

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Blue–Light Hazard:

Cálculo y construcción de un sensor adaptado
Protección efectiva de diferentes Lentes Intraoculares
comerciales

TRABAJO PARA OPTAR A LA SUFICIENCIA
INVESTIGADORA

realizado por

Diego Delgado Bueno

Director: Dra. Alicia Pons Anglio
Instituto de Física Aplicada (CSIC)

Tutor: Dr. Luís Plaja Rustein
Departamento de Física Aplicada.
Universidad de Salamanca

Salamanca, 2006

Agradecimientos

Esta memoria es el resultado del trabajo realizado prácticamente en su totalidad durante el año 2004 en el Departamento de Metrología del Instituto de Física Aplicada (CSIC) bajo la dirección de la Dra Alicia Pons a quien quiero expresar mi sincero agradecimiento por proponerme esta investigación y por sus constantes y pacientes consejos, imprescindibles para llevarla a cabo, así como por las facilidades de las que dispuse para completar el periodo de docencia previo al presente trabajo durante mi estancia como becario del Departamento.

Mi agradecimiento a los doctores Corróns y Gutierrez, jefes del Departamento e Instituto respectivamente durante el desarrollo del trabajo, por haberme permitido el uso de los laboratorios e instalaciones del mismo durante el desarrollo de la investigación.

A los compañeros y colegas del Instituto de los que tantas cosas he aprendido durante el intenso año que compartimos. En especial los colegas del '230', Alejandro, Jose Francisco y Vanesa por su filosofía especial sin olvidar el apoyo técnico prestado, Jose Francisco como responsable de los bancos de calibrado de detectores y, claro, Vanesa y más recientemente Rodrigo por parte del laboratorio de espectrofotometría.

A los compañeros del '326' donde tantas horas pasé, a todos los vecinos de 'Óptica de Metales' por su estupenda hospitalidad, y claro, a los becarios/as que encontré y conocí por los pasillos y con los que grandes ratos he y espero pasar.

Al Dr Corredera fuente de simpatía, cercanía y de conocimientos, al Dr Campos por su apoyo y sus consejos.

A los Drs Arias y Roso, del Grupo de Óptica de la Universidad de Salamanca por el apoyo prestado, sin olvidar al Dr Luís Plaja por aceptar ser el tutor de este trabajo ante la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca.

A mis padres, familia y a los amigos de Salamanca y repartidos por la intrincada geografía peninsular e insular con los que mato o intento matar los moderados ratos de ocio y lucidez que dispongo.

Índice general

1. Introducción:	1
2. Cálculo del sensor adaptado: Planteamiento del problema.	7
2.1. Selección de filtros:	8
2.2. Ajuste por mínimos cuadrados	8
2.3. Factor de escalado de las combinaciones de filtros:	12
2.4. Bondad del ajuste. Análisis de los valores:	14
2.5. Elección del detector:	18
3. Solución adoptada. Realización práctica del instrumento de medida del BLH.	29
3.1. Factor de escalado:	30
3.2. Realización práctica de la solución adoptada:	31
4. Lentes intraoculares.	37
4.1. Transmitancia espectral de las lentes intraoculares.	37
4.2. Comparación con el cristalino. Modificación del espectro de acción del BLH	38
4.3. Riesgo potencial de fuentes de radiación.	41
5. Conclusiones	45
A. Código Visual Basic 6.0	47

Índice de figuras

1.1. Espectro de acción del ' <i>Blue-Light Hazard</i> ', caso estándar y afático	4
2.1. Combinaciones totales desde dos hasta seis filtros en serie a calcular frente al número de filtros	15
2.2. Formulario principal, programa de ajuste de la combinación de filtros	16
2.3. Formulario de cálculo exhaustivo, programa de ajuste de la combinación de filtros	16
2.4. Responsividades relativas del fotodiodo de Silicio y del tubo fotomultiplicador	19
2.5. Responsividades relativas de los Fotodiodos CSi y GaP	19
2.6. Responsividad obtenida para el mejor ajuste con el fotomultiplicador Hamamatsu frente al ' <i>Blue-Light Hazard</i> '	27
2.7. Responsividad obtenida para el mejor ajuste con fotodiodos de silicio y CSi frente al ' <i>Blue-Light Hazard</i> '	27
2.8. Responsividad obtenida para el mejor ajuste con fotodiodos de silicio y GaP frente al ' <i>Blue-Light Hazard</i> '	28
2.9. Responsividad obtenida para el mejor ajuste con un fotodiodo de silicio frente al ' <i>Blue-Light Hazard</i> '	28
3.1. Relación de áreas un detector	31
3.2. Esquema electrónica suma y amplificación de señales	31
3.3. Transmitancia medida para los filtros SCHOTT adquiridos para la región visible	33
3.4. Transmitancia obtenida con los filtros SCHOTT destinados a la región UV	33
3.5. Responsividad final obtenida tras recalcular los filtros comprados en relación al BLH, obteniendo $f'_1 = 10,97\%$	35
4.1. Transmitancia de los cuatro modelos de LIO estudiadas	39

4.2. Comparación entre la transmitancia experimental de diferentes LIOs y el cristalino obtenido	40
4.3. Espectro de acción del <i>Blue-Light Hazard</i> y las modificaciones calculadas para cada LIO	40
4.4. Fuentes de irradiancia relativa introducidas para evaluar el BLH .	43
4.5. Irradiancia relativa de las lámparas estudiadas	43
A.1. Diagrama de flujo de un ajuste estándar del programa	47

Índice de tablas

1.1. Espectros de acción BLH	3
2.1. Responsividad espectral fotomultiplicador y fotodiodo de silicio	20
2.2. Responsividad fotodiodos SiC, GaP	22
2.3. Mejores resultados obtenidos con cada combinación	23
2.4. Datos de transmitancia calculada fotomultiplicador Hamamatsu	24
2.5. Datos de transmitancia calculada fotodiodo silicio	25
2.6. Datos de la responsividad conjunta relativa calculada con el fotodiodo de silicio y los fotodiodos de SiC y GaP	26
3.1. Mejores resultados seleccionados para la realización del detector BLH	30
3.2. Espesores y parámetros del ajuste tras recalcular los filtros SCHOTT comprados	32
3.3. Responsividad espectral medida con fotodiodos de silicio y la combinación seleccionada frente a la curva BLH	34
4.1. Características lentes LIO estudiadas	38
4.2. Modificación espectro de acción BLH	42
4.3. Valores de X_{blue} para las lentes LIO con diferentes fuentes	44
4.4. $X_{blue\text{relativo}}$ para las lentes LIO	44

Capítulo 1

Introducción:

El ojo humano, en general, por efecto de la absorción de la radiación óptica está expuesto a sufrir daño a través de varios mecanismos diferentes. La cornea y el cristalino, sometidos a radiación ultravioleta e infrarroja potencialmente peligrosas pueden sufrir lesiones térmicas o fotoquímicas. La retina, a su vez, por absorción de radiación óptica de intensidad suficiente puede sufrir lesiones térmicas (quemaduras de retina). Cuando la irradiancia es menor pero el tiempo de exposición suficientemente prolongado, aparece el efecto conocido como '*Blue-Light Hazard*' (BLH) o fotoretinitis. Se trata de lesiones de origen fotoquímico, no térmico, irreversibles; relacionadas con la absorción de radiación por ciertos pigmentos fotosensibles presentes en la retina.

La aparición del BLH está condicionada a una intensidad umbral y parece ser independiente de la zona iluminada. Se trata de un proceso en general poco conocido y poco presente en la literatura, confundido en ocasiones con las lesiones térmicas.

El BLH se define a través de su espectro de acción, éste, representa la capacidad relativa de cada longitud de onda para producir lesiones. Fue inicialmente recomendado por la '*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) [1, 2]' y más recientemente por la '*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*' (ICNIRP) [3]. Se distinguen dos espectros de acción para este efecto (BLH): El espectro de acción para un ojo normal $B(\lambda)$ y un segundo espectro de acción para aquellas personas cuyo cristalino ha sido extraído quirúrgicamente (afáticos) $A(\lambda)$ [4]. La principal diferencia entre ambos está directamente relacionada con la capacidad del cristalino de absorber gran parte de la radiación ultravioleta incidente. La Tabla 1.1 muestra los valores de estos dos espectros de acción, que se han representado gráficamente en la Figura (1.1).

La condición de afático es, hoy en día, rara; en las intervenciones de cataratas es habitual reemplazar el cristalino extraído por un lente intraocular (LIO) que hace el papel de éste. A pesar de que las primeras lentes intraoculares que aparecieron en el mercado no bloqueaban el ultravioleta y el paciente estaba potencialmente expuesto al efecto del BLH de manera similar a un afático, actualmente las LIO incorporan filtros UV que tratan de reproducir el comportamiento del cristalino.

El espectro de acción del BLH juega el papel de función de peso espectral para evaluar los valores límite umbral (TLV) a partir de los cuales se calcula el riesgo potencial de una fuente para producir este efecto, así como el establecimiento de los tiempos máximos de exposición. Las fuentes de radiación de banda ancha convencionales emiten diferentes longitudes de onda con diferente riesgo de producir el efecto considerado; por lo tanto, el BLH depende no sólo de la potencia total emitida por una fuente, sino también de su distribución espectral. El riesgo relativo de una determinada fuente de radiación se define como:

$$X_{blue} = \sum_{300}^{700} X_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda \quad (1.1)$$

Donde X_{λ} será la radiancia o la irradiancia espectral de la fuente, $B(\lambda)$ el espectro de acción para el BLH y $\Delta\lambda$ el intervalo de longitudes de onda alrededor del cual está definido el BLH o sobre el que se ha medido la radiancia o la irradiancia espectral de la fuente. La magnitud adecuada para evaluar el riesgo de daño fotoquímico es la irradiancia sobre la retina, sin embargo, los TLV están establecidos teniendo en cuenta la relación entre esta magnitud y la radiancia o la irradiancia espectral de la fuente, así, la expresión anterior indica que X_{blue} se puede obtener midiendo, de acuerdo a las condiciones de medida, la irradiancia o la radiancia espectral de la fuente problema en el intervalo espectral adecuado 305-700.

Sin embargo, la medida de cualquiera de estas funciones (irradiancia o radiancia) en la práctica es técnicamente difícil. Habitualmente es más conveniente un instrumento de medida de respuesta espectral idéntica a la de la función a medir (el BLH). Así, el instrumento será capaz de medir directamente el riesgo de cualquier fuente de radiación.

Actualmente, es posible encontrar cierta diversidad de instrumentos, con mejor o peor aproximación, diseñados para la medida del efecto BLH; sin embargo, en ningún caso (al menos hasta lo que nosotros conocemos) estos instrumentos son capaces de medir el efecto de longitudes de onda inferiores a 380nm.

Tabla 1.1: Espectros de acción adoptados por la ICNIRP para el '*Blue-Light Hazard*' caso estándar y afático

Longitud de onda	Espectro de acción BLH	Espectro de acción afático
305	0.01	6.00
310	0.01	6.00
315	0.01	6.00
320	0.01	6.00
325	0.01	6.00
330	0.01	6.00
335	0.01	6.00
340	0.01	5.88
345	0.01	5.71
350	0.01	5.46
355	0.01	5.22
360	0.01	4.62
365	0.01	4.29
370	0.01	3.75
375	0.01	3.56
380	0.01	3.19
385	0.0125	2.31
390	0.025	1.88
395	0.050	1.58
400	0.100	1.43
405	0.200	1.30
410	0.400	1.25
415	0.800	1.20
420	0.900	1.15
425	0.950	1.11
430	0.980	1.07
435	1.000	1.03
440	1.000	1.000
445	0.970	0.970
450	0.940	0.940
455	0.900	0.900
460	0.800	0.800
465	0.700	0.700
470	0.620	0.620
475	0.550	0.550
480	0.450	0.450
485	0.400	0.400
490	0.220	0.220
495	0.160	0.160
500-600	$10^{(450-\lambda)/50}$	$10^{(450-\lambda)/50}$
600-700	0.001	0.001

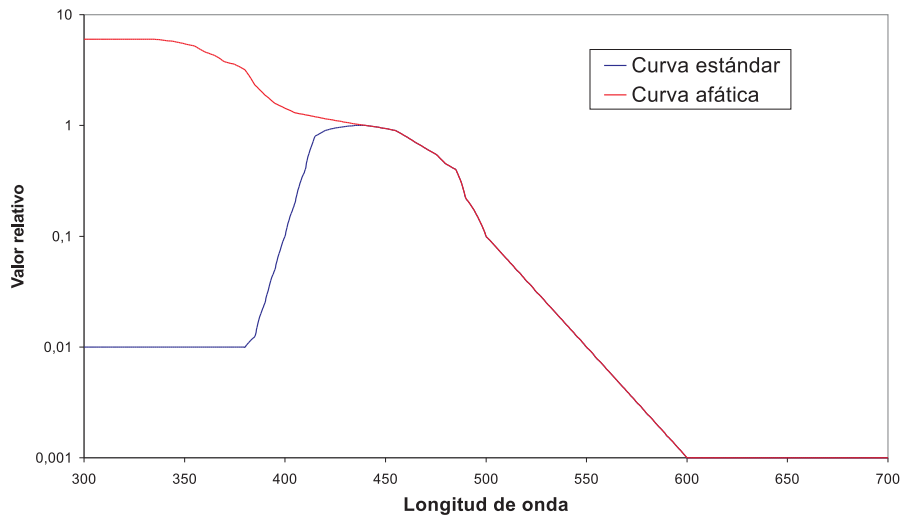


Figura 1.1: Espectro de acción del 'Blue-Light Hazard', caso estándar y afático (eje de ordenadas en escala logarítmica)

En general, la absorción del cristalino en el intervalo 300-380nm, hace que a la retina llegue muy poca radiación ultravioleta por lo que se podría pensar que no es necesario incluir dicha región en el rango de trabajo de esos instrumentos. Sin embargo, las diferencias en transmitancia del cristalino en función, entre otras, de la edad de la persona y, considerando al aumento en el uso de fuentes de radiación de alto contenido espectral en la región 300-380nm, parece conveniente extender el rango de medida de estos instrumentos, de forma que incluyan todo el intervalo en el que el BLH está definido.

Por otra parte, como ya hemos mencionado anteriormente, caso de ser necesario, el cristalino es sustituido quirúrgicamente por una lente intraocular. Es posible encontrar referencias en la literatura [5, 6, 7, 8] que expresan diferencias en algunos casos significativas, en la transmitancia espectral de estas lentes con respecto a la transmitancia del cristalino y, teniendo en cuenta el papel del cristalino en relación a la protección ocular frente el BLH, esto se puede traducir en un aumento del riesgo potencial de diferentes fuentes de radiación a producir el efecto BLH sobre personas en estas circunstancias.

El objetivo de este trabajo ha sido por tanto doble: en primer lugar, la realización de un instrumento que permita la medida del efecto BLH a lo largo del intervalo espectral completo donde está definido. Esto se presenta en la primera parte del trabajo, se aborda el cálculo teórico, las distintas soluciones estudiadas y el diseño y realización práctica de la solución final adoptada. La segunda parte del trabajo se centra en la posible influencia de las lentes intraoculares sobre el

espectro de acción del BLH y como consecuencia de ello el riesgo potencial de diferentes fuentes de radiación sobre personas con este tipo de lentes implantadas.

Capítulo 2

Cálculo del sensor adaptado: Planteamiento del problema.

El objetivo es, como ya hemos mencionado, diseñar un instrumento de medida del efecto conocido como '*Blue-Light Hazard*' (en adelante BLH) a lo largo de todo el intervalo espectral donde este está definido (305-700nm). Un medidor de BLH es un instrumento cuya responsividad espectral se ajusta exactamente al espectro de acción del efecto BLH.

El diseño y modificación de la responsividad espectral de detectores ópticos mediante filtros es una técnica bien implantada. Existen fotómetros cuya responsividad simula la curva de visión fotópica, colorímetros capaces de reproducir las funciones de mezcla y existen combinaciones de filtros para, por ejemplo, aislar cierta región del ultravioleta sobre un fotodiodo, entre otras.

Mediante una técnica de cálculo basada en un ajuste por el método de mínimos cuadrados [9] a la curva de transmitancia objetivo, es posible obtener la combinación y espesores óptimos de los filtros que montados sobre un detector, modifiquen a voluntad su responsividad espectral.

Así si $B(\lambda)$ es el espectro de acción del efecto BLH, y $R(\lambda)$ la responsividad espectral relativa del detector, en el caso ideal se cumplirá:

$$B(\lambda) = \alpha T(\lambda)R(\lambda) \tag{2.1}$$

Con $T(\lambda)$ transmitancia espectral del filtro (o combinación de filtros) ideal y α es una constante

Estudiando la transmitancia espectral de los filtros que existen en el mercado, se encontró que los filtros que son apropiados para la corrección en el visible, no se pueden usar por su absorción en el ultravioleta y viceversa. Por lo tanto, si se

usan en una combinación en serie, cada uno absorberá una porción del espectro, obteniendo una transmisión muy baja a la salida. La solución pasa entonces por calcular separadamente los filtros que simulan el intervalo UV del espectro (305-380nm) de aquellos que simulan el intervalo visible del espectro (380-700nm). A notar que en este caso, como ya se verá más adelante, es importante no sólo determinar el tipo y espesor de los filtros a usar, sino también el área relativa de cada juego de filtros.

2.1. Selección de filtros:

Conocida $T(\lambda)$ transmitancia ideal, buscamos la combinación de filtros que ajuste dicha transmitancia. Sean $T_i(\lambda)$ ($i = 1, 2 \dots, n$), las transmitancias de cada uno de los filtros. En conjunto tendremos:

$$T'(\lambda) = \prod_{i=1}^n T_i(\lambda) \quad (2.2)$$

La transmitancia conjunta $T'(\lambda)$ será el producto de las transmitancias. Para cada uno de los filtros, la transmitancia vale:

$$T_i(\lambda) = (1 - R_i)^2 t_i(\lambda) \quad (2.3)$$

Con $t_i(\lambda)$ transmitancia interna y R_i la reflectancia del filtro en cuestión.

Según la ley de Beer-Lambert:

$$t_i(\lambda) = e^{-k_i(\lambda)\delta_i} \quad (2.4)$$

Siendo $k_i(\lambda)$ el coeficiente de absorción y δ_i el espesor del correspondiente filtro. Es decir:

$$T_i(\lambda) = (1 - R_i)^2 e^{-k_i(\lambda)\delta_i} \quad (2.5)$$

2.2. Ajuste por mínimos cuadrados

Se busca que la transmitancia de la combinación de filtros se aproxime lo más posible a la ideal, seleccionada cierta combinación de filtros, el parámetro a ajustar será el espesor de cada filtro, entonces, se puede plantear la siguiente condición:

$$\int_{\lambda} (T'(\lambda) - \alpha T(\lambda))^2 d\lambda = M \quad (2.6)$$

Siendo α el coeficiente de proporcionalidad y M el factor a minimizar; desarrollando la integral:

$$\int_{\lambda} \left(\prod_{i=1}^n (1 - R_i)^2 e^{-k_i(\lambda)\delta_i} - \alpha T(\lambda) \right)^2 d\lambda = M \quad (2.7)$$

Así, los espesores $\delta_i (i = 1, 2, \dots, n)$ y el coeficiente de proporcionalidad α óptimos que hacen mínimo el factor M se obtienen de resolver el sistema de $n+1$ ecuaciones dadas por:

$$\frac{\partial M}{\partial \delta_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \frac{\partial M}{\partial \alpha} = 0 \quad (2.8)$$

El sistema es no lineal y aún en el caso de dos filtros difícil de resolver; esta dificultad, puede salvarse planteando el sistema en base a densidades ópticas en lugar de transmitancias, es decir, linealizando el sistema.

En la ecuación de partida tomamos logaritmos decimales cambiados de signo:

$$-\log_{10} B(\lambda) = -\log_{10} \alpha - \log_{10} T(\lambda) - \log_{10} R(\lambda) \quad (2.9)$$

Sean:

$$A = -\log_{10} \alpha \quad \text{Coeficiente de proporcionalidad} \quad (2.10)$$

$$D(\lambda) = -\log_{10} T(\lambda) \quad \text{Densidad óptica ideal} \quad (2.11)$$

En relación a las transmitancias de los filtros, se obtiene:

$$-\log_{10} T_i(\lambda) = k_i(\lambda)\delta_i \log_{10} e - 2 \log_{10}(1 - R_i) \quad (2.12)$$

Donde denotamos:

$$k_i(\lambda) \log_{10} e = d_i(\lambda) \quad (2.13)$$

$$-2 \log_{10}(1 - R_i) = r_i \quad (2.14)$$

Entonces la densidad óptica espectral del conjunto de n filtros se escribe:

$$D'(\lambda) = \sum_{i=1}^n (\delta_i d_i(\lambda) + r_i) \quad (2.15)$$

Estamos en condiciones de plantear una ecuación análoga a (2.7) pero en

términos de densidades:

$$\int_{\lambda} \left[\sum_{i=1}^n (\delta_i d_i(\lambda) + r_i) - (D(\lambda) + A) \right]^2 d\lambda = M' \quad (2.16)$$

Esta notación permite plantear un sistema lineal de ecuaciones para en principio cualquier número de filtros, limitado a seis en el presente trabajo, por simplicidad, se continúa para una combinación mínima de dos filtros. La condición de mínimos cuadrados se escribe:

$$\int_{\lambda} [\delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) + r_1 + r_2 - D(\lambda) - A]^2 d\lambda = M' \quad (2.17)$$

Sea $A' = A - r_1 - r_2$, entonces:

$$\int_{\lambda} [\delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) - D(\lambda) - A']^2 d\lambda = M' \quad (2.18)$$

Minimizamos los parámetros:

$$\frac{\partial M'}{\partial \delta_1} = \int_{\lambda} 2(\delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) - D(\lambda) - A') d_1(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial M'}{\partial \delta_2} = \int_{\lambda} 2(\delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) - D(\lambda) - A') d_2(\lambda) d\lambda = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial M'}{\partial A'} = - \int_{\lambda} 2(\delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) - D(\lambda) - A') d\lambda = 0 \quad (2.21)$$

Simplificando:

$$\int_{\lambda} (\delta_1 d_1^2(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) d_1(\lambda) - D(\lambda) d_1(\lambda) - A' d_1(\lambda)) d\lambda = 0 \quad (2.22)$$

$$\int_{\lambda} (\delta_1 d_1(\lambda) d_2(\lambda) + \delta_2 d_2^2(\lambda) - D(\lambda) d_2(\lambda) - A' d_2(\lambda)) d\lambda = 0 \quad (2.23)$$

$$- \int_{\lambda} (\delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) - D(\lambda) - A') d\lambda = 0 \quad (2.24)$$

Las transmitancias próximas a cero tanto en los filtros como la transmitancia ideal, producen densidades ópticas elevadas que, afectadas por la precisión numérica, conducen a soluciones erróneas; es posible reducir este problema introduciendo en el sistema lineal una función de peso que reduzca estas diferencias, así, en general, se busca que el ajuste incida sobre regiones de transmitancia significativa frente a las próximas a cero; en ocasiones es interesante lanzar un ajuste que desprece las regiones de transmitancia próxima a cero y en ocasiones es imprescindible, en aras de un resultado más correcto, dar mayor peso a estas

regiones. Los espesores óptimos finales calculados van a estar, por tanto, condicionados a la función de peso empleada.

Es habitual [9, 10] usar la propia $T(\lambda)$ como función de peso, de forma que aquellas regiones donde $T(\lambda)$ sea próxima a cero, no entrarán en el ajuste. Cuando se pretende eliminar expresamente cierta región espectral, o cuando la región de transmitancia ideal nula es extensa, es imprescindible modificar o introducir otra función de peso.

Dicha función de peso obliga a plantear de nuevo la ecuación de partida, tenemos:

$$\int_{\lambda} P(\lambda)[\delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) + r_1 + r_2 - D(\lambda) - A]^2 d\lambda = M' \quad (2.25)$$

Las condiciones de minimización nos llevan un sistema de ecuaciones similar al anterior, de su solución se obtienen los espesores y el factor de proporcionalidad; implementar el método, requiere discretizar la integral en sumatorios, tendremos:

$$\delta_1 \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1^2(\lambda) + \delta_2 \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1(\lambda) d_2(\lambda) - A' \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1(\lambda) - \sum_{\lambda} d_1(\lambda) P(\lambda) D(\lambda) = 0 \quad (2.26)$$

$$\delta_1 \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1(\lambda) d_2(\lambda) + \delta_2 \sum_{\lambda} P(\lambda) d_2^2(\lambda) - A' \sum_{\lambda} P(\lambda) d_2(\lambda) - \sum_{\lambda} d_2(\lambda) P(\lambda) D(\lambda) = 0 \quad (2.27)$$

$$\delta_1 \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1(\lambda) + \delta_2 \sum_{\lambda} P(\lambda) d_2(\lambda) - A' \sum_{\lambda} P(\lambda) - \sum_{\lambda} P(\lambda) D(\lambda) = 0 \quad (2.28)$$

Se trata de un sistema lineal de ecuaciones, es interesante escribirlo de manera más sencilla, para ello, tomamos:

$$B_1 = \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1^2(\lambda) \quad B_2 = \sum_{\lambda} P(\lambda) d_2^2(\lambda) \quad B_{12} = \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1(\lambda) d_2(\lambda) \quad (2.29)$$

$$C_1 = \sum_{\lambda} P(\lambda) B_1(\lambda) \quad C_2 = \sum_{\lambda} P(\lambda) d_2(\lambda) \quad F_1 = \sum_{\lambda} P(\lambda) d_1(\lambda) D(\lambda) \quad (2.30)$$

$$F_2 = \sum_{\lambda} P(\lambda) d_2(\lambda) D(\lambda) \quad G = \sum_{\lambda} P(\lambda) \quad H = \sum_{\lambda} P(\lambda) D(\lambda) \quad (2.31)$$

El sistema de ecuaciones entonces se escribirá:

$$B_1 \delta_1 + B_{12} \delta_2 - C_1 A' - F_1 = 0 \quad (2.32)$$

$$B_{12} \delta_1 + B_2 \delta_2 - C_2 A' - F_2 = 0 \quad (2.33)$$

$$C_1 \delta_1 + C_2 \delta_2 - G A' - H = 0 \quad (2.34)$$

Una solución única implica que el determinante de la matriz de coeficientes sea distinto de cero:

$$\Delta = \begin{vmatrix} B_1 & B_{12} & C_1 \\ B_{12} & B_2 & C_2 \\ C_1 & C_2 & G \end{vmatrix} \neq 0 \quad (2.35)$$

En estas condiciones, la solución se obtiene de:

$$\delta_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} F_1 & B_{12} & C_1 \\ F_2 & B_2 & C_2 \\ H & C_2 & G \end{vmatrix} \quad (2.36)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} B_1 & F_1 & C_1 \\ B_{12} & F_2 & C_2 \\ C_1 & H & G \end{vmatrix} \quad (2.37)$$

$$\mathbf{A}' = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} B_1 & B_{12} & F_1 \\ B_{12} & B_2 & F_2 \\ C_1 & C_2 & H \end{vmatrix} \quad (2.38)$$

2.3. Factor de escalado de las combinaciones de filtros:

Como ya hemos mencionado anteriormente, en configuraciones en las que se ajusta por separado el intervalo visible del intervalo ultravioleta (como nuestro caso), no sólo es necesario calcular el tipo y espesor de los filtros correspondientes, sino también, el área relativa de cada una de las combinaciones. Esto sería el caso de un único detector.

Nosotros, como posteriormente explicaremos, hemos estudiado también la posibilidad de utilizar dos detectores diferentes para cada uno de los intervalos espectrales estudiados. En cualquier caso, se hace necesario calcular el factor que escale una combinación respecto frente a la otra para obtener una curva de transmitancia conjunta que se aproxime a la ideal.

Estrictamente hablando, utilizar uno o dos detectores implica un cálculo algo diferente, ya que en el caso de dos detectores el escalado requiere la responsividad absoluta de estos y se realiza sobre la responsividad final obtenida. En el caso de un único detector, el cálculo del factor de escala se realiza sobre las transmitancias. Sin embargo, como quiera que el desarrollo matemático es similar en ambos casos, a continuación, se detalla el caso más sencillo:

Sean:

$T_1(\lambda)$, α_1 Transmitancia absoluta, coeficiente de proporcionalidad, serie 1

$T_2(\lambda)$, α_2 Transmitancia absoluta, coeficiente de proporcionalidad, serie 2

Comenzamos normalizando las transmitancias absolutas obtenidas mediante el factor de proporcionalidad de la serie de mayor relevancia espectral en el BLH final esperado:

$$(T_1(\lambda)/\alpha_1) = T_{1n}(\lambda) \quad (T_2(\lambda)/\alpha_2) = T_{2n}(\lambda)$$

Queremos calcular el factor de escalado S que debe presentar la serie $T_{2n}(\lambda)$ para que la transmitancia conjunta se adapte a la ideal, tenemos:

$$T_{1n}(\lambda) + ST_{2n}(\lambda) = T'(\lambda) \quad (2.39)$$

Transmitancia conjunta de la combinación de filtros. Se impone la condición:

$$\sum_{\lambda} (T_{1n}(\lambda) + ST_{2n}(\lambda) - T(\lambda))^2 = \min \quad (2.40)$$

Con $T(\lambda)$ transmitancia objetivo. Buscamos el factor S que hace mínima esta expresión:

$$\frac{\partial \min}{\partial S} = 2 \sum_{\lambda} (T_{1n}(\lambda) + ST_{2n}(\lambda) - T(\lambda))T_{2n}(\lambda) = 0 \quad (2.41)$$

Despejando:

$$S = \frac{\sum T(\lambda)T_{2n}(\lambda) - \sum T_{1n}(\lambda)T_{2n}(\lambda)}{\sum T_{2n}(\lambda)^2} \quad (2.42)$$

Esto es para el caso de un único detector. En el caso de utilizar dos detectores diferentes, como ya hemos mencionado, no es correcto resolver directamente el cálculo a partir de las transmitancias ya que las funciones de responsividad espectral de los detectores modificarían el resultado. Conocidas las responsividades absolutas de los detectores implicados, el factor de escalado resulta de un desarrollo análogo al anterior pero, en este caso, se efectúa sobre responsividades finales, no transmitancias; tendremos:

$$B_1(\lambda) = T_1(\lambda)R_1(\lambda) \quad (2.43)$$

$$B_2(\lambda) = T_2(\lambda)R_2(\lambda) \quad (2.44)$$

Sobre todo el intervalo espectral de interés. Dado que el citado espectro de acción del BLH, $B(\lambda)$ está normalizado en $\lambda = 435nm$ es correcto normalizar las responsabilidades absolutas finales obtenidas a su máximo conjunto en esa λ ;así:

$$B_{1n}(\lambda) = \frac{B_1(\lambda)}{B_{1max} + B_{2max}} \quad (2.45)$$

$$B_{2n}(\lambda) = \frac{B_2(\lambda)}{B_{1max} + B_{2max}} \quad (2.46)$$

De nuevo, sobre todo el intervalo espectral de interés y donde B_{1max} y B_{2max} serán los valores de las responsabilidades en $\lambda = 435nm$. Con esto, el desarrollo siguiente será, en todo, análogo al efectuado sobre las transmitancias de las combinaciones.

Es evidente que realizar el cálculo a través de las funciones de responsividad, también es posible para el caso de un solo detector; siendo por lo tanto esta forma de actuar más general que la del cálculo a partir de las transmitancias. Este ha sido por tanto el método elegido por nosotros.

2.4. Bondad del ajuste. Análisis de los valores:

Se han analizado todos los posibles filtros de absorción que en principio son útiles para la obtención de la combinación adecuada. Desafortunadamente, el número de filtros que es posible hoy en día encontrar en el mercado, está disminuyendo continuamente. Muchos de ellos, debido a la escasa demanda existente, han dejado de fabricarse. A partir de datos de catálogo, inicialmente de las casas SCHOTT y Hoya, hemos generado una base de datos de transmitancias espectrales; aunque ya adelantamos que finalmente y debido a la imposibilidad de conseguir filtros de la casa Hoya, la base de datos se ha limitado a los filtros SCHOTT [11].

Con el procedimiento anteriormente descrito, hemos obtenido una serie de combinaciones, las cuales añadidas a la responsividad espectral del radiómetro, hacen que la curva final se ajuste a la del espectro de acción del BLH. Para ello hemos realizado un programa de cálculo en Visual Basic 6.0 que implementa el algoritmo de forma general.

En primer lugar, el programa calcula, a partir de una curva de responsividad determinada y de la función teórica buscada, la transmitancia ideal a ajustar. A partir de aquí hay dos alternativas, calcular un ajuste sobre cierto número de filtros preseleccionados con los parámetros correspondientes, o bien, haciendo

uso de toda la colección de filtros, el programa es capaz de realizar un cálculo exhaustivo batiendo todas las combinaciones posibles de filtros tomados conjuntamente de dos en dos, tres en tres y sucesivamente hasta el límite de seis en seis. Los mejores resultados que cumplen las condiciones mínimas se van entonces seleccionando.

El elevado tiempo de cálculo que el método sistemático conlleva hace del número de combinaciones a calcular por el programa un parámetro importante; estas, dependen tanto del número total de filtros como del número de filtros tomados en serie. El número total de combinaciones se obtiene de la suma de todas las posibles combinaciones desde dos hasta seis filtros en serie para una colección de filtros dada:

$$\sum_{m=2}^6 \binom{n}{m} = \binom{n}{2} + \binom{n}{3} + \binom{n}{4} + \binom{n}{5} + \binom{n}{6} \quad (2.47)$$

Donde n será el número de filtros con los que trabajamos. Así, para una colección de 9 filtros las combinaciones totales a calcular serán 456, para 15 filtros se llega a 9933 combinaciones y con una colección de 30 filtros tendremos 768181 combinaciones.

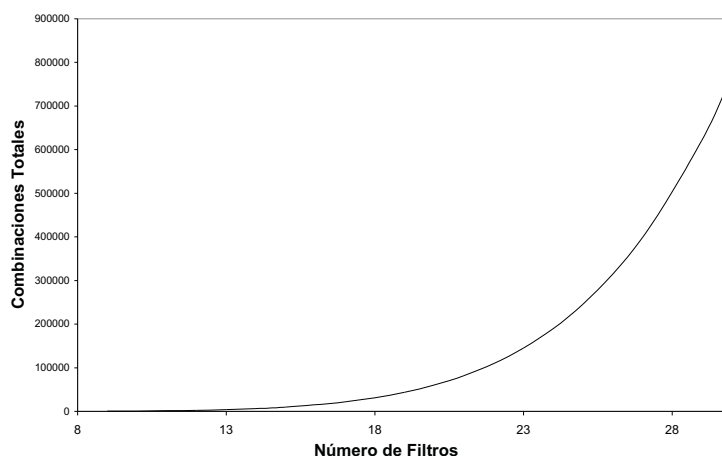


Figura 2.1: Combinaciones totales dos hasta seis filtros en serie a calcular frente al número de filtros

Como referencia se ha incluido en el AnexoI la parte más relevante del código implementado en el programa excluyendo por simplicidad el código de lectura y escritura de datos y resultados y de control de los eventos del formulario. Así mismo se incluyen las figuras (2.2 - 2.3) que muestran los dos formularios principales

del programa numérico desarrollado.

Figura 2.2: Formulario principal, programa de ajuste, cálculo de la transmitancia ideal, ajuste a un conjunto de filtros seleccionado, bondad del ajuste según factor M' y CIE $f'1$

Figura 2.3: Formulario exhaustivo del programa de ajuste, dada toda la colección de filtros y los parámetros del ajuste bate todas las combinaciones posibles en busca de los mejores ajustes.

Combinaciones que den como resultado espesores inapropiados de los filtros han sido excluidas. El espesor mínimo de cada filtro se ha limitado a 0.3mm, debido a la dificultad de obtener por pulido espesores inferiores. La siguiente limitación ha sido la transmitancia máxima de la combinación de los filtros. Combinaciones que obtuvieran con picos de transmitancia inferiores a 1.5% también fueron desestimadas.

Para realizar una estimación de la bondad de ajuste de las combinaciones obtenidas, hemos realizado una primera clasificación estimando el factor M' mi-

nimizado numéricamente. Factores M' más pequeños indican, a priori, mejores ajustes.

Conocidos los espesores óptimos $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ y el coeficiente de proporcionalidad A' , el factor M' se puede calcular de:

$$M' = \sum_{\lambda} (T'(\lambda) - \alpha T(\lambda))^2 \quad (2.48)$$

Donde:

$$\alpha = 10^{-A} \quad \text{Con} \quad A = A' + r_1 + r_2 + \dots + r_n \quad (2.49)$$

Si los filtros van pegados, sólo debemos considerar pérdidas por reflexión en la primera y última interfase del conjunto, entonces y en adelante, es más correcto escribir:

$$A = A' + r_1$$

La transmitancia obtenida para la combinación de filtros será:

$$T'(\lambda) = 10^{-D'(\lambda)} \quad (2.50)$$

Con:

$$D'(\lambda) = \delta_1 d_1(\lambda) + \delta_2 d_2(\lambda) + \dots + \delta_n d_n(\lambda) + r_1 \quad \text{Filtros pegados} \quad (2.51)$$

Como ya hemos dicho, El factor M' permite hacer una primera estimación de la bondad del ajuste. Sin embargo, dicho factor M' dista de ser un indicador válido; la expresión (2.48) minimizada numéricamente adolece de no estar normalizada en el intervalo espectral de interés, tampoco frente al intervalo en longitud de onda. Así, ajustes calculados sobre regiones espectrales amplias o con intervalos pequeños, tenderán a acumular factores M' cada vez mayores; el citado factor M' , por tanto, sólo será aplicable a comparar ajustes bajo condiciones equivalentes.

En fotometría y colorimetría [12, 13] es habitual el uso de la función de caracterización integral como función para determinar la bondad de ajuste de espectros de acción. Dicha función se define como:

$$f'_1 = \frac{\int_0^{\infty} |s^*(\lambda)_{rel} - s_{act,rel}(\lambda)| d\lambda}{\int_0^{\infty} s_{act,rel}(\lambda) d\lambda} \times 100\% \quad (2.52)$$

Donde $s(\lambda)_{act,rel}$ es el espectro de acción de la función actínica correspondiente (en este caso la función $B(\lambda)$); y

$$s^*(\lambda)_{rel} = \frac{\int_0^\infty S_\lambda s_{act,rel}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty S_\lambda s(\lambda)_{rel} d\lambda} s(\lambda)_{rel} \quad (2.53)$$

Con S_λ la distribución espectral del iluminante que se use para definir el ajuste; y $s(\lambda)_{rel}$ la responsividad espectral relativa del detector (en este caso el medidor de BLH). Cuando no existen recomendaciones de iluminante concreto a utilizar (como este caso), es habitual utilizar como entrada, el iluminante equienergético.

2.5. Elección del detector:

De la ecuación (2.1), es evidente que es posible encontrar diferentes combinaciones de filtros con diferentes funciones de responsividad espectral. Como ya hemos mencionado, nuestro objetivo es realizar un instrumento de medida para el BLH, que cubra todo el intervalo espectral en el que la citada función está definida, y con una curva de responsividad que se ajuste lo más posible a la curva teórica de la función $B(\lambda)$, es decir, con valores de f'_1 lo más pequeños posibles. Asimismo, como la solución de cálculo adoptada ha sido ajustar por separado los intervalos UV y visible del espectro, eso nos permite buscar diferentes combinaciones de detectores.

Partiendo de detectores cuya respuesta a priori, permitiera ajustar el intervalo espectral buscado (305-700nm), se han buscado soluciones teóricas con dos configuraciones distintas: configuraciones de un único detector para ajustar el intervalo espectral de interés; y configuraciones de dos detectores que ajusten independientemente el intervalo UV (305-380nm) y visible del espectro (380-700nm). En las configuraciones de un único detector para todo el intervalo espectral, se han usado dos tipos de detectores: un fotomultiplicador (Fotomultiplicador Hamamatsu H5784 Series type 01) y un fotodiodo de silicio (UDT F56378, 10mm² área activa).

En las configuraciones de dos detectores se ha usado un fotodiodo de silicio para el ajuste del intervalo visible del espectro y fotodiodos de SiC (Electro-Optical Components SiC Photodiode JEC 1S/JEC 1SS) y de GaP (Electro-Optical Components UV-Photodiode EPD-365-0/3.6), ambos de aplicación fundamentalmente en el ultravioleta cercano, para esta región del espectro.

Las curvas de responsividad espectral relativas de todos los tipos de detectores usados, a excepción del fotomultiplicador, del que se han usado datos de catálogo, han sido previamente medidas en nuestro laboratorio en el sistema comparador de detectores [14], existente en el mismo. Las Tablas (2.1, 2.2) muestran los valores

de las curvas de responsividad obtenidas, que se han representado gráficamente en las figuras (2.4 - 2.5)

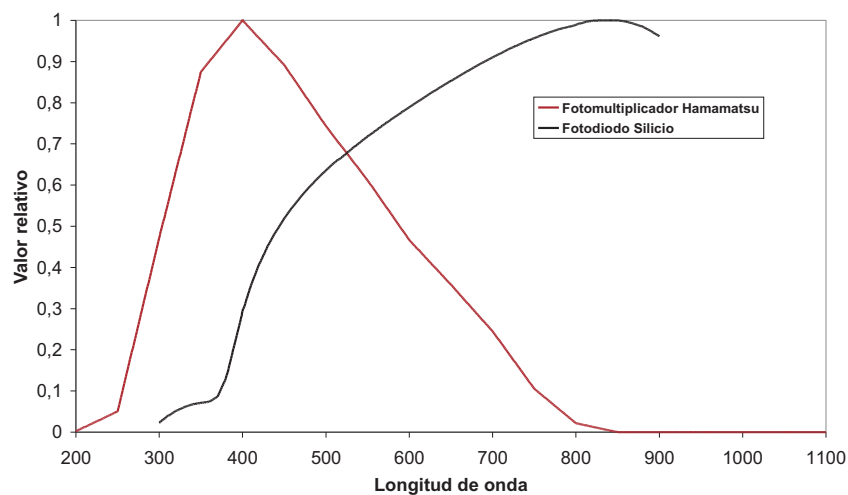


Figura 2.4: Responsividades relativas del fotodiodo de Silicio y del tubo fotomultiplicador

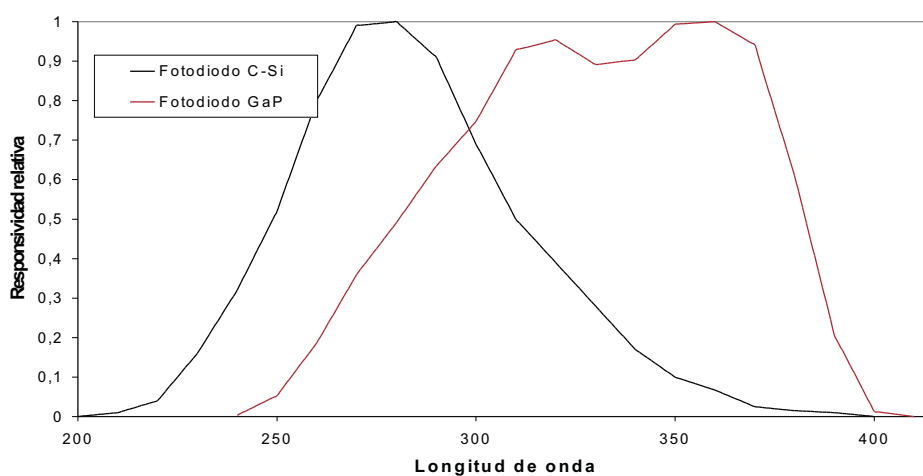


Figura 2.5: Responsividades relativas de los Fotodiodos CSi y GaP

A partir de estas curvas de responsividad y usando el método de cálculo descrito anteriormente, se han seleccionado las combinaciones que se representan en la Tabla (3.1)

Las Tablas (2.4 - 2.5) muestran las transmitancias espectrales de las combinaciones de filtros seleccionadas para el fotomultiplicador Hamamatsu y el fotodiodo de silicio, respectivamente junto con la transmitancia ideal en cada caso. La Tabla (2.6) muestra los resultados para los casos Fotodiodo de silicio-Fotodiodo SiC y

Tabla 2.1: Datos de responsividad espectral para el fotomultiplicador y para el fotodiodo de silicio empleados en los cálculos

Long. onda(nm)	Fotomultiplicador	Fotodiodo Si
305	0.512	0.031
315	0.593	0.045
325	0.673	0.056
335	0.754	0.064
345	0.835	0.069
355	0.887	0.072
365	0.912	0.080
375	0.937	0.108
385	0.962	0.170
395	0.987	0.251
405	0.989	0.325
415	0.967	0.382
425	0.946	0.429
435	0.924	0.469
445	0.902	0.503
455	0.877	0.533
465	0.847	0.559
475	0.817	0.584
485	0.788	0.605
495	0.758	0.626
505	0.730	0.645
515	0.704	0.662
525	0.677	0.677
535	0.651	0.694
545	0.625	0.710
555	0.597	0.725
565	0.568	0.740
575	0.539	0.755
585	0.510	0.769
595	0.481	0.782
605	0.456	0.796
615	0.434	0.809
625	0.412	0.822
635	0.391	0.835
645	0.369	0.847
655	0.347	0.859
665	0.324	0.871
675	0.302	0.883
685	0.279	0.894
695	0.256	0.905
705	0.231	0.915
715	0.203	0.926
725	0.175	0.935
735	0.147	0.944
745	0.119	0.953

Long. onda(nm)	Fotomultiplicador	Fotodiodo Si
755	0.097	0.961
765	0.080	0.968
775	0.063	0.975
785	0.047	0.981
795	0.030	0.986
805	0.020	0.992
815	0.015	0.997
825	0.011	0.999
835	0.006	0.999
845	0.002	0.999
855	0	0.998
865	0	0.994
875	0	0.988
885	0	0.979
895	0	0.968
900	0	0.961

Fotodiodo de silicio-Fotodiodo de GaP, en este caso, el escalado entre detectores debe hacerse entre sus responsividades finales, no transmitancias, razón por la que se comparan con la curva BLH directamente. Asimismo las figuras (2.6 - 2.7 - 2.8 - 2.9) representan las curvas de responsividad espectral obtenidas, para cada una de las combinaciones seleccionadas, y su comparación con la curva teórica $B(\lambda)$.

Tabla 2.2: Datos de responsividad espectral para los fotodiodos SiC, GaP, cada 5nm

Long. onda(nm)	Fotodiodo SiC	Fotodiodo GaP
200	0	0
205	0.005	0
210	0.010	0
215	0.025	0
220	0.04	0
225	0.100	0
230	0.160	0
235	0.240	0.002
240	0.320	0.003
245	0.420	0.028
250	0.520	0.053
255	0.660	0.120
260	0.800	0.186
265	0.895	0.273
270	0.990	0.360
275	0.995	0.425
280	1	0.491
285	0.955	0.563
290	0.910	0.634
295	0.800	0.691
300	0.690	0.747
305	0.595	0.838
310	0.500	0.928
315	0.445	0.941
320	0.390	0.954
325	0.335	0.922
330	0.280	0.891
335	0.225	0.897
340	0.170	0.903
345	0.135	0.948
350	0.100	0.993
355	0.083	0.997
360	0.067	1
365	0.046	0.970
370	0.025	0.941
375	0.020	0.775
380	0.015	0.610
385	0.012	0.408
390	0.010	0.206
395	0.005	0.101
400	0	0.013

Tabla 2.3:
Mejores combinaciones de filtros obtenidas con cada detector o combinación de detectores.

Fotodiodo silicio		Fotomult. Hamamatsu		Fotodiodos Si-SiC		Fotodiodo Si-GaP	
filtros	espesor	filtros	espesor	filtros	espesor	filtros	espesor
-	(mm)	-	(mm)	-	(mm)	-	(mm)
Visible		Visible		Visible		Visible	
B370	0.5	BG24A	0.7	B370	0.5	B370	0.5
BG28	2	BG28	1.2	BG28	2	BG28	2
FG13	0.45	BG34	4.6	FG13	0.45	FG13	0.45
GG395	7	FG13	0.3	GG395	7	GG395	7
KG5	1.3	GG395	11.6	KG5	1.3	KG5	1.3
M10	2.2	-	-	M10	2.2	M10	2.2
total	10	total	18.4	total	10	total	10
Ultravioleta		Ultravioleta		Ultravioleta		Ultravioleta	
UG5	1	UG5	1	BG24	2	FG3	1
UG11	3	UG11	3	WG295	1	UG1	2
total	4	total	4	total	3	total	3
Parametros		Parametros		Parametros		Parametros	
τ_{max}	5.29 %	τ_{max}	7.7 %	τ_{max}	5.61 %	τ_{max}	5.61 %
$CIEf'_1$	6.80 %	$CIEf'_1$	7.07 %	$CIEf'_1$	6.18 %	$CIEf'_1$	6.03 %
Escalado	0.62 %	Escalado	9.33 %	Escalado	0.53 %	Escalado	0.24 %

Tabla 2.4: Transmitancia calculada (tanto por uno) para la mejor combinación de filtros con el fotomultiplicador de Hamamatsu frente a la ideal. Calculada en el intervalo 200-1100, por brevedad se dan datos en 300-700nm, cada 5nm

Long. onda (nm)	Transmitancia Calculada	Transmitancia Ideal
300	0.0094	0
310	0.0097	0.0168
320	0.0096	0.0146
330	0.0100	0.0129
340	0.0100	0.0116
350	0.0097	0.0105
360	0.0091	0.0102
370	0.0076	0.0099
380	0.0049	0.0096
390	0.0191	0.0211
400	0.1277	0.0824
410	0.4671	0.3353
420	0.8656	0.8382
430	0.9474	0.9492
440	1	0.9976
450	0.9166	0.9666
460	0.8692	0.8839
470	0.6729	0.6954
480	0.4823	0.5328
490	0.3253	0.3013
500	0.1959	0.137
510	0.1146	0.0842
520	0.0661	0.0552
530	0.0333	0.0362
540	0.0223	0.0238
550	0.0213	0.0156
560	0.0153	0.0104
570	0.0076	0.0069
580	0.0023	0.0046
590	0.0010	0.0031
600	0.0006	0.0020
610	0.0004	0.0020
620	0.0004	0.0021
630	0.0002	0.0023
640	0.0001	0.0024
650	0.0002	0.0025
660	0.0002	0.0027
670	0.0004	0.0029
680	0.0007	0.0031
690	0.0016	0.0034
700	0.0024	0.0037

Tabla 2.5: Transmitancia calculada (tanto por uno) para la mejor combinación de filtros con el fotodiodo de silicio frente a la ideal. Calculada en el intervalo 200-1100, por brevedad se dan datos en 300-700nm,cada 5nm

Long. onda (nm)	Transmitancia Calculada	Transmitancia Ideal
300	0.0666	0
310	0.0746	0.0168
320	0.0802	0.0146
330	0.0831	0.0129
340	0.0802	0.0116
350	0.0765	0.0105
360	0.0633	0.0102
370	0.0391	0.0099
380	0.0148	0.0096
390	0.0533	0.0211
400	0.1297	0.0824
410	0.6070	0.3353
420	0.9482	0.8382
430	0.9843	0.9492
440	0.9054	0.9976
450	0.8069	0.9666
460	0.5843	0.8839
470	0.5267	0.6954
480	0.3262	0.5328
490	0.2165	0.3013
500	0.0527	0.137
510	0.0357	0.0842
520	0.0248	0.0552
530	0.0152	0.0362
540	0.0105	0.0238
550	0.0104	0.0156
560	0.0104	0.0104
570	0.0077	0.0069
580	0.0028	0.0046
590	0.0012	0.0031
600	0.0009	0.0020
610	0.0005	0.0020
620	0.0005	0.0021
630	0.0002	0.0023
640	$5e - 5$	0.0024
650	$5e - 5$	0.0025
660	$5e - 5$	0.0027
670	0.0001	0.0029
680	0.0002	0.0031
690	0.0005	0.0034
700	0.0013	0.0037

Tabla 2.6: Datos de la responsividad conjunta relativa calculada para la mejor combinación de filtros con fotodiodos de silicio en la región visible con SiC y GaP en la ultravioleta frente al espectro de acción BLH. Calculada en el intervalo 200-1100, por brevedad se dan datos en 300-700nm, cada 5nm. (En el caso de dos detectores el escalado entre curvas debe hacerse con los datos de responsividad absoluta de cada detector)

Long. onda (nm)	Espectro Acción BLH	Responsividad conjunta Silicio-SiC	Responsividad conjunta Silicio-GaP
300	0.01	0.0079	0.0007
310	0.01	0.0107	0.0025
320	0.01	0.0126	0.0055
330	0.01	0.0114	0.0079
340	0.01	0.0078	0.0099
350	0.01	0.0049	0.0125
360	0.01	0.0034	0.0129
370	0.01	0.0012	0.0118
380	0.01	0.0024	0.0076
390	0.025	0.0239	0.0244
400	0.100	0.1317	0.1318
410	0.400	0.4448	0.4447
420	0.900	0.8949	0.8948
430	0.980	0.9850	0.9850
440	1.000	1.0040	1.0040
450	0.940	0.8845	0.8845
460	0.800	0.7391	0.7391
470	0.620	0.6359	0.6359
480	0.450	0.4209	0.4209
490	0.220	0.2871	0.2872
500	0.1000	0.0707	0.0707
510	0.0631	0.0499	0.0499
520	0.0398	0.0353	0.0353
530	0.0251	0.0221	0.0221
540	0.0158	0.0156	0.0156
550	0.0100	0.0159	0.0159
560	0.0063	0.0161	0.0161
570	0.0040	0.0123	0.0122
580	0.0025	0.0046	0.0046
590	0.0016	0.0020	0.0020
600	0.0010	0.0014	0.0014
610	0.0010	0.0009	0.0009
620	0.0010	0.0009	0.0009
630	0.0010	0.0004	0.0004
640	0.0010	0.0001	0.0009
650	0.0010	$9e - 5$	$9e - 5$
660	0.0010	$9e - 5$	$9e - 5$
670	0.0010	0.0003	0.0003
680	0.0010	0.0003	0.0003
690	0.0010	0.0005	0.0005
700	0.0010	0.0006	0.0006

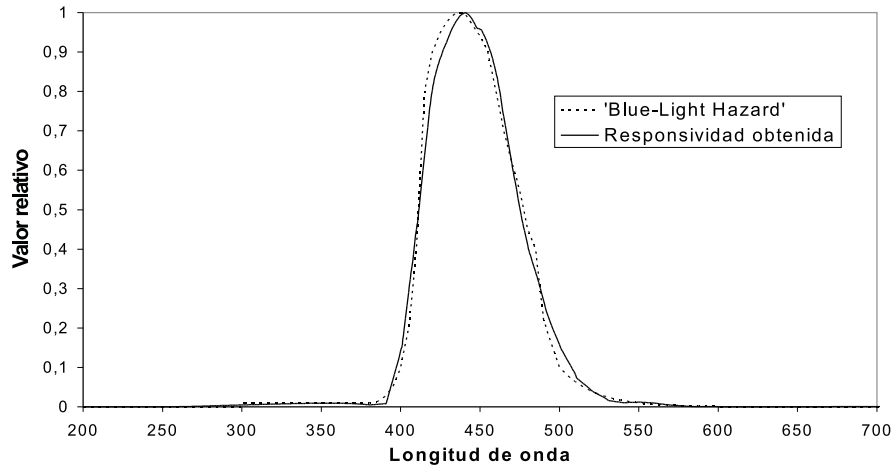


Figura 2.6: Responsividad obtenida para el mejor ajuste con el fotomultiplicador Hamamatsu frente al 'Blue-Light Hazard'

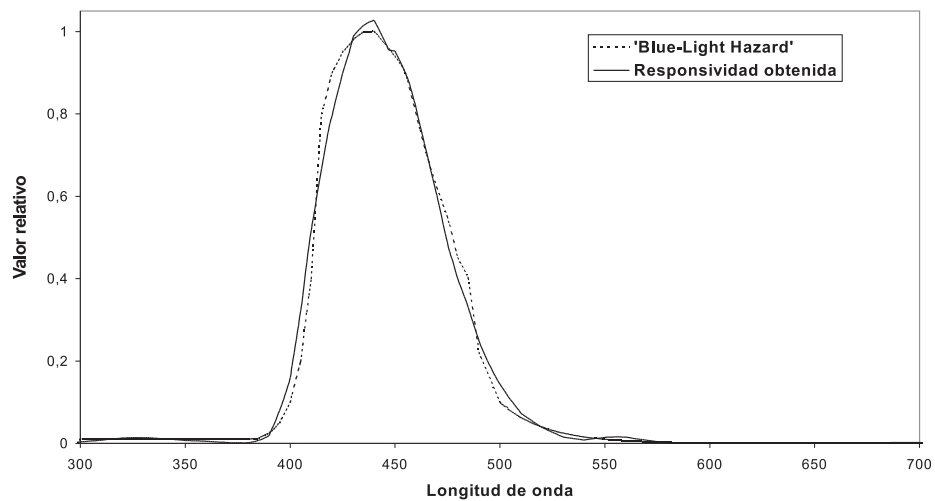


Figura 2.7: Responsividad obtenida para el mejor ajuste con fotodiodos de silicio y CSi frente al 'Blue-Light Hazard'

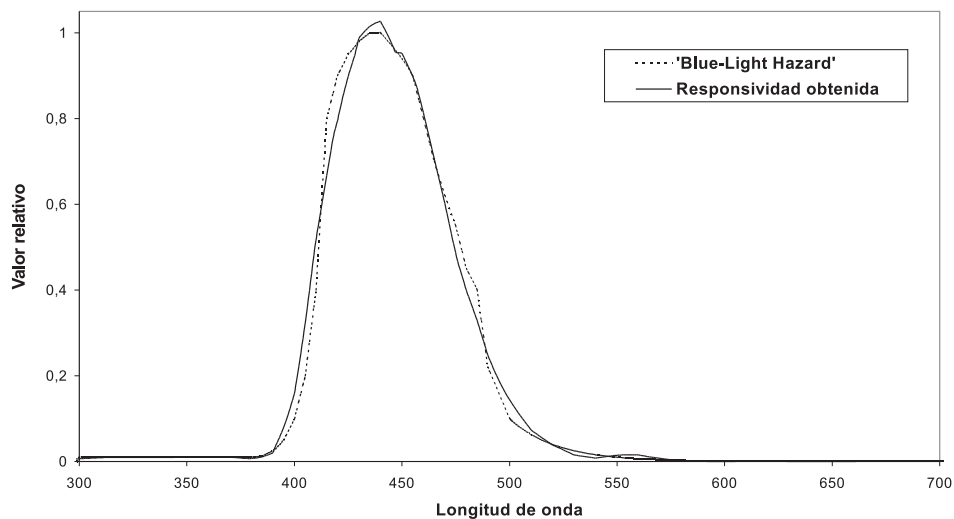


Figura 2.8: Responsividad obtenida para el mejor ajuste con fotodiodos de silicio y GaP frente al 'Blue-Light Hazard'

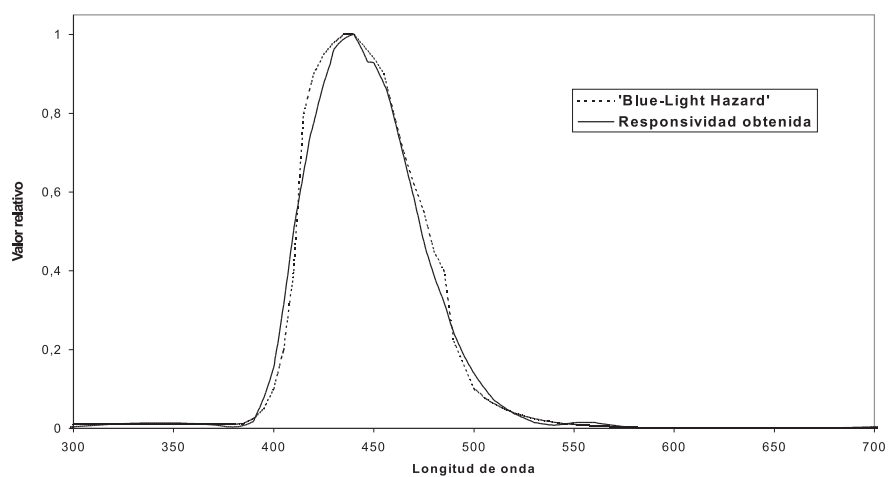


Figura 2.9: Responsividad obtenida para el mejor ajuste con un fotodiodo de silicio frente al 'Blue-Light Hazard'

Capítulo 3

Solución adoptada. Realización práctica del instrumento de medida del BLH.

En el capítulo anterior hemos obtenido distintas combinaciones teóricas, todas ellas con muy buenos ajustes para las distintas combinaciones estudiadas. Sin embargo, como el objetivo final de esta parte del trabajo era la realización práctica de un instrumento de medida del efecto BLH, debemos elegir una de las combinaciones seleccionadas para su realización.

En primer lugar, como ya hemos mencionado, nos ha sido imposible adquirir los filtros de la casa Hoya; lo que nos obliga a desechar todas las combinaciones en las que intervienen filtros de esta marca. Asimismo, con respecto a los filtros de la casa Schott, comprobamos que alguno de ellos había sido recientemente descatalogado, por lo que también tuvo que ser desechado.

La segunda consideración realizada ha sido en referencia al/los detectores a utilizar. Dadas las conocidas características de simplicidad de uso, estabilidad, rango dinámico y linealidad de los fotodiodos de silicio, finalmente hemos decidido adoptar la solución consistente en un único detector, siendo este un fotodiodo de silicio.

Considerando la responsividad del fotodiodo seleccionado, la combinación de filtros seleccionada finalmente como más adecuada para la realización práctica del medidor de BLH, ha sido la siguiente:

Tabla 3.1: Mejores combinaciones de filtros seleccionadas para la realización del detector BLH.

Visible(380 – 700nm)		IntervaloUV	
Filtros	Espesor (mm)	Filtros	Espesor (mm)
BG24A	0.6	UG5	1
BG25	0.7	UG11	3
BG34	4.1		
BG38	2.7		
FG15	1.6		
VG6	0.3		

Transmitancia máxima : 7,74 %

Valor de f'_1 : 8,14 %

Factor de escalado : 1,06 %

3.1. Factor de escalado:

Como vimos en el capítulo 2, la separación del cálculo de las combinaciones de filtros en dos regiones espectrales adyacentes, obliga a introducir un escalado posterior entre las combinaciones que reproduzca con la mayor precisión posible la curva buscada.

Para la combinación seleccionada, y usando un único detector, se obtiene una relación de áreas (factor de escalado) entre los ajustes de la región visible y ultravioleta del 1,06 %. Un diseño en base a un único detector exige introducir esta relación sobre la energía radiante. Teniendo en cuenta las dimensiones del área activa del detector seleccionado ($10mm^2$), es fácil entender que resultaría extremadamente complicado obtener dicha relación de áreas con una solución puramente mecánica (ver Figura (3.1)). Sin embargo no es difícil obtener esa relación de señales si partimos de una solución electrónica.

La fotocorriente generada en un fotodiodo habitualmente es transformada en voltaje mediante un convertidor I/V siendo esta la magnitud medida; Si en lugar de usar un único detector utilizamos dos detectores idénticos, uno para ajustar la parte visible, y el otro para el ajuste de la región ultravioleta; es posible entonces realizar el escalado electrónico de cada una de las fotocorrientes generadas y así obtener la relación que buscamos. Aunque este escalado se puede obtener en la primera etapa de amplificación, nosotros hemos considerado más adecuado, y así lo hemos implementado, realizar el escalado en la etapa de suma y amplificación final de ambas señales. La Figura (3.2) muestra el circuito de suma y amplificación de señales utilizado. La primera etapa transforma independiente-

mente las fotocorrientes en voltajes con el factor de amplificación correspondiente, éstos, serán sumados a continuación. Eligiendo convenientemente los valores de las resistencias R3 y R4 obtenemos el escalado electrónico buscado.

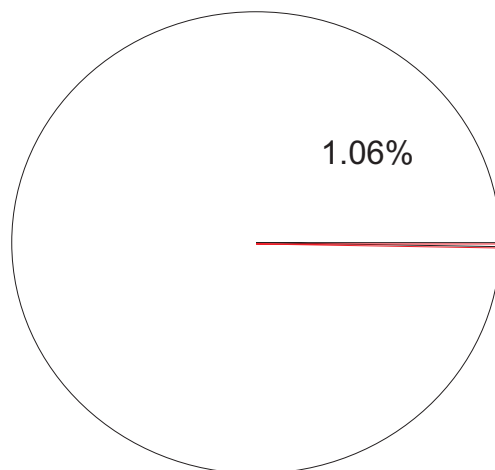


Figura 3.1: Relación areas para el fotodiodo de silicio

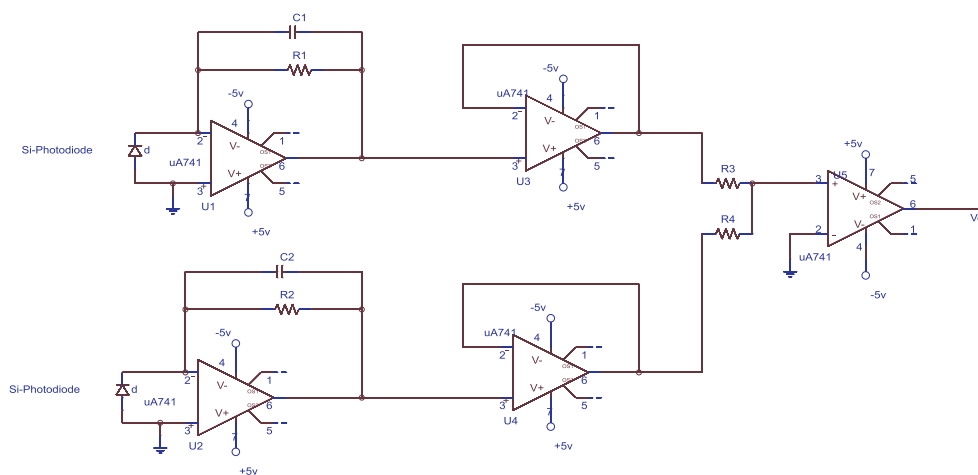


Figura 3.2: Esquema electrónica suma y amplificación de señales

3.2. Realización práctica de la solución adoptada:

Para realizar la construcción material del medidor de BLH obtuvimos de la casa SCHOTT los filtros seleccionados y medimos su transmitancia espectral real con un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo Lambda 900. No ha sido posible

que los filtros fueran suministrados al espesor calculado, sino con espesores próximos a los estándares de suministro (1,2 y 3mm), habiendo realizado nosotros posteriormente el pulido de los mismos para obtener el espesor adecuado. No obstante, con objeto de verificar la consistencia de los datos de catálogo, antes de proceder a su pulido se ha medido la transmitancia espectral en el espectrofotómetro. En las siguientes figuras ((3.3) y (3.4)) se muestran las curvas de transmitancia reales de los filtros adquiridos, en comparación con las obtenidas con los datos de catálogo.

Aunque se puede apreciar que los resultados son bastante coherentes, a partir de los valores reales de transmitancia espectral hemos calculado de nuevo los espesores y parámetros del ajuste (escalado de señales, función CIE f'_1 y transmitancia máxima), obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 3.2: Espesores y parámetros del ajuste tras recalcular los filtros SCHOTT comprados

Visible(380 – 700nm)		IntervaloUV	
Filtros	Espesor (mm)	Filtros	Espesor (mm)
BG24A	0.6	UG5	1
BG25	0.7	UG11	3
BG34	3.9		
BG38	2.7		
FG15	1.5		
VG6	0.3		

Transmitancia máxima : 9 %

Valor de f'_1 : 10,16 %

Factor de escalado : 1,05 %

Con esta combinación final y haciendo uso del método de escalado que hemos mencionado, se ha medido la responsividad espectral del conjunto seleccionado, obteniendo el resultado que se muestra en la tabla (3.3) y se representa gráficamente en la figura (3.5). Obteniendo un parámetro $f'_1 = 10,97 %$ para el ajuste.

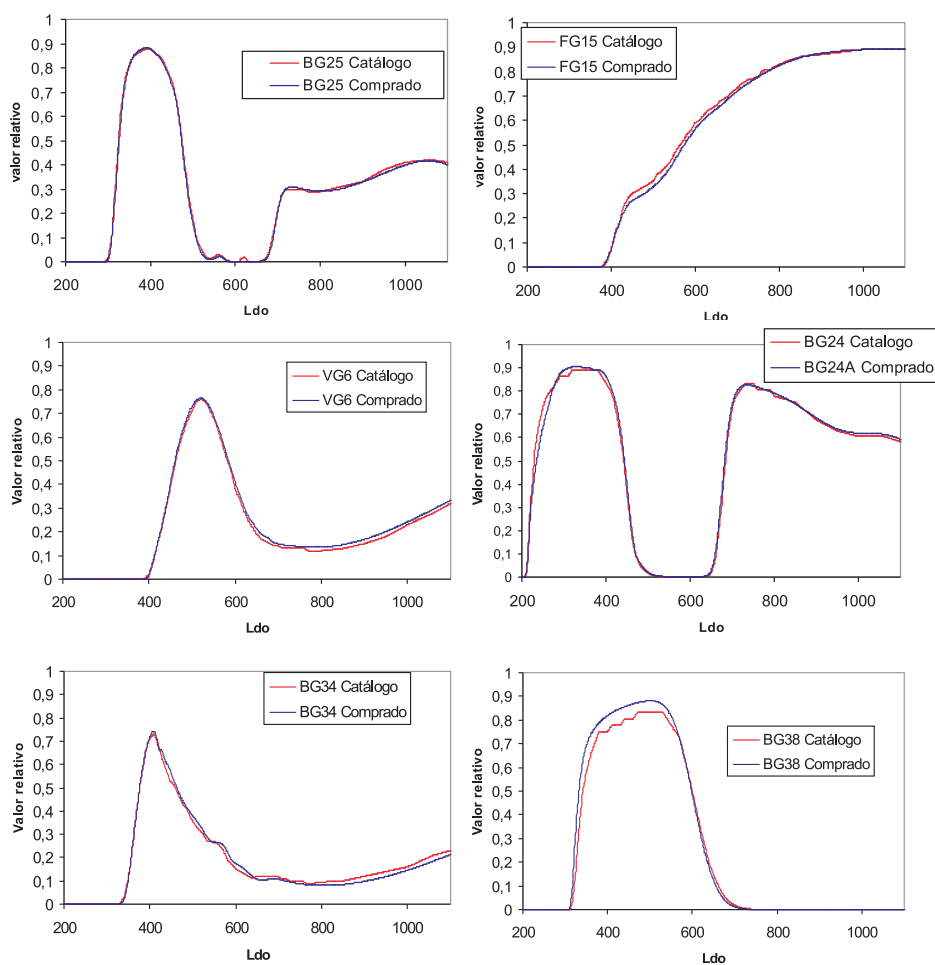


Figura 3.3: Transmitancia medida para los filtros SCHOTT comprados para la región visible del ajuste BG25,FG15,VG6,BG24A,BG34,BG38 en comparación a los valores de catálogo

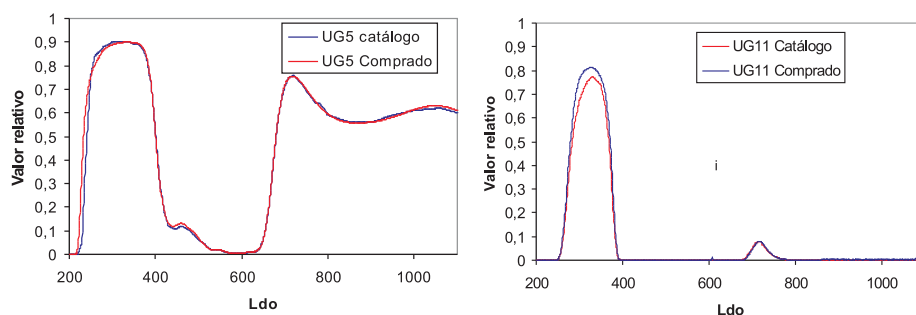


Figura 3.4: Transmitancia medida con los filtros SCHOTT comprados para la región UV del ajuste UG5, UG11 en comparación a valores de catálogo

Tabla 3.3: Responsividad espectral (tanto por uno) medida con fotodiodos de silicio y la combinación de filtros seleccionada frente a la curva BLH

Long. onda nm	BLH	Responsividad
—	—	—
200	0	$< 1e - 5$
210	0	$< 1e - 5$
220	0	$1e - 5$
230	0	$< 1e - 5$
240	0	$< 1e - 5$
250	0	$2e - 5$
260	0	0.0001
270	0	0.0008
280	0	0.0021
290	0	0.0033
300	0.01	0.0040
310	0.01	0.0074
320	0.01	0.0102
330	0.01	0.0121
340	0.01	0.0131
350	0.01	0.0129
360	0.01	0.0118
370	0.01	0.0092
380	0.01	0.0043
390	0.025	0.0181
400	0.100	0.1604
410	0.400	0.5118
420	0.900	0.7005
430	0.980	0.9356
440	1.000	0.9966
450	0.940	0.9463
460	0.800	0.7806
470	0.620	0.5749
480	0.450	0.3929
490	0.220	0.2590
500	0.100	0.1648
510	0.063	0.0913
520	0.039	0.0441
530	0.025	0.0186
540	0.016	0.0115
550	0.010	0.0131
560	0.006	0.0167
570	0.004	0.0102
580	0.002	0.0031
590	0.002	0.0008
600	0.001	0.0006

Long. onda	BLH	Responsividad
610	0.001	0.0006
620	0.001	0.0005
630	0.001	0.0003
640	0.001	0.0002
650	0.001	0.0001
660	0.001	0.0002
670	0.001	0.0005
680	0.001	0.0010
690	0.001	0.0017
700	0.001	0.0031
750	0	0.0006
800	0	$1e - 5$
850	0	$9e - 5$
900	0	0.0001
950	0	0.0002
1000	0	0.0004
1050	0	0.0003
1100	0	0.0010

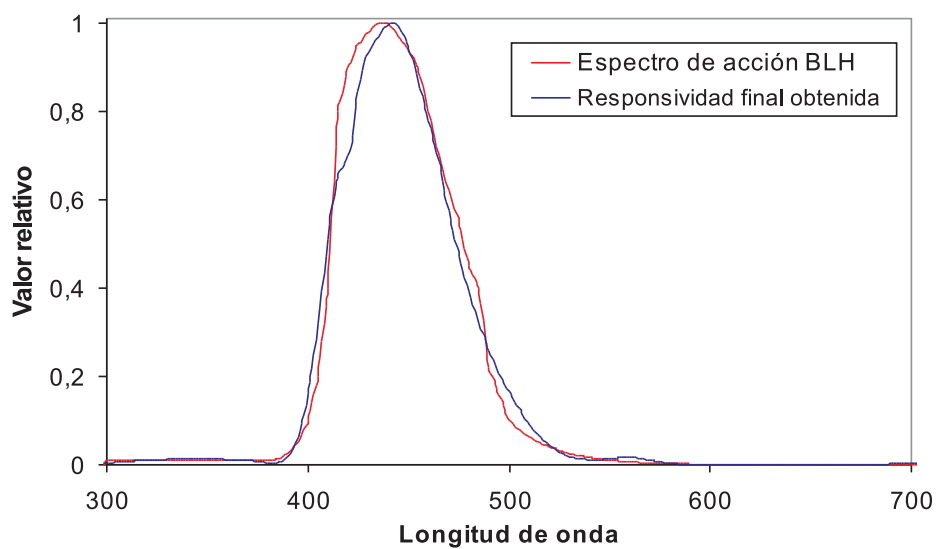


Figura 3.5: Responsividad final obtenida tras recalcular los filtros comprados en relación al BLH, obteniendo $f'_1 = 10,97\%$

Capítulo 4

Lentes intraoculares.

Como ya hemos mencionado, la condición de afático es, hoy en día, rara; en las intervenciones de cataratas se extrae el cristalino pero es habitual sustituirlo por una lente intraocular. Dichas lentes intraoculares están diseñadas para cumplir la función del cristalino una vez implantadas en lugar de éste. Actualmente, todas ellas incluyen filtros UV que tratan de simular la absorción del cristalino, sin embargo, según estudios publicados [5, 6, 7, 8] aparecen diferencias significativas con respecto a la transmitancia del cristalino, sobre todo en la longitud de onda de corte, circunstancia potencialmente peligrosa tanto desde el punto de vista del BLH como de otras patologías oculares tales como la degeneración macular. Por ello nos planteamos como segundo objetivo de este trabajo realizar la evaluación de diferentes lentes intraoculares comerciales y estudiar si, caso de encontrar las diferencias mencionadas, influyen sobre el espectro de acción del BLH en personas con las mencionadas lentes intraoculares implantadas.

4.1. Transmitancia espectral de las lentes intraoculares.

Se han estudiado cuatro modelos diferentes de lentes intraoculares comerciales de diferentes fabricantes. La Tabla (4.1) muestra las características principales de las mismas. Todas ellas van provistas de un filtro UV, y una de ellas (la identificada como Acrysoft Natural) va provista además de un filtro de luz azul.

Se ha medido la transmitancia espectral de todas ellas en un espectrofotómetro comercial Perkin Elmer Lambda 900, en el intervalo espectral de 200-700nm, con un ancho de banda de 0.5nm. Todas las lentes intraoculares tienen un valor similar de potencia para evitar inconsistencias en la geometría del haz. Las lentes

384.2. Comparación con el cristalino. Modificación del espectro de acción del BLH

Tabla 4.1: Características de las lentes LIO estudiadas

Fabricante	Material	Filtro	Nombre de la lente
Alcon	Acrílico	UV+Azul	Acrysoft Natural
Bausch & Lomb	Hidrogel/PMMA	UV	Hidroview
Bausch & Lomb	Silicona/Copolímero acrílico hidrófilo	UV	Akreos
LCA	Copolímero acrílico hidrófilo	UV	Istacryl

intraoculares vienen presentadas en un sobre estéril que debe abrirse en condiciones estériles de quirófano para garantizar su no contaminación. Sin embargo, las condiciones de esterilidad, en principio; no modifican las propiedades de transmitancia de las lentes.

Nosotros trabajamos en un ambiente normal de laboratorio, no estéril; no obstante, se han realizado medidas de cada una de las lentes en dos condiciones distintas: sumergidas en suero fisiológico y montadas directamente en aire, no encontrándose diferencias en cuanto al comportamiento espectral de las mismas.

En la figura (4.1) se pueden ver las curvas de transmitancia espectral obtenidas, una vez normalizadas al máximo de transmisión.

No sólo se observan diferencias significativas con la lente que incorpora un filtro azul extra (lente identificada como Acrysoft Natural), sino que también existen diferencias importantes entre las lentes que sólo incorporan el filtro UV, sobre todo en cuanto a la longitud de onda de corte. Todas ellas presentan absorción completa al UVC(200-280nm) y al UVB(280-320nm), sin embargo presentan comportamientos diferentes con respecto a la absorción del UVA (320-400nm). La única lente que presenta una absorción completa al UVA es la Acrysoft Natural. El resto presentan diferencias en la longitud de onda de corte desde 350nm para la Akreos hasta 370 ó 380nm para los modelos Istacryl e Hidroview respectivamente.

4.2. Comparación con el cristalino. Modificación del espectro de acción del BLH

Para poder determinar si los resultados obtenidos indican que es necesario modificar el espectro de acción del BLH, necesitamos en primer lugar comparar los valores obtenidos con la curva de transmitancia espectral del cristalino. En la literatura [15, 16, 17, 18, 19, 20] es posible encontrar distintos valores, dependiendo principalmente de la edad de la persona, en relación a la transmitancia del

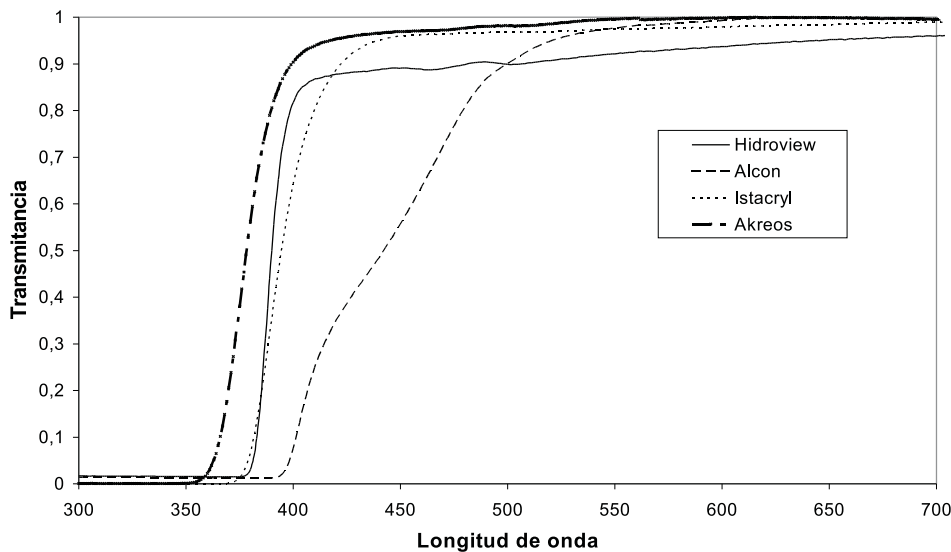


Figura 4.1: Transmitancia de los cuatro modelos de LIO estudiadas

cristalino; lo que nos plantea la dificultad de que curva utilizar en la comparación. Sin embargo, teniendo en cuenta que la diferencia entre los dos espectros de acción definidos ($A(\lambda)$ para ojos afáticos y $B(\lambda)$ para ojos normales) es debida al efecto del cristalino, podemos deducir la transmitancia espectral ideal del cristalino relacionando las curvas de ambos casos, es decir:

$$B(\lambda) = \text{Cristalino}(\lambda)A(\lambda) \quad \longrightarrow \quad \text{Cristalino}(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{A(\lambda)} \quad (4.1)$$

A partir de esta expresión hemos obtenido la curva de transmitancia espectral para el cristalino que se representa en la figura (4.2) en comparación con la obtenida para las lentes intraoculares estudiadas.

Como se aprecia en la figura, tres de los cuatro modelos estudiados tienen longitudes de onda de corte inferiores a la curva calculada para el cristalino. Como ya hemos visto el cristalino se comporta como una función de peso sobre el espectro de acción definido para el caso afático y así obtener el espectro de acción para un ojo normal. Si realizamos entonces la operación inversa, con cada una de las curvas de transmitancia obtenidas para las distintas lentes intraoculares, obtendríamos diferentes funciones $B(\lambda)$ de aplicación a las distintas lentes. Así, para cada lente intraocular, y aplicando la expresión (4.2) obtendremos:

404.2. Comparación con el cristalino. Modificación del espectro de acción del BLH

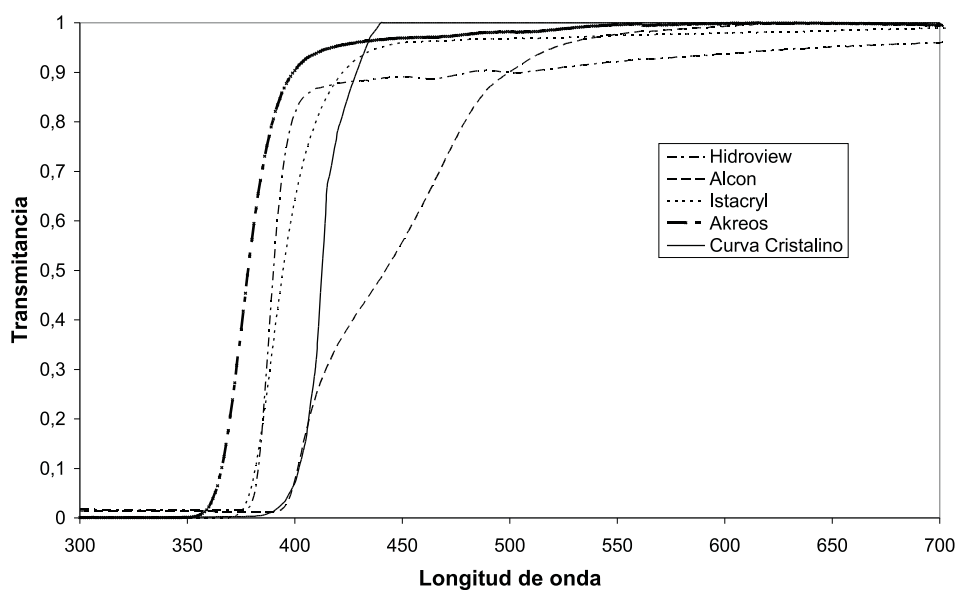


Figura 4.2: Comparación entre la transmitancia experimental de diferentes LIOs y el cristalino obtenido

$$B_{LIO}(\lambda) = \tau_{LIO}(\lambda)A(\lambda) \quad (4.2)$$

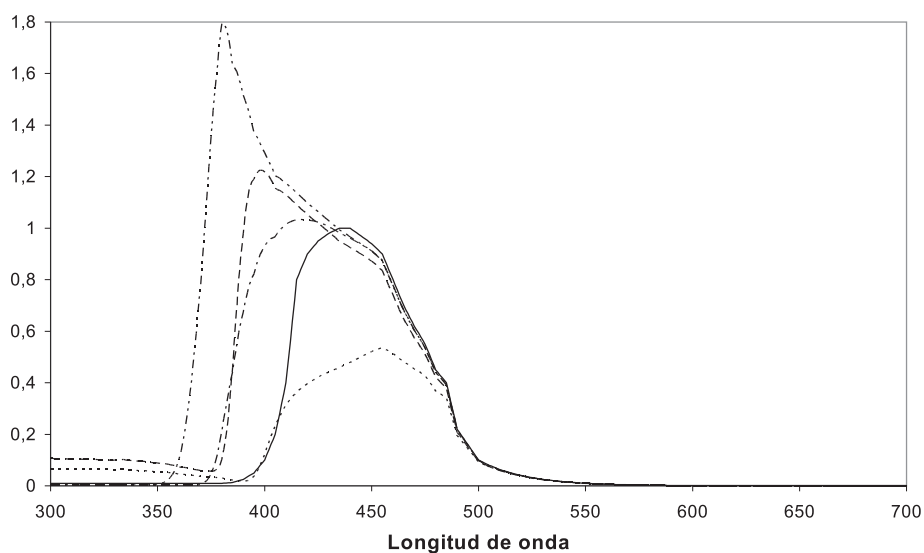


Figura 4.3: Espectro de acción del *Blue-Light Hazard* (línea continua) y las modificaciones calculadas para cada LIO

Hemos aplicado esta expresión a cada una de las curvas de transmitancia de las lentes estudiadas, los resultados obtenidos se han representado en la figura

(4.3).

Las diferencias obtenidas en transmitancia de las lentes respecto del cristalino, sobre todo en las longitudes de onda de corte, provocan modificaciones significativas del espectro de acción en esas regiones. Para longitudes de onda más largas, las modificaciones son pequeñas e incluso inexistentes. En el caso de la lente identificada como Acrysoft Natural, se aprecia un descenso significativo de la curva del BLH debido a la incorporación del filtro azul. Los valores de BLH en comparación a sus modificaciones se representan en la tabla (1.1).

4.3. Riesgo potencial de fuentes de radiación.

Recordemos que el espectro de acción del BLH juega el papel de función espectral de peso para evaluar los valores límite umbral (TLV) a partir de los cuales se calcula el riesgo potencial de una fuente de radiación para producir este efecto. Este riesgo relativo vendrá expresado por la ecuación:

$$X_{blue} = \sum_{300}^{700} X_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda \quad (4.3)$$

A la vista de los resultados obtenidos, resulta interesante reevaluar los valores límite umbral (TLV) y los tiempos máximos de exposición para diferentes fuentes de radiación, utilizando las modificaciones calculadas para el espectro de acción del BLH.

Sustituyendo en la ecuación (4.3) los valores de la función $B(\lambda)$ por cada una de las curvas calculadas anteriormente, y utilizando las curvas de irradiancia espectral relativa de distintas fuentes de radiación, con diferente contenido espectral en la zona UV, se ha calculado el riesgo potencial de distintas fuentes.

Las fuentes de radiación usadas en este estudio han sido las siguientes:

- Iluminantes patrones A y D65 definidos por la CIE [21]
- Tres espectros de irradiancia solar directa
- Lámpara fluorescente compacta
- Lámpara de vapor de mercurio de alta presión.

Los espectros de irradiancia solar directa se han obtenido usando el modelo SMART2 (versión 2.9.2) '*Single Model for Atmospheric Transmission of Sunshine*' de Gueymard [22], para diferentes condiciones atmosféricas. Como ejemplo se han generado tres espectros distintos variando la masa de aire relativa, el factor de turbidez y la cantidad de ozono.

Tabla 4.2: Modificación del espectro de acción del BLH para las diferentes LIO

Long. onda	BLH	Acrysoft	Hidroview	Akreos	Istacryl
305	0.01	0.0665	0.1043	0.0929	0.0029
315	0.01	0.0647	0.1026	0.0910	0.0029
325	0.01	0.0632	0.1006	0.0894	0.0028
335	0.01	0.0629	0.1006	0.0879	0.0017
345	0.01	0.0580	0.0936	0.0824	0.0023
355	0.01	0.0521	0.0838	0.0953	0.0023
365	0.01	0.0423	0.0682	0.378	0.0020
375	0.01	0.0351	0.0571	1.3050	0.0454
385	0.0125	0.0221	0.4574	1.5319	0.4420
395	0.0500	0.0364	1.1900	1.3007	0.8229
405	0.2000	0.2315	1.1545	1.1523	0.9667
415	0.8000	0.3627	1.0915	1.0959	1.0327
425	0.9500	0.4205	1.0176	1.0294	1.0232
435	1.0000	0.4591	0.9486	0.9622	0.9814
445	0.9700	0.5001	0.8992	0.9138	0.9373
455	0.9000	0.5361	0.8343	0.8467	0.8740
465	0.7000	0.4803	0.6468	0.6562	0.6810
475	0.5500	0.4268	0.5124	0.5191	0.5358
485	0.4000	0.3404	0.3761	0.3813	0.3906
495	0.1600	0.1441	0.1503	0.1519	0.1564
505	0.0794	0.0740	0.0743	0.0751	0.0777
515	0.0501	0.0479	0.0472	0.0477	0.0490
525	0.0316	0.0306	0.0299	0.0303	0.0309
535	0.0199	0.0195	0.0190	0.0192	0.0196
545	0.0126	0.0124	0.0120	0.0122	0.0124
555	0.0079	0.0078	0.0076	0.0077	0.0078
565	0.0050	0.0049	0.0048	0.0049	0.0049
575	0.0032	0.0031	0.0030	0.0031	0.0031
585	0.0020	0.0020	0.0020	0.0019	0.0020
595	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
605	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
615	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
625	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
635	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
645	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
655	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
665	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
675	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
685	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
695	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
700	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010

Los datos relativos a la lámpara fluorescente y la lámpara de vapor de mercurio se han obtenido experimentalmente en nuestro laboratorio midiendo las mismas, en un espectrorradiómetro UV-VIS [23]. Las curvas de irradiancia espectral relativa de cada una de las fuentes se pueden ver en las figuras (4.4 4.5).

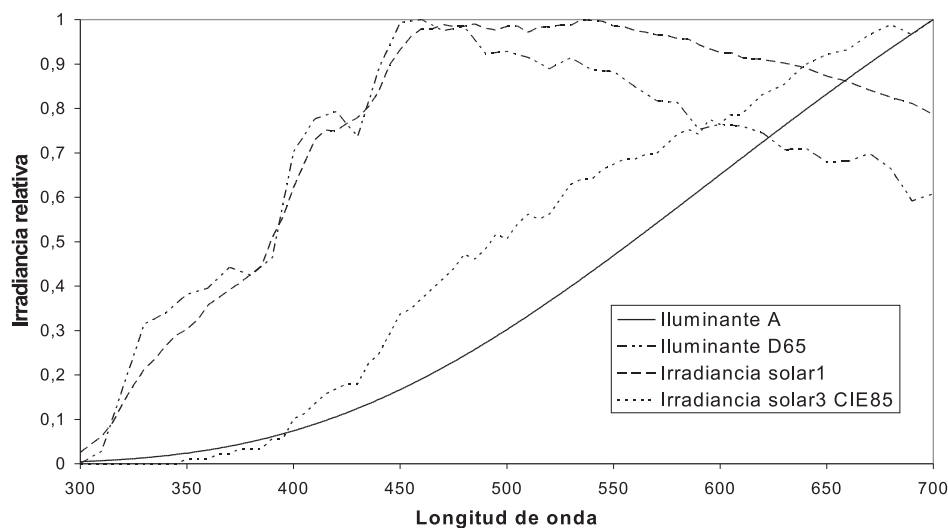


Figura 4.4: Irradiancia espectral relativa de las fuentes: Iluminante A, Iluminante D65 e Irradiancias Solares 1,2 y 3

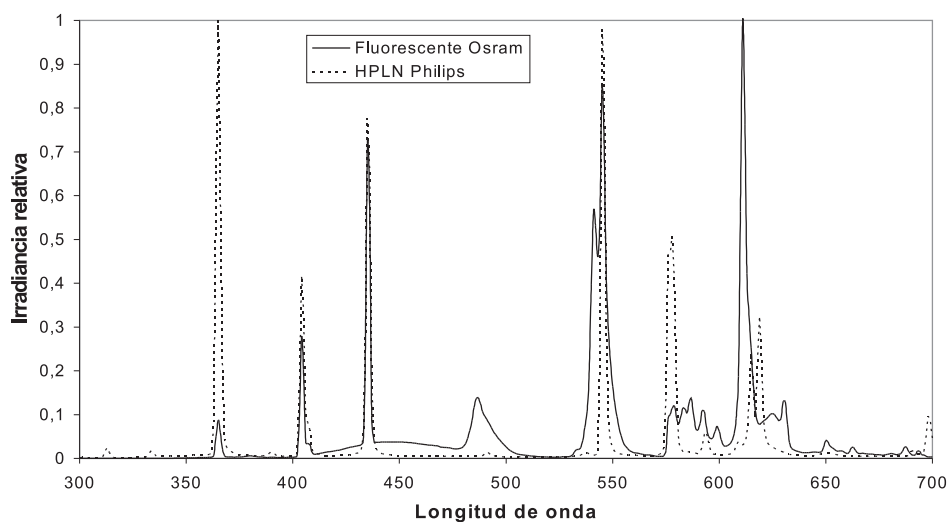


Figura 4.5: Irradiancia espectral relativa de la lámpara fluorescente compacta y de vapor de mercurio

En la Tabla (4.3) se dan los valores obtenidos para el factor de riesgo, X_{blue} , para cada fuente de radiación estudiada y cada espectro de acción modificado por

Tabla 4.3:

Valores obtenidos para X_{blue} para cada una de las lentes LIO con diferentes fuentes

X_{blue}	BLH	Istacryl	Akreos	Acrysoft	Hidroview
Iluminante A	11.428	12.957	15.084	7.486	13.154
Iluminante D65	60.571	74.454	93.351	38.107	78.284
Irrad. Solar1	59.584	72.777	91.037	37.493	76.148
Irrad. Solar2	60.155	73.532	92.048	37.804	76.876
Irrad. Solar3	20.265	21.994	23.857	13.175	21.882
Lámp. mercurio alta presion HPLN	2.701	3.657	5.174	1.588	4.045
Lámp. Fluorescente compacta	3.794	4.329	4.736	2.222	4.374

Tabla 4.4:

Valores relativos de X_{blue} para cada una de las lentes LIO con diferentes fuentes de irradiancia

$X_{blue}relativo$	Istacryl	Akreos	Acrysoft	Hidroview
Iluminante A	1.134	1.320	0.655	1.151
Iluminante D65	1.229	1.541	0.629	1.292
Irrad. Solar1	1.221	1.528	0.629	1.278
Irrad. Solar2	1.085	1.177	0.628	1.080
Irrad. Solar3	1.085	1.177	0.650	1.080
Lámp. Philips HPLN	1.354	1.916	0.588	1.498
Lámp. Fluorescente Osram	1.141	1.248	0.586	1.153

las lentes intraoculares.

De acuerdo con los valores obtenidos, todas las lentes, a excepción de la identificada como Acrysoft natural que incorpora un filtro azul además del filtro UV, producen factores de riesgo X_{blue} sustancialmente mayores al de un ojo normal. Para estimar mejor las diferencias en cada caso, en la tabla (4.4) hemos reescrito la tabla anterior en forma relativa, calculando la relación $X_{blue(LIO)}/X_{blue(BLHstandard)}$

A excepción de la lente identificada como Acrysoft natural, que consigue reducir el factor de riesgo entre aproximadamente un 35 % y un 42 %, dependiendo de la fuente estudiada, el resto de las lentes aumentan considerablemente el factor de riesgo. Es de destacar la lente identificada como Akreos, con factores de riesgo de hasta el 91.6 % superiores a los obtenidos en un ojo normal para fuentes de radiación de alto contenido en UV; e incluso fuentes de radiación de no muy alto contenido en UV como pueden ser una lámpara de incandescencia (Iluminante A) y la luz del día (Iluminante D65) pueden producir factores de riesgo entre el 32 % y el 54 % más alto que en un ojo normal.

Capítulo 5

Conclusiones

- Se ha hecho un estudio teórico encaminado a determinar las condiciones para el diseño y realización de un instrumento capaz de medir directamente el efecto de la radiación óptica conocido como '*Blue-Light Hazard*'.
- A partir del estudio teórico se ha elegido ajustar independientemente la región visible de la región ultravioleta del espectro.
- Se han seleccionado y se ha calculado los espesores que deben tener los filtros que modulen la región visible del espectro.
- Se han seleccionado y calculado los espesores que han de modular la región ultravioleta del espectro, y se ha determinado cual ha de ser el factor de escalado de cada región del espectro.
- Se han analizado distintas soluciones en base a la utilización de distintos tipos y combinaciones de detectores. Se presentan los criterios de bondad del ajuste de las distintas combinaciones obtenidas, y a partir de ellas se selecciona la mejor.
- Como conclusión de este estudio, se ha diseñado y construído un instrumento para la medida directa del efecto conocido como '*Blue-Light Hazard*', en todo el intervalo espectral donde está definido. La bondad de ajuste de la responsividad espectral relativa respecto al BLH teórico, viene dada por el valor $f'_1 = 10,97\%$.
- Se ha realizado un estudio de la transmitancia espectral de diferentes lentes intraoculares comerciales, encontrándose diferencias significativas entre ellas sobre todo en lo referente a la longitud de onda de corte.

- Las diferencias observadas en la transmitancia espectral de las lentes estudiadas con respecto a la transmitancia espectral del cristalino, obligan a modificar el espectro de acción BLH definido, para representar el caso de cada una de las lentes estudiadas. Sin llegar al caso afático, los nuevos espectros de acción calculados aumentan sensiblemente respecto al estándar para longitudes de onda cortas, consecuencia directa de sus menores longitudes de onda de corte.
- Se ha evaluado el riesgo potencial de diferentes fuentes de radiación sobre personas a las que se ha implantado este tipo de lentes, encontrándose que las personas con lentes intraoculares implantadas de los modelos estudiados, estarán más expuestas a sufrir el efecto '*Blue-Light Hazard*', particularmente si se ven expuestas a la irradiancia espectral de fuentes con alto contenido en radiación UV y longitudes de onda cortas del espectro visible.
- El aumento de riesgo de sufrir este efecto, en relación a un ojo normal, es muy importante en alguna de las lentes estudiadas, no sólo para el caso de estar expuesto a fuentes de radiación de alto contenido en UV, sino incluso para fuentes de radiación habitualmente usadas como fuentes de iluminación.

Apéndice A

Código Visual Basic 6.0

Se incluye el código que resume el ajuste de un juego de filtros a una curva objetivo como se describe en capítulos anteriores. El cálculo exhaustivo repite esta estructura básica para todas las combinaciones posibles de una colección entera de filtros seleccionando sucesivamente los mejores resultados

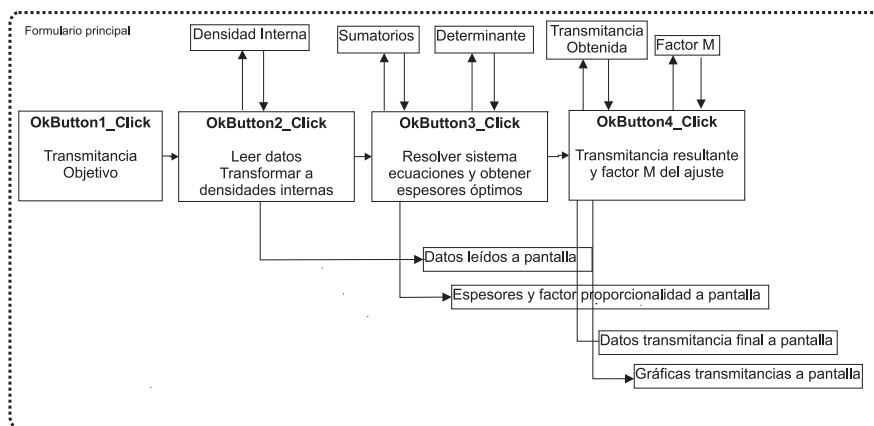


Figura A.1: Diagrama de flujo de un ajuste estándar del programa

..

..

' Leo datos y transformo a densidades internas

```
Private Sub OKButton2_ Click()
```

```
Dim numfiltro(6) As Integer
```

```
Dim Lectura(1 To 6001) As String
```

```
Dim thick(1 To 6) As Double
```

```

' Primero compruebo que las rutas son válidas
For i = 1 To CInt(NFiltros)
If (Filtro(i) = ) Then
MsgBox (.Especifique rutas válidas")
Exit Sub
End If

If (IsNumeric(EspesorTx(i - 1).Text) = False) Or (IsNumeric(Reflex(i - 1).Text)
= False) Then
MsgBox ("Intruduzca datos numéricos por favor")
Exit Sub
End If
Next i

' Espesores estándar y coeficientes reflexión como datos
For i = 0 To 5
thick(i + 1) = CDbI(EspesorTx(i).Text)
coefReflex(i + 1) = CDbI(Reflex(i).Text)
Next i

' Leo los datos de los archivos, y los transformo como necesito
For i = 1 To CInt(NFiltros)
Select Case i
Case 1
Call LeoArchivo(Filtro(i), filtro1(), Formato4(i - 1).Caption,numfiltro(i))
Call DensidadInterna(filtro1(), thick(i), coefReflex(i), numfiltro(i))
Case 2
Call LeoArchivo(Filtro(i), filtro2(), Formato4(i - 1).Caption,numfiltro(i))
Call DensidadInterna(filtro2(), thick(i), coefReflex(i),numfiltro(i))
Case 3
Call LeoArchivo(Filtro(i), filtro3(), Formato4(i - 1).Caption,numfiltro(i))
Call DensidadInterna(filtro3(), thick(i), coefReflex(i),numfiltro(i))
Case 4
Call LeoArchivo(Filtro(i), filtro4(), Formato4(i - 1).Caption,numfiltro(i))
Call DensidadInterna(filtro4(), thick(i), coefReflex(i),numfiltro(i))
Case 5
Call LeoArchivo(Filtro(i), filtro5(), Formato4(i - 1).Caption,numfiltro(i))

```

```

Call DensidadInterna(filtro5(), thick(i), coefReflex(i),numfiltro(i))
Case 6
Call LeoArchivo(Filtro(i), filtro6(), Formato4(i - 1).Caption,numfiltro(i))
Call DensidadInterna(filtro6(), thick(i), coefReflex(i),numfiltro(i))
End Select
Next i

```

```

' Compruebo que el número de datos es correcto
For i = 1 To CInt(NFiltros)
If (numdat <> numfiltro(i)) Then
MsgBox (.EI filtro " & i & " no tiene el número de datos correcto")
Exit Sub
End If
Next i

```

```

' Compruebo si los datos vienen ordenados como quiero
' Y los preparo para verlos en pantalla
For i = 1 To CInt(NFiltros)
Select Case i
Case 1
Call OrdenoDatos(filtro1(), numdat)
For j = 1 To numdat
Lectura(j) = CStr(filtro1(2, j))
Next j
Case 2
Call OrdenoDatos(filtro2(), numdat)
For j = 1 To numdat
Lectura(j) = Lectura(j) & & CStr(filtro2(2,j))
Next j
Case 3
Call OrdenoDatos(filtro3(), numdat)
For j = 1 To numdat
Lectura(j) = Lectura(j) & & CStr(filtro3(2,j))
Next j
Case 4
Call OrdenoDatos(filtro4(), numdat)
For j = 1 To numdat

```

```

Lectura(j) = Lectura(j) & & CStr(filtro1(2,j))
Next j
Case 5
Call OrdenoDatos(filtro5(), numdat)
For j = 1 To numdat
Lectura(j) = Lectura(j) & & CStr(filtro1(2,j))
Next j
Case 6
Call OrdenoDatos(filtro6(), numdat)
For j = 1 To numdat
Lectura(j) = Lectura(j) & & CStr(filtro1(2,j))
Next j
End Select
Next i

' Muestro los datos que leí
For i = 1 To numdat
Form2.List1.AddItem (CStr(filtro1(1, i)) & & Lectura(i))
Next i
Form2.Visible = True
OKButton3.Enabled = True
FuncionPeso.Enabled = True
End Sub

..

..

' Hago los sumatorios que forman los coeficientes del sistema de
' ecuaciones y calculo los determinantes que resuelven
Private Sub OKButton3_ Click()
Dim i As Integer
Dim Datos1(1 To 2, 1 To 6001) As Double, Datos2(1 To 2, 1 To 6001) As Double
Dim Resul As Double
Dim A(7, 8) As Double, B(7, 8) As Double, C(7) As Double

Call Sumatorios1(Trans(), filtro1(), filtro2(), filtro3(), filtro4(), fil-
```

```
tro6(), numdat, CInt(NFiltros), A(), BotonPeso.Caption)
```

```
'Esta parte resuelve por Cramer, lo duro es escoger las matrices
For i = 1 To NFiltros + 1
C(i) = A(i, 1)
Next i
```

```
' Determinantes que resuelven el sistema, reordenando antes las matrices
For k = -1 To NFiltros
For i = 1 To NFiltros + 1
For j = 1 To NFiltros + 1
```

```
    B(i, j) = A(i, j + 1)
    If ((k + 1) = j) Then B(i, j) = C(i) 'Voy substituyendo adecuadamente la matriz
    de coeficientes
Next j, i
Espesor(k + 1) = Determinante(B(), CInt(NFiltros))
```

```
    If (k = -1) And (Abs(Espesor(0)) < 1e-10) Then
MsgBox ("No hay solución única, revise los datos")
Exit Sub
End If
```

```
    If (k + 1 > 0) Then
Espesor(k + 1) = Espesor(k + 1) / Espesor(0)
End If
Next k
```

```
' Muestro los resultados en el formulario
Label8.Visible = True
TextA.Text = CSng(Espesor(1)): TextA.Visible = True
```

```
    espesorTotal = 0
For i = 1 To (NFiltros)
TextResult(i - 1).Visible = True
TextResult(i - 1).Text = CSng(Espesor(i + 1))
espesorTotal = espesorTotal + CSng(Espesor(i + 1))
```

Next i

```
Label12.Visible = True
TextEspesor.Text = espesorTotal: TextEspesor.Visible = True
OKButton4.Enabled = True
End Sub
```

..

..

```
'Con los espesores, obtengo la transmitancia correspondiente y el factor M'
Private Sub OKButton4_ Click()
Dim alfa As Double, M As Double
```

```
' Calculo la transmitancia resultante de los filtros...
' Y guardo datos en fichero especificado
Call TransmitanciaFinal(filtro1(), filtro2(), filtro3(), filtro4(), filtro5(), filtro6()),
Espesor(), coefReflex(), numdat, TrFinal(), CInt(NFiltros), alfa, True)
publicALFA = alfa 'Pequeña chapuzilla...jeje
Call FactorM(Trans(), TrFinal(), alfa, numdat, M)
```

```
' Comprueba la ruta final necesaria
If (RutaTr = ) Or (RutaTr = "-") Then
MsgBox ("Necesito una ruta para guardar la transmitancia resultante")
Exit Sub
End If
```

```
' Guardo los datos a archivo
Call GuardoDatos(RutaTr, TrFinal(), numdat)
```

```
' Muestro datos por pantalla
For i = 1 To numdat
Form2.List1.AddItem (TrFinal(1, i) & & TrFinal(2, i) & & Trans(2,i))
Next i
TextM.Text = CSng(M): TextM.Visible = True: Label9.Visible = True
Form2.Visible = True
```

```

' Representación gráfica de los datos
Dim Ploto1 As CWPlot, Ploto2 As CWPlot
Dim EjeX As CWAxis

```

```

Form3.Grafica1.ClearData
Form3.Grafica1.ChartLength = 2

```

```

Set Ploto1 = Form3.Grafica1.Plots.Add
Set Ploto2 = Form3.Grafica1.Plots.Add
Set EjeX = Form3.Grafica1.Axes.Item(1)

```

```

EjeX.Minimum = TrFinal(1, 1)
EjeX.Maximum = TrFinal(1, numdat)

```

```

Ploto1.PointColor = vbRed
Ploto1.LineStyle = cwLineNone
Ploto1.PointStyle = cwPointSimpleDot
Ploto1.PlotXY (TrFinal())

```

```

Ploto2.PointColor = vbGreen
Ploto2.LineStyle = cwLineNone
Ploto2.PointStyle = cwPointSimpleDot
Ploto2.PlotXY (Trans())

```

```

Form3.Visible = True
FrameAjuste.Enabled = True
End Sub

```

```

..

```

```

..

```

```

' Calculo de la transmitancia ideal
Public Sub TransmitanciaIdeal(Blue() As Double, EYE() As Double,
Trans() As Double, ByVal numBLH)
Dim i As Integer

```

```

For i = 1 To numBLH
If (EYE(2, i) < 0.00001) Then EYE(2, i) = 0.00001
Trans(1, i) = Blue(1, i)
Trans(2, i) = (Blue(2, i) / EYE(2, i))
Next i
End Sub

```

..

..

' Transformo transmitancias en densidades ópticas internas

```

Public Sub DensidadInterna(Datos() As Double, ByVal Espesor As Double, R As Double, ByVal numero As Integer, Optional format As String = "-")

```

```

    Dim i As Integer

```

```

    'Si cojo datos de entrada tengo el coeficiente  $T_2$ ...

```

```

    'O si estoy trabajando en cálculo sistemático...

```

```

    If (format = "-") Then

```

```

        format = Form1.Cambio2.Caption

```

```

    End If

```

```

        If (format = "T  $\hat{2}$ ") Then

```

```

            R = 1 - (R)  $\hat{(1 / 2)}$ 

```

```

        End If

```

' Pequeña clausula, si los datos de entrada son transmitancias internas

' Basta poner R=0 y el calculo es igual(ver formulas teoría)

```

    If (Form1.Cambio1.Caption = "Trans-Internas:") Then

```

```

        R = 0

```

```

    End If

```

```

    For i = 1 To numero

```

```

        If ((Datos(2, i)) < 0.00001) Then

```

'Así evito errores numéricos con los logaritmos, tengo en cuenta el espectrofotómetro

```

Datos(2, i) = 0.00001
End If
Datos(2, i) = (1 / Espesor) * Log(((1 - R) ^ 2) / Datos(2, i)) * (1 / Log(10)) ' es
por el rollo de los logaritmos
Next i
End Sub

```

..

..

' Hace los sumatorios para el sistema

```

Public Sub Sumatorios1(Ideal() As Double, d1() As Double, d2() As
Double, d3() As Double, d4() As Double, d5() As Double, d6() As
Double, ByVal numdat, ByVal NFiltros As Integer, A() As Double,
Optional FuncPeso As String = "Normal")

```

' Definición de variables Dim i As Integer, k As Integer, j As Integer

```
Dim D() As Double, UNOS(1 To 2, 1 To 6001) As Double
```

```
Dim Peso(1 To 6001) As Double
```

' Para cuando modifique la transmitancia ideal, creo una copia

```
For i = 1 To numdat
```

```
If (FuncPeso = "Normal") Then
```

```
If (Ideal(2, i) < 0.00001) Then Ideal(2, i) = 0.00001
```

```
Peso(i) = Ideal(2, i)
```

```
ElseIf (FuncPeso = "Logarit..") Then
```

```
Peso(i) = 10(Log(Ideal(2,i))/2*Log(10))
```

```
ElseIf (FuncPeso = "Normal-1") Then
```

```
Peso(i) = Ideal(2, i)
```

```
If (IsNumeric(Form1.PesoCero.Text) = True) Then
```

```
If (Ideal(2, i) <= 0.00001) Then Peso(i) = Form1.PesoCero.Text
```

```
Else
```

```
If (Ideal(2, i) <= 0.00001) Then Peso(i) = 0.0001
```

```
End If
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
' Elimino posibles datos de filtros no deseados...así evito errores
For i = (NFiltros + 1) To 6
For j = 1 To numdat
Select Case i
Case 1
d1(2, j) = 0
Case 2
d2(2, j) = 0
Case 3
d3(2, j) = 0
Case 4
d4(2, j) = 0
Case 5
d5(2, j) = 0
Case 6
d6(2, j) = 0
End Select
Next j, i

' Inicializo Matrices
For i = 1 To (NFiltros + 1)
For j = 1 To (NFiltros + 2)
A(i, j) = 0
Next j, i

' Matriz de unos
For i = 1 To 2
For j = 1 To 6001
UNOS(i, j) = 1
Next j, i

'Calculo todos los factores que necesito
For i = 1 To (NFiltros + 1)
Select Case i
Case 1
D = UNOS
```

```

Case 2
D = d1
Case 3
D = d2
Case 4
D = d3
Case 5
D = d4
Case 6
D = d5
Case 7
D = d6
End Select

```

```

    For k = 1 To numdat
    If ((Ideal(2, k)) < 0.00001) Then 'Así evito errores numéricos con los logaritmos,
    el valor puesto tiene en cuenta la precisión de un espectrofotómetro

```

```

        Ideal(2, k) = 0.00001
    End If

```

```

        ' Sumatorios
A(i, 1) = A(i, 1) + (Peso(k) * (-Log(Ideal(2, k)) / Log(10)) * D(2, k))
'Logaritmo en base 10, este es el término independiente, ¡ojo! con el signo
A(i, 2) = A(i, 2) - (Peso(k) * D(2, k))
A(i, 3) = A(i, 3) + (Peso(k) * d1(2, k) * D(2, k))
A(i, 4) = A(i, 4) + (Peso(k) * d2(2, k) * D(2, k))
A(i, 5) = A(i, 5) + (Peso(k) * d3(2, k) * D(2, k))
A(i, 6) = A(i, 6) + (Peso(k) * d4(2, k) * D(2, k))
A(i, 7) = A(i, 7) + (Peso(k) * d5(2, k) * D(2, k))
A(i, 8) = A(i, 8) + (Peso(k) * d6(2, k) * D(2, k))
Next k, i
End Sub

```

..

..

```

' Función que calcula determinantes de orden n, en principio.
' Desarrollandolo en menores
Public Function Determinante(A() As Double, NFiltros As Integer)
' Variables
Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, N As Integer
Dim Menor() As Double

N = NFiltros + 1
ReDim Menor(1 To N, 1 To N)

For i = 1 To N

    If (N = 1) Then
Determinante = Determinante + A(1, 1)
Exit Function
End If

    For j = 1 To N
If (j <> i) Then
For k = 2 To N
If (j > i) Then
Menor(k - 1, j - 1) = A(k, j)
ElseIf (j < i) Then
Menor(k - 1, j) = A(k, j)
End If
Next k
End If
Next j

' Se trata de una funcion recurrente
Determinante = Determinante + A(1, i) * ((-1)(1+i)) * Determinante(Menor(),
(N - 2))
Next i End Function

..

```

..

```

' Con los espesores calculados obtengo la transmitancia del sistema
Public Sub TransmitanciaFinal(d1() As Double, d2() As Double, d3()
As Double, d4() As Double, d5() As Double, d6() As Double, Espe-
sor() As Double, R() As Double, ByVal numdat, Trans1() As Double,
NFiltros As Integer, alfa As Double, Optional pegados As Boolean)

```

```

' Variables locales
Dim i As Integer, j As Integer
Dim DD(1 To 6001) As Double, A As Double, RR(1 To 6) As Double

```

```

'Inicializo matriz
For i = 1 To numdat
DD(i) = 0
Next i

```

```

' Si he seleccionado la opción de filtros pegados lo que hago es hacer cero los
R(i) que no necesito
If (pegados = True) Then
For i = 1 To NFiltros
RR(i) = R(i)
If (i > 1) Then R(i) = 0
Next i
End If

```

```

' Factor de proporcionalidad
A = Espesor(1)
For i = 1 To NFiltros
A = A - 2 * (Log((1 - R(i))) / Log(10))
Next i
alfa = 10(-A)

```

```

' Voy calculando la densidad resultante
For i = 1 To numdat
For j = 2 To (NFiltros + 1)
Select Case j

```

Case 2

DD(i) = DD(i) + (d1(2, i) * Espesor(j)) + ((-2) * Log(1 - R(j - 1)) / Log(10))

Case 3

DD(i) = DD(i) + (d2(2, i) * Espesor(j)) + ((-2) * Log(1 - R(j - 1)) / Log(10))

Case 4

DD(i) = DD(i) + (d3(2, i) * Espesor(j)) + ((-2) * Log(1 - R(j - 1)) / Log(10))

Case 5

DD(i) = DD(i) + (d4(2, i) * Espesor(j)) + ((-2) * Log(1 - R(j - 1)) / Log(10))

Case 6

DD(i) = DD(i) + (d5(2, i) * Espesor(j)) + ((-2) * Log(1 - R(j - 1)) / Log(10))

Case 7

DD(i) = DD(i) + (d6(2, i) * Espesor(j)) + ((-2) * Log(1 - R(j - 1)) / Log(10))

End Select

Next j

Trans1(1, i) = d1(1, i)

Trans1(2, i) = (1 / alfa) * (10^{(-DD(i))})

Next i

' Si he seleccionado filtros pegados, antes de salir recoloco bien los datos de pérdidas por reflexion

If (pegados = True) Then

For i = 1 To NFiltros

R(i) = RR(i)

Next i

End If

End Sub

..

..

'Factor M' para el ajuste

Public Sub FactorM(Ideal() As Double,ajustada() As Double, ByVal alfa As Double, ByVal numdat As Integer, M As Double)

Dim i As Integer

M = 0

```
alfa = 1 'Pongo esto pues ya introducí alfa antes...¡OJO!  
For i = 1 To numdat  
M = M + (ajustada(2, i) - (alfa) * Ideal(2, i))  $\hat{2}$   
Next i  
End Sub
```


Bibliografía

- [1] ACGIH Documentation for the Theshold Limit Values, 4th Ed.,American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, O.H. 1992
- [2] Sliney D H, Bitran M. the ACGIH action spectra for hazard assessment: The TLV's In: Matthens R, Sliney D H, ed. Measurements of optical radiation hazards. Oberschleissheim, Germany: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP 6/98) and CIE (x016-1998) 1998:241-29)
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 1997, Guidelines on Limints of Exposure for Broadband Incoherent Optical Radiation, Health Physics, 73 p.539-554. 1997
- [4] CIE Collection in Photobiology and Photochemistry. CIE Publication No 138. CIE Central Bureau. Viena (Austria), 2000
- [5] Ernest PH. Light-Transmission spectrum comprasion of foldable intraocular lenses. J. Cataract Refract Surg 2004; 30:1755-1758
- [6] Lindstrom RL, Doddi N. Ultraviolet light absortion in Intraocular Lenses. J. Cataract Refract Surg 1986; 12:285-289
- [7] Laube T, Apel H, Koch H R. Ultraviolet Radiation Absortion of Intraocular Lenses. Ophthalmology 2004; 11:880-885.
- [8] Link L, Lee Jeta L. Spectral transmission characteristics of spectacle, contact and intraocular lenses. An Ophthalmology 2002; 34:206-215
- [9] A. García Ovejero. Fuente patrón D65 para Colorimetría. Trabajo de iniciación a la investigación (Instituto de Óptica, CSIC) 1976
- [10] W.E.R Davis y G.Wyszecki. J.Opt.Soc.Amer. 52,679 (1962)
- [11] Schott Optical Glass Filters. Catálogo de Filtros (2004)

- [12] Methods of Characterizing Illuminance Meter and Luminance Meters. CIE Publication N° 69. CIE Central Bureau. Viena (Austria), 1987.
- [13] Handbook of Applied Photometry. ED. C.DeCusatis. AIP Press. New York, 1997.
- [14] A.Corróns and C.Carreras. Opt.Pur.Appl, Vol10 pp93 (1977).
- [15] BoettnerEA, Wolter JR. Transmission of the intraocular media. InvestOphthalmology 1962;1:776-783
- [16] VanNamem D, Voss JJ. Spectral transmission of the human ocular media. Vis Res 1974;14:1237-1244
- [17] Weale RA. Age and the tansmittance of the human crystalline lens. J.Physiology 1988; 395:577-587
- [18] Nguyen-Tri D, Overbury O, Faubert J. The role of lenticular sensescence in age-related colorvision changes. Invest Ophthalmology VisSci2003; 44:3698-3704
- [19] Gaillard ER, Zheng L, Merraim JC. Dillon J. Age-related changes in the absortion characteritics of the primate lens. Invest OphthalmolVisSci2000; 41:1454-1459
- [20] Kuriki I,Ishii W, Uchikawa K. Effect of change in spectral transmittance of crystalline lens with aging on colorvision. JofIEIJ2000; 85:107-117
- [21] Joint ISO/CIE Standart ISO 10526:1999/CIE S005/E-1998 CIE Strandart Illuminants for Colorimetry.
- [22] Gueymard CA. SMARTS, A simple model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algoritms and performance assessment (version2.9.2) 2003.
- [23] Corredera P, Corróns A, Campos J, Pons A. Realitation of an absolute spectroradiometer. ApplOpt 1991; 30:1279-1284
- [24] Czibula G. Procuding a detector with a predetermined spectral responsivity. 10th International Symposium of the Technical Committe on Photon Detectors. International Measurement Confederation (IMEKO) vol1:189-199 Budapest (1982)

- [25] Siekmann H. Hazards to the eyes from optical radiation. BG Institute for Occupational Safety and Health (2002)
- [26] George PE, Miklós R, Desing and characteritazion of a photometer colorimeter standard. ApplOpt 2004: 43 2621:2631.