una vez conocida la temperatura a la que se realizó cada barrido, pudo compararse el espectro obtenido con el ideal de cuerpo negro a la misma temperatura. De la comparación de ambos espectros pudo obtenerse el valor de M , que debía ser constante para todos los barridos y para ambas lámparas, y serviría para corregir la amplitud y asignarle magnitud a la señal obtenida.

4.3. Cálculo de la temperatura del filamento

Para poder realizar el ajuste de la señal del sistema al espectro de cuerpo negro, se necesita saber a qué temperatura del filamento se realizó cada barrido.

Dado que no era posible medir la temperatura del filamento mientras se realiza un barrido, se recurrió a un método indirecto para el cálculo de la misma. Según [11], es posible calcular la temperatura de un filamento de tungsteno conociendo la relación entre la resistencia que ofrece a la temperatura que se desea calcular ($R(T)$), y la resistencia a 273 K ($R(273)$). En este caso la temperatura que se deseaba conocer era la del filamento en cada barrido. Se partió de la suposición de que la temperatura era constante durante el barrido.

La resistencia $R(T)$ fue posible calcularla midiendo la caída de tensión y la corriente a través de la lámpara durante el barrido, y aplicando la ley de Ohm. Sin embargo, no era posible medir la resistencia a 273 K, por lo que se recurrió a la relación 4.3:

$$\frac{R(T)}{R(273)} = \frac{R(T)}{R(295)} \cdot \frac{R(295)}{R(273)} \quad (4.3)$$

Siendo $R(295)$ la resistencia ofrecida por la lámpara a la temperatura ambiente del laboratorio (22 °C) cuando se realizaron las medidas.

La relación $R(295)/R(273)$ se obtuvo mediante interpolación lineal a partir de las tablas de tungsteno aportadas por [11], en las que se indica un valor de $Z(T)$ para cada temperatura (recordar

$Z=R(T)/R(273)$	T (K)
1.00	273.16
1.20	314

Tabla 4.1: Valores de $Z(273.16K)$ y $Z(314K)$ según [11].

	Incandescente	Halógena
Resistencia media	17,12 Ω	0,56 Ω
Desviación estándar	0,22 Ω	0,02 Ω

Tabla 4.2: Valor medio de las resistencias de las bombillas incandescente y halógena a temperatura ambiente, junto con su desviación estándar.

que $Z(T)$ es el cociente entre dos resistencias). De esta forma, el valor de $Z(295)$ se pudo obtener a partir de los datos de $Z(314)$ y $Z(273.16)$, que se indican en la tabla 4.1.

$$\frac{R(295)}{R(273)} \equiv Z(295) = \frac{Z(314) - Z(273,16)}{314 - 273,16} \cdot (295 - 273,16) + 1 = 1,10695 \quad (4.4)$$

Por último era necesario conocer la resistencia de la lámpara a la temperatura del laboratorio ($R(295)$). Para ello se incluyó la lámpara en un circuito en serie con resistencias de valores conocidos. Midiendo la caída de tensión en los extremos de las resistencias se obtuvo el valor de la corriente que atravesaba el circuito. Con la corriente y la caída de tensión en la lámpara se pudo obtener la resistencia de la misma a partir de la ley de Ohm.

Todas las medidas se realizaron con una tensión en la fuente de aproximadamente 1V, y resistencias de entre 27 Ω y 1k Ω para la lámpara halógena, y de entre 390 Ω y 10k Ω para la incandescente. Se empezó a medir con la resistencia más alta, de modo que circulara poca intensidad y la bombilla se calentase poco. Al ser la corriente que circulaba por la lámpara muy

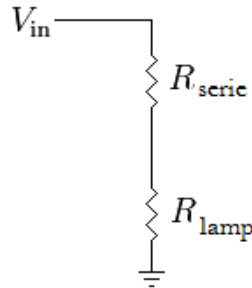


Figura 4.1: Esquema del circuito.

baja, el filamento no llegaba a lucir, por lo que se supuso que no se calentaba en exceso respecto a la temperatura ambiente. Se realizaron en total 17 medidas para la lámpara incandescente, y 20 para la halógena. Se tomó el valor medio de los resultados como valor de la resistencia de cada lámpara a temperatura ambiente ($R(295)$). Los resultados pueden verse en la tabla 4.2.

Al cociente entre $R(T)$ y $R(273)$ se le designa $Z(T)$. Los valores de $Z(T)$ están tabulados y se muestran en la figura 4.2, según las tablas de tungsteno [11]. De la representación se obtuvo una relación entre Z y T dada por un polinomio de grado 4. Este polinomio se utilizó para el cálculo de la temperatura T de cada barrido a partir de la resistencia de cada lámpara durante el barrido ($R(T)$).

La resistencia de las lámparas durante un barrido se obtuvo a partir de la caída de tensión y

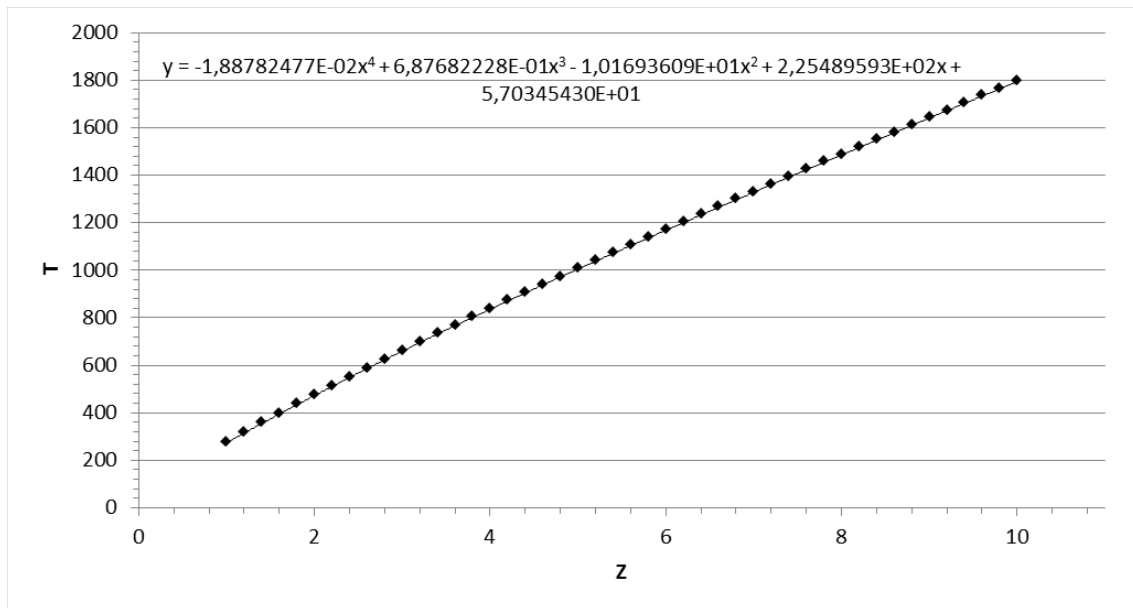


Figura 4.2: Representación de la temperatura en función del valor de Z, según [11].

la corriente que circulaba por ellas. En las tablas 4.3 y 4.4 se muestran los resultados obtenidos en cada barrido, tanto de las resistencias $R(T)$ como de la temperatura T del filamento, para cada lámpara.

Barrido	V (V)	I (mA)	R(Ω)	$\frac{R(T)}{R(273)}$	T (K)
BI1	2,002	2,69	74,42	4,81	973,47
BI2	3,045	3,35	90,90	5,88	1148,47
BI3	4	3,91	102,30	6,61	1266,71
BI4	5	4,43	112,87	7,30	1374,71
BI5	6	4,92	121,95	7,89	1466,72
BI6	7	5,37	130,35	8,43	1551,32
BI7	8,01	5,8	138,10	8,93	1629,03
BI8	9	6,21	144,93	9,37	1697,28
BI9	10	6,6	151,52	9,80	1763,03
BI10	11,01	6,98	157,74	10,20	1825,04
BI11	12	7,33	163,71	10,59	1884,51
BI12	13	7,67	169,49	10,96	1941,98
BI13	14	8	175	11,32	1996,67

Tabla 4.3: Tabla con los pasos seguidos para calcular la temperatura del filamento de tungsteno de la lámpara incandescente en cada barrido.

La temperatura obtenida se incrementa a medida que aumentan la tensión y la corriente en

Barrido	V_{lamp} (V)	I_{lamp} (mA)	$R(\Omega)$	$\frac{R(T)}{R(273)}$	T (K)
BH1	1,51	610	2,47	4,85	979,80
BH2	1,75	640	2,73	5,37	1066,14
BH3	2,00	680	2,95	5,79	1134,27
BH4	2,26	715	3,15	6,20	1199,78
BH5	2,50	75	3,34	6,56	1257,40
BH6	2,75	780	3,53	6,93	1316,89
BH7	3,00	810	3,71	7,29	1372,79
BH8	3,25	840	3,87	7,60	1421,87
BH9	3,50	870	4,02	7,91	1469,87
BH10	3,75	900	4,17	8,19	1514,53
BH11	4	930	4,30	8,45	1554,57
BH12	4,25	960	4,43	8,70	1592,99
BH13	4,51	990	4,56	8,95	1632,09

Tabla 4.4: Tabla con los pasos seguidos para calcular la temperatura del filamento de tungsteno de la lámpara halógena en cada barrido.

las lámparas, lo cual tiene sentido. Conocido el valor de la temperatura del filamento para cada barrido, podemos comparar el espectro obtenido experimentalmente con aquel de un cuerpo negro ideal a la misma temperatura, y obtener así la constante de proporcionalidad M.

4.4. Cálculo de la constante M

La constante M relaciona el espectro aportado por el sistema con el espectro ideal de cuerpo negro a la misma temperatura según la ecuación 4.5:

$$f(x) = M \cdot \frac{3,744 \cdot 10^{-16}}{x^5 \cdot [\exp(0,0144/(x \cdot T)) - 1]} \quad (4.5)$$

Para calcular el valor de M se hicieron ajustes no lineales (con Gnuplot) a la ecuación 4.5, donde $f(x)$ era la potencia óptica calculada en la sección 2.5.3. Inicialmente se utilizaron los niveles del microcontrolador, cuyos resultados se muestran en el Apéndice A.

Se realizaron dos series de ajustes a la ecuación 4.5. Primero se utilizó la temperatura calculada del filamento, pidiendo a Gnuplot el valor de M que ajustase la potencia óptica al espectro de cuerpo negro. En segundo lugar se ajustó la potencia óptica a la ecuación de cuerpo negro dejando libres tanto el parámetro M como la temperatura. Es decir, no se le dio un valor a la temperatura en la ecuación de ajuste, sino que se pidió al programa que calculase qué temperatura y qué valor de M tendría que tener la ecuación 4.5 para ajustarse a los datos experimentales.

En la siguiente sección se muestran los resultados de las dos series de ajustes.

4.5. Cálculo de M con la potencia óptica

Primero se muestran los valores de M obtenidos utilizando la temperatura fija calculada en el apartado 4.3. En la tabla 4.5 se indica cada barrido con su temperatura y el valor de M con su error para la bombilla incandescente. Los mismos valores se muestran en la tabla 4.6 para la bombilla halógena.

Barrido	T_{fija}	$M(T_{fija})$
BI1	973,47	$(2,35 \pm 0,17) \cdot 10^{-18}$
BI2	1148,48	$(2,13 \pm 0,05) \cdot 10^{-18}$
BI3	1266,71	$(1,84 \pm 0,04) \cdot 10^{-18}$
BI4	1374,71	$(1,49 \pm 0,03) \cdot 10^{-18}$
BI5	1466,72	$(1,33 \pm 0,02) \cdot 10^{-18}$
BI6	1551,32	$(1,11 \pm 0,02) \cdot 10^{-18}$
BI7	1629,03	$(1,02 \pm 0,02) \cdot 10^{-18}$
BI8	1697,28	$(9,64 \pm 0,17) \cdot 10^{-19}$
BI9	1763,04	$(8,53 \pm 0,18) \cdot 10^{-19}$
BI10	1825,04	$(8,25 \pm 0,17) \cdot 10^{-19}$
BI11	1884,51	$(7,90 \pm 0,15) \cdot 10^{-19}$
BI12	1941,98	$(7,60 \pm 0,14) \cdot 10^{-19}$
BI13	1996,67	$(7,41 \pm 0,13) \cdot 10^{-19}$

Tabla 4.5: Ajustes para la potencia óptica de la bombilla incandescente, con la temperatura fija.

Barrido	T_{fija}	$M(T_{fija})$
BH1	979,80046	$(3,573 \pm 0,022) \cdot 10^{-17}$
BH2	1066,13599	$(3,013 \pm 0,016) \cdot 10^{-17}$
BH3	1134,27189	$(2,500 \pm 0,015) \cdot 10^{-17}$
BH4	1199,78445	$(2,332 \pm 0,012) \cdot 10^{-17}$
BH5	1257,39821	$(2,163 \pm 0,014) \cdot 10^{-17}$
BH6	1316,89284	$(1,875 \pm 0,010) \cdot 10^{-17}$
BH7	1372,78771	$(1,659 \pm 0,009) \cdot 10^{-17}$
BH8	1421,87249	$(1,535 \pm 0,009) \cdot 10^{-17}$
BH9	1469,87104	$(1,449 \pm 0,009) \cdot 10^{-17}$
BH10	1514,53235	$(1,360 \pm 0,009) \cdot 10^{-17}$
BH11	1554,57017	$(1,337 \pm 0,009) \cdot 10^{-17}$
BH12	1592,98709	$(1,247 \pm 0,008) \cdot 10^{-17}$

Tabla 4.6: Ajustes para la potencia óptica de la bombilla halógena, con la temperatura fija.

En las gráficas 4.3 y 4.4 puede verse el ajuste a la ecuación de cuerpo negro realizado para cinco

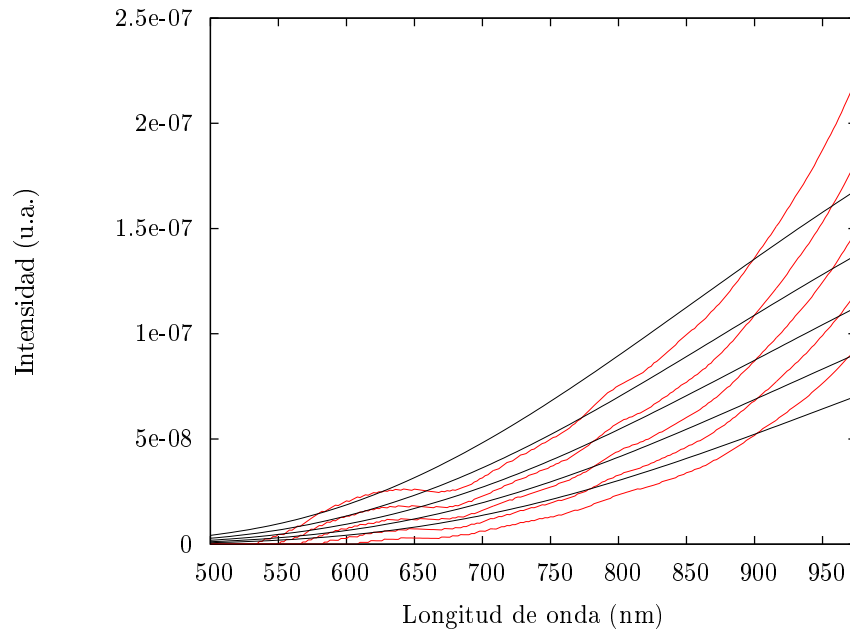


Figura 4.3: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

barridos de la bombilla incandescente y cinco barridos de la bombilla halógena, respectivamente.

Dado que el ajuste para la bombilla incandescente no era demasiado bueno, como puede verse en la figura 4.3, se decidió darle a Gnuplot libertad para ajustar los espectros a la ecuación 4.5 con la temperatura que fuese más adecuada. Es decir, no se le asignó un valor fijo a la temperatura, sino que se dejó como parámetro libre sobre el que realizar el ajuste. En las tablas 4.7 y 4.8 se muestran los valores obtenidos, tanto de M como de la temperatura, junto con su error, para cada barrido de la bombilla incandescente y halógena, respectivamente.

De nuevo se representaron los barridos junto a la ecuación de cuerpo negro 4.5 a la misma temperatura, para ver la calidad del ajuste. En las gráficas 4.5 y 4.6 puede verse esta representación, para cinco barridos de la bombilla incandescente y cinco de la halógena, respectivamente.

Viendo que el valor de M decrecía con la temperatura, se decidió representar esta dependencia en una sola gráfica para todos los casos. La tendencia puede verse en la figura 4.7. Fue la misma que cuando se hizo el tratamiento con las cuentas digitales (ver Apéndice A).

Algo que llamó la atención fue que los valores de M para la bombilla incandescente usando la temperatura fija eran 10 veces menores que para todos los demás (ajustes de las bombillas incandescente y halógena usando parámetros libres, y de la bombilla halógena usando la temperatura fija). Se ha incluido en la misma gráfica la dependencia de M con la temperatura fija, aumentada en un orden de magnitud (señalada en la gráfica con un asterisco). También cabe mencionar que la dependencia de M con las temperaturas fija y libre presenta la misma tendencia para cada bombilla

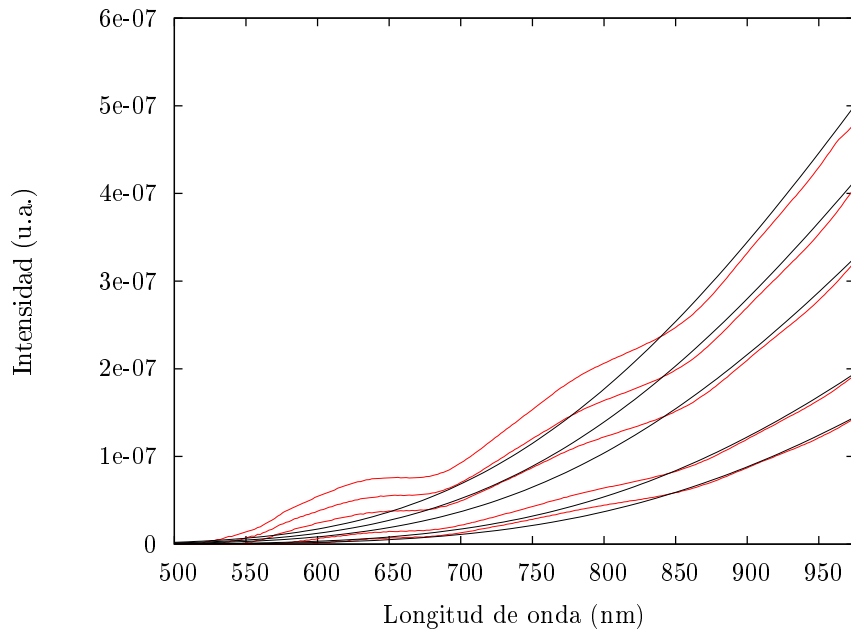


Figura 4.4: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

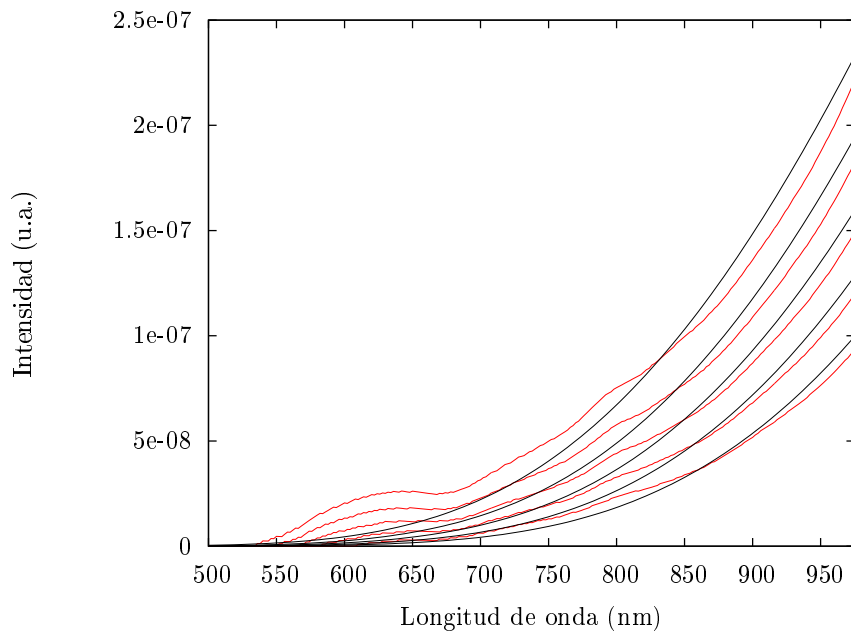


Figura 4.5: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, con la temperatura libre. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

Barrido	T_{libre}	$M(T_{libre})$
BI1	(388, 272 ± 6,207)	(1, 351 ± 0,814) · 10 ⁻¹⁸
BI2	(770, 542 ± 6,342)	(1, 251 ± 0,199) · 10 ⁻¹⁵
BI3	(906, 377 ± 7,659)	(2, 031 ± 0,282) · 10 ⁻¹⁶
BI4	(999, 309 ± 8,906)	(9, 213 ± 1,230) · 10 ⁻¹⁷
BI5	(1080, 26 ± 8,228)	(5, 312 ± 0,560) · 10 ⁻¹⁷
BI6	(1099, 78 ± 9,495)	(6, 286 ± 0,743) · 10 ⁻¹⁷
BI7	(1165, 93 ± 10,63)	(4, 277 ± 0,506) · 10 ⁻¹⁷
BI8	(1213, 01 ± 11,62)	(3, 596 ± 0,430) · 10 ⁻¹⁷
BI9	(1206, 42 ± 10,37)	(4, 876 ± 0,527) · 10 ⁻¹⁷
BI10	(1256, 49 ± 11,63)	(3, 853 ± 0,431) · 10 ⁻¹⁷
BI11	(1310, 38 ± 12,61)	(2, 953 ± 0,331) · 10 ⁻¹⁷
BI12	(1364, 78 ± 13,91)	(2, 295 ± 0,262) · 10 ⁻¹⁷
BI13	(1447, 5 ± 14,67)	(1, 482 ± 0,160) · 10 ⁻¹⁷

Tabla 4.7: Ajustes para la potencia óptica de la bombilla incandescente, con la temperatura como parámetro libre.

Barrido	T_{libre}	$M(T_{libre})$
BH1	(911, 705 ± 6,386)	(1, 111 ± 0,128) · 10 ⁻¹⁶
BH2	(1039, 56 ± 7,746)	(4, 315 ± 0,466) · 10 ⁻¹⁷
BH3	(1145, 87 ± 10,41)	(2, 186 ± 0,263) · 10 ⁻¹⁷
BH4	(1189, 02 ± 8,948)	(2, 615 ± 0,252) · 10 ⁻¹⁷
BH5	(1134, 24 ± 10,71)	(2, 498 ± 0,315) · 10 ⁻¹⁷
BH6	(1358, 28 ± 9,341)	(1, 318 ± 0,103) · 10 ⁻¹⁷
BH7	(1372, 54 ± 9,943)	(1, 662 ± 0,135) · 10 ⁻¹⁷
BH8	(1436, 58 ± 10,97)	(1, 375 ± 0,113) · 10 ⁻¹⁷
BH9	(1512, 80 ± 11,65)	(1, 076 ± 0,085) · 10 ⁻¹⁷
BH10	(1568, 66 ± 12,68)	(9, 560 ± 0,770) · 10 ⁻¹⁸
BH11	(1635, 61 ± 13,29)	(8, 154 ± 0,636) · 10 ⁻¹⁸
BH12	(1754, 01 ± 9,829)	(5, 075 ± 0,257) · 10 ⁻¹⁸

Tabla 4.8: Ajustes para la potencia óptica de la bombilla halógena, con la temperatura como parámetro libre.

por separado.

Dado que la relación entre M y la temperatura tenía en ambas bombillas la misma tendencia, se dedujo que ambas tenían el mismo comportamiento. El valor de M es mayor cuanto menor es la temperatura para poder ajustar los barridos al espectro de cuerpo negro. Esto puede deberse a que en el rango de longitudes de onda que se está considerando (500 nm - 1000 nm), y para las

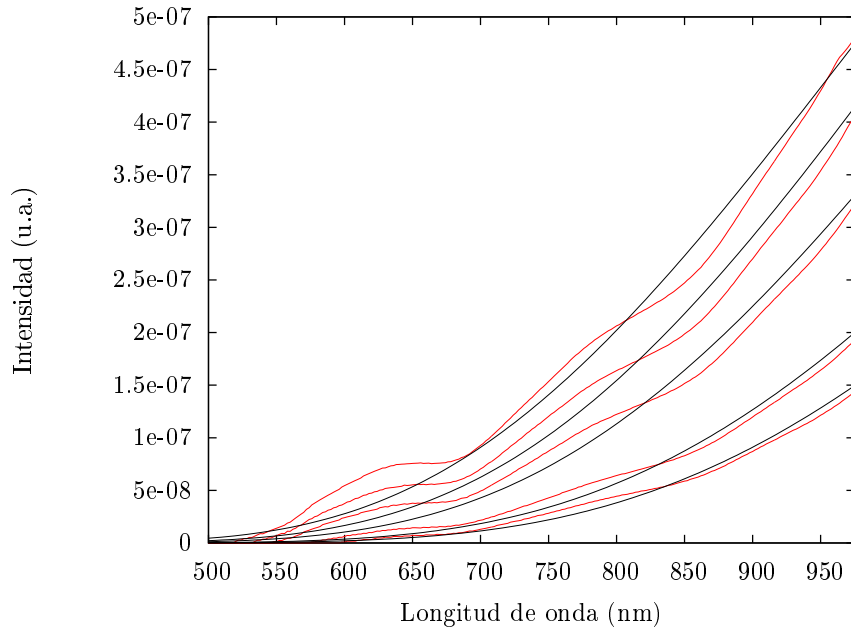


Figura 4.6: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, con la temperatura libre. Como en las anteriores, se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

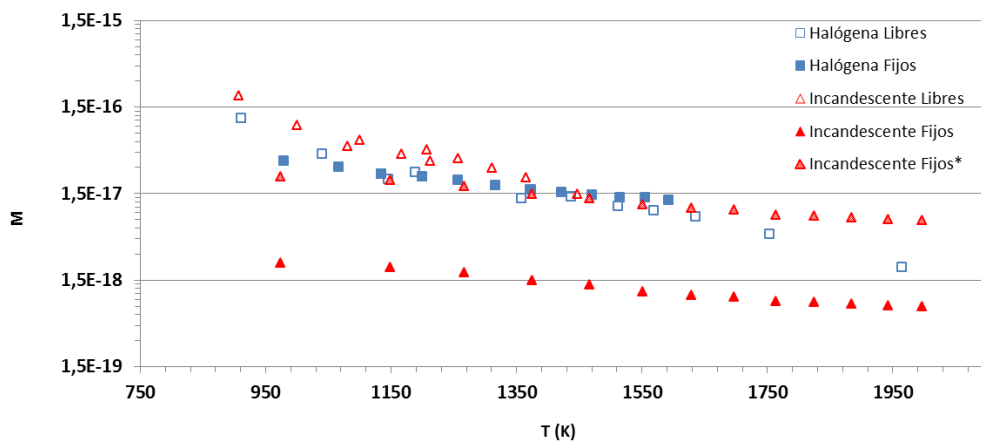


Figura 4.7: Parámetro M frente a la temperatura, en todos los casos, calculado con la potencia óptica. Ver texto para más detalles.

temperaturas con las que se está trabajando, el espectro de radiación de cuerpo negro tiene muy poca intensidad, ya que la longitud de onda del máximo del espectro ideal queda en el infrarrojo.

Se decidió por ello calcular qué porcentaje del área total de cuerpo negro cubrían los espectros dados por el sistema. Este cálculo se llevó a cabo utilizando Octave, calculando primero el área de la curva de cuerpo negro ideal a cada temperatura calculada, después el área de cuerpo negro a la misma temperatura en el rango en longitud de onda que se cubría con el sistema, y por último dividiendo ésta entre aquella. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 4.9 y 4.10, respectivamente para las bombillas incandescente y halógena, utilizando la temperatura libre (ya que ofrecía un mejor ajuste).

T (K)	Área total (u.a.)	Área del espectro (u.a.)	Ratio entre áreas	%
770,54	1,680 e14	1,302 e9	$7,753 \cdot 10^{-6}$	0,0008
906,38	3,399 e14	2,749 e10	$8,087 \cdot 10^{-5}$	0,0081
999,31	5,149 e14	1,396 e11	$2,712 \cdot 10^{-4}$	0,0271
1080,3	7,144 e14	4,622 e11	$6,470 \cdot 10^{-4}$	0,0647
1099,8	7,700 e14	6,015 e11	$7,812 \cdot 10^{-4}$	0,0781
1165,9	9,823 e14	1,380 e12	$1,405 \cdot 10^{-3}$	0,1405
1206,4	1,132 e15	2,198 e12	$1,942 \cdot 10^{-3}$	0,1942
1213,0	1,158 e15	2,365 e12	$2,043 \cdot 10^{-3}$	0,2043
1256,5	1,339 e15	3,758 e12	$2,807 \cdot 10^{-3}$	0,2807
1310,4	1,592 e15	6,410 e12	$4,025 \cdot 10^{-3}$	0,4025
1364,8	1,882 e15	1,055 e13	$5,606 \cdot 10^{-3}$	0,5606
1447,5	2,396 e15	2,104 e13	$8,784 \cdot 10^{-3}$	0,8784

Tabla 4.9: Relación entre el área de cuerpo negro entre 600 y 980 nm aportada por el sistema y el área total, a distintas temperaturas, para la bombilla incandescente.

Puede verse que el porcentaje de área que cubre el espectro aportado por el sistema en relación al área total de cuerpo negro a la misma temperatura sólo cubre el 3% en el mejor de los casos. Es decir, se está ajustando, mediante un modelo ideal, una curva experimental que sólo cubre el 3% del área total. Con el sistema sólo se recoge la parte inicial del espectro, la “cola” de la curva. Esto explica el hecho de que el ajuste no de buenos resultados.

4.6. ¿Es M realmente constante?

Durante todo el trabajo se ha supuesto que el factor por el que había que corregir el espectro medido por el sistema para obtener magnitudes de intensidad debía ser una constante. Sin embargo, la intensidad de la luz difractada por una red de difracción depende de su longitud de onda [4]. Es decir, la red de difracción del monocromador podría estar modificando la señal que el fotodiodo recibe.

T (K)	Área total (u.a.)	Área del espectro (u.a.)	Ratio entre áreas	%
911,71	3,486 e14	3,043 e10	$8,731 \cdot 10^{-5}$	0,0087
1039,6	6,081 e14	2,589 e11	$4,257 \cdot 10^{-4}$	0,0426
1134,2	8,758 e14	9,378 e11	$1,071 \cdot 10^{-3}$	0,1071
1145,9	9,138 e14	1,083 e12	$1,185 \cdot 10^{-3}$	0,1185
1189,0	1,066 e15	1,806 e12	$1,695 \cdot 10^{-3}$	0,1695
1358,3	1,846 e15	9,961 e12	$5,397 \cdot 10^{-3}$	0,5397
1372,5	1,927 e15	1,130 e13	$5,863 \cdot 10^{-3}$	0,5863
1436,6	2,322 e15	1,929 e13	$8,307 \cdot 10^{-3}$	0,8307
1512,8	2,869 e15	3,451 e13	$1,203 \cdot 10^{-2}$	1,2029
1568,7	3,326 e15	5,110 e13	$1,536 \cdot 10^{-2}$	1,5362
1635,6	3,943 e15	7,911 e13	$2,006 \cdot 10^{-2}$	2,0064
1754,0	5,237 e15	1,588 e14	$3,031 \cdot 10^{-2}$	3,0313

Tabla 4.10: Relación entre el área de cuerpo negro entre 600 y 980 nm aportada por el sistema y el área total, a distintas temperaturas, para la bombilla halógena.

Por ello se decidió representar el valor de M en función de la longitud de onda. Esto se llevó a cabo mediante un programa en Octave, que dividía el valor de la intensidad del espectro para cada longitud de onda del barrido entre el valor del espectro ideal de cuerpo negro en esa misma longitud de onda, para una temperatura concreta (se utilizó el valor de la temperatura libre, ya que ofrecía un mejor ajuste). Es decir, en lugar de obtener un único valor de M que ajustase ambos espectros (experimental y teórico) para cada temperatura, se obtuvo un valor de M para cada longitud de onda, a una única temperatura.

En la gráfica 4.8 se ha representado el valor de M para cada longitud de onda, a diferentes temperaturas, para la bombilla incandescente. Puede verse claramente que cuanto menor es la temperatura, mayor es el valor de M (la gráfica está en escala logarítmica). Sin embargo, parece que a partir de los 860 nm el valor de M tiende a estabilizarse, un comportamiento que se acentúa con la temperatura.

Por lo tanto, la consideración de que el valor de M debiera ser constante podría no ser acertada. Habría que hacer un estudio más detallado sobre la intensidad de luz que refracta la red de difracción en función de la longitud de onda.

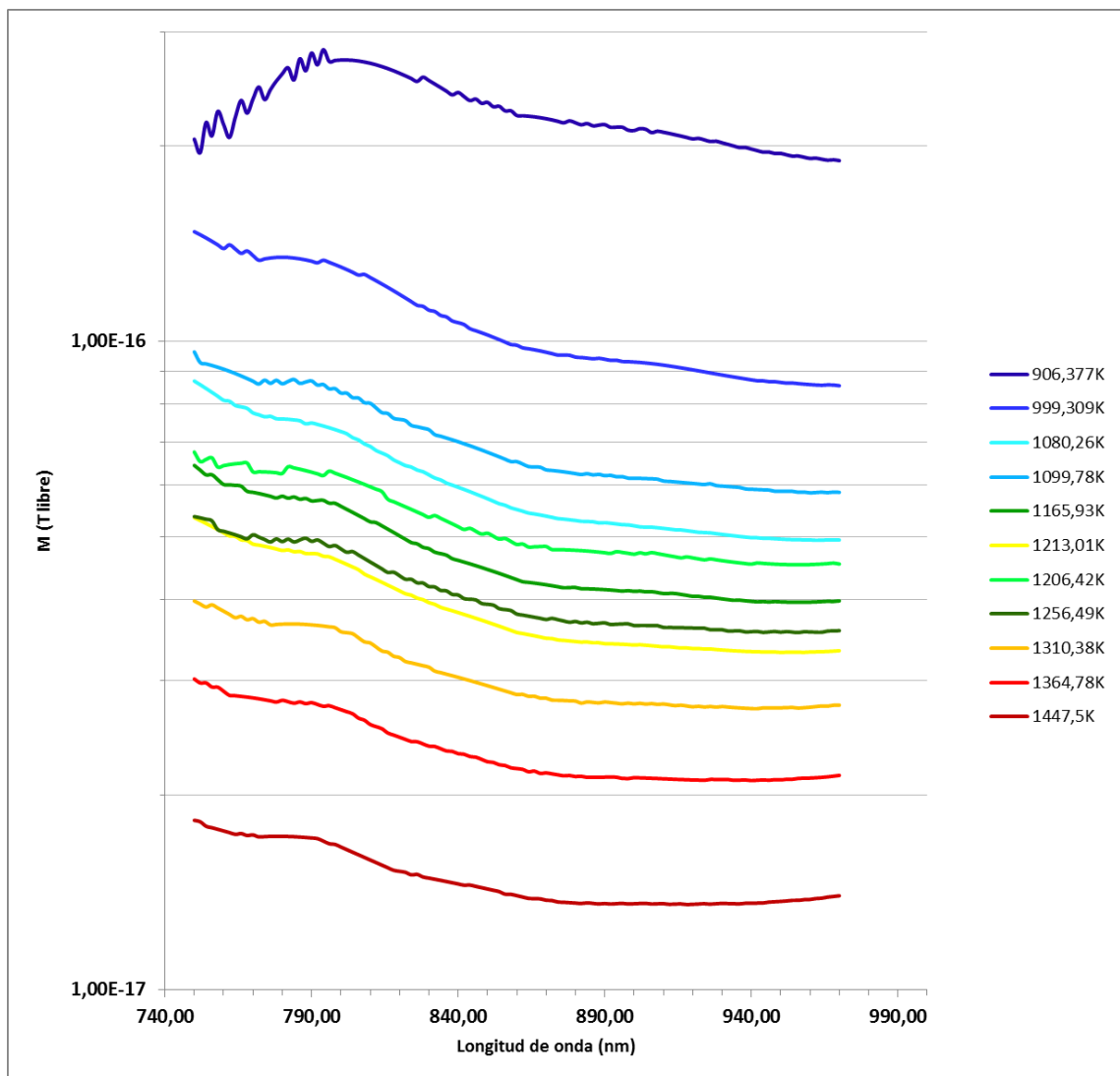


Figura 4.8: Factor de corrección M frente a la longitud de onda, para distintas temperaturas de la bombilla incandescente.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo de fin de grado se pretendía calibrar un sistema de caracterización óptica de fuentes de luz.

En el presente capítulo se exponen las principales conclusiones que pueden extraerse de este trabajo, así como se proponen algunas ideas para mejorar la calibración de cara al futuro.

El objetivo de calibrar en longitud de onda puede considerarse cubierto, ya que al representar la longitud de onda de todas las fuentes utilizadas frente a la supuesta teórica, todas siguen una tendencia lineal con una ordenada en el origen de +12,9 nm. Este valor podría considerarse el error sistemático cometido por el sistema, y sólo faltaría corregirlo mediante código. Aún así en el siguiente apartado se proponen algunas ideas de cara a mejorar la precisión del resultado.

La calibración en intensidad emitida no pudo realizarse. Se calculó la responsividad del fotodiodo, se estimó la potencia óptica medida por el fotodiodo a partir de las etapas de ganancia del sistema, y se ha intentado correlacionar la potencia óptica detectada (según las estimaciones hechas) con el espectro de emisión de cuerpo negro de las lámparas incandescentes usadas. El valor de M se incrementaba mucho para temperaturas bajas, lo que podría significar que se debe multiplicar la señal del fotodiodo por un factor cada vez mayor a medida que desciende la temperatura, para poder ajustar esa señal al espectro de cuerpo negro.

Por otro lado, el cálculo del porcentaje de área cubierto por el sistema respecto al total de cuerpo negro mostró que la idea de utilizar filamentos de tungsteno para realizar ajustes a cuerpo negro podría no ser suficiente, en el sentido de que no alcanzan una temperatura suficiente como para que el ajuste sea fiable. Además, el estudio del comportamiento del factor de relación entre los espectros teórico y experimental con la longitud de onda, hizo ver que había una dependencia entre ambos, por lo que habría que profundizar más en esa línea. Por estos motivos, se plantean otros métodos de calibración distintos al seguido en el presente trabajo, a realizar en un futuro.

5.1. Trabajo futuro

En esta sección se proponen algunas de las ideas que se contemplaron durante la realización del trabajo, pero que finalmente no pudieron llevarse a cabo por falta de tiempo o disponibilidad.

5.1.1. LDs

Se propuso medir el espectro de un diodo láser, debido a su carácter monocromático, para añadir datos a la calibración en longitud de onda. Habría que añadir un filtro previo a la entrada del monocromador, pues la potencia del láser saturaría la medida de la señal dada por el sistema. Sin embargo, para que esta medida contribuya también a la calibración en intensidad, se tendría que tener muy controlado el factor de reducción de intensidad del filtro.

5.1.2. Módulo RGB

Otra de las ideas que se barajaron fue medir el espectro de un módulo RGB. Se trata de un dispositivo electrónico que integra tres LEDs: uno rojo, uno verde y uno azul. La hoja de especificaciones del módulo RGB ASMT-YTB2-0BB02 aporta información sobre la intensidad luminosa de cada uno de los tres LEDs integrados, para una corriente de 20 mA. Por ello, la idea era diseñar y construir una fuente de corriente, de tal forma que se pudiese asegurar que por cada uno de los LEDs circulaban 20 mA, y poder comparar así las intensidades relativas de los picos en el espectro, y darles valor a cada una de las alturas en unidades absolutas.

5.1.3. Irradiancia solar

Dado que los ajustes para la intensidad de luz se estaban realizando utilizando la radiación de cuerpo negro, se pensó que una buena opción sería medir el espectro del Sol. Se contactó con David Mateos, del Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, pues en este grupo realizan mediciones diarias de la cantidad de luz solar que llega a la Tierra. La idea era medir con el sistema a la vez que se realizaban medidas de la intensidad de luz, para después poder relacionarlas directamente. Sin embargo el sistema pasaba de no obtener señal a saturar según se le inclinaba. Se propuso entonces poner una serie de filtros, pero no dio tiempo a realizar las medidas.

5.1.4. Calibración con el Grupo de Óptica Atmosférica

Se contactó con Carlos Toledano y Cristian Velasco, del Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid, exponiéndoles el objetivo del trabajo de fin de grado y los problemas que estaban surgiendo para llevarlo a cabo.

Propusieron hacer una calibración directa de la irradiancia, midiendo el espectro que pudiera ofrecer el sistema de una lámpara calibrada. Se trata de una lámpara de tipo FEL, con una irradiancia calibrada por el NIST, en unidades de $mW/m^2/nm$. El coeficiente de calibración buscado podría obtenerse dividiendo la señal del sistema entre la irradiancia conocida de la lámpara.

La irradiancia está calibrada para una distancia al fotodetector de 50 cm. Lo ideal sería poder colocar la lámpara a 50 cm del sistema, para poder comparar directamente ambas señales. Sin embargo, para que la calibración sea correcta, el sistema debe “ver” toda la lámpara. Dado que la entrada del sistema está diseñada para LEDs de 5 mm de diámetro, puede que una distancia de 50 cm no sea suficiente para lograr esto. Sin embargo, la lámpara puede colocarse a una distancia



Figura 5.1: Imagen del sistema durante la medición del espectro del Sol con el GOA.

mayor, hasta que la señal recibida cumpla la ley del cuadrado de la distancia, punto que será a partir del cuál el sistema vea la lámpara entera. Cuando esto se consiga, habrá que calcular la irradiancia de la lámpara para la nueva distancia, y después comparar las señales.

5.2. Aplicaciones del sistema

5.2.1. Astronomía

Una idea interesante que se propuso fue la de poder medir con el sistema espectros de estrellas. La idea era conectar mediante fibra óptica el sistema a un telescopio del Grupo Universitario de Astronomía. Para ello se diseñó una pieza que acoplase la fibra óptica a la entrada diseñada para LEDs. Los espectros obtenidos se ajustarían mucho mejor al espectro teórico de cuerpo negro, ya que están a más temperatura que el filamento de una bombilla, lo que además implica que el área recogida por el sistema sería mayor en relación a la teórica total. Ésto podría asegurar un mejor ajuste del parámetro M .

Por otro lado, existe bibliografía sobre la cantidad de luz que llega a la Tierra de ciertas estrellas concretas, por lo que podrían realizarse ajustes directos sobre la intensidad de radiación.

5.2.2. Aplicaciones del sistema: estudio de la emisión de una fuente en función de la distancia

En el presente trabajo se realizaron todos los barridos con las lámparas a una distancia fija, si bien era notable la variación de la intensidad de luz recibida en función de si la lámpara se acercaba o se alejaba de la entrada del sistema. Esto podría ser útil a la hora de hacer un estudio de tal efecto.

Apéndice A

Ajuste de datos previo

En este apéndice se muestran los resultados obtenidos del ajuste a la ecuación de cuerpo negro utilizando las cuentas digitales que aportaba el microcontrolador.

A.1. Ajuste con Gnuplot a la temperatura fija

El primer ajuste que se llevó a cabo fue utilizando las cuentas digitales del microcontrolador como señal a ajustar.

En las figuras A.1 y A.2 puede verse la representación de todos los barridos realizados para cada bombilla.

El ajuste se hizo mediante la herramienta “fit” de Gnuplot. En este primer apartado se utilizó la temperatura fija para cada barrido, dejando M como parámetro libre a la hora de ajustar. Al finalizar el ajuste, el programa indica el valor de M calculado y su error para ajustar ambas curvas (experimental y 4.5 a la misma temperatura fija).

En las tablas A.1 y A.2 se presentan los resultados obtenidos del primer ajuste, mostrando el valor de M obtenido para cada barrido junto a la temperatura fija del mismo.

Con los datos de M obtenidos para cada barrido, se representó el espectro obtenido con el sistema junto a la ecuación de ajuste 4.5 corregida por el valor de M correspondiente, para ver la fiabilidad del ajuste. En las figuras A.3 y A.4 se presentan cinco de los barridos realizados para cada bombilla (no se han representado todos los barridos para facilitar la visibilidad de la gráfica), ajustados a la ecuación de cuerpo negro 4.5 con el valor de M obtenido con Gnuplot.

Puede verse que el ajuste para los barridos de la bombilla incandescente es peor que para la bombilla halógena. De las tablas A.1 y A.2 se puede ver que el orden de magnitud de M para cada temperatura en ambas bombillas es similar. Sin embargo, el valor de M dista bastante de ser constante; en vez de eso, se puede apreciar que decrece con la temperatura. Por ello se representó el valor de M frente a la temperatura fija, para poder apreciar mejor esa dependencia. El resultado puede verse al final del apéndice, en la figura A.7.

Puede verse que la tendencia de M con la temperatura fija es la misma para ambas bombillas: M decrece con la temperatura, y aumenta rápidamente para temperaturas bajas. En las gráficas

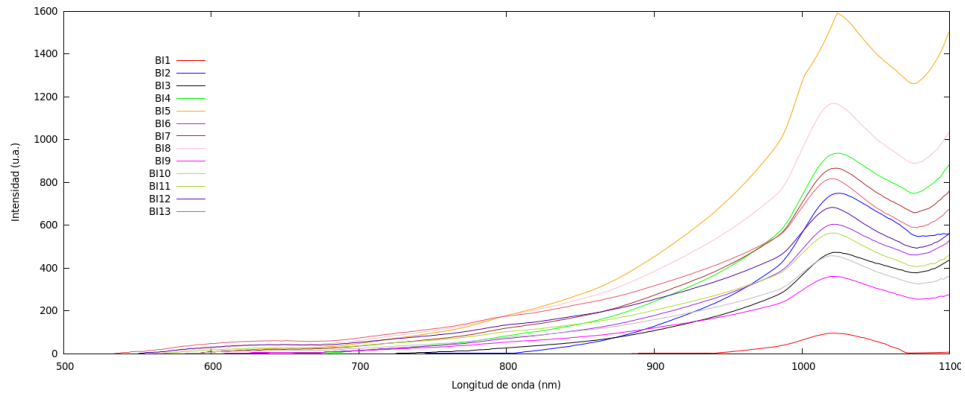


Figura A.1: Barridos realizados para la bombilla incandescente, en un rango de 500 a 1100nm.

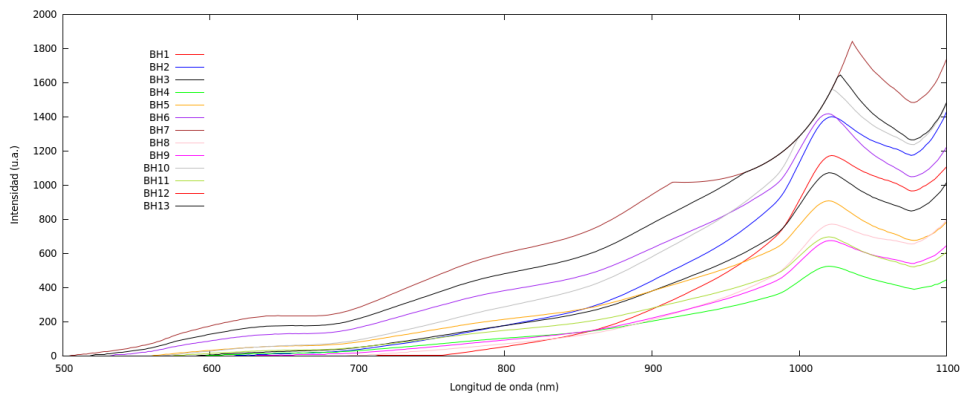


Figura A.2: Barridos realizados para la bombilla halógena, en un rango de 500 a 1100nm.

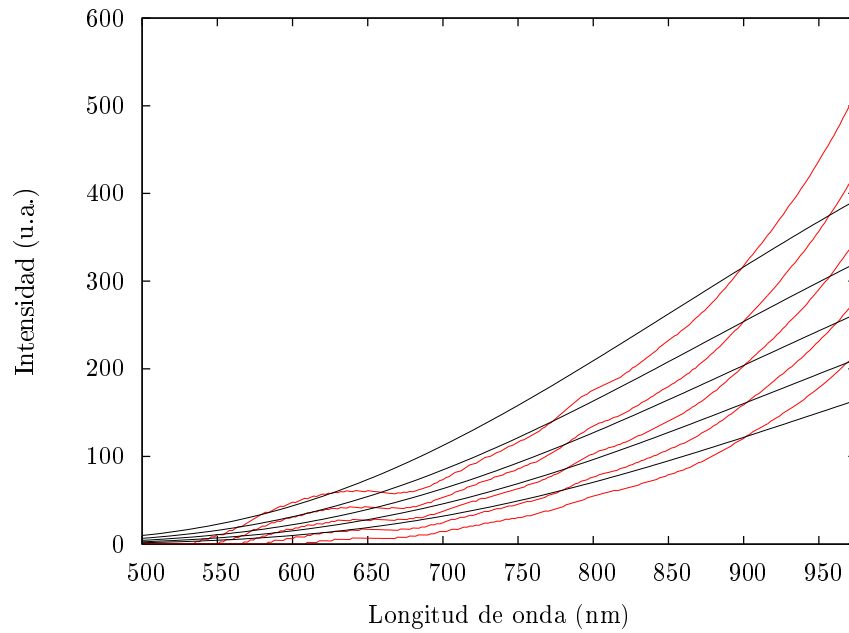


Figura A.3: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

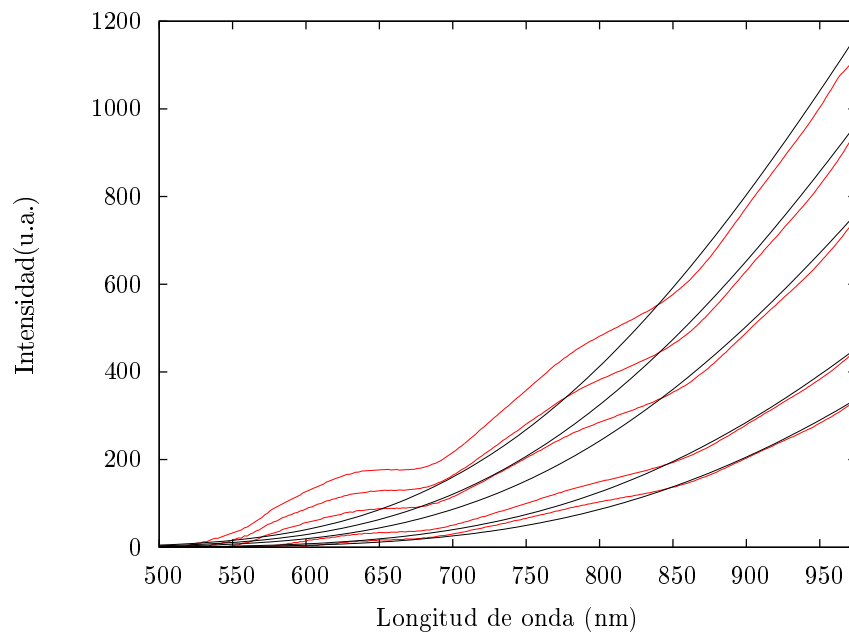


Figura A.4: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, usando la temperatura fija. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

Barrido	T_{fija}	$M(T_{fija})$
BI1	973,47	$(3,29 \pm 0,24) \cdot 10^{-7}$
BI2	1148,47	$(3,29 \pm 0,08) \cdot 10^{-7}$
BI3	1266,71	$(6,69 \pm 0,13) \cdot 10^{-8}$
BI4	1374,71	$(5,43 \pm 0,09) \cdot 10^{-8}$
BI5	1466,72	$(4,76 \pm 0,08) \cdot 10^{-8}$
BI6	1551,32	$(1,04 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$
BI7	1629,03	$(9,53 \pm 0,18) \cdot 10^{-9}$
BI8	1697,28	$(8,97 \pm 0,17) \cdot 10^{-9}$
BI9	1763,03	$(1,96 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$
BI10	1825,04	$(1,88 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$
BI11	1884,51	$(1,80 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$
BI12	1941,98	$(1,73 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$
BI13	1996,67	$(1,71 \pm 0,03) \cdot 10^{-9}$

Tabla A.1: Tabla que presenta los valores obtenidos de M para la lámpara incandescente, utilizando la temperatura fija.

Barrido	T_{fija}	$M(T_{fija})$
BH1	979,80	$(5,51 \pm 0,03) \cdot 10^{-6}$
BH2	1066,14	$(1,13 \pm 0,01) \cdot 10^{-6}$
BH3	1134,27	$(9,34 \pm 0,05) \cdot 10^{-7}$
BH4	1199,78	$(2,23 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$
BH5	1257,40	$(2,08 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$
BH6	1316,89	$(1,79 \pm 0,01) \cdot 10^{-7}$
BH7	1372,79	$(3,87 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$
BH8	1421,87	$(3,58 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$
BH9	1469,87	$(3,38 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$
BH10	1514,53	$(3,17 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$
BH11	1554,57	$(3,11 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$
BH12	1592,99	$(2,90 \pm 0,02) \cdot 10^{-8}$

Tabla A.2: Tabla que presenta los valores obtenidos de M para la lámpara halógena, utilizando la temperatura fija.

también se ve que los datos quedan “escalonados”; esto se debe a que quedaban agrupados en función de la ganancia de la etapa de acondicionamiento del fotodiodo que se hubiese seleccionado (ver sección 2.2).

Dado que el ajuste realizado con la temperatura fija no era del todo bueno, se optó por dejar tanto M como la temperatura como parámetros libres en el ajuste, de modo que Gnuplot se

encargase de seleccionar el valor de la temperatura que mejor ajustara los datos experimentales a la ecuación teórica 4.5.

A.2. Ajuste con Gnuplot usando parámetros libres

Para realizar este nuevo ajuste, se incluyó T como parámetro libre vía el que hacer el ajuste al utilizar la herramienta “fit” de Gnuplot. Es decir, no se le dio un valor a la temperatura para ajustar el espectro de cuerpo negro correspondiente, sino que se pidió al programa que calculase qué temperatura y qué valor de M tendría que tener la ecuación 4.5 para ajustarse a los datos experimentales. Los valores de M y de la temperatura como parámetros libres calculados para cada barrido se muestran en las tablas A.3 y A.4.

Barrido	T_{libre}	$M(T_{libre})$
BI3	973,05	$(2,44 \pm 0,19) \cdot 10^{-6}$
BI4	1077,51	$(1,14 \pm 0,12) \cdot 10^{-6}$
BI5	1155,94	$(7,81 \pm 0,77) \cdot 10^{-7}$
BI6	1165,99	$(2,73 \pm 0,28) \cdot 10^{-7}$
BI7	1221,45	$(2,24 \pm 0,24) \cdot 10^{-7}$
BI8	1263,41	$(2,06 \pm 0,23) \cdot 10^{-7}$
BI9	1259,29	$(6,65 \pm 0,69) \cdot 10^{-8}$
BI10	1302,38	$(5,79 \pm 0,61) \cdot 10^{-8}$
BI11	1340,45	$(5,23 \pm 0,57) \cdot 10^{-8}$
BI12	1377,04	$(4,77 \pm 0,53) \cdot 10^{-8}$
BI13	1424,39	$(4,06 \pm 0,44) \cdot 10^{-8}$

Tabla A.3: Tabla que presenta los valores obtenidos de M y T para la lámpara incandescente, ajustando ambos como parámetros libres.

De nuevo se representó el resultado del ajuste, esta vez para la temperatura libre. En las gráficas A.5 y A.6 pueden verse cinco de los espectros obtenidos para cada una de las lámparas junto al espectro de cuerpo negro teórico para la misma temperatura, ajustado según el parámetro M.

Viendo que el valor de M seguía decreciendo con la temperatura, volvió a representarse esa dependencia. En la gráfica A.7 puede verse que M sigue teniendo la misma tendencia decreciente con la temperatura que presentaba para la temperatura fija, y además sigue teniendo el mismo carácter en ambas bombillas.

También se compararon las temperaturas de cada barrido obtenidas por ambos métodos (temperatura fija calculada según [11] y temperatura libre calculada por Gnuplot). La relación entre ambas puede verse en la gráfica A.8. Se ve que la tendencia no es exactamente lineal, y que la desviación no es la misma en ambas bombillas.

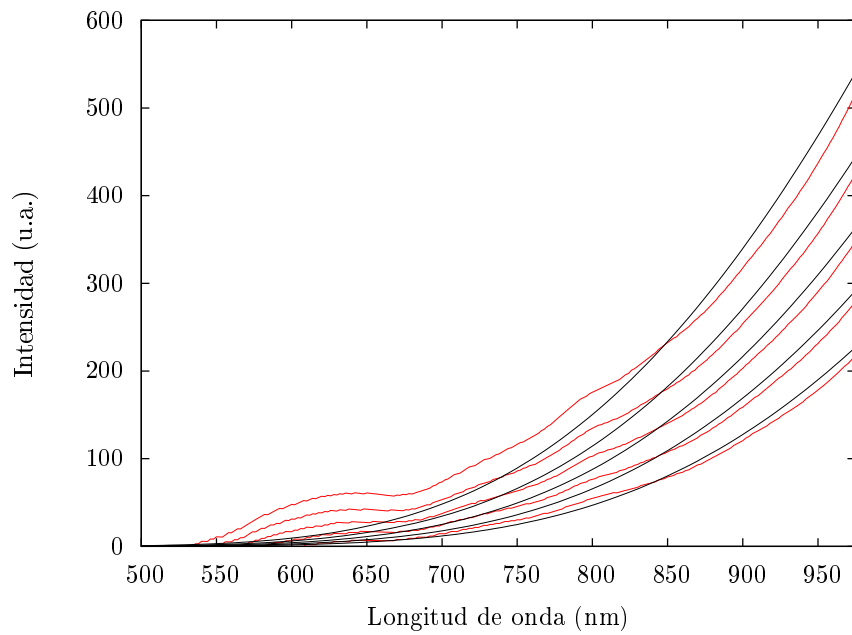


Figura A.5: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla incandescente, usando la temperatura libre. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

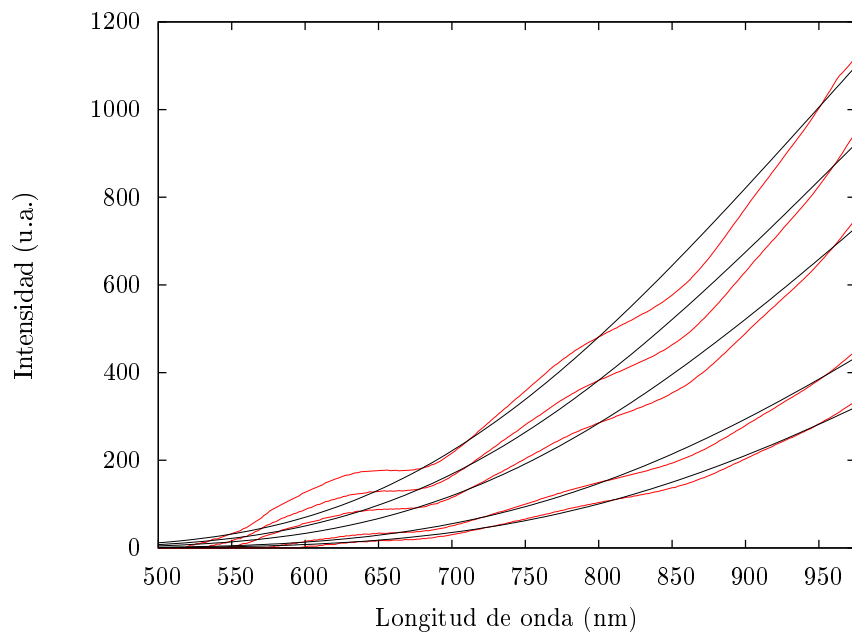


Figura A.6: Ajustes al espectro de cuerpo negro de cinco barridos a temperaturas diferentes, para la bombilla halógena, usando la temperatura libre. Se ha representado el espectro en rojo, y el ajuste en negro.

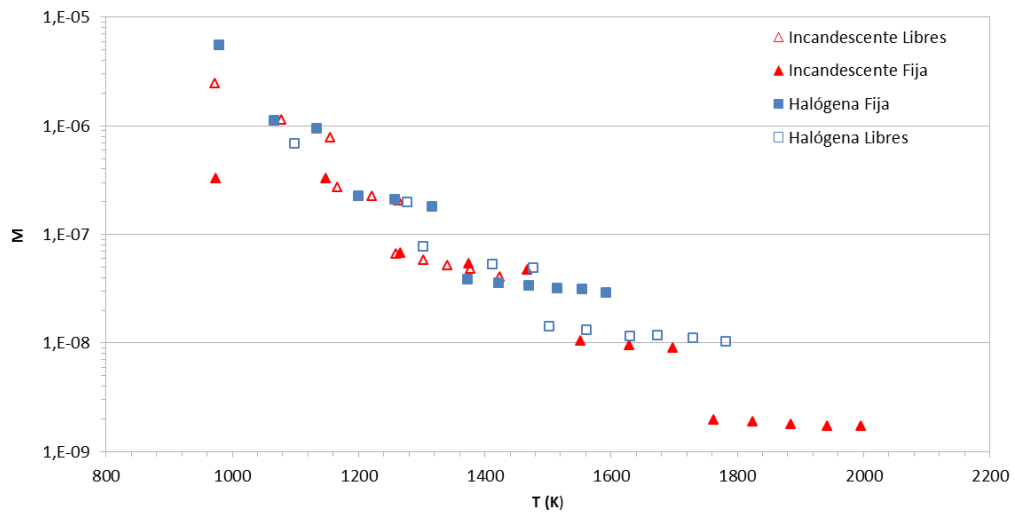


Figura A.7: Representación del valor de M en función de la temperatura, para todos los casos. El eje de ordenadas está en escala logarítmica.

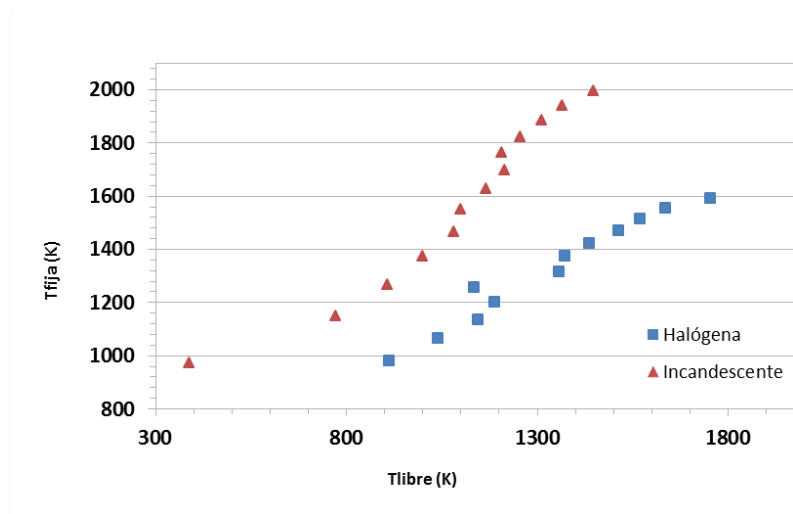


Figura A.8: Relación entre las temperaturas fija y libre para cada bombilla.

Barrido	T_{libre}	$M(T_{libre})$
BH2	1098,52	$(6,87 \pm 0,76) \cdot 10^{-7}$
BH3	1277,29	$(1,99 \pm 0,12) \cdot 10^{-7}$
BH4	1303,39	$(7,68 \pm 0,50) \cdot 10^{-8}$
BH5	1411,94	$(5,26 \pm 0,31) \cdot 10^{-8}$
BH6	1477,12	$(4,91 \pm 0,26) \cdot 10^{-8}$
BH7	1502,07	$(1,41 \pm 0,09) \cdot 10^{-8}$
BH8	1561,57	$(1,31 \pm 0,08) \cdot 10^{-8}$
BH9	1630,88	$(1,16 \pm 0,07) \cdot 10^{-8}$
BH10	1673,62	$(1,17 \pm 0,07) \cdot 10^{-8}$
BH11	1729,62	$(1,11 \pm 0,06) \cdot 10^{-8}$
BH12	1781,79	$(1,03 \pm 0,05) \cdot 10^{-8}$

Tabla A.4: Tabla que presenta los valores obtenidos de M y T para la lámpara halógena, ajustando ambos parámetros como libres

Apéndice B

Programas en Octave

En este apéndice se muestran los programas en Octave utilizados para representar el valor del factor M en función de la longitud de onda, y para el cálculo del porcentaje de área del espectro de cuerpo negro sobre el que se trabaja.

B.1. Cálculo del valor del factor M en función de la longitud de onda

```
function [v] = calculoM(name,t)
a=num2str(name);
temp=load(a);
a1=temp(:,1);
a4=temp(:,4);

clear m_individual bb1 M
z1 = 201;
z = 276;
a12=a1(z1:z);
a42=a4(z1:z);

f = @(x,T) 3.74399e-16 / ((x*10^(-10))^5*(exp(0.014403/((x*10^(-10))*T))-1));

for i=1:length(a12)
    bb1(i)=f(a12(i),t);
endfor

M = lsqnonneg(bb1',a42)
```

```

for i=1:1:length(a42)
    m_individual(i)=a42(i)/bb1(i);
endfor

f=[m_individual'];
save('nombre','f','-ascii');

save('longitudes','a12','-ascii');

figure
title("Espectro frente a CN*M");
plot(a12,a42,a12,bb1*M)
xlim([a1(z1) a1(z)])

figure
title("M frente a lambda");
plot(a12,m_individual)

v=[t,M];
endfunction}

```

B.2. Cálculo del porcentaje de área del espectro de cuerpo negro

```

function [v] = Area(t)
f = @(x,T) 3.74399e-16 / ((x*10^(-10))^5 * (exp(0.014403 / ((x*10^(-10)) * T)) - 1));

v = 1:1:100000;

for i=1:1:length(v)
a(i)=f(v(i),t);
endfor

integ =0;

for i=1:1:length(a)-1
integ = integ+a(i)*(v(i+1)-v(i));
endfor

```



```
Area_tot = integ;  
  
integ =0;  
  
for i=6000:1:9800  
integ = integ+a(i)*(v(i+1)-v(i));  
endfor  
  
Area_detector = integ;  
  
ratio = Area_detector/Area_tot;  
  
porcentaje=ratio*100;  
  
v=[t,Area_tot,Area_detector,ratio,porcentaje]  
  
endfunction
```


Bibliografía

- [1] JORGE FERNÁNDEZ LUCAS, *Diseño y fabricación de un sistema electrónico para la caracterización óptica de diodos emisores de luz*, Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid (2015).
- [2] BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES, *International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, JCGM 200:2008
- [3] J. RIU, R. BOQUÉ, A. MAROTO y F. X. RIUS, *Trazabilidad en medidas físicas mediante calibración directa: calibración de una balanza.*, Departamento de Química Analítica y Química Orgánica, Instituto de Estudios Avanzados, Universitat Rovira i Virgili.
- [4] CASAS, JUSTINIANO, *Óptica*
- [5] D. PARDO COLLANTES and L. A. BAILÓN VEGA, *Elementos de electrónica*, Universidad de Valladolid.
- [6] BAHAA E.A. SALEH and MALVIN CARL TEICH, *Fundamentals of photonics*, John Wiley & Sons (2007).
- [7] BEATRIZ M. O'DONELL, JOSÉ D. SANDOVAL and FERNANDO PAUKSTE, *Fuentes Luminosas.*
- [8] *Basic Atomic Spectroscopic Data. Strong Lines of Sodium (Na)*, National Institute of Standards and Technology.
- [9] *Basic Atomic Spectroscopic Data. Strong Lines of Mercury (Hg)*, National Institute of Standards and Technology.
- [10] J.E.SANSONETTI and W.C.MARTIN, J.Phys.Chem. Ref. Data, Vol. 34, 1559 (2009).
- [11] C J WORKOWSKI, *Temperature measurements in field emission microscopy. Part I: A tungsten resistance temperature scale.*, Institute of Experimental Physics, University of Wroclaw, 50-205 Wroclaw, Poland (1976).