



Universidad
Carlos III de Madrid

PROYECTO DE FIN DE CARRERA REALIZADO
EN INTERCAMBIO ACADÉMICO (ERASMUS)

AALTO UNIVERSITY
School of Electrical Engineering



LEDs for General and Horticultural Lighting / LEDs para Iluminación en General y para Horticultura

Autor: Emilio Girón González

Tutor UC3M: Elisa M^a Ruiz Navas

Supervisor Aalto University: Liisa Halonen

Co-Tutor Aalto University: Paulo Pinho

Leganés, Junio de 2012

Índice

1. Resumen del proyecto.....	4
2. Introducción	5
2.1 Funcionamiento de un LED.....	5
2.2 Visión general de la tecnología de iluminación artificial.....	6
2.2.1 Lámparas fluorescentes	6
2.2.2 Lámparas incandescentes	6
2.2.3 Lámparas de descarga de alta intensidad	7
2.2.4 LEDs	7
3. LEDs para iluminación en general.....	9
3.1 Espectro electromagnético y longitud de onda.....	9
3.2 Luz blanca y Color	9
3.3 Coordenadas de Cromaticidad.....	11
3.4 Temperatura de color.....	12
3.5 Índice de reproducción cromática	12
3.5.1 Calidad de los aspectos de la luz.....	12
3.6 Ventajas y desventajas de los LEDs	13
4. LEDs para iluminación en horticultura.....	15
4.1 Unidades para la iluminación en horticultura.....	15
4.2 Importancia de la luz en la horticultura	15
4.3 Importancia de los LEDs en la horticultura.....	15
4.3.1 Iluminación de estado sólido en iluminación en horticultura	15
4.3.2 Calidad de luz.....	16
4.3.3 Cantidad de luz.....	17

4.4	Invernaderos y fitotrones	17
5.	Medidas experimentales	18
5.1	Problemas	18
5.2	Objetivos.....	18
5.3	Resultados.....	18
5.4	Conclusiones.....	21
6.	Conclusiones y trabajos futuros	22

1. Resumen del proyecto

El documento empieza con una parte introductoria sobre qué son y cómo funcionan los diodos emisores de luz o *LEDs*. La iluminación mediante *LEDs* proporciona mayor eficiencia energética que las lámparas convencionales, ya que los *LEDs* requieren menos energía para operar que las lámparas incandescentes o bombillas fluorescentes y además son capaces de producir mayor cantidad de luz. Después de esta parte introductoria, se continúa con *LEDs* en iluminación en general donde se analizan diferentes conceptos relacionados con la luz y el color; como por ejemplo, el espectro, la longitud de onda, *Color Rendering Index* (o Índice de Reproducción Cromática, IRC) y el *Correlated Color Temperature* (o Temperatura del Color). Todos estos conceptos son usados con el fin de obtener la mejor iluminación posible para la sociedad. El resto del documento hace referencia a la iluminación de *LEDs* en aplicaciones de horticultura.

La luz del Sol es un elemento principal para la vida de las personas y, especialmente, para las plantas. Gracias al Sol es posible producirse el proceso de la fotosíntesis en las plantas, que es tan importante para un buen crecimiento en las mismas. Sin embargo, la luz del sol no está presente en todos los lugares durante todo el tiempo; es decir, en los países Escandinavos no tienen demasiada luz durante los meses de otoño e invierno, y además las temperaturas son muy bajas (por debajo de cero grados centígrados). Por esta razón, resulta muy difícil que una planta pueda crecer bajo estas condiciones de poca luz y de frío. De esta manera, es necesario el uso de la iluminación artificial. Los *LEDs* son usados para adquirir o conseguir un buen crecimiento en las plantas, ya que este tipo de dispositivos permiten ser usados en el interior de invernaderos, consiguiendo excelentes condiciones de luz y buenas condiciones ambientales para su correcto crecimiento.

En el último capítulo, son tomadas diferentes medidas experimentales combinando el espectro de cada color, para obtener la mejor iluminación posible. Para la ejecución de esta combinación de espectros es usado el software *Microsoft Office Excel*. Con este programa se aprende como mezclar y adquirir la mejor combinación de colores para alcanzar la *perfecta* luz o luz blanca, además de conocer el porcentaje que ha sido usado para cada color. Para saber cual es la mejor combinación posible para la sociedad, es necesario hacer uso del IRC y la Temperatura del Color.

2. Introducción

El LED fue creado en el año 1907 por el inventor británico H.J. Round. La tecnología LED presenta una energía muy eficiente en comparación con otros productos convencionales de iluminación. Los LEDs necesitan menos cantidad de energía para operar y son capaces de producir mayor luz si los relacionamos con el resto de iluminación artificial, ya sean bombillas incandescentes o lámparas fluorescentes.

Las empresas o fábricas que fabrican este tipo de dispositivos son capaces de producirlos en diferentes formas, colores y tamaños. Además, hay que destacar que los LEDs presentan una tecnología muy fiable, ya que es muy improbable que este dispositivo falle.

2.1 Funcionamiento de un LED

Un LED es un tipo de diodo que opera como un dispositivo semiconductor. La función de un LED es emitir luz a través de su unión p-n y otros materiales dopantes que crean esta unión. El material dopante en el área “n” proporciona cargas negativas, conocido como electrones; mientras que el dopante en el área “p” proporciona cargas positivas, referidas a los huecos (o agujeros). De esta manera, un diodo es capaz de convertir la electricidad en luz, siempre y cuando una tensión es aplicada en esa unión p-n, y en la dirección de “p” a “n”, no a la inversa.

Cuando un LED está encendido, los electrones son capaces de recombinarse con los huecos dentro del dispositivo. Un electrón libera energía cuando éste cae desde una órbita alta a una baja. Esta energía es liberada en forma de fotón. El color de los LEDs depende del hueco de la energía de la banda que es utilizada para crear la unión p-n, ya que este hueco de la banda es dependiente de la longitud de onda emitida.

En los diodos se puede producir la zona de agotamiento, como se muestra en la Figura 2.1. Esto es producido porque las cargas portadoras cargadas dentro de la zona “n” (electrones) y zona “p” (huecos), son atraídos y entonces eliminados en un proceso denominado recombinación. Esta zona de agotamiento puede ser eliminada si los electrones son movidos desde el área “n” al “p”, mientras los huecos se desplazan en sentido contrario. De esta manera, cuando la diferencia de tensión es alta entre los electrodos positivos y negativos, los electrones en la zona de agotamiento son expulsados de sus agujeros para que éstos

comiencen a moverse. Después de éste proceso, la zona de agotamiento desaparece y un nuevo flujo de corriente cruza la unión “p-n”.

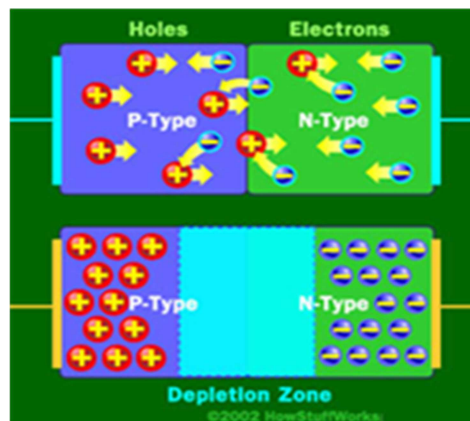


Figura 2.1: Formación de la zona de agotamiento

2.2 Visión general de la tecnología de iluminación artificial

La iluminación artificial convencional consiste de tres tipos diferentes de lámparas: fluorescentes, incandescentes y lámparas de descarga de alta intensidad. Sin embargo, el uso de LEDs ha sido muy importante en el mundo de la iluminación estos últimos años. A la hora de fabricar estos dispositivos, las empresas productoras tienen que tener en cuenta diferentes aspectos importantes en la calidad de luz como el brillo de la lámpara, la temperatura de color y *color rendering* o índice de reproducción cromática.

2.2.1 Lámparas fluorescentes

Un tubo fluorescente es una lámpara rellena de un gas, con una atmósfera de argón y una pequeña cantidad de mercurio. Estas lámparas usan electricidad para excitar el vapor del mercurio y de esta manera se produce una onda corta de luz ultravioleta que crea una especie de fósforo fluorescente, produciendo de esta manera luz visible.

Este tipo de iluminación usa menos cantidad de energía (50-80%) que la usada por una bombilla incandescente. Su periodo de vida es alrededor de 7,500 a 10,000 horas.

2.2.2 Lámparas incandescentes

Este tipo de lámparas es capaz de generar luz mediante el calor resistivo de un filamento muy fino de tungsteno que se alberga en su interior. Este filamento es capaz de generar más calor que luz. Además, éstas son muy utilizadas en diversas aplicaciones, a pesar que su

calidad de luz no es demasiado buena, ya que son dispositivos muy baratos. Un 10% del total proporciona solamente luz, mientras que el resto es consumido en forma de calor. El periodo de vida para este tipo de lámparas es entre 2,500 y 4,000 horas.

2.2.3 Lámparas de descarga de alta intensidad

Las lámparas de descarga de alta intensidad contienen en su interior atmósferas de presión de mercurio en condiciones de operación. La luz es producida mediante un arco eléctrico que es generado entre los electrodos de tungsteno que se encuentran ubicados dentro de un tubo translúcido o transparente. El interior de este tubo contiene sales de metales y algún gas. Cuando el arco es formado, se calienta y evapora las sales de metales produciendo plasma, obteniéndose una luz excelente.

Este tipo de lámparas ofrecen una alta eficacia, pero presentan un IRC bastante deficiente, por lo que no se debería usar para iluminación en humanos. El tiempo de duración es entre 20,000-25,000 horas.

2.2.4 LEDs

Los LEDs presentan una gran cantidad de ventajas, respecto a los dispositivos descritos anteriormente, ya que son unos dispositivos muy duraderos, fiables y con largo periodo de vida. Sólo un 10% de la energía de un LED es emitida en forma de calor. La duración de los LEDs en funcionamiento es en torno a 50,000 horas, mucho mayor que cualquier otro tipo de luz artificial.

La Figura 2.2 muestra la duración de las lámparas empleadas en iluminación artificial. En ella se puede observar la gran diferencia existente entre LEDs y el resto de iluminaciones artificiales.

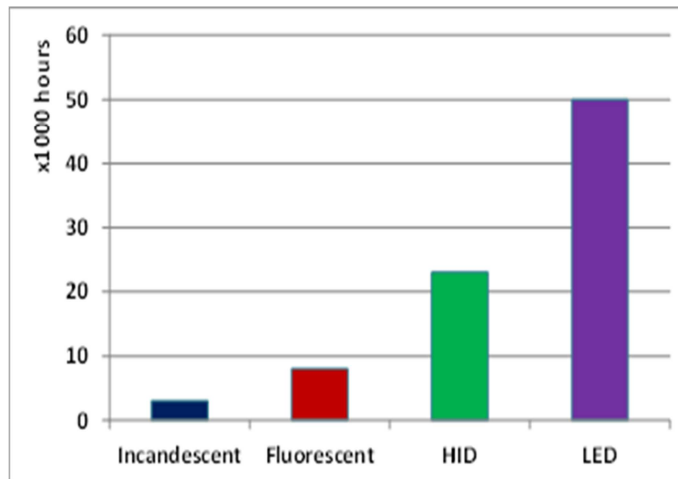


Figura 2.2: Duración (en horas) de las diferentes lámparas de iluminación artificial

3. LEDs para iluminación en general

3.1 Espectro electromagnético y longitud de onda

El *espectro electromagnético* es el rango de todas las posibles frecuencias de la radiación electromagnética. El espectro electromagnético de un objeto es la distribución característica de la radiación electromagnética emitida o absorbida por un objeto particular.

Toda radiación electromagnética difiere solamente de una propiedad, la *longitud de onda*. El espectro es obtenido cuando la radiación electromagnética es extendida según su longitud de onda. El espectro visible es solamente una parte de todo el espectro electromagnético. Este espectro es aquel que es posible verse a través de los ojos humanos. Normalmente, un ojo humano es capaz de ver desde una longitud de onda desde 380 nanómetros a 750 nanómetros; sin embargo, un ojo adaptado a la luz presenta su máxima sensibilidad alrededor de 555 nanómetros (correspondiente a la región amarilla y verde del espectro óptico). El espectro visible para el ojo humano es mostrado en la Figura 3.1.

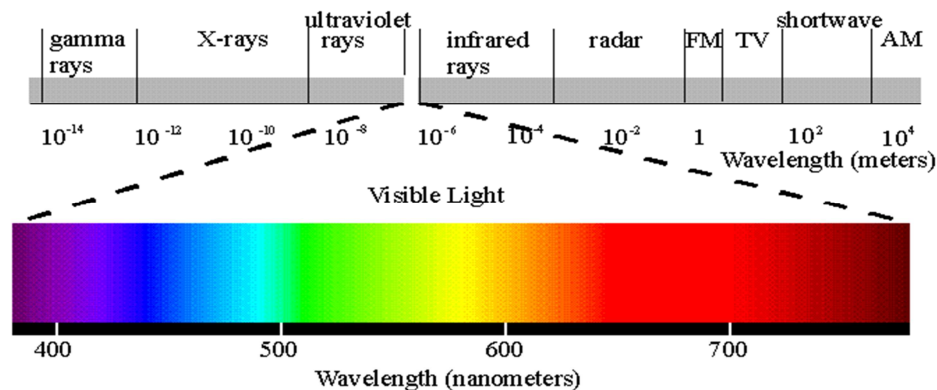


Figura 3.1: Espectro visible para el ojo humano

3.2 Luz blanca y Color

Todas las lámparas emiten luz blanca. Sin embargo, lo que aparece a los ojos como “luz blanca” es realmente una combinación de diferentes longitudes de onda en la zona visible del espectro electromagnético.

Para conseguir esta luz blanca, es posible obtenerla de dos maneras:

- 1) **Mediante conversión de fósforo.** Se produce cuando la zona azul o una zona próxima al ultravioleta está cubierta con fósforo que emite luz blanca. De esta forma, cuando el LED azul es combinado con fósforo amarillo, la luz aparecerá blanca a los ojos humanos, obteniéndose luz blanca.
- 2) **Mezclando colores.** Para este caso, con la combinación de diferentes colores de LEDs, se obtiene luz blanca.

Para entender bien como es posible obtener luz blanca a través del uso de LEDs, en la Figura 3.2 se muestra un esquema para comprender mejor ambos métodos.

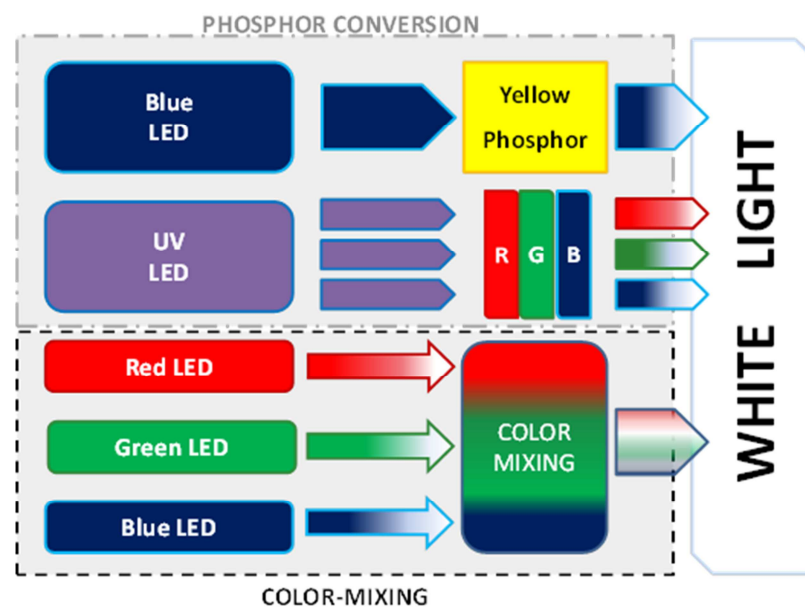


Figura 3.2: Métodos generales para crear luz blanca a través de LEDs

Además, hay una tercera opción para adquirir luz blanca. Ese nuevo método aún no está muy desarrollado, pero consiste en combinar los casos descritos anteriormente, obteniendo el Método Híbrido de LEDs, como se muestra en la Figura 3.3:

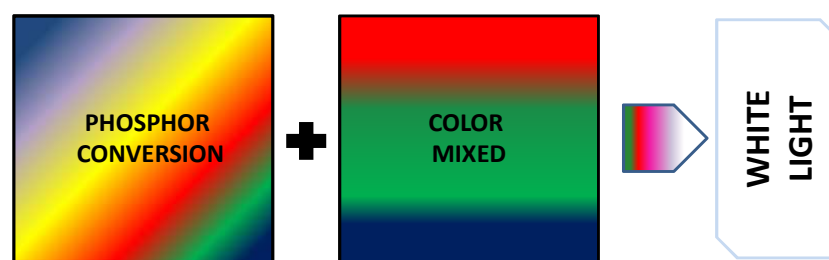


Figura 3.3: Método Híbrido de LEDs para crear luz blanca

3.3 Coordenadas de Cromaticidad

Los LEDs, o cualquier otra fuente de luz, pueden producir luz blanca. Esta luz debería tener una excelente iluminación para mostrar correctamente el color de los objetos que son iluminados. El color de luz es siempre representado por el espacio de color CIE 1931. El espacio CIE fue deliberadamente diseñado, donde son usados diferentes parámetros XYZ para determinar una iluminación dada. De esta manera, el parámetro Y es una medida del brillo o luminosidad de un color. La cromaticidad de un color se determina a través de dos parámetros derivados x e y , en función de los tres valores X, Y y Z; como se puede observar en las expresiones (1) y (2).

$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)} \quad (1)$$

$$y = \frac{Y}{(X + Y + Z)} \quad (2)$$

Con estas expresiones, cualquier color puede ser expresado mediante coordenadas cromáticas (x,y) en el *diagrama de cromaticidad del color CIE 1931* (x,y) , como es mostrado en la Figura 3.4.

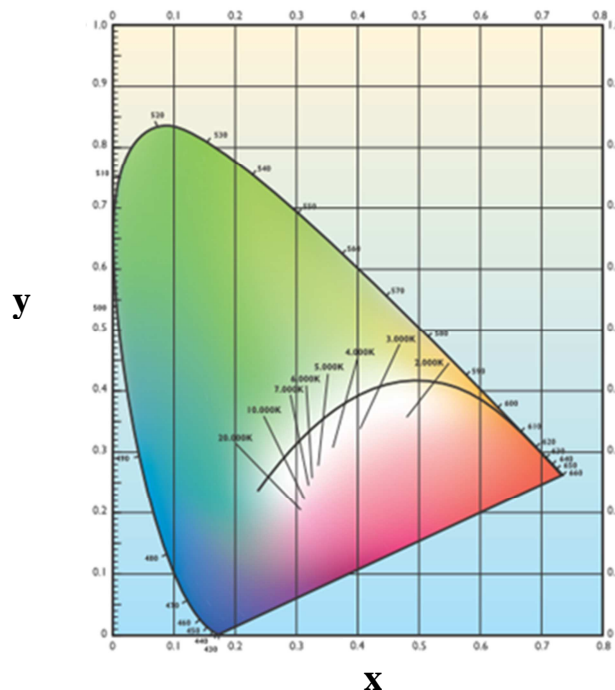


Figura 3.4: Diagrama de Cromaticidad del espacio color CIE 1931

3.4 Temperatura de color

La *temperatura de color* de una fuente de luz se define enumerando su color dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Esta temperatura del color es medida en Kelvin (K) y el rango de temperatura existente va desde los 2,500 K a 20,000 K. Sin embargo, los colores más tradicionales o que más suelen ser usados, son aquellos cuyo rango va desde 2,850 K (luz templada o incandescente) a 6,500 K (luz de día).

3.5 Índice de reproducción cromática

Una de las características más importantes de cualquier fuente de iluminación es el *índice de reproducción cromática (IRC)*. El IRC mide la capacidad que una fuente luminosa tiene para reproducir fielmente los colores de varios objetos en comparación con una fuente de luz natural. Para este método, es necesario seleccionar catorce muestras de varios colores diferentes, incluyendo varios colores saturados, con el propósito de conocer la calidad de la luz. Normalmente, las luces con un IRC elevado son necesarias para aplicaciones donde son importantes los colores. Gracias a factores como el índice de reproducción cromática y a la temperatura de color, es posible determinar la calidad de una fuente luminosa.

Por otra parte, a partir de diferentes investigaciones efectuadas con el IRC, se ha comprobado que este factor no es adecuado para medir la calidad de iluminación en LEDs. Esto se debe, a que los LEDs presentan una longitud de onda muy particular, por lo que se hace difícil comparar el color del LED con las catorce muestras que existen en el índice de reproducción cromática.

3.5.1 Calidad de los aspectos de la luz

El principal rol de la luz no es solamente suministrar una alta calidad, sino que hay otros factores importantes como el confort visual o aspectos físicos o psicológicos. Una buena iluminación puede ser considerada cuando se ha alcanzado un buen nivel de bienestar para ser capaz de desarrollar la aplicación en cuestión.

Los *aspectos psicológicos* de la luz hacen referencia a que la iluminación proporcionada puede transmitir emociones o diferentes sensaciones en el cuerpo humano. Normalmente, cuando la iluminación en una instalación determinada no reúne las expectativas de lo

usuarios, ésta puede ser considerada como inaceptable. Una mala iluminación puede producir falta de motivación e incomodidad entre los humanos.

Por otra parte, los *aspectos visuales* deben asegurar un nivel de luz adecuado y aceptable para crear una buena calidad de iluminación y un buen ambiente visual. El deslumbramiento es uno de los aspectos de la luz que debe ser evitado puesto que crea mucha incomodidad al ojo humano.

3.6 Ventajas y desventajas de los LEDs

Los LEDs presentan más ventajas que desventajas, puesto que es una tecnología muy innovadora y que proporciona gran cantidad de beneficios en la iluminación. Algunas de las principales ventajas en LEDs, son:

- **Reducción en el consumo de energía.** Los LEDs son muy eficientes y producen gran cantidad de luz, en comparación con la iluminación incandescente.
- **Presentan una larga vida de operación.**
- **Durabilidad.**
- **Mantenimiento del color durante un largo tiempo.** Presenta la misma intensidad de color desde el primer momento de uso hasta el último; sin embargo, no ocurre lo mismo con el resto de tecnologías convencionales, donde existe una degradación con el paso del tiempo.
- **Iluminación uniforme.**
- **Es posible realizar un ajuste de la intensidad del color.**
- **No contienen mercurio.**
- **Presentan un tamaño muy compacto.** Pueden ser usados en cualquier tipo de aplicación, sin existir ningún problema de espacio.

Sin embargo, los LEDs no son una tecnología perfecta por lo que presentan algunos inconvenientes, como:

- **Alto precio de LEDs.** Hay que realizar una gran inversión con esta tecnología, porque son dispositivos muy caros, pero a la vez puede ser amortizada sin pasar mucho tiempo, consiguiendo importantes beneficios.
- **Índice de reproducción cromática.** No es un factor recomendable para medir la calidad de iluminación de los LEDs, debido a la iluminación que suministran.

- **Existe el riesgo de la creación de deslumbramiento.** Este efecto puede llegar a ser muy desagradable.
- **Temperatura en el ambiente.** Si hay una temperatura muy alta en el ambiente, es posible que los LEDs no tengan un funcionamiento correcto debido a sobrecalentamientos en los mismos.

4. LEDs para iluminación en horticultura

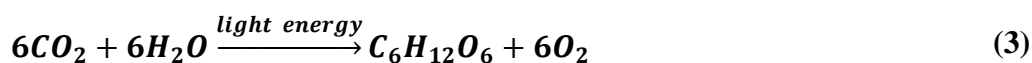
4.1 Unidades para la iluminación en horticultura

La *densidad de flujo de fotones fotosintéticos* (PPFD) mide el número de fotones dentro del rango de 400 a 700 nanómetros cayendo en una superficie determinada por unidad de área y por unidad de tiempo. PPFD está relacionada con la *radiación Fotosintética Activa* (PAR). Las unidades del PPFD son $\text{micromoles}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

4.2 Importancia de la luz en la horticultura

La luz es el factor y componente más importante para las plantas y árboles, ya que es usada para producir alimento a través de la fotosíntesis, y así conseguir un crecimiento aceptable. La fotosíntesis es uno de los procesos más importantes en el planeta tierra, porque es posible almacenar la energía del sol como energía química.

La fotosíntesis, generalmente, es la síntesis del azúcar procedente de la luz, dióxido de carbono y agua, con oxígeno y diferentes productos de desperdicio o subproductos. La fotosíntesis requiere una luz intensa que es capturada por pigmentos especiales, el más importante la clorofila. Con este pigmento, la planta es capaz de absorber la luz. La expresión (3) muestra la ecuación química simplificada de la fotosíntesis, donde se puede observar que los carbohidratos (como la glucosa, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, y oxígeno, O_2) son los productos principales del proceso fotosintético. Con estos productos y aplicación de luz, se obtiene dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O).



4.3 Importancia de los LEDs en la horticultura

4.3.1 Iluminación de estado sólido en iluminación en horticultura

La *iluminación de estado sólido* (Solid-state lighting) es una tecnología que se refiere a todo tipo de iluminación que emplea dispositivos como diodos emisores de luz inorgánicos y orgánicos (LEDs y OLEDs) o diodos emisores de luz basados en polímeros (PLEDs).

4.3.2 Calidad de luz

La calidad de luz consiste en descubrir que longitud de onda es mejor para generar el proceso de fotosíntesis y, de esta manera, un buen crecimiento en la planta.

La longitud de onda del color ultravioleta (UV), luz visible e infrarroja (IR) desempeña una función muy importante en el campo de la fotobiología. La intensidad, duración de la luz y algunos factores climáticos son características muy importantes para este campo.

Toda persona humana percibe la luz de diferente forma que las plantas. Los humanos presentan una respuesta a la luz más fuerte en la región verde/amarilla mientras que las plantas tienden a responder mejor a su crecimiento en la zona azul y roja, como es mostrado en la Figura 4.1. La región del color verde no es absorbida por la clorofila, ya que ésta se refleja; por esta razón, la clorofila y las plantas son verdes.

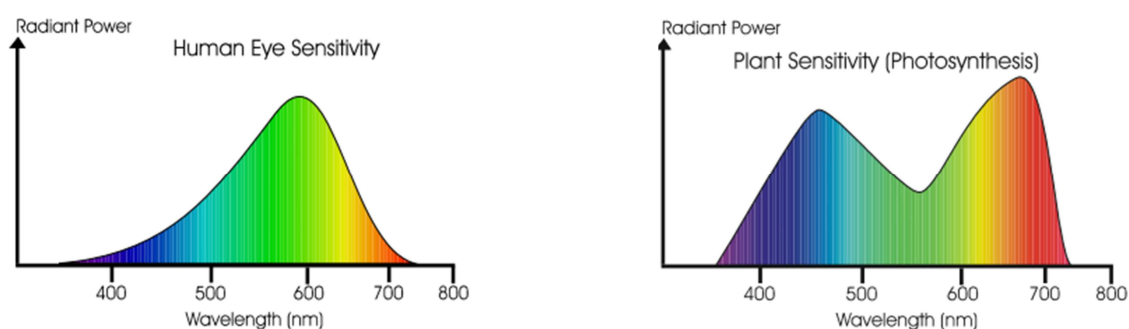


Figura 4.1: Diferencia del espectro visible para humanos y plantas

Analizando el espectro, desde la longitud de onda más corta a la más larga, la luz visible corresponde al color violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Cada uno de estos colores aporta diferentes características para su desarrollo.

Así, el primer color a analizar es el azul. Este color es empleado para estimular y regular el proceso de crecimiento en la planta. Con este color se promueve la formación de la clorofila en la superficie de las hojas para absorber energía y convertirla en energía química.

El color rojo es absorbido por la vegetación. Este color permite estimular el crecimiento de la planta y también contribuye a la formación del proceso de la fotosíntesis. De este modo, analizado el color azul y rojo se ha descubierto que la mezcla de ambos espectros proporciona un crecimiento muy efectivo en el desarrollo de las cosechas. Es la mejor combinación posible.

El tercer color analizado es la luz verde. La función principal del verde consiste en regular el desarrollo vegetativo, el fotoperiodo de la flor y la apertura de los estomas de las hojas.

Por otra parte, la región de la luz ultravioleta presenta algunas notaciones a tener en cuenta. Este tipo de luz no puede ser usada en grandes cantidades, ya que es peligrosa para la flora; sin embargo, se ha demostrado que en pequeñas cantidades es muy beneficiosa para las plantas porque aporta olores, aromas y colores a éstas

La última región a analizar es la radiación infrarroja. Ésta solamente participa en el proceso de la fotosíntesis y en diferentes reacciones de las plantas.

4.3.3 Cantidad de luz

La cantidad o intensidad de luz es un término completamente diferente a la calidad de la luz, ya que éste hace referencia a la cantidad de luz que recibe una planta, sin tener en cuenta la longitud de onda ni el color.

La cantidad de luz debe ser aceptable para que el crecimiento de la planta sea correcto, ya que cualquier tipo de anomalía en la cantidad de luz aportada puede producir malformaciones o quemaduras en las hojas de la misma

4.4 Invernaderos y fitotrones

Un invernadero es un sistema artificial empleado para simular un ecosistema apropiado para generar el crecimiento de las cosechas en su interior. Los invernaderos permiten controlar el ambiente interior para protegerlo de los factores externos, y así favorecer el crecimiento de las plantas o vegetales.

La estructura de cualquier invernadero está formada por materiales transparentes o translúcidos. Normalmente se usa el polietileno (PE), ya que aporta importantes ventajas como bloquear los rayos ultravioletas perjudiciales para las plantas; sin embargo, permite el paso de la luz infrarroja.

Por otra parte, los fitotrones son un tipo de invernadero que emulan diferentes tipos de interacciones entre plantas y atmósferas. Los fitotrones pueden regular diferentes parámetros como la humedad, temperatura, concentración del dióxido de carbono (CO₂) y otras condiciones ambientales. Son dispositivos muy caros, pero a la vez muy útiles.

5. Medidas experimentales

Este capítulo de *Medidas Experimentales* ha sido dividido en diferentes secciones en el documento original: problemas, objetivos, resultados y conclusiones. Como este capítulo es demasiado largo, se pondrá algún ejemplo para mostrar cual ha sido el procedimiento llevado a cabo, porque el resto de casos serán iguales pero cambiando los colores de los LEDs a usar. Si se desea conocer más sobre este capítulo, revisar directamente el documento original.

5.1 Problemas

Los LEDs son dispositivos de luz monocromática, es decir solamente proporcionan un color de luz. Para proporcionar importantes ventajas a las plantas es necesario mezclarlos con otros colores para suministrar una buena calidad en su crecimiento.

El principal problema es identificar cual es el mejor color para cada planta, puesto que en función de los colores que se usen será mejor para unas propiedades u otras. Sin embargo, hay una combinación que es aceptable y aporta importantes características a las plantas, como los colores azul y rojo. A esta combinación se le pueden añadir otros colores para mejorar las propiedades, ya que cada color aporta importantes beneficios a éstas.

5.2 Objetivos

El principal objetivo de los LEDs, cuando son usados en horticultura e iluminación en general, es obtener la mejor iluminación para adquirir un satisfactorio crecimiento de la planta y un ambiente confortable.

Para conseguirlo se han hecho uso de diferentes instrumentos con el fin de obtener los espectros de cada color. A partir de éstos, el objetivo es alcanzar la mejor iluminación posible. Para obtener los espectros, se ha hecho uso de un espectrómetro, fibra óptica, una caja negra para la ejecución de las mezclas y adquirir el espectro de dicha mezcla, y otros elementos que pueden ser vistos en la memoria original.

5.3 Resultados

Esta sección muestra las medidas y resultados que se han obtenido a partir de las diferentes combinaciones que se han realizado con los LEDs. El procedimiento ha sido, en primer

lugar, obtener la mejor calidad de iluminación para las plantas, y una vez conseguido, con esa misma combinación de colores se ha intentado obtener la mejor combinación (luz blanca) para las personas añadiendo otros colores diferentes

Normalmente, un buen porcentaje para conseguir un correcto desarrollo en la planta es 23% color azul y 77% color rojo. Con este porcentaje el espectro que se obtiene es el mostrado en la Figura 5.1:

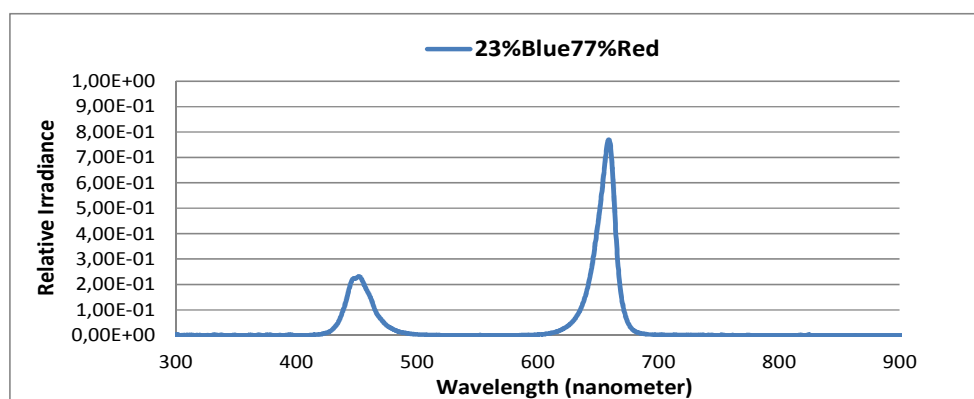


Figura 5.1: Espectro obtenido a partir de la combinación del color azul y rojo

Si se presta atención a la Figura 4.1, y se compara con la Figura 5.1 es posible comprobar la existencia de los mismos picos entre la región azul y roja, aproximadamente en 450 y 670 nanómetros, respectivamente. Por esa razón, la combinación de un 23% azul y 77% rojo, aporta importantes características a la planta. También, si algún otro color (como verde o azul) es añadido a esta mezcla, mejorará alguna de sus propiedades de crecimiento. El porcentaje de 23% azul y 77% rojo es representado en la aplicación (o programa) desarrollado en *Microsoft Office Excel*, tal y como se muestra en la Figura 5.2:

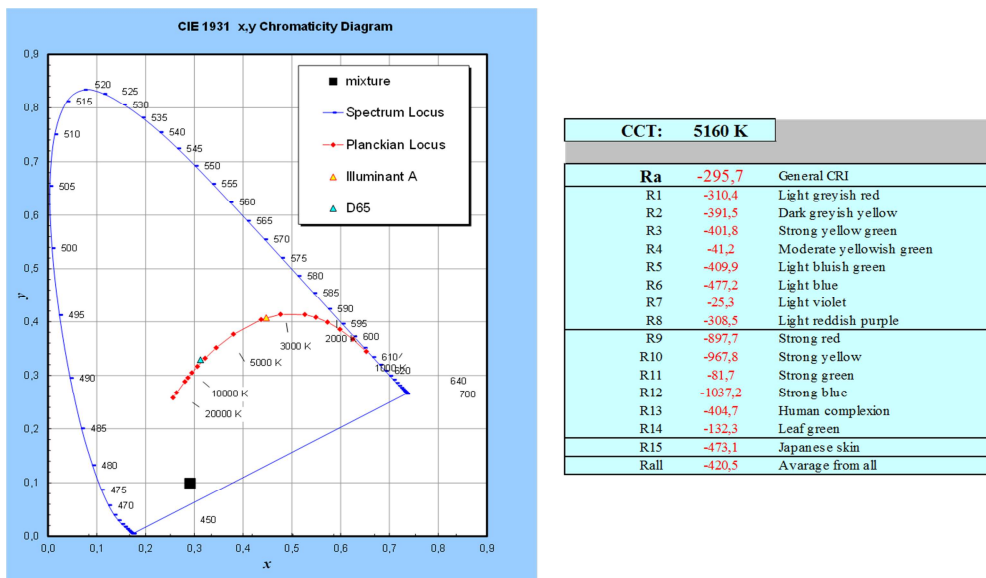


Figura 5.2: Diagrama Cromático para la combinación de los LEDs azul y rojo

Atendiendo a la Figura 5.2, se puede observar la posición del cuadrado negro. Como la combinación que se está empleando es para plantas, la posición del cuadrado es errónea (si se piensa en una iluminación para las personas) y además el valor del IRC es pésimo (comprobar *General CRI*); por esa razón, este tipo de iluminación no es válido para iluminación en general. El procedimiento para conseguir una correcta luz para las personas, consiste en intentar colocar ese cuadrado negro sobre la recta roja (o *Planckian locus*). Cuando el cuadrado es posicionado en la recta roja, en principio se obtendría una buena calidad de iluminación.

El siguiente paso consiste en añadir diferentes colores hasta obtener un valor del IRC aceptable para la iluminación de las personas. Si el IRC presenta un valor muy pobre, esa iluminación proporcionada sería inaceptable, por lo tanto, podría ser rechazada ya que puede crear un mal rendimiento y antipatía en las personas si la iluminación no es la correcta.

Otro factor a tener en cuenta es la temperatura del color. Es posible obtener un valor de IRC muy bueno, y a la vez un color temperatura cercano a la luz templada o luz de día. En función de donde sea utilizada esa iluminación, es posible que sea más recomendable obtener una luz cercana a la luz de día o más cercana a una luz templada. Este factor no llega a ser determinante ni demasiado importante a la hora de obtener una correcta iluminación; sin embargo, al IRC hay que prestarle mucha atención para conseguir un valor correcto y que la iluminación sea aceptable.

De esta manera, la combinación de azul y rojo se mantiene fija (sin variar sus porcentajes) y se añaden otros colores para conseguir la mejor iluminación para personas. Alguna simulación realizada con la aplicación de *Microsoft Office Excel*, es la mostrada a continuación en la Figura 5.3:

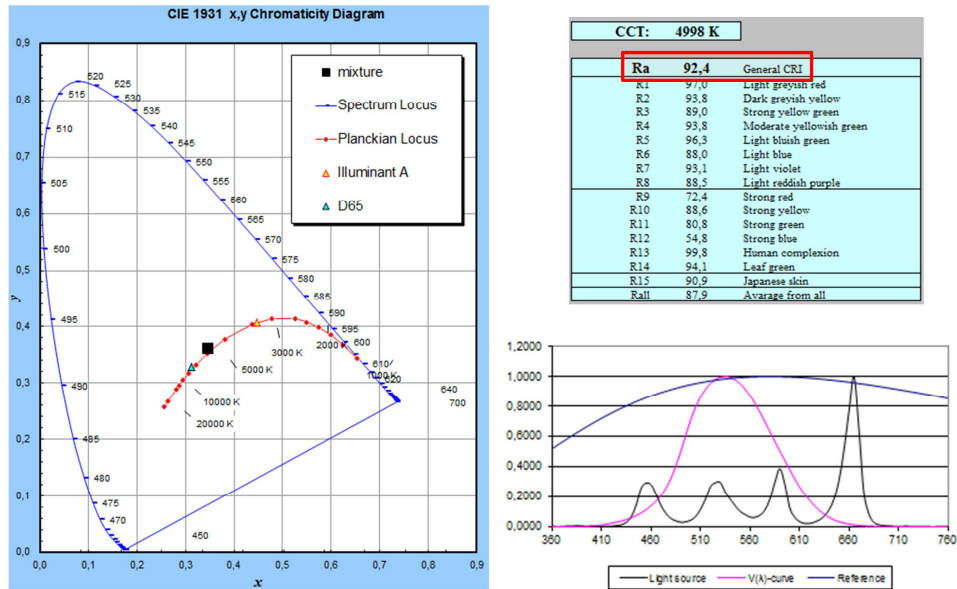


Figura 5.3: Resultado de combinar colores rojo-azul, verde y amarillo

Para este caso, el porcentaje que ha sido empleado es 65% Rojo-Azul + 15% Verde + 20% Amarillo. Observando la Figura 5.3, se puede comprobar que el cuadrado negro ha sido colocado sobre la línea roja y además se ha obtenido un buen valor del IRC (cercano al 93). Cabe destacar que una buena calidad de iluminación es considerada cuando el IRC se encuentra en el rango del 85 al 100. Para el valor del color temperatura se ha alcanzado una tonalidad de color muy cercana a la luz de día (*daylight*). Por lo tanto, esta simulación obtenida puede ser considerada como una muy buena calidad de luz, para su uso en aplicaciones diferentes para las personas (iluminación en general).

5.4 Conclusiones

Analizados los diferentes casos que pueden ser vistos en el documento original, cabe destacar que todas las combinaciones realizadas son simulaciones, por lo tanto a la hora de querer representar estos porcentajes en la realidad, puede que no sea exactamente igual porque pueden existir pequeñas variaciones. Esto se debe a que en las simulaciones no se

tienen en cuenta algunos factores que en la realidad pueden producirse. Sin embargo, con estas simulaciones se intenta obtener un resultado igual o similar a la realidad.

6. Conclusiones y trabajos futuros

La luz es una gran fuente de crecimiento y de energía, por esta razón es necesario buscar otras alternativas y no hacer uso siempre del mismo tipo. El principal propósito de un diseño de iluminación óptimo es lograr con seguridad una buena calidad de luz para cumplir con los diferentes aspectos visuales y proporcionar una buena calidad de luz a los objetos a iluminar.

La luz es un elemento clave para estimular el proceso de la fotosíntesis. Mediante el uso de iluminación artificial es posible controlar el ambiente en lugares cerrados, como los invernaderos. Para controlar estos ambientes, es necesario usar dispositivos de control que permitan controlar la cantidad de luz y color para ajustarse a los requerimientos de la planta.

Hoy en día, hay una gran selección de estos dispositivos de control, sin embargo uno de los más importantes (por las prestaciones que puede aportar) es el dispositivo mediante el *Control de Iluminación Dinámico (DLC)*. Un *DLC* es un dispositivo con una gran precisión para controlar aspectos de la luz como la cantidad, calidad, fotoperiodo y combinación de colores LEDs. Además, un *DLC* puede regular la energía de consumo si además está conectado a algún sensor de luz de día. De esta forma, si la cantidad de luz natural entrante en el invernadero no es suficiente para desarrollar el crecimiento de las cosechas, entonces es necesario hacer uso de la luz artificial (mediante el encendido de LEDs).

Por otra parte, hay predicciones sobre la importancia de los LEDs, ya que tanto éstos como los OLEDs revolucionarán la iluminación y los mercados en un futuro cercano. El *Departamento de Energía de los Estados Unidos*, dentro de la iluminación del estado sólido, ha vaticinado que los precios de las lámparas LEDs serán reducidos considerablemente un 30% entre 2010 y 2015; mientras que entre 2015 y 2020 se producirá un descenso adicional del 10-15%. Este descenso de los precios, producirá una gran expansión en su uso en el campo de la horticultura, ya que hasta el momento supone una tecnología muy cara.

Los OLEDs también van a ser una tecnología muy importante. Éstos son capaces de proporcionar mayor eficiencia, mejor iluminación y alta calidad del color respecto a los LEDs; pero todavía son demasiado caros para adquirirlos.

