



**I
N
A
O
E**

**TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS
CROMÁTICAS ENTRE UN COLORÍMETRO DE
LED'S Y UN ESPECTROFOTÓMETRO**

Por

Karen Patricia Volke Sepúlveda

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la especialidad de Optica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Optica y Electrónica.

Supervisada por:

Dr. Eduardo Tepichín, I.N.A.O.E.

Tonantzintla, Puebla.

1998



AGRADECIMIENTOS

Un trabajo de tesis es siempre una tarea compartida. Por esta razón, quiero expresar mi profunda gratitud a las siguientes personas e instituciones que de alguna forma contribuyeron o están involucradas en la realización de este trabajo:

En primer lugar al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) por otorgarme la beca que me permitió realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Eduardo Tepichín por haberme sugerido el tema de tesis, por la dirección de la misma y por su gran apoyo.

A los sinodales Dr. Alejandro Cornejo Rodríguez, Dr. Gabriel Martínez Niconoff y M.C. José Guadalupe Suárez Romero por sus importantes comentarios, su excelente disposición y el tiempo que dedicaron para revisar este trabajo. Así mismo, agradezco de manera muy especial a la Dra. Jazmín Carranza por su colaboración y sus muy valiosas sugerencias.

A Gustavo Ramírez y a Jorge Ibarra por su invaluable ayuda técnica y por hacerme más agradables las jornadas de trabajo con sus bromas.

A Vladimir, por sus atinadas observaciones y sugerencias, por su apoyo en todo momento, y además, por la dicha que me da al compartir mi vida con él (y bueno... también por soportar mis malos humores cuando había mucho trabajo).

A mis padres y a mi hermana Tania, por su gran amor y por el apoyo que siempre me han brindado, entre otras muchas cosas, para estudiar y prepararme.

A todos mis amigos, que me hacen la vida más agradable a través de los momentos que tengo la alegría de compartir con ellos. Particularmente, quiero agradecer a mi amigo Luis Carcaño por la ayuda y asesoría que me brindó en la parte de electrónica.

Al CONACyT por el soporte económico que brindó a esta investigación a través del proyecto No. 211290-5-3103PE.

A la empresa Axon Electro-fotónica por haber prestado el instrumento prototipo que se utilizó para desarrollar la parte experimental del trabajo. Y a Francisco Echeagaray y Eugenio Vargas por enseñarme a usarlo.

Finalmente, les doy las gracias a todas las personas que de un modo u otro han contribuido a mi formación profesional.

RESUMEN

La medición del color es un tema muy importante en la actualidad, ya que en la industria moderna el control de calidad por medio de color es una práctica cada vez más requerida.

Básicamente existen dos tipos de instrumentos capaces de medir color: los espectrofotómetros y los colorímetros. Dentro de los colorímetros se pueden distinguir dos clases: los visuales y los fotoeléctricos.

Los colorímetros visuales son los instrumentos más directos para medir color, pero presentan el inconveniente de que sus lecturas dependen del observador. Por esta razón están siendo desplazados por los colorímetros fotoeléctricos que tradicionalmente han utilizado luz blanca y una combinación de filtros y detectores fotoeléctricos para reemplazar al ojo. Sin embargo, este tipo de instrumentos deben tener características particulares para poder considerar que miden color, ya que el término color está referido a la percepción e interpretación de un observador humano a cierto estímulo físico.

En este trabajo se analiza la posibilidad de medir color con un nuevo tipo de instrumento fotoeléctrico que reemplace el sistema de luz blanca y filtros por diodos emisores de luz o LED's, lo cual disminuiría los costos de fabricación. Esto es ahora posible, ya que hace menos de tres años que salieron al mercado los LED's azules. En la tesis se discuten las características técnicas que deben dichos instrumentos para poder considerarse colorímetros, y finalmente se presenta una transformación de coordenadas que relacione las lecturas de este tipo de instrumentos con el sistema internacional de especificación de color más utilizado (Sistema CIE 1930).

A mis padres,

a mi hermana,

y a mi esposo Vladimir...con todo mi amor.

INDICE	pag
1. Introducción	1
2. Conceptos básicos de teoría del color	6
2.1. El concepto de color	7
2.2. La sensación de color	9
2.3. Radiometría	12
2.4. El estudio de la luz: Fotometría	16
3. Colorimetría	21
3.1. Elementos que producen la sensación de color	22
3.2. Mezcla aditiva de colores	25
3.3. Sistema CIE de coordenadas de color	32
3.4. Longitud de onda dominante y pureza	36
3.5. Mezcla sustractiva de colores	40
3.6. Evaluación de diferencias de color	41
3.7. Instrumentos para medir color	44
3.7.1. Colorímetros de tres colores utilizando componentes espectrales	46
3.7.2. Colorímetros visuales de tres colores utilizando filtros	47

3.7.3. Colorímetros para la determinación directa de longitud de onda dominante y pureza	48
3.7.4. Colorímetros de vectores de Guild	48
3.7.5. Colorímetros de dispersión rotatoria	49
3.7.6. Colorímetros empíricos	50
3.7.7. Colorímetros de disco utilizando estándares de color	50
3.7.8. Colorímetros fotoeléctricos de filtros	51
3.7.9. Colorímetros de LED's	53
Transformaciones de coordenadas cromáticas	55
4.1. Transformación de coordenadas cromáticas para colorímetros visuales	56
4.2. Transformación de coordenadas cromáticas para colorímetros fotoeléctricos de filtros	59
4.3. Propuesta de transformación de coordenadas entre los valores triestímulo XYZ y las lecturas de un colorímetro de LED's	62

5. Resultados experimentales	68
5.1. Equipo, materiales y métodos utilizados	68
5.1.1. Características técnicas del instrumento prototipo	69
5.1.2. Caracterización de los LED's	76
5.1.3. Descripción de la muestra que se utilizó como blanco estándar, de las muestras de color y de las mediciones	86
5.2. Análisis de resultados	89
5.3. Nuevas propuestas	95
6. Conclusiones	100
Referencias	102
Apéndice A. Valores triestímulo espectrales CIE 1931.	104
Apéndice B. Iluminantes patrón.	106
Apéndice C. Radiancia espectral de los LED's.	107

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION

En la actualidad, cualquier producto industrial está sujeto a estándares de calidad, y el color es uno de los criterios decisivos para establecerlos. De hecho, los productos de la industria moderna se identifican por un color típico que siempre debe tener la misma apariencia [1]. Como algunos ejemplos se pueden mencionar a industrias como la textil, la automotriz, la cosmética, la alimenticia, las de pinturas y tintas, las imprentas, etc. Esta situación ha demandado que la tecnología de medición del color se desarrolle significativamente en el último siglo.

Por el momento, la frase “medición de color” se puede entender como el proceso de determinar los valores de un conjunto de cantidades físicas que permitan especificar un color en términos de algún tipo de escala. Esta es una definición muy ambigua, sin embargo, a lo largo de este trabajo se presentarán los elementos suficientes para precisar dicho concepto.

En general, el proceso de medir un color comprende dos etapas: el examen de la muestra y la evaluación de resultados. Para examinar una muestra es necesario contar con una fuente de luz, un estándar de referencia y un detector. Cualquier sistema de análisis de color cuenta con estas partes. Por otro lado, la evaluación comprende tres pasos fundamentales; los dos primeros consisten en determinar si existe o no una diferencia de color, y describir esta diferencia en caso de que exista. El tercer paso en el proceso de evaluación, es el de decidir con base en los resultados, si la diferencia es aceptable o no [2]. En los instrumentos más sencillos, que son los que se tratan en esta tesis, la tarea de decidir se encuentra a cargo de un operador. Sin embargo, actualmente existen dispositivos programados para tomar la decisión por sí mismos. Estos son los sistemas de visión artificial, que además, no están limitados al

análisis del color de una muestra, sino que también pueden analizar a su textura, forma y tamaño [3]. Por supuesto, el costo de estos sistemas es muy elevado, ya que es una tecnología relativamente reciente y muy sofisticada.

La mayoría de los instrumentos que miden color, basan su funcionamiento en el principio de colorimetría tricromática, esto es, que cualquier color se puede igualar con la mezcla de tres colores básicos o primarios (las limitaciones de esta técnica se discuten en el Capítulo 3) [4]. Excluyendo a los sistemas de visión artificial, los dos tipos más importantes de instrumentos que permiten medir color son los espectrofotómetros y los colorímetros. Aunque también se puede mencionar a los densitómetros, pero haciendo la aclaración de que esta clase de instrumentos no es capaz de evaluar color en términos de una escala absoluta; su aplicación está estrictamente limitada a detectar diferencias de color [5]. Una escala absoluta de medición de algún atributo, se refiere a aquella en la que sólo existe un valor de referencia, que corresponde a la magnitud cero cuando se carece por completo del atributo en cuestión. En contraste, una escala relativa es aquella en la que se imponen tanto el límite inferior como el superior [5].

Los espectrofotómetros miden el porcentaje de luz reflejada (o transmitida) por un objeto para cada longitud de onda del espectro visible, lo cual implica un minucioso análisis a todo lo largo del espectro. Para esto se utiliza una fuente de luz blanca y un dispositivo monocromador que puede ser una rejilla de difracción o un prisma [4]. La información proporcionada por un espectrofotómetro no constituye, en sí misma, una medición de color, pero a partir de ella se pueden calcular los valores que permiten especificar e identificar el color de un objeto en el sistema colorimétrico más utilizado, que es el que se conoce como CIEXYZ o CIE 1930 [2], y que es una escala absoluta. Esta es una forma indirecta de medir color, pero tiene la ventaja de ser un método muy confiable y de gran exactitud.

En contraste, los colorímetros analizan la reflectancia (o transmitancia) de una muestra sólo para determinadas longitudes de onda. Antes de profundizar más en este tema, hay que hacer una distinción entre dos clases de colorímetros: los visuales y los fotoeléctricos [6]. Los visuales son los sistemas más directos para medir color, pero

presentan el grave inconveniente de que sus lecturas pueden variar mucho entre un observador y otro. Por esa razón, en la actualidad están siendo desplazados por los colorímetros fotoeléctricos, que tradicionalmente han utilizado filtros y detectores fotoeléctricos para reemplazar al ojo. Su funcionamiento consiste en iluminar con luz blanca la muestra que será analizada, y determinar el porcentaje de luz reflejada a través de tres o cuatro filtros. En esta forma, se obtienen ternas de valores que caracterizan el color del objeto [2].

Es importante mencionar que los filtros en los colorímetros fotoeléctricos deben tener características particulares, de tal forma que se pueda considerar que estos instrumentos miden color (tales características se discutirán en los Capítulos 3 y 4) [6]. Esto se debe a que el término color no es un concepto físico, sino psicofísico. Es decir, hablar de color involucra de manera inherente a un observador humano y su percepción e interpretación de un cierto estímulo físico. Por lo tanto, resulta muy delicado plantear un método de medición de color en el que no participe un observador, y hay que precisar las condiciones bajo las cuales esto es posible. Por eso es que con frecuencia los colorímetros fotoeléctricos se utilizan preferentemente para medir diferencias de color, es decir, utilizando una escala relativa, y no para realizar mediciones absolutas [2]. Aún así, es posible encontrar transformaciones aproximadas entre las lecturas de cualquier tipo de colorímetro y las especificaciones de color obtenidas con un espectrofotómetro.

Con respecto a los costos, los espectrofotómetros y los colorímetros son más baratos que los sistemas de visión artificial; sus precios en el mercado pueden variar aproximadamente entre \$5,000 y \$50,000 U.S.D. Tal es el caso, por ejemplo, del espectrofotómetro Ely-2000, que cuesta alrededor de \$5000 U.S.D. [7]; o los espectrofotómetros Color Eye 580 (portátil), Color Eye 2180 y Color Eye 7000 de la compañía Macbeth, cuyos precios son de aproximadamente \$13,500 U.S.D. para los dos primeros, y de \$42,000 U.S.D., para el último [8]. Pero hoy en día, con el desarrollo de los diodos emisores de luz o LED's, se puede reemplazar el sistema de luz blanca y filtros por este tipo de fuentes, lo cual resulta aún más económico y práctico, ya que los LED's son muy baratos (entre \$0.10 y \$8.00 U.S.D) y de fácil

manipulación. Esta es una tecnología muy novedosa, ya que hasta hace menos de tres años, aún no existían comercialmente LED's azules, y por lo tanto, no era posible concebir un colorímetro de LED's. Sin embargo, al igual en el caso de los colorímetros fotoeléctricos de filtros, los dispositivos de LED's también deben satisfacer ciertas características para que efectivamente puedan considerarse colorímetros, y no sólo densitómetros. Por su novedad, tales características aún no han sido determinadas.

En ese sentido, los objetivos generales de este trabajo son: por una parte, presentar los argumentos físicos que permiten reconocer la posibilidad de medir color utilizando una combinación de LED's y detectores fotoeléctricos. Por otra parte, establecer las características físicas y técnicas que debe satisfacer un instrumento de este tipo para poder considerarse colorímetro. Y finalmente, proponer una transformación entre las coordenadas de color CIEXYZ, proporcionadas por un espectrofotómetro, y las lecturas que se obtienen con un colorímetro de LED's.

El instrumento que se utilizó como prototipo, para verificar experimentalmente las hipótesis realizadas en este trabajo, fue desarrollado por Alarcón, Echeagaray y Tepichín en 1997 [9]. Su sistema óptico consta básicamente de cuatro LED's y un detector fotoeléctrico, y está diseñado para determinar el porcentaje de luz reflejada por objetos opacos en tres colores primarios, con respecto a la que refleja una muestra de color blanco que se toma como referencia.

De acuerdo a lo anterior, el contenido de la tesis es el siguiente: los Capítulos 2 y 3 están dedicadas a presentar las bases teóricas de colorimetría. Específicamente, en el Capítulo 2 se exponen los conceptos básicos relacionados con color, y en el Capítulo 3, se aborda el tema de medición del color. Se explican los sistemas de coordenadas cromáticas más importantes, así como las características de los colorímetros tradicionales y del colorímetro de LED's.

En el Capítulo 4 se presentan las transformaciones de coordenadas cromáticas ya existentes para los colorímetros visuales y fotoeléctricos. Y posteriormente, se hacen las propuestas concretas en cuanto a las condiciones que deben satisfacer los

colorímetros de LED's. Por último, se sugiere una transformación de coordenadas cromáticas aplicable a dichos instrumentos.

La descripción del trabajo experimental que se realizó para probar la hipótesis planteada en el Capítulo 4, así como el análisis de resultados, se muestran en el Capítulo 5.

Finalmente, el Capítulo 6 está dedicado a las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS BÁSICOS DE TEORÍA DEL COLOR

Los objetos pueden verse gracias a la luz que emiten, reflejan, dispersan, o bien, que pasa a través de ellos. En el lenguaje cotidiano, decimos que un objeto se distingue de otros gracias a atributos como su forma, tamaño, textura, color, etc. En esta tesis se trata particularmente con uno de dichos atributos: el color.

El término color se utiliza con varias acepciones. Pero en general, al hablar de color no se está hablando de un concepto solamente físico, como se verá en la Sección 2.1, ya que involucra además un problema de interpretación; por ejemplo, el mismo objeto puede parecer verde a una persona y azul a otra. Es por esta razón que la investigación acerca de este tema debe realizarse desde tres enfoques diferentes, pero inseparables: el físico, el psicofísico y el psicológico. El primero está relacionado con cantidades físicas que pueden ser medidas y analizadas más allá de cualquier interpretación, tales como la energía contenida en el campo de radiación electromagnética y la forma en que ésta se transporta. Lo anterior es materia de estudio de la radiometría.

En contraste, el proceso de detección o percepción de color está sujeto a la respuesta del observador y en consecuencia, no sólo depende de las características del estímulo, sino también de las características fisiológicas de cada individuo, por consiguiente, éste implica un proceso psicofísico.

Finalmente, la interpretación del estímulo recibido es un proceso únicamente psicológico, que depende de la información previa con la que cuenta el sujeto, y esto constituye la sensación de color.

Con el objetivo de plantear las ideas básicas y formar un panorama general del tema, en la primera Sección de este Capítulo se presentan y discuten diferentes

definiciones de color, lo cual permite entender las dificultades de establecer una definición única. En las tres Secciones siguientes se trata por separado cada uno de los puntos de vista desde los cuales se puede analizar el color. Buscando una mayor claridad en la exposición, el orden en que se presentan éstos aspectos es el siguiente: Primero, en la Sección 2.2 se exponen los conceptos asociados a la interpretación psicológica del color, aquí se introduce una parte importante de la terminología que se utilizará en el resto del trabajo. Posteriormente, en la Sección 2.3, se presentan las bases de radiometría y las principales cantidades involucradas en el aspecto físico del problema. Y por último, en la Sección 2.4 se trata con los conceptos básicos de fotometría, que permitirán entender el proceso de recepción del estímulo físico por parte de un observador humano.

2.1. El concepto de color

Como se mencionó en la introducción del Capítulo, hasta el momento no existe una definición única para el término color. El propósito de esta Sección es exponer y analizar diferentes definiciones, para entender cuáles son las dificultades que se presentan en torno a dicho concepto, y llegar finalmente a un acuerdo respecto al sentido con el que se utilizará la palabra color a lo largo de este trabajo.

La primera definición que se mencionará aquí es la del Comité de Colorimetría de la Sociedad Americana de Optica (OSA, Optical Society of America), que estableció que el término color se refiere a *“aquellas características de la luz distintas de las inhomogeneidades espaciales y temporales”* [6]. Sin embargo, esta descripción además de ser poco clara, induce a pensar que se trata de un concepto puramente físico.

Otra definición, que parece más comprensible, es la de Judd [11], que afirma que *“si dos objetos de igual forma y textura, iluminados con la misma luz y en iguales condiciones de observación puede distinguirse, el atributo de estos objetos*

que permite distinguirlos es el color”. Aunque, ésta resulta muy subjetiva, ya que no sugiere una cantidad que pueda ser cuantificada.

Una tercera definición que vale la pena mencionar es la de Lozano [11], quien dice que el color es *“el atributo de la luz que hace corresponder unívocamente a cada distribución espectral una sensación. Esta sensación está condicionada por la intensidad y duración del estímulo, el estado de adaptación del observador, el área de la retina afectada y el contraste luminoso y cromático que se percibe”*. Conviene aclarar que al decir unívocamente significa que a cada distribución espectral corresponde una y sólo una sensación de color, pero de hecho, el caso inverso no se cumple. Es decir, que una misma sensación puede ser producida por infinitas combinaciones de distribuciones espectrales y objeto. A este fenómeno se le llama *metamerismo* [11].

La definición de Lozano contempla todos los aspectos del color, desde el estímulo físico y la percepción, hasta la interpretación psicológica. Aunque el resultado es un poco ambiguo, puesto que en este caso, la palabra color se podría utilizar tanto para referirse a una cualidad física como a una sensación, sin distinguir entre ambas.

Finalmente, para evitar cualquier ambigüedad y confusión, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE, Commission Internationale de l’Eclairage), que es el organismo internacional reconocido para establecer todo tipo de estándares en materia de colorimetría, propone distinguir entre dos conceptos: color percibido y color psicofísico [5]. El color percibido, según el CIE, es *“el aspecto de la percepción visual por medio del cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos de visión del mismo tamaño, forma y estructura, y asumir que han sido causadas por diferencias en la composición espectral de la radiación involucrada en la observación”*. Por otra parte, el color psicofísico se define como *“la característica de la radiación visible mediante la cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos de visión del mismo tamaño, forma y estructura, y asumir que han sido causadas por diferencias en la composición espectral de la radiación involucrada en la observación”*. De acuerdo a estas recomendaciones del CIE, el

color psicofísico es algo que puede ser especificado en términos de cantidades numéricas, mientras que el color percibido es un concepto más privado, peculiar a cada observador, para el que no se puede proponer un método de medición o especificación [5]. Con base en lo anterior, cuando se utilice el término color dentro del contexto de este trabajo, se estará refiriendo al color psicofísico, y de esta manera se debe entender.

La discusión anterior pone en evidencia algunas de las dificultades implícitas en el estudio del color. Sin embargo, las dudas se irán aclarando en la siguiente Sección, al introducir los conceptos fundamentales relacionados con su interpretación.

2.2. La sensación de color

De todo el espectro de radiación electromagnética, sólo aquella que tiene longitudes de onda comprendidas entre los 400nm y los 700nm aproximadamente, produce una sensación visual al incidir sobre la retina. A esta región visible del espectro, es lo que conocemos como *luz visible* o simplemente *luz*. Las características de la sensación visual que nos produce un objeto dependen del modo en que la luz interactúe con la materia, una de ellas es el color. A su vez, la sensación de color tiene tres cualidades o atributos que son: el tinte, la saturación y el brillo [4].

El *tinte* es el atributo que permite clasificar un color como rojo, verde, azul, etc. El blanco, el negro y cualquier gris neutro carecen de tinte. La *saturación*, describe la proporción en que un color difiere de un gris neutro y se aproxima a un color espectral puro, éste último está totalmente saturado, mientras que el primero es completamente no saturado, esta situación se ilustra en la Fig. 2.1, para una serie de colores de tinte azul y brillo constante. Juntos, la saturación y el tinte constituyen la *sensación cromática* o *cromatismo* de la sensación. Un gris neutro no tiene tinte ni saturación y por consiguiente se le denomina *acromático*.



FIGURA 2.1. Colores de tinte azul con diferente valor de saturación, que incrementa de izquierda a derecha.

El término *brillo*, es el atributo que permite relacionar cualquier sensación de color con algún miembro de una serie de grises neutrales que produzca una sensación equivalente. Para entender mejor la idea considérese la Fig. 2.2, en donde se presenta una selección de diez muestras de una escala de grises neutros, partiendo del blanco puro en el extremo izquierdo hasta el negro puro en el extremo derecho; de todas ellas la que produce la mayor sensación de brillo es el blanco y la menor sensación de brillo corresponde al negro, las muestras intermedias evocan sensaciones intermedias de brillo. Si a cada uno de estos cuadros se les fuera agregando algún tinte en la misma proporción, la nueva serie de muestras se podrían seguir comparando con la escala acromática de grises y la sensación de brillo producida por cualquier muestra coloreada es equivalente a la que produce la muestra acromática correspondiente.



FIGURA 2.2. Escala de grises para evocar la sensación de brillo.

En este sentido, la saturación también se puede entender como el grado en que un color difiere de un gris del mismo brillo.

Algunos de los sistemas que existen para clasificar colores consisten de una colección de muestras físicas que son ordenadas con base en su tinte, saturación y brillo. Este tipo de sistemas es de gran aplicación práctica, por ejemplo, en industrias de colorantes, pinturas e imprentas, entre otras. El más importante de ellos es el *sistema Munsell* [2], en cual las muestras se encuentran organizadas a lo largo de tres dimensiones llamadas “*valor*”, “*tinte*” y “*croma*”. Estas corresponden respectivamente a los atributos perceptuales de brillo, tinte y saturación [2]. Las

muestras están arregladas en planas o páginas de tinte constante distribuidas en la dirección angular simulando un sólido de revolución. En la Fig. 2.3 se ilustra la distribución en una de estas páginas, que corresponde al tinte azul. A lo largo de la dirección vertical está representada la variación del brillo, con el máximo en el extremo superior y el mínimo en el inferior; el eje del sólido de revolución corresponde a las muestras de grises neutros. Las variaciones en saturación se representan en la dirección horizontal, aumentando desde el centro hacia afuera. Actualmente, el sistema Munsell es considerado un atlas de color.

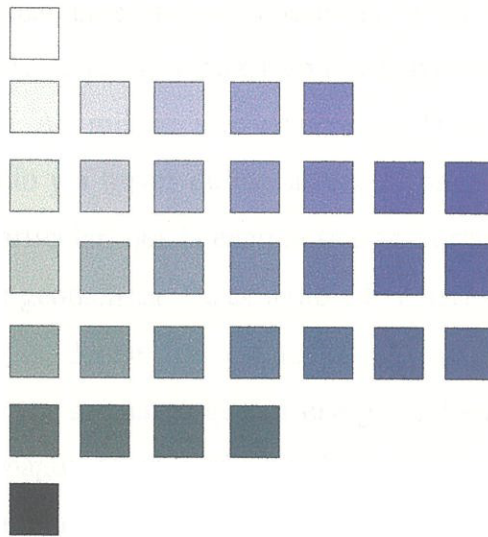


FIGURA 2.3. Esquema del arreglo correspondiente a una página de tinte azul en el sistema Munsell.

Sin embargo, existen métodos más generales para especificar colores que no están limitados a una serie finita de muestras, sino que se basan en sistemas de coordenadas capaces de describir cualquier color existente. Aunque cabe aclarar que el uso de uno u otro tipo de sistemas para describir color depende de la aplicación. Esto se tratará con mayor detenimiento en el Capítulo 3 en relación con el tema de colorimetría.

Una vez presentados algunos de los conceptos fundamentales involucrados en la interpretación del color, en la siguiente Sección se exponen las bases físicas requeridas para su estudio.

2.3. Radiometría

La radiometría trata con el problema de medir el contenido de energía de los campos de radiación electromagnética y determinar como ésta fluye a través de los sistemas ópticos. La radiometría no se restringe a una región particular del espectro, pero se encuentra basada en ciertas suposiciones que delimitan su campo de aplicación [10]. La primera de tales suposiciones es que se estudian fuentes incoherentes; esto se debe a que el transporte de energía mediante campos de radiación depende críticamente de su coherencia; y el estudio de la radiación completamente coherente se puede realizar con la herramienta que provee la teoría electromagnética clásica. Así mismo, se considera que la propagación de la radiación a través del espacio vacío y a través de los sistemas ópticos obedece las leyes de la óptica geométrica; en particular, que la energía se transporta a lo largo de la dirección de los rayos de la óptica geométrica. De acuerdo a lo anterior, la radiometría descarta el estudio de problemas donde los efectos de difracción e interferencia son predominantes. Por último, se asume que la energía del campo óptico se conserva siempre que éste se propague en un medio no absorbente. A continuación se definen una serie de cantidades radiométricas que serán de utilidad en este trabajo [10].

La cantidad radiométrica esencial es el *flujo* o *potencia radiante* y se define como la rapidez con la cual se transfiere energía de un lugar a otro a través del campo de radiación, esto es

$$\Phi = dQ/dt, \quad (2.1)$$

donde Q representa la *energía radiante*. En el sistema internacional de unidades (S.I.), la potencia radiante se mide en watts (W).

Otra cantidad importante, conocida como *radiancia*, es el flujo radiante por unidad de área proyectada en la dirección de observación, por unidad de ángulo sólido, que parte de la fuente o cualquier superficie de referencia. Si $d^2\Phi$ es el flujo emitido a través de un elemento de ángulo sólido $d\Omega$, por un elemento de fuente cuya

área proyectada en la dirección de detección es dA_{proj} , entonces la radiancia está definida como

$$L = d^2\Phi / dA_{\text{proj}} d\Omega; \quad (2.2)$$

sus unidades en el S.I. son watt / metro² steradian (W/m² sr).

La última de las cantidades radiométricas que se introducirá aquí, de acuerdo a los propósitos y el alcance de este trabajo, es la *irradiancia*, que se define como la potencia radiante incidente sobre una superficie por unidad de área, es decir

$$E = d\Phi / dA, \quad (2.3)$$

y en el S.I. se mide en W/m².

Sin embargo, las cantidades anteriores no toman en cuenta la composición espectral del campo de radiación, sino sólo su energía total. Para analizar cómo se distribuye esta energía a lo largo del espectro se define $\Phi_\lambda d\lambda$ como el flujo radiante en el intervalo de longitudes de onda de λ a $\lambda + d\lambda$, de modo que el flujo radiante total está dado por

$$\Phi = \int \Phi_\lambda d\lambda. \quad (2.4)$$

Análogamente, $L_\lambda d\lambda$ y $E_\lambda d\lambda$ representan la radiancia y la irradiancia en el intervalo de longitudes de onda de λ a $\lambda + d\lambda$, respectivamente. La cantidad Φ_λ se conoce como *flujo radiante espectral* y sus unidades son W/nm cuando λ se da en nm. L_λ es la *radiancia espectral* y se mide en W/m² nm sr. Por último, E_λ se llama *irradiancia espectral* y se expresa en W / m² nm.

Al graficar la energía radiante espectral de una fuente luminosa como función de la longitud de onda se obtiene la *composición espectral* de la radiación. Esta composición espectral se puede expresar en términos de cualquiera de las cantidades

espectrales definidas anteriormente, puesto que son proporcionales entre sí, la que se use depende de cual sea la más apropiada en cada caso específico [6]. Si se dividen todos los valores de la energía radiante espectral por alguno en particular para una determinada longitud de onda, se obtendrá la *distribución espectral relativa* (o simplemente distribución espectral) respecto a esa longitud de onda cuyo valor de energía se tomó como la unidad. De hecho, las fuentes radiantes quedan caracterizadas al especificar su distribución espectral y la potencia radiante total [11].

De acuerdo a los mecanismos de emisión de energía, las fuentes radiantes se dividen básicamente en dos grandes grupos: *fuentes térmicas* y *fuentes no térmicas* [11]. La distribución espectral que presentan es diferente en ambos casos. La distribución espectral de una fuente térmica es continua y similar a la de un cuerpo negro o radiador total. En este sentido, cada fuente térmica tiene asociada una *temperatura de color correlacionada*. Para explicar esto, hay que recordar que se llama *temperatura de color* a la temperatura para la cual un cuerpo negro presenta una distribución espectral determinada, de modo que al comparar la distribución espectral de una fuente térmica cualquiera con la del cuerpo negro, y determinar a qué temperatura de color corresponde la distribución que más se le parece, se obtiene la temperatura de color correlacionada para dicha fuente [2].

Por otra parte, los mecanismos no térmicos para producir radiación electromagnética han tenido un gran desarrollo en los últimos tiempos. Entre los más típicos se encuentran el de descarga eléctrica en un gas y los efectos luminiscentes, aunque actualmente se han desarrollado otros, como por ejemplo el láser y los diodos emisores de luz o LED's (Light Emitting Diode). Las distribuciones espectrales de las fuentes no térmicas presentan uno o varios máximos, que son característicos del espectro de emisión del elemento o elementos que las constituyen. Adicionalmente, el láser y los LED's tienen un ancho de banda característico, lo cual significa que tales fuentes sólo emiten energía radiante en un intervalo reducido de longitudes de onda alrededor del máximo. Gráficamente, el ancho de banda se podría interpretar como la desviación estándar de la distribución con respecto al máximo correspondiente (aunque su significado físico es mucho más complejo).

La composición espectral de la radiación luminosa se puede correlacionar con la sensación visual que produce en un observador. El tinte está determinado por la posición en el espectro de aquellas radiaciones que son marcadamente más intensas que las demás (es decir, por los máximos de emisión). Por otra parte, la saturación está asociada al grado en que tales radiaciones predominan sobre las demás. En el caso de láseres y LED's, mientras más reducido es el ancho de banda, más saturado se ve el color de la luz que emiten. En contraste, la luz que emiten las fuentes térmicas se ve muy poco saturada, ya que su distribución espectral es más uniforme. Por último, la intensidad de la fuente está relacionada con el brillo, es decir, al comparar dos fuentes que tienen la misma distribución espectral, aquella cuya radiancia sea mayor tendrá una apariencia más brillante* [12].

Por último, el tema de radiometría no quedaría completo sin mencionar los principales medios de detección de energía radiante. Al respecto se pueden mencionar dos tipos básicos de detectores: los no-selectivos y los selectivos. Entre los primeros se encuentran, por ejemplo, los termopares y bolómetros, que transforman energía radiante en energía térmica, independientemente de la longitud de onda de la radiación incidente. Por esta característica, los detectores no-selectivos se pueden utilizar para medir flujo radiante en cualquier región del espectro, aunque se utilizan con mayor frecuencia en el infrarrojo, donde otros métodos fallan [11].

En contraste, los detectores selectivos transforman energía radiante en energía química o eléctrica. En el primer caso se dice que son detectores fotoquímicos, como las placas fotográficas, cuya respuesta depende de la longitud de onda del flujo radiante incidente por unidad de área. En el segundo caso se conocen como detectores fotoeléctricos (de hecho, su funcionamiento está basado precisamente en el efecto fotoeléctrico). Hay tres clases de detectores fotoeléctricos (a veces también llamados fotoceldas): fotoconductivos, fotoemisivos y fotovoltaicos. Los tubos fotomultiplicadores se encuentran entre los detectores fotoemisivos [11]. Otro

* La apariencia de brillo es afectada por el estado de adaptación del ojo, pero para un estado de adaptación determinado, se puede asumir que a mayor energía física se observa mayor brillo [12].

detector selectivo es el ojo, y también funciona transformando energía radiante a impulsos eléctricos que se transmiten hasta el cerebro. La respuesta de cualquier detector selectivo depende de la composición espectral de la radiación incidente, y está descrita por una *curva de sensibilidad espectral*. Estas curvas describen gráficamente el grado de sensibilidad del detector para cada longitud de onda, son continuas y presentan un máximo característico, que depende del material del que esté constituido el detector. Con base en estas curvas se determina la región del espectro donde debe utilizarse cada detector. El tipo de detector que se emplea en un instrumento depende del propósito para el cual sea diseñado.

Para completar la exposición de los aspectos asociados al color, falta discutir el proceso de percepción de los estímulos por un observador. Este, como ya se dijo, es un proceso psicofísico y las bases para entenderlo se plantean en la siguiente Sección.

2.4. El estudio de la luz: Fotometría

La fotometría se ocupa de analizar exclusivamente la región visible del espectro, es decir, la luz, y de evaluar la respuesta que ésta provoca sobre un observador humano.

Partiendo del hecho de que cantidades iguales de flujo radiante de diferentes longitudes de onda no producen la misma sensación de brillo, se realizó un cuidadoso análisis experimental estadístico de un gran número de observadores [12], con el objetivo de determinar la capacidad relativa del flujo radiante de cada longitud de onda para evocar dicha sensación [4]. Esto es lo que se conoce como *luminosidad relativa*. Los resultados obtenidos en condiciones de *iluminación fotópica*, es decir, cuando hay suficiente cantidad de luz, se muestran en la Fig. 2.3. La ordenada de la curva en la escala del lado izquierdo indica la luminosidad relativa, y está

normalizada con respecto al valor máximo que ocurre para $\lambda = 555\text{nm}$, esto significa, que el flujo monocromático de 555nm es el que produce la sensación de mayor brillo.

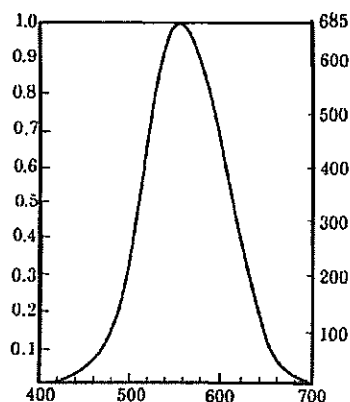


FIGURA 2.4. Curva de luminosidad relativa para el observador estándar. Escala a la izquierda, luminosidad relativa; escala a la derecha, eficiencia luminosa.

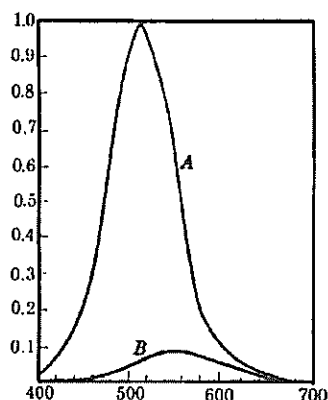


FIGURA 2.5. Efecto Purkinje. Curvas de luminosidad relativa bajo condiciones de (A) baja iluminación y (B) buena iluminación.

En condiciones de muy baja iluminación o *iluminación escotópica*, tales como la visión nocturna, la sensibilidad del ojo aumenta de manera muy significativa y el máximo se desplaza hacia la izquierda. Este fenómeno, conocido como *efecto Purkinje* [4] se puede apreciar en la Fig. 2.4, en donde la curva A corresponde a la sensibilidad en condiciones de iluminación escotópica y la curva B es la misma que la de la Fig. 2.3 pero reescalada con respecto al máximo de la curva A. Para comprender este efecto cabe mencionar que en la retina existen dos tipos de células receptoras: los *conos*^{*}, que son sensibles a altos niveles de iluminación y al color; y los *bastones*, que son detectores mucho más sensibles que los conos y aparentemente no lo son al color,

^{*} El fenómeno de mezcla de colores e igualación (Sección 3.2), demuestra que la retina responde al menos en tres maneras diferentes a los colores. Young y Helmholtz concluyeron de este hecho, que debían existir tres tipos de receptores con distintas sensibilidades espectrales en la región visible del espectro, y que todos los colores se perciben como resultado de las respuestas combinadas de estos receptores en diferentes grados y proporciones. Lo anterior llevó a pensar que existen tres tipos de conos, pero no hay evidencias histológicas ni de otro tipo al respecto. Sin embargo, un cuidadoso estudio realizado por Polyak permitió aclarar que, aunque aparentemente todos los conos son iguales, existen tres patrones diferentes de arreglos sinápticos de transmisión de impulsos nerviosos [6].

aunque se piensa que posiblemente tienen gran participación en el mecanismo de detección del azul [11]. La función de los bastones se ve inhibida cuando los niveles de iluminación son muy altos y sólo son estimulados en condiciones de iluminación escotópica. Además, hay entre 6 y 7 millones de conos, mientras que el número de bastones va desde 110 a 130 millones distribuidos (de manera no uniforme) en toda el área de la retina [11].

Las curvas de las Figuras 2.3 y 2.4 se llaman *curvas de luminosidad relativa*. Ambas tienden asintóticamente a cero a ambos lados de los máximos, de modo que no hay límites definidos del espectro visible.

La curva de la Fig. 2.3 ha sido adoptada por el CIE como la *curva de luminosidad estándar*, pero es importante recordar que ésta no es única ni se puede usar para predecir la respuesta de la retina en condiciones de iluminación escotópica.

El *flujo luminoso* Φ_v , en analogía con el flujo radiante, es la cantidad fotométrica de mayor importancia, y se define como la integral del flujo radiante espectral en la región visible del espectro, evaluado con respecto a su capacidad para producir la sensación de brillo en cada longitud de onda [4]. Dicho de otro modo, es la integral del producto del flujo radiante espectral por la curva de luminosidad estándar de la Fig. 2.3 en la región visible del espectro. Por ejemplo, de la Fig. 2.3 se ve que la sensación de brillo producida por una determinada cantidad de flujo radiante de longitud de onda de 555 nm es mayor que la misma cantidad de flujo radiante de longitud de onda de 500 nm o de 600 nm. En el sistema internacional la unidad de Φ_v es el lumen (lm). Si se considera una muestra de flujo radiante de 1 W de longitud de onda de 555 nm, el flujo luminoso que contiene es de 685 lúmenes. De acuerdo con lo anterior, la *luz* se puede definir formalmente como “la forma de energía radiante que es capaz de estimular la retina del ojo humano; provocando un proceso consciente que da lugar a las sensaciones visuales” [11].

La cantidad de lúmenes que contiene el flujo luminoso para determinada longitud de onda no es fija, sino que es proporcional a la *luminosidad relativa* correspondiente a esa longitud de onda. Esto significa que si por ejemplo, la

aunque se piensa que posiblemente tienen gran participación en el mecanismo de detección del azul [11]. La función de los bastones se ve inhibida cuando los niveles de iluminación son muy altos y sólo son estimulados en condiciones de iluminación escotópica. Además, hay entre 6 y 7 millones de conos, mientras que el número de bastones va desde 110 a 130 millones distribuidos (de manera no uniforme) en toda el área de la retina [11].

Las curvas de las Figuras 2.3 y 2.4 se llaman *curvas de luminosidad relativa*. Ambas tienden asintóticamente a cero a ambos lados de los máximos, de modo que no hay límites definidos del espectro visible.

La curva de la Fig. 2.3 ha sido adoptada por el CIE como la *curva de luminosidad estándar*, pero es importante recordar que ésta no es única ni se puede usar para predecir la respuesta de la retina en condiciones de iluminación escotópica.

El *flujo luminoso* Φ_v , en analogía con el flujo radiante, es la cantidad fotométrica de mayor importancia, y se define como la integral del flujo radiante espectral en la región visible del espectro, evaluado con respecto a su capacidad para producir la sensación de brillo en cada longitud de onda [4]. Dicho de otro modo, es la integral del producto del flujo radiante espectral por la curva de luminosidad estándar de la Fig. 2.3 en la región visible del espectro. Por ejemplo, de la Fig. 2.3 se ve que la sensación de brillo producida por una determinada cantidad de flujo radiante de longitud de onda de 555 nm es mayor que la misma cantidad de flujo radiante de longitud de onda de 500 nm o de 600 nm. En el sistema internacional la unidad de Φ_v es el lumen (lm). Si se considera una muestra de flujo radiante de 1 W de longitud de onda de 555 nm, el flujo luminoso que contiene es de 685 lúmenes. De acuerdo con lo anterior, la *luz* se puede definir formalmente como “la forma de energía radiante que es capaz de estimular la retina del ojo humano; provocando un proceso consciente que da lugar a las sensaciones visuales” [11].

La cantidad de lúmenes que contiene el flujo luminoso para determinada longitud de onda no es fija, sino que es proporcional a la *luminosidad relativa* correspondiente a esa longitud de onda. Esto significa que si por ejemplo, la

luminosidad relativa para $\lambda = 600$ nm es de 0.6, una muestra de flujo radiante de 1 W de esa longitud de onda sólo contiene $(0.6)(685 \text{ lm}) = 411 \text{ lm}$ de flujo luminoso.

La razón del flujo luminoso al flujo radiante de una muestra de flujo se conoce como *eficiencia luminosa* [4], esto es

$$\text{Eficiencia luminosa} = \frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{Flujo radiante}} = \frac{\Phi_v}{\Phi_\lambda}. \quad (2.5)$$

Por supuesto, la eficiencia luminosa de una muestra monocromática de flujo de 555 nm es de 685 lm/W, y para cualquier otra longitud de onda es la misma cantidad multiplicada por la luminosidad relativa correspondiente. La escala a la derecha de la ordenada de la Fig. 2.3 da la eficiencia luminosa de flujo monocromático para cualquier longitud de onda. Para evitar posibles confusiones, cabe aclarar que este mismo término se utiliza en el caso de lámparas incandescentes o fluorescentes para designar el cociente del flujo luminoso total de salida entre la potencia total de entrada.

En caso de que una muestra de flujo radiante no sea monocromática, la eficiencia luminosa se calcula por medio de integraciones, es decir, si V es la luminosidad relativa para la longitud de onda λ , el número de lúmenes $d\Phi_v$ contenido en el intervalo comprendido entre λ y $\lambda + d\lambda$ es

$$d\Phi_v = V (685 \text{ lm/W}) \Phi_\lambda d\lambda, \quad (2.6)$$

y el número total de lúmenes o flujo luminoso total de la muestra está dado por

$$\Phi_v = \int d\Phi_v = (685 \text{ lm/W}) \int V \Phi_\lambda d\lambda. \quad (2.7)$$

Por lo tanto, su eficiencia luminosa es

$$\text{Eficiencia luminosa} = \frac{\Phi_v}{\Phi_\lambda} = \frac{685 \int V \Phi_\lambda d\lambda}{\int \Phi_\lambda d\lambda}. \quad (2.8)$$

Debido a que no existe una expresión analítica para la luminosidad relativa, la integración en la ecuación (2.7) debe llevarse a cabo por métodos numéricos o gráficos [4].

Por otra parte, el análogo de la radiancia es la *luminancia* L_v , que se mide en lumen/(metro)² steradian, unidad conocida también como nit ($\text{lm/m}^2 \text{ sr} = \text{nt}$) y se define como

$$L_v = d^2 \Phi_v / dA_{\text{proj}} d\Omega, \quad (2.9)$$

es decir, el flujo luminoso por unidad de área de la fuente proyectada en la dirección de detección, por unidad de ángulo sólido.

Por último, otra cantidad importante en fotometría que se utilizará más adelante, es la *intensidad luminosa* I_v , que se define como el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, es decir

$$I_v = d \Phi_v / d\Omega, \quad (2.10)$$

sus unidades son lm/sr y se denominan candelas (cd).

Las cantidades fotométricas anteriores son las que se utilizarán en este trabajo, aunque cabe aclarar que no son las únicas que existen [10].

Una vez presentados los conceptos fundamentales de los aspectos que constituyen el color, el siguiente paso es plantear los métodos para medirlo, y eso es lo que se hace en el Capítulo 3.

CAPÍTULO 3

COLORIMETRÍA

Al inicio del Capítulo anterior se vio que establecer una definición absoluta del término color aún no ha sido posible, ya que ni siquiera los organismos internacionales especializados en el tema coinciden en una definición única, a diferencia de lo que ocurre en el caso de magnitudes puramente físicas.

Sin embargo, y pese a las dificultades que conlleva, el estudio del color no daría lugar a un área científica si no fuera posible establecer métodos y sistemas de medición. Con respecto a lo anterior, Lord Kelvin comentó [4]: “A menudo digo que cuando puedes medir aquello de lo que estás hablando y expresarlo en números, conoces algo acerca de eso; pero cuando no puedes expresarlo en números, tu conocimiento es insatisfactorio; puede ser el comienzo del conocimiento, pero apenas avanza en tus pensamientos hacia el estatus de ciencia, cualquiera que sea la materia que tratas”. Hoy en día, el color se puede medir, la ciencia que trata con la medición del color se llama colorimetría y el organismo internacional reconocido para establecer los patrones de medición de color es el CIE. Por consiguiente, al especificar un color es importante poderlo relacionar con los estándares del CIE.

Este Capítulo, está dedicado a introducir aspectos cuantitativos del estudio del color, por lo tanto, antes de seguir adelante es conveniente precisar el concepto de medición de color. De acuerdo a las definiciones de color percibido y color psicofísico que se dieron en el Capítulo 2, se mencionó que el color percibido no puede medirse, sin embargo, se puede clasificar en una escala nominal, es decir, aquella en la que sólo se determina si dos elementos son iguales o no. Por otra parte, el color psicofísico puede especificarse con cantidades físicas que pueden ser ordenadas dentro de un espacio Euclidiano, que involucra distancias como una

medida de diferencias [5]. Tales cantidades y los métodos para obtenerlas se tratarán con más detenimiento en este Capítulo.

Concretamente, el contenido del Capítulo es el siguiente, en la Sección 3.1 se analizan los factores que producen la percepción de color, con el objetivo de entender qué parámetros físicos están involucrados en su evaluación. En la Sección 3.2 se exponen las bases de la mezcla aditiva de colores, que constituye el principio fundamental de la colorimetría tricromática. En la Sección 3.3 se presenta el sistema de coordenadas más importante para describir color, establecido por el CIE. Dos parámetros colorimétricos esenciales para caracterizar un color desde el punto de vista psicofísico, que son la pureza y la longitud de onda dominante, se tratan en la Sección 3.4. Posteriormente, en la Sección 3.5 se aborda el tema de la mezcla sustractiva de colores, aplicable al caso de filtros y pigmentos; esta información resulta de utilidad cuando se discuten algunos de los instrumentos para medir color. En la Sección 3.6 se expone un sistema colorimétrico que permite evaluar y especificar diferencias de color, puesto que esta es una función básica de los colorímetros. Por último, la Sección 3.7 está dedicada a ilustrar y discutir los tipos fundamentales de instrumentos para medir color, las semejanzas y diferencias entre ellos, así como sus ventajas y desventajas.

3.1. Elementos que producen la sensación de color

Para poder medir un determinado color, primero es necesario entender cómo funciona el proceso de producirlo y cuáles son los factores que influyen en su percepción.

Hay dos formas de percibir el color, una de ellas es observando directamente hacia una fuente de luz que presenta determinado color, sin necesidad de que ésta ilumine ningún objeto más que la retina. En ese caso se dice que es el '*modo iluminante*' de ver [2]. La otra forma es cuando una fuente de luz ilumina alguna

muestra material, y esto se conoce como el '*modo objeto*' de ver [2]. Normalmente, al hablar de color nos referimos al segundo caso, y éste es el que se trata en la tesis.

De lo anteriormente expuesto, resulta fácil comprender que para producir el estímulo físico que será percibido como color, son necesarias tres cosas: una *fente* de luz, un *objeto* que se ilumine y un *observador* que lo detecte. En el '*modo objeto*' de ver, esto resulta obvio, en el '*modo iluminante*' de ver se puede considerar que el ojo juega el papel de objeto y detector a la vez. Aunque el término color está referido a la interpretación de un observador humano, para propósitos de medición se puede remplazar el ojo, por otros detectores fotosensibles alternativos [2]. A continuación se analizan con mayor cuidado cada uno de estos tres factores.

Antes que nada es importante hacer la distinción entre los términos *fente* e *iluminante* [2]. El primero se refiere a la luz física real, cuya distribución espectral se determina experimentalmente. Por otra parte, un iluminante se define mediante su distribución espectral y puede ser posible o no, realizar una fuente que lo reproduzca. Así mismo, una fuente puede ser adoptada como iluminante.

El CIE ha definido varios iluminantes como patrones para medir color. Por ejemplo, una lámpara de filamento de tungsteno operando a una temperatura de color correlacionada de 2854 °K, que es una fuente real, se adoptó por definición como el iluminante CIE A[2]. Los iluminantes denotados por el CIE como B y C son derivados del iluminante A, haciendo pasar su luz a través de filtros líquidos que contienen en distintas proporciones compuestos como sulfato de cobre, manitol, piridina, sulfato de cobalto, ácido sulfúrico y agua destilada [11]. El iluminante B tiene una temperatura de color de alrededor de 4800 °K y corresponde aproximadamente a la luz solar promedio del mediodía cuya temperatura de color es de 4870°K [11]. El iluminante C, es una aproximación a la luz promedio del cielo diurno completamente cubierto, con temperatura de color de cerca de 6770°K [11]. Otro iluminante recomendado por el CIE es el D₆₅₀₀, o simplemente D65, correspondiente a la irradiación solar para una temperatura de color de 6500°K [11]. La distribución espectral de energía para los iluminantes A, B, C y D65 se encuentra tabulada en el Apéndice B.

Un hecho importante es que, aún cuando diferentes distribuciones espectrales pueden dar lugar a la misma sensación visual de color, a cada distribución espectral le corresponde sólo una sensación de color [2].

Por otro lado, con respecto al objeto, hay cuatro parámetros fundamentales que caracterizan su interacción con la luz incidente y que por tanto, definen sus propiedades ópticas, éstos son: *reflectancia*, *transmitancia*, *absorbancia* y *difusividad* [11]. La suma de los tres primeros es siempre igual a la unidad. La difusividad es una propiedad que evalúa la capacidad del objeto para dispersar la radiación que recibe. La magnitud relativa de cada uno de estos parámetros depende del tipo de objeto que se considere. El interés de este trabajo se centra principalmente en los objetos de alta reflectividad y difusividad; es decir, aquellos que reflejan en todas direcciones la radiación incidente, aunque también se mencionará el caso de los objetos de alta transmitancia y baja difusividad, tales como los filtros.

Los materiales que reflejan la mayor parte de la luz incidente sin esparcirla, y obedeciendo la ley de reflexión de la luz, se dice que presentan *reflexión especular*, ejemplos de éstos son las superficies metálicas pulidas. Por el contrario, aquellos que transmiten en mayor proporción de lo que reflejan, y que obedecen la ley de Snell de la refracción, son los materiales *transparentes*.

Los objetos que esparcen la radiación que incide sobre ellos se conocen como *difusores*, en particular, si parte del flujo se transmite se dice que el material es *translucido*. Si por el contrario, hay flujo reflejado o absorbido se dice que el material es *mate* o *semimate*, la mayor parte de los objetos que nos rodean son de este tipo [11]. Un *difusor perfecto* es aquel que para cualquier ángulo de incidencia del haz de luz, el flujo reflejado posee una intensidad igual a la prevista por la ley de Lambert (igual en todas direcciones) [10].

Cualquier tipo de objeto se puede caracterizar por su curva de reflectancia, o bien, de transmitancia espectral, según sea el caso. Éstas determinan las propiedades del objeto con relación a las sensaciones de color que producen, ya que describen la fracción de luz que es reflejada o transmitida por el material para cada longitud de onda.

Finalmente, la percepción del color es también una función de la curva de respuesta espectral del detector que se utiliza. En el caso del ojo, ésta es precisamente la curva de luminosidad estándar que fue discutida en la Sección 2.3 del Capítulo anterior y que se muestra en la Fig. 2.3.

La selección de un determinado detector depende de la aplicación específica que se le vaya a dar. Cabe mencionar que el problema de la detección es tan importante en el área de colorimetría, que el CIE creó en 1975 un Comité Técnico dedicado especialmente a investigar en este tema [11].

En resumen, la apariencia de un color depende principalmente del tipo de iluminante o fuente que se utilice, de las propiedades ópticas del objeto que se ilumina y de la respuesta del detector con que se percibe, sea éste el ojo o algún otro. Cada uno de estos elementos se puede caracterizar mediante una curva espectral; en el caso del primero es la distribución espectral de energía, para el segundo es la reflectancia o transmitancia espectral y para el tercero es la curva de sensibilidad espectral. La combinación de los tres provee el estímulo que el cerebro interpreta como sensación de color.

Cabe mencionar, por último, que además de la iluminación, el objeto y el detector, hay otros factores que también influyen en la percepción del color, tales como el tamaño del campo visual, la geometría del sistema iluminación-detección y el color del fondo sobre el que se encuentra la muestra observada. Dependiendo de estos factores se presentan pequeñas variaciones en las escalas para especificar color [6].

3.2. Mezcla aditiva de colores

En la Sección 2.2 del Capítulo anterior, se mencionó que existen sistemas para clasificar colores que están basados en el ordenamiento de una colección de muestras físicas, y también se comentó que hay sistemas de coordenadas para especificar

cualquier color, que resultan mucho más generales. Estos últimos son los que ocupan la mayor atención en colorimetría, ya que son precisamente los que se utilizan para realizar instrumentos de medición de color y están basados en el concepto de *mezcla aditiva de colores*.

La mezcla aditiva de colores se fundamenta en el hecho, que descubrió Isaac Newton a principios del siglo XVII, de que al hacer pasar luz blanca a través de un prisma de vidrio se descompone en un espectro de luces de colores que van desde el violeta en un extremo, hasta el rojo en el extremo opuesto. Dicho de otro modo, la luz blanca se compone de una mezcla de luces monocromáticas de diferentes longitudes de onda entre los 400 y 700 nm aproximadamente. Pero no es necesario contar con todas estas componentes para producir luz blanca; con sólo tres luces de diferentes colores es suficiente para producir luz blanca y luz de una amplia gama de colores, combinándolas en proporciones adecuadas. Esto es precisamente la mezcla aditiva de colores y el principio de colorimetría tricromática. Para aclarar el concepto, supóngase que se tienen tres fuentes (R), (G) y (B) de luz monocromática de distintos colores, a las que se llamará *componentes*. Si se proyectan sobre una pantalla blanca de tal manera que existan regiones iluminadas por más de una componente, entonces la luz reflejada por dichas regiones se denomina mezcla de colores; y se considera una mezcla aditiva porque la luz reflejada está constituida por una fracción de cada una de las componentes reflejadas. La Fig. 3.1 muestra esquemáticamente esta situación.

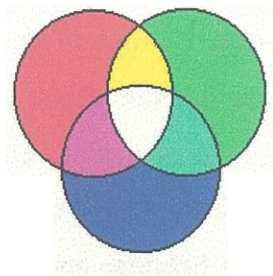


FIGURA 3.1. Esquema de la mezcla aditiva de colores; las áreas de intersección entre los círculos representan las regiones en que las proyecciones de las fuentes de luz monocromática se superponen, dando lugar a un nuevo color como resultado de la mezcla aditiva de las componentes.

Si además se cuenta con un dispositivo que permita controlar la cantidad de flujo luminoso emitido por cada componente en una mezcla, se consigue igualar una amplia gama de colores. De esta forma, se puede igualar la luz reflejada por una cuarta fuente arbitraria, (C), y averiguar así las cantidades de (R), (G) y (B) que la conforman. Un instrumento diseñado para tal fin constituye un tipo de *colorímetro*.

Un hecho muy importante en el contexto de la colorimetría tricromática es el papel que desempeña el fenómeno de metamerismo, que recordando de la Sección 2.1, se define como la igualdad de dos sensaciones de color entre estímulos de diferente composición espectral [12]. Esto es precisamente lo que ocurre al igualar un color mediante la mezcla aditiva de tres componentes; el color original y la mezcla que lo iguala constituyen un *par metamérico*.

El conjunto de tres componentes *no es único*, pero sí es determinante para delimitar la gama de colores que se pueden reproducir con mezclas aditivas, ya que con ningún conjunto de componentes se consigue igualar todos los colores de la manera que se ha descrito antes, a menos que este conjunto tuviera un número infinito de componentes. Sin embargo, se ha encontrado que sí existe un método para lograr la igualación de cualquier color con sólo tres componentes, el cual consiste en añadir una de las componentes al color que se desea igualar, y entonces igualar la nueva mezcla con una combinación de las dos restantes [4]. Las proporciones de (R), (G) y (B) se siguen controlando de manera apropiada hasta que las dos mezclas lleguen a ser iguales. Esta situación se da cuando el color a igualar es muy saturado, y la componente que se le agrega se puede entender como un desaturante (se agrega verde a los azules y violetas, rojo a los verdes y azul a los amarillos y naranjas) [11]. Así se puede extender el concepto de mezcla aditiva de colores, tomando a la fracción de la componente añadida a (C) como una cantidad negativa. Por ejemplo, si la igualación de la cantidad c de flujo luminoso del color (C) se obtiene de la siguiente forma:

$$c(C) + R(R) \equiv B(B) + G(G), \quad (3.1)$$

entonces el color (C) se puede expresar como

$$c(C) \equiv B(B) + G(G) - R(R), \quad (3.2)$$

donde R, G y B representan las cantidades de flujo luminoso de (R), (G) y (B), respectivamente.

Es importante notar que en las ecuaciones anteriores hay dos tipos de símbolos: (C), (R), (G) y (B), que no tienen significado numérico, pero se introducen para identificar las luces que están siendo mezcladas o medidas, es decir, los estímulos; y por otra parte, c, R, G y B, que representan las cantidades de luz involucradas en la observación [12]. El símbolo $\equiv$ representa la *equivalencia* o *igualdad* de las sensaciones en ambos lados de cada ecuación.

De acuerdo a lo anterior, *todos los colores se pueden medir en términos de cualesquiera tres componentes**, puesto que la totalidad de los colores se pueden igualar con una mezcla de tres colores, siempre y cuando el concepto de mezcla aditiva se extienda para considerar la adición de cantidades negativas [4].

Es un hecho experimental que escogiendo como componentes al rojo, al verde y al azul, se puede igualar la mayor cantidad de colores sin usar cantidades negativas, en este sentido se les considera los *colores primarios*.

Se ha visto entonces, que es posible encontrar experimentalmente la cantidad necesaria de flujo luminoso de cada uno de los componentes primarios, para igualar una determinada cantidad de flujo radiante de cada color espectral (entendiendo como color espectral un haz de luz que comprende sólo un pequeño intervalo de longitudes de onda). En esta forma, se obtienen ternas de valores que especifican cada color del espectro en términos de los colores primarios seleccionados.

Para una selección particular de componentes espectrales, que corresponden a 650 nm (luz roja), 530 nm (luz verde) y 425 nm (luz azul), en la Fig. 3.2 se muestran

* La única restricción para seleccionar las componentes es que ninguna de ellas pueda ser igualada por alguna mezcla aditiva de las otras dos [12].

las gráficas del flujo luminoso de cada una de ellas que se necesita para igualar 1 watt de flujo radiante de cada color espectral, mediante una mezcla aditiva [4].

Por supuesto, para una selección diferente de componentes se obtendrían curvas diferentes. Sin embargo, a través de una transformación lineal de un sistema de componentes primarias a otro, se puede encontrar el perfil de las curvas respectivas para las nuevas componentes, sin necesidad de repetir el trabajo experimental [4]. Precisamente, en el Capítulo 4 se discuten a detalle este tipo de transformaciones y se plantea la transformación específica para el instrumento que se usa como prototipo.

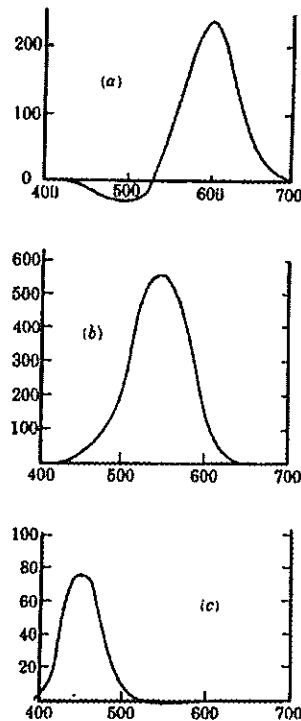


FIGURA 3.2. Cantidad de flujo luminoso de cada una de las componentes monocromáticas requerido para igualar 1 W de flujo radiante monocromático.
(a) Componente roja de 650nm; (b) Componente verde de 530nm;
(c) Componente azul de 425nm.

Los conceptos anteriores y algunas de sus implicaciones se pueden resumir en tres leyes fundamentales de colorimetría, conocidas como las *leyes de Grassmann*, que son las siguientes [5]:

- (1) Tres variables independientes son necesarias y suficientes para especificar una mezcla de color.
- (2) Estímulos que provocan la misma sensación de color producen resultados idénticos en mezclas aditivas de color, sin importar su composición espectral.
- (3) Si una componente de una mezcla de color cambia, el color de la mezcla cambia de manera correspondiente.

La primera ley es clara de acuerdo a los antecedentes que se han expuesto, lo único que se podría agregar es que para cada terna de componentes primarios existe una y sólo una combinación que iguala perceptualmente cualquier color real [11].

La segunda ley de Grassmann también se ha explicado previamente en relación con el metamerismo, es decir, que estímulos de diferentes características físicas pueden igualar la misma sensación de color. En términos de una expresión matemática, dicho fenómeno se puede representar de la siguiente manera: Si

$$(C_1) \equiv (C_2),$$

donde

$$(C_1) \equiv r_1(R) + g_1(G) + b_1(B),$$

$$(C_2) \equiv r_2(R) + g_2(G) + b_2(B),$$

entonces

$$r_1(R) + g_1(G) + b_1(B) \equiv r_2(R) + g_2(G) + b_2(B). \quad (3.3)$$

Por último, la tercera ley de Grassmann tiene dos implicaciones. La primera es que si la intensidad de la radiación que produce una sensación de color dada se multiplica por un factor arbitrario n , las características cromáticas de la sensación no cambian. Esto es, que si

$$c(C) \equiv R(R) + G(G) + B(B),$$

entonces

$$n\{c(C)\} \equiv n\{R(R)\} + n\{G(G)\} + n\{B(B)\}. \quad (3.4)$$

Antes de continuar, es importante aclarar que en muchas ocasiones conviene separar la cualidad cromática del color (C), representada por las proporciones de (R), (G) y (B) en la mezcla, de la cantidad total de flujo luminoso que está siendo igualada. Esto se puede hacer, por ejemplo, dividiendo las cantidades R, G y B entre su suma (R+G+B), ya que además es claro que se cumple la condición $c=R+G+B$, esto da como resultado

$$l(C) \equiv r(R) + g(G) + b(B), \quad (3.5a)$$

donde

$$r = R/(R+G+B), \quad g = G/(R+G+B), \quad b = B/(R+G+B), \quad (3.5b)$$

y en consecuencia,

$$r + g + b = 1. \quad (3.5c)$$

La ecuación (3.5a) se conoce como ecuación tricromática unitaria para (C), y la cantidad de (C) representada es una unidad tricromática o una T-unidad. De esta manera, las cualidades cromáticas de (C) son función de dos variables únicamente, puesto que de los tres valores r, g y b, definidos por las ecuaciones (3.5b,) sólo dos son independientes, como se establece mediante la ecuación (3.5c). La terna r, g, b se conoce como coordenadas de cromaticidad de C en el sistema RGB, definido por las componentes (R), (G) y (B) que se hayan elegido [12].

Por último, retomando la discusión acerca de las leyes de Grassmann, la segunda implicación de la tercera ley es que si se suman dos estímulos cualesquiera, evaluados en términos de las mismas componentes, el resultado es equivalente a la suma algebraica de las proporciones de las componentes en cada uno de ellos, es decir, que si

$$(C_1) \equiv r_1(R) + g_1(G) + b_1(B),$$

$$(C_2) \equiv r_2(R) + g_2(G) + b_2(B),$$

entonces

$$c_3(C_3) \equiv (C_1) + (C_2) \equiv \{r_1 + r_2\}(R) + \{g_1 + g_2\}(G) + \{b_1 + b_2\}(B), \quad (3.6)$$

donde (C_3) representa el nuevo color que resulta de mezclar una T-unidad de flujo luminoso de (C_1) con una T-unidad de (C_2) , y por supuesto, c_3 es igual a dos T-unidades.

Debido a que la elección de las componentes primarias es, hasta cierto punto, arbitraria, las leyes de Grassmann son aplicables a cualquier terna de estímulos (R) , (G) y (B) [5].

3.3. Sistema CIE de coordenadas de color

Con el objetivo de estandarizar y simplificar el manejo de los colores primarios de referencia, evitando los valores negativos, en 1931 el CIE determinó expresar todos los datos de mezcla de colores en términos de tres componentes escogidas de tal manera, que las curvas correspondientes a las de la Fig. 3.2 se encontraran para todas las longitudes de onda por encima del eje de las abscisas [4]. Esto implica que las componentes estándar del CIE no representan colores reales, pero eso no es problema, dada la equivalencia entre los sistemas definidos por cada serie de componentes.

Este sistema se conoce como CIEXYZ, y las curvas estándar para la mezcla aditiva de colores se muestran en la Fig. 3.3; sus ordenadas se expresan en unidades arbitrarias tales que las áreas bajo las tres curvas sean iguales [4]. Los símbolos (X) , (Y) , (Z) se utilizan para designar a las componentes que corresponderían al rojo, verde y azul respectivamente. Las proporciones de estas componentes requeridas para

igualar una cantidad unitaria de flujo radiante de luz de cualquier longitud de onda se llaman *valores triestímulo* del color espectral de esa longitud de onda y se denotan por $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$. Un aspecto muy importante del criterio para seleccionar las componentes estándar del CIE es que se eligió a la componente (Y) de tal manera que la curva $\bar{y}$ vs λ coincidiera con la curva de luminosidad relativa estándar de la Fig. 2.3 (Pag. 17).

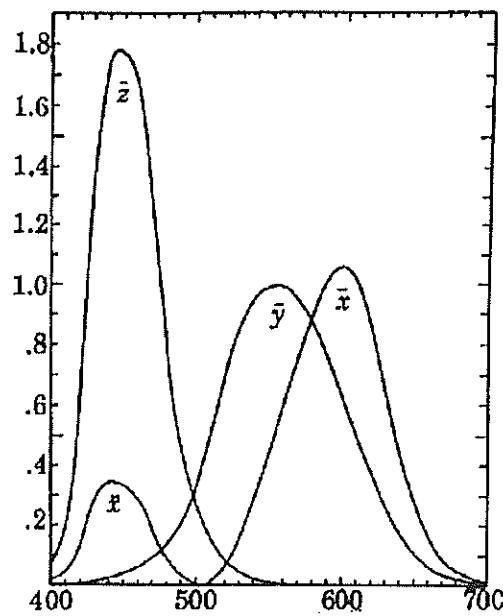


FIGURA 3.3. Curvas estándar del CIE para la mezcla aditiva de colores.

En analogía con los sistemas RGB, y para evitar la evidente dificultad de representar gráficamente los colores en un espacio tridimensional, se introducen los coeficientes tricromáticos para el sistema CIEXYZ que son definidos como [4]

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} ; \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} ; \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} , \quad (3.7)$$

esto significa que sólo dos coordenadas son linealmente independientes puesto que $x+y+z=1$.

La curva que se obtiene al graficar las parejas ordenadas (x,y) para los colores del espectro se muestra en la Fig. 3.4. Esta curva se llama *localización espectral*, y al diagrama se le conoce como *diagrama de cromaticidad* [4].

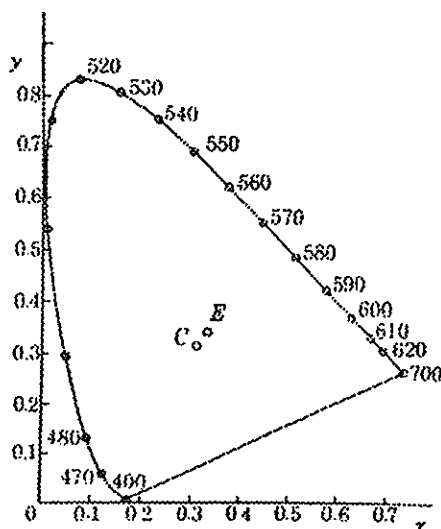


FIGURA 3.4. Diagrama de cromaticidad mostrando la localización espectral, el iluminante C y el punto equienergético E.

Para una fuente arbitraria, los valores triestímulo se definen como las cantidades de las componentes estándar del CIE que al mezclarse aditivamente, logran igualar la sensación de color evocada por dicha fuente. Se denotan como X, Y y Z, y para calcularlos es necesario realizar una integración. Ya que $\Phi_\lambda d\lambda$ representa la cantidad de flujo radiante en el intervalo de longitudes $d\lambda$ alrededor de λ en una muestra dada de luz, entonces la cantidad requerida de la componente (X) para igualar la muestra en esa longitud de onda está dada por $\bar{x} \Phi_\lambda d\lambda$, y por lo tanto, la cantidad total para la igualación es

$$X = \int \bar{x} \Phi_\lambda d\lambda. \quad (3.8a)$$

Análogamente,

$$Y = \int \bar{y} \Phi_{\lambda} d\lambda, \quad (3.8b)$$

$$Z = \int \bar{z} \Phi_{\lambda} d\lambda. \quad (3.8c)$$

Estas integraciones no se pueden realizar analíticamente, ya que las curvas de la Fig. 3.3 para $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$, no tienen una expresión analítica. Además, hay que mencionar que en la práctica, tanto las curvas como las integrales, son una extrapolación de una evaluación discreta de valores obtenidos a intervalos regulares que pueden ser de 10, 5 o 1nm, dependiendo de la máxima resolución del instrumento que se utilice, ya que es imposible hacer un análisis del espectro como un continuo. Las integrales en realidad corresponden a sumatorias.

Del mismo modo en que se definieron los coeficientes tricromáticos para el caso de colores espectrales, para una fuente cualquiera éstos son

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}, \quad (3.9)$$

y las parejas ordenadas resultantes, (x,y), también se pueden representar en el diagrama de cromaticidad. Por ejemplo, en la Fig. 3.4 se muestra la ubicación del iluminante C del CIE. Así mismo, se puede ver el punto que representa a un iluminante ideal E, que corresponde a valores iguales de los coeficientes tricromáticos $x = 0.333$, $y = 0.333$, $z = 0.333$, y por lo tanto, se llama espectro de igual energía.

Finalmente, para el caso de un objeto se tiene que, si r_{λ} es la reflectancia de la muestra en la longitud de onda λ , y $\Phi_{\lambda} d\lambda$ es la cantidad de flujo radiante que incide sobre la muestra en ese rango de longitudes de onda, entonces los valores triestímulo de la luz reflejada por el objeto son

$$X = \int \bar{x} r_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda; \quad Y = \int \bar{y} r_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda; \quad Z = \int \bar{z} r_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda, \quad (3.10)$$

y sus respectivos coeficientes tricromáticos también se calculan mediante las ecuaciones (3.9). El análogo de las ecuaciones (3.10) para los objetos cuya transmitancia predomina sobre su reflectancia se obtiene sustituyendo r_λ por t_λ , su transmitancia espectral. De las ecuaciones (3.10) se puede notar claramente que el color que se percibe de un objeto depende de la fuente de luz, de las características propias del objeto y de la respuesta del detector, en este caso el ojo, que está incorporada a través de las funciones $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$.

Un detalle que es importante hacer notar es que como la curva $\bar{y}$ coincide con la curva de luminosidad estándar, el valor triestímulo Y de cualquier muestra es directamente proporcional a su flujo luminoso y se puede asociar al concepto psicológico de brillo. Del mismo modo, existen otras dos cantidades colorimétricas que se pueden relacionar con la saturación y el matiz, el propósito de la siguiente Sección es justamente introducir estos conceptos.

3.4. Longitud de onda dominante y pureza

Cuando dos colores cualesquiera se mezclan aditivamente, la cromaticidad de la mezcla se encuentra localizada en el diagrama cromático en algún punto de la línea recta que une a los puntos que representan la cromaticidad de los componentes [4], como se puede ver en la Fig. 3.5 para el caso de los colores D y E. De acuerdo con esto se puede inferir que sobre la línea que une cada color espectral (puntos sobre la curva de localización espectral) con el punto blanco C, se encuentran comprendidos todos los colores que se pueden obtener al combinar luz blanca con el color espectral. En la medida en que cualquier punto intermedio sobre esta línea se aproxima a la curva de localización espectral, el color representado por ese punto se aproxima al color espectral puro, tal es el caso del punto F en la Figura con respecto al punto G. Con base en esto, la *pureza* de un color se define cuantitativamente como el cociente

de la longitud de la línea que va del punto blanco al punto representativo del color, entre la longitud total que resulta de extender esa misma línea desde el punto blanco hasta intersectar la curva de localización espectral. Este cociente se expresa como porcentaje. Para la Fig. 3.5, la pureza del color F estaría dada por: Pureza de F = CF/CG [4].

De la forma en que se ha definido, la pureza de un color se puede relacionar con el concepto psicológico de saturación.

Por otra parte, el color espectral G es la longitud de onda dominante que corresponde al color F y a cualquier color que se encuentre sobre la línea CG. En general, si se traza una línea desde el punto blanco hasta el punto de un color cualquiera, y se extiende de tal modo que llegue a intersectar la curva de localización espectral, se dice que la longitud de onda representada por el punto de intersección es la *longitud de onda dominante* de dicho color [4]. Este concepto es el análogo psicofísico de lo que se ha denominado matiz o tinte.

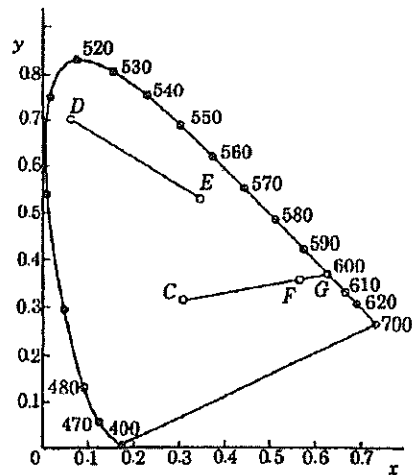


FIGURA 3.5. A partir del diagrama de cromaticidad se pueden inferir los conceptos de pureza y longitud de onda dominante.

En conjunto, la longitud de onda dominante y la pureza de una muestra, constituyen su *cromaticidad*.

Para concluir la discusión anterior, considérese el caso de los colores que se encuentran dentro del triángulo HCJ en la Fig. 3.6. Estos no están asociados a ningún color espectral, por tal razón, se conocen como colores no espectrales. Como se ve de la Figura, no se pueden igualar mediante la mezcla de blanco y un color espectral, por lo tanto, en vez de asociarles una longitud de onda dominante, se les asocia una longitud de onda complementaria. Esto significa que, por ejemplo, el color K se puede mezclar aditivamente con algún color de la línea CM para dar como resultado el blanco (c). En general, a dos colores cuya suma da como resultado el blanco se les llama complementarios. Los colores del triángulo HCJ también se conocen como púrpuras o magentas y reflejan principalmente en el rojo y el azul, por lo que pueden ser descritos como “menos-verdes”. La pureza de estos colores se define como la distancia de su punto representativo al punto blanco expresada como porcentaje de la distancia del punto blanco a la línea HJ [4].

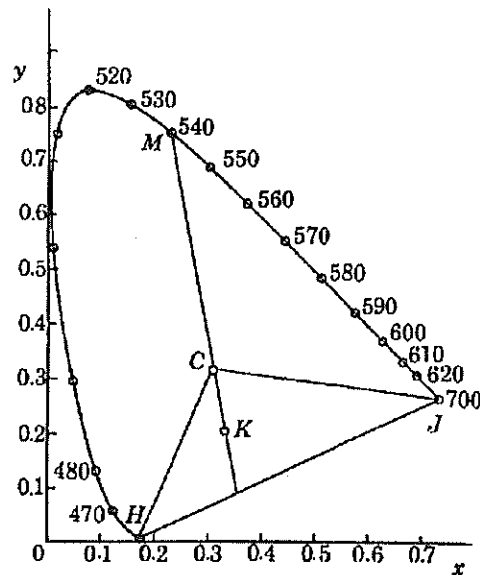


FIGURA 3.6. Púrpuras y colores complementarios.

Hay que aclarar que aunque existe una correspondencia entre los conceptos psicofísicos y sus análogos psicológicos, la diferencia entre ellos es que los primeros

son cantidades cuantificables y definidas en general. En contraste, los segundos son cantidades que dependen de cada observador.

Con el objetivo de precisar el concepto de color, en el Cuadro 3.1 se resumen y organizan las ideas que se han expuesto hasta aquí. En la columna izquierda se enlistan los aspectos físicos, en la central se muestran los psicofísicos y en la columna derecha los psicológicos. Aquellos que son correspondientes entre sí se encuentran al mismo nivel horizontal. Se incluyen también las respectivas denominaciones en inglés con la finalidad de identificar la terminología que se utiliza aquí, con la que se emplea en la mayor parte de las referencias.

Conceptos Físicos (Estímulo)	Conceptos Psicofísicos (Percepción)	Conceptos Psicológicos (Sensación)
Flujo radiante (Radiant flux)	Flujo Luminoso (Luminous flux)	Brillo (Brightness)
Máximo de la distribución espectral (Spectral distribution peak)	Longitud de onda dominante (Dominant wave lenght)	Tinte (Hue)
Ancho de banda (Bandwidth)	Pureza (Purity)	Saturación (Saturation)
— • —	— • —	— • —
Distribución espectral (Spectral distribution)	Cromaticidad (Chromaticity): Pureza + Longitud de onda dominante	Sensación cromática (Chromaticness): Tinte + Saturación

CUADRO 3.1. Resumen de los conceptos fundamentales asociados al color.

3.5. Mezcla sustractiva de colores

En contraste con la mezcla aditiva de colores, cuando los colores se reproducen mediante pigmentos, tintas o colorantes, la mezcla de ellos es sustractiva, ya que la porción del espectro que cada tinta controla es aquella que absorbe [2]. Por esta razón la superficie ideal sobre la cual se plasman las tintas es blanca, puesto que refleja en igual proporción toda la región visible del espectro con una absorción mínima. Esto significa que mientras mayor es la concentración de colorante que se deposite sobre una superficie blanca, mayor es la cantidad de luz absorbida. Los colores de pigmentos que pueden reproducir la gama más amplia de colores al combinarse son el magenta, que absorbe la porción verde del espectro, el cian, que absorbe la luz roja y el amarillo, que absorbe la luz azul. De tal manera, que cuando se combinan, por ejemplo, un colorante azul con uno amarillo, el primero absorbe la luz roja y el segundo la luz azul, dando como resultado una superficie que sólo refleja la luz verde. Es un error común confundir el magenta con el rojo y el cian con el azul, por eso cabe aclarar que los colores sustractivos primarios son en realidad magenta, amarillo y cian. La combinación de estos tres absorbe idealmente toda la luz que incide sobre la mezcla y el resultado es una superficie negra. Esta situación se ilustra esquemáticamente en la Fig. 3.7.

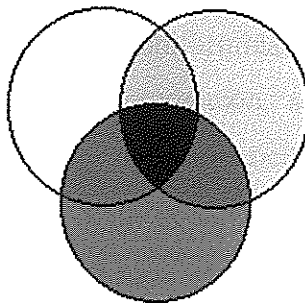


FIGURA 3.7. Mezcla sustractiva de colores mediante la combinación de pigmentos o tintas.

Lo mismo ocurre con materiales traslúcidos como son los filtros de colores. Por ejemplo, un filtro que por transmitancia se ve amarillo, es aquel que absorbe la parte azul del espectro y deja pasar al rojo y al verde. A veces la terminología para describir a los filtros se basa en el color que sustraen del espectro, por ejemplo, a un filtro amarillo se le conoce como “menos-azul” [4].

3.6. Evaluación de diferencias de color

El sistema CIE de valores triestímulo es uno de los más utilizados para describir color, sin embargo, se ha encontrado que distancias iguales en el diagrama de cromaticidad, no corresponden a diferencias iguales en percepción. Por ejemplo, somos capaces de distinguir una diferencia menor en el rango de los colores azul-violeta que en el rango de los verdes [1].

Un sistema métrico ideal para medir y especificar diferencias de color, sería aquel en el que todas las distancias de un determinado valor correspondieran a diferencias iguales en el color percibido, sin importar su dirección y ubicación dentro del espacio. Esto es lo que se llama *espacio uniforme de color*. Por lo tanto, el problema de especificar diferencias de color es el de encontrar una transformación matemática adecuada, del espacio tridimensional de valores triestímulo a otro espacio tridimensional, que tenga la propiedad de uniformidad de color. Las transformaciones que satisfacen aproximadamente dicha condición, se dice que son de *escala de cromaticidad uniforme* (UCS, uniform chromaticity scale), y un diagrama de cromaticidad que corresponda a un sistema métrico de este tipo se conoce como *diagrama UCS* [5].

Las escalas más utilizadas de diferencia de color son aquellas en que se ha tomado como base el Libro de Color de Munsell. De hecho, el sistema Munsell representa un atlas de color. Una transformación UCS que logre igualar las distancias entre las cromaticidades de pares de elementos Munsell con las mismas ubicaciones

de tinte y saturación, usualmente se considera exitosa en su intento por conseguir una métrica de cromaticidad uniforme [5].

En 1976 el CIE adoptó al sistema que se conoce actualmente como $L^* a^* b^*$ o CIELAB, desarrollado por Hunter y Judd [1], como un sistema de cromaticidad uniforme. Este es uno de los que más se usan en la práctica, aunque no es el único. La definición e interpretación de sus coordenadas se describirá a continuación.

El término *luminosidad*, se define como el brillo de una muestra, evaluado con respecto al brillo de una muestra blanca iluminada de manera similar [5]. Este es el atributo perceptual más importante para distinguir entre dos elementos de una serie de grises. La cantidad psicométrica que permite estimar cuantitativamente dicho atributo es precisamente L^* , la *luminosidad psicométrica*, y está definida mediante la relación [5]

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16, \quad Y/Y_n > 0.008856; \quad (3.11a)$$

$$L^* = 903.3(Y/Y_n), \quad Y/Y_n \leq 0.008856; \quad (3.11b)$$

donde Y es el valor triestímulo del color considerado, y Y_n el del blanco estándar.

Por otra parte, a^* es un parámetro que varía sobre un eje que va desde el rojo en un extremo hasta el verde en el extremo opuesto, si la muestra tiende al rojo a^* es positivo y si tiende al verde es negativo. Del mismo modo b^* indica la cantidad de amarillo cuando es positiva y de azul cuando es negativa [2]. Las ecuaciones que las definen son

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \quad (3.12)$$

$$b^* = 500[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)], \quad (3.13)$$

donde la función f , para una variable cualquiera, está dada por

$$f(u) = u^{1/3}, \quad \text{si } u > 0.008856; \quad (3.14a)$$

$$f(u) = 7.787 u + 16/116, \quad \text{si } u \leq 0.008856. \quad (3.14b)$$

De manera análoga que en la ecuación (3.11), en las ecuaciones (3.12) y (3.13) respectivamente, X y Z son los valores triestímulo del color que se considera, mientras que X_n y Z_n son los de una muestra blanca estándar.

Un esquema tridimensional de este sistema se muestra en la Fig. 3.8. Pero hay que aclarar que esto no representa un diagrama UCS, ya que los valores de a^* y b^* no dependen de L^* , y para L^* constante, las líneas rectas en el diagrama de cromaticidad CIE 1931 (x, y) corresponden a curvas en el sistema coordenado (a^*, b^*) [5]. Esta situación causa conflicto cuando se involucran mezclas de luces, y por eso es importante que en todos los diagramas de cromaticidad las líneas rectas se conserven como tales.

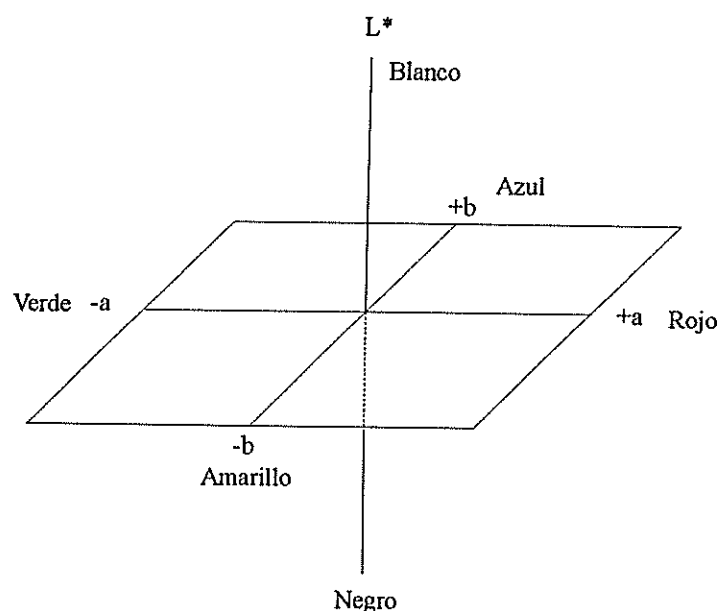


FIGURA 3.8. Esquema tridimensional de las coordenadas CIELAB para medir diferencias de color.

Cada punto en este espacio tridimensional representa un color. Consecuentemente, las diferencias de color corresponden a la distancia Euclidiana entre dos puntos, denotada como ΔE^* , esto es

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}, \quad (3.15)$$

donde $\Delta L^* = L_m^* - L_r^*$; $\Delta a^* = a_m^* - a_r^*$; $\Delta b^* = b_m^* - b_r^*$, y los subíndices m y r denotan la muestra y a la referencia respectivamente. ΔE^* se puede interpretar como la diferencia entre las sensaciones producidas por la muestra y por la referencia. La referencia en este caso no tiene que ser necesariamente una muestra blanca, puede ser un color arbitrario con el que se desea comparar una serie de muestras. Esta es una práctica muy común en el terreno de control de calidad, por ejemplo.

El sistema CIELAB mejora notablemente la conexión de la diferencia perceptual entre dos estímulos con su descripción matemática, comparada con el sistema CIEXYZ de valores triestímulo. Aunque el CIE continua investigando en el área de colorimetría diferencial. De hecho, actualmente existen ecuaciones más modernas que dan mejores resultados que el sistema CIELAB para cuantificar diferencias de color. Tal es el caso, por ejemplo, de las ecuaciones CMC, que incluso constituyen el estándar británico (BS 6923) para evaluar diferencias pequeñas de color y que está siendo considerada como estándar ISO [1].

Para concluir el Capítulo 3, en la siguiente Sección se presentan los principales instrumentos de medición de color.

3.7. Instrumentos para medir color

Aunque las cantidades que se miden en colorimetría son psicofísicas, los procedimientos instrumentales que se emplean son físicos [6]. En esta Sección se discuten los más importantes, ya sea por su trascendencia histórica, o por su aplicación en la actualidad. Al final de la Sección se describen los colorímetros de LED's, que por su novedad, son el centro de atención de este trabajo.

Los instrumentos diseñados para realizar mediciones directas de color se llaman colorímetros. Sin embargo, también se puede medir color de forma indirecta a través de un espectrofotómetro.

Ya que muchos colorímetros requieren caracterizar algunos de sus componentes mediante análisis espectrofotométricos, es conveniente comenzar por aclarar lo que es un espectrofotómetro y cómo se usa para determinar color.

Un fotómetro es un dispositivo que permite medir la intensidad luminosa, ya sea de la luz emitida por una fuente, transmitida a través de un material traslúcido, o bien, reflejada por un material opaco. Cuando un monocromador se combina de alguna manera con un fotómetro para medir la emitancia, transmitancia o reflectancia espectral, este instrumento se llama espectrofotómetro [6].

Originalmente, los fotómetros y espectrofotómetros eran visuales, es decir, era un observador humano quien determinaba, por medio de comparación, el punto en que la luminancia de dos fuentes era igual. Aún existen instrumentos de este tipo, pero es muy difícil y tedioso obtener suficiente precisión de esta manera, así que se han investigado métodos que reemplacen al ojo por otros detectores. Uno de los primeros métodos consistió en emplear como sistema de detección una termopila junto con un filtro, cuya transmitancia espectral fuera aproximadamente igual a la curva de luminosidad del observador estándar. Sin embargo, la baja sensibilidad de los detectores no selectivos cambió la atención hacia los detectores selectivos, que son más sensibles. Mediante la combinación de celdas fotovoltaicas o fotoemisoras con un filtro corrector adecuado en cada caso, también se ha logrado aproximar satisfactoriamente la curva de luminosidad estándar del ojo, aumentando considerablemente la sensibilidad del sistema. Los espectrofotómetros que utilizan este tipo de sistemas de detección se llaman espectrofotómetros fotoeléctricos [6]. Cabe aclarar que si un monocromador se combina únicamente con un detector no selectivo, entonces el dispositivo es un espectralradiómetro, que mide la distribución espectral de energía radiante.

Una vez que se obtienen las curvas de transmitancia, reflectancia o emitancia espectral con un espectrofotómetro, el cálculo de los valores triestímulo del CIE es inmediato a partir de las ecuaciones (3.10), ya que los datos de las curvas $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$ se encuentran tabulados incluso para diferentes tamaños de campo visual (2° y 10°) [2,5,12]. También las emitancias espectrales de las fuentes estándar del CIE están

tabuladas. A medida que se analice el funcionamiento de los colorímetros existentes, se podrá ver que el cálculo de cromaticidades por medio de un análisis espectrofotométrico es el método más preciso para determinar color, aunque sea un método indirecto. De cualquier forma, hay que resaltar el hecho de que las funciones de mezcla de colores, que se tomaron como base para establecer el sistema de valores triestímulo, fueron obtenidas mediante colorímetros.

Antes de comenzar con la descripción de los colorímetros existentes, es importante mencionar otro tipo de instrumentos, los densitómetros, que aunque no permiten medir color como tal, son capaces de detectar diferencias de color. Estos han sido diseñados principalmente para evaluar color en materiales fotográficos, pero su aplicación no está limitada a dicha tarea; con frecuencia se utilizan para control de calidad, procesos y materiales. Los densitómetros son instrumentos fotoeléctricos, muy similares en su principio de operación a los colorímetros fotoeléctricos de filtros que se discutirán en la Sección 3.7.8. La principal diferencia estriba en que la respuesta de su sistema de detección no está relacionada de ningún modo con la del observador estándar del CIE, y en consecuencia, los densitómetros no están diseñados para responder al color como lo haría un observador. El problema que se presenta con estos instrumentos es el frecuente intento de manejar sus lecturas como si fueran datos colorimétricos. En el Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI, American National Standard Institute) se está trabajando en resolver tal problema, estableciendo estándares propios para densitometría [5].

Una vez aclarada la existencia y función de los densitómetros, en lo que resta de este Capítulo se describirán brevemente los principales tipos de colorímetros que se han desarrollado desde que surgió la colorimetría hasta la actualidad [6].

3.7.1. Colorímetros de tres colores utilizando componentes espectrales

Este tipo de instrumentos se utilizan para igualar un color desconocido mezclando aditivamente tres componentes de cromaticidad constante pero luminancia variable. Para conseguir esto, se aíslan tres colores espectrales colocando tres rendijas en el plano del espectro. Las luminancias de las componentes espectrales se

controlan variando el ancho de las rendijas. Pero la precisión de las mediciones se ve muy limitada por las dificultades para controlar y calibrar el ancho de las rendijas. Y por otra parte, al variar el ancho de las rendijas es inevitable que las componentes se contaminen por los colores espectrales adyacentes y en consecuencia sus cromaticidades también cambian.

Pese a estas desventajas, es posible construir colorímetros de componentes espectrales de gran precisión. Por ejemplo, Wright usó uno de estos instrumentos para determinar las funciones de mezcla aditiva de colores que se muestran en la Fig. 3.2. Y de hecho, una parte importante de los datos estándar que adoptó el CIE para mezcla de colores están basados en este trabajo experimental [6].

Sin embargo, el uso de componentes espectrales no resulta práctico para medir color, puesto que los instrumentos de este tipo que alcanzan suficiente precisión son muy complicados y delicados. Además, cuando se usan colores espectrales puros se presentan serias discrepancias entre observadores, ya que los estímulos generados por éstos son muy distintos de los que estamos acostumbrados a ver, que corresponden a distribuciones espectrales continuas.

Cabe mencionar que en estos instrumentos el grado de metamerismo es muy alto, ya que el color que se desea igualar y la mezcla de componentes espectrales difieren mucho en composición espectral, y sin embargo, evocan la misma sensación de color al observador.

3.7.2. Colorímetros visuales de tres colores utilizando filtros.

En este caso, las componentes espectrales se sustituyen por componentes generadas por medio de una fuente de luz blanca que pasa a través de filtros de banda angosta. El uso de colorímetros tricromáticos de filtros resulta mucho más conveniente que el de los anteriores para mediciones rutinarias, por varias razones. En primera, la luz transmitida por los filtros se puede evaluar y controlar de manera exacta, sin el error debido a la contaminación de las componentes espectrales. Además, las mezclas de componentes filtradas se parecen mucho más a los estímulos de color ordinarios, y por lo tanto, las discrepancias entre observadores disminuyen

considerablemente. Finalmente, estos colorímetros son más simples, menos delicados y se pueden transportar con mucha más facilidad que los primeros.

Guild utilizó un colorímetro de filtros para determinar los datos que se tomaron como base para la estandarización CIE de 1931, y que confirmaron los datos de Wright. Hay que destacar que los resultados obtenidos de cualquier colorímetro tricromático se pueden convertir al sistema CIE de valores triestímulo, mediante una sencilla transformación que se describirá a detalle en el siguiente Capítulo.

El número de filtros que se utilizan en estos colorímetros no está limitado a tres. Por ejemplo, Donaldson construyó un colorímetro de seis filtros, en el cual el proceso de medición da como resultado una reproducción aproximada de la distribución espectral de la muestra.

3.7.3. Colorímetros para la determinación directa de la longitud de onda dominante y la pureza.

El modo de operación de estos dispositivos consiste en igualar un color mediante la mezcla de un color espectral puro y un estímulo acromático estándar, por eso se dice que son del tipo “monocromático más blanco”. La proporción de las luminancias de los constituyentes se determina por fotometría heterocromática, que es un método que consiste en comparar luminancias de diferentes cromaticidades. Este procedimiento es la fuente de los mayores errores en este tipo de instrumentos, pero además presentan sensibilidad extrema al observador, lo cual es propio de todos los métodos que usan componentes espectrales. Por tales razones, estos instrumentos han dejado de emplearse.

3.7.4. Colorímetros de vectores de Guild.

Para evitar la fotometría heterocromática, conservando la simplicidad de mezclar sólo dos componentes, Guild diseñó un instrumento para la determinación directa de la cromaticidad mediante dos igualaciones sucesivas. Este instrumento fue llamado colorímetro de vectores debido a que la cromaticidad se determina por la intersección de dos vectores en el diagrama de cromaticidad. Primero se escogen dos

componentes, A y B, (pueden ser colores espectrales o bien combinaciones de luz blanca y filtros) tales que al mezclarse aditivamente, variando sus intensidades, logren igualar la cromaticidad del color de prueba. Por lo tanto, éste debe ser un punto de la línea recta AB que une a los componentes en el diagrama de cromaticidad. Después se escoge otro par de colores, C y D, suficientemente diferente de los primeros y que también sean capaces de igualar al color de prueba, que en este caso, será un punto sobre la recta CD. El punto de intersección de las rectas (o vectores) AB y CD en el diagrama de cromaticidad, define entonces la cromaticidad del color de prueba. Este método da buenos resultados para igualar colores de alta pureza, pero no es así en el caso de estímulos de baja pureza.

3.7.5. Colorímetros de dispersión rotatoria.

Algunos materiales cristalinos presentan la propiedad de rotar el plano de polarización de un haz linealmente polarizado que incide sobre ellos, este fenómeno se llama actividad óptica. El ángulo y la dirección de rotación son característicos de cada material, pero se ha probado que en todos los casos la actividad óptica es aproximadamente proporcional al recíproco del cuadrado de la longitud de onda de la energía radiante. Consecuentemente, los planos de polarización de las componentes espectrales de un haz linealmente polarizado de energía radiante heterogénea son separados al pasar a través de un medio ópticamente activo. Esto implica que la distribución espectral del haz transmitido se puede variar colocando a la salida un dispositivo polarizador, tal como un prisma de Nicol, y variando su orientación. Esto es lo que se llama dispersión rotatoria.

Se han construido colorímetros en los cuales los colores producidos por dispersión rotatoria de luz polarizada, se usan para especificar cromaticidad. Del espesor de placas de cuarzo (que es un material ópticamente activo) y su arreglo entre prismas de Nicol, y de la orientación de éstos últimos, se puede calcular la distribución de energía de una fuente y su cromaticidad puede determinarse.

Las ventajas del método de dispersión rotatoria para colorimetría son la absoluta reproducibilidad del instrumento y la similitud entre las distribuciones

espectrales de las muestras ordinarias y la igualación de color producida por dispersión rotatoria. La desventaja más seria de este tipo de colorímetros es la rápida variación de la luminancia, que frecuentemente es acompañada de cambios moderados de cromaticidad. Además se requiere obtener una base de datos experimentales muy grande para su calibración, lo cual lo hace un método poco práctico.

3.7.6. Colorímetros empíricos.

Los colorímetros empíricos consisten en hacer pasar la luz proveniente de una fuente, en sucesión a través de combinaciones variables de materiales de absorción selectiva, hasta lograr la combinación óptima que iguale al color de prueba. Por su modo de operación, éstos también se llaman colorímetros sustractivos. Este método se ha ocupado tanto para especificación de color, como para determinar constitución química por medio del color. Los materiales de absorción selectiva que se utilizan son filtros en tres series de colores, que corresponden a los primarios sustractivos, y los miembros de cada serie están numerados de acuerdo a su densidad óptica.

Para que los resultados obtenidos con estos colorímetros se puedan relacionar con los estándares del CIE, es necesario contar con análisis espectrofotométricos de todos los filtros y de las fuentes que se utilicen. A partir de estos datos, los valores triestímulo de la combinación óptima se calculan con las ecuaciones (3.10). Aunque el uso general de estos valores típicos introduce discrepancias, debido a las diferencias entre filtros particulares y aquellos filtros que se analizaron con espectrofotómetro.

3.7.7. Colorímetros de disco utilizando estándares de color.

La manera de generar una mezcla aditiva de colores en este tipo de instrumentos es por medio de lo que se conoce como un disco de sectores. Esto es, un disco con sectores opacos y transparentes, o sectores de diferentes reflectancias, que se rota a una velocidad lo suficientemente alta como para producir una respuesta constante al promedio de energía transmitida o reflejada por los sectores. Estos

colorímetros se usan con el sistema Munsell de estándares de color, ya que se cuenta con un análisis espectrofotométrico de cada uno de sus elementos y sus valores triestímulo ya se han calculado. Buscando simplificar la construcción e incrementar la velocidad de operación, estos dispositivos han sido modificados. Ahora se colocan sectores de papeles Munsell que reflejen luz de diferentes colores en un disco estacionario, de tal manera que sus proporciones se pueden cambiar continuamente, y un prisma rotando rápidamente barre un área anular del disco de sectores. Los resultados se expresan como interpolaciones en términos de las notaciones Munsell correspondientes a los estándares Munsell utilizados para los sectores.

En realidad, cualquier conjunto de muestras que se puedan incorporar al disco y cuyos valores triestímulo sean conocidos se pueden utilizar como estándar.

De acuerdo a lo anterior, los resultados que proporcionan estos colorímetros pueden obtenerse directamente en términos de los valores triestímulo del CIE.

3.7.8. Colorímetros fotoeléctricos de filtros.

Todos los colorímetros que se han mencionado hasta aquí son colorímetros visuales. Pero al igual que ocurre con los espectrofotómetros, actualmente existe la tendencia de reemplazar al ojo por otros sistemas de detección. En el caso de los colorímetros fotoeléctricos se utilizan filtros para generar las componentes de la mezcla aditiva de colores, y el sistema de detección está constituido por fotoceldas.

Aunque el número de fotoceldas no está limitado, originalmente se utilizaron tres. La característica más sobresaliente de estos instrumentos es la independencia y la separabilidad de las respuestas simultáneas de las fotoceldas (aunque nunca se ha demostrado que el ojo tenga respuestas separables, esto se debe asumir para poder explicar los hechos observables de visión de color). Cuando se usa una sola fotocelda, se deben registrar las respuestas sucesivas a través de cada uno de los filtros y la muestra de color debe permanecer inalterada durante el tiempo requerido para realizar las mediciones.

Sin embargo, ningún instrumento cuyo detector tenga características esencialmente diferentes de las del ojo se puede relacionar con las propiedades

fundamentales de éste, como ocurre con los densitómetros. Por lo tanto, hay una condición básica que debe cumplir un instrumento fotoeléctrico para poder llamarse colorímetro, y es que el producto de la sensibilidad espectral de cada una de las fotoceldas por la transmitancia espectral de los filtros sea aproximadamente proporcional, a todo lo largo del espectro, a una combinación lineal de las curvas estándar del CIE para la mezcla aditiva de colores [6].

La Fig. 3.8 muestra esquemáticamente la comparación entre: (a) el estímulo de color percibido por un observador humano y (b) detectado por un colorímetro fotoeléctrico.

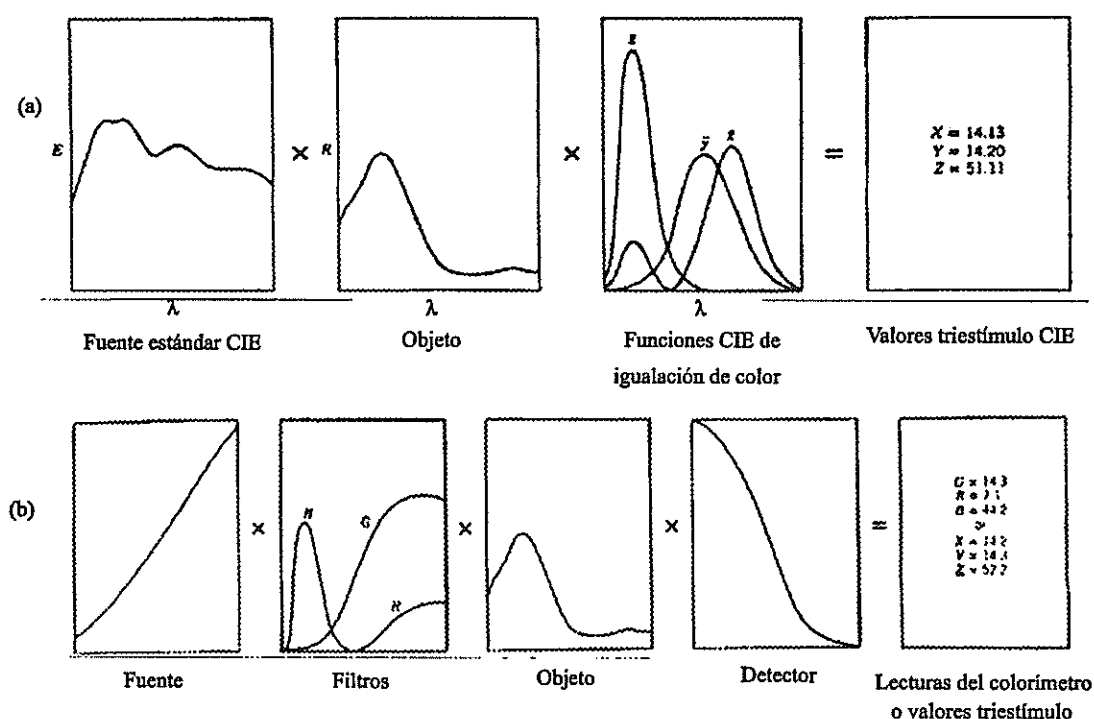


FIGURA 3.8. (a) Esquema que representa cómo se obtienen los valores triestímulo, considerando al ojo como detector. (b) Esquema que ilustra la manera en que un colorímetro fotoeléctrico genera sus resultados.

En general, las lecturas de un colorímetro que satisface la condición antes mencionada pueden convertirse al sistema CIE de valores triestímulo. Esto se tratará con más detalle en el siguiente Capítulo.

Un instrumento en particular que se incluye entre los colorímetros fotoeléctricos es el que se conoce como colorímetro triestímulo. En éste se utilizan cuatro filtros cuyas transmitancias se escogen de modo que se aproximen a las funciones $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$ del CIE. Las características de la fuente que se utilice deben correlacionarse con los filtros específicos del instrumento, por lo que solo se puede usar una fuente de luz por cada serie de filtros [13].

Otro instrumento que se puede incluir en este grupo es el colorímetro espectrofotométrico, el cual en vez de filtros, utiliza diecisiete fotodiodos como detectores para medir diecisiete puntos sobre la curva espectral. Estos instrumentos son capaces de evaluar color usando más de un iluminante [13].

Aunque históricamente, los colorímetros visuales tienen un lugar fundamental en colorimetría, hoy en día están siendo reemplazados por los colorímetros fotoeléctricos, por la gran ventaja que representa la repetibilidad de las mediciones, y porque en general son instrumentos más sencillos de usar y transportar.

3.7.9. Colorímetros de LED's.

Actualmente, se ha desarrollado un nuevo tipo de colorímetros, los de LED's, que también son instrumentos fotoeléctricos.

Los diodos electroluminiscentes o LED's son fuentes no-coherentes y de ancho espectral reducido (entre 25 y 110 nm) [14]. Por estas características, resultan adecuados para medición de color, en lugar del sistema de luz blanca y filtros que se emplea en los colorímetros fotoeléctricos tradicionales. Además, los LED's son muy económicos y fáciles de conseguir, lo cual representa una ventaja de los colorímetros de LED's sobre los de filtros.

Al igual que en el caso de los colorímetros fotoeléctricos, es de suponerse que los colorímetros de LED's deben satisfacer la condición de que el producto de la emisividad de cada uno de los LED's por la sensibilidad del fotodiodo, a todo lo largo del espectro visible, sea aproximadamente proporcional a una combinación lineal de las curvas estándar del CIE para la mezcla aditiva de colores. Tomando esto como base, en la Sección 4.3 del próximo Capítulo se plantea una transformación de

coordenadas de color que relacione las lecturas de los colorímetros de LED's con los valores triestímulo del CIE.

Para concluir la discusión a cerca de colorímetros, se debe mencionar como advertencia un hecho muy importante, sobre todo al hablar de colorímetros fotoeléctricos. Es muy frecuente, aún entre colorímetros de la misma marca y modelo, que existan discrepancias en las mediciones de una misma muestra. Estas diferencias se deben a que con las fuentes, filtros y detectores existentes es muy difícil lograr que las curvas de respuesta de diferentes colorímetros sean exactamente iguales, es de esperarse que esta situación también ocurra en el caso de los colorímetros de LED's. Por tal motivo, no es conveniente considerar que las lecturas obtenidas de este tipo de instrumentos tienen un significado absoluto, y no deben utilizarse con propósitos de estandarización, especificación comercial, etc. El uso más adecuado que se puede dar a estos colorímetros es el de medir diferencias de color, y en este sentido tienen la ventaja de ser extremadamente sensibles. Además, las mediciones diferenciales son altamente reproducibles entre unos y otros colorímetros. Para cuantificarlas se acostumbra usar el sistema CIELAB, que se describió en la Sección 3.6 [2].

Pese a lo anterior, no hay que confundir los colorímetros fotoeléctricos con los densitómetros, pues como ya se mencionó, las lecturas de éstos últimos no se pueden relacionar con ningún sistema colorimétrico como lo es el CIELAB. De hecho, en el Capítulo 4 se trata el tema de transformaciones de coordenadas cromáticas entre las lecturas de las distintas clases de colorímetros y el sistema CIEXYZ.

CAPÍTULO 4

TRANSFORMACIONES DE COORDENADAS CROMATICAS

Como cualquier instrumento de medición, los colorímetros deben calibrarse y sus lecturas deben poderse dar en términos de algún estándar internacional. En el Capítulo anterior se vio que hay varios sistemas de especificación de color, pero el más utilizado es el sistema de valores triestímulo del CIE, ya que se ha convertido en un estándar universal.

En general, si la especificación de un color es conocida en términos de cualquier serie de componentes (R), (G), (B), su especificación en el sistema CIE puede calcularse mediante una transformación de coordenadas, siempre y cuando: (a) las especificaciones de las componentes (R), (G) y (B), sean conocidas en el sistema CIE; y (b) la especificación de un color estándar de referencia sea conocida en ambos sistemas [15]. Sin embargo, estas transformaciones nunca son exactas. Tanto en el caso de los instrumentos visuales, como en el de instrumentos fotoeléctricos, el error se debe a las discrepancias que hay entre las características visuales del observador estándar y las del sistema de detección que se use, sea éste el ojo de un usuario común, o un sistema fotoeléctrico.

El objetivo de este Capítulo es el de establecer una transformación de coordenadas cromáticas entre las lecturas de un colorímetro de LED's y los valores triestímulo del CIE. Para ello, primero se hace una revisión breve de las transformaciones más simples que hay para los instrumentos ya existentes.

Específicamente, en la primera Sección se discuten las transformaciones de coordenadas cromáticas para los colorímetros visuales. En la Sección 4.2 se analiza una de las transformaciones más sencillas que hay para colorímetros fotoeléctricos, haciendo notar la gran importancia de la calibración y las referencias que se utilizan

como estándar. Para terminar, en la Sección 4.3 se establece una comparación entre los colorímetros fotoeléctricos y los de LED's, que concluye con una propuesta de transformación de coordenadas cromáticas aplicable a éstos últimos.

4.1. Transformación de coordenadas cromáticas para colorímetros visuales.

La transformación más simple y directa que hay, es aquella que relaciona las lecturas de los colorímetros visuales de tres componentes con los valores triestímulo del CIE, la cual puede ser expresada en términos de una matriz. El método general para obtener explícitamente dicha matriz se describe a continuación.

En primer lugar, es necesario contar con un color estándar de referencia, por ejemplo S, cuyas coordenadas de color sean conocidas en ambos sistemas. Las componentes del colorímetro se denotarán como (R), (G) y (B). Entonces supóngase que las coordenadas del color (S) en este sistema están dadas por (r_s, g_s, b_s) . Esto significa que una cantidad unitaria de luz de ese color se puede igualar con una mezcla de r_s , g_s y b_s T-unidades, respectivamente, de cada uno de los tres estímulos de referencia en este sistema, donde $r_s + g_s + b_s = 1$.

Por otra parte, en el sistema CIEXYZ el color (S) tiene coordenadas (X_s, Y_s, Z_s) . Y los valores triestímulo de las componentes (R), (G) y (B), que también son conocidos, y se denotan como (X_R, Y_R, Z_R) , (X_G, Y_G, Z_G) y (X_B, Y_B, Z_B) . Por supuesto, se debe cumplir que, $X_s + Y_s + Z_s = 1$ y que $X_i + Y_i + Z_i = 1$, con $i = R, G, B$. En correspondencia, cantidades unitarias de estos mismos estímulos en el sistema RGB, tienen coordenadas (lX_R, lY_R, lZ_R) , (mX_G, mY_G, mZ_G) y (nX_B, nY_B, nZ_B) , donde l , m y n , son constantes, aún desconocidas [15].

Esto implica que el color (S) en el sistema RGB se puede expresar como

$$(S) \equiv r_s(R) + g_s(G) + b_s(B), \quad (4.1a)$$

o bien,

$$(S) \equiv r_S \{ lX_R(X) + lY_R(Y) + lZ_R(Z) \} + g_S \{ mX_G(X) + mY_G(Y) + mZ_G(Z) \} + b_S \{ nX_B(X) + nY_B(Y) + nZ_B(Z) \}. \quad (4.1b)$$

Finalmente, reagrupando términos

$$(S) \equiv \{ r_S lX_R + g_S mX_G + b_S nX_B \} (X) + \{ g_S lY_R + g_S mY_G + b_S nY_B \} (Y) + \{ r_S lZ_R(Z) \} + g_S mZ_G + b_S nZ_B \} (Z). \quad (4.1c)$$

De lo anterior se sigue que los valores triestímulo del color S, en términos de las componentes del colorímetro, se puede expresar como [15]

$$\begin{aligned} X_S &= r_S lX_R + g_S mX_G + b_S nX_B; \\ Y_S &= r_S lY_R + g_S mY_G + b_S nY_B; \\ Z_S &= r_S lZ_R + g_S mZ_G + b_S nZ_B. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones (4.2) para l , m y n , se puede determinar una matriz de transformación entre los sistemas RGB y XYZ. Por lo tanto, para encontrar los valores triestímulo de un color cualquiera, cuyas coordenadas en el sistema RGB, corresponden a las lecturas del colorímetro, (r,g,b), se utiliza la ecuación matricial

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} lX_R & mX_G & nX_B \\ lY_R & mY_G & nY_B \\ lZ_R & mZ_G & nZ_B \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

donde la matriz

$$M = \begin{pmatrix} lX_R & mX_G & nX_B \\ lY_R & mY_G & nY_B \\ lZ_R & mZ_G & nZ_B \end{pmatrix},$$

es la matriz de transformación de coordenadas cromáticas entre ambos sistemas.

El color (S), que se acostumbra tomar como referencia es el blanco equi-energético, el cual tiene coordenadas de cromaticidad (1/3,1/3,1/3) en cualquier sistema. Sin embargo, si experimentalmente no se cuenta con una fuente de estas características, se puede utilizar cualquier otra fuente estándar del CIE, cuyas coordenadas de color sean conocidas en los dos sistemas.

Por otra parte, para encontrar los valores triestímulo de las componentes del colorímetro es necesario hacer la distinción entre dos tipos de colorímetros. Si se trata de un colorímetro de componentes espectrales, sus valores triestímulo se obtienen directamente de los datos tabulados para las funciones $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$, o mediante una interpolación. En caso de que las componentes sean generadas con filtros, sus valores triestímulo se obtienen a partir de un análisis espectrofotométrico de cada uno los filtros y de la luz que incide sobre ellos, como se describió en la Sección 3.7 del Capítulo anterior.

En teoría, la transformación de las lecturas del colorímetro serán iguales a los valores triestímulo del CIE únicamente si las funciones de mezcla de colores del observador que lo usa son indistinguibles de las del observador estándar del CIE. Como esto no suele ocurrir, los resultados obtenidos con un colorímetro son sólo aproximaciones a las especificaciones CIE. Sin embargo, las variaciones de las funciones de mezcla de colores entre observadores normales se pueden compensar en cierto grado. La forma de hacerlo es ajustando las unidades de r , g y b para cada observador, de tal manera que a partir de las lecturas de ese observador para el color (o fuente) estándar se obtengan exactamente los valores XYZ del CIE correspondientes a ese estímulo [6]. Este tipo de problemas no se presenta al calcular los valores triestímulo con los datos proporcionados por un espectrofotómetro, y por esa razón es que dicho método es más exacto [6].

Para finalizar esta Sección, es muy importante aclarar que la aplicación de las transformaciones para colorímetros visuales, no está limitada a obtener los valores XYZ. Es decir, se puede aplicar una transformación completamente análoga para obtener la equivalencia entre las coordenadas cromáticas de cualquier par de sistemas RGB, cuyas componentes difieran entre sí. Además, en el caso de colorímetros visuales, la selección de las componentes R, G y B, no está sujeta a ningún tipo de restricción, en contraste con el caso de colorímetros fotoeléctricos, que se verá en la continuación

4.2. Transformación de coordenadas cromáticas para colorímetros fotoeléctricos de filtros

Cuando se expuso el tema de colorímetros fotoeléctricos en la última Sección del Capítulo anterior, se mencionó que deben cumplir la condición de que el producto de la transmitancia espectral de los filtros por la sensibilidad espectral del (o los) detector(es) sea proporcional a una combinación lineal de las curvas del CIE para la mezcla aditiva de colores. En el diseño de este tipo de colorímetros se tienen tres elementos fundamentales, la fuente, el detector y los filtros, por lo tanto, existen diferentes formas de lograr que dicha condición se cumpla. La manera más sencilla es utilizar una de las fuentes estándar del CIE y escoger los otros dos elementos de tal forma que la respuesta del detector (o detectores) en combinación con la transmitancia de cada uno de los filtros iguale directamente a cada una de las curvas $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$. El grado en que las lecturas del instrumento se aproximen a los valores triestímulo reales de las muestras depende de qué tan bien hayan sido duplicadas las curvas de los valores triestímulo espectrales [2].

Una de las dificultades para duplicar las curvas es el hecho de que $\bar{x}$ tiene dos máximos (ver Fig. 3.3). En algunos instrumentos el pico pequeño de esta curva se considera idéntico en forma a la curva $\bar{z}$, pero de menor tamaño. Este

procedimiento limita mucho la precisión. En otros instrumentos se utiliza un filtro adicional para obtener esta parte de la curva $\bar{x}$, lo cual mejora los resultados.

Las lecturas de este tipo de colorímetros se pueden expresar de diferentes maneras. Quizá la más simple es aquella en que el instrumento se calibra de manera que las lecturas a través de cada uno de los filtros, indiquen el 100% de reflectancia para una muestra de blanco puro. El material que se toma como blanco estándar para medidas de reflectancia, es el óxido de magnesio (MgO) [2]. A menudo estas lecturas se denominan R para el rojo, G para el verde y B para el azul. Si se usan cuatro filtros, el que corresponde al pico pequeño de la curva $\bar{x}$ se denota como R'.

La transformación de coordenadas que permite calcular los valores triestímulo aproximados a partir de estas lecturas es la siguiente [1]

$$\begin{aligned} X &= aR + bB && \text{(colorímetros de 3 filtros), o bien,} \\ X &= aR + bR' && \text{(colorímetros de 4 filtros),} \\ Y &= G, \\ Z &= cB, \end{aligned} \tag{4.4}$$

donde los factores numéricos a , b y c en las ecuaciones (4.4) varían dependiendo del iluminante estándar y del campo visual que se hayan considerado para calcularlos. Sus valores explícitos se han calculado, como parte de este trabajo, para los iluminantes A, B, C y D65, y para campos visuales de 2° y 10°, los resultados se muestran en la Tabla 4.1.

TABLA 4.1. Coeficientes de la transformación de coordenadas cromáticas para colorímetros fotoeléctricos

	Campo visual:	Iluminante A	Iluminante B	Iluminante C	Iluminante D65
a	2°	1.04462	0.85170	0.78319	0.77003
b	2°	0.05385	0.13923	0.19752	0.18015
c	2°	0.35582	0.85313	1.18225	1.08845
a	10°	1.05715	0.85286	0.77728	0.76829
b	10°	0.05444	0.13921	0.19570	0.17998
c	10°	0.35200	0.84349	1.16137	1.07414

La forma de obtener esta transformación se describe a continuación. Para comenzar, G y Y se consideran idénticos por definición, ya que el valor triestímulo Y para el MgO es 100. Los valores X y Z están normalizados con respecto al valor de Y . Esto significa que si se considera que para el reflector ideal (es decir, la muestra de blanco estándar: MgO) la reflectancia espectral r_λ es igual a la unidad para toda λ en la región visible del espectro, entonces de acuerdo con las ecuaciones (3.9), que definen a los valores triestímulo de un objeto en modo reflectancia, se tiene que

$$X = \int \bar{x} \Phi_\lambda d\lambda; \quad Y = \int \bar{y} \Phi_\lambda d\lambda; \quad Z = \int \bar{z} \Phi_\lambda d\lambda.$$

Y el valor de los coeficientes a , b y c en las ecuaciones (4.4), se obtiene precisamente al normalizar estas ecuaciones con respecto al valor de Y . En el caso del coeficiente c esto es inmediato, a saber,

$$c = \frac{\int_{380nm}^{750nm} \bar{z} \Phi_\lambda d\lambda}{\int_{380nm}^{750nm} \bar{y} \Phi_\lambda d\lambda}. \quad (4.5a)$$

Sin embargo, en el caso de los coeficientes a y b para determinar X , es necesario dividir la función $\bar{x}$ en dos partes; la que corresponde al pico pequeño, que va desde $\lambda = 380nm$ hasta $\lambda = 505nm$, para determinar a , y la que corresponde al pico grande, que va desde $\lambda = 505nm$ hasta $\lambda = 780nm$, para determinar b , esto es

$$a = \frac{\int_{380nm}^{505nm} \bar{x} \Phi_\lambda d\lambda}{\int_{380nm}^{750nm} \bar{y} \Phi_\lambda d\lambda}; \quad (4.5b)$$

$$b = \frac{\int_{505nm}^{750nm} \bar{x}\Phi_{\lambda}d\lambda}{\int_{380nm}^{750nm} \bar{y}\Phi_{\lambda}d\lambda}. \quad (4.5c)$$

El valor de $\lambda = 505nm$ se escoge como valor límite entre los picos grande y pequeño de la función $\bar{x}$ porque corresponde a la posición del mínimo relativo. Aunque en realidad esto es para un campo visual de 2° ; para un campo de 10° , el mínimo relativo de $\bar{x}_{10}$ se encuentra en $\lambda = 500nm$, pero el procedimiento sigue siendo el mismo, sólo cambian los límites de integración en las ecuaciones (4.5b) y (4.5c).

De las ecuaciones (4.5) se puede ver por qué los coeficientes a , b y c dependen del iluminante que se utilice y también del campo visual, ya que las funciones $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$ están tabuladas para campos de 2° y 10° [5,12] (estos datos se encuentran en el apéndice A).

4.3. Propuesta de transformación de coordenadas entre los valores triestímulo XYZ y las lecturas de un colorímetro de LED's

Después de presentar los antecedentes que se han reunido hasta ahora, se cuenta con los elementos necesarios para entender en forma directa la viabilidad de los colorímetros de LED's, y las características que deben satisfacer dichos instrumentos.

En primer lugar, y como es evidente, la distribución espectral de cada LED se puede ver como la distribución espectral de una fuente de luz blanca a través de un filtro apropiado. De modo que si es posible construir colorímetros fotoeléctricos con un sistema de luz blanca y filtros, entonces es igualmente posible construirlos con LED's.

Además, los colorímetros de LED's también son instrumentos fotoeléctricos, así que deben satisfacer una condición análoga a la que satisfacen los de filtros para que efectivamente puedan considerarse colorímetros.

Por lo tanto, la condición que se propone en esta tesis para lograr que un instrumento de LED's sea capaz de medir color es que *el producto de la distribución espectral de los LED's por la sensibilidad espectral del (o los) detector(es) sea proporcional a una combinación lineal del producto de las curvas $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$ por algún iluminante patrón*. El instrumento de LED's que satisface dicha condición se puede considerar un colorímetro, puesto que sus funciones de respuesta estarán relacionadas con las funciones de la mezcla aditiva de colores para el observador estándar del CIE. Esta condición es completamente equivalente a la que deben cumplir los colorímetros de filtros.

En principio, existen múltiples maneras de satisfacer el requerimiento anterior, ya que actualmente hay una gran variedad tanto de LED's como de detectores en diferentes regiones del espectro. Sin embargo, para reducir las posibilidades, en este trabajo se decidió considerar sólo aquellos detectores cuya respuesta sea lineal en la región visible del espectro. De esta forma, la propuesta anterior se reduce a que *el producto de la distribución espectral de cada uno de los LED's por la sensibilidad espectral del detector debe ser proporcional al producto de las curvas $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$ por algún iluminante patrón*. La primera aproximación para lograr esto sería contar con cuatro LED's ideales; dos para igualar las funciones $\bar{y}\Phi_\lambda$ y $\bar{z}\Phi_\lambda$, donde Φ_λ representa la distribución espectral de algún iluminante patrón; y otros dos para igualar cada uno de los picos de la función $\bar{x}\Phi_\lambda$. Las características espectrales que deberían tener dichos LED's fueron determinadas y se resumen en la Tabla 4.2. Estas corresponden a las características de las funciones $\bar{x}\Phi_\lambda$, $\bar{y}\Phi_\lambda$ y $\bar{z}\Phi_\lambda$ para cuatro iluminantes distintos y dos tamaños de campo visual (la tabulación de los datos espectrales de los iluminantes patrón se encuentra en el apéndice B).

*TABLA 4.2. Características de las funciones CIEXYZ para diferentes iluminantes
Y tamaños de campo visual.*

Función	Iluminante	Máximos (nm)	Ancho de banda (nm)
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [380nm,505nm]	A	455	50
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [510nm,750nm]	A	605	80
$\bar{y} \Phi_\lambda$	A	570	105
$\bar{z} \Phi_\lambda$	A	460	55
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [380nm,500nm]	A	450	45
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [505nm,750nm]	A	600	75
$\bar{y}_{10} \Phi_\lambda$	A	570	105
$\bar{z}_{10} \Phi_\lambda$	A	455	55
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [380nm,505nm]	B	445	50
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [510nm,750nm]	B	600	85
$\bar{y} \Phi_\lambda$	B	560	95
$\bar{z} \Phi_\lambda$	B	455	55
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [380nm,500nm]	B	445	50
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [505nm,750nm]	B	590	80
$\bar{y}_{10} \Phi_\lambda$	B	560	105
$\bar{z}_{10} \Phi_\lambda$	B	450	55
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [380nm,505nm]	C	445	50
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [510nm,750nm]	C	595	80
$\bar{y} \Phi_\lambda$	C	555	90
$\bar{z} \Phi_\lambda$	C	445	50
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [380nm,500nm]	C	445	50
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [505nm,750nm]	C	595	80
$\bar{y}_{10} \Phi_\lambda$	C	555	100
$\bar{z}_{10} \Phi_\lambda$	C	445	55
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [380nm,505nm]	D65	450	50
$\bar{x} \Phi_\lambda$ [510nm,750nm]	D65	600	80
$\bar{y} \Phi_\lambda$	D65	550	100
$\bar{z} \Phi_\lambda$	D65	450	50
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [380nm,500nm]	D65	450	50
$\bar{x}_{10} \Phi_\lambda$ [505nm,750nm]	D65	600	90
$\bar{y}_{10} \Phi_\lambda$	D65	550	100
$\bar{z}_{10} \Phi_\lambda$	D65	450	50

Actualmente se pueden encontrar LED's que satisfagan las propiedades ideales en lo que respecta a la posición de sus máximos de emitancia, pero no en el ancho de banda. Sin embargo, si se busca una combinación adecuada de varios LED's mediante una mezcla aditiva, se puede conseguir una mejor aproximación a la distribución espectral de las funciones del CIE.

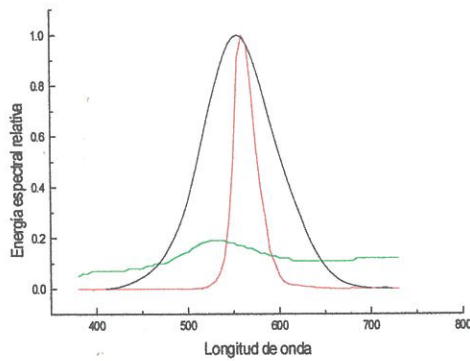
De cualquier forma, es conveniente insistir en que queda abierta la posibilidad de explorar combinaciones de detectores y LED's que permitan reproducir las funciones de CIE.

Con respecto a la transformación de coordenadas entre las lecturas de un colorímetro de LED's ideal (es decir, que cumpliera la condición propuesta) y los valores triestímulo del CIE, otra de las hipótesis de esta tesis es que *las ecuaciones de transformación (4.4), para colorímetros fotoeléctricos de filtros, son igualmente aplicables al caso de colorímetros de LED's*. El argumento para sustentar tal suposición es que, como ya se vio, dicha transformación es independiente del instrumento. Las ecuaciones (4.4) fueron deducidas a partir de las características propias de las funciones del CIE, aunque por supuesto, bajo la premisa de que las funciones de respuesta del instrumento coincidieran con las del CIE.

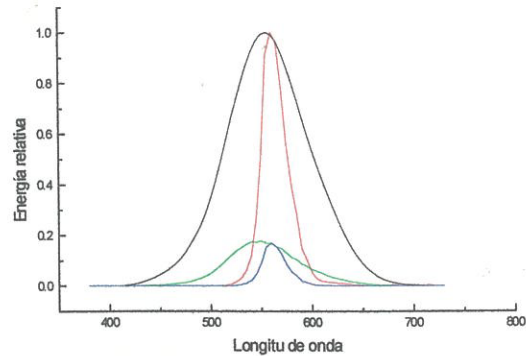
Para verificar experimentalmente las hipótesis que se han hecho respecto a los colorímetros de LED's, se utilizó como prototipo el instrumento desarrollado por Alarcón, Echeagaray y Tepichín [9]. Este instrumento cuenta con un detector fotoeléctrico cuya respuesta se puede considerar lineal en la región visible del espectro, y con LED's de los tres colores básicos para la mezcla aditiva de colores (rojo, verde y azul). Aún cuando este instrumento es capaz de detectar diferencias de color, no satisface las condiciones establecidas en esta Sección, puesto que sus LED's no coinciden con los propuestos idealmente, ni en la posición de sus máximos de distribución espectral, ni en sus anchos de banda. Por lo tanto, al aplicar la transformación (4.4) a las lecturas de éste instrumento, los resultados presentan una desviación muy alta respecto al valor esperado. De acuerdo a la propuesta que se hace

en esta tesis, dichos resultados deberían mejorar si los LED's originales del instrumento se reemplazaran por unos nuevos, de tal manera que los máximos del producto de sus distribuciones espectrales por la curva de sensibilidad espectral del detector coincidan con los máximos de cada una de las curvas $\bar{x}\Phi_\lambda$, $\bar{y}\Phi_\lambda$ y $\bar{z}\Phi_\lambda$, para algún iluminante estándar.

Para entender mejor esta situación, considérese la Fig. 4.1. Donde g_λ representa la energía radiante espectral de un LED verde cualquiera y D_λ la sensibilidad espectral del detector. En el caso (a), la curva en negro corresponde a la función $\bar{y}\Phi_\lambda$ (para el iluminante C y campo visual de 2°); la curva en rojo corresponde al producto $g_\lambda D_\lambda$, y la curva en verde representa la reflectividad espectral r_λ de un objeto arbitrario.



a) La curva en negro representa la función $\bar{y}\Phi_\lambda$; la curva en rojo representa la función $g_\lambda D_\lambda$ para un LED y la curva en verde representa la reflectancia de un objeto arbitrario.



b) La curva en verde es el resultado del producto $\bar{y}\Phi_\lambda r_\lambda$ y la curva en azul es el resultado del producto $g_\lambda D_\lambda r_\lambda$.

FIGURA 4.1. Comparación entre el valor triestímulo Y y el valor G, para un objeto de reflectancia espectral r_λ .

El valor triestímulo Y para el objeto, normalizado con respecto al valor Y_s para el MgO, se obtiene a partir de la ecuación

$$Y = \frac{\int_{380nm}^{750nm} \bar{y} r_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda}{\int_{380nm}^{750nm} \bar{y} \Phi_{\lambda} d\lambda}. \quad (4.6)$$

Gráficamente, esta ecuación corresponde al cociente del área bajo la curva en verde en la Fig. 4.1(b) entre el área bajo la curva en negro.

Por otra parte, para el caso del LED, el valor G representa la proporción de luz reflejada por el objeto que es detectada por el instrumento, con respecto a la luz reflejada por el MgO, esto es

$$G = \frac{\int_{380nm}^{750nm} r_{\lambda} g_{\lambda} D_{\lambda} d\lambda}{\int_{380nm}^{750nm} g_{\lambda} D_{\lambda} d\lambda}. \quad (4.7)$$

Gráficamente esta ecuación corresponde al área bajo la curva en azul en la fig. 4.1(b) entre el área bajo la curva en rojo.

Como es evidente de la Fig. 4.1, la proporción en que difieran los valores de G y de Y será menor, en la medida en que las curvas $\bar{y} \Phi_{\lambda}$ y $g_{\lambda} D_{\lambda}$, sean más parecidas.

De acuerdo a lo anterior, el error que resulte de aplicar la transformación (4.4) a las lecturas del instrumento prototipo debe reducirse si los LED's originales se reemplazan por otros cuyas distribuciones espectrales se parezcan más a las funciones del CIE. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente Capítulo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la primera Sección de este Capítulo se describirán el equipo, los materiales y los métodos que se utilizaron en cada etapa del análisis experimental, mencionando los aspectos que se consideran más relevantes dentro del marco de este trabajo. En la Sección 5.2 se presentan y discuten los resultados obtenidos. Por último, en la Sección 5.3 se discute una nueva propuesta teórica.

5.1. Equipo, materiales y métodos utilizados

Para realizar esta investigación se utilizaron fundamentalmente tres equipos: el instrumento prototipo, el fotómetro-espectroradiómetro Pritchard modelo 1980-B y el radiómetro New Port modelo 815; los dos primeros controlados por medio de una computadora personal. Por otra parte, los materiales empleados fueron los siguientes: treinta y siete diodos emisores de luz o LED's; doce muestras de color y una muestra de óxido de magnesio (MgO) colocada en un contenedor de vidrio. Adicionalmente, se usaron otros materiales para realizar un circuito eléctrico simple, en el que se pudieran encender los LED's con corriente controlada. Por último, el método general de trabajo se describe a continuación:

- i) Primero se midieron las muestras de color con el instrumento prototipo original, que fue calibrado con la muestra de MgO.

- ii) Por otra parte, se caracterizaron todos los LED's obteniendo su distribución espectral para hacer una preselección, y luego se analizó la potencia radiante como función de la corriente para aquellos que fueron preseleccionados.
- iii) Basándose en el análisis de los LED's se seleccionaron cuatro de ellos, cuyas características se aproximarán más a las ideales, para reemplazar a los LED's que originalmente tenía el instrumento prototipo.
- iv) Se reemplazaron los LED's originales del instrumento por los cuatro LED's nuevos.
- v) Después de reemplazar los LED's en el instrumento prototipo, se midieron nuevamente las muestras de color, calibrando del mismo modo en que se hizo antes.
- vi) Posteriormente, se mandaron a analizar las muestras de color para tener datos de referencia con los cuales se pudieran comparar las lecturas del instrumento prototipo.
- vii) Por último, se realizó el análisis de datos.

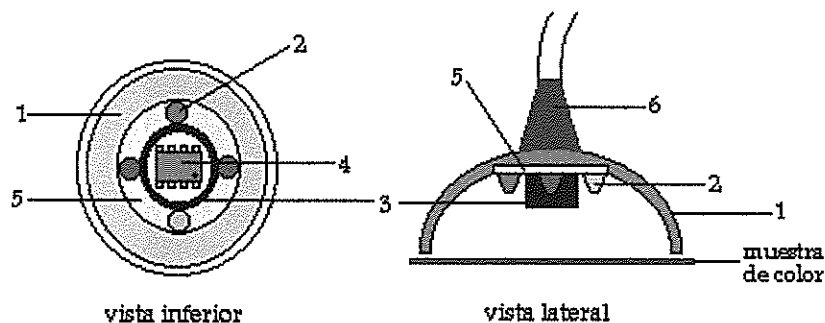
En las Subsecciones siguientes se describirán con mayor detalle las etapas del trabajo experimental.

5.1.1. Características técnicas del instrumento prototipo.

Antes de comenzar con la descripción del instrumento que se utilizó como prototipo, conviene aclarar que lo único que se reemplazó en este trabajo fueron los LED's; tanto el diseño óptico, electrónico y de software, como los demás elementos que lo componen, se conservaron inalterados.

El instrumento prototipo se puede dividir en cinco bloques principales, éstos son: controlador central, arreglo óptico sensor, interfase de usuario, almacenamiento o memoria y fuente de poder [9]. En este trabajo sólo se analizará el arreglo óptico sensor. Los detalles técnicos del resto de los bloques se pueden encontrar en la referencia [9].

El arreglo óptico sensor se ilustra esquemáticamente en la Fig. 5.1. Este consta de un casco soporte (1) de forma semiesférica, cuya superficie interior cuenta con un recubrimiento de material reflejante. En la parte superior interna del casco se encuentra una pastilla (5) que sirve como base para colocar y conectar un convertidor de luz a frecuencia (4), que fue el elemento que se utilizó como detector, y cuatro LED's (2); uno rojo, uno verde y dos azules. El detector se encuentra rodeado lateralmente por una cubierta opaca (3), de tal manera que no recibe luz por emisión directa de los LED's, sino sólo por reflexión difusa de la muestra. Desde la parte superior externa del casco salen los cables (6) que van hacia el controlador central.



1. Casco soporte del sistema
2. LED's
3. Cubierta opaca para proteger el sensor
4. Convertidor de luz a frecuencia
5. Pastilla para realizar las conexiones
6. Cableado que conduce al controlador central

FIGURA 5.1. Arreglo óptico-sensor del instrumento prototipo

El diámetro de la base del casco (que va en contacto con la muestra) es de 4.5 ± 0.05 cm; su profundidad desde la base hasta la pastilla es de 2.2 ± 0.05 cm; y los LED's quedan separados una distancia de 1.0 ± 0.05 cm de la muestra al momento de realizar las mediciones.

Los LED's están conectados y controlados de tal manera que se encienda uno a la vez. Los dos LED's azules se encuentran conectados en paralelo y encienden al mismo tiempo. La razón para colocar dos fue porque sus intensidades eran muy bajas

comparadas con las del rojo y el verde, y se deseaba simular una fuente de iluminación equi-energética.

La Fig. 5.2 muestra una imagen del arreglo óptico sensor del instrumento (en ésta fotografía los LED's ya habían sido reemplazados); y en la Fig. 5.3 se puede apreciar el prototipo conectado a la computadora.



FIGURA 5.2. Fotografía del arreglo óptico sensor del instrumento prototipo.



FIGURA 5.3. Instrumento prototipo conectado a la computadora

Cuando el detector recibe la luz proveniente de la muestra, genera una frecuencia de salida que depende de la energía de la radiación, e inmediatamente es analizada por el sistema. En esta forma, el instrumento proporciona los porcentajes de luz de cada una de las componentes que es reflejada por la muestra, con respecto a la luz reflejada por una muestra de color blanco. Finalmente el color medido se compara contra una base de datos prealmacenada, y si no es identificado, el programa da la opción de incorporarlo a dicha base.

Para realizar las mediciones el casco se coloca sobre la muestra en la posición que se indica en la Fig. 5.4

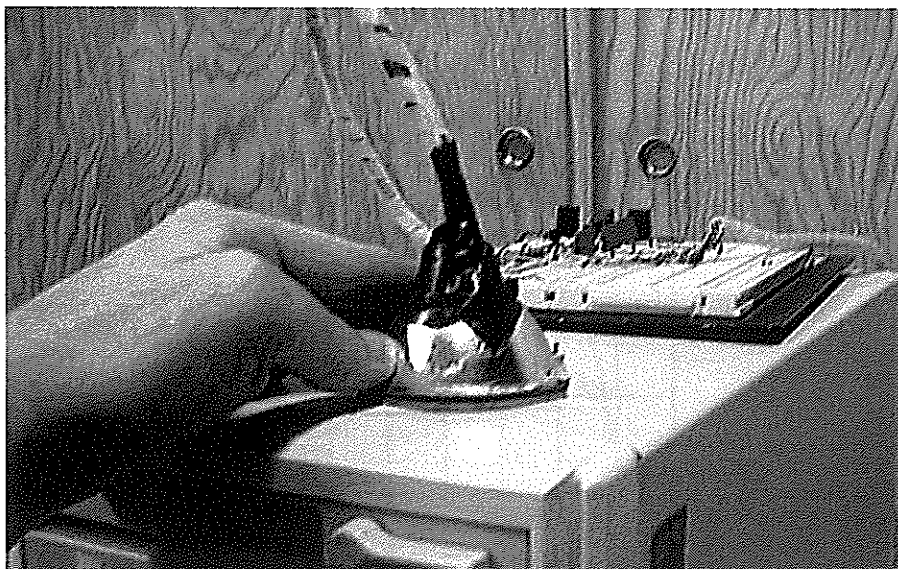


FIGURA 5.4. En la imagen se muestra la manera en que se realizan las mediciones con el instrumento prototipo.

Como se menciona en la referencia [9], el convertidor de luz a frecuencia que se utiliza es el TSL230 de Texas Instruments. Este dispositivo combina un arreglo de fotodiodos de silicón con un convertidor de corriente a frecuencia. La señal de salida puede ser un tren de pulsos, o bien, una onda cuadrada cuya frecuencia es directamente proporcional a la intensidad de la luz. La tolerancia es de $\pm 20\%$ en la frecuencia absoluta de salida [16], lo cual es extremadamente alto. Para disminuir el error en las mediciones derivado de esta situación, el programa de control del

instrumento prototipo realiza diez mediciones consecutivas y las promedia automáticamente para dar cada resultado.

En la Fig. 5.5 se muestra la curva de sensibilidad espectral del fotodiodo que utiliza el convertidor TSL230, reportada en el catálogo del fabricante. Como se puede ver, en la región comprendida entre los 380 y 730 nm la curva es aproximadamente lineal, de modo que se extrapolaron los datos y se les ajustó una recta mediante una regresión lineal, utilizando el paquete estadístico Origin. La ecuación obtenida es la siguiente

$$D_{\lambda} = 0.00198 \lambda - 0.40848. \quad (5.1)$$

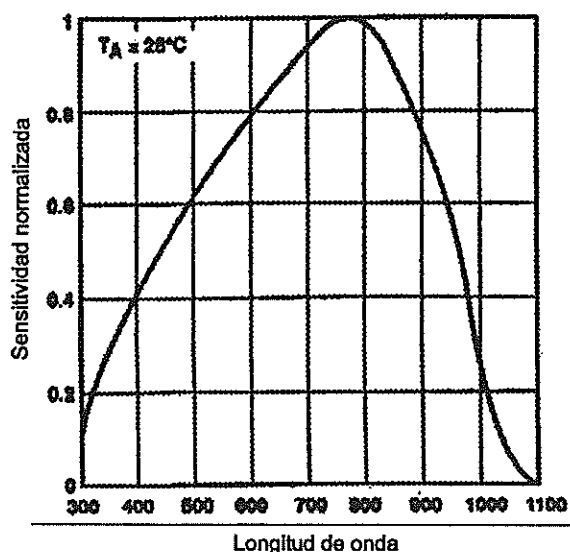


FIGURA 5.5. Curva de sensibilidad espectral para el fotodiodo del convertidor de luz a frecuencia TSL230 (tomada del catálogo "Intelligent Opto Sensor Data Book"[16], de la compañía Texas Instruments).

Con respecto a los LED's, sus características más importantes se resumen en la Tabla 5.1. La cuarta columna se refiere a la corriente con la cual operan dentro del instrumento, ésta se puede regular mediante una resistencia variable de precisión para cada LED. La corriente de operación de los LED's debe ser tal que la potencia radiante de cada uno de ellos sea la misma al realizar las mediciones.

TABLA 5.1. Características espectrales de los LED's originales

Color	Pico de la distribución espectral (nm)	Ancho de banda (nm)	Corriente de operación (mA)
Rojo	625 ± 2.5	40 ± 5	1.9 ± 0.05
Verde	560 ± 2.5	30 ± 5	6.2 ± 0.05
Azul	465 ± 2.5	65 ± 5	8.7 ± 0.05

En la Fig. 5.6 se muestra el producto de la distribución espectral de cada uno de estos LED's por la sensibilidad espectral del detector (evaluada con la ec. (5.1)), en comparación con las funciones $\bar{x} \Phi_\lambda$, $\bar{y} \Phi_\lambda$ y $\bar{z} \Phi_\lambda$ correspondientes al iluminante C y un campo visual de 2°.

Como se puede observar, las distribuciones de los LED's son diferentes con respecto a las del CIE, tanto en el ancho de banda como en la posición de los máximos. Con base en esto y en los planteamientos que se hicieron en la Sección 4.3, resulta evidente suponer que la discrepancia entre los valores CIEXYZ y las coordenadas X,Y,Z calculadas a partir de las lecturas R,G,B del instrumento prototipo es demasiado grande. Y por lo tanto, no es posible considerar a dicho instrumento como un colorímetro, aún cuando permite detectar diferencias de color.

De acuerdo a lo anterior, lo que se pretende en esta parte del trabajo es reemplazar los LED's originales del instrumento, por otros cuyas características se aproximen más a las de las funciones $\bar{x} \Phi_\lambda$, $\bar{y} \Phi_\lambda$ y $\bar{z} \Phi_\lambda$, al menos en lo referente a la posición de los máximos de la distribución espectral. Para encontrar los LED's que deberán reemplazar a los originales, se realizó un cuidadoso proceso de selección que se describe en la siguiente Subsección.

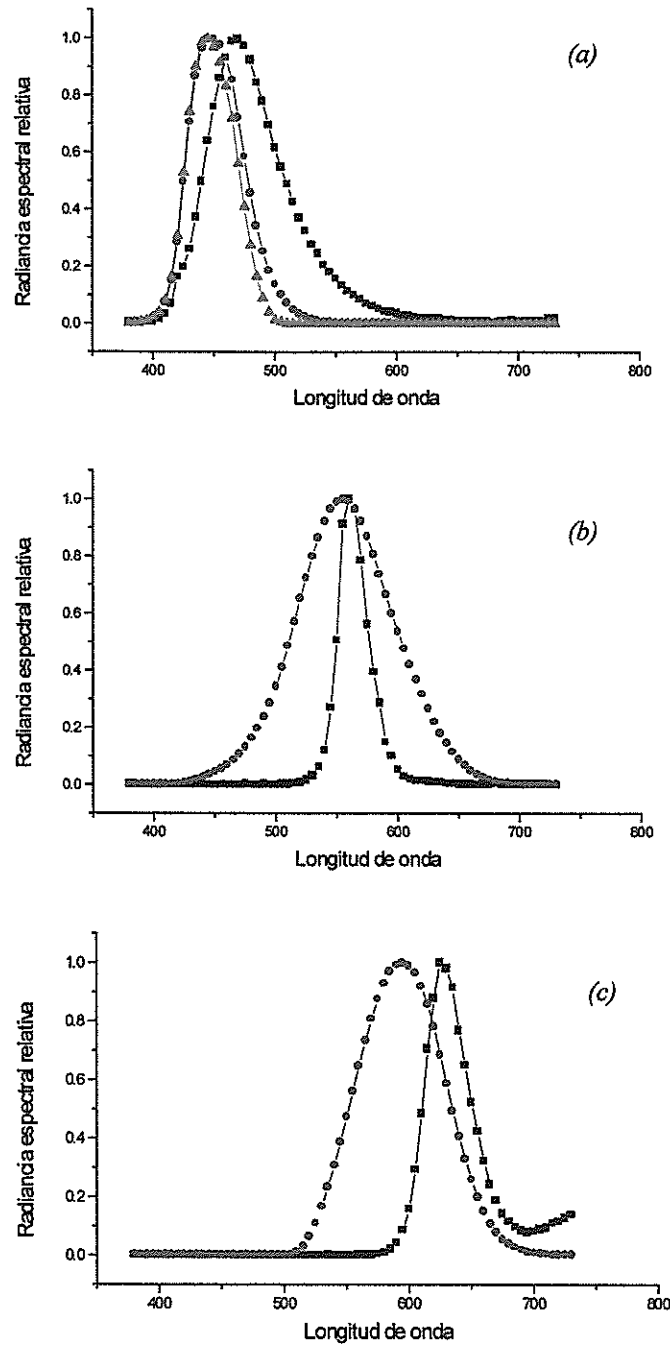


FIGURA 5.6. Comparación entre las curvas correspondientes a los LED's y las funciones para la mezcla aditiva de colores del CIE para el iluminante C. Las curvas en negro corresponden a la sensibilidad espectral del detector por la radiancia espectral relativa para: (a) el LED azul; (b) el LED verde; y (c) el LED rojo. Las curvas en rojo representan al producto de las funciones del CIE por el iluminante patrón C: (a) corresponde a la función $\bar{z} \Phi_\lambda$; (b) a la función $\bar{y} \Phi_\lambda$; y (c) a la función $\bar{x} \Phi_\lambda$. Adicionalmente, la curva en verde de la gráfica (a) corresponde al pico pequeño de la función $\bar{x} \Phi_\lambda$. Todas las curvas fueron normalizadas.

5.1.2. Caracterización de los LED's.

Con el objeto de buscar los LED's que habrían de colocarse en el instrumento prototipo para reemplazar a los originales, y así acercarse más a las condiciones que se plantean en esta tesis para un colorímetro, se analizaron treinta y tres LED's en total. Doce de ellos, con máximos entre 555 y 565 nm; dieciocho LED's en la región que abarca desde el amarillo y el ámbar (570 y 590nm) hasta el naranja (605 y 610nm) y por último, tres LED's azules (460nm). Además de los cuatro LED's originales, que fueron previamente analizados.

Es importante mencionar que los LED's azules aparecen en el mercado recientemente (menos de tres años), por lo cual, la gama de posibilidades (respecto al máximo de la distribución espectral) es muy reducida, y se ofrecen a un alto costo comparado con las otras longitudes de onda^{*}. Los máximos de emisión de estos LED's están entre 450 y 480nm. Así mismo, en cuanto a los LED's verdes, los que existen en la actualidad tiene máximos comprendidos en el intervalo de 545 a 570 nm, es decir, que aún no hay LED's disponibles con máximos mayores que 480nm y menores que 545nm. Por el momento, esto constituye una limitante para desarrollar en el presente un colorímetro de LED's que cuente con un sólo detector.

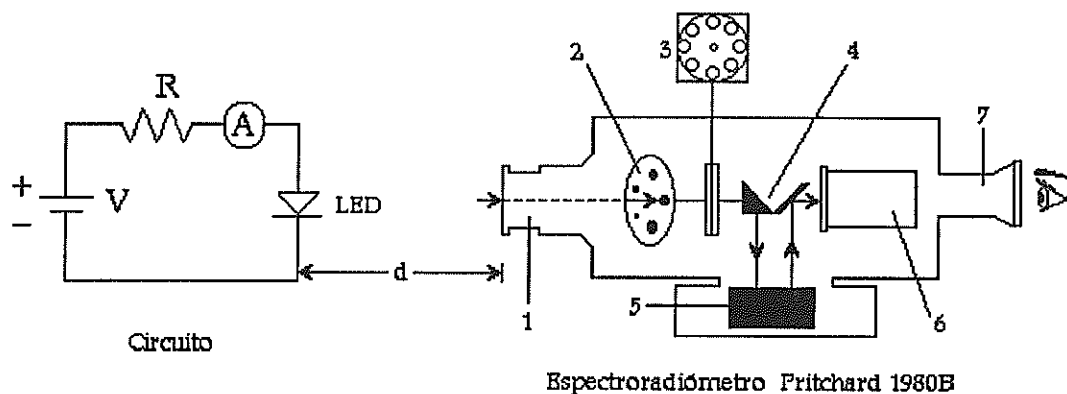
El proceso de selección comprendió básicamente dos etapas: (a) la de determinación de las características espectrales y (b) la del análisis de la potencia radiante como función de la corriente. Ambas se describirán a continuación.

a. Determinación de las características espectrales.

La primera etapa de selección consistió en determinar la curva de radiancia espectral de los LED's. Esto se hizo mediante el fotómetro-espectroradiómetro Pritchard modelo 1980B [18]. El arreglo utilizado se muestra esquemáticamente en la Fig. 5.7. Los LED's se conectaron en un circuito muy simple, con una fuente (V) de voltaje variable, una resistencia de seguridad (R) de 470Ω colocada en

^{*} Mientras el precio unitario de un LED común oscila entre \$ 0.1 U.S. y \$ 0.7 U.S., el precio de los LED's azules va desde \$ 6.5 U.S. hasta \$ 8.2 U.S [17].

serie, y un amperímetro (A) para registrar y controlar la corriente. La distancia, d , entre el LED y el lente objetivo del Pritchard fue de 67cm, ésta es la mínima distancia de enfoque.



1. Lente objetivo
2. Disco seleccionador del campo visual
3. Discos seleccionadores de filtros (2)
4. Sistema desviador de haz
5. Monocromador
6. Fototubo
7. Sistema de visión

FIGURA 5.7. Arreglo experimental para caracterizar los LED's

La luz que entra a través del lente objetivo (1) pasa por un orificio cuyo tamaño determina el campo de medición, y que puede ser seleccionado mediante un disco giratorio (2). La selección depende del tamaño angular con el que se observa la muestra a través del sistema de visión (7) del Pritchard a una distancia de medición determinada, y la selección correcta es aquella para la cual el tamaño del campo de medición es igual o menor que el tamaño observado de la muestra, de modo que se pueda garantizar que sólo se está analizando la muestra y no sus alrededores. El campo de medición que se utilizó para caracterizar los LED's fue de $20'$. Después de pasar por el orificio, el haz de luz continua su trayectoria pasando a través de una combinación de filtros, que se puede seleccionar

mediante un par de discos giratorios acoplados (3), pero con movimiento independiente. En este caso se seleccionó la opción designada como “open”, que significa que la luz no atravesará ningún filtro en esa zona. Posteriormente, el haz llega a un prisma que es parte del sistema desviador de haz (4), y que cambia su dirección un ángulo de 90° para enviarlo a un sistema monocromador (5). Los intervalos de análisis pueden escogerse de 1, 5 o 10nm, y el máximo barrido espectral que cubre el aparato va desde 370 a 730nm; la opción que se eligió fue de 5nm y se tomó el intervalo de barrido completo. El haz de luz cuasimonocromática que emerge del monocromador es enviado nuevamente al sistema desviador (4) y su dirección vuelve a cambiar 90° para llegar al tubo fotomultiplicador donde será medida su energía radiante. El sistema de visión (7) sólo cumple la tarea de permitir al usuario enfocar la muestra. El espectroradiómetro se puede operar manualmente, o bien, por medio de una PC, que fue como se hizo en esta ocasión.

En la Fig. 5.8 se muestra una fotografía del arreglo experimental.

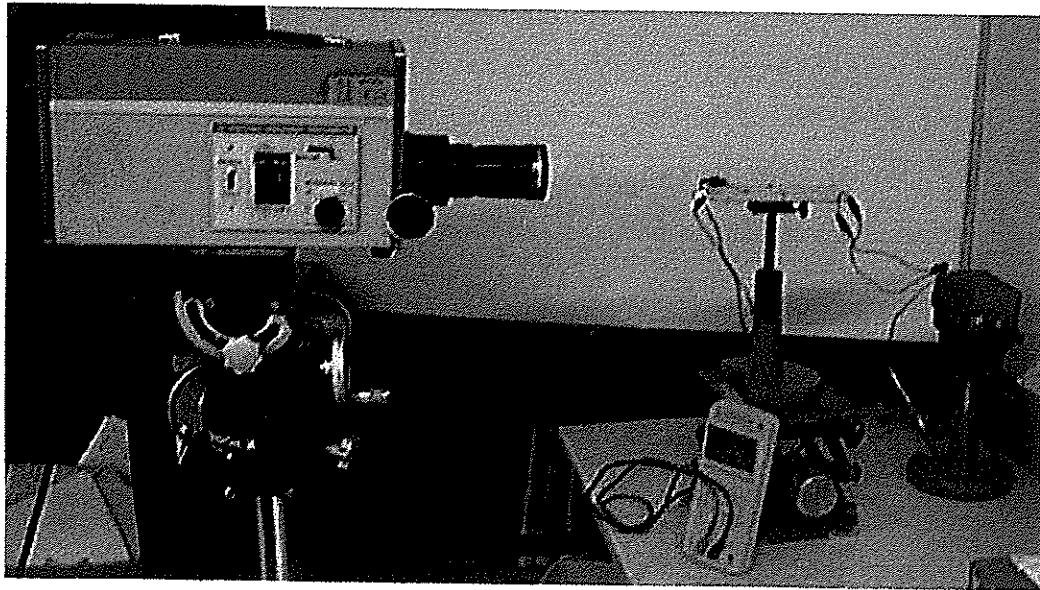


FIGURA 5.8. Arreglo experimental utilizado para la caracterización espectral de los LED's.

El Pritchard 1980B también puede usarse como fotómetro, con una combinación adecuada de filtros y mediante un mecanismo que retira el sistema desviador del haz, de modo que la luz viaja directamente al tubo fotomultiplicador sin pasar por el monocromador.

De los doce LED's verdes que se analizaron, se determinó que cinco de ellos tenían su máximo de emisión en 565nm; seis en 560nm y uno en 555nm. Por otra parte, de los dieciocho LED's entre 570 y 610nm, se encontró que uno de ellos tenía su máximo en 570nm; otro en 580 nm; ocho en 585nm; tres en 590nm; tres en 605nm y dos en 610nm. Finalmente, los tres LED's azules presentaron el máximo en 460nm*.

Para escoger los nuevos LED's primero se hizo una preselección, donde se eliminaron aquellos que no cumplían con la condición deseada, de que sus máximos coincidieran en lo posible con los de la Tabla 4.2 para el iluminante C y un campo de 2°. Luego se repitieron las mediciones tres veces más para cada uno de los preseleccionados. Finalmente, se volvieron a analizar los resultados, tomando en cuenta la magnitud del máximo valor de radiancia, y se seleccionaron cuatro LED's, para los cuales se repitieron las mediciones otras dos veces. En todas estas mediciones, la corriente de operación de los LED's fue de 20.0 ± 0.05 mA, excepto para los azules que fue de 8.0 ± 0.05 mA, debido a que su intensidad es muy alta.

Las principales características espectrales de los LED's seleccionados se resumen en la Tabla 5.2. Los datos que se exhiben ahí son el resultado de un promedio (la tabulación de la radiancia espectral de todos los LED's que se utilizan en el trabajo se encuentra en el Apéndice C). Como se puede ver comparando las Tablas 5.1 y 5.2, el LED verde tiene características espectrales muy semejantes a aquel que va a reemplazar, la razón para cambiarlo está

* Los LED's azules se encontraron en un catálogo comercial de la compañía Digi-Key [17]; son marca Panasonic modelo LNG995PF9 (P464-ND, en el catálogo de Digi-Key).

relacionada con la magnitud de su potencia radiante, así que se justificará más adelante (en el punto b de esta Subsección).

TABLA 5.2. Principales características espectrales de los LED's seleccionados.

Color	Máximo de la distribución espectral (nm)	Ancho de banda (nm)
Ámbar	590 ± 2.5	35 ± 5
Naranja	605 ± 2.5	40 ± 5
Verde	560 ± 2.5	25 ± 5
Azul	460 ± 2.5	75 ± 5

La razón para escoger un LED naranja y uno ámbar, es que la combinación de ellos resulta más próxima a la función $\bar{x} \Phi_\lambda$ (en la región de 505 a 750nm) que las distribuciones espectrales de cada uno de ellos por separado. Esto se puede corroborar gráficamente en la Fig. 5.9. Además, ya que el instrumento se diseñó de tal forma que dos de los cuatro LED's prendieran simultáneamente (en principio los dos azules), esa situación se aprovechó, en este caso, para combinar a los LED's ámbar y naranja.

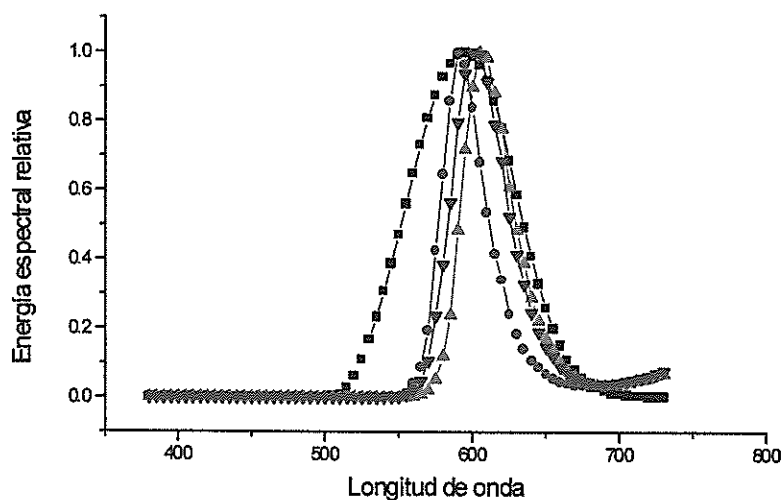


FIGURA 5.9. Comparación entre la función $\bar{x} \Phi_\lambda$ (curva en negro) y las distribuciones espectrales del LED ámbar (curva en rojo), del LED naranja (curva en verde) y de la suma de ambos (curva en azul). Todas las funciones se encuentran normalizadas.

Las distribuciones espectrales normalizadas de los LED's nuevos se muestran en la Fig. 5.10, comparadas con las de los anteriores y con las funciones del CIE.

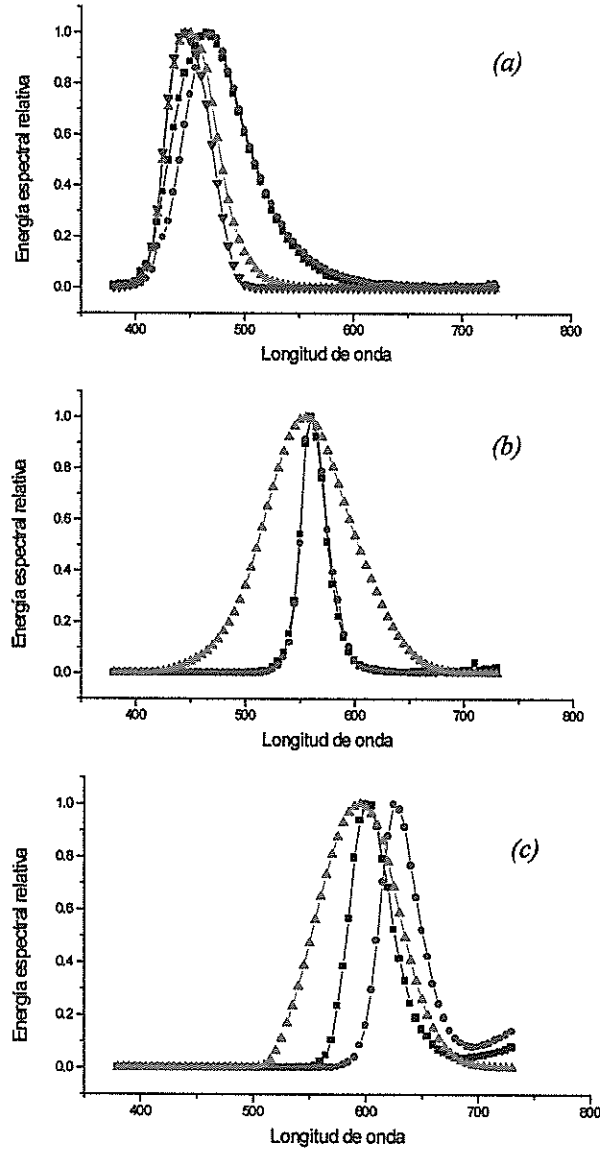


FIGURA 5.10. Comparación entre las funciones del CIE para el iluminante patrón C y campo visual de 2° y las curvas de respuesta del sistema con los LED's nuevos y con los LED's originales. Las curvas en negro corresponden al producto de la sensibilidad espectral del detector por la radiancia espectral para: (a) el nuevo LED azul; (b) el nuevo LED verde; y (c) la combinación de los LED's ámbar y naranja. Las curvas en rojo corresponden: (a) al LED azul original; (b) al LED verde original; y (c) al LED rojo original. Las curvas en verde representan a: (a) la función $\bar{z}\Phi_\lambda$; (b) la función $\bar{y}\Phi_\lambda$; y (c) la función $\bar{x}\Phi_\lambda$. Por último la curva en azul en la gráfica (a) corresponde al pico pequeño de la función $\bar{x}\Phi_\lambda$. Todas las curvas fueron normalizadas.

De acuerdo con la Fig. 5.10 (a), se puede esperar una mejoría en los valores para Z obtenidos al aplicar la correspondiente transformación de coordenadas (4.4) (Pag. 60) a los nuevos valores de B. La razón para suponer esto es que la distribución espectral del nuevo LED azul (curva en negro) se aproxima más a las funciones del CIE (curvas en azul y en verde) para las longitudes de onda más bajas, que la distribución del LED azul original (curva en rojo). En el valor Y no se espera mejoría, ya que como se muestra en la Fig. 5.10 (b), la distribución espectral del LED nuevo, como ya se señaló, es muy semejante a la del anterior. Finalmente, para el valor X se espera la mejoría más significativa, puesto que como se puede ver en la Fig. 5.10(c), la distribución espectral de la combinación de LED's ámbar y naranja (curva en negro), se aproxima mucho más a la función del CIE (curva en verde) que la distribución del LED rojo original (curva en rojo).

A continuación se describirá la segunda etapa en el proceso para seleccionar los LED's, la cual consistió en determinar la corriente con la que debían operar dentro del instrumento, de modo que la potencia radiante de emisión fuera la misma para todos.

Es necesario aclarar que después de hacer la preselección de los LED's con base en sus características espectrales, y una vez determinada la corriente a la que debía operar cada LED, se volvieron a obtener las distribuciones espectrales de los LED's seleccionados, para esa corriente en particular. El proceso de selección se hizo en esta forma debido que la distribución espectral de un LED, en general varía dependiendo de las condiciones a las que opera. Las gráficas de la Fig. 5.10 corresponden a las distribuciones espectrales de los LED's funcionando a sus respectivas corrientes de operación dentro del instrumento, aunque fueron normalizadas para poder establecer la comparación.

a. Curva de potencia radiante v.s. corriente.

Como ya se mencionó, el otro criterio importante que se siguió para escoger los LED's, además de sus características espectrales, fue su potencia radiante relativa. En el prototipo original se reguló la corriente en cada uno de los LED's

buscando que sus potencias fueran iguales. Con este mismo objetivo, se seleccionaron de entre los LED's que cumplían mejor con las características espectrales deseadas, a aquellos cuya potencia radiante fuera mayor, ya que la del nuevo LED azul es muy alta comparada con la de los demás. Esta es la razón por la cual se reemplazó al LED verde original, pues su potencia era demasiado baja en comparación con la del azul.

Para analizar la potencia radiante de los LED's se utilizó el mismo circuito que se muestra en la Figura 5.4, pero en este caso la potencia radiante se midió con un radiómetro marca New Port modelo 815. Las mediciones de potencia se fueron registrando a medida que la corriente se variaba a intervalos de 2.5 mA desde cero hasta 20mA. Se observó que la potencia varía linealmente con la corriente en todos los casos, de manera que se ajustaron rectas mediante una regresión lineal, utilizando el paquete estadístico Origin. Los valores obtenidos de la regresión para cada una de rectas se resumen en la Tabla 5.3, en todos los casos la potencia está dada en μW y la corriente en mA.

TABLA 5.3. Datos de la regresión lineal para las curvas de Corriente v.s. Potencia de los diferentes LED's

LED	Símbolo de Potencia	Pendiente ($\mu\text{W}/\text{mA}$)	Desviación estándar de la pendiente	Ordenada al Origen (μW)	Desviación estándar de la ordenada
Ámbar	P_A	0.00172	0.00003	- 0.00075	0.00034
Naranja	P_R	0.00245	0.00007	- 0.00304	0.00091
Verde	P_G	0.00225	0.00004	- 0.00282	0.00053
Azul	P_B	0.01584	0.00043	- 0.00043	0.00546

Las Figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14 muestran los datos originales y las rectas que se les ajustaron para los LED's ámbar, naranja, verde y azul, respectivamente.

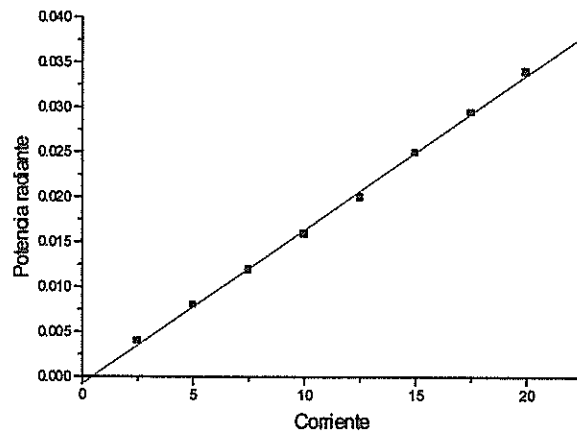


FIGURA 5.11. Recta de Corriente v.s. Potencia para el LED ámbar.

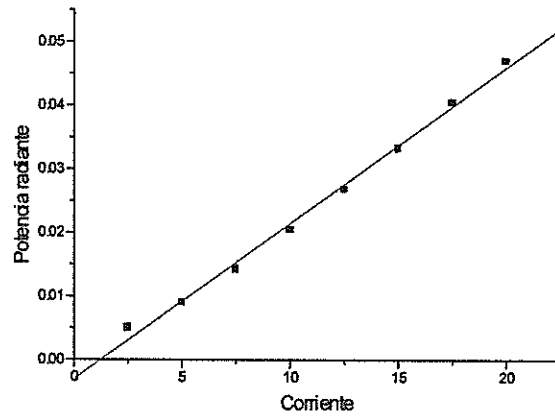


FIGURA 5.12. Recta de Corriente v.s. Potencia para el LED naranja.

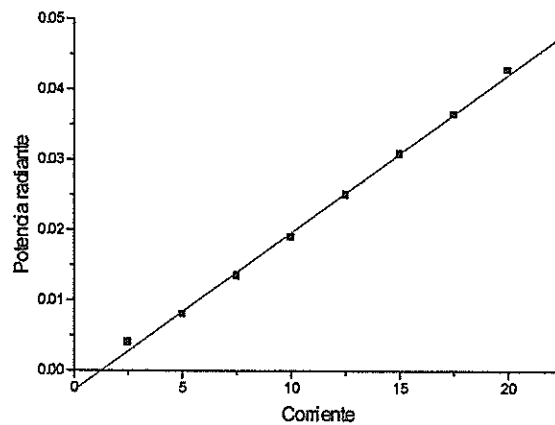


FIGURA 5.13. Recta de Corriente v.s. Potencia para el LED verde.

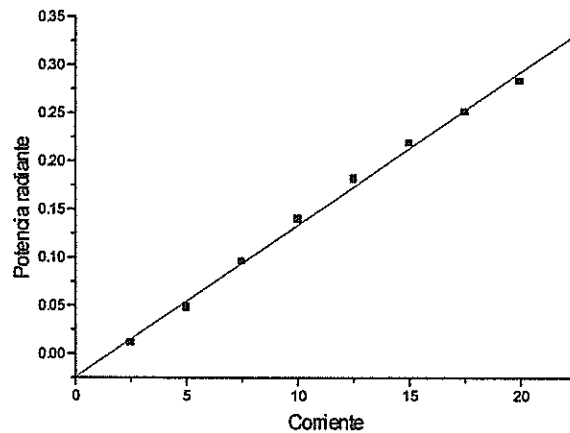


FIGURA 5.14. Recta de Corriente v.s. Potencia para el LED azul.

A partir de las ecuaciones anteriores se calculó la corriente de operación necesaria para cada uno de los LED's, de tal forma que cumplieran con la condición

$$P_A + P_R = P_G = P_B = P_o \quad (5.2)$$

donde P_o es el valor común de potencia que fue de $0.034 \mu W$, aunque en realidad su valor numérico resulta irrelevante siempre y cuando se satisfaga la condición (5.2) y las mediciones radiométricas se hayan realizado bajo las mismas condiciones para todos los LED's. Hay que recordar que los LED's ámbar y naranja prenden al mismo tiempo y es por ello que la suma de sus potencias radiantes debe ser igual al valor P_o . La corriente resultante para cada uno de los LED's fue la siguiente

LED's ámbar y naranja	$i = 9.1 \text{ mA};$
LED verde	$i = 16.4 \text{ mA};$
LED azul	$i = 3.7 \text{ mA}.$

Después de este análisis se procedió a reemplazar los LED's originales por los que se seleccionaron, y mediante las resistencias variables de precisión del instrumento prototipo se reguló la corriente de operación de cada uno de los LED's.

Las mediciones de las muestras de color se tomaron primero con el instrumento original y después se repitieron con los nuevos LED's. En la siguiente Subsección se describirán las muestras de color y el blanco de referencia que se usó para calibrar.

5.1.3. Descripción de la muestra que se utilizó como blanco estándar, de las muestras de color y de las mediciones.

Como se mencionó en el Capítulo 4, la calibración de todos los instrumentos es importante porque ofrece la oportunidad de verificar el instrumento con respecto a un estándar conocido, y de eso depende la confiabilidad de las mediciones posteriores [19]. Por lo tanto, es esencial que los valores CIEXYZ de la muestra de color blanco que se utilice como referencia para calibrar, sean conocidos. El óxido de magnesio (MgO), es el material que se ha utilizado por excelencia como blanco estándar para mediciones de reflectancia, y por lo tanto, sus valores triestímulo son conocidos para cualquier iluminante patrón del CIE y para campos visuales de 2° y 10°. En particular, los datos de referencia con los que se compararán los resultados, corresponden a un campo visual de 2° y el iluminante D65. Esto significa que la transformación de coordenadas que se utiliza entre los resultados del instrumento prototipo y los valores CIEXYZ está dada por

$$\begin{aligned} X &= (0.77003)R + (0.18015)B, \\ Y &= G, \\ Z &= (1.08845)B. \end{aligned} \tag{5.3}$$

Para obtener las ecs. (5.3) a partir de las ecs. (4.4) los valores de los coeficientes a , b y c se tomaron de la Tabla 4.1.

Como ya se explicó en el Capítulo 4, el procedimiento para calibrar un instrumento fotoeléctrico utilizando una muestra de MgO , consiste en tomar los valores de R , G y B como 100 (100% de reflectancia). Para encontrar los valores CIEXYZ correspondientes, se utiliza la transformación (5.3), de donde se obtiene que $X=95.018$; $Y= 100.000$; $Z=108.845$, es decir, los valores aceptados por el CIE para el MgO evaluados con el iluminante D65 y un campo visual de 2° [12].

Para realizar la calibración del instrumento prototipo, en el laboratorio de películas delgadas del INAOE se consiguió la cantidad suficiente de MgO requerida para hacer una muestra de color blanco que pudiera medirse. Debido a que el material se encuentra en la forma de un polvo muy fino (parecido al talco), se construyó un contenedor de vidrio como el que se ilustra esquemáticamente en la Fig. 5.15. Para ello se usó una base cuadrada de vidrio de 7.5 cm de lado, en la cual se pegaron cuatro tiras del mismo vidrio, A1, A2, A3 y A4, de tal manera que en el centro se forma un depósito cuadrado, y en cuyo interior se coloca el MgO . La profundidad del depósito queda definida por el espesor e del vidrio, que es de 1.2 mm. La longitud, L , de los lados del depósito, es tal que coincide el diámetro del casco del instrumento prototipo (4.5cm). En vista de que cada vez que se realiza el proceso de calibración es necesario colocar el casco soporte sobre el contenedor de MgO , se debe tener cuidado para que el polvo no se levante y eventualmente pueda dañar las componentes opto-electrónicas que se encuentran en el interior del casco.

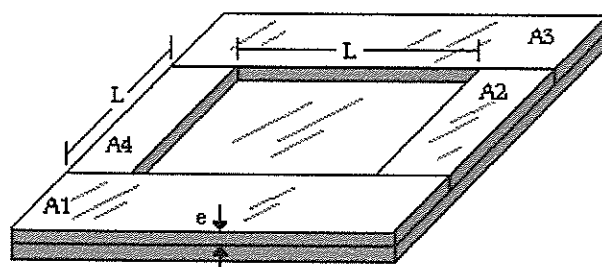


FIGURA 5.15. Contenedor para el MgO .

Se decidió hacer el contenedor de vidrio transparente para evitar posibles errores en las mediciones causados por la influencia de un material de color.

En la Fig. 5.16 se muestra una fotografía del contenedor de MgO junto al sensor del instrumento prototipo, para que se pueda apreciar la relación de tamaños.

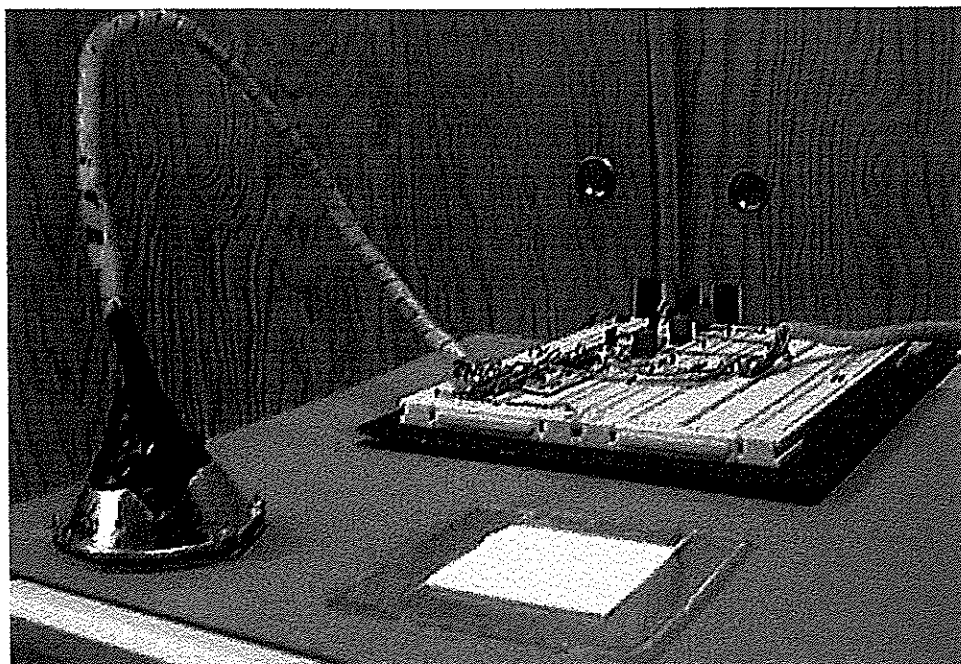


FIGURA 5.16. Contenedor del MgO utilizado como muestra de blanco estándar junto al instrumento prototipo.

Por otra parte, con respecto a las mediciones de color, las muestras utilizadas son de dos tipos. Uno de ellos es un conjunto de elementos del muestrario comercial de la marca de pinturas Meridien. Se escogieron seis elementos de tres tintes diferentes, es decir, dos muestras por cada tinte; una más brillante y menos saturada que la otra. Sin embargo, todas ellas en general, son de baja saturación y alto brillo. Así que para contrastar, el otro tipo de elementos que se analizó, son muestras de colores más saturados y menos brillantes, que se generaron mediante una impresión a color sobre un papel opalina blanco y utilizando una impresora Epson Stylus Color 600 a chorro de tinta.

Cada vez que se realizan las mediciones con el instrumento prototipo es necesario calibrarlo. La calibración en este caso debe hacerse en completa obscuridad, ya que como el contenedor de MgO es de vidrio, si recibe luz externa en el momento de la calibración, las reflexiones internas dentro de los vidrios afectan significativamente los resultados. Para realizar las mediciones de las muestras no es necesario que haya obscuridad. Cada muestra se midió diez veces, tanto para el caso en que el prototipo tenía los LED's originales, como para el caso en que éstos habían sido reemplazados por los nuevos LED's. Los datos que se presentan en las Tablas de resultados son un promedio de estas series de mediciones.

Los valores X,Y,Z que se tomaron como referencia fueron obtenidos con un espectrofotómetro Macbeth Color Eye-7000. Este dispositivo es propiedad del laboratorio de colorimetría del Centro de Investigaciones en Optica (C.I.O), unidad Aguascalientes. En total se caracterizaron doce muestras, utilizando el iluminante D65 para un campo visual de 2°.

5.2. Análisis de resultados

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados de las lecturas RGB tomadas con el instrumento prototipo original (que se denotarán como R_o , G_o y B_o) y los valores XYZ que resultan de aplicarles la transformación (5.3) (que se denotarán como X_o , Y_o y Z_o). En la primera columna se encuentra el código que identifica a cada una de las muestras de color; las siguientes tres columnas corresponden a los valores R_o , G_o y B_o respectivamente, y las últimas tres columnas a los valores X_o , Y_o y Z_o .

Los elementos cuyo código distintivo está conformado por cinco números y una literal, pertenecen al muestrario de Meridien. Aquellos para los que el último número del código es 1, indica que son más brillantes y menos saturados que los que tienen el número 2. Las demás muestras se denotan por el nombre de sus respectivos tintes.

TABLA 5.4. Valores RGB y XYZ obtenidos mediante el instrumento prototipo con los LED's originales.

Objeto	R _o	G _o	B _o	X _o	Y _o	Z _o
MgO	100	100	100	95.0	100	108.8
1-3001p	80 ± 1	73 ± 1	63 ± 1	73.0 ± 0.8	73 ± 1	68.6 ± 1.1
1-3002p	59 ± 1	47 ± 1	38 ± 1	52.3 ± 0.8	47 ± 1	41.4 ± 1.1
1-3901p	78 ± 1	79 ± 1	77 ± 1	73.9 ± 0.8	79 ± 1	83.8 ± 1.1
1-3902p	54 ± 1	56 ± 1	54 ± 1	51.3 ± 0.8	56 ± 1	58.8 ± 1.1
2-0401p	86 ± 1	87 ± 1	76 ± 1	79.9 ± 0.8	87 ± 1	82.7 ± 1.1
2-0402p	85 ± 1	80 ± 1	60 ± 1	76.3 ± 0.8	80 ± 1	65.3 ± 1.1
Magenta	71 ± 1	13 ± 1	15 ± 1	57.4 ± 0.8	13 ± 1	16.3 ± 1.1
Rojo	71 ± 1	15 ± 1	13 ± 1	57.0 ± 0.8	15 ± 1	14.2 ± 1.1
Verde	8 ± 1	18 ± 1	18 ± 1	9.4 ± 0.8	18 ± 1	19.6 ± 1.1
Amarillo	77 ± 1	72 ± 1	25 ± 1	63.8 ± 0.8	72 ± 1	27.2 ± 1.1
Cian	4 ± 1	10 ± 1	40 ± 1	10.3 ± 0.8	10 ± 1	43.5 ± 1.1
Azul	6 ± 1	8 ± 1	17 ± 1	7.7 ± 0.8	8 ± 1	18.5 ± 1.1

La Tabla 5.5 es completamente análoga a la Tabla 5.4, pero corresponde a los valores RGB obtenidos después de haber reemplazado los LED's del instrumento prototipo. Estos valores se denotarán como R_n, G_n y B_n y los correspondientes valores triestímulo como X_n, Y_n y Z_n.

TABLA 5.5. Valores RGB y XYZ obtenidos con los LED's nuevos.

Objeto	R _n	G _n	B _n	X _n	Y _n	Z _n
MgO	100	100	100	95.0	100	108.8
1-3001p	84 ± 1	74 ± 1	69 ± 1	77.1 ± 0.8	74 ± 1	75.1 ± 1.1
1-3002p	62 ± 1	48 ± 1	39 ± 1	54.8 ± 0.8	48 ± 1	42.5 ± 1.1
1-3901p	81 ± 1	80 ± 1	79 ± 1	76.6 ± 0.8	80 ± 1	86.0 ± 1.1
1-3902p	58 ± 1	58 ± 1	56 ± 1	54.8 ± 0.8	58 ± 1	61.0 ± 1.1
2-0401p	91 ± 1	90 ± 1	75 ± 1	83.6 ± 0.8	90 ± 1	81.6 ± 1.1
2-0402p	88 ± 1	85 ± 1	56 ± 1	77.9 ± 0.8	85 ± 1	61.0 ± 1.1
Magenta	55 ± 1	12 ± 1	17 ± 1	45.4 ± 0.8	12 ± 1	18.5 ± 1.1
Rojo	60 ± 1	15 ± 1	12 ± 1	48.4 ± 0.8	15 ± 1	13.1 ± 1.1
Verde	10 ± 1	18 ± 1	17 ± 1	10.8 ± 0.8	18 ± 1	18.5 ± 1.1
Amarillo	77 ± 1	70 ± 1	19 ± 1	62.7 ± 0.8	70 ± 1	20.7 ± 1.1
Cian	5 ± 1	10 ± 1	43 ± 1	11.6 ± 0.8	10 ± 1	46.8 ± 1.1
Azul	7 ± 1	7 ± 1	22 ± 1	9.4 ± 0.8	7 ± 1	23.9 ± 1.1

En la Tabla 5.6 se muestra la comparación entre los datos para el valor triestímulo X proporcionados por el C.I.O. (segunda columna); con el instrumento prototipo original (tercera columna) y con los nuevos LED's (cuarta columna). La quinta y sexta columnas corresponden, respectivamente, a las desviaciones de los valores X_o y X_n en relación con los valores X de referencia [19] (éstas se denotan por E_o y E_n).

Las Tablas 5.7 y 5.8 son análogas a la Tabla 5.6, pero corresponden a los valores Y y Z, respectivamente.

En todas estas Tablas, los valores XYZ obtenidos con el Color Eye-7000 se denotan simplemente como X, Y y Z.

TABLA 5.6. Análisis de error para los resultados del valor X tomando como referencia a las mediciones realizadas con el espectrofotómetro Color Eye-7000.

Objeto	X	X_o	X_n	$E_o = X - X_o / X$	$E_n = X - X_n / X$
1-3001p	72.169 ± 0.0005	73.0 ± 0.8	77.1 ± 0.8	0.01	0.07
1-3002p	52.404 ± 0.0005	52.3 ± 0.8	54.8 ± 0.8	0.00	0.05
1-3901p	76.334 ± 0.0005	73.9 ± 0.8	76.6 ± 0.8	0.03	0.00
1-3902p	57.548 ± 0.0005	51.3 ± 0.8	54.8 ± 0.8	0.11	0.05
2-0401p	81.718 ± 0.0005	79.9 ± 0.8	83.6 ± 0.8	0.02	0.02
2-0402p	76.175 ± 0.0005	76.3 ± 0.8	77.9 ± 0.8	0.00	0.02
Magenta	35.304 ± 0.0005	57.4 ± 0.8	45.4 ± 0.8	0.63	0.29
Rojo	35.249 ± 0.0005	57.0 ± 0.8	48.4 ± 0.8	0.62	0.37
Verde	15.149 ± 0.0005	9.4 ± 0.8	10.8 ± 0.8	0.38	0.29
Amarillo	60.174 ± 0.0005	63.8 ± 0.8	62.7 ± 0.8	0.06	0.04
Cian	16.867 ± 0.0005	10.3 ± 0.8	11.6 ± 0.8	0.39	0.31
Azul	13.482 ± 0.0005	7.7 ± 0.8	9.4 ± 0.8	0.43	0.31

TABLA 5.7. Análisis de error para los resultados del valor Y tomando como referencia a las mediciones realizadas con el espectrofotómetro Color Eye-7000.

Objeto	Y	Y _o	Y _n	E _o = Y-Y _o /Y	E _n = Y-Y _n /Y
1-3001p	73.172 ± 0.0005	73 ± 1	74 ± 1	0.00	0.01
1-3002p	50.369 ± 0.0005	47 ± 1	48 ± 1	0.07	0.05
1-3901p	80.455 ± 0.0005	79 ± 1	80 ± 1	0.02	0.01
1-3902p	60.673 ± 0.0005	56 ± 1	58 ± 1	0.08	0.04
2-0401p	87.671 ± 0.0005	87 ± 1	90 ± 1	0.01	0.03
2-0402p	81.842 ± 0.0005	80 ± 1	85 ± 1	0.02	0.04
Magenta	20.668 ± 0.0005	13 ± 1	12 ± 1	0.37	0.42
Rojo	23.080 ± 0.0005	15 ± 1	15 ± 1	0.35	0.35
Verde	24.631 ± 0.0005	18 ± 1	18 ± 1	0.27	0.27
Amarillo	62.890 ± 0.0005	72 ± 1	70 ± 1	0.15	0.11
Cian	21.687 ± 0.0005	10 ± 1	10 ± 1	0.54	0.54
Azul	11.782 ± 0.0005	8 ± 1	7 ± 1	0.32	0.41

TABLA 5.8. Análisis de error para los resultados del valor Z tomando como referencia a las mediciones realizadas con el espectrofotómetro Color Eye-7000.

Objeto	Z	Z _o	Z _n	E _o = Z-Z _o /Z	E _n = Z-Z _n /Z
1-3001p	68.775 ± 0.0005	68.6 ± 1.1	75.1 ± 1.1	0.00	0.09
1-3002p	43.440 ± 0.0005	41.4 ± 1.1	42.5 ± 1.1	0.05	0.02
1-3901p	83.145 ± 0.0005	83.8 ± 1.1	86.0 ± 1.1	0.01	0.03
1-3902p	63.042 ± 0.0005	58.8 ± 1.1	61.0 ± 1.1	0.07	0.03
2-0401p	77.101 ± 0.0005	82.7 ± 1.1	81.6 ± 1.1	0.07	0.06
2-0402p	56.977 ± 0.0005	65.3 ± 1.1	61.0 ± 1.1	0.15	0.07
Magenta	27.201 ± 0.0005	16.3 ± 1.1	18.5 ± 1.1	0.40	0.32
Rojo	14.406 ± 0.0005	14.2 ± 1.1	13.1 ± 1.1	0.02	0.09
Verde	15.055 ± 0.0005	19.6 ± 1.1	18.5 ± 1.1	0.30	0.23
Amarillo	11.567 ± 0.0005	27.2 ± 1.1	20.7 ± 1.1	1.35	0.79
Cian	55.327 ± 0.0005	43.5 ± 1.1	46.8 ± 1.1	0.21	0.67
Azul	34.414 ± 0.0005	18.5 ± 1.1	23.9 ± 1.1	0.46	0.40

Las observaciones que se pueden hacer de las Tablas de resultados, permiten concluir lo siguiente:

- i) De la Tabla 5.6 se puede ver que aunque en algunos casos (1-3001p; 1-3002p; 2-040p) el error aumenta un poco con los LED's nuevos, en general existe una mejoría de los resultados para X después de cambiar los LED's, tal como se esperaba. En el caso más extremo, que es el del color magenta, el error se reduce hasta un 34%.
- ii) Para el caso de la función Y, tal y como se observa en la Tabla 5.7, los resultados son muy parecidos antes y después de cambiar los LED's, como ya se había previsto. Incluso, en algunos casos el error E_n es mayor que el error E_o , esto puede deberse a que el ancho de banda del LED nuevo es ligeramente menor que el del original.
- iii) El valor Y de referencia es, en general, mayor que el proporcionado por el instrumento prototipo para los colores rojos y azules. Esto puede explicarse notando que el ancho de banda de la función $y \Phi_\lambda$ es mucho mayor que el de los LED's (ver Fig.5.10 b). Por lo tanto, la función Y del CIE abarca una región más amplia del espectro, y resulta razonable suponer que la proporción de luz reflejada en las regiones correspondientes a los rojos y a los azules es mayor si se evalúa con dicha función, que si se evalúa con los LED's.
- iv) Para Z, también se observa en la Tabla 5.8 que los resultados mejoraron en general al cambiar los LED's. Aunque el error es excesivamente grande para el color amarillo. La razón que puede explicar este hecho es que el ancho de banda de los LED's azules es mayor que el de la función $\bar{z} \Phi_\lambda$, y su máximo está a la derecha del máximo de $\bar{z} \Phi_\lambda$, por lo que los LED's abarcan más la región del verde y menos la del azul que la función del CIE.
- v) Por último, un hecho que es muy importante destacar es que mientras más saturado y menos brillante es un color, el error aumenta, lo cual se puede verificar para las muestras que fueron impresas en comparación con las muestras de Meridien. Esto se debe por una parte, a que el color con que se

calibra cualquier instrumento es el blanco, y por definición, para éste coinciden los valores X,Y,Z de todos los instrumentos. Consecuentemente, el error será mayor en la medida en que una muestra difiera más respecto al blanco estándar.

Por otra parte, mientras más brillante y menos saturado es un color, su curva de reflectancia espectral es más suave y uniforme, es decir, que sus extremos relativos son menos pronunciados. Y mientras más uniforme sea la reflectancia, es menos relevante la posición de los máximos de las funciones que se utilicen para evaluar la proporción de luz que reflejan con respecto a la que refleja el MgO (sean éstas las curvas del CIE, o las de los LED's). Lo anterior se puede verificar en la Fig. 5.16, donde se ilustra la curva de reflectancia para tres muestras diferentes. La curva en verde es la reflectancia de la muestra más brillante (3-1901p), la curva en rojo corresponde a una muestra menos brillante (3-1902p) y la curva en negro representa al color más saturado (3-0604d). Las curvas de reflectancia se obtuvieron con el espectrofotómetro Lambda 3 marca Perkin Elmer, del laboratorio de espectrofotometría del I.N.A.O.E.

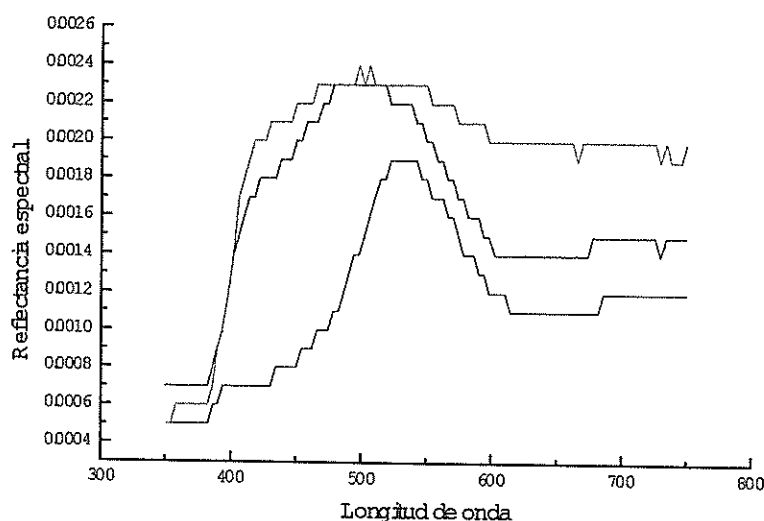


FIGURA 5.16. Comparación de las reflectancias espectrales para tres objetos con diferente grado de saturación y brillo.

En la siguiente Sección se realizan dos nuevas propuestas para elaborar un instrumento de LED's que se aproxime más a las características que debe satisfacer un colorímetro.

5.3. Nuevas propuestas

Como se pudo verificar en la Sección anterior, existe una mejoría en los valores XYZ calculados a partir de los valores RGB del instrumento después de reemplazar los LED's, pero el error en los resultados sigue siendo demasiado alto. Para remediar esta situación, en primer lugar se deben corregir las limitaciones del instrumento original, por ejemplo, sustituir el detector por uno con menor tolerancia y analizar cuidadosamente la geometría de iluminación. Sin embargo, debido a que el único cambio que se realizó en el instrumento durante este trabajo fue el reemplazo de los LED's, es razonable atribuir la disminución del error en los resultados a dicho cambio, y esto apoya la hipótesis que se realizó en el Capítulo 4. Pero aún existe una gran diferencia en el ancho de banda entre las distribuciones de los LED's y las funciones del CIE.

La finalidad de esta Sección es plantear de manera teórica dos nuevas propuestas independientes, para construir un instrumento de LED's que satisfaga las condiciones necesarias para considerarse colorímetro.

La primera propuesta está basada en la misma idea que se ha manejado en la tesis desde la Sección 4.3, es decir, la de utilizar un solo detector cuya respuesta sea lineal en la región visible del espectro y aproximar las funciones del CIE, pero en este caso con más de cuatro LED's. Como un ejemplo para ilustrar esta propuesta, a continuación se explora el caso teórico de una combinación de once LED's.

El objetivo es buscar una combinación lineal de LED's, de tal manera que la distribución espectral de dicha combinación sea lo más próxima posible a la de las funciones del CIE no sólo en los máximos de emitancia, sino también en el ancho de

banda. Para ello, considérese un conjunto de diez LED's, designados por L1, L2,..., L9 y L10, cuyos máximos y anchos de banda se muestran en la Tabla 5.9. Estos LED's son reales y fueron caracterizados espectralmente (Apéndice C). De hecho, L1 y L9 son los LED's rojo y verde que se encontraban originalmente en el instrumento prototipo, y los LED's L3 y L4 son los que se usaron para reemplazar al rojo.

TABLA 5.9. Características de los LED's involucrados en la nueva propuesta.

LED	Color	Máximo espectral (nm)	Ancho de banda (nm)
L1	Rojo	625	40
L2	Naranja	610	40
L3	Naranja	605	40
L4	Ambar	590	35
L5	Ambar	585	35
L6	Amarillo	580	35
L7	Amarillo	570	35
L8	Verde	565	30
L9	Verde	560	30
L10	Verde	555	25

Mediante una computadora se probaron diferentes combinaciones lineales de las distribuciones espectrales de los LED's L1 a L10 para reproducir con la mayor fidelidad posible las curvas X y Y del CIE.

Los resultados son los siguientes, para aproximar la curva X se encontró una combinación dada por

$$R = 0.133 (L1) + 0.044 (L2) + 0.178 (L3) + 0.148 (L4) + 0.089 (L5) + 0.118 (L6) + 0.089 (L7) + 0.059 (L8) + 0.133 (L9) + 0.009 (L10) \quad (5.8)$$

donde R sería la lectura correspondiente a la componente roja en un instrumento de este tipo. En la Fig. 5.17 se muestra la distribución espectral obtenida con la ecuación (5.8) (curva en rojo), en comparación con la función $\bar{x} \Phi_\lambda$ para el iluminante C y campo visual de 2° (curva en negro), ambas curvas están normalizadas. Los coeficientes indican los factores de peso con que se debe sumar la reflectancia de cada LED. En este caso la calibración debería hacerse tomando la lectura de cada uno

de los LED's para el MgO igual a 100, suponiendo que prendieran de manera independiente y con la misma intensidad.

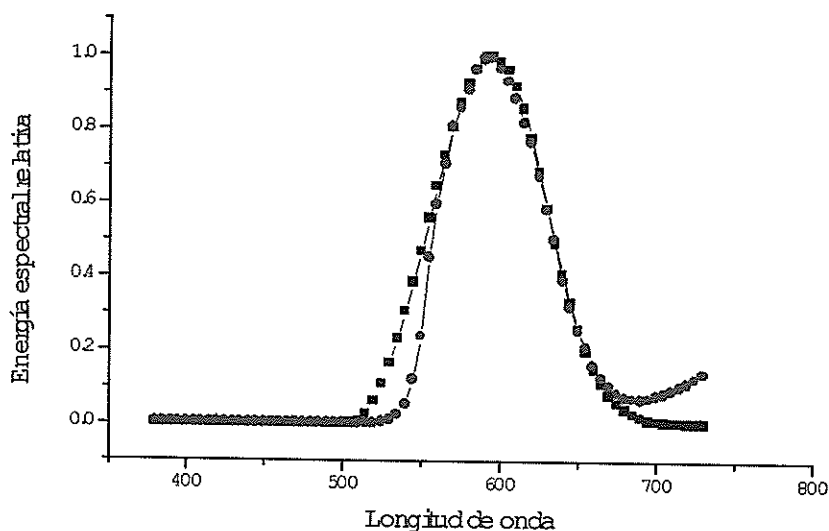


FIGURA 5.17. Comparación entre la nueva combinación de LED's propuesta para el valor de R y la función $\bar{x} \Phi_\lambda$ para el iluminante C y un campo de 2° .

Para aproximar la función Y , la combinación lineal que se determinó es

$$G = 0.035 (L1) + 0.035 (L2) + 0.070 (L3) + 0.070 (L4) + 0.080 (L5) + 0.080 (L6) + 0.105 (L7) + 0.140 (L8) + 0.175 (L9) + 0.210 (L10) \quad (5.9)$$

donde G representa lo que sería la lectura correspondiente a la componente verde del nuevo instrumento. De la distribución espectral resultante para la ecuación (5.9) se obtiene la curva en rojo de la Fig. 5.18, comparada con la curva en negro que representa la función $\bar{y} \Phi_\lambda$. Como se puede ver, en el intervalo de 480 a 555 nm aún no hay posibilidades de aproximarse a la curva $\bar{y} \Phi_\lambda$, puesto que aún no existen LED's comerciales en esa región.

Vale la pena notar que la única diferencia entre las ecuaciones (5.8) y (5.9) son los coeficientes, pero se utilizan los mismos LED's. Aunque de existir otros tipos de LED's verdes, éstos se deberán incorporar a la ecuación (5.9).

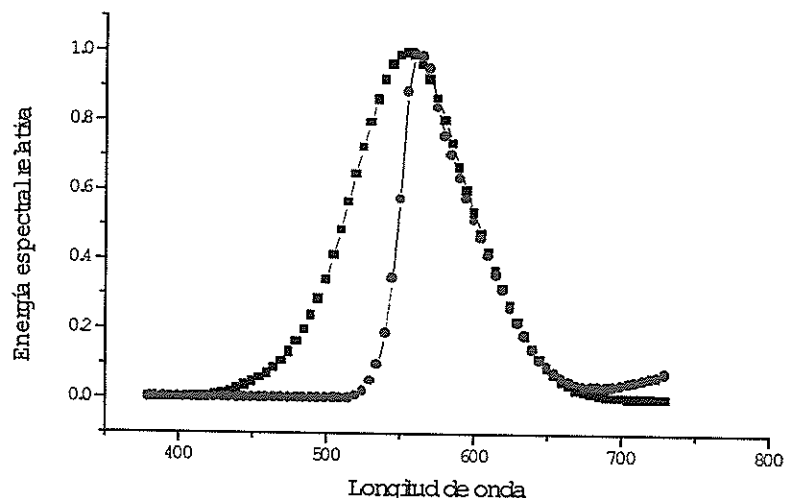


FIGURA 5.18. Comparación entre la nueva combinación de LED's propuesta para G y la función $\bar{y} \Phi_\lambda$ para el iluminante C.

Respecto a la componente azul, la propuesta que se puede hacer para obtener mejores resultados del valor triestímulo Z, es utilizar un LED azul cuyo máximo de emisión esté realmente en 450nm. Como ya se mencionó, estos LED's en principio ya se encuentran disponibles comercialmente.

Lo anterior es sólo un ejemplo para ilustrar la idea de usar más de cuatro LED's. Sin embargo, implementar un instrumento con varios LED's puede resultar muy complicado en la práctica, en este caso se sacrificaría el tamaño compacto del instrumento para lograr mayor exactitud. Por consiguiente, habría que buscar una combinación con el menor número posible de LED's pero que cumpliera la condición deseada. Las combinaciones óptimas se podrían determinar con algún algoritmo de computo.

La otra posibilidad que se plantea en este trabajo para construir un instrumento fotoeléctrico de LED's que se pueda considerar colorímetro, es más sencilla de implementar en la práctica. Esta consiste en buscar que el sistema de

detección tenga una curva de sensibilidad espectral igual a la del observador estándar del CIE (Fig. 2.4, pag. 17), lo cual se puede lograr colocando un filtro adecuado al detector fotoeléctrico.

Si bien, una de las ventajas que se planteó en la introducción de los colorímetros de LED's sobre los colorímetros fotoeléctricos tradicionales, era precisamente evitar el uso de filtros para disminuir los costos, en este caso se está proponiendo sustituir un sistema de tres o cuatro filtros por uno sólo. Además, se evita el problema de conseguir una fuente de luz blanca adecuada. Esto también se traduce en una disminución de los costos.

Con esta segunda opción no hay restricciones respecto a los LED's, se puede utilizar cualquier terna de LED's de los colores primarios. Y las transformaciones de coordenadas cromáticas para un instrumento de este tipo serían las mismas que se aplican para colorímetros visuales, simplemente conociendo los valores triestímulo de los LED's y de la muestra blanca de referencia, tal como se señaló en la Sección 4.1.

Finalmente se puede añadir el hecho de que si no existe un filtro adecuado se puede mandar a construir.

La posibilidad de poner en práctica alguna de las propuestas que se mencionan en esta Sección queda como un problema abierto.

CONCLUSIONES

Como se mencionó al inicio de esta tesis, el estudio del color y su medición es un tema de gran interés en la actualidad debido a la vasta cantidad de aplicaciones que encuentra en la industria moderna. Los métodos para medir color han ido evolucionando, y hoy en día es posible investigar nuevas técnicas que permitan incorporar la tecnología reciente, y que al mismo tiempo resulten más económicas que las tradicionales. El objetivo general de esta tesis fue precisamente el de explorar y discutir una de estas nuevas técnicas: los colorímetros de LED's. En particular, se propuso determinar las características técnicas que debían tener este tipo de instrumentos para poder considerarse colorímetros. Y por otra parte, se buscó establecer una transformación de coordenadas que relacionara las lecturas proporcionadas por un colorímetro de LED's y los valores X, Y, Z, establecidos por el CIE.

Para cumplir tales objetivos, en la primera parte del trabajo se dió como antecedente, un panorama general de los aspectos y conceptos más sobresalientes de teoría del color y colorimetría. Posteriormente se presentaron las transformaciones ya establecidas entre las lecturas RGB de los diferentes tipos de colorímetros existentes y el sistema CIEXYZ.

Con base en esto, se analizaron las analogías físicas que hay entre los colorímetros fotoeléctricos de filtros y los de LED's. De dicho análisis se infirió que en principio sí es posible realizar un colorímetro reemplazando el sistema de luz blanca y filtros, por diodos emisores de luz, siempre y cuando se satisfaga la condición de que el producto de la distribución espectral de los LED's por la sensibilidad del (o los) detector(es) sea igual a una combinación lineal del producto de las funciones del CIE para la mezcla aditiva de colores, por algún iluminante patrón. La anterior es una propuesta general, pero también se realizó una propuesta más concreta para satisfacer tal condición. De acuerdo a esta última, se discutieron las características ideales que deberían tener los elementos de un instrumento de LED's para que sea capaz de medir color.

Finalmente, se dedujo que es posible aplicar una de las transformaciones de coordenadas cromáticas para colorímetros fotoeléctricos de filtros, a aquellos colorímetros de LED's que satisfagan la condición antes mencionada.

Para probar las hipótesis realizadas en la tesis, se llevó a cabo un trabajo experimental con un instrumento prototipo, cuyas características originales diferían mucho de las que se proponen en este trabajo. Por lo tanto, se reemplazaron los elementos originales, en este caso los LED's, por otros que fueran más parecidos a los ideales.

Los resultados del trabajo experimental apoyan las hipótesis propuestas. Aunque no se pueden considerar concluyentes, ya que el instrumento que se utilizó sólo cuenta con cuatro LED's, y este número de elementos es insuficiente para probar de manera decisiva las suposiciones realizadas.

En este sentido, se dejan abiertas dos nuevas propuestas independientes para continuar esta investigación.

REFERENCIAS

1. Dr. Lange Application Report No. 8.0e.
2. F.W. Billmeyer, Jr y M. Saltzman. Principles of Color Technology 2nd Edition. Interscience Publishers, John Wiley & sons, Nueva York. 1981.
3. N. Zuech. Applying Macchine Vision. John Wiley & Sons. U.S.A.1988.
4. F.W. Sears. Optics. Addison-Wesley Press, Inc. U.S.A, 1942.
5. F. Grum and C.J. Bartleson. Optical Radiation Mesurements. Vol 2: Color Mesurements. Academic Press, Inc. USA, 1980.
6. T.Y. Crowell. The Science of Color. Optical Society of America; Committee on Colorimetry. 1973.
7. ELyPTICA. Instrumentación electro-óptica, 1997. La Joya 214. Fracc. Playa Ensenada, Ensenada, B.C. Tel (617) 61 338.
8. Macbeth. Division of Kolimorgen Instruments Corporation. USA, 1997. www.macbethdiv.com
9. V. Alarcón, F. Echeagaray, E. Tepichín. Sistema Manual para Mediciones de Color. Memorias de Congreso de Instrumentación SOMI XII, Septiembre-Octubre, S.L.P., México, 1997.
10. R.W. Boyd. Radiometry and the detection of optical radiation. John Wiley & Sons. U.S.A.1983.

11. R.D. Lozano. El color y su medición. Ed. Américalée, Argentina, 1978.
12. W.D. Wright. The measurement of Colour. Adam Hilger LTD. London. 1969
13. M.D. Burkenbine. Feasibility Study of Colorimeters. 1981.
www.niu.edu/acad/english/wac/techdefl.html.
14. B. Rubio Martínez. Introducción a la Ingeniería de la Fibra Optica. Adison-Wesley Iberoamericana. USA, 1994.
15. J.W.T. Walsh. Photometry. Constable & Company LTD. London, 1953.
16. Intelligent Opto Sensor Data Book. Texas Instruments Incorporated 1995.
17. Compañía Digi-Key, U.S.A., 1998. www.digikey.com.
18. Instruction Manual for the Pritchard Model 1980B Spectroradiometer. Photo Research, U.S.A., 1980.
19. J.P. Holman. Métodos experimentales para ingenieros. McGraw-Hill. México 1981.

APENDICE A. Valores triestímulo espectrales CIE 1931

En la Tabla A1 se presenta la tabulación de los de los valores triestímulo espectrales, $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$, para un campo visual de 2° [12].

TABLA A1. Funciones $\bar{x}$, $\bar{y}$ y $\bar{z}$, para un campo visual de 2°.

λ	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	λ	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
380	0.0014	0.0000	0.0065	580	0.9163	0.8700	0.0017
385	0.0022	0.0001	0.0105	585	0.9786	0.8163	0.0014
390	0.0042	0.0001	0.0201	590	1.0263	0.7570	0.0011
395	0.0076	0.0002	0.0362	595	1.0567	0.6949	0.0010
400	0.0143	0.0004	0.0679	600	1.0622	0.6310	0.0008
405	0.0232	0.0006	0.1102	605	1.0456	0.5668	0.0006
410	0.0435	0.0012	0.2074	610	1.0026	0.5030	0.0003
415	0.0776	0.0022	0.3713	615	0.9384	0.4412	0.0002
420	0.1344	0.0040	0.6456	620	0.8544	0.3810	0.0002
425	0.2148	0.0073	1.0391	625	0.7514	0.3210	0.0001
430	0.2839	0.0116	1.3856	630	0.6424	0.2650	0.0000
435	0.3285	0.0168	1.6230	635	0.5419	0.2170	0.0000
440	0.3483	0.0230	1.7471	640	0.4479	0.1750	0.0000
445	0.3481	0.0298	1.7826	645	0.3608	0.1382	0.0000
450	0.3362	0.0380	1.7721	650	0.2835	0.1070	0.0000
455	0.3187	0.0480	1.7441	655	0.2187	0.0816	0.0000
460	0.2908	0.0600	1.6692	660	0.1649	0.0610	0.0000
465	0.2511	0.0739	1.5281	665	0.1212	0.0446	0.0000
470	0.1954	0.0910	1.2876	670	0.0874	0.0320	0.0000
475	0.1421	0.1126	1.0419	675	0.0636	0.0232	0.0000
480	0.0956	0.1390	0.8130	680	0.0468	0.0170	0.0000
485	0.0580	0.1693	0.6162	685	0.0329	0.0119	0.0000
490	0.0320	0.2080	0.4652	690	0.0227	0.0082	0.0000
495	0.0147	0.2586	0.3533	695	0.0158	0.0057	0.0000
500	0.0049	0.3230	0.2720	700	0.0114	0.0041	0.0000
505	0.0024	0.4073	0.2123	705	0.0081	0.0029	0.0000
510	0.0093	0.5030	0.1582	710	0.0058	0.0021	0.0000
515	0.0291	0.6082	0.1117	715	0.0041	0.0015	0.0000
520	0.0633	0.7100	0.0782	720	0.0029	0.0010	0.0000
525	0.1096	0.7932	0.0573	725	0.0020	0.0007	0.0000
530	0.1655	0.8620	0.0422	730	0.0014	0.0005	0.0000
535	0.2257	0.9149	0.0298	735	0.0010	0.0004	0.0000
540	0.2904	0.9540	0.0203	740	0.0007	0.0003	0.0000
545	0.3597	0.9803	0.0134	745	0.0005	0.0002	0.0000
550	0.4334	0.9950	0.0087	750	0.0003	0.0001	0.0000
555	0.5121	1.0002	0.0057	755	0.0002	0.0001	0.0000
560	0.5945	0.9950	0.0039	760	0.0002	0.0001	0.0000
565	0.6784	0.9786	0.0027	765	0.0001	0.0000	0.0000
570	0.7621	0.9520	0.0021	770	0.0001	0.0000	0.0000
575	0.8425	0.9154	0.0018	775	0.0000	0.0000	0.0000
580	0.9163	0.8700	0.0017	780	0.0000	0.0000	0.0000

La Tabla A2 muestra la tabulación de los valores triestímulo espectrales para un campo visual de 10° , $\bar{x}_{10}$, $\bar{y}_{10}$ y $\bar{z}_{10}$ [12].

TABLA A1. Funciones $\bar{x}_{10}$, $\bar{y}_{10}$ y $\bar{z}_{10}$, para un campo visual de 10° .

λ	$\bar{x}_{10}$	$\bar{y}_{10}$	$\bar{z}_{10}$	λ	$\bar{x}_{10}$	$\bar{y}_{10}$	$\bar{z}_{10}$
380	0.0002	0.0000	0.0007	580	1.0142	0.8689	0.0000
385	0.0007	0.0001	0.0029	585	1.0743	0.8256	0.0000
390	0.0024	0.0003	0.0105	590	1.1185	0.7774	0.0000
395	0.0072	0.0008	0.0323	595	1.1343	0.7204	0.0000
400	0.0191	0.0020	0.0860	600	1.1240	0.6583	0.0000
405	0.0434	0.0045	0.1971	605	1.0891	0.5939	0.0000
410	0.0847	0.0088	0.3894	610	1.0305	0.5280	0.0000
415	0.1406	0.0145	0.6568	615	0.9507	0.4618	0.0000
420	0.2045	0.0214	0.9725	620	0.8563	0.3981	0.0000
425	0.2647	0.0295	1.2825	625	0.7549	0.3396	0.0000
430	0.3147	0.0387	1.5535	630	0.6475	0.2835	0.0000
435	0.3577	0.0496	1.7985	635	0.5351	0.2283	0.0000
440	0.3837	0.0621	1.9673	640	0.4316	0.1798	0.0000
445	0.3867	0.0747	2.0273	645	0.3437	0.1402	0.0000
450	0.3707	0.0895	1.9948	650	0.2683	0.1076	0.0000
455	0.3430	0.1063	1.9007	655	0.2043	0.0812	0.0000
460	0.3023	0.1282	1.7454	660	0.1526	0.0603	0.0000
465	0.2541	0.1528	1.5549	665	0.1122	0.0441	0.0000
470	0.1956	0.1852	1.3176	670	0.0813	0.0318	0.0000
475	0.1323	0.2199	1.0302	675	0.0579	0.0226	0.0000
480	0.0805	0.2536	0.7721	680	0.0409	0.0159	0.0000
485	0.0411	0.2977	0.5701	685	0.0286	0.0111	0.0000
490	0.0162	0.3391	0.4153	690	0.0199	0.0077	0.0000
495	0.0051	0.3954	0.3024	695	0.0138	0.0054	0.0000
500	0.0038	0.4608	0.2185	700	0.0096	0.0037	0.0000
505	0.0154	0.5314	0.1592	705	0.0066	0.0026	0.0000
510	0.0375	0.6067	0.1120	710	0.0046	0.0018	0.0000
515	0.0714	0.6857	0.0822	715	0.0031	0.0012	0.0000
520	0.1177	0.7618	0.0607	720	0.0022	0.0008	0.0000
525	0.1730	0.8233	0.0431	725	0.0015	0.0006	0.0000
530	0.2365	0.8752	0.0305	730	0.0010	0.0004	0.0000
535	0.3042	0.9238	0.0206	735	0.0007	0.0003	0.0000
540	0.3768	0.9620	0.0137	740	0.0005	0.0002	0.0000
545	0.4516	0.9822	0.0079	745	0.0004	0.0001	0.0000
550	0.5298	0.9918	0.0040	750	0.0003	0.0001	0.0000
555	0.6161	0.9991	0.0011	755	0.0002	0.0001	0.0000
560	0.7052	0.9973	0.0000	760	0.0001	0.0000	0.0000
565	0.7938	0.9824	0.0000	765	0.0001	0.0000	0.0000
570	0.8787	0.9555	0.0000	770	0.0001	0.0000	0.0000
575	0.9512	0.9152	0.0000	775	0.0000	0.0000	0.0000
580	1.0142	0.8689	0.0000	780	0.0000	0.0000	0.0000

APENDICE B. Iluminantes patrón

En la Tabla B1 se presenta la tabulación de los datos espectrales de la energía radiante para los iluminantes A, B, C y D65 [12].

TABLA B1. Energía radiante espectral para los iluminantes A, B, C y D65.

λ	A	B	C	D65	λ	A	B	C	D65
380	9.79	22.4	33	50	580	114.44	101	97.8	95.8
385	10.9	26.85	39.92		585	118.08	100.07	95.43	
390	12.09	31.3	47.4	54.6	590	121.73	99.2	93.2	88.7
395	13.36	36.18	55.17		595	125.39	98.44	91.22	
400	14.71	41.3	63.3	82.8	600	129.04	98	89.7	90
405	16.15	46.62	71.81		605	132.7	98.08	88.83	
410	17.68	52.1	80.6	91.5	610	136.34	98.5	88.4	89.6
415	19.29	57.7	89.53		615	139.99	99.06	88.19	
420	21	63.2	98.1	93.4	620	143.62	99.7	88.1	87.7
425	22.79	68.37	105.8		625	147.23	100.36	88.06	
430	24.67	73.1	112.4	86.7	630	150.83	101	88	83.3
435	26.64	77.31	117.75		635	154.42	101.56	87.86	
440	28.7	80.8	121.5	104.9	640	157.98	102.2	87.8	83.7
445	30.85	83.44	123.45		645	161.51	103.05	87.99	
450	33.09	85.4	124	117	650	165.03	103.9	88.2	80
455	35.41	86.88	123.6		655	168.51	104.59	88.2	
460	37.82	88.3	123.1	117.8	660	171.96	105	87.9	80.2
465	40.3	90.08	123.3		665	175.38	105.08	87.22	
470	42.87	92	123.8	114.9	670	178.77	104.9	86.3	82.3
475	45.52	93.75	124.09		675	182.12	104.55	85.3	
480	48.25	95.2	123.9	115.9	680	185.43	103.9	84	78.3
485	51.04	96.23	122.92		685	188.7	102.84	82.21	
490	53.91	96.5	120.7	108.8	690	191.93	101.6	80.2	69.7
495	56.85	95.71	116.9		695	195.12	100.38	78.24	
500	59.86	94.2	112.1	109.4	700	198.26	99.1	76.3	71.6
505	62.93	92.37	106.98		705	201.36	97.7	74.36	
510	66.06	90.7	102.3	107.8	710	204.41	96.2	72.4	74.3
515	69.25	89.65	98.81		715	207.41	94.6	70.4	
520	72.5	89.5	96.9	104.8	720	210.36	92.9	68.3	61.6
525	75.79	90.43	96.78		725	213.26	91.1	66.3	
530	79.13	92.2	98	107.7	730	216.12	89.4	64.4	69.9
535	82.52	94.46	99.94		735	218.92	88	62.8	
540	85.95	96.9	102.1	104.4	740	221.66	86.9	61.5	75.1
545	89.41	99.16	103.95		745	224.36	85.9	60.2	
550	92.91	101	105.2	104	750	227	85.2	59.2	63.6
555	96.44	102.2	105.67		755	229.58	84.8	58.5	
560	100	102.8	105.3	100	760	232.11	84.7	58.1	46.4
565	103.58	102.92	104.11		765	234.59	84.9	58	
570	107.18	102.6	102.3	96.3	770	237.01	85.4	58.2	66.8
575	110.8	101.9	100.15		775	239.37	86.1	58.5	
580	114.44	101	97.8	95.8	780	241.67	87	59.1	63.4

APENDICE C. Radiancia espectral de los LED's

En este apéndice se presentan los datos espectrales de todos los LED's que se utilizaron en el trabajo. La notación que se utiliza para designarlos es la de la Tabla 5.8. Aunque se han incorporado tres LED's adicionales con respecto a dicha Tabla, que son: el LED verde (L11) que reemplazó al original en el instrumento prototipo; el LED azul (L12) que originalmente tenía el instrumento y el LED azul nuevo (L13).

La Tabla C1 es análoga a la Tabla 5.8, pero incluye los LED's adicionales.

TABLA C1. Características espectrales de los LED's involucrados en el trabajo.

LED	Color	Máximo espectral (nm)	Ancho de banda (nm)
L1	Rojo	625	40
L2	Naranja	610	40
L3	Naranja	605	40
L4	Ambar	590	35
L5	Ambar	585	35
L6	Amarillo	580	35
L7	Amarillo	570	35
L8	Verde	565	30
L9	Verde	560	30
L10	Verde	555	25
L11	Verde	560	25
L12	Azul	465	65
L13	Azul	460	75

En las Tabla C2 se presentan los datos de la radiancia espectral para los LED's L1, L2, L3 y L4; en la Tabla C3 se encuentran los datos correspondientes a los LED's L5, L6, L7 y L8; finalmente en la Tabla C4 están los datos para los LED's L 9, L10, L11, L12 y L13.

TABLA C2. Radiancia espectral de los LED's L1, L2, L3 y L4.

λ	L1	L2	L3	L4	λ	L1	L2	L3	L4
380	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	555	0.0007	0.0093	0.0097	0.1102
385	0.0012	0.0000	0.0000	0.0001	560	0.0012	0.0230	0.0305	0.3390
390	0.0002	0.0000	0.0000	0.0001	565	0.0017	0.0586	0.0761	0.7077
395	0.0005	0.0000	0.0000	0.0002	570	0.0040	0.1510	0.1741	1.5520
400	0.0007	0.0002	0.0000	0.0001	575	0.0078	0.8219	0.4258	3.3368
405	0.0002	0.0001	0.0000	0.0002	580	0.0174	1.0540	0.9555	4.9824
410	0.0009	0.0001	0.0000	0.0002	585	0.0369	1.8870	1.8760	6.5352
415	0.0001	0.0003	0.0000	0.0001	590	0.0705	3.5930	3.7550	7.5004
420	0.0003	0.0001	0.0000	0.0001	595	0.1434	5.2380	5.4980	7.1548
425	0.0000	0.0002	0.0000	0.0001	600	0.2634	7.2050	6.7900	6.1284
430	0.0002	0.0002	0.0000	0.0001	605	0.4794	8.2580	7.4560	4.9148
435	0.0000	0.0002	0.0000	0.0002	610	0.7759	8.3100	7.2430	3.8278
440	0.0001	0.0001	0.0000	0.0002	615	1.1173	7.5370	6.4210	2.9392
445	0.0003	0.0002	0.0000	0.0002	620	1.3763	6.4940	5.5910	2.3762
450	0.0002	0.0001	0.0000	0.0002	625	1.5475	5.1920	4.3230	1.6694
455	0.0001	0.0002	0.0000	0.0002	630	1.499	4.5570	3.4030	1.2670
460	0.0001	0.0003	0.0000	0.0002	635	1.3808	4.0620	2.7010	0.9497
465	0.0006	0.0003	0.0000	0.0002	640	1.1484	2.4010	1.9830	0.7277
470	0.0004	0.0002	0.0000	0.0002	645	0.9589	2.0310	1.5030	0.5757
475	0.0002	0.0004	0.0000	0.0003	650	0.7616	1.8580	1.1510	0.4416
480	0.0006	0.0002	0.0000	0.0003	655	0.6112	1.4990	0.9263	0.3455
485	0.0006	0.0005	0.0000	0.0003	660	0.4593	1.2050	0.6643	0.2885
490	0.0003	0.0005	0.0000	0.0004	665	0.3418	1.1220	0.5017	0.2417
495	0.0003	0.0004	0.0000	0.0004	670	0.2634	1.1280	0.3991	0.2230
500	0.0002	0.0003	0.0000	0.0005	675	0.1961	1.1850	0.2952	0.2025
505	0.0002	0.0004	0.0003	0.0005	680	0.1562	1.2300	0.2322	0.1837
510	0.0001	0.0004	0.0004	0.0007	685	0.1300	1.3390	0.2222	0.1825
515	0.0002	0.0005	0.0005	0.0009	690	0.1113	1.4440	0.2073	0.1902
520	0.0008	0.0005	0.0005	0.0012	695	0.1034	1.5560	0.2210	0.1991
525	0.0008	0.0006	0.0005	0.0018	700	0.1068	1.6810	0.2306	0.2119
530	0.0003	0.0007	0.0008	0.0029	705	0.1145	1.8200	0.2528	0.2291
535	0.0012	0.0010	0.0009	0.0048	710	0.1200	1.9830	0.2786	0.2455
540	0.0001	0.0013	0.0015	0.0089	715	0.1401	2.1630	0.2984	0.2710
545	0.0002	0.0023	0.0024	0.0174	720	0.1453	2.3350	0.3190	0.2970
550	0.0004	0.0039	0.0042	0.0426	725	0.1583	2.5990	0.3618	0.3280
555	0.0007	0.0093	0.0097	0.1102	730	0.1724	2.8940	0.3920	0.3660

TABLA C3. Radiancia espectral de los LED's L5, L6, L7 y L8.

λ	L5	L6	L7	L8	λ	L5	L6	L7	L8
380	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	555	0.0164	0.0107	0.3487	3.8500
385	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	560	0.0504	0.0195	0.5228	5.2750
390	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	565	0.0907	0.0433	0.6157	5.6500
395	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	570	0.1717	0.0744	0.6337	5.1750
400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	575	0.2413	0.0953	0.5102	3.8430
405	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	580	0.2740	0.1067	0.4035	2.8340
410	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	585	0.2796	0.1054	0.3203	2.0930
415	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	590	0.2493	0.0904	0.2449	1.5870
420	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	595	0.2032	0.0750	0.1890	1.0810
425	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	600	0.1610	0.0558	0.1486	0.7828
430	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	605	0.1260	0.0428	0.1187	0.5517
435	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	610	0.0989	0.0339	0.0875	0.3919
440	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	615	0.0728	0.0240	0.0681	0.2781
445	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	620	0.0544	0.0184	0.0526	0.1900
450	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	625	0.0424	0.0141	0.0402	0.1422
455	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	630	0.0300	0.0108	0.0304	0.1074
460	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	635	0.0235	0.0075	0.0251	0.0786
465	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	640	0.0176	0.0059	0.0204	0.0658
470	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	645	0.0163	0.0045	0.0163	0.0623
475	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	650	0.0102	0.0033	0.0134	0.0499
480	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	655	0.0085	0.0026	0.0116	0.0535
485	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005	660	0.0060	0.0020	0.0101	0.0541
490	0.0000	0.0000	0.0000	0.0007	665	0.0040	0.0020	0.0092	0.0598
495	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	670	0.0032	0.0013	0.0088	0.0617
500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0014	675	0.0031	0.0011	0.0085	0.0651
505	0.0000	0.0000	0.0001	0.0026	680	0.0016	0.0009	0.0085	0.0691
510	0.0000	0.0000	0.0002	0.0042	685	0.0016	0.0010	0.0088	0.0756
515	0.0000	0.0000	0.0004	0.0075	690	0.0019	0.0009	0.0094	0.0779
520	0.0000	0.0000	0.0010	0.0183	695	0.0015	0.0011	0.0099	0.0848
525	0.0000	0.0000	0.0026	0.0394	700	0.0020	0.0013	0.0108	0.0928
530	0.0000	0.0002	0.0061	0.0838	705	0.0022	0.0013	0.0115	0.1042
535	0.0000	0.0005	0.0130	0.2007	710	0.0019	0.0016	0.0126	0.1104
540	0.0000	0.0011	0.0312	0.4289	715	0.0023	0.0014	0.0138	0.1232
545	0.0010	0.0024	0.0718	0.9288	720	0.0025	0.0020	0.0155	0.1321
550	0.0059	0.0052	0.1587	2.0380	725	0.0022	0.0019	0.0164	0.1457
555	0.0164	0.0107	0.3487	3.8500	730	0.0027	0.0023	0.0187	0.1603

TABLA C4. Radiancia espectral de los LED's L9, L10, L11, L12 y L13.

λ	L9	L10	L11	L12	L13	λ	L9	L10	L11	L12	L13
380	0.0016	0.0000	0.0040	0.0064	0.0598	555	1.1580	1.8916	5.5112	0.1476	0.4335
385	0.0012	0.0000	0.0011	0.0045	0.0938	560	1.2505	1.5976	6.0606	0.1241	0.3663
390	0.0009	0.0000	0.0007	0.0037	0.0912	565	1.1860	1.0544	5.5096	0.1065	0.3035
395	0.0002	0.0000	0.0005	0.0066	0.0997	570	0.9556	0.7057	4.4796	0.0896	0.2457
400	0.0007	0.0000	0.0005	0.0127	0.1749	575	0.6719	0.4035	2.9862	0.0748	0.1703
405	0.0005	0.0000	0.0004	0.0287	0.4154	580	0.4663	0.2313	1.9858	0.0641	0.1619
410	0.0003	0.0000	0.0003	0.0629	0.5857	585	0.3330	0.1418	1.2478	0.0540	0.1325
415	0.0003	0.0000	0.0004	0.1286	1.0075	590	0.1722	0.0716	0.7770	0.0442	0.1057
420	0.0005	0.0000	0.0003	0.2897	1.6060	595	0.1156	0.0374	0.4564	0.0389	0.0800
425	0.0004	0.0000	0.0004	0.3447	2.3136	600	0.0587	0.0178	0.2716	0.0345	0.0602
430	0.0002	0.0000	0.0003	0.4432	3.0126	605	0.0310	0.0098	0.1706	0.0282	0.0482
435	0.0007	0.0000	0.0003	0.6220	3.7012	610	0.0201	0.0070	0.1119	0.0243	0.0415
440	0.0005	0.0000	0.0003	0.8116	4.2882	615	0.0160	0.0061	0.0747	0.0204	0.0376
445	0.0003	0.0000	0.0003	1.0211	4.7650	620	0.0155	0.0048	0.0558	0.0164	0.0329
450	0.0003	0.0000	0.0004	1.1890	4.9188	625	0.0115	0.0045	0.0436	0.0161	0.0234
455	0.0003	0.0000	0.0003	1.3227	5.1440	630	0.0090	0.0042	0.0376	0.0147	0.0236
460	0.0001	0.0000	0.0005	1.4037	5.2590	635	0.0087	0.0040	0.0301	0.0142	0.0204
465	0.0003	0.0000	0.0005	1.4623	5.2342	640	0.0043	0.0039	0.0287	0.0106	0.0166
470	0.0001	0.0000	0.0006	1.4470	5.0598	645	0.0042	0.0035	0.0273	0.0113	0.0138
475	0.0017	0.0000	0.0008	1.3887	4.8046	650	0.0028	0.0027	0.0278	0.0087	0.0115
480	0.0006	0.0000	0.0009	1.2903	4.4518	655	0.0014	0.0015	0.0289	0.0072	0.0083
485	0.0001	0.0000	0.0010	1.1610	4.0788	660	0.0008	0.0001	0.0301	0.0066	0.0061
490	0.0011	0.0000	0.0014	1.0537	3.6264	665	0.0001	0.0000	0.0322	0.0085	0.0048
495	0.0005	0.0004	0.0022	0.9239	3.2402	670	0.0012	0.0000	0.0332	0.0070	0.0043
500	0.0009	0.0011	0.0040	0.8031	2.8006	675	0.0004	0.0000	0.0365	0.0064	0.0043
505	0.0018	0.0025	0.0071	0.7038	2.4552	680	0.0044	0.0000	0.0377	0.0041	0.0046
510	0.0021	0.0053	0.0144	0.6158	2.1238	685	0.0011	0.0000	0.0401	0.0049	0.0047
515	0.0047	0.0138	0.0573	0.5308	1.8228	690	0.0009	0.0000	0.0423	0.0057	0.0052
520	0.0095	0.0371	0.0660	0.4539	1.5632	695	0.0008	0.0000	0.0448	0.0087	0.0056
525	0.0226	0.0790	0.1408	0.3922	1.2876	700	0.0019	0.0000	0.0481	0.0064	0.0066
530	0.0430	0.2234	0.3121	0.3294	1.1082	705	0.0016	0.0000	0.0522	0.0069	0.0073
535	0.0828	0.3932	0.5398	0.2885	0.9234	710	0.0007	0.0000	0.1681	0.0065	0.0083
540	0.1589	0.7181	0.9880	0.2359	0.7660	715	0.0045	0.0000	0.0625	0.0066	0.0083
545	0.3529	1.1674	1.7980	0.2059	0.6518	720	0.0015	0.0000	0.0678	0.0072	0.0075
550	0.6518	1.6288	3.3886	0.1750	0.5265	725	0.0004	0.0000	0.0757	0.0119	0.0079
555	1.1580	1.8916	5.5112	0.1476	0.4335	730	0.0001	0.0000	0.0828	0.0138	0.0088