



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



María José Bustos Araya

Índice de Reproducción Cromática CRI para Fuentes de Luz

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 23 de agosto de 2017



Índice de Reproducción Cromática CRI para Fuentes de Luz

María José Bustos Araya

Informe Final para optar al título de Ingeniero Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Enrique Piraino Davidson
Profesor Guía

Sr. Iván Kopaitic Otero
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingherhuth
Secretario Académico

Valparaíso, 23 de agosto de 2017

Dedico este trabajo a mi esposo Sebastián y a mi familia por su cariño y apoyo incondicional.

Resumen

Considerando lo impresionable y subjetivo que puede ser la percepción individual frente a un mismo hecho, en lo que refiere a la luz e interpretación de su fenomenología, surge como una reacción pragmática diversas técnicas que conllevan a su estudio metódico y sistemático.

La dependencia del color en referencia a la luz es axiomática. La teoría del color incluye tanto sus propiedades intrínsecas (tono, saturación y luminosidad) para valorar la forma en como percibimos los colores como tal (fisiología de la visión). La diferenciación de su jerarquía cuando tratamos el color en relación a la luz en contraposición a la referencia en pigmentos hace necesaria su clasificación y tratamiento.

El estudio del espectro lumínico y la temperatura de color resulta inexorablemente necesario (tomando en cuenta un cuerpo negro como referencia para comparar la temperatura a evaluar) estableciendo que la relación que existe entre temperatura de color y longitud de onda es la siguiente: mientras mayor sea la temperatura de un cuerpo negro, menor será la longitud de onda que emite. Por otro lado, es de acuerdo al espectro lumínico y la temperatura del color que se clasifican las luces (cálidas, neutras, frías), clasificación necesaria para contextualizar las fuentes lumínicas.

El índice de reproducción cromática es una medida cuantitativa que valora la capacidad que tiene una fuente de luz de reproducir fielmente los colores de los objetos. El proceso consiste en la medición de la luz procedente de una fuente de prueba y ver cómo el color de la luz reflejada aparece en comparación con las muestras de color conocidas. Con el fin de comparar de forma objetiva las propiedades de reproducción cromática de cualquier fuente de luz, se vale de una escala de 0 a 100 existiendo una relación directamente proporcional entre valor medido en la escala y su representación perceptible.

La Comisión Internacional de la Iluminación es la autoridad internacional en estudios de luz, iluminación, color y espacios de color. Es una organización técnica, científica y cultural sin ánimo de lucro y cuenta con divisiones técnicas que cubren todos los aspectos de luz e iluminación que han surgido hasta ahora. Unos de sus principales cometidos es la propuesta de modelos de color, sistemas de evaluación de color y establecimiento de valores y referencias para evaluaciones generales y específicas del color.

El algoritmo será por lo tanto, el que ayude a ordenar las etapas para la evaluación del índice de reproducción del color, analizando y desarrollando cada una de ellas con el fin de comprender no solamente su objetivo sino también su origen y cálculos.

.

Abstract

Considering the impressionable and subjective that can be the individual perception against the same fact, in what refers to the light and interpretation of its phenomenology, arises like a pragmatic reaction diverse techniques that lead to its methodical and systematic study.

The dependence of color in reference to light is axiomatic. Color theory includes both its intrinsic properties (hue, saturation and luminosity) to assess the way we perceive colors as such (physiology of vision). The differentiation of its hierarchy when we treat the color in relation to the light as opposed to the reference in pigments makes necessary its classification and treatment.

The study of the light spectrum and the color temperature is inexorably necessary (taking into account a blackbody as a reference to compare the temperature to evaluate) establishing that the relationship between color temperature and wavelength is as follows: the greater the temperature of a black body, the smaller the wavelength it emits. On the other hand, it is according to the light spectrum and the color temperature that the lights are classified (warm, neutral, cold), classification necessary to contextualize the light sources

The chromatic reproduction index is a quantitative measure that assesses the ability of a light source to faithfully reproduce the colors of objects. The process consists of measuring the light from a test source and seeing how the color of the reflected light appears compared to the known color samples. In order to objectively compare the chromatic reproduction properties of any light source, it uses a scale from 0 to 100 and there is a directly proportional relationship between the value measured on the scale and its perceptible representation.

The International Commission on Illumination is the international authority in studies of light, lighting, color and color spaces. It is a technical, scientific and cultural non-profit organization and has technical divisions that cover all aspects of light and lighting that have emerged until now. One of its main tasks is the proposal of color models, systems of color evaluation and establishment of values and references for general and specific evaluations of color.

The algorithm will therefore be the one that helps to order the stages for the evaluation of the index of color reproduction, analyzing and developing each of them in order to understand not only its objective but also its origin and calculations.

Índice general

Introducción.....	1
1 Color	2
1.1 Historia del Color.	2
1.2 Teoría del Color.	3
1.3 Propiedades del Color.	4
1.4 Fisiología de la Visión.	6
1.5 Colores Primarios en la Luz	8
1.6 Colores Primarios en el Pigmento	9
2 Temperatura de Color y Distribución de Energía Espectral.	11
2.1 Concepto de Temperatura de Color.....	11
2.2 Luces Cálidas, Neutras y Frías.	12
2.3 Concepto de Distribución Espectral.	15
3 Comisión Internacional de Iluminación.....	18
3.1 Objetivos de la Comisión Internacional de Iluminación.	18
3.2 Divisiones de la Comisión Internacional de Iluminación.	19
3.3 Modelos de Color.	20
3.3.1 Valores Triestímulos y Coordenadas Cromáticas.....	20
3.3.2 Sistema de Medición CIE 1976.	24
4 Algoritmo del Índice de Reproducción Cromática (CRI).	27
4.1 Algoritmo Clásico del Rendimiento del Color.	27
4.2 Desarrollo del Algoritmo.	31
4.2.1 Objetivo	31
4.2.2 Ámbito de Aplicación.....	31
4.2.3 Procedimiento.	31
Discusión y conclusiones.....	37
Bibliografía	39

Introducción

La luz con su connotación sagrada e inexorablemente necesaria, ha cimentado, desde siempre, la base de millares de fundamentos religiosos, filosóficos, científicos- tecnológicos y naturales. Cuestionando a su vez la realidad que percibimos y catalogando de subjetivo lo que en forma individual nos resulta absolutamente objetivo. Es por ello, que surge la necesidad inapelable, dada las condiciones sociales tecnológicas y nuestro esencial estilo de vida, de estudiar de forma metódica y analítica su funcionalidad y propósito.

Teniendo en cuenta el sistema óptico como primer receptor y luego nuestro cerebro como analizador y catalogador, sistema perfecto e imperfecto a la vez, se hace necesario la sistematización de la percepción del color. La presente investigación trate de ello; luz como parte fundamental de la interpretación del color, historia de sistemas y métodos de medición del color, influencia de variables exógenas del color, distribución de potencia espectral y los sistemas, metodologías y algoritmos actuales que se emplean para determinar el índice de reproducción cromática, versan los rudimentos para entender fundamentalmente la interpretación real de los colores como fenómeno físico, absoluto y definitivo. Ver con mayor objetividad los colores y su interpretación para bases científico-tecnológicas es lo que nos ofrece el índice de reproducción del color, el cual nos permite catalogar porcentualmente una fuente de iluminación iluminando un objeto reflejando sus colores y marcando una cifra si los colores se ven apropiadamente, tomando como iluminante de referencia el sol.

1 Color

En éste capítulo se explicará de manera detallada las diferentes facetas de la teoría del color, su historia y propiedades.

1.1 Historia del Color.

El color ha existido desde el origen del universo, pero no siempre se ha pensado y opinado lo mismo sobre él, sobre su origen o sobre su composición. Así mismo, el color nos produce muchas sensaciones, sentimientos, nos transmite mensajes, nos expresa valores, situaciones y sin embargo, no existe más allá de nuestra percepción visual.

El color ha sido estudiado, por científicos, físicos, filósofos y artistas. Cada uno en su campo llegó a diversas conclusiones que, en ocasiones, fueron buenos puntos de partida para posteriores estudios y para todo lo que hoy sabemos del color.

El filósofo Aristóteles (384 - 322 AC) afirmó que todos los colores se forman con la mezcla de colores. Estos colores, que denominó como básicos, eran los de tierra, el fuego, el agua y el cielo. Además otorgó un papel fundamental a la incidencia de luz sobre los mismos.

Siglos más tarde, Leonardo Da Vinci (1452-1519) definió al color como propio de la materia. Confeccionó la siguiente escala de colores básicos: primero el blanco como el principal ya que permite recibir a todos los demás colores, después el amarillo para la tierra, verde para el agua, azul para el cielo, rojo para el fuego. Por último, el negro para la oscuridad, ya que es el color que nos priva de todos los otros. Con la mezcla de estos colores obtenía todos los demás, aunque también observó que el verde surgía de una mezcla.

Finalmente fue Isaac Newton (1642-1727) quien estableció un principio hasta hoy aceptado: la luz es color. En 1665 Newton descubrió que la luz del sol al pasar a través de un prisma (Figura 1-1), se dividía en varios colores. Esto no es, ni más ni menos, que la descomposición de la luz en los colores del espectro. Estos colores son el azul violáceo, el azul celeste, el verde, el amarillo, el rojo anaranjado y el rojo púrpura. Este fenómeno lo podemos contemplar con mucha frecuencia, cuando la luz se refracta en el borde de un cristal o de un plástico. También cuando llueve y algunos rayos de sol atraviesan las nubes, las gotas de agua cumplen la misma función que el prisma de Newton y descomponen la luz produciendo lo que llamamos arcoíris.



Figura 1-1: Caracterización de la descomposición de la luz solar experimentalmente.

Así es como observa que la luz natural está formada por luces de siete colores. Cuando incide sobre un elemento absorbe algunos de esos colores y refleja otros. Con esta observación dio lugar al siguiente principio: todos los cuerpos opacos al ser iluminados reflejan todos o parte de los componentes de la luz que reciben. Por lo tanto cuando vemos una superficie roja, realmente estamos viendo una superficie de un material que contiene un pigmento el cual absorbe todas las ondas electromagnéticas que contiene la luz blanca con excepción de la roja, la cual al ser reflejada, es captada por el ojo humano y decodificada por el cerebro como el color denominado rojo.

1.2 Teoría del Color.

El color es un atributo que percibimos de los objetos cuando hay luz. Todo el mundo que nos rodea es de colores siempre y cuando haya luz. La luz es una forma de energía que tiene dos aspectos: un aspecto de onda electromagnética y un aspecto corpuscular (fotones). La luz emitida por el sol viaja a una velocidad de aproximadamente 300.000 (km/s) con una frecuencia de aproximadamente 600.000 (GHz).

Cada una de esas ondas tiene una longitud de onda diferente que es lo que produce los distintos tipos de luz, como la luz infrarroja, la luz ultravioleta o el espectro visible. El espectro visible es aquel en el que la longitud de la onda está comprendida entre los 380 y los 750 nanómetros ya que el ojo humano sólo es capaz de percibir ese tipo de luz (Figura 1-2).

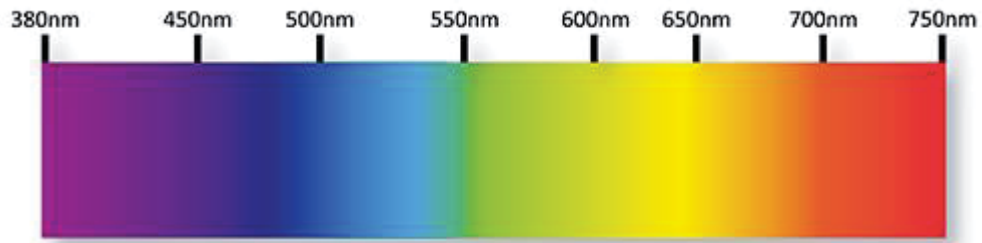


Figura 1-2: Espectro Visible por el Ojo Humano.

1.3 Propiedades del Color.

Las propiedades del color son aquellos atributos que cambian y hacen único a cada color. Estos atributos son tres: El tono, la saturación y el brillo (Figura 1-3).

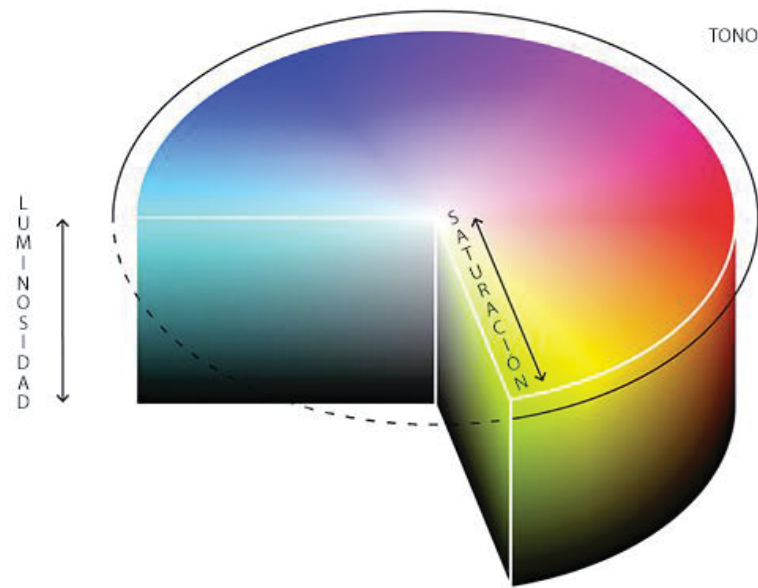


Figura 1-3: Propiedades del color, Tono, Saturación y Luminosidad.

El Tono también es conocido como matiz, tinte, croma o su nombre en inglés, Hue. Es la propiedad que diferencia un color de otro y por la cual designamos los colores: verde, violeta, rojo, etc. Hace referencia al recorrido que hace un color en el círculo cromático adquiriendo matices (Figura 1-4), como por ejemplo el rojo anaranjado o el amarillo verdoso.



Figura 1-4: Tono

La Saturación representa la intensidad cromática o pureza de un color. En otras palabras, es la claridad u oscuridad de un color, está determinado por la cantidad de luz que un color tiene (Figura 1-5). La saturación de los colores cambia a medida que ese color tiene más o menos cantidad de gris. A mayor cantidad de gris, más pálido y menos saturación.



Figura 1-5: Saturación del color rojo.

La luminosidad es la cantidad de luz reflejada por una superficie en comparación con la reflejada por una superficie blanca en iguales condiciones de iluminación. En la teoría del color, la luminosidad hace referencia a cuánto de oscuro o de claro es un color (Figura 1-6). A mayor luminosidad de un color mayor luz reflejará.



Figura 1-6: Luminosidad del color morado.

1.4 Fisiología de la Visión.

El color es una percepción y depende directamente de sus tres dimensiones físicas para poder verlos. Estas dimensiones son la saturación, la brillantez y el tono. El resultado de toda esta mezcla son tantas combinaciones que el número total de colores que nuestro cerebro puede procesar es infinito.

En la retina del ojo humano hay dos tipos de "células" diferentes llamadas bastones y conos. Los bastones y conos del órgano de la vista (Figura 1-7) están organizados en grupos de tres elementos sensibles, cada uno de ellos destinado a captar un solo color del espectro: uno al azul, otro al verde y otro al rojo. Cuando vemos rojo es porque se ha excitado el elemento sensible a esta longitud de onda. Cuando vemos amarillo es porque se excitan al mismo tiempo el verde y el rojo, y cuando vemos azul celeste (cyan), es que están funcionando simultáneamente el verde y el azul (azul violeta). A esta capacidad de percepción de los colores contribuye, además, el que todos los cuerpos están constituidos por sustancias (pigmentos) que absorben y reflejan las ondas electromagnéticas; es decir, absorben y reflejan colores. Decimos que un objeto tiene un color cuando, con preferencia, refleja o transmite las radiaciones correspondientes a tal color. Cuando un cuerpo se ve blanco es porque recibe todos los colores básicos del espectro (rojo, verde y azul) y los devuelve reflejados, generándose así la mezcla de los tres colores, el blanco. Si el objeto se ve negro es porque absorbe todas las radiaciones electromagnéticas (todos los colores) y no refleja ninguno. Así, los colores de las cosas que vemos mediante la luz reflejada dependen del tipo de luz que cae sobre ellas, pero también depende de la naturaleza de sus superficies; o sea, del tipo de pigmento que las cubra. Los pigmentos son compuestos que absorben la luz de unos colores particulares (según su longitud de onda) con especial eficiencia.

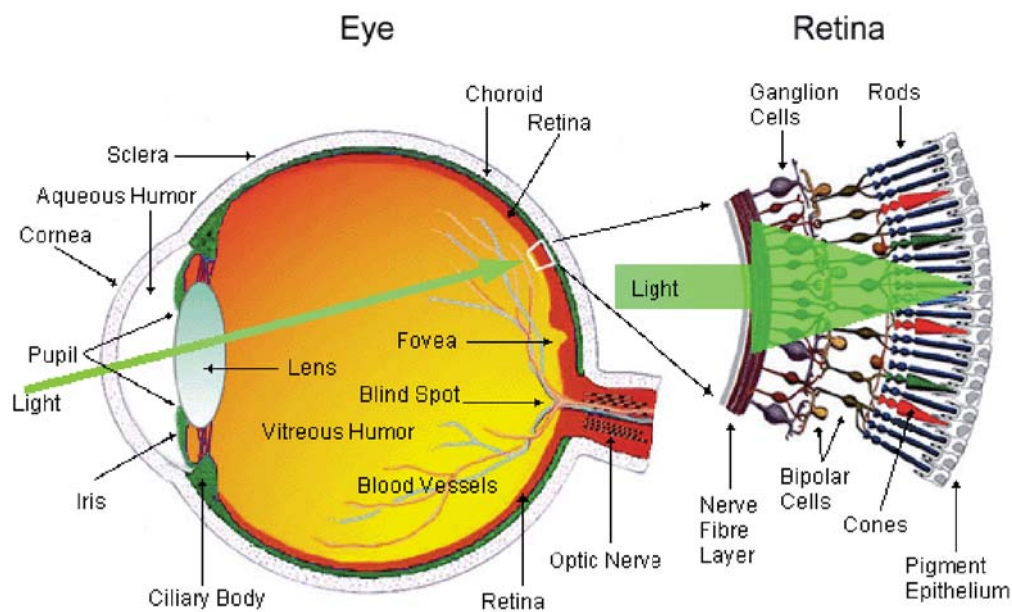


Figura 1-7: Fisiología ocular.

El ojo humano puede ver radiación con longitudes de onda entre 380 y 750 nanómetros (Figura 1-2). La radiación con longitudes menores de 380 [nm] se denomina radiación ultravioleta, mientras que la radiación con longitudes de onda mayores de 750 [nm] se llama radiación infrarroja. El rango de las longitudes de onda que es visible para el ojo humano se denomina "espectro visible" (Figura 1-8).

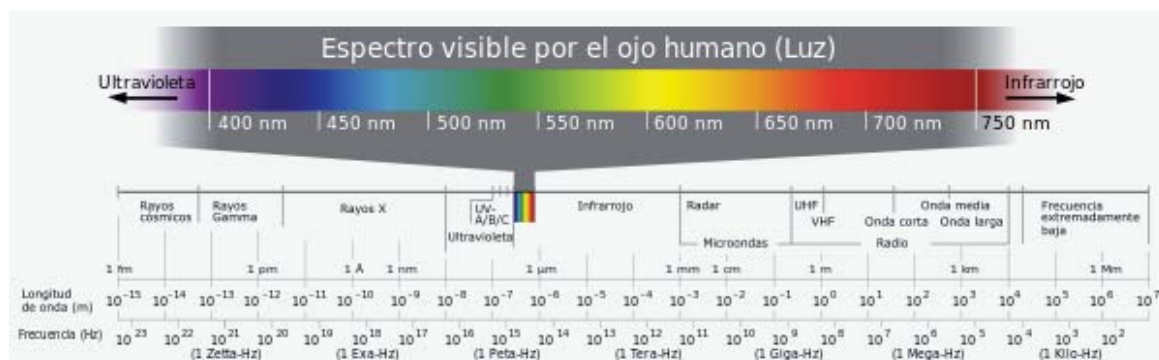


Figura 1-8: Espectro Visible por el Ojo Humano.

Como se puede apreciar en la Figura del Espectro Visible (Figura 1-8), los que son principalmente sensibles a la radiación roja son las longitudes de onda que se encuentran entre los 640 [nm] hasta los 750 [nm], llamados rojos; por otro lado están los sensibles a la radiación verde entre los 490 [nm] hasta los 570 [nm], llamados verdes; y finalmente los sensibles a la radiación azul 427 [nm] hasta los 476 [nm], llamados azules.

Pero esto puede variar al interpretar un gráfico de intensidad lumínica versus longitud de onda (Figura 1-9), aquí se pueden observar las tres longitudes de onda juntas pero obteniendo máximos importantes en los valores de longitud de onda determinadas, esto se podría interpretar de la siguiente forma: como se encuentran todas las ondas juntas pero con distintos porcentajes de intensidad lumínica se podría concluir que no existen colores puros y que estos varían de acuerdo al color que predomina, por ejemplo la onda del color verde posee color rojo y azul en su comienzo pero la que predomina alrededor de los 550 [nm] que es su punto máximo y que es el verde, por lo que ese sería el color que se ha de visualizar.

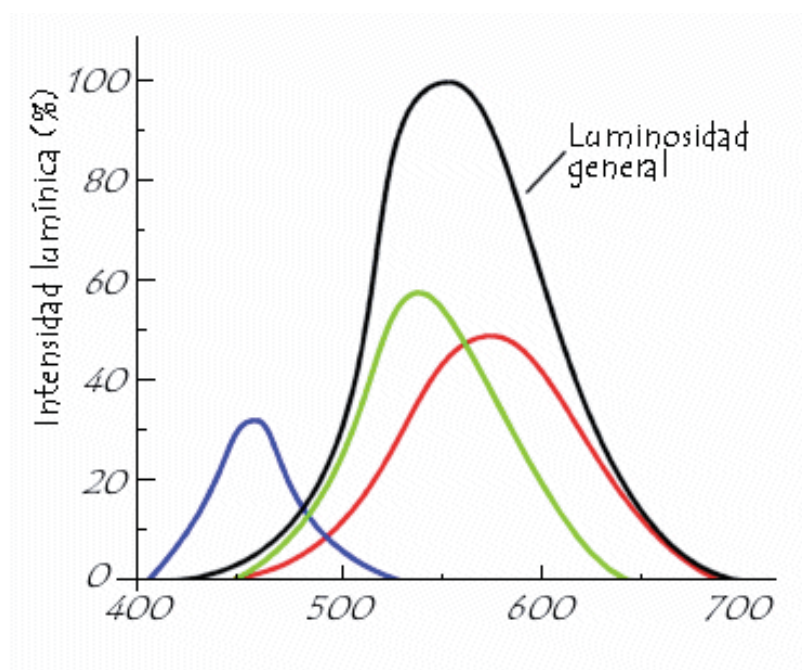


Figura 1-9: Gráfico Intensidad Lumínica versus Longitud de Onda de los colores rojo, verde y azul.

1.5 Colores Primarios en la Luz

Se considera color primario, al color que no se puede obtener mediante la mezcla de ningún otro. El trío de colores, rojo- verde- azul (RGB: red-green-blue) (Figura 1-10), se considera idealmente como el conjunto de colores primarios de la luz, ya que con ellos se puede representar una gama muy amplia de colores visibles; la mezcla de los tres en iguales intensidades (adición) resulta en grises claros, que tienden idealmente al blanco. En la síntesis aditiva, la mezcla de los colores primarios ideales da los siguientes resultados:

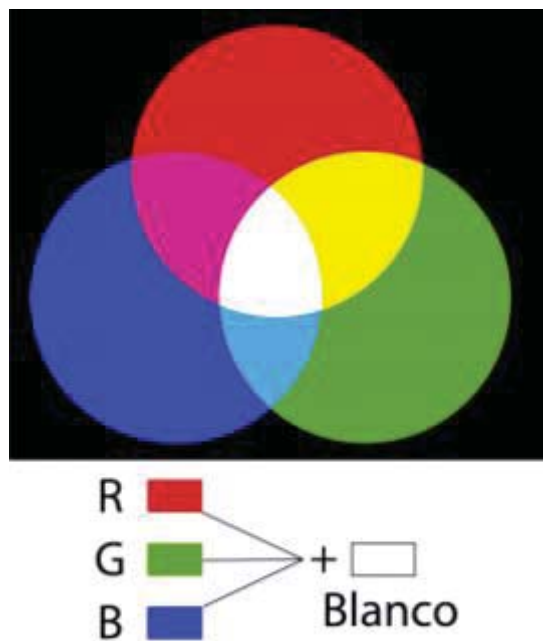


Figura 1-10: Colores Primarios en la luz.

- Verde + azul = Cian.
- Rojo + azul = Magenta.
- Rojo + verde = Amarillo.
- Rojo + azul + verde = Blanco.

1.6 Colores Primarios en el Pigmento

Entonces, si se mezclan pigmentos, se trata de una mezcla sustractiva, ya que con cada pigmento que se añade lo que hace es absorber más partes del espectro; es decir, más colores primarios, y el resultado final será la ausencia de luz: el negro. Así, el magenta, el cian y el amarillo son colores pigmento, su fusión da el negro (CMYK: cian-magenta-yellow-key o black) (Figura 1-11). Son los colores utilizados en la imprenta, las tintas y el papel. Su mezcla se llama síntesis sustractiva y es común en todos los sistemas de impresión, pinturas, tintes y colorantes. La mezcla de estos colores primarios da los siguientes resultados ideales en la síntesis sustractiva:

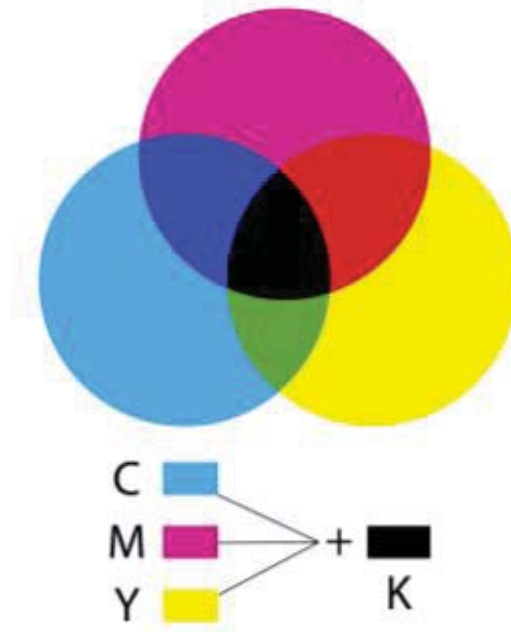


Figura 1-11: Colores Primarios en el pigmento.

- Magenta + amarillo = Rojo
- Cian + amarillo = Verde
- Cian + magenta = Azul
- Cian + magenta + amarillo = Negro

2 Temperatura de Color y Distribución de Energía Espectral.

2.1 Concepto de Temperatura de Color.

La temperatura de color de una fuente de luz se define comparando su color dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada (Figura 2-1). Un cuerpo teórico llamado cuerpo negro, el cual no absorbe ni refleja ninguna frecuencia lumínica, es capaz de irradiar luz según aumenta de temperatura. A cada temperatura a la que se caliente dicho cuerpo emitirá una determinada longitud de onda (color) que tendrá una energía máxima. La relación que existe entre temperatura de color y longitud de onda es la siguiente: mientras mayor sea la temperatura de un cuerpo negro, menor será la longitud de onda que emite.

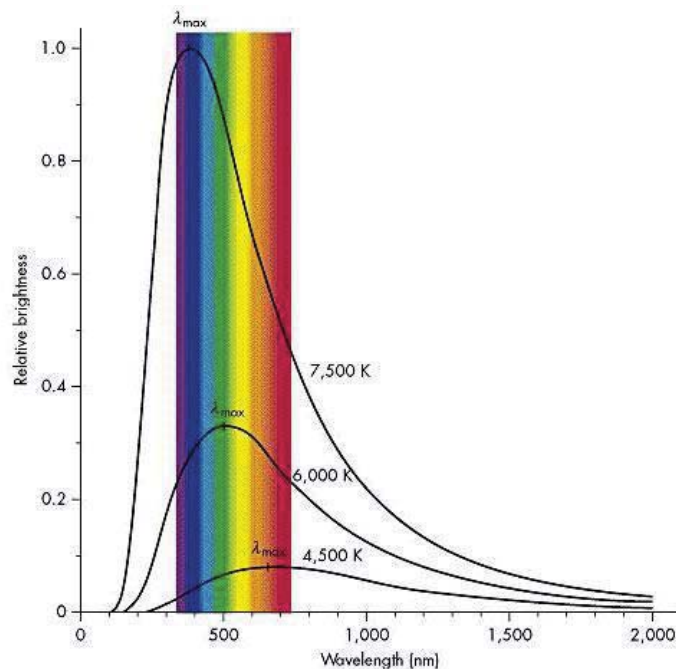


Figura 2-1: Relación entre temperatura y su distribución espectral (longitud de onda).

2.2 Luces Cálidas, Neutras y Frías.

Se denominan fuentes lumínicas cálidas a aquellas que, debido a su temperatura de color, tienen tonos cercanos al rojo, y frías las que tienen tonos próximos al azul. Las fuentes lumínicas situadas en el medio de ambas se consideran neutras (Figura 2-2).

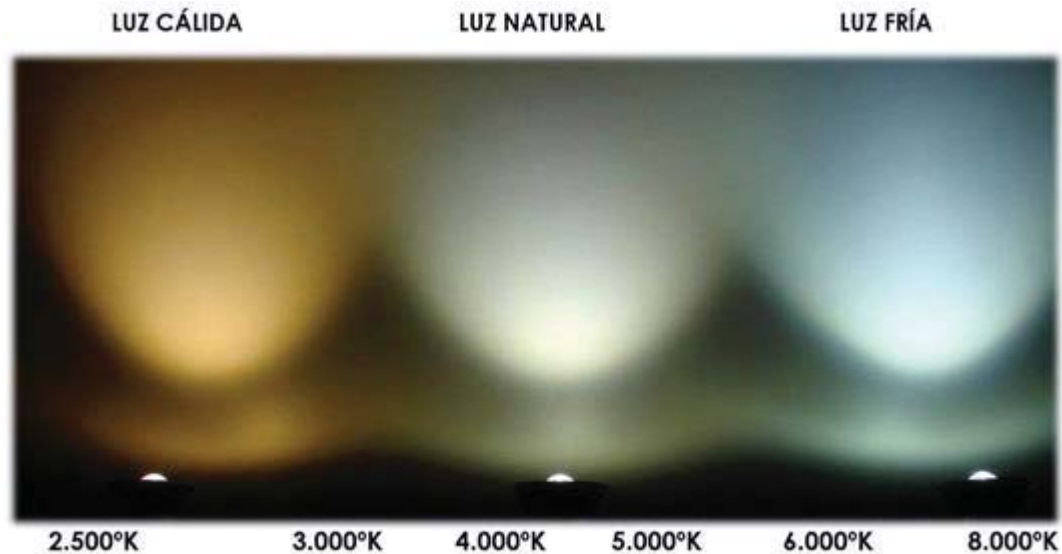


Figura 2-2: Luz cálida, neutra y fría.

Habitualmente, se hablan de 3 grupos de temperatura de color (Figura 2-3):

Luz Cálida: (Temperaturas de color entre 2800K y 3500K). Equivale a la luz que producían las bombillas incandescentes y los focos halógenos.

Luz Neutra: (Temperaturas de color entre 3800K y 4500K) dicen los expertos que es la luz más natural. Se puede instalar en cualquier entorno que no requiera del matiz específico que puedan aportar las otras 2 categorías.

Luz Fría: (Temperaturas de color de más de 5000K). Equivale a la luz de un día muy soleado o nublado. Una de las ventajas de la luz fría es que a la misma intensidad aporta una mayor cantidad de lúmenes lo que genera una percepción mayor de luminosidad.

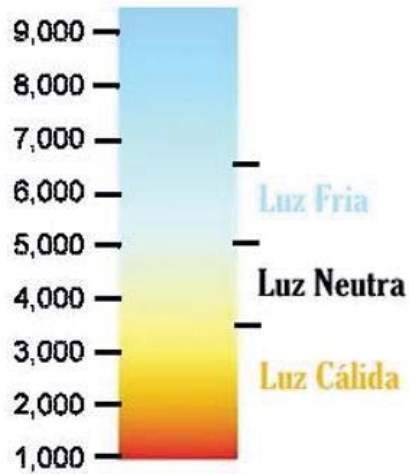


Figura 2-3: Escala de temperatura de color.

Si aplicamos la información de temperatura de color antes mencionada a distintas fuentes de luz tanto artificiales como naturales obtenemos Tabla 2-1 y la Tabla 2-2:

Tabla 2-1: Temperatura de color para distintas fuentes de luz artificial.

Luz artificial	
Llama de una cerilla	1.700 K
Llama de una vela	1.850 K
Lámpara incandescente de tungsteno de 40 W	2.650 K
Lámpara incandescente de tungsteno de 75 W	2.820 K
Lámpara incandescente de tungsteno de 100 W	2.900 K
Lámpara de tungsteno de 3.200 K	3.200 K
Lámpara “photoflood” y reflector difusor	3.400 K
Lámpara “photoflood” azul luz día	4.800 K
Lámpara de arco de xenón	6.420 K

Tabla 2-2: Temperatura de color para distintas fuentes de luz día.

Luz día	
Luz del sol: amanecer u ocaso	2.000 K
Luz del sol: una hora después del amanecer	3.500 K
Luz del sol: por la mañana temprano	4.300 K
Luz del sol: a última hora de la tarde	4.300 K
Luz media del sol en verano a medio día	5.400 K
Luz directa del sol a mediados de verano	5.800 K
Cielo cubierto	6.000 K
Luz media del sol en verano (más luz del cielo azul)	6.500 K
Sombra suave en verano	7.100 K
Sombra media en verano	8.000 K
Luz del cielo de verano	9.500 a 30.000 K

Un caso interesante es la luz que percibimos del sol, que varía su temperatura de color dependiendo de la hora del día o la presencia o ausencia de nubes. Esto es debido a que la luz solar tiene que atravesar más o menos cantidad de gases en la atmósfera según la hora del día y su posición en el cielo, o según haya o no nubes, con lo que se absorben antes las frecuencias altas de la luz, esto es, la gama azul/ultravioleta, quedando una luz más rojiza (cálida), sobre todo al amanecer y atardecer (Figura 2-4).



Figura 2-4: Temperatura de color del día.

2.3 Concepto de Distribución Espectral.

Una composición de luz puede ser definida de forma precisa, expresando la energía de luz que tiene en cada longitud de onda del espectro visible. La distribución resultante de energía espectral (SPD), contiene todos los datos físicos básicos sobre la luz, y sirve como punto de partida para el análisis cuantitativo del color. La distribución de potencia espectral o SPD puede ser medido por un espectrofotómetro. De la distribución de potencia espectral se pueden derivar tanto la luminancia, como el croma de un color, para poderlo expresar de forma precisa en el sistema CIE (Comisión Internacional de Iluminación).

La distribución espectral de la luz de una superficie iluminada es el producto del porcentaje de reflexión de la superficie y la distribución espectral de la luz que cae sobre la superficie. Para poder explicar dichos conceptos, se utiliza un gráfico el cual muestra las intensidades relativas de la fuente a cada longitud de onda. Estas gráficas pueden ser usadas para comparar los niveles de energía de varias fuentes de luz. Son la manera más práctica para comparar la calidad de luz creada por diferentes lámparas. El gráfico muestra exactamente que longitudes de onda de luz (longitudes expresadas en nanómetros o 1×10^{-9} metros) están siendo emitidas (Figura 2-5).

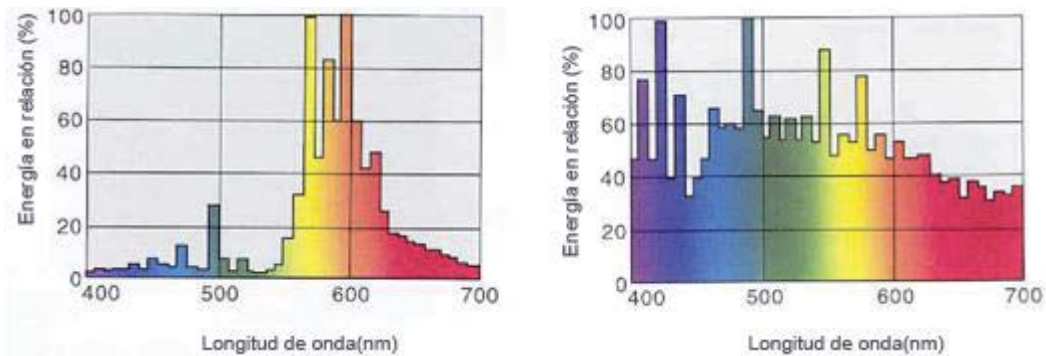


Figura 2-5: Gráfico de Distribución Espectral de la Luz.

La escala vertical es el porcentaje de energía relativa. La mayor cantidad de energía de la fuente de luz se mostrará en un nivel mayor en la escala vertical. Este pico es usado para comparar los niveles de energía de todas las otras longitudes de onda producidas por esa fuente de luz. La escala horizontal del gráfico muestra todas las longitudes de onda alrededor de la luz visible que la fuente de luz produce.

Por ello, para determinar el valor patrón de “CRI = 100”, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) eligió a la lámpara incandescente. La emisión de luz de esta lámpara contiene un espectro llamado “Continuo”, es decir que su gráfico de distribución espectral contiene a todos los colores del espectro visible (si bien no en la misma proporción) esto se observa en la Figura 2-6. Por contraste, una lámpara fluorescente tradicional tiene un espectro discontinuo Figura 2-7, por lo cual su índice de reproducción cromática (CRI) es bajo, generalmente alrededor de 65.



Figura 2-6: Diagrama espectral continuo (fuente incandescente).



Figura 2-7: Diagrama espectral discontinuo (fuente fluorescente).

Los distintos diagramas de distribución espectral para algunas de las fuentes de luz como: fuentes de vapor de sodio alta presión, led, halogenuros metálicos entre otros (Figura 2-8):

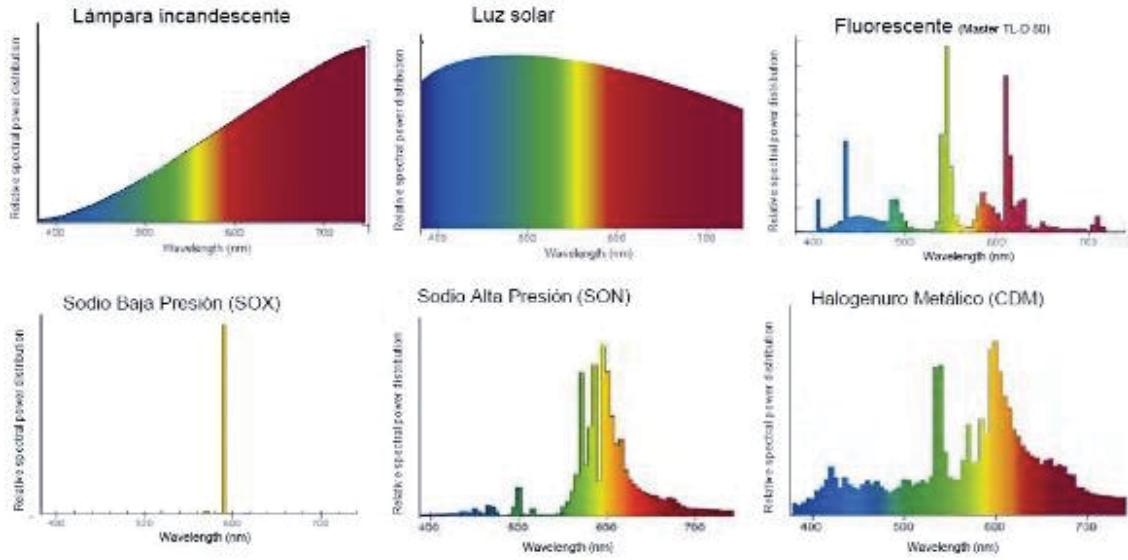


Figura 2-8: Distribución espectral para distintas fuentes de luz.

3 Comisión Internacional de Iluminación

La Comisión Internacional de la Iluminación también conocido como el CIE de su título francés, la Comisión Internacional de l'Eclairage se dedica a la cooperación a nivel mundial y el intercambio de información sobre todos los asuntos relacionados con la ciencia y el arte de la luz y la iluminación, el color y visión, fotobiología y la tecnología de imágenes. Con sólidos fundamentos técnicos, científicos y culturales, el CIE es una organización independiente, sin fines de lucro que sirve a los países miembros sobre una base voluntaria. Desde su creación en 1913, la CIE se ha convertido en una organización profesional y ha sido aceptada como la representación de la mejor autoridad en la materia y como tal es reconocido por la ISO como organismo internacional de normalización.

3.1 Objetivos de la Comisión Internacional de Iluminación.

La CIE es una organización técnica, científica y cultural sin ánimo de lucro cuyos objetivos son:

- Proporcionar un foro internacional para la discusión de todos los asuntos relacionados con la ciencia, la tecnología y el arte en los campos de la luz y la iluminación y para el intercambio de información en estos campos entre los países.
- Desarrollar las normas y procedimientos de la metrología en los campos de la luz y la iluminación básicos.
- Proporcionar orientación en la aplicación de los principios y procedimientos en el desarrollo de normas internacionales y nacionales en los campos de la luz y la iluminación.
- Preparar y publicar normas, informes y otras publicaciones que se ocupan de todas las cuestiones relacionadas con la ciencia, la tecnología y el arte en los campos de la luz y la iluminación.
- Mantener el enlace y la interacción técnica con otras organizaciones internacionales que se ocupan de cuestiones relacionadas con la ciencia, la tecnología, la normalización y el arte en los campos de la luz y la iluminación.

Es importante tener en cuenta que en estos objetivos luz y la iluminación abarca temas tan fundamentales como la visión, la fotometría y colorimetría, que implican radiaciones naturales y artificiales sobre el las regiones visible e ir del espectro UV, y los sujetos de aplicación que abarcan todo el uso de la luz, en interiores y exteriores, incluyendo los efectos ambientales y estéticos, así como los medios para la producción y el control de la luz y la radiación.

A partir de 1999 también los aspectos ópticos, visuales y metrológicos de la comunicación, procesamiento y reproducción de imágenes, utilizando todo tipo de dispositivos de imágenes análogas y digitales, medios de almacenamiento y medios de formación de imágenes están cubiertas por la CIE.

3.2 Divisiones de la Comisión Internacional de Iluminación.

Las actividades técnicas del CIE se llevan a cabo bajo la responsabilidad de las divisiones que cubren cada uno de los sectores de la luz y la iluminación. Una división es presidida por un Director de División. Cada Comité Nacional tiene derecho a designar un miembro con derecho a voto a cada División. Cada División establece Comités Técnicos (CT) para llevar a cabo el programa técnico de la División. El Presidente TC nombra a los miembros del TC de entre los expertos de los países miembros (que no necesitan ser miembro de la división). En la actualidad hay 7 divisiones:

- Visión y color: El estudio de las respuestas visuales a la luz y establecer estándares de respuesta de las funciones, los modelos y procedimientos de especificación relevantes para la fotometría, colorimetría, reproducción del color, el rendimiento visual y la evaluación visual de la luz y la iluminación.
- Medición física de la luz y la radiación: Para estudiar los procedimientos estándar para la evaluación de los rayos ultravioleta, radiación visible e infrarroja, radiación global, y las propiedades ópticas de los materiales y luminarias, así como las propiedades ópticas y el rendimiento de los detectores físicos y otros dispositivos necesarios para su evaluación.
- Medio ambiente interior y diseño de iluminación: Para estudiar y evaluar los factores visuales que influyen en la satisfacción de los ocupantes de un edificio con su entorno, y su interacción con térmica y los aspectos acústicos, y para proporcionar orientación sobre los criterios de diseño relevantes tanto para la iluminación natural y artificial; así como para estudiar las técnicas de diseño, incluyendo los cálculos pertinentes, para la iluminación interior de los edificios; la incorporación de estos hallazgos y los de otras divisiones de la CIE en guías de iluminación de interiores en general, para determinados tipos de interiores y para problemas específicos en la práctica iluminación interior.
- Iluminación y señalización para transporte: Para el estudio de la iluminación y de señalización visual y requisitos de información de transporte y tráfico, tales como carreteras y la iluminación del vehículo, delineación, la firma y la señalización para todos los tipos de vías públicas y todo tipo de usuarios y vehículos, y ayudas visuales para los modos distintos de transporte por carretera.
- Iluminación exterior y otras aplicaciones: Para estudiar los procedimientos y preparar guías para el diseño de iluminación para áreas exteriores de trabajo, iluminación de

seguridad, iluminación de inundación, peatonales y otras áreas urbanas sin tráfico motorizado, áreas deportivas y recreativas, y para la iluminación de minas.

- Fotobiología y Fotoquímica: Para estudiar y evaluar los efectos de la radiación óptica en los sistemas biológicos y fotoquímicos (exclusivo de la visión).
- Imagen y tecnología: Para el estudio de los procedimientos y preparar guías y normas relativas a los aspectos ópticos, visuales y metrológicos de la comunicación, procesamiento y reproducción de imágenes, utilizando todo tipo de dispositivos analógicos y la imagen digital, medios de almacenamiento y medios de formación de imágenes.

3.3 Modelos de Color.

Como solución a los problemas de evaluación del color se crearon modelos de medición para poder cuantificarlo y expresarlo numéricamente, cuyos principios están basados en la cantidad de luz reflejada por el objeto.

3.3.1 Valores Triestímulos y Coordenadas Cromáticas.

La organización internacional de la luz y color CIE (Commission Internationale de L'Eclairage o Comisión Internacional de Iluminación) desarrolló dos importantes sistemas para la evaluación de color en términos de números basados en la medición de reflectancia espectral de la muestra.

El primer sistema fue creado en 1931 se refiere a los valores triestímulos (X Y Z) y el segundo sistema creado en 1976 referido los espacios de color ($L^* a^* b^*$), siendo estos sistemas los más utilizados en la actualidad por los instrumentos de medición de color (Figura 3-1).

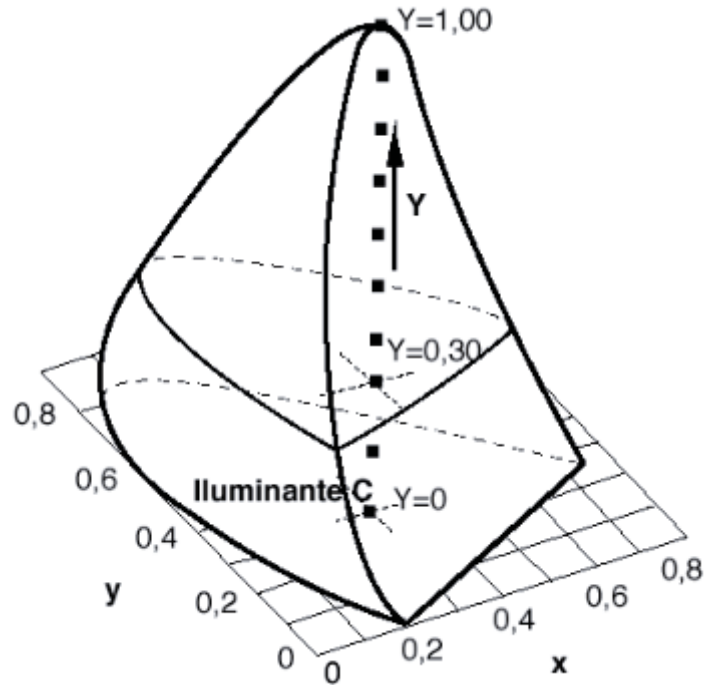


Figura 3-1: Gráfico de Coordenadas de Valores Triestímulos XYZ.

El sistema CIE de determinación del color se basa en la elección de tres primarios como colores patrón para la formación por mezclas aditivas de todos los demás colores del espectro. Los valores triestímulos son las cantidades de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) que permiten describir un estímulo cromático. Los triestímulos CIE se llaman X, Y y Z.

$$X = k * \sum_{380}^{750} S(\lambda) * R(\lambda) * \bar{x}(\lambda) \quad (3-1)$$

$$Y = k * \sum_{380}^{750} S(\lambda) * R(\lambda) * \bar{y}(\lambda) \quad (3-2)$$

$$Z = k * \sum_{380}^{750} S(\lambda) * R(\lambda) * \bar{z}(\lambda) \quad (3-3)$$

$$K = \frac{100}{\sum_{380}^{750} S(\lambda) * y''(\lambda)} \quad (3-4)$$

Donde:

- $S(\lambda)$ = Energía espectral relativa del iluminante CIE.
- $R(\lambda)$ = Factor de reflectancia del objeto.
- $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ = Funciones de mezcla definidas por el observador patrón para cada una de las longitudes de onda visibles.
- K = La luminancia relativa de una muestra se indica directamente por el valor de Y , asignando un valor de Y igual a cero para un negro absoluto y un valor igual a cien para un blanco perfecto lo que define la constante.

Para la determinación de las coordenadas de cromaticidad se tienen las ecuaciones:

$$\bar{x} = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (3-5)$$

$$\bar{y} = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (3-6)$$

$$\bar{z} = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (3-7)$$

Por lo tanto, es imposible encontrar tres primarios reales tales que por medio de sus mezclas aditivas puedan obtenerse todos los colores existentes. Podemos comprobarlo en un sistema real reproductivo de mezclas aditivas como es la televisión, en la que sólo puede verse una gama limitada de colores.

En 1931 cuando se especificó el sistema CIE se decidió utilizar tres primarios imaginarios tales que los valores triestímulos X , Y y Z fueran siempre positivos para todos los estímulos reales posibles (esa consideración de evitar el signo menos tenía mucha importancia en los días en que no existían ordenadores. La CIE diseñó su sistema de forma que uno de sus valores triestímulos el valor Y fuera directamente proporcional a la luminancia del total de la mezcla aditiva, esto es, que tuviera una sensibilidad espectral que correspondiera a la sensibilidad luminosa del ojo humano. La luminancia Y de una fuente luminosa se obtiene de forma continua por integración de su Distribución de Potencia Espectral (SPD) respecto a su función de mezcla de color para un Observador CIE Estándar (Figura 3-2).

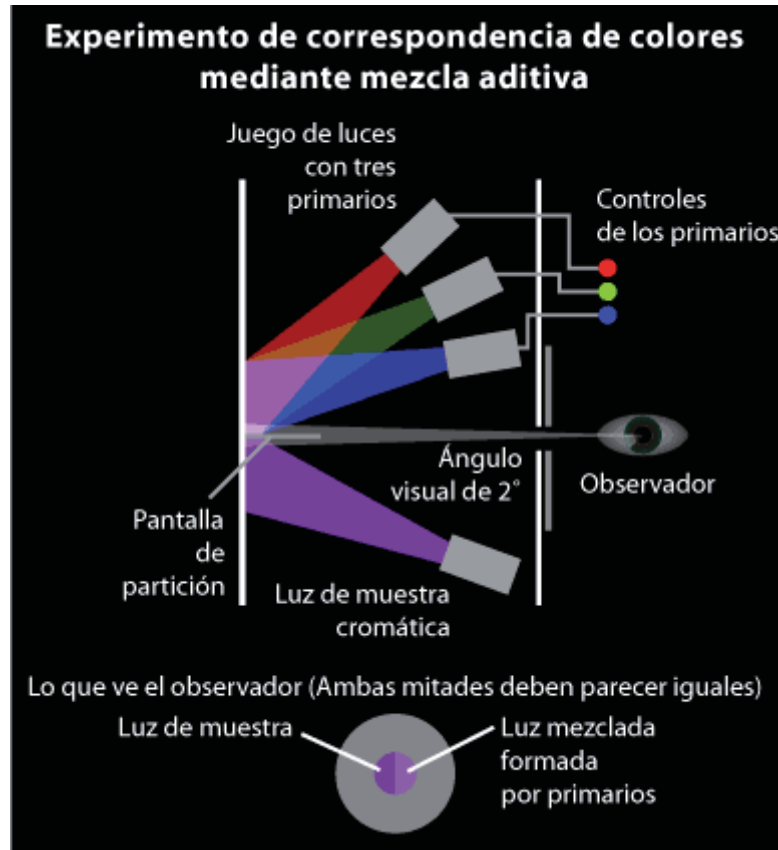


Figura 3-2: Experimento del Observador CIE Estándar.

Cuando a la luminancia Y se añaden las otras dos componentes X y Z (sin luminancia), calculadas por medio de la integración de las otras dos ecuaciones de obtención del color \bar{X} e \bar{Y} se obtienen las componentes conocidas como valores triestímulos XYZ que tienen la propiedad de llevar incluidas las características espectrales de la visión humana del color.

La tríada de colores primarios (rojo, verde, azul) que utiliza el sistema CIE XYZ son colores que en realidad no existen, son colores imaginarios a los que se llega a través de transformaciones matemáticas (Ecuaciones). En realidad ni siquiera son visibles pues tanto al rojo como al azul se les asigna luminancia cero, ya que toda la luminancia se le adjudica al imaginario verde primario. Así pues un color cualquiera vendrá determinado por sus componentes de rojo y azul más la luminancia que tenga el verde. La especificación de un color en el sistema CIE se escribe así: CIE (x , y , Y) añadiendo el nombre del iluminante si el objeto no es luminoso. Conforme disminuya la luminosidad Y disminuirá el locus, siendo menor el número de colores disponibles.

3.3.2 Sistema de Medición CIE 1976.

Espacios de color (L^* a^* b^*):

Este sistema de medición también es conocido como CIELAB, expresa la luminosidad L^* (claro u oscuro); a^* y b^* (Figura 3-3) indican la orientación del color. Para la determinación de los espacios de color L^* a^* b^* se tienen las ecuaciones:

$$L^* = 116 * \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^\beta - 16 \quad \text{si} \quad \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > 0,008856 \quad (3-8)$$

$$L^* = 903,29 * \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^\beta - 16 \quad \text{si} \quad \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq 0,008856 \quad (3-9)$$

$$a^* = 500 * \left[\left(\frac{Y}{X_n}\right)^\beta - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^\beta \right] \quad (3-10)$$

$$b^* = 200 * \left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^\beta - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^\beta \right] \quad (3-11)$$

Donde:

- L^* = Luminosidad.
- a^* = Tendencia del color al rojo (positivo) o al verde (negativo).
- b^* = Tendencia del color al amarillo (positivo) o al azul (negativo).
- X, Y, Z = Valores triestímulo CIE calculados para el objeto a caracterizar.
- $X_n Y_n Z_n$ = Valores X, Y, Z , para el blanco de referencia elegido.

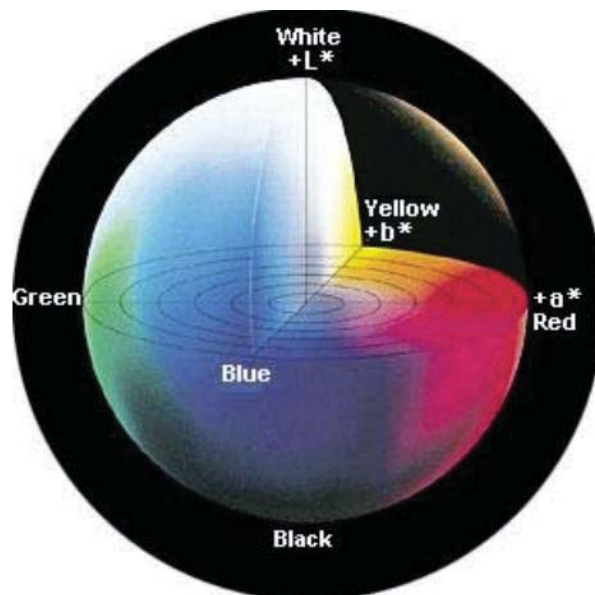


Figura 3-3: Diagramas de Espacios de Color (L^* , a^* , b^*).

Para la aplicación de estos sistemas de medición de color la CIE consideró diferentes tipos de iluminantes ya que cada fuente de luz viene caracterizada por la energía que emite en las diferentes longitudes de onda, pero si se enfatiza en los más comunes estos son:

Iluminante A: El iluminante A se basa en la fuente más usual de luz artificial la bombilla incandescente de filamento de tungsteno. Su distribución espectral se corresponde con la de un cuerpo negro a unos 2.856 K (Figura 3-4).

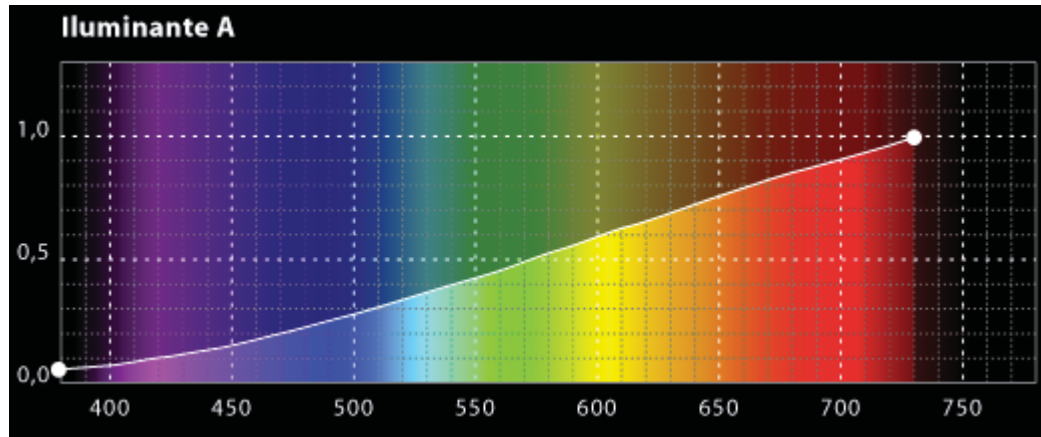


Figura 3-4: Diagrama de Distribución Espectral para el Iluminante A.

Iluminante C: Luz solar de día (promedio) con una temperatura de color de 6774 K, no incluye la radiación ultravioleta (Figura 3-5).

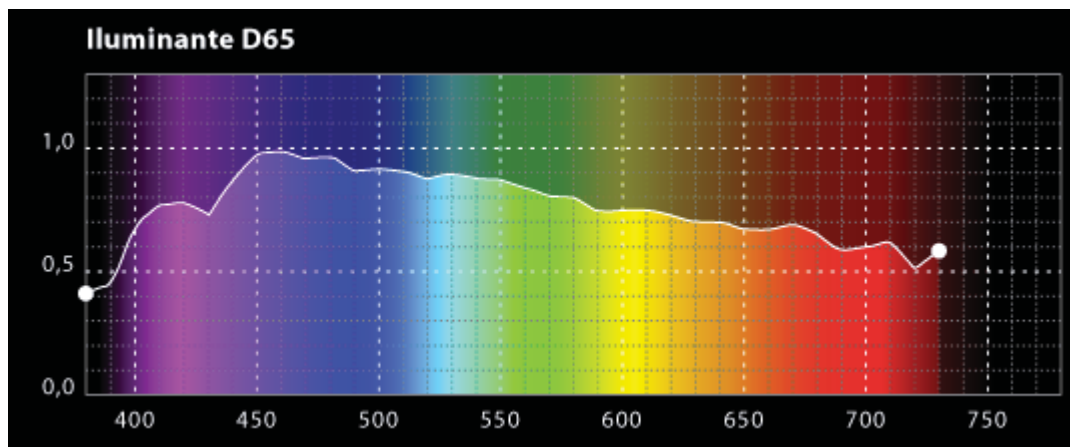


Figura 3-5: Diagrama de Distribución Espectral para el Iluminante D.

Otra consideración importante es el observador; definido como la visión normal de color de la media de la población humana, ya que dependiendo del ángulo de observación la sensibilidad del ojo cambia, por lo que la CIE definió en 1931 un observador a 2° (grados) y en 1964 definió el observador de 10° como se indican en la Figura 3-6.

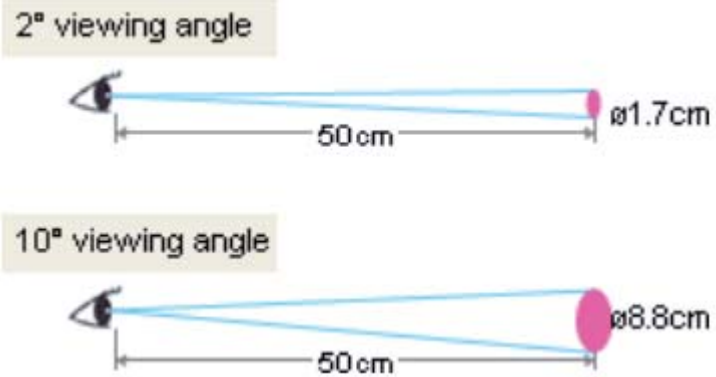


Figura 3-6: Observador y Ángulos de Observación.

En el reporte técnico de colorimetría CIE 15 (2004) se dan las recomendaciones para la medición de color y se encuentran publicados los valores de distribución espectral para cada tipo de iluminante y para cada observador que son utilizados en los cálculos de color [14].

4 Algoritmo del Índice de Reproducción Cromática (CRI).

4.1 Algoritmo Clásico del Rendimiento del Color.

El algoritmo actual sobre rendimiento del color se basa en la publicación CIE 13.35 [1]. La Figura 4-1 resume esquemáticamente el algoritmo general, que se puede dividir en 6 etapas principales:

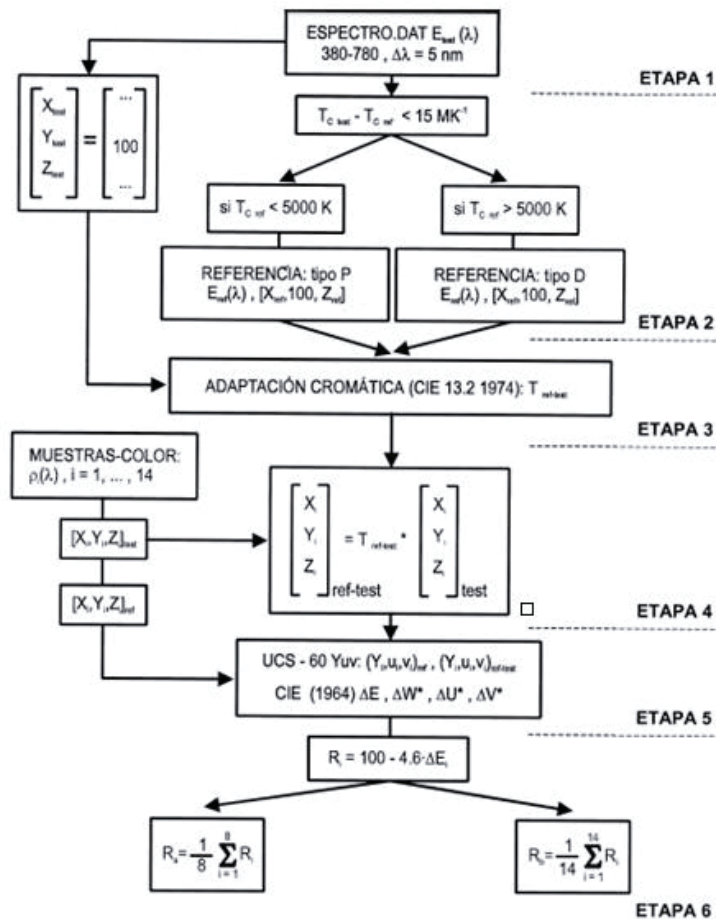


Figura 4-1: Algoritmo de Desarrollo del Rendimiento del Color.

La caracterización colorimétrica de la fuente test se realiza siempre mediante el instrumental adecuado de medida del color como por ejemplo con un tele-espectro radiómetro y una muestra de tipo Halon como patrón blanco de referencia. Un muestreo satisfactorio de la radiancia espectral $L(\lambda)$ medida a intervalos de 5 [nm] entre 380 [nm] y 750 [nm]. Con estos datos, se procede a calcular mediante el observador patrón CIE-1931[2] los valores triestímulo absolutos X_{test}, Y_{test} en (cd/m^2) , y Z_{test} que, posteriormente se normalizan de forma que $Y_{test} = 100$. La búsqueda de la fuente de referencia $E_{ref}(\lambda)$ es un sub-algoritmo que se desdobra en dos opciones posibles: encontrar una fuente o iluminante tal que su similitud cromática con la fuente test sea menor que $15MK^{-1}$, o que la diferencia de croma $\Delta C = (\Delta u^2 + \Delta v^2)^{\frac{1}{2}} < 0,01$ unidades en el sistema UCS-1960. Si la temperatura correlacionada de color (TC) del iluminante de referencia seleccionado es inferior a 5000 K, la distribución espectral $E_{ref}(\lambda)$ de este iluminante tipo P se rige por el radiador absoluto o de Planck. Pero si la temperatura correlacionada de color (TC) del iluminante de referencia seleccionado es superior o igual a 5000 K, entonces la distribución espectral $E_{ref}(\lambda)$ de este iluminante tipo D se calcula a partir de unas fórmulas empíricas donde se extrae primero las coordenadas cromáticas (xD, yD) de la fase de luz diurna D seleccionada, y, posteriormente estas variables cromáticas sirven para formar una combinación lineal de funciones espectrales, concretamente tres funciones base $S_0(\lambda), S_1(\lambda)$ y $S_2(\lambda)$ bien tabuladas, que dan definitivamente el espectro $E_{ref}(\lambda)$ a utilizar en el resto del algoritmo de R. Con la distribución de potencia espectral $E_{ref}(\lambda)$ se calculan también mediante el observador patrón CIE-1931 los valores triestímulo relativos ($X_{ref}, Y_{ref} = 100, Z_{ref}$) del iluminante de referencia seleccionado.

La determinación de la adaptación cromática entre la fuente test y el iluminante de referencia es la descripción de una igualación asimétrica de color, las condiciones de igualación no son las mismas entre la muestra test y la muestra de referencia. La teoría más sencilla sobre la adaptación cromática y su uso para las igualaciones asimétricas se debe desde principios de siglo a Von Kries. En ella se estableció ya el concepto de color correspondiente como aquella terna de valores triestímulo $(X_i, Y_i, Z_i)_{ref-test}$ que proporciona bajo condiciones diferentes de iluminación y de contorno la misma valoración psicofísica o perceptual de color que la misma muestra coloreada i cuando está caracterizada por una terna diferente de valores triestímulo $(X_i, Y_i, Z_i)_{test}$ bajo otras condiciones de iluminación. Esto significaba que la transformación de adaptación cromática más sencilla relaciona de forma matricial las ternas $(X_i, Y_i, Z_i)_{test}$ y $(X_i, Y_i, Z_i)_{ref-test}$ para una muestra coloreada i (Ecuación 4-1). No obstante, aunque el algoritmo actual de R sigue utilizando una matriz de fundamentales anticuada como la de los primarios de Judd, la transformación de adaptación cromática $T_{ref-test}$ es una variación más compleja, con datos empíricos de los años 60, de una adaptación cromática clásica o de Von Kries.

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_{i\ ref-test} \end{bmatrix} = T_{ref-test} * \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_{i\ test} \end{bmatrix} \quad ; \text{ con } T_{ref-test} = M^{-1} * D_{ref-test} * M \quad (4-1)$$

$$\text{con } M \text{ matriz de fundamentales, } M_{JUDD} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0.45996 & 1.35879 & 0.10117 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$\text{y con } D_{ref-test} = \begin{bmatrix} \frac{L_{ref}}{L_{ref}} & 0 & 0 \\ \frac{M_{ref}}{M_{ref}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S_{ref}}{S_{ref}} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

$$\text{donde } \begin{bmatrix} L_k \\ M_k \\ S_k \end{bmatrix} = M * \begin{bmatrix} X_k \\ 100 \\ Z_k \end{bmatrix} \quad k = \text{ref o test} \quad (4-4)$$

El conjunto de muestras estándar de tipo Munsell (Figura 4-2) se eligen como una muestra aparentemente representativa del conjunto infinito de reflectancias espectrales posibles. El conjunto se subdividirá posteriormente en uno compuesto por las primeras 8 muestras, todas ellas con claridad o valor V = 6 y croma C intermedio, para calcular el índice general R_a ; y el otro compuesto por todas las 14 muestras, en las que las 6 últimas varían claramente en claridad o value V.

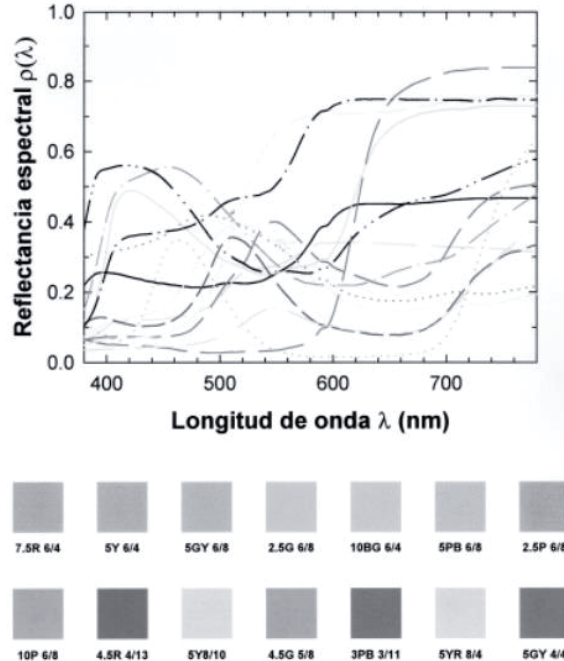


Figura 4-2: Reflectancias espectrales de las 14 muestras Munsell (tono H / claridad V / croma C).

Con la reflectancia espectral $\rho(\lambda)$ tabulada de cada una de las 14 muestras Munsell se calculan mediante el observador patrón CIE- 1931 los valores triestímulo de las mismas bajo la fuente test $(X_i, Y_i, Z_i)_{test}$ y el iluminante de referencia $(X_i, Y_i, Z_i)_{ref}$. Llegado este punto, es cuando se calculan mediante la transformación de adaptación cromática impuesta por la iluminación de referencia los 14 colores correspondientes $(X_i, Y_i, Z_i)_{ref\ test}$ de las 14 muestras Munsell. Tras estos cálculos, la siguiente fase del algoritmo de R es calcular las diferencias psicofísicas de color $\Delta W^*, \Delta U^*, \Delta V^*$ y ΔE en el espacio perceptualmente uniforme CIE-1964 basado en el espacio UCS-1960 (Y, u, v) [3], donde:

$$u = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad , \quad v = \frac{6y}{X + 15Y + 3Z} \quad (4-5)$$

$$W^* = 25\sqrt[3]{Y} - 17 \quad , \quad U^* = 13W^*(u - u_n) \quad , \quad V^* = 13W^*(v - v_n) \quad (4-6)$$

Con n: iluminante

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta W^*)^2 + (\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2} \quad (4-7)$$

Con $\Delta \equiv$ (ref-test)-ref

La definición del índice especial de rendimiento en color R_i se hace de acuerdo con una normalización a 100 de las diferencias de color ΔE calculadas anteriormente (Ecuación 4-3). Entonces, se calculan los índices generales R_a y R_b , sobre el promedio de las 8 primeras muestras Munsell (todas ellas con value V = 6) para R_a y todo el conjunto de 14 muestras para R_b . Es decir, si la fuente test fuera una simuladora perfecta de la fuente de referencia, todas las diferencias de color ΔE calculadas serían cero, entonces todos los índices R_i, R_a y R_b valdrían 100, el valor de perfección. El factor de peso 4,6 se seleccionó para que una fuente o lámpara fluorescente de tipo “blanco cálido”, que intenta reproducir las cualidades cromáticas del iluminante A, obtuviera un índice $R_a = 50$, pero $R_b = 37$ debido sobre todo a las desviaciones colorimétricas de las muestras de alto croma.

$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i \quad \text{para } i = 1, \dots, 14$$

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_1^8 R_i \quad , \quad R_b = \frac{1}{14} \sum_1^{14} R_i \quad (4-8)$$

Del análisis pueden extraerse fundamentalmente las consideraciones siguientes: Utilización de un modelo de adaptación cromática no actualizado, uso de las coordenadas uniformes UCS-1960 (u, v), ya en desuso, aplicación del espacio uniforme CIE-1964 (W^*, U^*, V^*), también ya en desuso, cálculo de la diferencia de color ΔE a partir de CIE-1964 (W^*, U^*, V^*).

4.2 Desarrollo del Algoritmo.

4.2.1 Objetivo

Encontrar una especificación que establezca un método (recomendado por CIE) para medir y especificar colores. Las propiedades de representación de las fuentes de luz basadas en los cambios de color resultantes de los objetos de prueba, llamado Prueba de Color. Este método debe ser considerado como el método fundamental para la evaluación de la producción de color para las propiedades de las fuentes de luz y se recomienda para las pruebas de tipo, así como para lámparas.

4.2.2 Ámbito de Aplicación.

Esta especificación se aplica a la mayoría de los iluminantes de uso general (por ejemplo, lámparas de filamento de tungsteno, lámparas fluorescentes tubulares y compactas, y todos los demás tipos de lámparas eléctricas de descarga gaseosa excepto fuentes de radiación predominantemente monocromática, como sodio a baja presión). Este método también se puede aplicar a la luz del día modificada.

4.2.3 Procedimiento.

a) Observaciones generales

Para aplicar el método de prueba de color recomendado, el color resultante se desplaza para una coloración de prueba convenientemente escogida. Para hacer esto, primero deben determinarse los valores triestímulos de los distintos colores de ensayo tanto para el iluminante de referencia como para el iluminante que será probado.

El siguiente paso consiste en transformar estos valores triestímulos en coordenadas del Diagrama de 1960 UCS *[3]. El cambio de color adaptativo se explica por una transformación de Von Kries con las primarias dadas por Judd. La diferencia entre las cromaticidades del iluminante probado y el iluminante de referencia debe ser lo suficientemente pequeño para la aproximación del efecto de la adaptación cromática. A continuación, las diferencias de color de las muestras de color de ensayo se calcularán en el uniforme de 1964 espacio [3].

b) Iluminador de referencia

La valoración de las propiedades de representación cromática de una fuente de luz se hará siempre respecto del iluminante de referencia, que puede definirse matemáticamente. Este iluminante de referencia deberá ser de la misma o casi la misma cromaticidad que la lámpara a probar. A menos que se especifique lo contrario, el iluminante de referencia para fuentes de luz con color correlativo, temperatura inferior a 5000 K será un radiador planckiano y de 5000 K una serie de distribuciones de potencia espectral de las fases de luz diurna [3]. Para casos especiales, el CIE u otros productos de iluminación estándar específicos pueden servir como iluminante de referencia. En todos los casos una descripción completa en términos de distribución de potencia espectral para intervalos de longitud de onda no superior a 10 [nm] sobre el espectro visible.

c) Tolerancias para el iluminante de referencia

El iluminante de referencia se pretende que sea de la misma o casi la misma cromaticidad que la luminaria para ser probado. Se seleccionará de modo que la diferencia de cromaticidad (DC) sea inferior a $5,4 * 10^{-3}$. Esta tolerancia se sugiere como un límite práctico de la diferencia entre la luminaria a ensayar (u_k, v_k) y el iluminante de referencia (U_r, V_r) se calculará como:

$$Dc = \sqrt{[(U_k - U_r)^2 + (V_k - V_r)^2]} \quad (4-9)$$

La tolerancia de $DC = 5,4 * 10^{-3}$ corresponde a aproximadamente 15^{-1} MK (mega kelvin recíproco) a lo largo del Locus planckiano. La curva de Planck o lugar geométrico del cuerpo negro es la ruta de acceso o locus que el color de una fuente incandescente de cuerpo negro tomaría en un determinado espacio de cromaticidad. Se va desde el fondo rojo a bajas temperaturas a través de naranja, amarillento, blanco, y finalmente al azulado blanco a temperaturas muy altas. Un espacio de color es un espacio tridimensional; es decir, un color se especifica por un conjunto de tres números (el CIE coordenadas X, Y, y Z, u otros valores tales como la tonalidad, colorido, y luminancia), que especifica el color y el brillo de un particular. Cromaticidad es un color proyectado en un espacio de dos dimensiones que ignora el brillo. La curva de Planck (Figura 4-3), la ruta en el que el color de un cuerpo negro toma los cambios de temperatura, se muestran a menudo en este espacio de cromaticidad estándar.

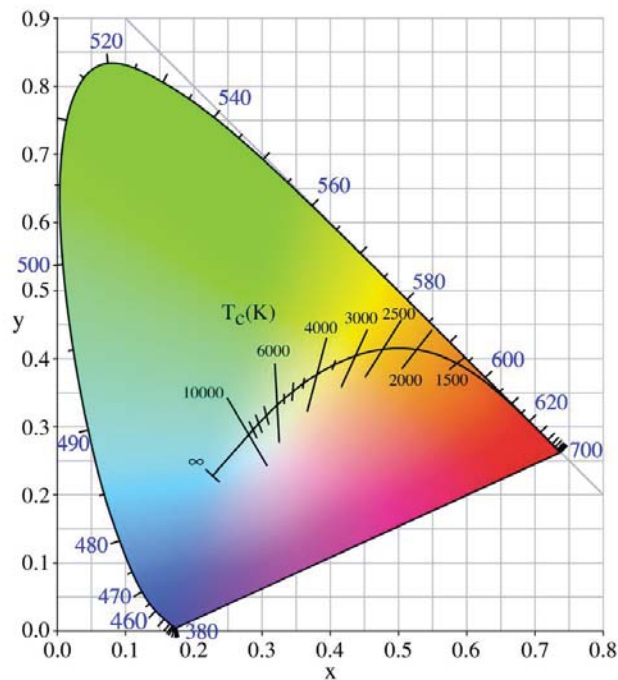


Figura 4-3: Curva de Planck en el diagrama de cromaticidad CIE 1931.

Si la diferencia de cromaticidad entre la lámpara a ensayar y el iluminante de referencia es mayor que la tolerancia de $DC = 5,4 * 10^{-3}$ se puede esperar que los índices de rendimiento del color resultantes se vuelven menos precisos.

d) Muestras de Color de Prueba

Un conjunto de ocho muestras de color de prueba CIE-1974 [1] (T_i , $i = 1 \dots 8$) especificado por la luminancia espectral. Estas muestras cubren el círculo de tono, son moderadas en saturación y también son aproximadamente iguales en ligereza (Figura 4-4). Los datos correspondientes a otras muestras de color de prueba CIE-1974 (q , $i = 9 \dots 14$) que representan un color rojo, amarillo, verde y azul y que representan los colores de tez y follaje, varían ampliamente en ligereza y saturación.

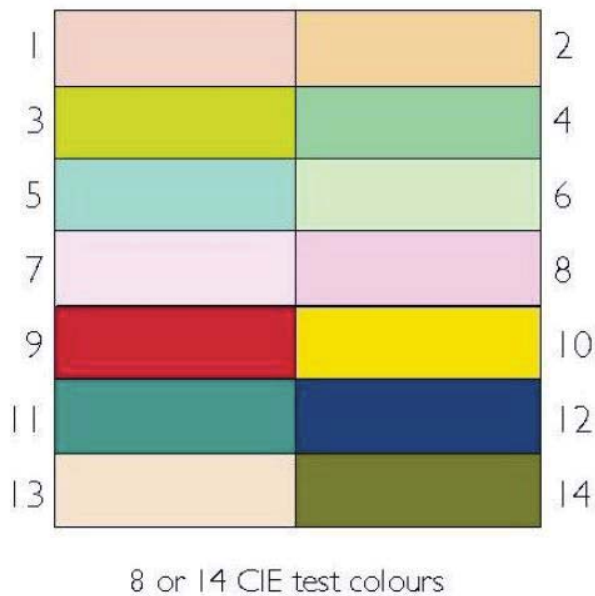


Figura 4-4: Set de Colores de Prueba.

e) Determinación de los valores CIE 1931, valores triestímulos de las muestras de color de prueba

A partir de una medida espectro radiométrica adecuadamente precisa de la lámpara a ensayar combinada con los datos del factor de radiancia espectral de las muestras de color de la prueba CIE-1974 [8] tal como se indica en los valores triestimulados CIE 1931 X, Y, Z, CIE 1931 coordenadas de cromaticidad x, y [7] de las muestras de prueba y las fuentes de luz respectivamente, se determinarán todas las cromaticidades calculada o medidas (Figura 4-5).

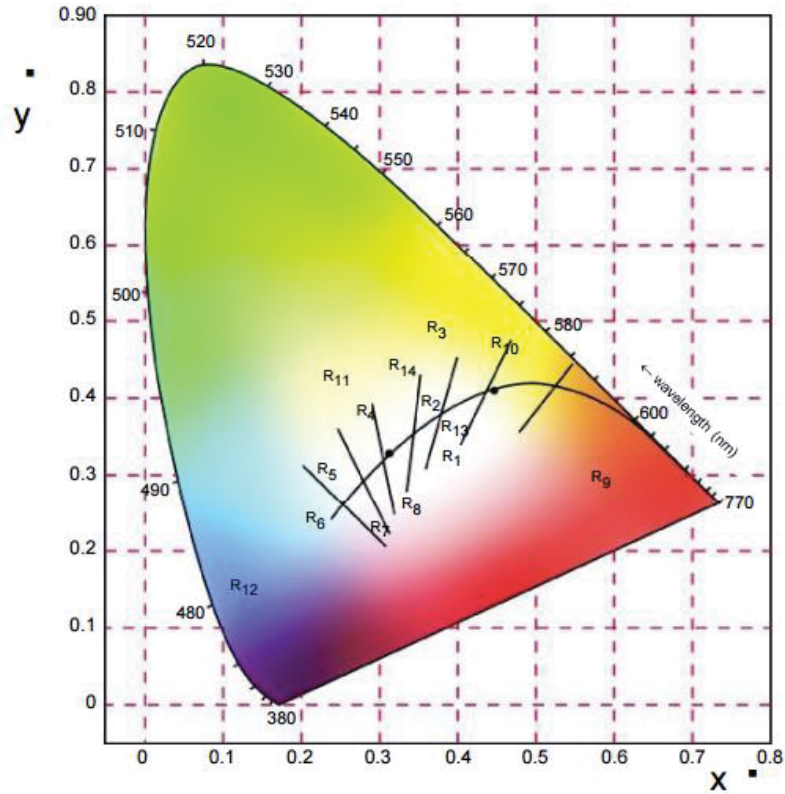


Figura 4-5: Distintos Puntos de Prueba realizada.

f) Transformación en 1960

Los datos colorimétricos [3] deben ahora ser transformados de los valores CIE 1931 (X, Y, Z, x, y) a (u, v) [5]. Coordenada del diagrama 1960 por medio de las siguientes fórmulas:

$$u = 4xI(X + 15Y + 3Z) \quad (4-10)$$

$$v = 6yI(X + 15Y + 3Z)$$

$$u = 4xI(-2X + 12Y + 3)$$

$$v = 6yI(-2X + 12Y + 3)$$

g) Consideración de adaptación (percibida) de color

Para dar cuenta del cambio de color adaptativo debido al estado diferente de la adaptación cromática bajo la lámpara que se someterá a prueba k y por debajo del iluminante de referencia se aplicarán las siguientes fórmulas:

$$u'_{k,i} = \frac{10,872 + 0,404 * \frac{c_r}{c_k} * c_{k,i} - 4 * \frac{d_r}{d_k} * d_{k,i}}{16,518 + 1,481 * \frac{c_r}{c_k} * c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} * d_{k,i}} \quad (4-11)$$

$$v'_{k,i} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 * \frac{c_r}{c_k} * c_{k,i} - \frac{d_r}{d_k} * d_{k,i}} \quad (4-12)$$

Los valores $u'_{k,i}$ y $v'_{k,i}$ corresponden a las coordenadas de cromaticidad de una muestra de color de ensayo i después de la consideración del cambio de color adaptativo, obtenido por el moviendo la fuente de luz a ensayar a la del iluminante de referencia, $u'_k = u_r$ y $v'_k = v_r$ y no deben ser mezcladas con las coordenadas CIE 1976 coordenadas u' y v' . Las funciones c y d para el uso en la (Ecuación 4-6) se calcularán para la fuente de luz a ser probada (u_k, v_k) (dando c_k, d_k) y las muestras de color de prueba i bajo la fuente de luz a ser probada $u_{k,i}$ y $v_{k,i}$ (dando $c_{k,i}$ y $d_{k,i}$) de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$c = \frac{1}{v}(4 - u - 10v) \quad (4-13)$$

$$d = \frac{1}{v}(1,708v + 0,404 - 1,481u) \quad (4-14)$$

h) Transformación en 1964 Coordenadas Espaciales Uniformes

Los datos colorimétricos deben ahora ser transformados en las coordenadas del espacio uniforme de 1964 usando siguientes fórmulas:

$$W_{r,i}^* = 25(Y_{r,i})^{\frac{1}{3}} - 17; \quad W_{k,i}^* = 25(Y_{k,i})^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (4-15)$$

$$U_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(u_{r,i} - u_r) \quad U_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(u'_{k,i} - u'_k) \quad (4-16)$$

$$V_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(v_{r,i} - v_r); \quad V_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(v'_{k,i} - v'_k) \quad (4-17)$$

Los valores $U'_k = U_r$ y $v'_k = v_r$, son las coordenadas de cromaticidad de la fuente de luz a ser probada después de la consideración del cambio de color adaptativo. Los valores $Y_{r,i}$ y $Y_{k,i}$ deben normalizarse de modo que $Y_r = Y_k = 100$.

i) Determinación del cambio de color resultante

Para calcular la diferencia entre el correlato del color percibido de una muestra de color de ensayo i iluminado por la fuente de luz a ensayar k y el de la misma muestra iluminada por el Iluminante de referencia r de 1964 obtenemos la fórmula de diferencia de color:

$$\Delta E_{i=} = \sqrt{(U_{r,i}^* - U_{k,i}^*)^2 + (V_{r,i}^* - V_{k,i}^*)^2 + (W_{r,i}^* - W_{k,i}^*)^2} \quad (4-18)$$

$$\Delta E_{i=} = \sqrt{(\Delta U_i^*)^2 + (\Delta V_i^*)^2 + (\Delta W_i^*)^2}$$

El índice de representación de color se designa con la letra R . Los "índices de representación de color especiales" se designan con el símbolo R_i ($i = 1, 2, 3 \dots$ correspondiente al número de cualquier muestra de color de prueba individual que se pueda estudiar). El índice de rendimiento de color general derivado se designa con el símbolo R_a .

j) Cálculo del índice de rendimiento de color especial

El índice de rendimiento de color especial R_i , basado en el cambio de color resultante obtenido de la fórmula anterior ΔE_i para cualquier muestra de color de prueba individual, se obtendrá mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$R_i = 100 - 4,6\Delta E_i \quad \text{para } i = 1, \dots, 14$$

redondeando el resultado al número entero más cercano. El índice ha sido escalado de modo que 100 representa la identidad de las coordenadas de color de una muestra de color de prueba bajo la fuente a ensayar y su patrón de referencia y un índice de rendimiento de color general de aproximadamente 50 se asigna a una lámpara fluorescente blanca de advertencia estándar usada en estudios previos realizados con referencia a una lámpara incandescente. Este ajuste de escala se logra mediante el uso del factor 4,6 de la ecuación.

k) Cálculo del Índice de Rendimiento de Color General

El índice de rendimiento de color general R_a debe derivarse como la media aritmética de los ocho índices de representación de color especial R_i para las muestras de color de ensayo CIE-1974 $n= 1 \dots 8$.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (4-19)$$

Discusión y conclusiones

Considerando que el índice de reproducción cromático (CRI) para fuente de luz puede ser definida como la medida utilizada en relación a una fuente de luz para medir su capacidad de mostrar los colores de un objeto y/o material y así encontrar la diferencia entre el color conocido y el color real. Se ha dilucidado, mediante la adquisición, la medida, la representación y el procesado de la información, su finalidad y cometido, y junto a ello, las particularidades y ventajas que sugiere este sistema de análisis cromático.

La carta de colores Munsell representa todas las cromaticidades visibles por una persona promedio. Esta región se conoce como la gama de la visión humana. La gama de todas las cromaticidades visibles en la carta la comisión internacional de iluminación CIE la representa como la figura en forma de herradura de caballo visto en el capítulo 4. El nicho espectral corresponde a luz monocromática (con cada punto representando una tonalidad pura de una sola longitud de onda), con las longitudes de onda mostradas en nanómetros. El borde recto en la parte baja de la gama es conocida como la línea del púrpura. Estos colores, a pesar de que se encuentran al borde de la gama, no existen realmente en la luz monocromática. Los colores menos saturados aparecen en el interior del esquema, con el blanco hacia el centro.

Además, si se escoge cualquier par de puntos de color en la carta cromática, todos los colores que aparezcan en línea recta entre los dos puntos pueden ser formados a través de la mezcla de estos dos colores. Esto conlleva a deducir que la gama de los colores debe ser de forma convexa. Todos los colores que pueden ser formados mezclando tres primarios pueden ser encontrados dentro del triángulo formado por los puntos iniciales en la carta de cromaticidad (y de la misma manera, para múltiples fuentes).

Al apreciar distintas composiciones espectrales de distintas fuentes de iluminación, el color percibido depende de la distribución espectral de la luz, si prevalecen las radiaciones con longitudes de ondas largas todo se verá rojizo, si prevalecen las longitudes de onda intermedias del espectro el color se percibirá amarillo-verde, o si las radiaciones están concentradas en la parte baja del espectro lo percibido estará condicionado por el color azul. Por lo tanto, cuanto más continua y pareja es la emisión de la radiación electromagnética en función de las distintas longitudes de onda, tal como se representa en el diagrama de distribución de energía espectral ideal, mejor será su capacidad de reproducir los colores con naturalidad. Por ello, para determinar el valor patrón de “CRI = 100”, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) eligió a la lámpara

incandescente. La emisión de luz de esta lámpara contiene un espectro llamado “continuo”, es decir que su diagrama de distribución espectral contiene a todos los colores del espectro visible (si bien no en la misma proporción). Por contraste, una lámpara fluorescente tradicional tiene un espectro discontinuo por lo cual su índice de reproducción cromática (CRI) es bajo, generalmente alrededor de 65. Cabe destacar que si se analiza el gráfico de longitudes de onda para cada color (verde, azul y rojo), podemos inferir que los colores puros no existen, y que todos son una mezcla de colores donde existe una predominancia en sus puntos más altos y se le asigna finalmente el color correspondiente.

Por otro lado, y no siendo menos importante para evaluar el índice de reproducción del color esta la temperatura del color, en donde se debe enfatizar que el CRI no determina la temperatura del color ni viceversa. Pero para hacer una comparación objetiva del CRI de dos fuentes de luz, es preferible que ambas fuentes posean la misma temperatura de color. Por ejemplo, una lámpara incandescente de 3000K tiene en el papel un CRI mayor (cercano a 100 o 100) al de un tubo fluorescente también de 3000K (generalmente en el rango de 60 y 70). La luz natural del sol está entre los 5000K a 6000K y tiene, obviamente, un CRI de 100 y sería ideal que sea tomada siempre como punto de referencia para determinar el CRI de una fuente de luz, lo cual lamentablemente no ocurre. Por lo tanto, el color que reproduce cada luminaria depende de la temperatura de color, mientras que el CRI cerciora cuál es la luminaria que más representa los colores de forma fidedigna a la realidad. Así, a la hora de comparar que lámpara o bombilla tiene mejor CRI deben tener ambas la misma temperatura de color para que no haya discrepancias en las tonalidades resaltadas.

Si se unen ambos términos mencionados anteriormente, temperatura de color y distribución espectral podemos concluir que el dato de temperatura de color hace referencia únicamente al color de la luz, pero no a su composición espectral que resulta decisiva para la reproducción de los colores. Así dos fuentes de luz pueden tener un color muy parecido y poseer al mismo tiempo unas propiedades de reproducción cromática muy diferentes.

Por lo tanto para que el índice de reproducción CRI sea perfecto (CRI = 100), la diferencia de color bajo la fuente de referencia y el color bajo la fuente de la muestra a ensayar valdrían cero y todos los índices correspondientes R_i , R_a y R_b valdrían 100 serían “perfectos”, considerando que la temperatura de color y su distribución de energía espectral fueran casi idénticos, lo cual es muy complejo de lograr.

Por último, se debe enfatizar que, si bien el CRI es una medida que surge de la variación en el color que poseen los objetos alumbrados por distintas fuentes de iluminación y comparados con una fuente ideal de iluminación (o de referencia), no puede considerarse una medida exacta, esto se debe a que muchos factores que corresponden tanto a la luminaria ocupada como al ente que mide pueden sufrir variaciones, principalmente porque las condiciones de precisión no siempre son las mismas.

Bibliografía

- [1] "Colorimetry: Understanding the CIE System", J. SCHANDA, M. MESZAROS, AND G. CzieuL~, Calculating correlated color temperature with a desktop programmable calculator, Color Res. Appl. 3, 65-69 (1978).
- [2] "Tecnología del Color" J. M. Artigas, Pascual Capilla Perea, Jaume Pujol i Ramo.
- [3] CIE Publication No. 15 (E.1.3.1.) 1971: Colorimetry. This Publication has been updated in 1986 to CIE Publication 16.2. Colorimetry, 1987.
- [4] CIE 15. (2004). Technical report, colorimetry. Commission Internationale de L'Eclairage.
- [5] "Principios básicos de medida y percepción de color". Información técnica. HUNTER LAB (2001)
- [6] SCHANDA, J.: "The Effect of Chromatic Adaptation on Colour Rendering". Color Res. Appl., 6, 4, 221-227 (1981).ement de génie chimique, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.
- [7] Commission Internationale de L'Eclairage, 1981. CIE Publication N° 19/2 TC-3.1. An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance Vienna, CIE.
- [8] "Calculation from the original experimental data of the CIE 1931 RGB standard observer spectral chromaticity co-ordinates and color matching functions" By A. D. Broadbent, Dépar.
- [9] "Revision of CIE document 15.2 Colorimetry" of CIE Division 1 "Colour and Vision"pdf 1 cie 1964.

- [10] "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources" CIE 13.3-1995 ISBN 978.3.900734-573 21.
- [11] "Revision of the algorithm of color rendering index of light sources". Francisco M. Verdú y Jaime Pujol.
- [12] "An Assessment method for evaluating colour rendering properties of light sources" by Monica Billger, Björn Löfving, Jörgen Thaug, University of Gothenburg.
- [13] CIE, 1981. CIE 51-1981. "A method for assessing the quality of daylight simulators for colorimetry", 1981.
- [14] CIE, 1986a. CIE S002-1986. CIE standard colorimetric observers, 1986. (Published also as CIEISO 10527:1991).

A Nociones de Iluminación.

A continuación se darán a conocer algunos de los conceptos básicos de iluminación necesarios para poder comprender esta tesis en su totalidad.

A.1 Conceptos Básicos de Iluminación.

Absorción: Se refiere a la cantidad de luz absorbida por un objeto, en lugar de ser reflejada. Las superficies de colores oscuros o mates reflejan menos luz, por lo que tienen una mayor capacidad de absorción.

Adaptación Cromática: Es la capacidad del sistema visual humano para adaptarse a cambios en la iluminación con el fin de preservar la apariencia de los colores de los objetos. Es responsable de la aparición de los colores de los objetos estables a pesar de la amplia variación de la luz que puede ser reflejada por un objeto y observado por los ojos.

Apariencia de color: Está dada por la temperatura de color (grados Kelvin) de las lámparas y repercute directamente en la definición de los aspectos (fríos, cálidos, etc.).

CIE: Comisión Internacional de la Iluminación (conocida por la sigla CIE, de su nombre en francés (Commission Internationale de l'Eclairage) es la autoridad internacional en luz, iluminación, color y espacios de color.

Coeficiente de utilización: Es la proporción del flujo emitido por la lámpara que sale de la luminaria.

Color Corregido: La adición de fósforo en una lámpara para mejorar el Índice de Rendimiento del Color (CRI).

Cuerpo Negro: Un cuerpo negro es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un sistema físico idealizado para el estudio de la emisión de radiación electromagnética. El nombre Cuerpo negro fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862. La luz emitida por un cuerpo negro se denomina radiación de cuerpo negro.

Deslumbramiento: Fuente de luz incómoda y brillante que se vuelve el foco de atención y deja de tener el significado para el cual fue colocado. Puede ser directo o reflejado. Existe el deslumbramiento molesto y el que impide la visión.

Eficacia luminosa de una fuente de luz: Esta relación expresa el rendimiento energético de una lámpara y mide la calidad de la fuente como un instrumento destinado a producir luz por la transformación de energía eléctrica en energía radiante visible. Es el cociente entre el flujo luminoso total emitido y la potencia total consumida por la fuente.

Flujo Luminoso: Energía radiada por una fuente de luz, por segundo, ponderada respecto de la sensibilidad espectral del ojo humano. Expresa la cantidad total de luz emitida por segundo por una fuente de luz.

Iluminación de Baja Tensión: Sistema que utiliza menos de 50V (comúnmente son 12V), en lugar de los 220V. Para convertir la corriente eléctrica al voltaje deseado, se utiliza un transformador específico.

Iluminancia: Es la cantidad de luz, o flujo luminoso, que incide sobre la unidad de superficie. Su unidad es el Lux (lumen por metro cuadrado).

Índice de Rendimiento de Color (CRI o RA): Escala que mide la apariencia del color de la luz con respecto a la luz día. El CRI se utiliza para comparar las características cromáticas de fuentes luminosas. El tipo de rendimiento color varía para cada tipo de necesidad de iluminación. Cuanto mayor sea el índice de rendimiento color mejor será la reproducción cromática.

Intensidad lumínica: Expresa la concentración de luz radiada por segundo en una dirección específica. Su unidad es la candela (cd).

Kelvin: Medida de temperatura de color (K).

Ley de Wien: La ley de desplazamiento de Wien es una ley de la física que establece que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura. Matemáticamente, la ley es:

$$\lambda_{max} = \frac{0,0028976 \text{ m} * K}{T} \quad (A-1)$$

Donde T es la temperatura del cuerpo negro en kelvin (K) y λ_{max} es la longitud de onda del pico de emisión en metros. La constante de Wien está dada en kelvin por metro.

Lumen: Cantidad de luz emitida por una fuente artificial por segundo. Es la unidad del Flujo Luminoso.

Luminancia: Representa la intensidad luminosa emitida por unidad de superficie en una dirección específica. Esta emisión puede ser directa o reflejada.

Lux: Medida del total de luz que alcanza una superficie, un lux es un lumen por metro cuadrado.

Luz Blanca: Se refiere generalmente a la luz con una temperatura de color entre 5000-6250 grados Kelvin y compuesta por el espectro de luz visible completo. Esta luz permite que todos los colores del espectro sean reflejados en la superficie de un objeto, otorgando una buena calidad de rendimiento de color. La luz del día es la fuente más referida a la luz blanca.

Nivel de iluminación: Cantidad de luz incidente sobre una superficie. Se expresa en forma de iluminancia, lux.

Observador Estándar CIE: Es el resultado de experimentos en los que se pidió a los sujetos del mismo que establecieran una igualdad entre longitudes de onda monocromáticas con mezclas de los tres primarios aditivos. De hecho, el observador estándar es una tabla en la que se indica cuánto de cada primario necesita un observador promedio para igualar cada longitud de onda.

Reflexión: Cociente de luz reflejada desde una superficie. La cantidad de luz reflejada depende de la dirección de la luz incidente, su composición espectral y del color de la superficie iluminada.

Temperatura de color: Es el color que se obtiene por comparación del color de una lámpara y una fuente patrón dada por el CIE (Comisión Internacional de Iluminación). Según la temperatura de color una iluminación puede dar una sensación de calidez o frialdad. La unidad de Temperatura Color es el grado Kelvin ($^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}$).

Sistema de color Munsell: Fue elaborado por el pintor y profesor de arte Albert Henry Munsell en sus libros *A Color Notation* (1905) y *Atlas of Munsell Color System* (Atlas del sistema de color Munsell, 1915). Se basa en una disposición ordenada en un sólido tridimensional, en este caso la esfera de Munsell, que depende de la medida de las propiedades del color, las cuales se grafican sobre tres ejes que corresponden a: tono, luminosidad y saturación.

A.2 Tablas.

Tabla_apéndice A-1: Clasificación del Índice de Reproducción del Color.

Clase	Índice de Reproducción de Color CRI	Evaluación
1A	>90	Preciso
1B	80 a 89	Bueno
2A	70 a 79	Moderado
2B	60 a 69	Pobre
3	40 a 59	Muy Pobre
4	<20	Sin Importancia

Tabla_apéndice A-2: Tipos de fuentes luminosas en función de sus características de temperatura de color e índice de reproducción cromática.

Índice de reproducción cromática %	Clase	Cálido < 3.300K	Neutro 3.300K a 5.000K	Frío >5.000K	Criterio aplicación
≥ 90	1 A	Halógenas, fluorescente lineal y compacta, halógenos metálicos y cerámicos	Fluorescente lineal y compacta, halógenos metálicos y cerámicos	Fluorescente lineal y compacta	Principalmente donde la apreciación del color sea un parámetro crítico
80 - 89	1 B	Fluorescente lineal y compacta, halógenos metálicos y cerámicos, sodio blanco	Fluorescente lineal y compacta, halógenos metálicos y cerámicos	Fluorescente lineal y compacta	En áreas donde la apreciación correcta del color no es una consideración primaria pero donde es esencial una buena reproducción de colores
70 - 79	2 A	Halógenos metálicos	Halógenos metálicos	Halógenos metálicos	En áreas donde la apreciación correcta del color es de poca importancia
< 70	2 B, 3 y 4	Mercurio y sodio	Mercurio		En áreas donde la apreciación correcta del color es de poca importancia

Tabla_apéndice A-3: índice de reproducción del color y temperatura para fuentes luminosas.

Fuentes Luminosas	Temperatura de color K	CRI
Cielo azul	10.000 a 30.000	85 a 100 (grupo 1)
Cielo nublado	7.000	85 a 100 (grupo 1)
Luz solar día	6.000	85 a 100 (grupo 1)
Luz día (halogenuros)	6.000	96 a 100 (grupo 1)
Blanco neutral	3.000 a 5.000	70 a 84 (grupo 2)
Blanco cálido	Menos de 3.000	40 a 69 (grupo 3)
Lámpara descarga (Na)	2.900	Menos de 40
Lámpara incandescente	2.100 a 3.200	85 a 100 (grupo 1)
Lámpara fotográfica	3.400	85 a 100 (grupo 1)
Llama de vela o de bujía	1.800	40 a 69 (grupo 3)

Tabla_apéndice A-4: Muestras de color de prueba CIE.

No.	Aproximación Notación Munsell	Apariencia de color bajo luz día
1	7,5 R 6/4	Rojo grisáceo claro
2	5 Y 6/4	Amarillo grisáceo oscuro
3	5 GY 6/8	Amarillo verdoso fuerte
4	2,5 G 6/6	Amarillo verdoso moderado
5	10 BG 6/8	Verde azulado claro
6	5 PB 6/8	Azul claro
7	2,5 P 6/8	Violeta claro
8	10 P 6/8	Púrpura rojizo claro
9	4,5 R 4/13	Rojo fuerte
10	5 Y 8/10	Amarillo fuerte
11	4,5 G 5/8	Verde fuerte
12	3 PB 3/11	Azul fuerte
13	5 YR 8/4	Rosa amarillento claro
14	5 GY 4/4	Verde oliva moderado