

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Diseño de una instalación LED para la producción de
plantas en entornos cerrados**

**(Design of an LED installation for the production of
plants in closed environments)**

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Mónica García Peña

Octubre – 2018

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Mónica García Peña

Director del TFG: José Luis Arce Diego, Félix Fanjul Vélez

Título: “Diseño de una instalación LED para la producción de plantas en entornos cerrados”

Title: “Design of an LED installation for the production of plants in closed environments”

Presentado a examen el día: 24 de Octubre de 2018

para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): José Luis Arce Diego

Secretario (Apellidos, Nombre): Beatriz Aja Abelán

Vocal (Apellidos, Nombre): Luis Sánchez González

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del TFG (sólo si es
distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº
(a asignar por Secretaría)

Cuando se llega al momento en que termina una etapa es inevitable recordar y agradecer a todas aquellas personas que han contribuido de forma directa o indirecta a que ese momento llegase.

En primer lugar, quería agradecer a mi familia y amigos, en especial a mi madre y mi hermana, que siempre han estado ahí para apoyarme en los momentos difíciles. Y a mí chico, por siempre saber que decir cuando no han salido las cosas como quería.

También a mis compañeros, que han hecho que esta trayectoria en la universidad se haga más amena.

Finalmente, agradecer a las personas del ámbito docente y profesores, especialmente a mi tutor José Luis Arce Diego por su dedicación, tiempo y ayuda cuando la he necesitado para la elaboración de este documento y por sus consejos y dedicación a los alumnos que nos encontramos en los últimos momentos de nuestra educación universitaria.

Índice general

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación y objetivos	1
1.3. Estructura.....	2
Capítulo 2. Interacción luz-materia.....	4
2.1. Introducción	4
2.1.1. ¿Qué es la luz?.....	4
2.2. Propiedades ópticas fundamentales.....	5
2.2.1. Reflexión y refracción.....	5
2.2.1.1. Índice de refracción.....	5
2.2.1.2. Reflexión y refracción sobre una interfaz	6
2.2.1.2.1. Ley de Snell-Descartes.....	7
2.2.1.2.2. Ley de Fresnel.....	8
2.2.2. Absorción.....	8
2.2.3. Scattering	11
2.2.3.1. Scattering de Rayleigh.....	13
2.2.3.2. Scattering de Mie	14
2.3. Propagación de la luz en medios turbios	14
2.4. Teoría de transporte de fotones	16
2.4.1. Dispersión de primer orden	16
2.4.2. Teoría de Kubelka-Munk	17
2.4.3. Aproximación de difusión	17
2.4.4. Simulaciones de Montecarlo.....	17
2.4.5. Método de adición-duplicación inversa.....	17
2.5. Medición de las propiedades ópticas del tejido.....	17
2.6. Conclusión	21
Capítulo 3. Mecanismos de interacción	22
3.1. Introducción	22
3.2. Interacción fotoquímica	23
3.2.1. Terapia fotodinámica	24

3.3. Interacción térmica	24
3.3.1. Generación de calor	24
3.3.2. Transporte de calor	25
3.3.3. Efectos de calor	25
3.4. Fotoablación.....	25
3.5. Ablación inducida por plasma o ablación ultrarrápida	25
3.6. Fotodisrupción	25
3.7. Conclusión	26
Capítulo 4. Fuentes de luz	27
4.1. Introducción	27
4.2. Fuentes de luz no-coherente	27
4.2.1. Lámparas incandescentes	27
4.2.1.1. Halogenadas.....	28
4.2.1.2. Lámparas reflectoras dicroicas.....	29
4.2.2. Lámparas de descarga en baja presión	30
4.2.2.1. Tubos fluorescentes	30
4.2.2.2. Fluorescentes compactas (CFL).....	31
4.2.2.3. Baja presión en sodio	32
4.2.3. Lámparas de descarga en alta presión	33
4.2.3.1. Descarga en vapor de mercurio	33
4.2.3.2. Haluros metálicos.....	34
4.2.4. Diodo emisor de luz (LED)	35
4.2.4.1. LED de emisión lateral o por el borde, ELED	37
4.2.4.2. LED super luminiscente, SLD	37
4.2.4.3. LED por emisión superficial, SLED	37
4.3. Fuentes de luz coherente.....	37
4.3.1. Láseres.....	38
4.3.1.1. Láseres de gas	38
4.3.1.1.1. Láseres de gas neutro (He-Ne)	39
4.3.1.1.2. Láseres de gas ionizado (Argón).....	39
4.3.1.1.3. Láseres moleculares	40
4.3.1.2. Láseres de estado sólido	41
4.3.1.2.1. Láseres basados en iones de neodimio.....	41
4.3.1.2.2. Láser de rubí.....	42

4.3.1.2.3. Láseres de fibra	43
4.3.1.3. Láseres de semiconductor.....	43
4.3.1.4. Otros láseres.....	44
4.3.1.4.1. Láseres de colorante	44
4.3.1.4.2. Láseres de electrones libres	44
4.3.1.4.3. Láseres de rayos X	45
4.4. Conclusión	45
Capítulo 5. Fotosíntesis: Aspectos básicos.....	47
5.1. Introducción	47
5.2. Clasificación de los organismos fotosintéticos.....	48
5.2.1. Organismos fotosintéticos oxigénicos.....	49
5.2.2. Organismos fotosintéticos anoxigénicos.....	50
5.3. Principios de transformación de energía fotosintética	50
5.4. Fotosíntesis oxigénica	54
5.4.1. Cloroplastos: Estructura y organización.....	54
5.4.2. Absorción de luz: El sistema de antena.....	56
5.4.3. Fotoquímica primaria: FOTOSISTEMA II y centros de reacción del fotosistema	60
.....	64
5.4.4. Transporte de electrones	64
5.4.5. Creación de un potencial electroquímico de electrones	66
5.4.6. Síntesis de ATP por la enzima ATP sintasa	67
5.4.7. Síntesis de carbohidratos	68
5.4.8. Rendimiento cuántico fotosintético y eficiencia de conversión de la energía	69
5.4.9. Fotosíntesis oxigénica en algas	70
5.4.10. Fotosíntesis oxigénica en bacterias.....	71
5.5. Fotosíntesis anoxigénica	71
5.6. Fotosíntesis a nivel global	72
5.7. Conclusión	73
Capítulo 6. La óptica en la agricultura.....	74
6.1. Introducción	74
6.2. Eficiencia en la agricultura	74
6.3. Influencia en el mundo textil	75
6.4. Fenotipado de alto rendimiento	76

6.5. Avances en la iluminación en invernaderos.....	76
6.6. Conclusión	78
Capítulo 7. Iluminación LED para la horticultura	79
7.1. Introducción	79
7.2. Planteamiento del problema	79
7.3. Aplicación de los LED en la producción en invernaderos.....	82
7.3.1. Color de la luz	82
7.3.2. ¿Qué tipo de luz necesito?	83
7.4. Experimento	86
7.4.1. Exposición.....	86
7.4.2. Diseño de una instalación LED	87
7.4.2.1. Requerimientos del cultivo	87
7.4.2.2. Características de la lámpara LED	88
7.4.2.3. Cálculo del flujo luminoso total necesario en la instalación	91
7.4.2.3.1. Datos de entrada.....	92
7.4.2.3.2. Coeficiente de utilización (C_u)	93
7.4.2.3.3. Coeficiente de mantenimiento (C_m)	94
7.4.2.4. Cálculo del número de iluminarias.....	95
7.4.2.5. Disposición de las iluminarias	95
7.5. Conclusión	96
Capítulo 8. Conclusiones	98
Capítulo 9. Anexos.....	100
9.1. Anexo I. Comparativa lámpara LED vs lámpara vapor de sodio (HPS)	100
Capítulo 9. Bibliografía	102

Índice de figuras

<i>Figura 2.1: Espectro electromagnético</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2: Geometría de reflexión y refracción.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2. 3: Transiciones de un nivel de energía a otro.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.4: Absorción entre niveles electrónicos.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2. 5: (A) Antes de chocar contra la partícula, el haz incidente tiene una potencia uniforme $P_{in} = I_0 A$, donde I_0 es la intensidad de la radiación y A es la sección. (B) Después de encontrarse con la partícula, parte de la energía del haz se dispersa, dejando d</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.6: La sección diferencial cruzada de dispersión σ_s expresa la distribución angular de la radiación esparcida en relación a la radiación que incide sobre la partícula</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.7: Tipos de scattering</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2. 8: El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.9: Ejemplos de los diferentes métodos para la medición de propiedades ópticas en tejidos: (a) Método para medir la atenuación total. (b) Método para medir la absorción. (c) Método para medir la dependencia angular de la dispersión</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.10: Geometría de esfera doble de integración para la medición simultánea de diferentes propiedades ópticas de los tejidos. Los detectores miden la intensidad coherente transmitida (T_c), la intensidad difusa transmitida (T_d) y la intensidad difusa reflejada</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.11: Propiedades ópticas de la materia blanca del cerebro humano en su estado original y en su estado coagulado.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.1: Mecanismos de interacción de la luz con el tejido biológico en función de la duración y de la intensidad de la fuente óptica</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.2: Terapia fotodinámica</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4.1: Lámpara halógena</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.2: Lámpara reflectora dicróica.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.3: Tubo fluorescente.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.4: Lámpara fluorescente compacta (CFL).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.5: Lámpara de sodio de baja presión</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.6: Lámpara de vapor de mercurio</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.7: Haluro metálico.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.8: Láser de helio-neón</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.9: Vista de un láser de neodimio</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.10: Diseño de un láser de diodo semiconductor.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.11: Esquema de un láser de electrones libres</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.1: Origen de la fotosíntesis y organismos con capacidad fotosintética</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.2: Funcionamiento del complejo antena.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.3: Estructura y reacciones básicas de los fotosistemas I y II</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.4: Estructura interna del cloroplasto.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.5: Modelo de la membrana fotosintética de las plantas que muestra los componentes de transporte de electrones y la enzima ATP Synthase (vista transversal)</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.6: Estructura química de la clorofila</i>	<i>57</i>

<i>Figura 5.7: Espectros de absorción estimados de clorofila a, clorofila b y carotenoides en cloroplastos</i>	<i>59</i>
<i>Figura 5.8: Dibujo esquemático del fotosistema II</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.9: Vías de transporte de electrones y tasas del fotosistema II</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.10: Vías y rutas de transporte del electrón del fotosistema I</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.11: Vía de transporte de electrones de las plantas (fotosíntesis oxigénica)</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.12: Un esquema abreviado que muestra la reducción de dióxido de carbono por el ciclo de Calvin</i>	<i>69</i>
<i>Figura 6.1: Recogida de la fibra de algodón.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.2: Cultivo en interiores</i>	<i>77</i>
<i>Figura 7.1: Fotopigmento de absorción espectral.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 7.2: Absorción espectral media de la planta de cultivo</i>	<i>81</i>
<i>Figura 7.3: Curva de eficiencia cuántica relativa de la fotosíntesis</i>	<i>82</i>
<i>Figura 7.4: Longitud de onda LED correspondiente al efecto del crecimiento de la planta</i>	<i>84</i>
<i>Figura 7.5: Espectro electromagnético adecuado de una lámpara LED</i>	<i>85</i>
<i>Figura 7.6: Curva de McCree y características espectrales de lámparas HPS y LED</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7.7: LED COB.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.8: Configuración de 4 LED COB sobre una placa</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.9: Factores determinantes de una lámpara</i>	<i>90</i>
<i>Figura 7.10: Dimensiones de la sala y altura del plano de trabajo</i>	<i>92</i>
<i>Figura 7.11: Tabla de corrección</i>	<i>94</i>



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE
TELECOMUNICACIÓN**



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

La óptica es un campo dentro de la física, pero impacta significativamente a toda la sociedad y además juega un papel crucial en el desarrollo de la medicina y la biología.

La óptica se ha utilizado, desde la antigüedad, como ayuda para el examen de pacientes humanos y en algunos tratamientos terapéuticos. Muchos de los instrumentos médicos ópticos actualmente en uso se desarrollaron en el siglo XIX y, con el advenimiento de las fibras ópticas y las fuentes de luz láser a mediados del siglo XX, se ha desarrollado una nueva generación de dispositivos médicos, instrumentos y técnicas que han ayudado modernizar la medicina y realizar tareas inimaginables hace solo unas décadas.

La medicina abarca diversas técnicas ópticas, algunas de estas son:

- Dispositivos y redes de fibra óptica.
- Técnicas ópticas para la caracterización molecular de tejidos biológicos.
- Técnicas ópticas para la caracterización estructural de tejidos biológicos.
- Técnicas ópticas para el tratamiento de tejidos biológicos.
- Técnicas ópticas para aplicaciones quirúrgicas.
- Endoscopios y sondas de fibra ópticas para aplicaciones biomédicas.

Del mismo modo esto se puede extrapolar al mundo de la biología dado que ambas ciencias comparten una naturaleza biológica. De hecho, este trabajo no habría sido posible sin la aplicación de la óptica a la biología. Para poder estudiar la evolución de los cultivos, es necesario hacer un uso de técnicas ópticas, debido a la especial relación que tiene este tipo de organismos con la luz a través del proceso de la fotosíntesis. Este trabajo ilustra, a través de varios instrumentos ópticos y ejemplos de aplicaciones, los usos, beneficios y perspectivas futuras que la óptica brinda como una tecnología habilitadora para la biología y la industria alimenticia en general.

1.2. Motivación y objetivos

Nuestro entorno está cambiando rápidamente, lo que causa una amenaza creciente para los ecosistemas naturales. Los ecosistemas vegetales, incluidos los campos agrícolas y los bosques, están expuestos a muchas variables, como la sequía, las inundaciones, las temperaturas bajas y altas, la deficiencia de nutrientes, los metales pesados, los contaminantes atmosféricos y las plagas. Se necesitan nuevas herramientas para la producción más eficaz de cultivos y la seguridad alimentaria.

Una motivación para centrarse en este tema es el fin de buscar soluciones contra la falta de alimento y ropa, intentando evitar las desigualdades sociales cada vez más presentes en nuestro mundo. Para ello, en este proyecto se propone incrementar la producción aumentando, a su vez, la eficiencia de producción a través de la integración de la tecnología LED en los cultivos.

Por tanto, podemos definir los siguientes objetivos básicos para el presente trabajo:

- Comprender los fundamentos ópticos de la ingeniería biomédica.
- Conocer los diferentes tipos de interacciones de la luz con los tejidos.
- Ahondar en los diferentes tipos de fuentes ópticas diferenciando el espectro electromagnético en el que trabajan.
- Explicar el funcionamiento básico de la fisiología vegetal.
- Introducirnos en la problemática agrícola, buscando el mejor rendimiento para los cultivos.
- Estudiar en profundidad la tecnología LED, haciendo hincapié en su aplicación en horticultura, mostrando sus actuales líneas de trabajo y fijando nuevas líneas de investigación relacionadas con este proyecto.
- Determinar cuáles son las conclusiones más importantes obtenidas.

1.3. Estructura

A continuación, se muestra una tabla (Tabla 1.1) con la estructura del trabajo, capítulos y títulos.

CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	PROPIEDADES ÓPTICAS FUNDAMENTALES
CAPÍTULO III	MECANISMOS DE INTERACCIÓN
CAPÍTULO IV	FUENTES ÓPTICAS
CAPÍTULO V	FOTOSÍNTESIS: ASPECTOS BÁSICOS
CAPÍTULO VI	LA ÓPTICA EN LA AGRICULTURA
CAPÍTULO VII	ILUMINACIÓN LED PARA LA HORTICULTURA
CAPÍTULO VIII	CONCLUSIONES

Tabla 1.1: Estructura del trabajo

En el primer capítulo se hace una pequeña introducción a la temática del trabajo indicando los aspectos más importantes del mismo.

En el segundo capítulo se estudiará en detalle las propiedades ópticas de los tejidos, que son de gran importancia en el ámbito de la ingeniería biomédica.

A continuación, en el tercero, se dará una explicación detallada de la interacción de la luz con los tejidos biológicos y veremos algunos mecanismos de interacción.

En el apartado cuatro desarrollaremos los diferentes tipos de fuentes ópticas especificando el espectro electromagnético en el que trabajan.

En el capítulo cinco se explicarán los fundamentos más básicos del proceso de la fotosíntesis.

En el sexto capítulo presentaremos la situación actual de la óptica en el ámbito de la agricultura.

En el apartado siete propondremos el diseño de una instalación LED en entornos cerrados, llevando a cabo todos los cálculos pertinentes.

Por último, en este capítulo mostraremos los principales resultados y conclusiones de la instalación LED.

Capítulo 2. Interacción luz-materia

2.1. Introducción

2.1.1. ¿Qué es la luz?

La luz es radiación electromagnética dentro de una cierta porción del espectro electromagnético (Fig. 2.1). La palabra generalmente se refiere a la luz visible, que es el espectro que es sensible para el ojo humano y es responsable del sentido de la vista. La luz visible generalmente es definida como el rango de longitudes de onda entre los 400 y 700 nanómetros (nm), entre el infrarrojo (con longitudes de onda más grandes) y el ultravioleta (con longitudes de onda más cortas).

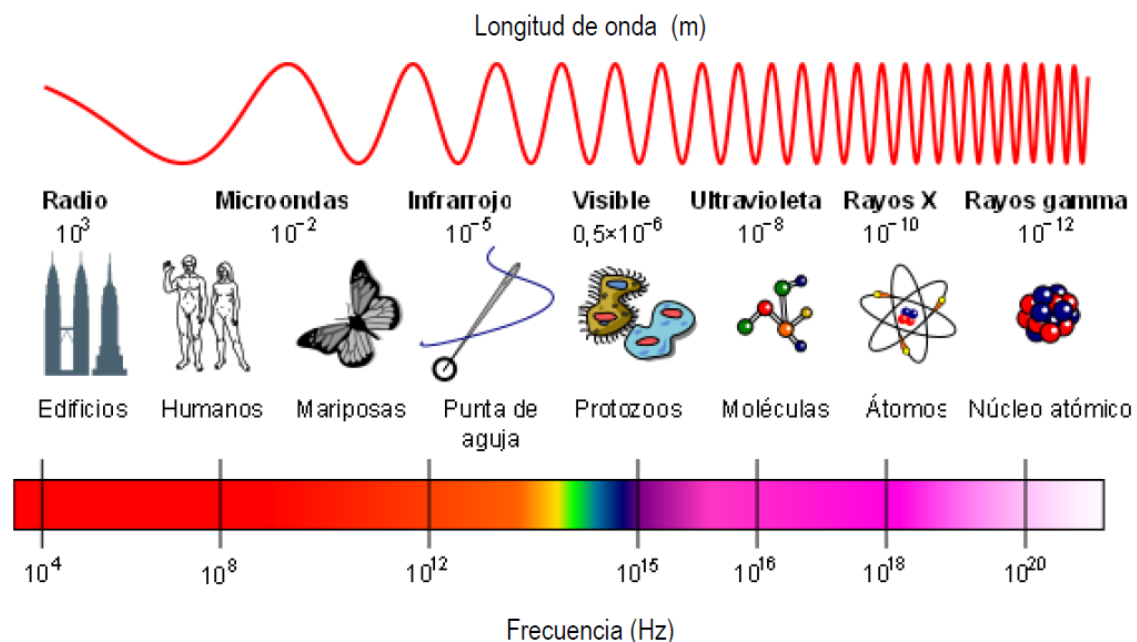


Figura 2.1: Espectro electromagnético

La principal fuente de luz en la Tierra es el sol. La luz del sol proporciona la energía que las plantas usan para crear azúcares principalmente en forma de almidones, que liberan energía en los seres vivos que los digieren. Este proceso de fotosíntesis proporciona prácticamente toda la energía utilizada por los seres vivos. Históricamente, otra fuente importante de luz para los humanos ha sido el fuego, desde fogatas antiguas hasta lámparas de queroseno modernas. Con el desarrollo de luces eléctricas y sistemas de energía, la iluminación eléctrica ha reemplazado eficazmente a la luz de fuego. Algunas especies de animales generan su propia luz, un proceso llamado bioluminiscencia. Por ejemplo, las luciérnagas usan la luz para localizar parejas, y los calamares vampiros la usan para esconderse de sus presas.

Las principales propiedades de la luz visible son la intensidad, la dirección de propagación, la frecuencia o el espectro de longitud de onda y la polarización, con una velocidad en el vacío de 299 792 458 metros por segundo, es una de las constantes fundamentales de la naturaleza.

En física, el término luz a veces se refiere a la radiación electromagnética de cualquier longitud de onda, ya sea visible o no. En este sentido, los rayos gamma, los rayos X, las microondas y las ondas de radio, al igual que la luz visible se propagan como ondas.

El estudio de la luz, conocido como óptica, es un área de investigación importante en la física moderna.

2.2. Propiedades ópticas fundamentales

En este apartado se verán los fenómenos básicos que ocurren cuando la luz interacciona con la materia. La radiación electromagnética puede actuar sobre la materia de múltiples maneras, las más destacadas: reflexión y refracción, absorción y scattering. Estas interacciones, entre la luz y el tejido, dependen fundamentalmente de los constituyentes del tejido, de las propiedades ópticas del tejido y de la propagación de la luz. [Daukantas17].

2.2.1. Reflexión y refracción

2.2.1.1. Índice de refracción

La energía radiante se propaga en el vacío con una velocidad que tomaremos como $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. La velocidad en los medios materiales, v , varía con la constitución de estos, y cada medio viene caracterizado desde este punto de vista óptico por su índice de refracción, n , que se define como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío a la que lleva en dicho medio, es decir:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

Donde n es un valor adimensional. De esta expresión, puesto que la velocidad en cualquier medio material es menor que en el vacío, se desprende que el índice de refracción para dichos medios es mayor que la unidad.

Es de destacar el hecho que, en el vacío la velocidad de la luz es la misma para todas las longitudes de onda, no ocurriendo lo mismo cuando se propaga en un medio material, de modo que varía según, el índice de refracción.

Cuando la luz se propaga en un medio material la frecuencia no varía, por tanto, si cambia la velocidad es porque varía la longitud de onda. El índice de refracción se puede escribir en función de las longitudes de onda. Si llamamos λ_0 a la longitud de una radiación luminosa en el vacío:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Teniendo en cuenta que para un medio cualquiera $\lambda = \frac{v}{f}$ y combinando las dos ecuaciones anteriores resulta:

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{f}{f} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (2.3)$$

Y puesto que $n > 1$ concluimos que $\lambda < \lambda_0$.

2.2.1.2. Reflexión y refracción sobre una interfaz

Debido a la diferencia de velocidades de propagación, o de índices de refracción, aparecen los fenómenos de refracción y reflexión. Cuando la luz llega a la superficie de separación entre dos medios de diferente índice de refracción, parte de la radiación se refleja (reflexión) y otra parte pasa al segundo medio (refracción) donde se propaga con otra velocidad, cambiando su dirección.

Dos leyes nos permiten calcular lo que le ocurre a la luz:

- Ley de Snell-Descartes, permite saber la dirección (ángulo) con la que se refleja la luz.
- Ley de Fresnel, permite saber qué porcentaje de luz se refleja y qué porcentaje se refracta.

Para hacer los cálculos, se consideran tres rayos de luz (Fig. 2.2): incidente, reflejado y transmitido:

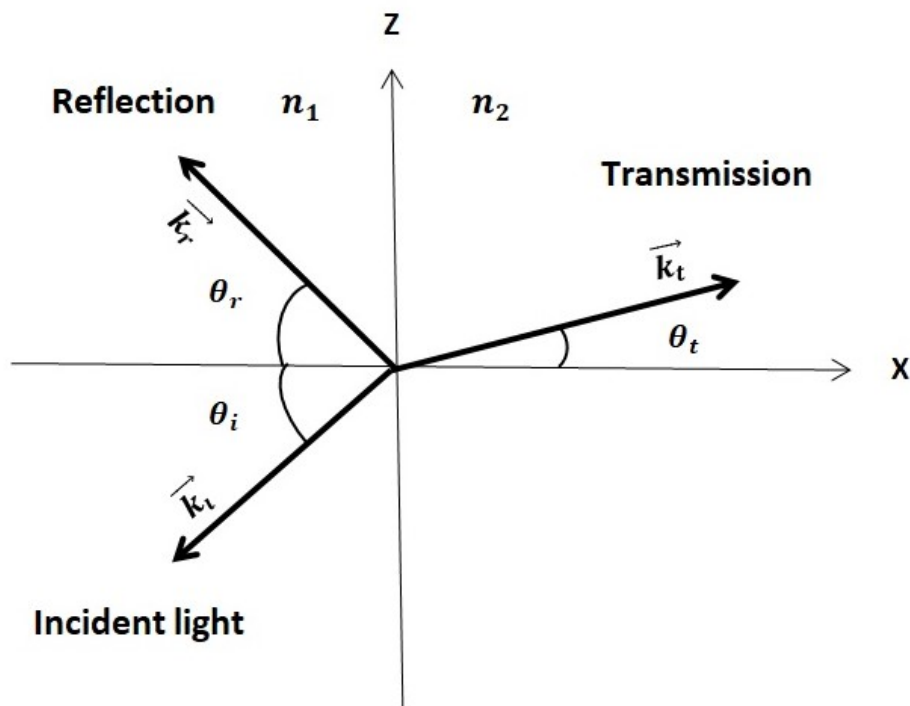


Figura 2.2: Geometría de reflexión y refracción

A la izquierda hay un medio de índice n_1 y a la derecha un medio de índice n_2 , la interfase entre los dos es la superficie. Todos los ángulos se miden respecto a la normal (perpendicular) a la superficie.

2.2.1.2.1. Ley de Snell-Descartes

Permite calcular los ángulos de los rayos reflejado y transmitido.

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.4)$$

$$n_1 \cdot \sin \theta_i = n_2 \cdot \sin \theta_t \quad (2.5)$$

Es decir, el ángulo reflejado es el mismo que el incidente. Y el transmitido depende de los índices de refracción. Si n_1 es igual a n_2 , en realidad no hay cambio de índice y no existe la superficie, el rayo incidente no cambia de ángulo. Si $n_2 > n_1$ el ángulo transmitido es menor que el ángulo del rayo incidente, y viceversa.

Existe reflexión total interna cuando $n_1 > n_2$, el rayo transmitido tiene más ángulo que el incidente, así que hay un ángulo de entrada para el que el ángulo de salida es igual o superior a 90° . Esto nos es físicamente posible lo que significa que en realidad no hay rayo transmitido, todo se refleja. Esto no ocurre para todos los ángulos de entrada, solo para ángulos grandes, mayores que el llamado ángulo crítico.

2.2.1.2.2. Ley de Fresnel

Las fórmulas de Fresnel permiten saber el porcentaje de luz que se refleja y transmite cuando no hay reflexión total interna, donde llamamos R al porcentaje de luz reflejado y T al porcentaje de luz transmitido, ambos suman el 100%:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.6)$$

$$T = \frac{4 \cdot n_1 \cdot n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.7)$$

2.2.2. Absorción

Durante la absorción, la intensidad de una onda electromagnética incidente se atenúa al pasar por un medio. La absorbancia de un medio se define como la relación de intensidad absorbida e incidente. La absorción se debe a una parcial conversión de la energía de la luz en movimiento, en calor o vibraciones, de las moléculas del material absorbente.

En fotónica biomédica a este proceso se le pueden dar dos tipos de aplicaciones:

- Aplicaciones de diagnóstico: Las transiciones entre dos niveles de energía de una molécula a longitudes de onda específicas podrían servir como huella espectral. Útil en la detección de tumores u otro tipo de evaluaciones fisiológicas.
- Aplicaciones terapéuticas: La absorción de energía es el principal mecanismo que permite que la luz de un láser sea capaz de producir efectos físicos sobre tejidos con fines terapéuticos. Es utilizado, por ejemplo, en cirugía ocular o en la eliminación de tatuajes.

Un medio perfectamente transparente permite el paso de la luz sin ninguna absorción, es decir, la energía radiante total que entra es la misma que la que sale de dicho medio. Por el contrario, los medios en los que la radiación incidente se reduce prácticamente a cero se llaman opacos. Los términos "transparente" y "opaco" son relativos, ya que ciertamente son dependientes de la longitud de onda. La córnea y la lente, por ejemplo, consisten principalmente en agua que muestra una fuerte absorción a longitudes de onda en el espectro infrarrojo. Por lo tanto, estos tejidos aparecen opacos en esta región espectral. Actualmente, no se sabe que ningún medio sea transparente u opaco a todas las longitudes de onda del espectro electromagnético.

Los procesos de absorción implican un concepto importante de la teoría cuántica, el nivel energético, que es el estado cuántico de un átomo o molécula. El

cambio de estado (una molécula o un átomo) de un nivel de energía a otro se denomina transición (Fig. 2.3). Una transición de un nivel de energía bajo a uno superior implica el cambio de la partícula a un estado excitado y requiere la absorción de una cantidad de energía del fotón, $h \cdot \nu$, igual a la diferencia de energía, E , entre los dos niveles:

$$h\nu = \Delta E \quad (2.8)$$

Una caída desde un nivel de energía superior a otro inferior se llama decaimiento y se acompaña de una liberación de energía igual a la diferencia de energía entre los dos niveles. Esta liberación de energía puede ocurrir sin radiación (calentando el medio circundante) o puede dar lugar a la emisión de un fotón (por ejemplo, luminiscencia).

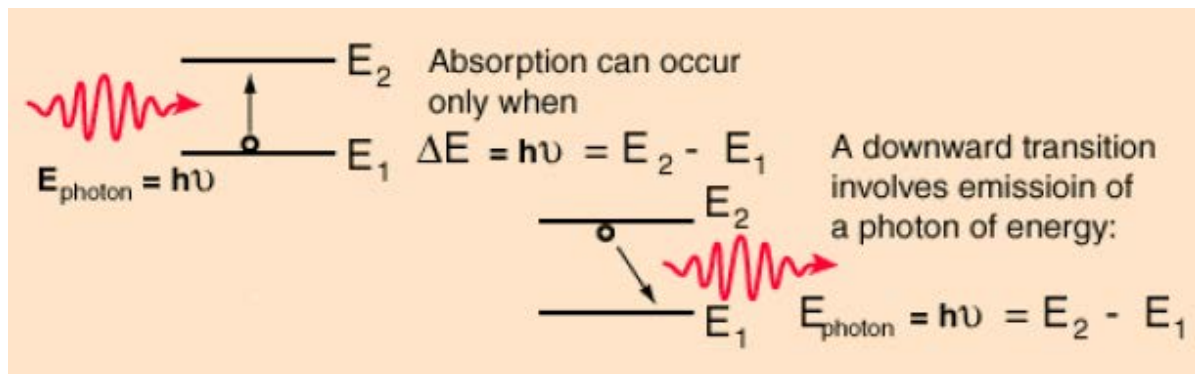


Figura 2. 3: Transiciones de un nivel de energía a otro

Las regiones del espectro donde ocurren estos procesos de absorción se conocen como bandas de absorción; estas bandas son específicas para determinadas especies atómicas o moleculares. En general, hay tres tipos básicos de procesos de absorción: (1) electrónicos, (2) vibratorios y (3) rotativos. Las transiciones electrónicas ocurren tanto en átomos como en moléculas, mientras que las transiciones vibratorias y rotacionales ocurren solo en las moléculas.

1) Absorción entre Niveles Electrónicos

En equilibrio, un grupo de moléculas tiene una distribución térmica en los niveles más bajos de vibración y rotación del estado fundamental. Entonces, cuando una molécula absorbe energía de excitación, se eleva desde S_0 a algún nivel vibratorio de los siguientes estados excitados, S_1 (Fig. 2.4). La intensidad de la absorción (es decir, fracción de moléculas del estado fundamental promovidas al estado excitado electrónico) depende de la intensidad de la radiación de excitación (es decir, número de fotones) y la probabilidad de la transición de fotones de la energía particular utilizada.

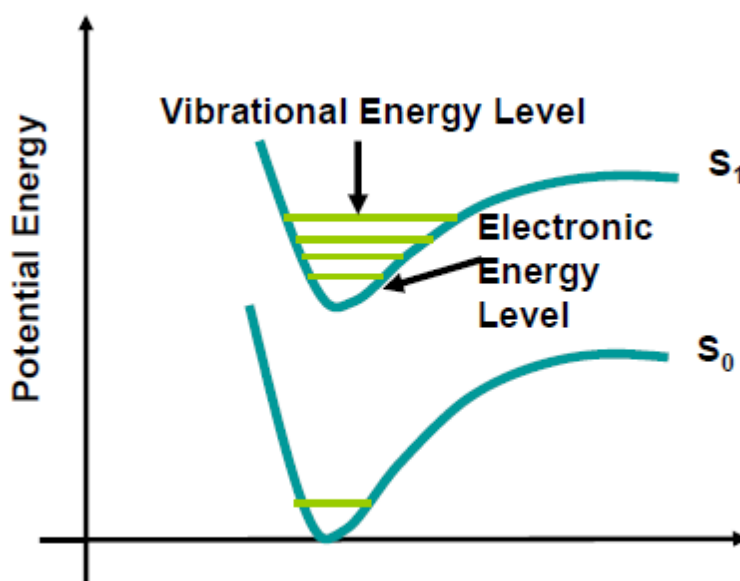


Figura 2.4: Absorción entre niveles electrónicos

2) Absorción entre niveles vibratorios

Los niveles vibratorios caracterizan los diferentes estados de vibración de los átomos en una molécula. Las vibraciones en varios grados de libertad se cuantifican, dando lugar a una serie de niveles de vibración para cada patrón vibratorio de una molécula. Una transición vibratoria ocurre cuando una molécula cambia de un estado vibratorio a otro. Típicamente, las transiciones vibratorias corresponden a los fotones del infrarrojo.

3) Absorción entre niveles rotacionales

Los niveles de rotación representan los diferentes estados de la rotación de una molécula. Estos niveles de energía cuantificados se corresponden con las energías de fotones del infrarrojo lejano de longitudes de onda submilimétricas.

La capacidad de un medio para absorber radiación electromagnética depende de una serie de factores, como la constitución electrónica de sus átomos y moléculas, la longitud de onda de radiación, el espesor de la capa absorbente, y otros parámetros internos como la temperatura. La relación empírica que relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción es conocida como la ley de Beer-Lambert. La relación entre ambas intensidades puede expresarse a través de las siguientes relaciones:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu_a \cdot z) \quad (2.9)$$

Donde I e I_0 son la intensidad saliente y entrante respectivamente, μ_a es el coeficiente de absorción y z es la longitud atravesada por la luz en el medio.

Un medio con una distribución uniforme de partículas absorbentes puede ser caracterizado por el coeficiente de absorción:

$$\mu_a = \rho \sigma_a \quad [m^{-1}] \quad (2.10)$$

donde ρ es el número de densidad de partículas absorbentes. Para una partícula absorbente en una inserción localizada, la sección cruzada de absorción puede definirse como:

$$\sigma_a = \frac{P_{abs}}{I_0} \quad [m^2] \quad (2.11)$$

Donde P_{abs} es la cantidad de potencia absorbida a partir de una onda plana inicialmente uniforme de intensidad I_0 .

2.2.3. Scattering

Scattering es una palabra que podría traducirse por dispersión, esparcimiento o difusión. Se refiere a un fenómeno en el que la luz es dispersada en diferentes direcciones del espacio. Debido a que solo la luz viaja en la dirección de propagación es útil porque es la que llega al receptor del sistema, este es un fenómeno que puede verse como una fuente de atenuación.

Dependiendo de su aplicación lo podemos dividir en:

- Aplicaciones de diagnóstico: La dispersión depende del tamaño, la morfología y la estructura de los componentes en tejidos (por ejemplo, membrana lipídica, fibras de colágeno, núcleos).
- Aplicaciones terapéuticas: Las señales de dispersión pueden usarse para determinar la dosimetría de luz óptima y proporcionar retroalimentación útil durante la terapia.

El scattering se describe normalmente considerando la radiación incidente como una onda plana. En principio, conocidos los índices de refracción de los diferentes materiales y el tamaño y la forma de la partícula dispersora, la radiación que sufre este fenómeno puede ser calculada de manera sencilla. El scattering se cuantifica por medio de un parámetro denominado sección transversal de scattering (scattering cross section). Para una onda plana monocromática con una intensidad I_0 que choca con una partícula dispersora, se libera una cantidad de energía P_{scatt} (potencia por unidad de área) que es espacialmente redirigida hacia otra dirección del espacio.

$$\sigma_s(\hat{s}) = \frac{P_{scatt}}{I_0} \quad (2.12)$$

El radio de la energía esparcida (energía por segundo) hacia el exterior de la onda plana incidente es lo que se conoce como sección transversal de scattering, donde $\hat{s}$ determina la dirección de propagación de la onda incidente

Las relaciones empíricas que relacionan la potencia con la intensidad ejercida por la luz sobre un área determinada pueden expresarse a través de las siguientes relaciones matemáticas, Fig. 2.5.

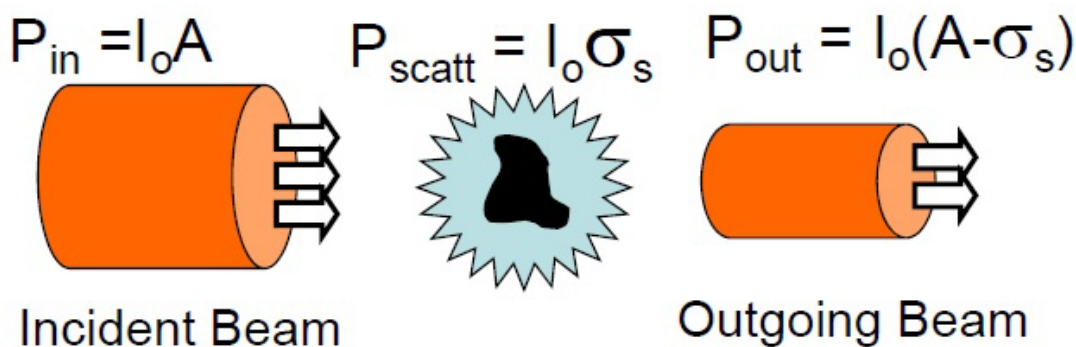


Figura 2. 5: (A) Antes de chocar contra la partícula, el haz incidente tiene una potencia uniforme $P_{in} = I_0 A$, donde I_0 es la intensidad de la radiación y A es la sección. (B) Después de encontrarse con la partícula, parte de la energía del haz se dispersa, dejando d

La sección transversal de scattering es equivalente al área que un objeto debería suprimir de una onda plana incidente para eliminar la potencia dispersada observada P_{scatt} . La dispersión depende la polarización de la radiación.

La distribución angular de la radiación esparcida viene dada por el diferencial de sección cruzada (Fig. 2.6), donde $\hat{s}'$ define el eje de un ángulo $d\Omega$ que se origina en la partícula esparcidora.

$$\frac{d\sigma_s}{d\Omega}(\hat{s}, \hat{s}') \quad (2.13)$$

Un medio que contiene una distribución uniforme de partículas dispersoras viene caracterizado por el coeficiente de scattering,

$$\mu_s = \rho \sigma_s \quad (2.14)$$

Donde ρ es la densidad de partículas de ese medio. El camino medio libre de scattering es un parámetro que representa la distancia media que recorre un fotón entre dos eventos de esparcimiento consecutivos.

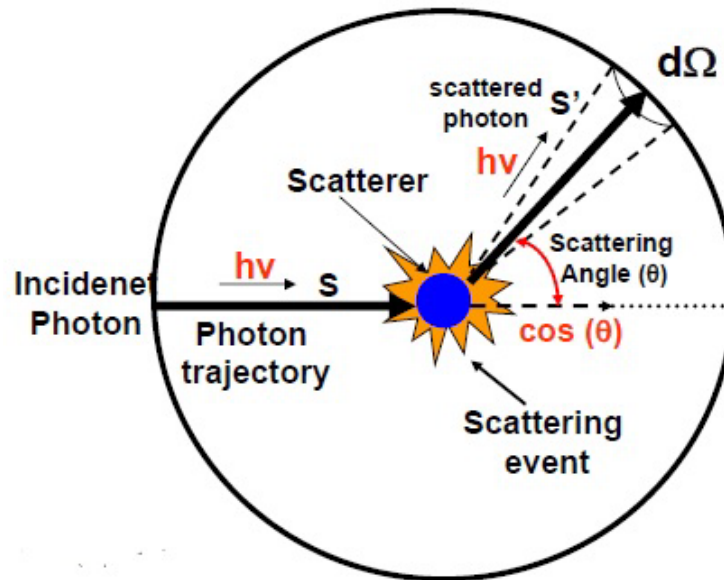


Figura 2.6: La sección diferencial cruzada de dispersión σ_s expresa la distribución angular de la radiación esparcida en relación a la radiación que incide sobre la partícula

En tejidos biológicos, los fenómenos de dispersión son mecanismos dominantes que afectan a la propagación de la luz. En la práctica, se clasifican en tres categorías definidas según el tamaño de la partícula en relación con la longitud de onda de la radiación incidente: (1) *Scattering de Rayleigh* y (2) *Scattering de Mie*. (Fig. 2.7).

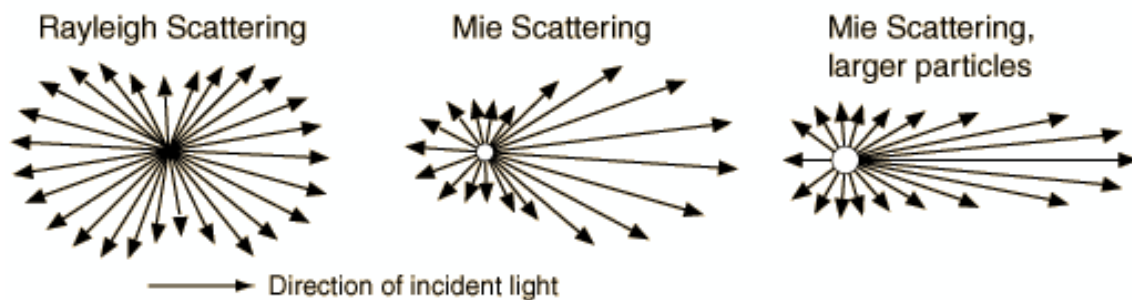


Figura 2.7: Tipos de scattering

2.2.3.1. Scattering de Rayleigh

En concreto, el scattering de Rayleigh se produce en presencia de inhomogeneidades muy pequeñas, mucho más que la longitud de onda de la luz. Puesto que todo tejido se puede considerar no homogéneo al estar formado por átomos y moléculas, se dice que se trata de un efecto inevitable.

Se ha comprobado que es un fenómeno omnidireccional, es decir la luz sale en cualquier dirección sin preferencia. Se ha calculado también la atenuación que este fenómeno produce debido a la luz que pasa a viajar fuera del camino de propagación.

Para una partícula esférica de radio a , la sección diferencial cruzada de scattering en el límite de Rayleigh viene dada por:

$$\frac{d\sigma_s}{d\Omega} = 8\pi^4 n_m^4 \left(\frac{n_s^2 - n_m^2}{n_s^2 + 2n_m^2} \right) \frac{a^6}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.15)$$

Sin entrar en la definición de los parámetros, conviene destacar la dependencia inversa con λ elevado a la cuarta potencia, esto indica una muy fuerte dependencia con la longitud de onda, cuanto menos sea la longitud de onda, más causado es el fenómeno y por tanto más intensa la atenuación.

2.2.3.2. Scattering de Mie

Se produce en la presencia de inhomogeneidades más grandes o del orden en tamaño a la longitud de onda de la luz. Además, es un fenómeno de esparcimiento principalmente hacia delante (aunque depende del tamaño concreto de las imperfecciones), por lo que la atenuación producida es menor.

2.3. Propagación de la luz en medios turbios

En las secciones anteriores hemos visto que, cuando la luz se propaga por un medio y encuentra un obstáculo, pueden darse dos posibles situaciones: la luz es absorbida o dispersada.

En la mayoría de los tejidos, ambas situaciones estarán presentes simultáneamente. Estos medios se denominan medios turbios.

Su coeficiente de atenuación puede expresarse como:

$$\alpha_t = \alpha + \alpha_s \quad (2.16)$$

Solo en algunos casos, α o α_s pueden ser insignificantes el uno respecto del otro, pero es importante darse cuenta de la existencia de ambos procesos y del hecho de que generalmente ambos están funcionando. Además, es muy conveniente definir un parámetro adicional, el albedo óptico a , como:

$$a = \frac{\alpha_s}{\alpha_t} = \frac{\alpha_s}{\alpha + \alpha_s} \quad (2.17)$$

Para $a=0$, la atenuación es debida exclusivamente a la absorción, mientras que en el caso de $a=1$ solo se produce dispersión. Para $a=1/2$, se da que $\alpha=\alpha_s$, es decir, los coeficientes de absorción y dispersión son la misma magnitud.

En la figura 2.8 el albedo se muestra como una función del coeficiente de dispersión. También podemos ver los 3 diferentes coeficientes de absorción típicos en el tejido biológico:

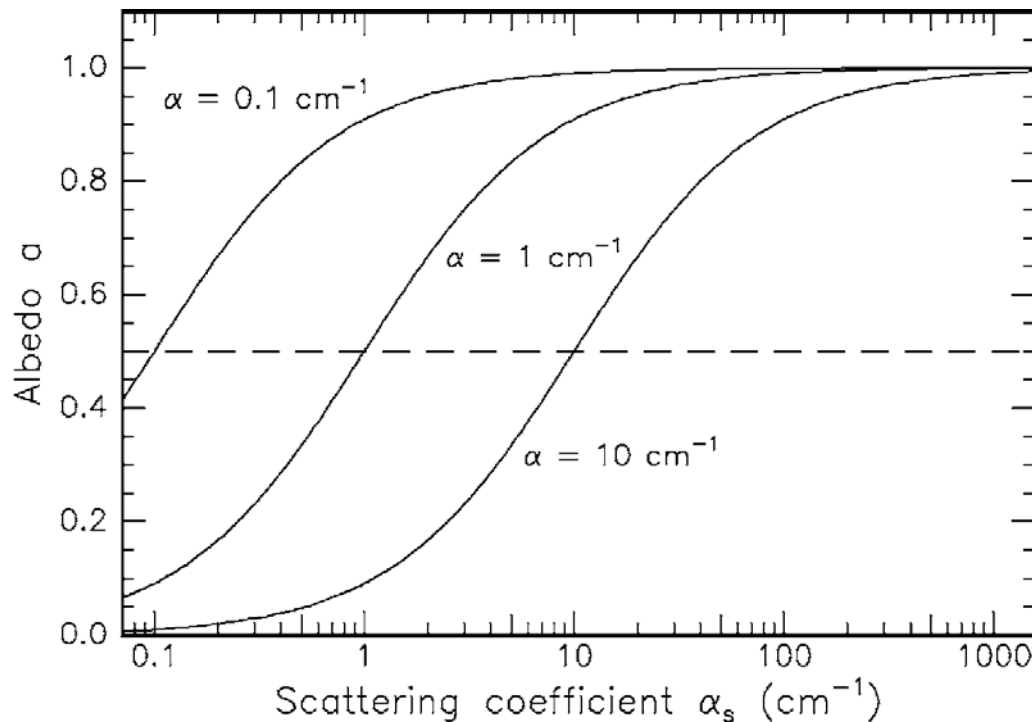


Figura 2. 8: El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma

Cuando se trata de medios turbios, otro parámetro útil es la profundidad óptica, que se define por:

$$d = \int_0^s \alpha_t ds' \quad (2.18)$$

donde ds denota un segmento de la trayectoria óptica, y s es su longitud total.

La ventaja de utilizar un albedo y el parámetro de profundidad óptica en lugar de coeficiente de absorción α y de dispersión α_s , es que los primeros son parámetros adimensionales.

2.4. Teoría de transporte de fotones

Una descripción matemática de las características de absorción y de dispersión de la luz se puede realizar de dos maneras diferentes: con la teoría analítica o con la teoría de transporte. La primera se basa en la física de ecuaciones de Maxwell y es, al

menos en principio, el enfoque más coherente. Sin embargo, su aplicabilidad es limitada debido a la complejidad del proceso, en cuanto a la elaboración de soluciones analíticas exactas. La teoría del transporte, por otro lado, aborda directamente el transporte de fotones a través de medios absorbentes y dispersivos sin tener en cuenta las ecuaciones de Maxwell. Es de carácter heurístico y carece del rigor de las teorías analíticas. Sin embargo, la teoría del transporte se ha utilizado ampliamente cuando se trata de interacciones del láser con el tejido, y se está dando evidencia experimental de que sus predicciones son satisfactorias en muchos casos.

El valor fundamental en la teoría del transporte es conocido como *radiance*³ $J(r, s)$ y se expresa en unidades de $W \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Denota la densidad de flujo de potencia en una dirección específica s dentro de un ángulo sólido de unidad $d\omega$. La ecuación diferencial por la cual se rige en cuanto a la radiación se llama ecuación radiativa de transporte y está dada por:

$$\frac{dJ(r, s)}{ds} = -\alpha_t J(r, s) + \frac{\alpha_s}{4\pi} \int_{4\pi} p(s, s') J(r, s') d\omega' \quad (2.19)$$

El principal problema con el que la teoría del transporte tiene que lidiar es la evaluación de la radiación difusa, ya que los fotones dispersados no siguen un determinado camino. Por lo tanto, se deben escoger las aproximaciones adecuadas y los enfoques estadísticos, dependiendo principalmente del valor del albedo, es decir, si la absorción o la dispersión es el proceso dominante en la atenuación.

Cada aproximación o enfoque se basa en ciertas suposiciones con respecto a las condiciones iniciales y de frontera. En general, la complejidad de cualquiera de los métodos está estrechamente relacionada con su precisión y con el tiempo de cálculo necesario. Estos métodos se conocen como:

2.4.1. Dispersión de primer orden: Sólo si la radiación difusa es considerablemente menor que la radiación coherente puede darse una solución. Este caso se llama dispersión de primer orden, ya que la luz dispersada se puede tratar de manera similar a la luz absorbida.

2.4.2. Teoría de Kubelka-Munk: Un modelo más útil cuya hipótesis principal es que la radiación sea difusa. La teoría de Kubelka-Munk es un caso especial de la llamada teoría de muchos flujos, donde la ecuación de transporte se convierte en un diferencial de ecuación matriz considerando la radiación en muchos ángulos directos.

2.4.3. Aproximación de difusión: Utilizada para albedos donde $a \gg 0.5$, es decir, si la dispersión es mucho mayor que la absorción.

2.4.4. Simulaciones de Montecarlo: Un enfoque numérico a la ecuación de transporte se basa en simulaciones de Monte Carlo. El método de Monte Carlo esencialmente se ejecuta mediante simulación por ordenador con un número N de fotones. Por tanto, es un enfoque estadístico. Un gran número de fotones se deben tener en cuenta para obtener una aproximación válida. Por lo tanto, todo el procedimiento, requiere mucho tiempo y se puede realizar de manera eficiente solo en grandes ordenadores.

2.4.5. Método de adición-duplicación inversa: Otro enfoque numérico de la ecuación de transporte se llama adición-duplicación inversa, introducida recientemente. El término “inversa” implica una inversión del proceso habitual de cálculo de la reflectancia y la transmitancia. El método de duplicación asume que la reflexión y la transmisión de la luz incidente en un ángulo determinado es conocido para una determinada capa de tejido. Las mismas propiedades de una capa doble de gruesa son encontradas dividiéndolo en dos capas iguales. Por lo tanto, la reflexión y transmisión para una capa arbitraria de tejido se pueden calcular a partir de un desbaste plano y delgado con propiedades conocidas, tal como se obtiene por la absorción y dispersión y doblando hasta que se consigue el espesor deseado.

2.5. Medición de las propiedades ópticas del tejido

En general, existen varios métodos (Fig. 2.9) para la medición de las propiedades ópticas del tejido. Estos métodos se centran en diferentes magnitudes que analizan la luz transmitida, reflejada y las intensidades dispersas. La absorbancia en sí es difícil de determinar, cuando los fotones son absorbidos por el tejido ya no se pueden utilizar para la detección. Por lo tanto, la intensidad absorbida generalmente se obtiene al restar la intensidad transmitida, reflejada e intensidades dispersas de la intensidad incidente.

Dependiendo del método experimental, se puede evaluar el coeficiente de atenuación total o los coeficientes de absorción y dispersión. La dependencia angular de la intensidad dispersa se mide por la rotación del correspondiente detector.

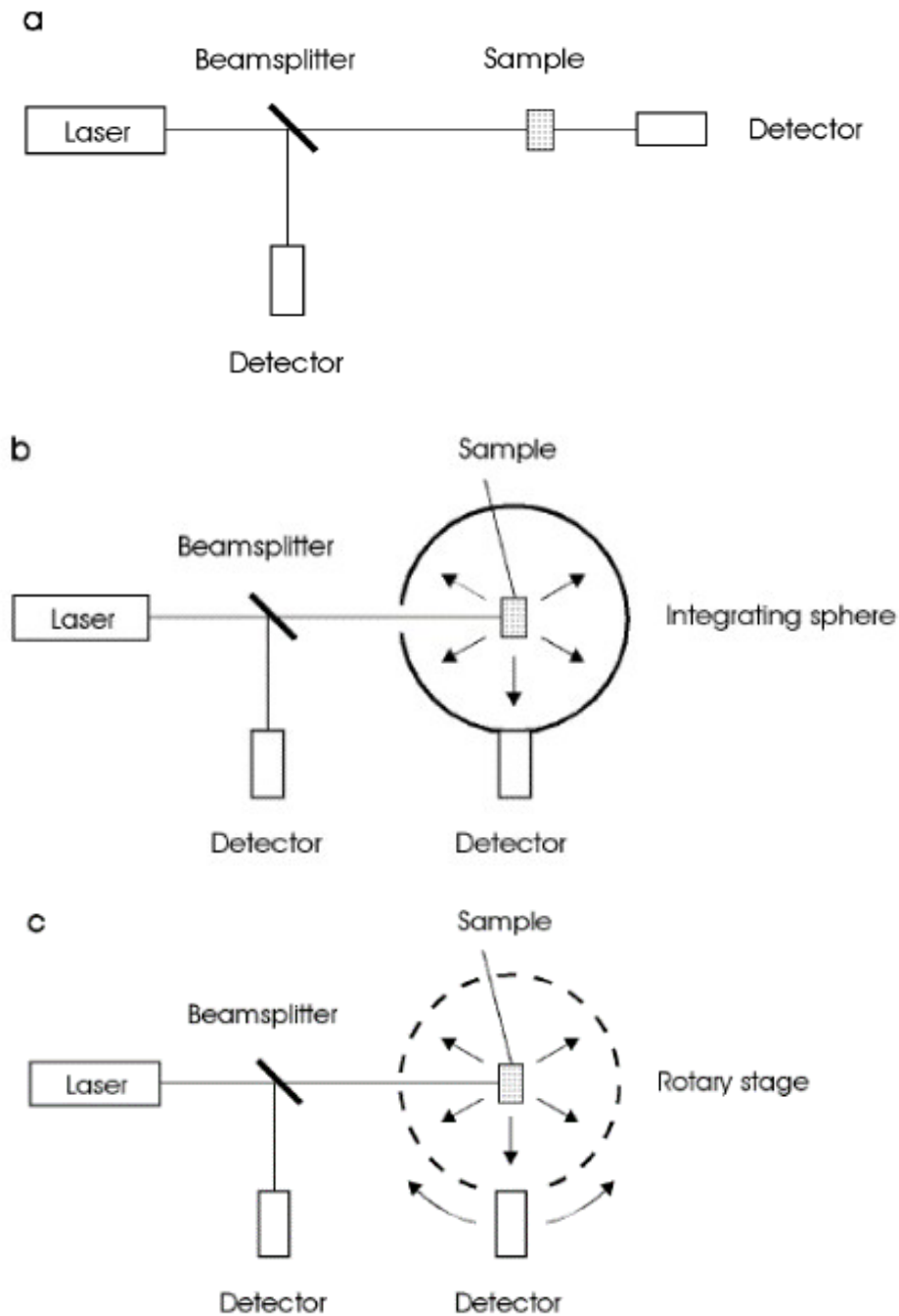


Figura 2.9: Ejemplos de los diferentes métodos para la medición de propiedades ópticas en tejidos:
(a) Método para medir la atenuación total. (b) Método para medir la absorción. (c) Método para medir la dependencia angular de la dispersión

La principal desventaja de estas técnicas que se muestran en la figura 2.9 es que no pueden realizarse simultáneamente. Sin embargo, es bien sabido que las propiedades ópticas del tejido biológico se alteran durante el calentamiento que es a menudo asociado con la exposición a la radiación láser. Por lo tanto, es más preciso medir estas propiedades en la misma configuración experimental y al mismo tiempo. Una configuración comúnmente utilizada que satisface este requisito es la geometría de esfera doble de integración, que se muestra en la figura 2.10.

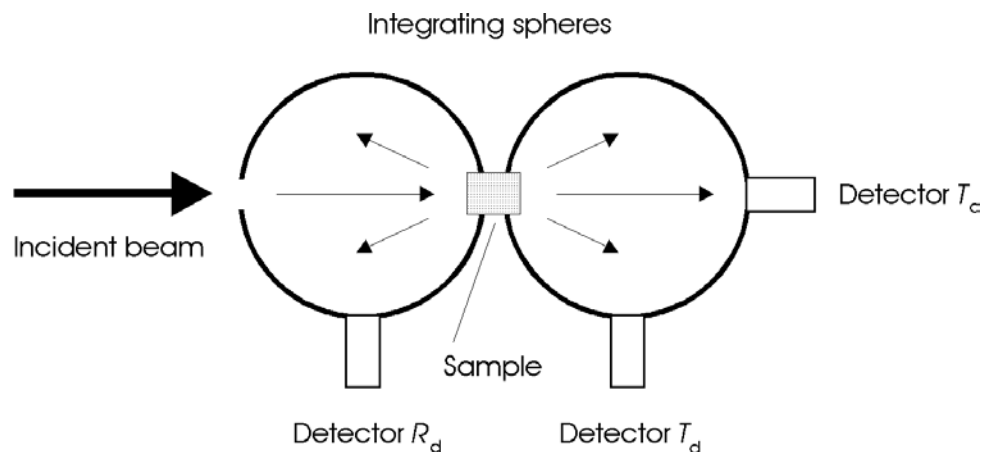


Figura 2.10: Geometría de esfera doble de integración para la medición simultánea de diferentes propiedades ópticas de los tejidos. Los detectores miden la intensidad coherente transmitida (T_c), la intensidad difusa transmitida (T_d) y la intensidad difusa reflejada

La geometría de esfera doble de integración está compuesta de dos esferas más o menos idénticas, situadas delante y detrás de la muestra que se va a analizar. La primera esfera integra toda la radiación que se refleja o dispersa hacia atrás desde la muestra. La radiación dispersa se envía hacia adelante y es absorbida por la segunda esfera. Con tres detectores, todas las mediciones pueden realizarse simultáneamente. En la figura 2.10, estos detectores están etiquetados como T_c para una transmitancia coherente, T_d para transmitancia difusa, y R_d para la reflectancia difusa, respectivamente.

La reflexión especular puede de nuevo evitarse colocando deflectores entre la muestra y cada detector. Sin embargo, una pequeña fracción de luz en cualquiera de las esferas podría penetrar nuevamente a través de la muestra, alcanzando así la otra esfera.

La simplicidad del modelo Kubelka-Munk lo ha convertido en un método popular para la medición de las propiedades ópticas de la materia. En general, el modelo se basa en la propagación de una radiación uniforme y difusa en una sola dimensión geometría.

Lamentablemente, los supuestos de una radiación difusa y una geometría unidimensional no se cumplen en los tejidos biológicos.

A esto se añade que los coeficientes de absorción y dispersión pueden cambiar durante la exposición al laser. Cuando se habla de los efectos térmicos encontraremos que la carbonización, en particular, conduce a una mayor absorción. La dispersión, por otro lado, se ve afectada a temperaturas más bajas, por ejemplo, cuando el tejido está coagulado.

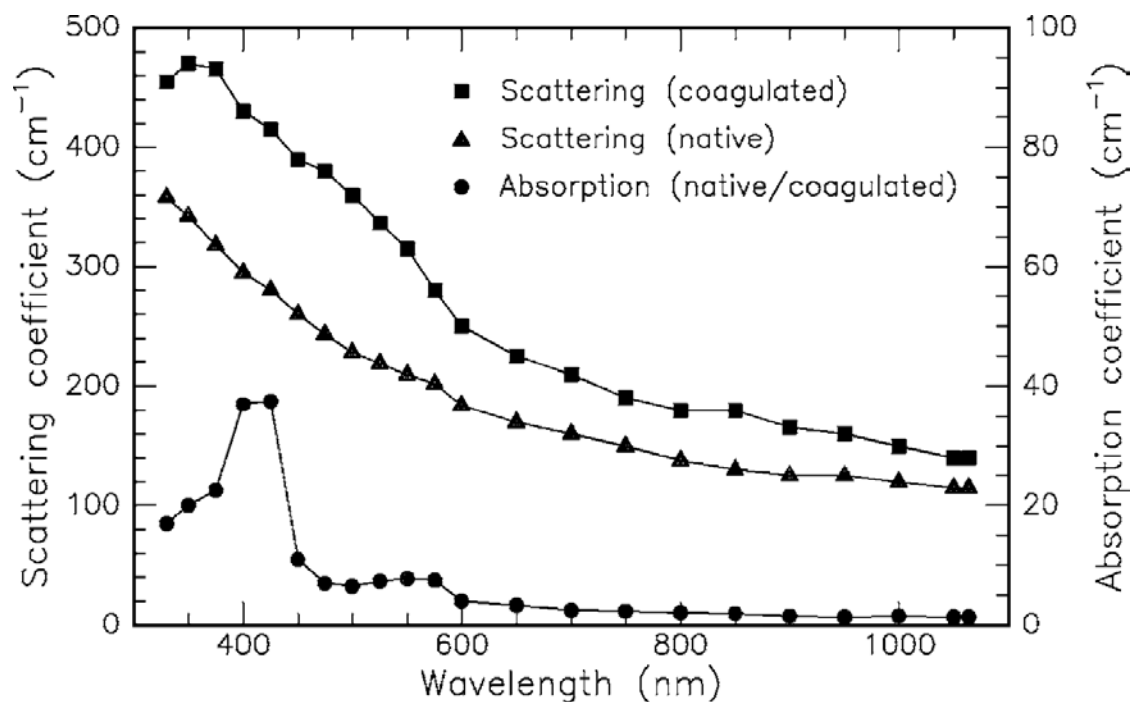


Figura 2.11: Propiedades ópticas de la materia blanca del cerebro humano en su estado original y en su estado coagulado

Es importante darse cuenta que tanto la teoría como la experimentación son necesarias para obtener valiosos resultados.

Finalmente, cabe señalar que el tejido biológico es algo poco homogéneo y frágil, con lo cual hace que sea difícil transferir datos experimentales de una muestra a otra. Por lo general, este inconveniente se tiene en cuenta aplicando generosas franjas de error.

Además, el tejido vivo no tiene la misma estructura morfológica que el tejido extirpado. Un ejemplo típico es el tejido corneal que se convierte en un material turbio a las pocas horas después de la disección. También, las alteraciones son provocadas por la deformación y el manejo inevitable del tejido como el secado, congelación, o simplemente sumergirse en una solución salina.

Por lo tanto, cuando se necesitan datos para ciertas aplicaciones clínicas, se debe realizar un análisis cuidadoso de las muestras en un entorno de trabajo específico, en vez de confiar ciegamente en mediciones informadas en otros lugares.

2.6. Conclusión

A lo largo de este capítulo se ha explicado cómo se comporta la luz en su interacción con la materia, a través del estudio de las propiedades ópticas básicas que ocurren.

También se han repasado diversos teoremas y postulados, que han sido utilizados ampliamente a lo largo de la historia para estudiar las propiedades ópticas de la materia y se han visto diferentes técnicas y métodos empleados para medir dichas propiedades.

Capítulo 3. Mecanismos de interacción

3.1. Introducción

La variedad de mecanismos de interacción que pueden surgir al aplicar una fuente de luz al tejido biológico son múltiples. Las características específicas del tejido, así como los parámetros de la fuente óptica, como la longitud de onda, el tiempo de exposición, la energía aplicada y la densidad de potencia, contribuyen a esta diversidad.

En este capítulo definiremos cinco tipos de mecanismos de interacción: fotoquímicos, térmicos, fotoablación, ablación inducida por plasma o ablación ultrarrápida, y fotodisrupción.

Los parámetros que controlan principalmente estos procesos son la duración de exposición al emisor de luz y la intensidad del mismo. En la siguiente figura 3.1 se muestra un mapa logarítmico con los cinco tipos básicos de interacción luz-tejido. El eje de las ordenadas expresa la intensidad de la fuente o irradiancia en W/cm^2 . La abscisa representa el tiempo de exposición en segundos. Dos diagonales muestran fluencias de energía constantes a $1 J/cm^2$ y $1000 J/cm^2$, respectivamente. Según la imagen, la escala de tiempo puede ser dividida aproximadamente en cinco secciones: tiempos de exposición $> 1 s$ para interacciones fotoquímicas, de 1 min hasta $1 \mu s$ para interacciones térmicas, $1 \mu s$ hasta 1ns para la fotoablación, y $< 1 ns$ para la ablación inducida por plasma y fotodisrupción. La diferencia entre los dos últimos se atribuye a diferentes densidades de energía. [Niemz07].

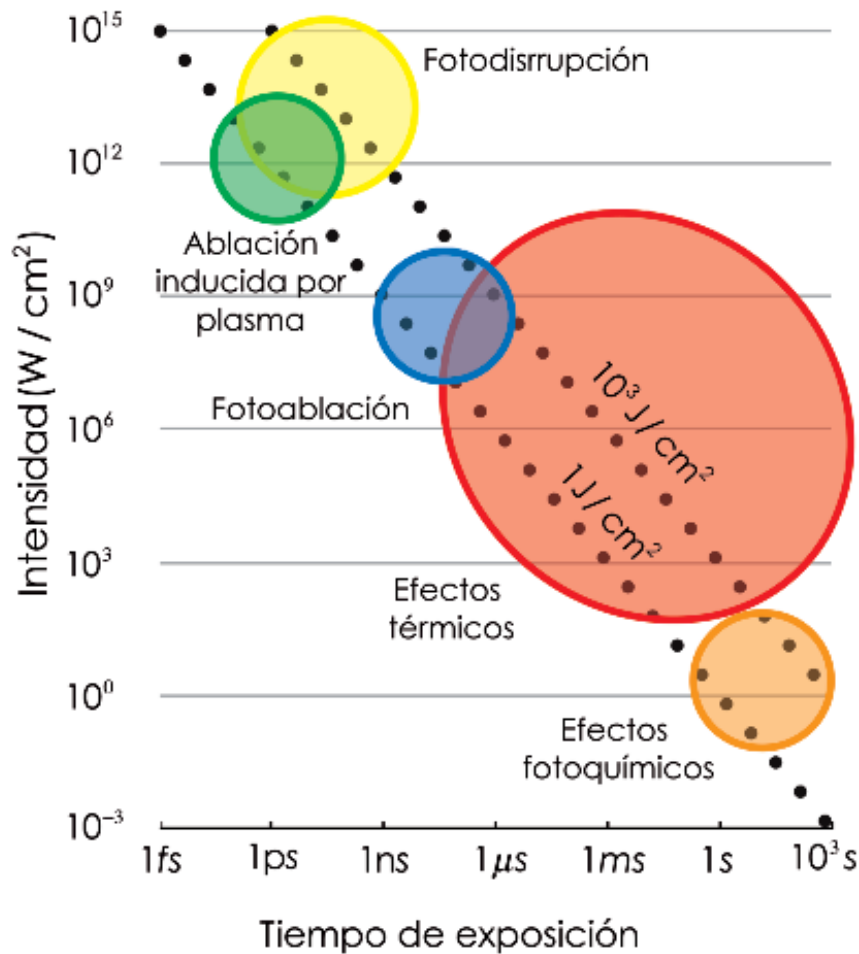


Figura 3.1: Mecanismos de interacción de la luz con el tejido biológico en función de la duración y de la intensidad de la fuente óptica

Este tipo de interacciones se pueden ver perjudicadas debido a la falta de homogeneidad de la mayoría de los tejidos. Sin embargo, la física básica involucrada en cada interacción se vuelve accesible si se recopilan suficientes datos para ajustar los parámetros desconocidos.

3.2. Interacción fotoquímica

Inducir reacciones químicas en determinadas moléculas o tejidos es muy sencillo. Para ello se utilizan fuentes de baja intensidad $1 (W/cm^2)$ y tiempos de interacción largos. Como interesa alcanzar profundidades de penetración grandes, las longitudes de onda que se emplean se encuentran en la región visible del espectro. Un procedimiento habitual en el que se aprovecha este tipo de efecto es la denominada terapia fotodinámica.

3.2.1. Terapia fotodinámica

Esta terapia se utiliza en la eliminación de tumores (Fig. 3.2). En ella, un cromóforo (denominado fotosensibilizador) se inyecta en un cuerpo cancerígeno, este tras unos días elimina todo el tejido sano salvo los tumores. En ese momento, se irradia el cuerpo con láser, el cual provoca una serie de reacciones químicas al interactuar con el fotosensibilizador, de esta manera se consigue eliminar el tumor.

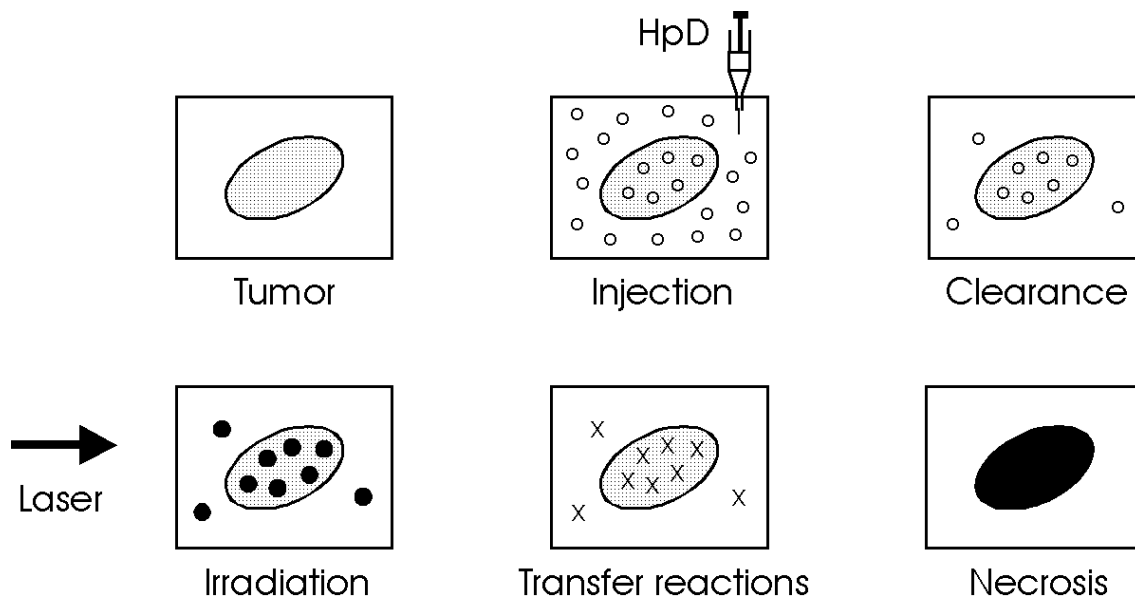


Figura 3.2: Terapia fotodinámica

3.3. Interacción térmica

La interacción térmica está asociada a un incremento de la temperatura en el tejido debido a la absorción de la energía de una fuente óptica. Como se decía al comienzo del capítulo, este mecanismo depende de la intensidad y duración del láser sobre el tejido dando lugar al incremento de la temperatura y provocando distintos efectos macroscópicos, tales como: coagulación, vaporización, carbonización y fusión. Estos efectos son la consecuencia del proceso, el cual podemos dividir en tres etapas:

3.3.1. Generación de calor

Es producida por la absorción de la energía de la fuente en el tejido. A nivel microscópico, el proceso se puede dividir en dos etapas. En la primera, se produce la absorción de fotones por parte de las moléculas, quedando estas excitadas.

Posteriormente, las moléculas se desexcitan por colisiones, de forma que la energía absorbida se convierte en energía cinética, y, por tanto, en calor.

3.3.2. Transporte de calor

Una vez que se ha elevado localmente la temperatura del tejido, el calor se difunde por las regiones adyacentes según las propiedades de conducción y difusión inherentes a cada tejido, disminuyendo la temperatura en la zona de irradiación y aumentando en las zonas que la circundan.

3.3.3. Efectos de calor

Dependiendo de la temperatura que se alcance en una determinada región del tejido, se producen distintos efectos, como coagulación, vaporización o ablación térmica, carbonización o fusión del tejido.

3.4. Fotoablación

La fotoablación es el proceso que emplea luz ultravioleta para romper las moléculas del tejido, con este proceso se obtienen cortes muy preciosos y limpios en el que los efectos térmicos son prácticamente despreciables.

Otro parámetro destacado en este proceso es la intensidad de la fuente, el rango de intensidades típico en el que se suele trabajar es de $10^7 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$.

3.5. Ablación inducida por plasma o ablación ultrarrápida

La ablación inducida por plasma o ablación ultrarrápida ocurre cuando se utilizan intensidades elevadas y el tiempo de interacción de la luz con el tejido es muy corto (por debajo de los picosegundos).

3.6. Fotodisrupción

La fotodisrupción es un efecto que se genera tras la generación del plasma en proceso de ablación ultrarrápida. Cuando la intensidad es muy elevada, la expansión del material debido a la explosión de fase genera una onda de choque que se propaga a lo

largo del tejido, dando lugar a modificaciones no deseadas, como cavitaciones, fisuras, etc.

En la siguiente tabla (Tabla 3.1) se presentan las intensidades necesarias para producir ablación ultrarrápida y fotodisrupción en tejido corneal.

Duración del pulso	Umbral de ablación ultrarrápida (W/cm^2)	Umbral de fotodisrupción (W/cm^2)
100 fs	$2,0 \times 10^{13}$	$5,0 \times 10^{14}$
1 ps	$3,3 \times 10^{12}$	$5,0 \times 10^{13}$
10 ps	$8,0 \times 10^{11}$	$5,0 \times 10^{12}$
100 ps	$2,3 \times 10^{11}$	$5,0 \times 10^{11}$

Tabla 3.1: Umbrales de intensidad en los procesos de ablación ultrarrápida y fotodisrupción, en función de la duración del pulso láser

En general la fotodisrupción no es un mecanismo utilizado ya que genera cortes y estructuras no controladas en el tejido.

3.7. Conclusión

En este capítulo se ha estudiado el comportamiento del tejido biológico al ser expuesto a la luz, considerando fundamental en esta interacción los diferentes tipos e intensidades de luz y el tiempo de exposición a la misma. También se explican las modificaciones a las que se ven expuestos estos tejidos al entrar en contacto con la luz.

Teniendo en cuenta que este trabajo va a ser dirigido a la recreación del espectro electromagnético del Sol con una fuente de luz artificial para la fomentación del crecimiento y floración de las plantas, concluimos que el mecanismo de interacción que va a intervenir en este proceso es el fotoquímico, provocando la reacción química de la fotosíntesis, en consecuencia, a la utilización de fuentes de baja intensidad y tiempos de interacción largos.

Capítulo 4. Fuentes de luz

4.1. Introducción

Se puede distinguir entre fuentes naturales (el Sol) o artificiales (una lámpara). Con el fin de buscar una fuente de luz artificial que simule el espectro electromagnético que emite el Sol, hacemos un amplio análisis de las fuentes de luz disponibles en la actualidad. Dentro de las fuentes artificiales distinguimos entre las de luz no-coherente y coherente.

4.2. Fuentes de luz no-coherente

La radiación luminosa de la luz normal está constituida por ondas electromagnéticas cuya longitud de onda está comprendida entre 400 y 800 nanómetros.

La superposición de dos o más ondas produce, generalmente, interferencias; las ondas se suman o se restan, produciendo con ello máximas o mínimas intensidades. Una luz con estas características se denomina una luz no-coherente o incoherente.

4.2.1. Lámparas incandescentes

Una lámpara incandescente moderna estándar está compuesta de una bombilla de vidrio que contiene un filamento de alambre metálico como tungsteno (W) en el vacío. El filamento de alambre tiene alta resistencia eléctrica. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de este filamento de alambre, las colisiones entre los electrones y átomos del cable conducen a la incandescencia del alambre (es decir, lo hacen brillar) dando como resultado una producción de luz. Debido a que con el tiempo la incandescencia conduce a la evaporación de los átomos del filamento de alambre, a fin de prolongar la vida útil de la lámpara y preservar la calidad de la luz, la lámpara a veces se llena con un gas noble (por ejemplo, argón), que reduce la evaporación del filamento de alambre.

Las lámparas incandescentes modernas estándar producen radiación no ionizante en el rango de luz visible y generalmente no emiten radiación en el rango ultravioleta (UV), excepto en condiciones extremas de muy alta potencia. El rango de radiación depende del material del filamento de metal en la lámpara. Además, este tipo de lámpara también emite radiación infrarroja no ionizante invisible que se siente como calor.

Se usan principalmente para el alumbrado interior en las casas, oficinas, negocios, etc. debido a su bajo costo, la facilidad de su instalación y a que funcionan en cualquier posición.

4.2.1.1. Halogenadas

La lámpara halógena (Fig. 4.1) es un tipo de lámpara incandescente que generalmente contiene un filamento de tungsteno (W) y se llena con un gas halógeno como el yodo (I) o el bromo (Br). El gas halógeno reduce la cantidad de vapor de gas de tungsteno emitido por el filamento, lo que prolonga la vida útil de la lámpara y mejora la calidad de la luz. Por lo tanto, la lámpara puede funcionar a una temperatura más alta que una lámpara incandescente estándar llena de gas noble, lo que aumenta su eficacia (hasta en un 10% o más) y proporciona una mejor iluminación y un uso eficaz de la energía eléctrica. Esta característica permite el uso de lámparas halógenas relativamente más pequeñas, integradas en sistemas de iluminación compactos, como los reflectores.

Las lámparas halógenas producen luz visible. Una pequeña cantidad de la radiación emitida está en el rango de UV. Debido a que parte de la radiación en este rango es ionizante (como parte de la luz del sol) y puede causar quemaduras o cáncer de piel con exposición prolongada, se debe evitar dicha exposición cerca de lámparas halógenas.

Para reducir la posibilidad de exposición a la radiación UV, el cuarzo del bulbo de vidrio generalmente se mezcla con una cantidad mínima de material absorbente de UV (un proceso conocido como "dopaje") o mediante un espesamiento óptico. Otro enfoque es encerrar la lámpara halógena en una caja de vidrio que reduce el riesgo de quemaduras.

Las lámparas halógenas que emiten radiación UVB se utilizan intencionalmente con fines científicos o médicos, como los tratamientos dentales.

Ocasionalmente, las lámparas halógenas explotan cuando alcanzan altas temperaturas. Uno de los riesgos de usarlos es el peligro de incendios cuando se encuentran cerca de materiales inflamables, como en los techos de casas de madera.



Figura 4.1: Lámpara halógena

4.2.1.2. Lámparas reflectoras dicroicas

La lámpara dicroica (Fig. 4.2) casi siempre se refiere a proyectores halógenos de bajo voltaje. La superficie interior de estas lámparas está diseñada como un reflector, con el propósito de recoger la luz generalizada del filamento de tungsteno y proyectarlo hacia adelante a través de la parte frontal de la lámpara. [Web8].

La superficie de este reflector se puede fabricar de dos maneras, de aluminio o de un recubrimiento dicroico. El propósito de un revestimiento de aluminio no es complicado, proyecta la mayor cantidad de luz posible hacia adelante sin discriminar entre la luz visible y la radiación UV o IR invisible, cualquiera de los cuales puede ser perjudicial.

Un recubrimiento dicroico es esencialmente una capa delgada de película no metálica, a veces denominada película de interferencia, que refleja la luz visible del filamento hacia adelante mientras filtra la radiación infrarroja y permite que pase a través de la parte posterior de la lámpara. Dado que la radiación IR es una fuente importante de calor, el efecto neto de esto es hacer que el haz sea mucho más fresco.



Figura 4.2: Lámpara reflectora dicroica

4.2.2. Lámparas de descarga en baja presión

Las lámparas de baja presión tienen una presión de trabajo mucho menor que la presión atmosférica. Por ejemplo, las lámparas fluorescentes comunes funcionan a una presión de aproximadamente 0.3% de presión atmosférica.

4.2.2.1. Tubos fluorescentes

La iluminación fluorescente (Fig. 4.3) en forma de lámpara o tubo se basa en la descarga eléctrica de gas ionizado (plasma). Las lámparas y tubos fluorescentes contienen gases nobles como por ejemplo el argón (Ar), neón (Ne), criptón (Kr) o xenón (Xe), así como sustancias como mercurio (Hg), sodio (Na), y compuestos metálicos y sustancias halógenas (halogenuros metálicos). Además, la lámpara o tubo está recubierto internamente con material fluorescente. [Web9].

El proceso de iluminación se lleva a cabo de la siguiente manera:

La conexión eléctrica proporciona el motor de arranque, los electrodos se calientan y se produce la emisión térmica de electrones.

El voltaje eléctrico entre los electrodos acelera los electrones térmicos, lo que lleva a la excitación directa o ionización de los átomos de mercurio (Hg) u otras sustancias dentro de la lámpara o tubo. Además, la ionización indirecta (ionización Pening) ocurre cuando los átomos del gas noble (o mezcla de gases) en el tubo, excitados por los electrones térmicos (en el campo eléctrico), transfieren energía colisionando con los átomos de mercurio. Esta energía conduce a la excitación o ionización de los átomos de mercurio, y la cantidad de átomos de mercurio excitados alcanza niveles de energía más altos.

Los átomos de mercurio que se someten a la excitación a altos niveles de energía regresan espontáneamente a niveles de energía más bajos. Esto va acompañado de emisión de radiación UV, especialmente en las longitudes de onda de 253.7 y 185 nanómetros (y en otros materiales de acuerdo con las longitudes de onda apropiadas para sus propiedades electrónicas).

La radiación UV producida en el tubo causa la excitación de los átomos del recubrimiento interno de la capa fluorescente del tubo que conduce a la emisión espontánea de luz visible.

Los colores percibidos de la luz emitida dependen de las propiedades atómicas del recubrimiento fluorescente de la superficie del tubo.



Figura 4.3: Tubo fluorescente

4.2.2.2. Fluorescentes compactas (CFL)

Una CFL es una lámpara fluorescente de tamaño reducido (Fig. 4.4). Este tipo de lámpara produce una iluminación de intensidad similar a la de las lámparas incandescentes. El funcionamiento de la CFL es similar al de las lámparas fluorescentes regulares: una CFL generalmente contiene una mezcla de gases y vapor de mercurio. Los electrones de los átomos de mercurio experimentan excitación térmica a altos niveles de energía y emiten luz UV cuando regresan a niveles de energía más bajos. La luz ultravioleta producida en la lámpara provoca la excitación de los átomos del revestimiento interior de la capa fluorescente de la lámpara que conduce a la emisión espontánea de luz visible y calienta otros componentes de la lámpara, como el vidrio. Aunque la luz producida de esta manera tiene un espectro diferente al producido por la lámpara incandescente, el uso de varios materiales fosforescentes especiales altera el espectro de luz emitido por las lámparas fluorescentes compactas para asemejarse a la luz emitida por las lámparas incandescentes. Recubrir la lámpara con una capa de materiales fosforescentes evita la emisión de radiación UV de longitud de onda corta por fotoluminiscencia, que absorbe la radiación UV y permite la emisión de fotones menos energéticos (es decir, de longitudes de onda más largas con frecuencias más bajas). Sin embargo, la radiación UV puede filtrarse cuando la capa de recubrimiento es de baja calidad, o está agrietada o fabricada inadecuadamente, o está dañada con el tiempo.

El consumo de energía de una CFL es aproximadamente un tercio o un cuarto (o incluso menos) que el de una lámpara incandescente similar, por lo que las lámparas fluorescentes compactas se consideran de conservación de energía. Las lámparas

fluorescentes compactas están diseñadas de varias formas, como bobina, tubo plegado, etc., en un intento de maximizar la cantidad de luz y minimizar el volumen de la lámpara.

El espectro de radiación emitido por las CFL incluye, además de la luz visible, una pequeña cantidad de radiación UV. Las líneas espectrales de radiación UV dependen del uso de compuestos de fósforo en la CFL. Incluyen líneas espectrales en el rango de UVA (380-420 nanómetros) y líneas con longitudes de onda incluso más cortas (mayor energía) en el rango UVC.



Figura 4.4: Lámpara fluorescente compacta (CFL)

4.2.2.3. Baja presión en sodio

Las lámparas de sodio de baja presión (Fig. 4.5) producen hasta 180 lúmenes por vatio y tienen la mayor eficacia de todas las fuentes de iluminación disponibles comercialmente.

A pesar de que emiten una luz amarilla, una lámpara de sodio de baja presión no debe confundirse con una lámpara de sodio de alta presión estándar, que es una lámpara de descarga de alta intensidad.

Las lámparas de sodio de baja presión funcionan como las lámparas fluorescentes y requieren balasto. Las lámparas también son físicamente grandes, por lo que la distribución de la luz desde los dispositivos es menos controlable. Hay un breve período de calentamiento para que la lámpara alcance el brillo completo.

Estas lámparas producen una luz prácticamente monocromática que promedia una longitud de onda de 589,3 nm (en realidad dos líneas espectrales dominantes muy juntas entre 589,0 y 589,6 nm).

Las lámparas de sodio de baja presión se utilizan cuando la reproducción del color no es importante, pero sí la eficiencia energética. Se usan comúnmente para exteriores,

carreteras, estacionamientos y luces de camino. Se prefieren las lámparas de sodio de baja presión alrededor de los observatorios astronómicos porque la luz amarilla se puede filtrar de la luz aleatoria que rodea el telescopio.



Figura 4.5: Lámpara de sodio de baja presión

4.2.3. Lámparas de descarga en alta presión

Las lámparas de descarga de alta intensidad (HID) son similares a las fluorescentes ya que se genera un arco entre dos electrodos. El arco en una fuente HID es más corto, pero genera mucha más luz, calor y presión dentro del tubo de arco.

4.2.3.1. Descarga en vapor de mercurio

Las lámparas de vapor de mercurio (Fig. 4.6) consisten en un tubo de descarga de arco interno construido de cuarzo rodeado por una envoltura exterior de vidrio de borosilicato duro. La radiación UV de onda corta, resultado de la descomposición de los electrones del átomo de mercurio de un estado excitado a un estado estable, se transmite fácilmente a través del tubo de cuarzo interno, pero se bloquea virtualmente por la envoltura exterior de vidrio durante el funcionamiento normal. [Web10].

En las lámparas de vapor de mercurio de presión media, las líneas de 200-600 nm están presentes. Las lámparas pueden construirse para emitir principalmente en UV-A (alrededor de 400 nm) o UV-C (alrededor de 250 nm).

Las lámparas de vapor de mercurio son más eficientes energéticamente que las incandescentes y la mayoría de las luces fluorescentes, con eficacias luminosas de 35 a 65 lúmenes / vatio. Sus otras ventajas son una larga vida útil del bulbo en el rango de 24 000 horas y una salida de luz blanca clara de alta intensidad. Por estas razones, se utilizan para la iluminación general de grandes áreas, como en fábricas, almacenes y estadios deportivos, así como para alumbrado público. Las lámparas de mercurio claro producen luz blanca con un tinte de color verde azulado debido a la combinación de líneas espectrales de mercurio. Esto no favorece el color de la piel humana, por lo que estas

lámparas generalmente no se usan en tiendas minoristas. También requieren un período de calentamiento de 4 a 7 minutos para alcanzar la salida de luz completa. Las lámparas de vapor de mercurio se están volviendo obsoletas debido a la mayor eficiencia y al mejor equilibrio de color de las lámparas de halogenuros.



Figura 4.6: Lámpara de vapor de mercurio

4.2.3.2. Haluros metálicos

También conocidas como halogenuros metálicos (Fig. 4.7) son similares a las lámparas de vapor de mercurio, pero usan aditivos de haluros metálicos dentro del tubo de arco junto con el mercurio y el argón. Estos aditivos permiten que la lámpara produzca más luz visible por vatio con una reproducción cromática mejorada.

Las potencias oscilan entre 32 y 2000, ofreciendo una amplia gama de aplicaciones en interiores y exteriores. La eficacia de las lámparas de halogenuros metálicos oscila entre 50 y 115 lúmenes por vatio, típicamente aproximadamente el doble que la del vapor de mercurio.

Debido a la buena reproducción del color y la alta emisión de lúmenes, estas lámparas son buenas para estadios deportivos y estadios. Los usos interiores incluyen grandes auditorios y salas de convenciones. Estas lámparas a veces se utilizan para la iluminación general al aire libre, como las instalaciones de estacionamiento, pero un sistema de sodio de alta presión suele ser una mejor opción.



Figura 4.7: Haluro metálico

4.2.4. Diodo emisor de luz (LED)

Definimos LED como un diodo emisor de luz es una fuente de luz semiconductor formada por una unión p-n que emite luz cuando se aplica una corriente eléctrica adecuada. [Web1].

Un diodo permite que una corriente eléctrica viaje en una sola dirección. Se crea un diodo en la intersección entre dos tipos de materiales (semiconductores). Cuando se aplica una corriente alterna al diodo en lo que se denomina una polarización directa (dirección), la corriente pasa a través del diodo, mientras que en una polarización inversa (dirección) la corriente no viaja a través del diodo. El diodo también funciona cuando una corriente eléctrica directa pasa a través del diodo a lo largo de su propio sesgo (dirección).

Un diodo emisor de luz (LED) está compuesto por un semiconductor que ha sufrido dopaje. Cuando una corriente eléctrica pasa a través del diodo, los átomos del semiconductor se excitan (suben) a niveles de alta energía. Cuando los átomos reversion espontáneamente a niveles inferiores, emiten fotones en las longitudes de onda de la luz visible.

El color de la luz obtenida depende de las propiedades de los materiales que componen el diodo. Los diodos emisores de luz no emiten luz en todas las direcciones. Por lo tanto, deben combinarse de tal manera que permitan esta función. Los diodos están integrados en una estructura que se asemeja a una lámpara incandescente regular.

Como en una lámpara de este tipo, los LED producen una iluminación fuerte al instante. Por el contrario, una lámpara fluorescente no se enciende inmediatamente. La calidad de la iluminación de las lámparas LED y su salida se desvanecen con el tiempo, aunque a lo largo de los años la calidad de las lámparas LED ha mejorado. Las lámparas LED tienen una larga vida útil (25 000-100 000 horas) y son eficientes energéticamente.

Hoy, las lámparas LED que emiten luz blanca están reemplazando gradualmente a las lámparas incandescentes y las lámparas fluorescentes compactas. Dado que aproximadamente un cuarto del consumo de electricidad es para iluminación, el paso a la iluminación LED tendrá un tremendo impacto en la conservación de energía global.

A continuación, se muestra una tabla (Tabla 4.1) con LED fabricados con diferentes materiales semiconductores y en la longitud de onda que trabajan.

Color	Longitud de Onda [nm]	Material semiconductor
Blanco	Espectro amplio	- Blanco puro: LED azul o UV con fosforo amarillo - Blanco cálido: LED azul con fosforo naranja
Ultravioleta	$\lambda < 400$	- Nitruro de Galio-Indio (InGaN) (385-400 nm) - Diamante (C) (235 nm) - Nitruro de Boro (BN) (215 nm) - Nitruro de Aluminio (AlN) (210 nm) - Nitruro de Galio-Aluminio (AlGaIn) - Nitruro de Aluminio-Galio-Indio (AlGaInN) (hasta 210 nm)
Violeta	$400 < \lambda < 450$	- Nitruro de Galio-Indio (InGaN)
Azul	$450 < \lambda < 500$	- Seleniuro de Zinc (ZnSe) - Nitruro de Galio-Indio (InGaN) - Carburo de Silicio (SiC)
Verde	$500 < \lambda < 570$	- Fosfato de Galio (GaP) - Fosfuro de Aluminio-Galio-Indio (AlGaInP) - Fosfuro de Galio-Aluminio (AlGaP) - Nitruro de Galio-Indio (InGaN) - Nitruro de Galio (GaN)
Amarillo	$570 < \lambda < 590$	- Fosfuro de Galio y Arsénico (GaAsP) - Fosfuro de Aluminio-Galio-Indio (AlGaInP) - Fosfato de Galio (GaP)
Naranja	$590 < \lambda < 610$	- Fosfuro de Galio y Arsénico (GaAsP) - Fosfuro de Aluminio-Galio-Indio (AlGaInP) - Fosfato de Galio (GaP)
Rojo	$610 < \lambda < 760$	- Arseniuro de Galio-Aluminio (AlGaAs) - Fosfuro de Galio y Arsénico (GaAsP) - Fosfuro de Aluminio-Galio-Indio (AlGaInP)

			- Fosfato de Galio (GaP)
	Radiación infrarroja	$\lambda > 760$	- Arseniuro de Galio (GaAs) - Arseniuro de Galio-Aluminio (AlGaAs)

Tabla 4.1: LED

Principalmente podemos clasificar los LED en tres tipos:

4.2.4.1. LED de emisión lateral o por el borde, ELED

Este tipo de LED presenta una superficie emisora de luz semejante a una tira estrecha en el mismo plano de la unión p-n, consiguiendo así que la luz radie de forma transversal haciéndose más directiva y las pérdidas de acoplamiento sean menores. [Web5].

4.2.4.2. LED super luminiscente, SLD

Su particularidad radica en que una de sus caras por donde va a salir la luz es tallada y por tiene una cierta capacidad de reflexión, la otra cara no es tallada, de manera que el efecto laser no se presenta, pero hay una cierta amplificación.

4.2.4.3. LED por emisión superficial, SLED

Este tipo de LED fue desarrollado para aplicaciones con necesidades altas de velocidad de transmisión (mayores a 100 Mbps). Este tipo de LED emite luz en muchas direcciones, pero concentrando la luz emitida en un área muy pequeña. Son más eficientes que los anteriores y permiten que se acople más potencia. Sin embargo, son más costosos y difíciles de elaborar.

4.3. Fuentes de luz coherente

Con una fuente de luz coherente, todas las ondas emitidas tienen la misma longitud de onda y la misma orientación.

Todos los fotones tienen la misma energía y la misma impulsión. Esta luz monocromática se presta a procedimientos de amplificación que son aprovechados en el principio del láser. [Waymant00].

4.3.1. Láseres

La palabra LÁSER es un acrónimo que proviene del inglés y significa Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación. Un láser es un dispositivo que produce luz altamente direccional y la emite a través de un proceso llamado emisión estimulada de radiación que aumenta la intensidad de la luz.

Un láser se diferencia de las fuentes de luz convencionales en cuatro parámetros: coherencia, direccionalidad, monocromía e intensidad.

Las ondas de luz de las fuentes ordinarias poseen muchas longitudes de onda, por lo tanto, los fotones emitidos están fuera de fase y la luz es incoherente. Por el contrario, las ondas de luz láser tienen una sola longitud de onda, por lo que los fotones emitidos están en fase y la luz es coherente.

Las ondas de luz del láser al contener solo una longitud de onda o color son conocidas como luz monocromática.

El rayo láser es muy estrecho y se puede concentrar en un área muy pequeña, esto hace que la luz láser sea altamente direccional.

La luz láser se extiende en una pequeña región del espacio, con lo cual, toda la energía se concentra en una región estrecha provocando una intensidad de luz mayor que la ordinaria.

A continuación, clasificamos los láseres según el medio utilizado.

4.3.1.1. Láseres de gas

Son láseres en los cual una corriente eléctrica se descarga a través de un gas dentro del medio láser para producir luz láser. En los láseres de gas, el medio láser está en estado gaseoso. [Fer10].

Los láseres de gas se utilizan en aplicaciones que requieren luz láser con una calidad de haz muy alta y longitudes de coherencia largas.

En el láser de gas, el medio láser o medio de ganancia se compone de una mezcla de gases. Esta mezcla se empaqueta en un tubo de vidrio. El tubo de vidrio se encuentra lleno con la mezcla de gases que actúa como un medio activo o medio láser.

Es el primer láser que funciona según el principio de convertir energía eléctrica en energía lumínica.

4.3.1.1.1. Láseres de gas neutro (He-Ne)

A temperatura ambiente, un láser de rubí solo emitirá ráfagas cortas de luz láser, y cada pulso de láser se producirá después de un destello de la luz de bombeo. Sería mejor tener un láser que emite luz continuamente. Tal láser se llama láser de onda continua (CW).

El láser de helio-neón fue el primer láser de onda continua (CW) jamás construido. Fue construido en 1961 por Ali Javan, Bennett y Herriott en Bell Telephone Laboratories.

Los láseres de helio-neón son los láseres de gas más utilizados. Estos láseres tienen muchos usos industriales y científicos y se utilizan a menudo en demostraciones de laboratorio de óptica.

En los láseres He-Ne (Fig. 4.8), el método de bombeo óptico no se usa en su lugar, se usa un método de bombeo eléctrico. La excitación de electrones en el medio activo de gas He-Ne se logra al pasar una corriente eléctrica a través del gas.

El láser de helio-neón opera a una longitud de onda de 632.8 nanómetros (nm), en la porción roja del espectro visible.

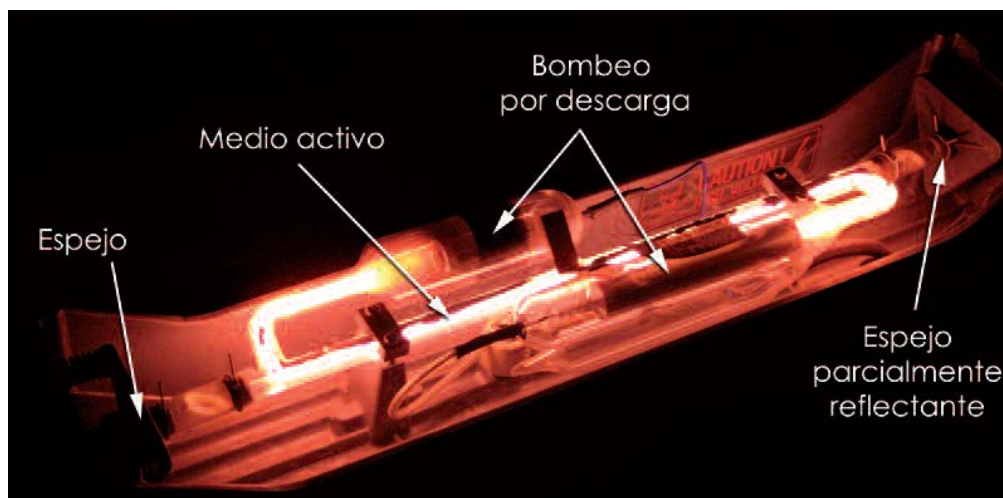


Figura 4.8: Láser de helio-neón

4.3.1.1.2. Láseres de gas ionizado (Argón)

Los láseres de argón y criptón son los más usados entre los láseres de gases nobles ionizados.

Un láser de criptón es un láser de iones que utiliza iones de criptón como medio de ganancia, bombeado por descarga eléctrica. Los láseres de criptón se utilizan para la investigación científica, o cuando el criptón se mezcla con argón, para la creación de

láseres de "luz blanca", útiles para los espectáculos con luz láser. Los láseres de criptón también se usan en medicina (por ejemplo, para la coagulación de la retina), para la fabricación de hologramas de seguridad y para muchos otros fines.

Los láseres de iones de argón se utilizan para fototerapia de retina (para diabetes), litografía y bombeo de otros láseres. Los láseres de ion argón se emiten a 13 longitudes de onda a través del espectro visible, ultravioleta y casi visible, incluyendo: 351.1 nm, 363.8 nm, 454.6 nm, 457.9 nm, 465.8 nm, 476.5 nm, 488.0 nm, 496.5 nm, 501.7 nm, 514.5 nm, 528,7 nm, 1092,3 nm.

Los láseres comunes de argón y criptón son capaces de emitir una salida de onda continua (CW) de varios milivatios a decenas de vatios. Sus tubos suelen estar hechos de campanas de extremo de níquel, sellos Kovar de metal a cerámica, cerámica de óxido de berilio o discos de tungsteno montados en un difusor de calor de cobre en un revestimiento de cerámica. Los primeros tubos eran de cuarzo simple, seguidos de cuarzo con discos de grafito. En comparación con los láseres de helio-neón que requieren solo unos pocos miliamperios, la corriente utilizada para bombear el láser de criptón es de varios amperios, ya que el gas tiene que ser ionizado. El tubo de láser de iones produce una gran cantidad de calor residual y requiere un enfriamiento activo.

El típico plasma de láser de ion de gas noble consiste en una descarga luminiscente de alta densidad de corriente en un gas noble en presencia de un campo magnético.

4.3.1.1.3. Láseres moleculares

Los láseres moleculares son láseres de gas donde los constituyentes activos son moléculas en lugar de átomos o iones separados. Ejemplos de tales moléculas son el CO_2 (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), N (nitrógeno), HF (fluoruro de hidrógeno), DF (fluoruro de deuterio), NH_3 (amoníaco) y CH_3OH (metanol). Estos láseres aprovechan los estados excitados de tales moléculas que pueden involucrar no solo una excitación puramente electrónica (como átomos o iones) sino también vibraciones y oscilaciones de las moléculas. En muchos casos, las energías de excitación son relativamente pequeñas, lo que lleva a la emisión con largas longitudes de onda en la región espectral del infrarrojo medio o lejano.

Hay diferentes formas de bombear láseres de gas molecular:

Muchos láseres moleculares se bombean eléctricamente con una descarga de gas (en parte con excitación de radiofrecuencia) y, a veces, con haces de electrones energéticos. El ejemplo más destacado con el bombeo de descarga de gas es el láser de CO_2 , que puede producir muchos kilovatios de potencia de salida con alta calidad de haz y una eficiencia de conversión de potencia que (como consecuencia de una ruta de

excitación favorable) es al menos sustancialmente mejor que la de muchos otros láseres de gas.

En cuanto a las aplicaciones, se utiliza mucho en procesos industriales como el procesamiento de materiales: corte, soldadura, perforado, etc. También tiene aplicaciones en medicina y cirugía.

4.3.1.2. Láseres de estado sólido

Un láser de estado sólido es un láser que usa sólidos como medio láser. En estos láseres, se usan materiales cristalinos o de vidrio.

Los iones se introducen como impurezas en el material del huésped, que puede ser un cristal o cristalino. El proceso de agregar impurezas a la sustancia se llama dopaje. Los elementos de tierras raras como el cerio (Ce), el erbio (Eu), el terbio (Tb), etc. son los más comúnmente utilizados como dopantes.

Materiales como el zafiro (Al_2O_3), el granate de itrio y aluminio dopado con neodimio (Nd: YAG), el vidrio dopado con neodimio (Nd: vidrio) y el vidrio dopado con iterbio se usan como materiales huéspedes para el medio láser. Fuera de estos, el granate de itrio-aluminio dopado con neodimio (Nd: YAG) es el más comúnmente utilizado.

El primer láser de estado sólido era un láser de rubí. Todavía se usa en algunas aplicaciones. En este láser, se usa un cristal de rubí como medio láser.

En los láseres de estado sólido, la energía de la luz se utiliza como fuente de bombeo. Las fuentes de luz como el flashtube, las lámparas de flash, las lámparas de arco o los diodos láser se utilizan para lograr el bombeo.

Los láseres de semiconductores no pertenecen a esta categoría porque estos láseres suelen ser bombeados eléctricamente e implican procesos físicos diferentes.

4.3.1.2.1. Láseres basados en iones de neodimio

YAG es un cristal que se utiliza como medio activo para láseres de estado sólido. El dopante es neodimio triplemente ionizado, Nd, típicamente reemplaza una pequeña fracción (1%) de los iones de itrio (YAG), ya que los dos iones son de tamaño similar. Es el ion de neodimio el que proporciona la actividad láser en el cristal (Fig. 4.9). Los láseres de neodimio operan de forma natural en el infrarrojo (1064 nm), aunque también lo pueden hacer en el verde (523 nm) y el ultravioleta (355 nm) si se dobla o triplica la

energía, respectivamente. Los láseres de neodimio tienen muchas aplicaciones: procesamiento de materiales, medicina, detección, bombeo de otro tipo de láseres, etc.

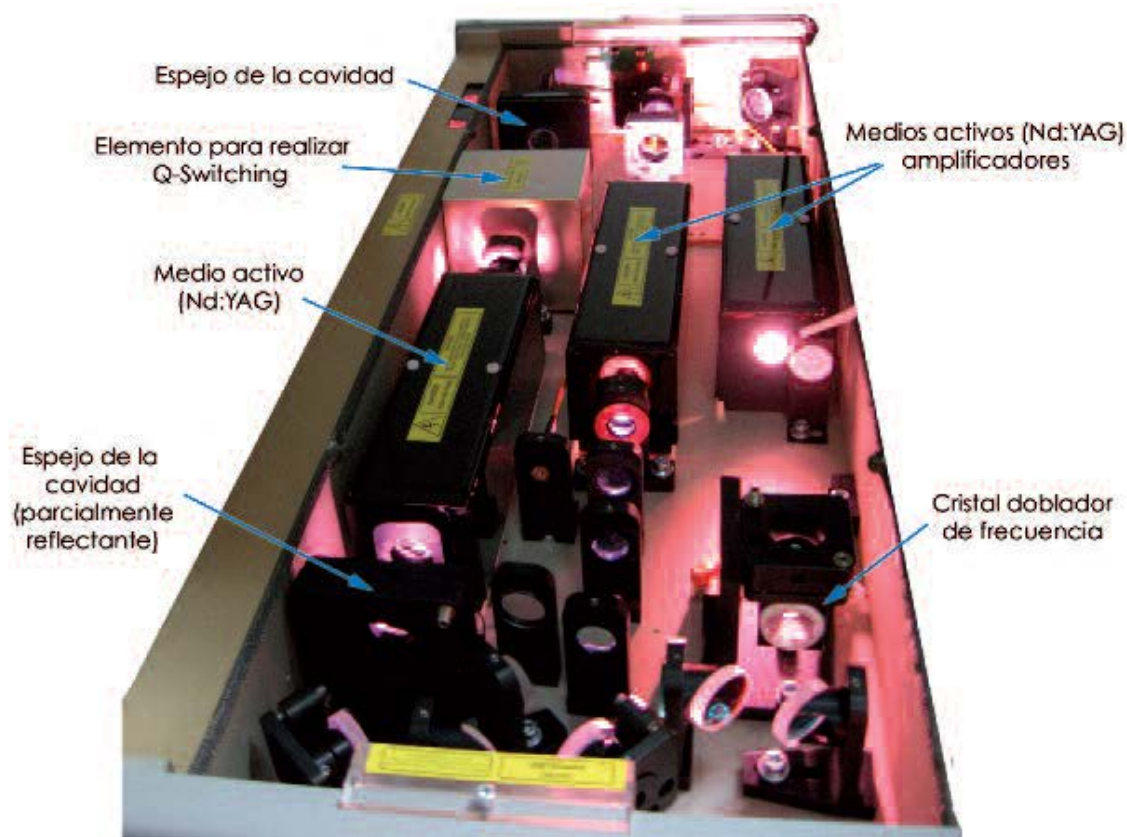


Figura 4.9: Vista de un láser de neodimio

4.3.1.2.2. Láser de rubí

Un láser de rubí es un láser de estado sólido que utiliza un cristal de rubí sintético como medio activo. El 1960, fue el primer láser en entrar en funcionamiento.

Los láseres de rubí producen pulsos de luz visible coherente a una longitud de onda de 694,3 nm, que es de un color rojo intenso. Las longitudes típicas del pulso del láser de rubí son del orden de un milisegundo.

Los láseres de rubí han disminuido su uso con el descubrimiento de mejores medios láser, aunque todavía se usan en una serie de aplicaciones donde se requieren pulsos cortos de luz roja.

4.3.1.2.3. Láseres de fibra

Un láser de fibra es un láser donde el medio activo que se utiliza es una fibra óptica que ha sido dopada con tierras raras, típicamente, erbio, iterbio, neodimio, tulio, praseodimio, holmio o disprosio. Si bien no es necesario preocuparse demasiado por los elementos de tierras raras que se han utilizado, lo más importante es que se trata de fibra que se utiliza en el centro de esta máquina láser.

4.3.1.3. Láseres de semiconductor

También se conocen como diodos láser. En los láseres semiconductores, una unión p-n de un diodo semiconductor forma el medio activo o medio láser (Fig. 4.10).

Los láseres de semiconductores juegan un papel importante en nuestra vida cotidiana. Estos láseres son muy baratos, de tamaño compacto y consumen poca potencia. Todas estas ventajas hacen que sean muy usados en aplicaciones como lectores de discos compactos, impresoras o las telecomunicaciones. La posibilidad de usar conjuntos de láseres de diodo agrupados, a veces utilizando fibras ópticas, ha hecho que puedan conseguirse potencias muy altas con este tipo de láseres, lo que ha extendido sus aplicaciones a muchos campos de la industria y de la ciencia.

La longitud de onda de un láser semiconductor está en la frontera entre el rojo y el infrarrojo y la mayoría se mueve en esa zona. Sin embargo, a día de hoy hay láseres de diodo comerciales desde el infrarrojo lejano hasta el ultravioleta.

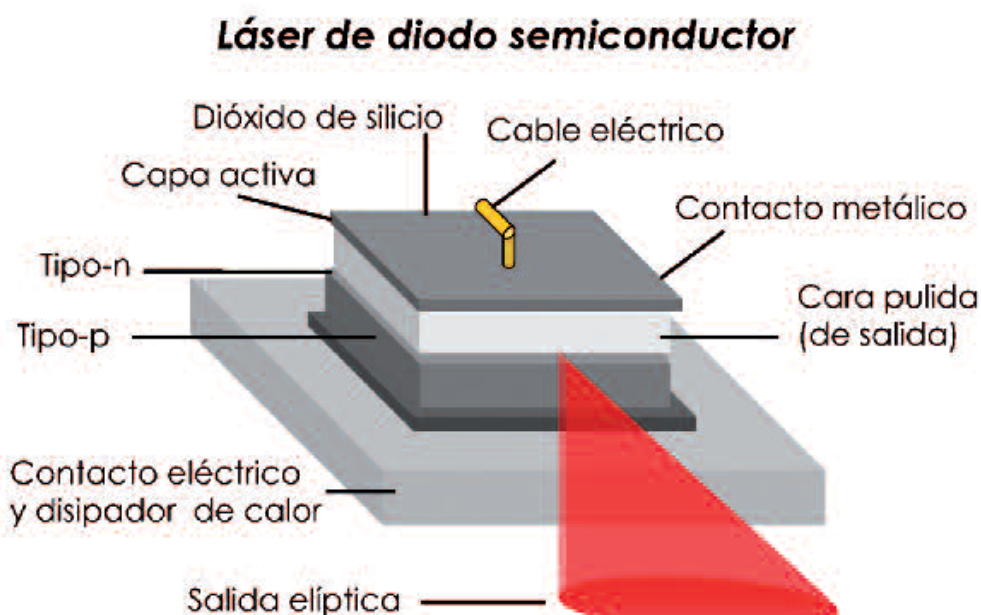


Figura 4.10: Diseño de un láser de diodo semiconductor

4.3.1.4. Otros láseres

4.3.1.4.1. Láseres de colorante

Un láser de colorante es un láser que usa un colorante orgánico como medio activo, generalmente como solución líquida. En comparación a los gases y a la mayoría de los medios activos de estado sólido, un láser de colorante se puede utilizar generalmente para un rango mucho más amplio de longitudes de onda.

El ancho de banda amplio los hace particularmente adecuados para láseres sintonizables y láseres pulsados. El colorante Rodamina 6G, por ejemplo, puede ajustarse desde los 635 nm (rojo anaranjado) hasta los 560 nm (amarillo verdoso), y producir pulsos tan cortos como 16 femtosegundos. Además, el tinte puede ser reemplazado por otro tipo para generar un rango aún más amplio de longitudes de onda con el mismo láser, desde el infrarrojo cercano hasta casi el ultravioleta, aunque esto generalmente requiere reemplazar también otros componentes ópticos en el láser, como los espejos dieléctricos.

4.3.1.4.2. Láseres de electrones libres

Un láser de electrones libres es un tipo de láser cuyo medio láser consiste en electrones a muy alta velocidad que se mueven libremente a través de una estructura magnética.

El láser de electrones libres es sintonizable y tiene un rango de frecuencias muy amplio, mayor que cualquier otro tipo de láser, actualmente varía entre las microondas hasta casi los rayos X. Para sintonizar este tipo de láseres tan solo hay que variar la velocidad de los electrones y el tamaño de los imanes. Otras de las ventajas es que tienen una intensidad de salida elevada, no necesitan refrigeración y no hay posibilidad de dañar el material (Fig. 4.11).

Entre los inconvenientes esta su difícil instalación, que hace que este tipo de láseres sean caros.

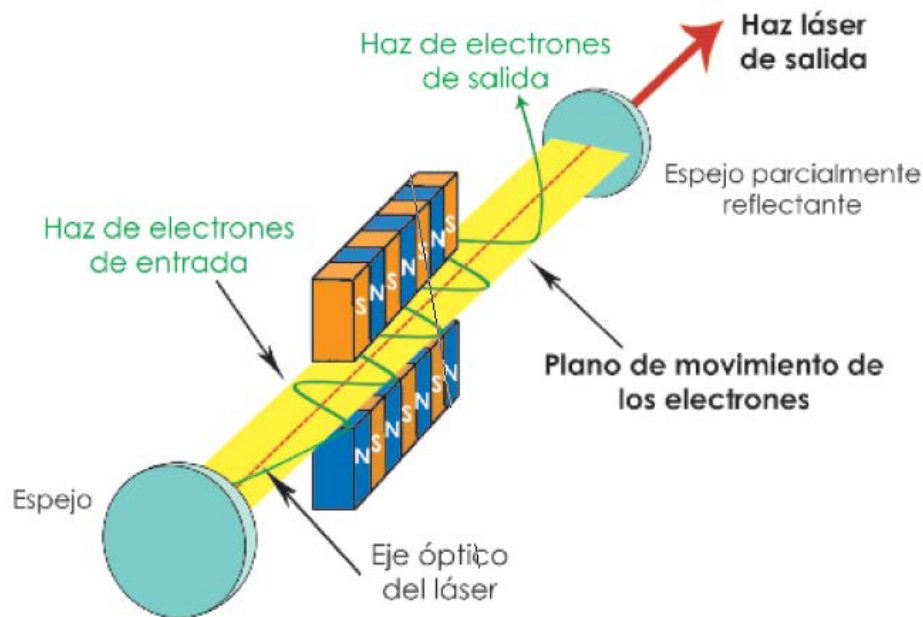


Figura 4.11: Esquema de un láser de electrones libres

4.3.1.4.3. Láseres de rayos X

Un láser de rayos X es un dispositivo que usa emisión estimulada para generar o amplificar la radiación electromagnética en la región de los rayos X o borde de la ultravioleta, es decir, generalmente del orden de varias decenas de nanómetros (nm) de longitudes de onda.

El principal problema es que este tipo de láseres son muy difíciles de construir debido a la imposibilidad de tener buenos espejos de rayos X.

Entre las posibles aplicaciones de los láseres de rayos X están la holografía de materiales biológicos, microscopía, fotolitografía, espectroscopia de rayos X, caracterización de metales, etc.

4.4. Conclusión

Tras el estudio de los diferentes tipos de fuentes de luces artificiales podemos concluir que existen dos grandes grupos de fuentes de luz, incoherentes y coherentes, que se diferencian fundamentalmente en cuatro parámetros: coherencia, direccionalidad, monocromía e intensidad.

Centrándonos en sus diferencias, las fuentes de luz incoherentes poseen muchas longitudes de onda, es decir, emiten un haz de luz difuso, en cambio las fuentes de luz

coherentes tienen una sola longitud de onda con un rayo de luz muy estrecho, lo que provoca una intensidad de luz mayor que las anteriores. Esto nos lleva a pensar que el tipo de fuentes de luz más propicio para la simulación del espectro electromagnético del sol, atendiendo a sus semejanzas, son las fuentes de luz no-coherente.

Capítulo 5. Fotosíntesis: Aspectos básicos

5.1. Introducción

La fotosíntesis es el proceso físico-químico mediante el cual las plantas, las algas y las bacterias fotosintéticas utilizan la energía de la luz para sintetizar compuestos orgánicos.

En plantas, algas y en algunos tipos de bacterias, el proceso fotosintético produce la liberación de oxígeno molecular y la utilización del dióxido de carbono de la atmósfera para sintetizar carbohidratos. A este proceso se le llama fotosíntesis oxigénica.

Por otro lado, hablamos de fotosíntesis anoxigénica cuando otro tipo de bacterias emplean la energía de la luz para crear compuestos orgánicos, pero no producen oxígeno.

La fotosíntesis proporciona la energía y el reduce el CO_2 necesarios para la supervivencia de la vida en nuestro planeta, así como también el oxígeno molecular necesario para la supervivencia de los organismos que consumen dicho compuesto. Además, los combustibles fósiles que se están quemando actualmente para generar energía fueron producidos por antiguos organismos fotosintéticos. A pesar de que la fotosíntesis ocurre en células u orgánulos que generalmente tienen solo unas pocas micras de espesor, el proceso tiene un profundo impacto en la atmósfera y el clima de la tierra. Cada año, más del 10% del dióxido de carbono atmosférico total se reduce a carbohidratos por los organismos fotosintético. A su vez, el rendimiento de los organismos fotosintéticos depende de la atmósfera y del clima de la tierra. Durante el próximo siglo, el gran aumento en la cantidad de dióxido de carbono atmosférico creado por la actividad humana tendrá un profundo impacto en el rendimiento y la competencia de los organismos fotosintéticos. El conocimiento del proceso fisicoquímico de la fotosíntesis es esencial para comprender la relación entre los organismos vivos y la atmósfera y el equilibrio de la vida en la Tierra.

La ecuación general para la fotosíntesis no es sencilla. De hecho, un conjunto complejo de reacciones físicas y químicas debe ocurrir de manera coordinada para la síntesis de compuestos orgánicos. Para producir una molécula de azúcar como la sacarosa, las plantas requieren casi 30 proteínas distintas que funcionen dentro de una compleja estructura membranosa. La investigación sobre el mecanismo de la fotosíntesis se centra en la comprensión de la estructura de los componentes fotosintéticos y los procesos moleculares que usan energía radiante para impulsar la síntesis de carbohidratos. La investigación involucra varias disciplinas, que incluyen física, biofísica, química, biología estructural, bioquímica, biología molecular y fisiología, y sirve como un ejemplo sobresaliente del éxito de la investigación multidisciplinaria.

Como tal, la fotosíntesis presenta un desafío especial en la comprensión de varios procesos moleculares interrelacionados. [Web7].

5.2. Clasificación de los organismos fotosintéticos

Toda la vida se puede dividir en tres grandes grupos (Fig. 5.1): Archaea, Bacteria y Eucarya, que se originaron a partir de un ancestro común. Históricamente, el término fotosíntesis se ha aplicado a organismos que dependen de la clorofila para la conversión de energía de la luz en energía libre de químicos. Estos incluyen organismos en los dominios Bacteria (bacterias fotosintéticas) y Eucarya (algas y plantas). El dominio más primitivo, Archaea, incluye organismos conocidos como halobacterias, que convierten la energía de la luz en energía libre de químicos. Sin embargo, el mecanismo por el cual las halobacterias convierten la luz es diferente al de los demás organismos porque no hay química de oxidación y las halobacterias no pueden usar el CO_2 como fuente de carbono. En consecuencia, algunos biólogos no consideran las halobacterias como fotosintéticas. Este capítulo seguirá la definición histórica de fotosíntesis y omitirá la halobacteria. [Perez09].

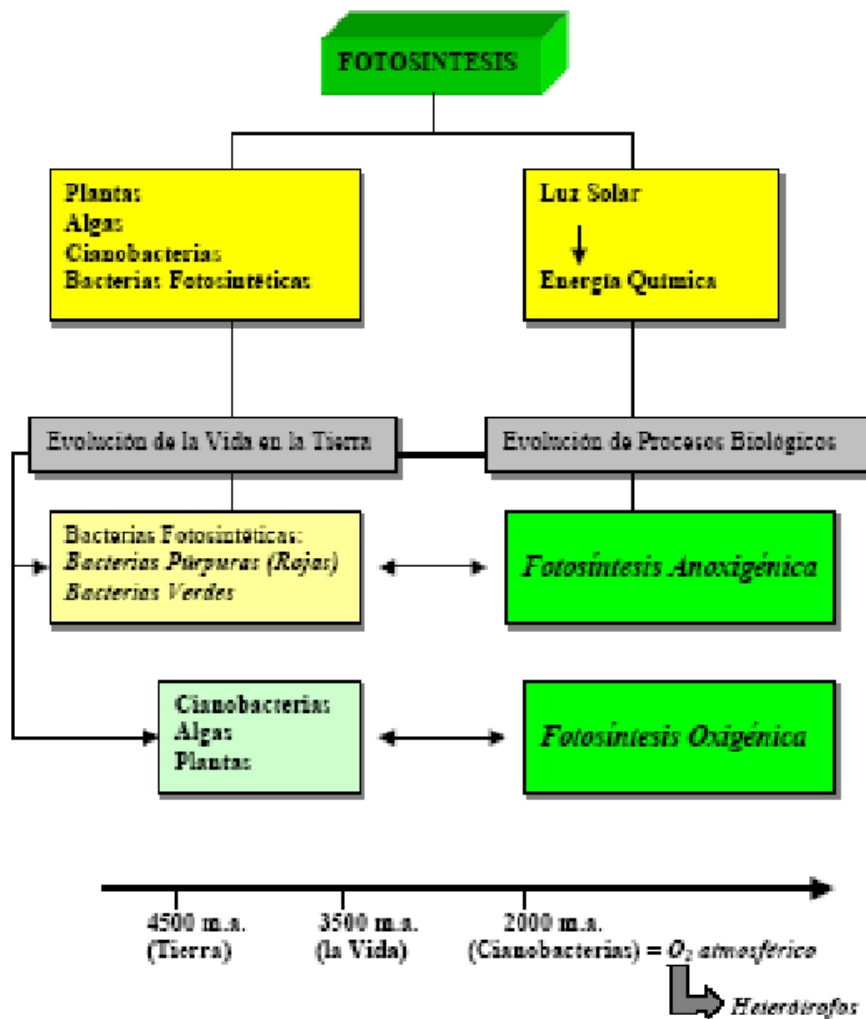


Figura 5.1: Origen de la fotosíntesis y organismos con capacidad fotosintética

5.2.1. Organismos fotosintéticos oxigénicos

El proceso fotosintético en todas las plantas y algas, así como en ciertos tipos de bacterias fotosintéticas implica la reducción de CO_2 a compuestos orgánicos y la eliminación de electrones de H_2O , lo que provoca la liberación de O_2 . En este proceso, conocido como fotosíntesis oxigénica, el agua se oxida por el centro de reacción del fotosistema II, complejo proteico localizado en la membrana fotosintética. Años de investigación han demostrado que la estructura y función del fotosistema II es similar en plantas, algas y ciertas bacterias, de modo que el conocimiento adquirido en una especie se puede aplicar a otras. Esta homología es una característica común de las proteínas que realizan la misma reacción en diferentes especies. Esta analogía a nivel molecular es importante porque se estima que hay entre 300 000 y 500 000 especies de plantas. Si las diferentes especies hubieran desarrollado diversos mecanismos para

oxidar el agua, la investigación dirigida a una comprensión general de la oxidación fotosintética del agua sería inútil.

5.2.2. Organismos fotosintéticos anoxigénicos

Algunas bacterias fotosintéticas pueden usar energía de la luz para extraer electrones de otras moléculas además de agua. Estos organismos son de origen antiguo, se presume que evolucionaron antes que los organismos fotosintéticos oxigénicos. Los organismos fotosintéticos anoxigénicos se encuentran en el dominio Bacteria y se pueden clasificar en cuatro tipos: Bacterias púrpuras, Bacterias azufradas verdes, Bacterias verdes y Bacterias gram positivas.

5.3. Principios de transformación de energía fotosintética

La energía que impulsa la fotosíntesis se origina en el centro del sol u otros tipos de fuentes de luz. Una pequeña fracción de la luz visible incidente en la tierra es absorbida por las plantas. A través de una serie de reacciones de transducción de energía, los organismos fotosintéticos pueden transformar la energía de la luz en energía libre de químicos de forma estable que puede durar cientos de millones de años (por ejemplo, los combustibles fósiles). En esta sección se presenta un esquema simplificado que describe cómo se transforma la energía en el proceso fotosintético. El foco está en las características estructurales y funcionales esenciales para las reacciones de transformación de energía. Una descripción más altamente resuelta de la fotosíntesis oxigénica y anoxigénica se da en las secciones siguientes.

El proceso fotosintético en las plantas y las algas se produce en pequeños orgánulos conocidos como cloroplastos que se encuentran dentro de las células. Los organismos fotosintéticos más primitivos, como las cianobacterias oxigénicas, los proclorofitos y las bacterias fotosintéticas anoxigénicas, carecen de orgánulos. Las reacciones fotosintéticas se dividen tradicionalmente en dos etapas: las "reacciones luminosas", que consisten en reacciones de transferencia de electrones y protones y las "reacciones oscuras", que consisten en la biosíntesis de carbohidratos a partir del CO_2 . Las reacciones a la luz se producen en un complejo sistema membranoso (la membrana fotosintética) que se compone de complejos de proteínas, portadores de electrones y moléculas de lípidos. La membrana fotosintética está rodeada de agua y puede considerarse como una superficie bidimensional que define un espacio cerrado, con una fase de agua interior y exterior. Una molécula o ion debe pasar a través de la membrana fotosintética para ir desde el espacio interior al espacio exterior. Los complejos proteicos incrustados en la membrana fotosintética tienen una orientación única con respecto a

la fase interna y externa. La disposición asimétrica de los complejos proteicos permite que parte de la energía liberada durante el transporte de electrones cree un gradiente electroquímico de protones a través de la membrana fotosintética.

El transporte de electrones fotosintéticos consiste en una serie de pasos donde ocurre la transferencia de electrones de un portador de electrones a otro. Los portadores de electrones son complejos de iones metálicos y grupos aromáticos. Los complejos de iones metálicos y la mayoría de los grupos aromáticos están unidos dentro de las proteínas. La mayoría de las proteínas involucradas en el transporte de electrones fotosintéticos están compuestas de numerosas cadenas de polipéptidos que se unen a través de la membrana, proporcionando un andamio para los iones metálicos y los grupos aromáticos. Un electrón entra en un complejo proteico en un sitio específico, se transfiere dentro de la proteína de una portadora a otra y sale de la proteína en un sitio diferente. La proteína controla la ruta de los electrones entre los portadores al determinar la ubicación y el entorno de los complejos de iones metálicos y los grupos aromáticos. Al establecer la distancia entre los portadores de electrones y controlar el entorno electrónico que rodea un complejo de iones metálicos o un grupo aromático, la proteína controla las reacciones de transferencia de electrones por parejas. La asociación de proteínas está controlada por una serie de factores, que incluyen la estructura de las dos proteínas, sus propiedades eléctricas y químicas superficiales y la probabilidad de que colisionen entre sí. No todos los portadores de electrones están ligados a proteínas. Las formas reducidas de plastoquinona o ubiquinona y nicotinamida adenina dinucleótido fosfato (NADPH) o NADH actúan como portadores de electrones móviles que funcionan entre complejos proteicos. Para que se produzca la transferencia de electrones, estas moléculas pequeñas deben unirse a bolsas especiales en las proteínas conocidas como sitios de unión. Los sitios de unión son altamente específicos y son un factor crítico para controlar la velocidad y la vía de la transferencia de electrones.

Las reacciones de luz que ocurren hacen pasar a un fotón a un estado electrónico excitado y elevarlo, de este modo, a un nivel mayor de energía (esta transferencia se realiza como un excitón) a través de pigmentos de antena ubicados dentro de los fotosistemas (Fig. 5.2). El pigmento de antena consiste en cientos de moléculas, principalmente de clorofilas y carotenoides dentro de la membrana fotosintética que sirven a un complejo de proteínas especializado conocido como centro de reacción. Algunos excitones se convierten nuevamente en fotones y se emiten como fluorescencia, algunos se convierten en calor y otros quedan atrapados por una proteína del centro de reacción. Los excitados atrapados por un centro de reacción proporcionan la energía para la reacción fotoquímica primaria de la fotosíntesis: transferencia de un electrón de una molécula donadora a una molécula receptora. Al aceptar el electrón, la molécula receptora se reduce. De esta manera, la energía de los fotones es utilizada

para mover electrones de los centros de reacción a niveles de energía mayores de modo que puedan ser transferidos a otras moléculas. Al perder un electrón, el centro de reacción se oxida y queda en posibilidad de aceptar electrones de otras moléculas.

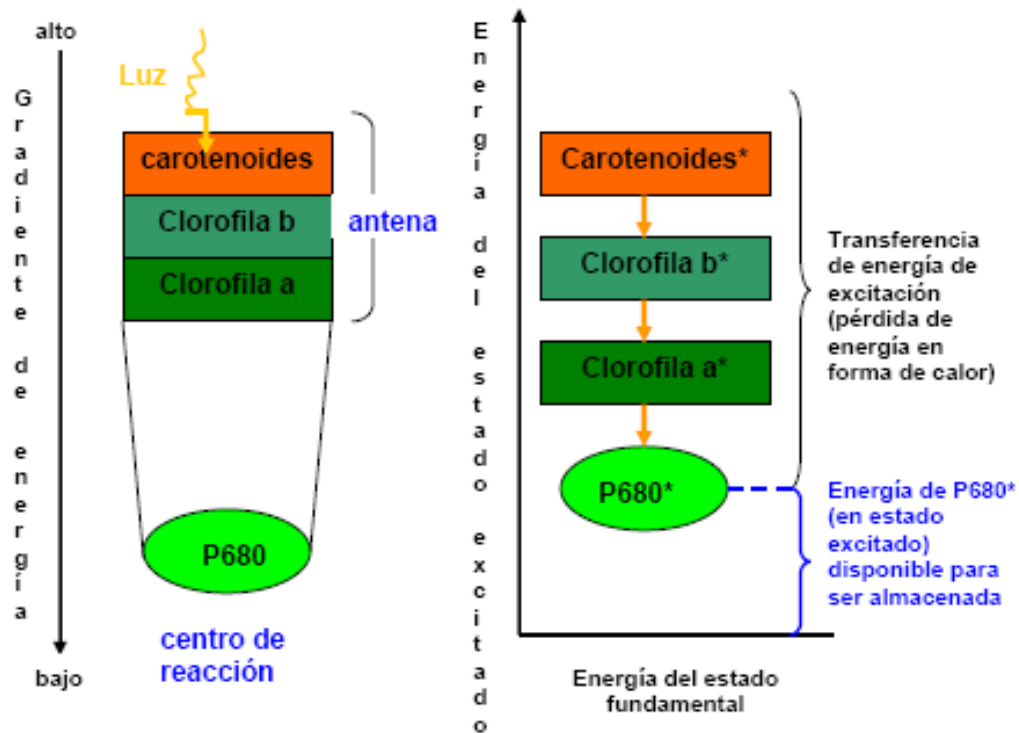


Figura 5.2: Funcionamiento del complejo antena

En los organismos fotosintéticos oxigénicos, existen dos centros de reacción diferentes, conocidos como fotosistema II y fotosistema I que funcionan al mismo tiempo, pero en serie (Fig. 5.3). Después de captar la luz, el fotosistema II alimenta de electrones al fotosistema I. La reacción neta es la transferencia de electrones de una molécula de agua a NADP⁺, que produce la forma reducida, NADPH. En el proceso fotosintético, gran parte de la energía inicialmente proporcionada por la energía de la luz se almacena como energía libre redox (una forma de energía libre de químicos) en NADPH, para ser utilizada más adelante en la reducción de carbono. Además, las reacciones de transferencia de electrones concentran protones dentro de la vesícula membranosa y crean un campo eléctrico a través de la membrana fotosintética. En este proceso, las reacciones de transferencia de electrones convierten la energía libre redox en un potencial electroquímico de protones. La energía almacenada en el potencial electroquímico del protón es utilizada por un complejo proteico unido a la membrana (ATP-sintasa) para unir covalentemente un grupo fosfato al adenosín difosfato (ADP),

formando trifosfato de adenosina (ATP). Los protones pasan a través del complejo de proteína ATP-sintasa que transforma la energía electroquímica libre en un tipo de energía libre de químicos conocida como potencial de transferencia de grupos fosfato (o un enlace de fosfato de alta energía). La energía almacenada en ATP puede transferirse a otra molécula transfiriendo el grupo fosfato. El efecto neto de las reacciones de luz es convertir la energía radiante en energía libre redox en forma de NADPH y energía de transferencia de grupo de fosfato en forma de ATP. En las reacciones de luz, la transferencia de un solo electrón de agua a NADP + implica alrededor de 30 iones metálicos y 7 grupos aromáticos. Los iones metálicos incluyen 19 Fe, 5 Mg, 4 Mn y 1 Cu. Los compuestos aromáticos incluyen quinonas, feofitina, NADPH, tirosina y una flavoproteína. El NADPH y el ATP formados por las reacciones de luz proporcionan la energía para las reacciones oscuras de la fotosíntesis, conocido como el ciclo de Calvin o el ciclo de reducción de carbono fotosintético. La reducción del CO_2 atmosférico a carbohidratos se produce en la fase acuosa del cloroplasto e implica una serie de reacciones enzimáticas. El primer paso es catalizado por la proteína RuBisCo (D-ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase / oxygenase), que une el CO_2 a un compuesto de cinco carbonos. La reacción produce dos moléculas de un compuesto de tres carbonos. Las reacciones bioquímicas posteriores implican varias enzimas que reducen el carbono por transferencia de hidrógeno y reorganizan los compuestos de carbono para sintetizar carbohidratos. El ciclo de reducción de carbono implica la transferencia y la reorganización de la energía del enlace químico.

En organismos fotosintéticos anoxigénicos no se usa agua como donante de electrones. El flujo de electrones es cíclico y está impulsado por un solo fotosistema, que produce un gradiente electroquímico de protones que se utiliza para proporcionar energía para la reducción de NAD + por un átomo de H externo o donador en un proceso conocido como "flujo inverso de electrones". La fijación de CO_2 ocurre a través de diferentes vías en diferentes organismos

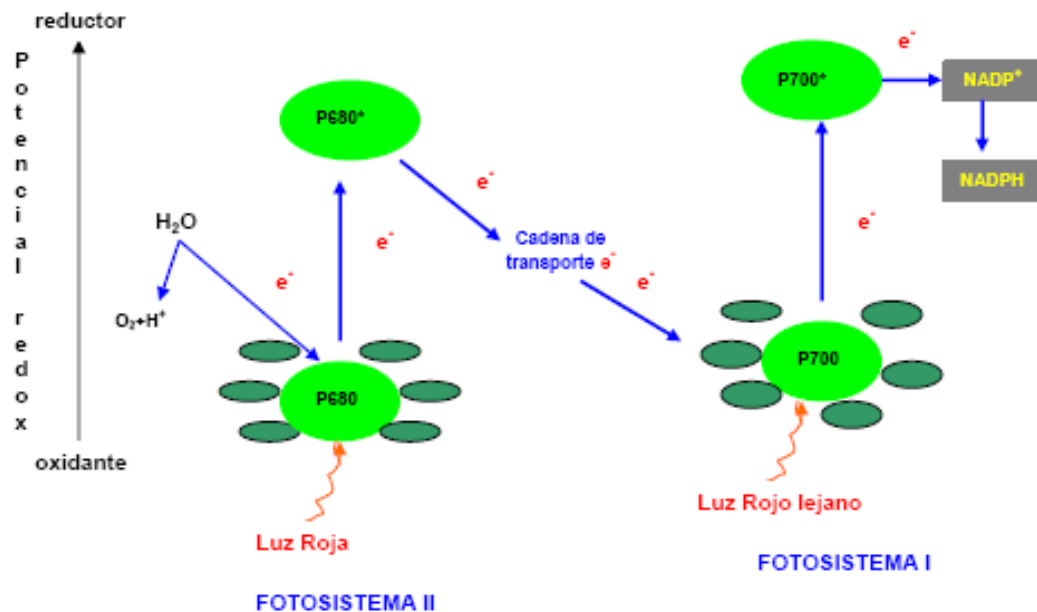


Figura 5.3: Estructura y reacciones básicas de los fotosistemas I y II

5.4. Fotosíntesis oxigénica

5.4.1. Cloroplastos: Estructura y organización

En las plantas, el proceso fotosintético ocurre dentro de los cloroplastos, que son orgánulos que se encuentran en ciertas células. Los cloroplastos proporcionan la energía y la reducción de carbono necesaria para el crecimiento y desarrollo de las plantas, mientras que las plantas proporcionan al cloroplasto dióxido de carbono, agua, nitrógeno, moléculas orgánicas y minerales necesarios para la biogénesis de los cloroplastos. La mayoría de los cloroplastos se encuentran en células foliares especializadas, que a menudo contienen 50 o más cloroplastos por célula. Cada cloroplasto está definido por una membrana interna y otra externa con forma de lente menisco convexa de 5 a 10 micras de diámetro (Fig. 5.4), aunque se pueden encontrar de muchas formas y tamaños diferentes en las plantas. La membrana interna de la envoltura actúa como una barrera controlando el flujo de moléculas orgánicas que pasan dentro y fuera del cloroplasto. El agua fluye libremente a través de las membranas de la envoltura, al igual que otras moléculas neutras pequeñas como el CO_2 y el O_2 . Existen evidencias de que los cloroplastos fueron alguna vez bacterias libres que invadieron una célula no fotosintética hace mucho tiempo. Han conservado parte del ADN necesario para su ensamblaje, pero gran parte del ADN necesario para su biosíntesis se encuentra en el núcleo de la célula. Esto permite que una célula controle la biosíntesis de los cloroplastos dentro de su dominio.

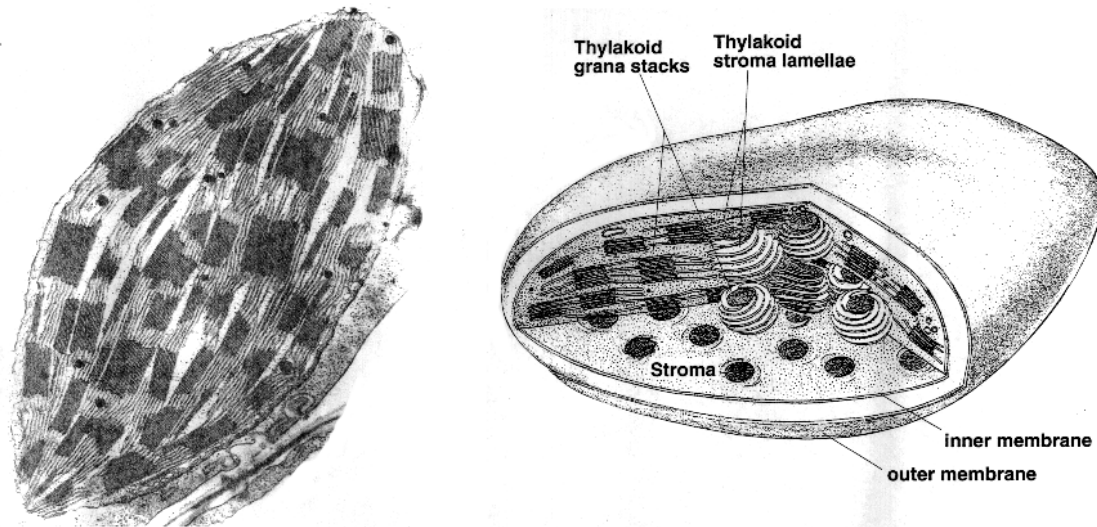


Figura 5.4: Estructura interna del cloroplasto

En el interior, el cloroplasto es un sistema membranoso complicado, conocido como la membrana fotosintética (o membrana tilacoidal), que contiene la mayoría de las proteínas necesarias para las reacciones luminosas. Las proteínas necesarias para la fijación y reducción del CO_2 se encuentran fuera de la membrana fotosintética en la fase acuosa circundante. La membrana fotosintética está compuesta principalmente de lípidos y proteínas de glicerol. Los lípidos de glicerol son una familia de moléculas caracterizadas por un grupo de cabeza polar hidrofílica y dos cadenas laterales de ácido graso que son hidrófobas. En las membranas, las moléculas de lípidos se disponen en una bicapa, con la cabeza polar hacia la fase acuosa y las cadenas de ácidos grasos alineadas dentro de la membrana formando un núcleo hidrófobo (Fig. 5.5). La membrana fotosintética es vesicular, que define un espacio cerrado con un espacio de agua exterior (estroma) y un espacio de agua interior (lumen). La organización de la membrana fotosintética se puede describir como un conjunto de grupos de membranas apiladas, interconectadas por membranas no apiladas que sobresalen de los bordes de las pilas (Fig. 5.4). Los experimentos indican que el espacio acuoso interno de la membrana fotosintética es probablemente continuo dentro del cloroplasto. No se sabe por qué la membrana fotosintética forma una estructura tan complicada. Para comprender la energía de la fotosíntesis, se puede ignorar esta complicada estructura y la membrana fotosintética se puede ver como una simple vesícula.

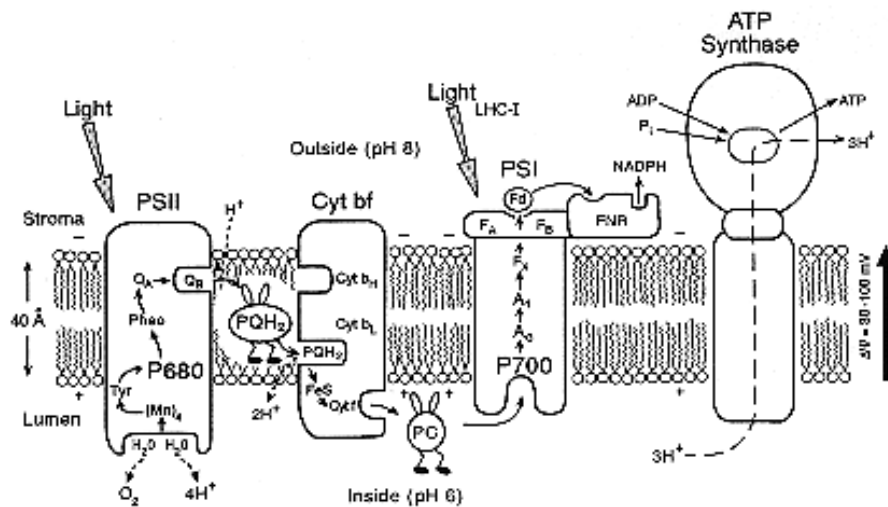
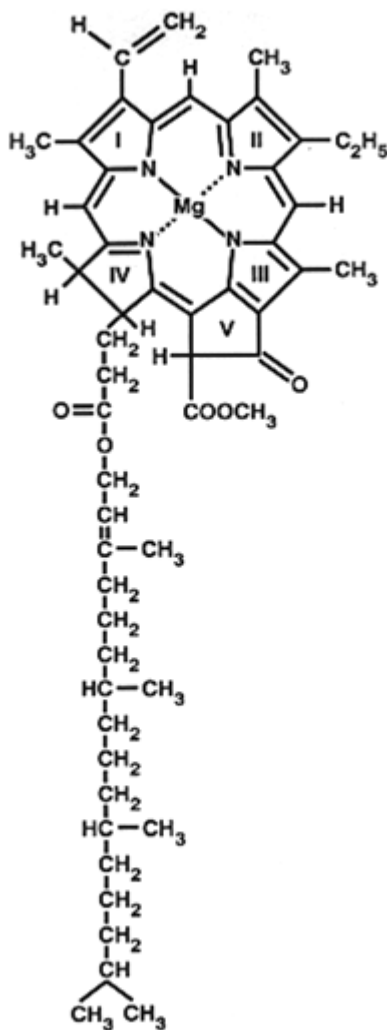


Figura 5.5: Modelo de la membrana fotosintética de las plantas que muestra los componentes de transporte de electrones y la enzima ATP Synthase (vista transversal)

5.4.2. Absorción de luz: El sistema de antena

La fotosíntesis de las plantas es impulsada principalmente por la luz visible (longitudes de onda entre los 400 y los 700 nm) que es absorbida por las moléculas de pigmento (principalmente clorofila a, clorofila b y carotenoides). La estructura química del pigmento de la clorofila a se muestra en la Fig. 5.6.



Chlorophyll a

Figura 5.6: Estructura química de la clorofila

En la clorofila b, el CH_3 del anillo II se reemplaza por el grupo CHO. Las plantas parecen verdes debido a la clorofila, que es tan abundante que las grandes regiones vegetativas de la Tierra se ven verdes desde el espacio. El espectro de absorción de la clorofila a y b y carotenoides junto con el espectro de acción de la fotosíntesis de un cloroplasto se muestra en la Fig. 5.7. La luz es recolectada por 200-300 moléculas de pigmento que se unen a complejos proteicos recolectores de luz ubicados en la membrana fotosintética. Los complejos recolectores de luz rodean los centros de reacción que sirven como antena. La estructura tridimensional del complejo de recolección de luz muestra que la proteína determina la posición y orientación de los pigmentos de la antena. La fotosíntesis se inicia por la absorción de un fotón por una molécula de antena, que se produce en aproximadamente un femtosegundo (10^{-15} s)

y provoca una transición del estado básico electrónico al estado excitado. Dentro de 10-13 s, el estado excitado decae por relajación vibracional al primer estado singlete excitado. El destino de la energía del estado excitado está guiado por la estructura de la proteína. Debido a la proximidad de otras moléculas de antena con estados de energía iguales o similares, la energía del estado excitado tiene una alta probabilidad de ser transferida por transferencia de energía de resonancia a un vecino cercano. La transferencia de energía de excitón entre las moléculas de la antena se debe a la interacción del momento dipolar de transición de las moléculas. La probabilidad de transferencia depende de la distancia entre los dipolos de transición de las moléculas donante y aceptora ($1 / R^6$), la orientación relativa de los dipolos de transición y la superposición del espectro de emisión de la molécula donante con el espectro de absorción de la molécula aceptora. Los sistemas de antenas fotosintéticas son muy eficientes en este proceso de transferencia. En condiciones óptimas, más del 90% de los cuantos absorbidos se transfieren en unos pocos cientos de picosegundos desde el sistema de antena al centro de reacción que actúa como una trampa para el excitón.

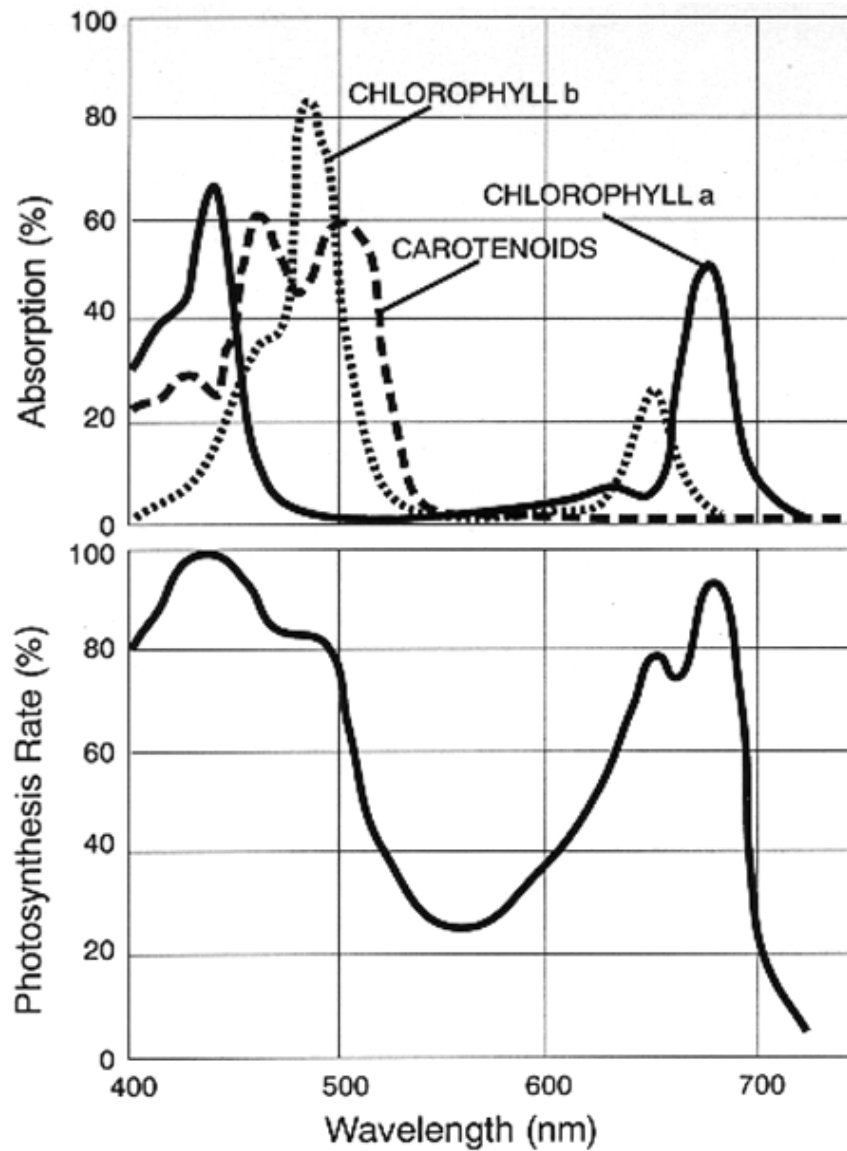


Figura 5.7: Espectros de absorción estimados de clorofila a, clorofila b y carotenoides en cloroplastos

5.4.3. Fotoquímica primaria: Fotosistema II y centros de reacción del fotosistema

Fotosistema II utiliza energía de la luz para generar dos reacciones químicas: la oxidación del agua y la reducción de la plastoquinona. El complejo fotosistema II está compuesto por más de quince polipéptidos y se ha demostrado que al menos nueve componentes redox diferentes (clorofila, feofitina, plastoquinona, tirosina, Mn, Fe, citocromo b559, carotenoide e histidina) se someten a transferencia de electrones inducida por la luz. Sin embargo, se sabe que solo cinco de estos componentes redox están implicados en la transferencia de electrones de H_2O al conjunto de plastoquinonas: el clúster de manganeso oxidante del agua (Mn) 4, el aminoácido tirosina, el clorofila del centro de reacción (P680), la feofitina y el moléculas de plastoquinona, QA y QB. De estos componentes redox esenciales, se ha demostrado que la tirosina, P680, feofitina, QA y QB se unen a dos polipéptidos clave que forman el núcleo central de la reacción heterodimérica del fotosistema II (D1 y D2). Trabajos recientes indican que los polipéptidos D1 y D2 también proporcionan ligandos para el grupo (Mn) 4. La estructura tridimensional del fotosistema II no se conoce. Nuestro conocimiento de su estructura está guiado por la estructura conocida del centro de reacción en bacterias moradas y datos bioquímicos y espectroscópicos. La figura 5.8 muestra una vista esquemática del fotosistema II que es consistente con los datos actuales.

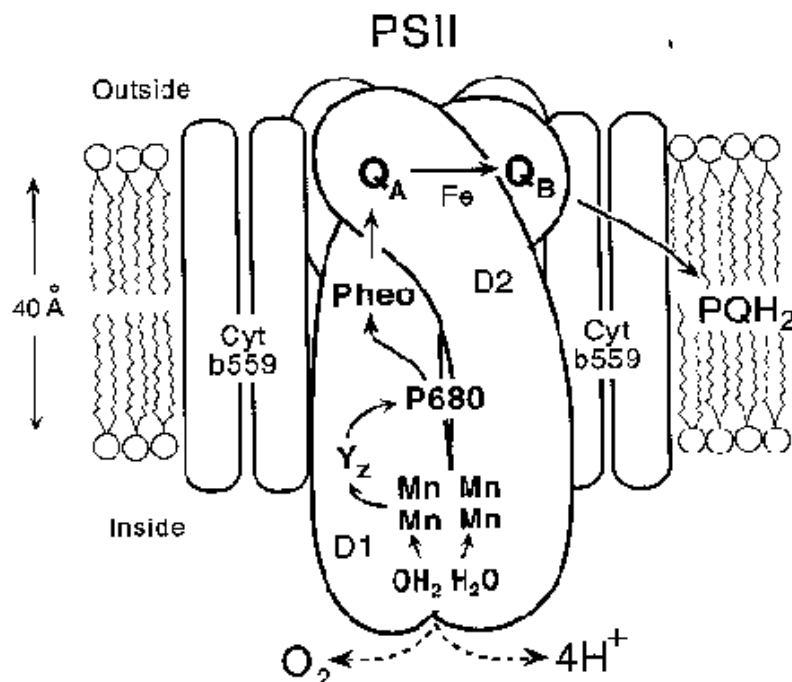


Figura 5.8: Dibujo esquemático del fotosistema II

La fotoquímica en el fotosistema II se inicia por separación de carga entre P680 y feofitina, creando $P680^+ / Feo^-$. La separación de carga primaria tarda unos pocos picosegundos (Fig. 5.9).

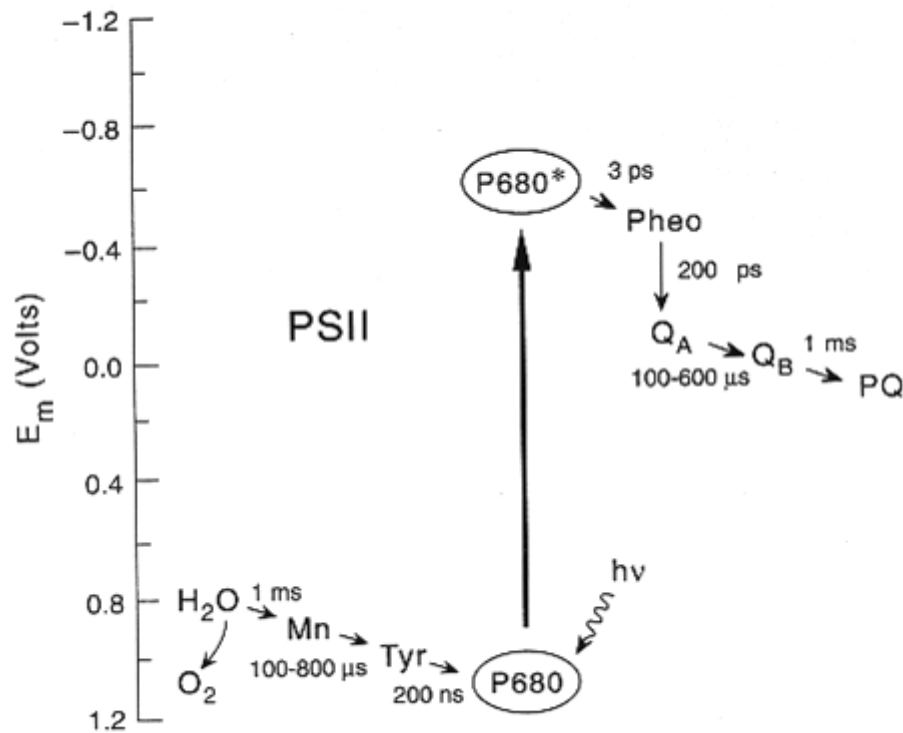


Figura 5.9: Vías de transporte de electrones y tasas del fotosistema II

Los pasos posteriores de transferencia de electrones se han diseñado a través de la evolución para evitar que la separación de carga primaria se recombine. Esto se logra transfiriendo el electrón dentro de 200 picosegundos de feofitina a una molécula de plastoquinona (QA) que está permanentemente unida al fotosistema II. Aunque la plastoquinona normalmente actúa como un aceptor de dos electrones, funciona como un aceptor de un electrón en el sitio QA. El electrón en QA⁻ se transfiere luego a otra molécula de plastoquinona que está débilmente unida al QB. La plastoquinona en QB difiere de QA en que funciona como un aceptor de dos electrones, quedando completamente reducido y protonado después de dos pérdidas de balón fotoquímicas del centro de reacción. La reducción total de plastoquinona requiere la adición de dos electrones y dos protones, es decir, la adición de dos átomos de hidrógeno. La plastoquinona reducida luego se descuelga del centro de reacción y se difunde en el núcleo hidrofóbico de la membrana. Después de lo cual, una molécula de plastoquinona oxidada encuentra su camino al sitio de unión de QB y el proceso se repite. Debido a que el sitio QB está cerca de la fase acuosa externa, los protones

añadidos a la plastoquinona durante su reducción se toman del exterior de la membrana.

El fotosistema II es el único complejo de proteína conocido que puede oxidar el agua, dando como resultado la liberación de O_2 a la atmósfera. A pesar de años de investigación, se sabe poco sobre los eventos moleculares que conducen a la oxidación del agua. Enérgicamente, el agua es un donador de electrones pobre. El potencial de punto medio de oxidación-reducción (E_m , 7) de agua es $+0.82$ V (pH 7). En el fotosistema II, esta reacción es impulsada por el centro de reacción oxidado, $P680^+$ (el potencial del punto medio de $P680 / P680^+$ se estima en $+1.2$ V a pH 7). Cómo se transfieren los electrones del agua a $P680^+$ sigue siendo un misterio. Se sabe que $P680^+$ oxida una tirosina en la proteína D1 y que Mn juega un papel clave en la oxidación del agua. Cuatro iones Mn están presentes en el complejo oxidante del agua. La espectroscopía de absorción de rayos X muestra que Mn sufre una oxidación inducida por la luz. La oxidación del agua requiere dos moléculas de agua e implica cuatro volúmenes de operaciones secuenciales del centro de reacción. Esto fue demostrado por un experimento que demuestra que la liberación de oxígeno por el fotosistema II ocurre con una dependencia de cuatro destellos. Cada reacción fotoquímica crea un oxidante que elimina un electrón. La reacción neta da como resultado la liberación de una molécula de O_2 , la deposición de cuatro protones en la fase acuosa interior y la transferencia de cuatro electrones al sitio QB (que produce dos moléculas reducidas de plastoquinona).

Los centros de reacción Photosystem II contienen varios componentes redox sin función conocida. Un ejemplo es el citocromo b559, una proteína hemo, que es un componente esencial de todos los centros de reacción del fotosistema II. Si el citocromo no está presente en la membrana, no se puede formar un centro de reacción PS II estable. Aunque la estructura y la función de Cyt b559 aún no se han descubierto, se sabe que el citocromo no está involucrado en la actividad enzimática primaria de la PS II, que es la transferencia de electrones del agua a la plastoquinona. Por qué los centros de reacción PS II contienen componentes redox que no están implicados en las reacciones enzimáticas primarias es una pregunta desconcertante. La respuesta se puede encontrar en las reacciones químicas inusuales que ocurren en la PS II y en el hecho de que el centro de reacción opera a un nivel de potencia muy alto. Photosystem II es una enzima transformadora de energía que debe cambiar entre varios estados de alta energía que implican la creación de los poderosos oxidantes necesarios para eliminar los electrones del agua y la química compleja de la reducción de plastoquinona que está fuertemente influenciada por los protones. En la luz de saturación, un solo centro de reacción puede tener un rendimiento de energía de 600 eV / s (equivalente a $60,000$ kW por mol de PS II). Operar a un nivel de potencia tan alto da como resultado daños en el centro de reacción. Puede ser que algunos de los

componentes redox "extra" en el fotosistema II puedan servir para proteger el centro de reacción.

Photosystem II tiene otra característica desconcertante. Se ha demostrado que muchas plantas y algas tienen un número significativo de centros de reacción del fotosistema II que no contribuyen al transporte de electrones. La razón por la cual las plantas dedican recursos para la síntesis de centros de reacción que aparentemente no contribuyen a la conversión de energía es desconocida.

El complejo del fotosistema I cataliza la oxidación de la plastocianina, una pequeña proteína Cu soluble, y la reducción de la ferredoxina, una pequeña proteína FeS. El fotosistema I está compuesto de un heterodímero de proteínas que actúan como ligandos para la mayoría de los portadores de electrones. El centro de reacción es servido por un sistema de antena que consiste en aproximadamente doscientas moléculas de clorofila (principalmente clorofila a) y la fotoquímica primaria es iniciada por un dímero de clorofila a, P700. En contraste con el fotosistema II, muchas de las moléculas de clorofila de antena en el fotosistema I están unidas a las proteínas del centro de reacción. Además, los centros FeS sirven como portadores de electrones en el fotosistema I y, por lo que se sabe, la transferencia de electrones del fotosistema I no está acoplada a la translocación de protones. La separación de carga primaria se produce entre un donador primario, P700, un dímero de clorofila y un monómero de clorofila (Ao). Los sucesos y tasas de transferencia de electrones posteriores se muestran en la figura 5.10.

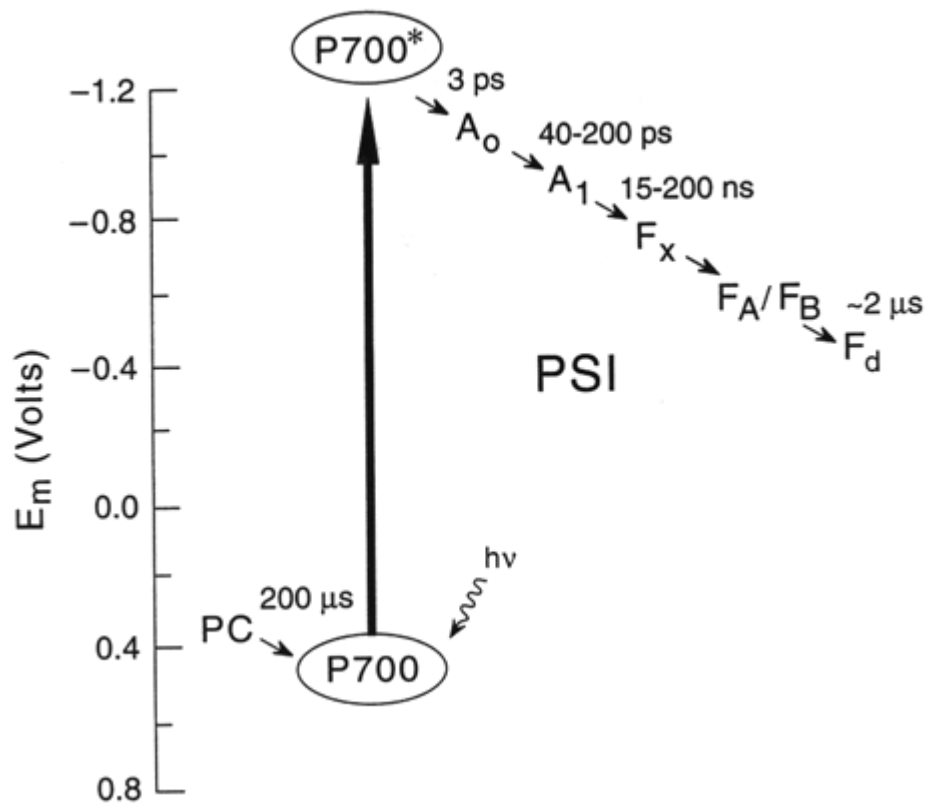


Figura 5.10: Vías y rutas de transporte del electrón del fotosistema I

5.4.4. Transporte de electrones

El transporte de electrones del agua al NADP + requiere tres complejos proteicos unidos a la membrana que operan en serie: fotosistema II, complejo del citocromo bf y fotosistema I. Los electrones se transfieren entre estos grandes complejos proteicos mediante moléculas móviles pequeñas (plastoquinona y plastocianina en plantas). Debido a que estas pequeñas moléculas transportan electrones (o átomos de hidrógeno) a distancias relativamente largas, juegan un papel único en la conversión de energía fotosintética. Esto se ilustra mediante plastoquinona (PQ), que cumple dos funciones clave. La plastoquinona transfiere electrones desde el centro de reacción del fotosistema II al complejo del citocromo bf y transporta protones a través de la membrana fotosintética. Lo hace haciendo circular átomos de hidrógeno a través de la membrana desde el fotosistema II al complejo del citocromo bf. Debido a que la plastoquinona es hidrófoba, su movimiento está restringido al núcleo hidrofóbico de la membrana fotosintética. La plastoquinona actúa difundiendo a través de la membrana hasta que, debido a colisiones aleatorias, se une a un sitio específico en el complejo del fotosistema II. El centro de reacción del fotosistema II reduce la plastoquinona en el sitio QB mediante la adición de dos electrones y dos protones que

crean PQH₂. La molécula de plastoquinona reducida se desprende del fotosistema II y se difunde al azar en la membrana fotosintética hasta que encuentra un sitio de unión específica en el complejo citocromo bf. El complejo de citocromo bf es un complejo proteico de membrana que contiene cuatro portadores de electrones, tres citocromos y un centro de FeS. La estructura cristalina se ha resuelto para el citocromo f del nabo y el centro FeS de las mitocondrias del corazón bovino. En una secuencia de reacción complicada que no se comprende completamente, el complejo citocromo bf elimina los electrones de la plastoquinona reducida y facilita la liberación de los protones en el espacio acuoso interno. Los electrones finalmente se transfieren al centro de reacción del fotosistema I. Los protones liberados en el espacio acuoso interno contribuyen a la energía libre de protones químicos a través de la membrana.

La transferencia de electrones desde el complejo citocromo bf al fotosistema I está mediada por una pequeña proteína Cu, plastocianina (PC). La plastocianina es soluble en agua y opera en el espacio de agua interior de la membrana fotosintética. La transferencia de electrones del fotosistema I al NADP⁺ requiere ferredoxina, una pequeña proteína FeS, y ferredoxin-NADP oxidoreductasa, una flavoproteína periférica que opera en la superficie externa de la membrana fotosintética. Ferredoxin y NADP⁺ son solubles en agua y se encuentran en la fase acuosa externa.

La ruta de los electrones está determinada en gran medida por la energía de la reacción y la distancia entre los portadores. La afinidad electrónica de los portadores se representa en la Fig. 5.11 por sus potenciales de punto medio, que muestran la energía libre disponible para las reacciones de transferencia de electrones en condiciones de equilibrio. Debe tenerse en cuenta que las condiciones de reacción durante la fotosíntesis no están en equilibrio. Después de la separación de carga primaria, el transporte de electrones está energéticamente cuesta abajo (de un potencial redox inferior negativo a uno superior más positivo). Es el flujo descendente de electrones que proporciona energía libre para la creación de un gradiente químico de protones.

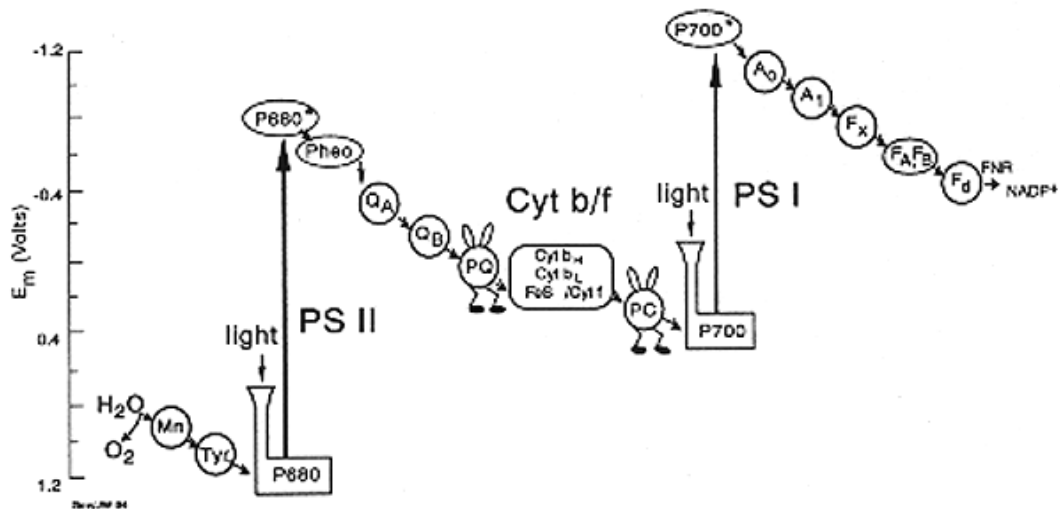


Figura 5.11: Vía de transporte de electrones de las plantas (fotosíntesis oxigénica)

Las membranas fotosintéticas efectivamente limitan el transporte de electrones a dos dimensiones. Para los portadores de electrones móviles, limitar la difusión a dos dimensiones aumenta el número de encuentros aleatorios. Además, debido a que la plastocianina es móvil, cualquier complejo de citocromo bf puede interactuar con varios complejos de fotosistema I. Lo mismo es cierto para la plastoquinona, que comúnmente opera en una estequiometría de aproximadamente seis moléculas por complejo fotosistema II.

5.4.5. Creación de un potencial electroquímico de electrones

El transporte de electrones crea el potencial electroquímico de protones de la membrana fotosintética mediante dos tipos de reacciones. La primera, la liberación de protones durante la oxidación del agua por el fotosistema II y la translocación de protones de la fase acuosa externa a la fase acuosa interna por las reacciones acopladas del fotosistema II y el complejo citocromo bf en la reducción y oxidación de plastoquinona en lados opuestos de la membrana, esto crea una diferencia de concentración de protones a través de las membranas ($DpH = pH_{in} - pH_{out}$). Y la segunda, la separación de carga primaria en el centro de reacción impulsa un electrón a través de la membrana fotosintética, lo que crea un potencial eléctrico a través de la membrana ($DY = Y_{in} - Y_{out}$). Juntas, estas dos formas de energía conforman el potencial electroquímico de protones a través de la membrana fotosintética ($DmH +$) que está

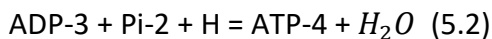
relacionado con la diferencia de pH a través de la membrana y la diferencia de potencial eléctrico a través de la membrana mediante la siguiente ecuación:

$$DmH + = F DY - 2.3 RT DpH \quad (5.1)$$

donde F es la constante de Faraday, R es la constante del gas y T la temperatura en grados Kelvin. Aunque el valor de DY a través de la membrana fotosintética en los cloroplastos puede ser tan grande como 100 mV, en condiciones normales domina el gradiente de protones. Por ejemplo, durante la fotosíntesis, el pH externo es típicamente cerca de 8 y el pH interno es típicamente cerca de 6, dando una diferencia de pH de 2 a través de la membrana que es equivalente a 120 mV. En estas condiciones, la energía libre para la transferencia de protones desde la fase acuosa interna a la externa es -12 kJ / mol de protones.

5.4.6. Síntesis de ATP por la enzima ATP sintasa

La conversión de la energía electroquímica de protones en energía libre de químicos se lleva a cabo mediante un solo complejo de proteínas conocido como ATP sintasa. Esta enzima cataliza una reacción de fosforilación, que es la formación de ATP mediante la adición de fosfato inorgánico (Pi) a ADP:



La reacción es energéticamente cuesta arriba ($DG = +32$ kJ / mol) y es impulsada por la transferencia de protones a través de la proteína ATP sintasa. El complejo ATP sintasa se compone de dos subunidades principales, CF₀ y CF₁. La subunidad CF₀ abarca la membrana fotosintética y forma un canal de protones a través de la membrana. La subunidad CF₁ se adjunta a la parte superior de la CF₀ en el exterior de la membrana y se encuentra en el espacio acuoso. CF₁ se compone de varias subunidades de proteínas diferentes, denominadas a, b, g, d y e. La porción superior de la subunidad CF₁ está compuesta por tres dímeros ab que contienen los sitios catalíticos para la síntesis de ATP. Los procesos moleculares que combinan la transferencia de protones a través de la proteína con la adición química de fosfato a ADP son poco conocidos. Se sabe que la fosforilación puede ser impulsada por un gradiente de pH, un campo eléctrico transmembrana o una combinación de los dos. Los experimentos indican que tres protones deben pasar a través del complejo ATP sintasa para la síntesis de una molécula de ATP. Sin embargo, los protones no están involucrados en la química de agregar fosfato a ADP. Paul Boyer y sus colaboradores han propuesto un mecanismo alternativo de sitio de unión para la síntesis de ATP. Un modelo basado en su propuesta es que hay tres sitios catalíticos en cada CF₁ que circulan entre tres estados diferentes. Los estados difieren en su afinidad por ADP, Pi y ATP. En cualquier momento, cada sitio se encuentra

en un estado diferente. Este modelo está respaldado por la estructura de ATPasa elucidada por Abrahams et al. (1994). Inicialmente, un sitio catalítico en CF₁ se une a un ADP y una molécula de fosfato inorgánico relativamente suelta. Debido a un cambio conformacional de la proteína, el sitio se convierte en un sitio de unión apretado, que estabiliza el ATP. A continuación, la transferencia de protones induce una alteración en la conformación de proteínas que hace que el sitio libere la molécula de ATP en la fase acuosa. En este modelo, la energía del gradiente electroquímico de protones se utiliza para disminuir la afinidad del sitio por el ATP, lo que permite su liberación a la fase acuosa. Los tres sitios en CF₁ actúan de forma cooperativa, es decir, los estados conformacionales de los sitios están vinculados. Se ha propuesto que los protones afectan el cambio conformacional impulsando la rotación de la parte superior (los tres dímeros ab) de CF₁. Tal modelo giratorio se ha visto respaldado recientemente por el registro de una rotación de la subunidad gamma relativa a las subunidades alfa-beta por Sabbert et al. (1996). Este mecanismo de sitio giratorio requeriría tasas de hasta 100 revoluciones por segundo. Vale la pena señalar que los flagelos que impulsan algunas bacterias son impulsados por una bomba de protones y pueden girar a 60 revoluciones por segundo.

5.4.7. Síntesis de carbohidratos

Todas las plantas y algas eliminan el CO_2 del medio ambiente y lo reducen a carbohidratos según el ciclo de Calvin. El proceso es una secuencia de reacciones bioquímicas que reducen el carbono y reorganizan los enlaces para producir carbohidratos a partir de moléculas de CO_2 . El primer paso es la adición de CO_2 a un compuesto de cinco carbonos (ribulosa-1,5-bisfosfato) (Fig. 5.12). El compuesto de seis carbonos se divide, dando dos moléculas de un compuesto de tres carbonos (3-fosfoglicerato). Esta reacción clave está catalizada por RuBisCO, un gran complejo de proteína soluble en agua. La estructura tridimensional ha sido determinada por análisis de rayos X para RuBisCO aislado del tabaco a partir de una cianobacteria (*Synechococcus*) y de una bacteria púrpura (*Rhodospirillum rubrum*). La reacción de carboxilación es energicamente cuesta abajo. El aporte de energía principal en el ciclo de Calvin es la fosforilación por ATP y la posterior reducción por NADPH del compuesto inicial de tres carbonos formando un azúcar de tres carbonos, triosafosfato. Parte del triosafosfato se exporta desde el cloroplasto y proporciona la base para sintetizar moléculas más complejas. En un proceso conocido como regeneración, el ciclo de Calvin utiliza algunas de las moléculas de triosafosfato para sintetizar la riqueza de ribulosa 1,5-bisfosfato necesaria para la reacción de carboxilación inicial. Esta reacción requiere la entrada de energía en forma de un ATP. En general, se requieren trece enzimas para catalizar las reacciones en el ciclo de Calvin. La eficiencia de conversión de energía del

ciclo de Calvin es aproximadamente del 90%. Las reacciones no involucran la transducción de energía, sino la reordenación de la energía química. Cada molécula de CO_2 reducida a un azúcar [CH_2O] n requiere 2 moléculas de NADPH y 3 moléculas de ATP.

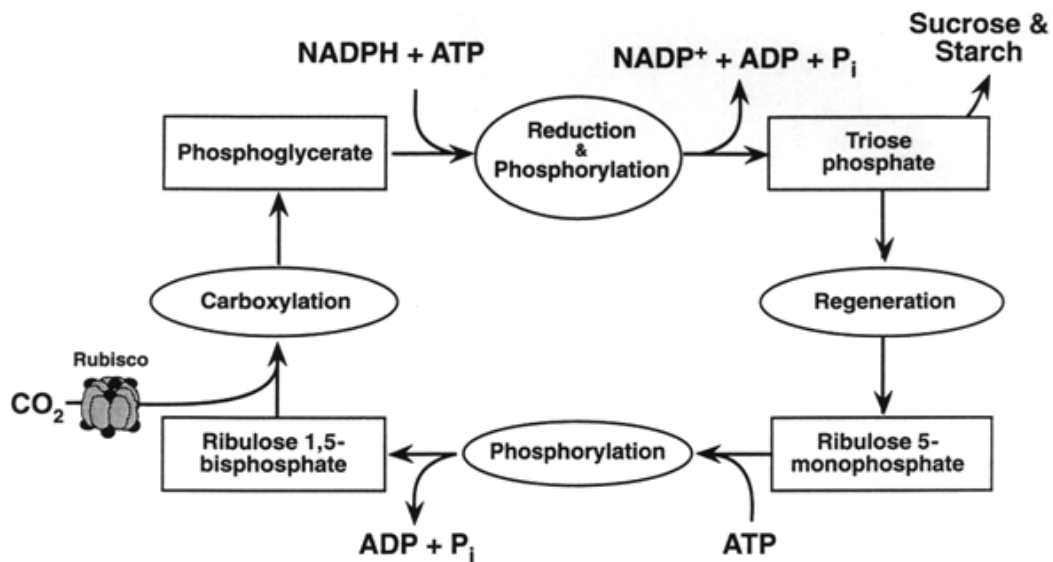


Figura 5.12: Un esquema abreviado que muestra la reducción de dióxido de carbono por el ciclo de Calvin

RuBisCO es una enzima bifuncional que, además de unir CO_2 a ribulosa bisfosfato, también puede unir O_2 . Esta reacción de oxigenación produce el 3-fosfoglicerato que se usa en el ciclo de Calvin y un compuesto de dos carbonos (2-fosfoglicolato) que no es útil para la planta. En respuesta, se inicia un conjunto complicado de reacciones (conocidas como fotorrespiración) que sirven para recuperar carbono reducido y eliminar el fosfoglicolato. La reacción de oxigenación de RuBisCO parece no ser útil para la planta. Algunas plantas han desarrollado estructuras especializadas y rutas bioquímicas que concentran CO_2 cerca de RuBisCO. Estas vías (C4 y CAM) sirven para disminuir la fracción de reacciones de oxigenación (ver el Capítulo de este volumen sobre reducción de carbono).

5.4.8. Rendimiento cuántico fotosintético y eficiencia de conversión de la energía

El requisito cuántico mínimo teórico para la fotosíntesis es de 8 cuantos para cada molécula de oxígeno evolucionado (cuatro cuantos requeridos por el fotosistema II y

cuatro por el fotosistema I). Las mediciones en células de algas y hojas en condiciones óptimas (por ejemplo, poca luz) dan requisitos cuánticos de 8-10 fotones por molécula de oxígeno liberada. Estas mediciones de rendimiento cuántico muestran que los rendimientos cuánticos de los centros de reacción del fotosistema II y del fotosistema I en condiciones óptimas están cerca del 100%. Estos valores se pueden usar para calcular la eficiencia teórica de conversión de energía de la fotosíntesis (energía libre almacenada como carbohidratos / energía de la luz absorbida). Si se absorben 8 quanta rojas (8 mol de fotones rojos equivalen a 1400 kJ) para cada molécula de CO_2 reducida (480 kJ / mol), la eficiencia energética máxima teórica para la reducción de carbono es del 34%. En condiciones óptimas, las plantas pueden lograr eficiencias de conversión de energía dentro del 90% del máximo teórico. Sin embargo, en condiciones de crecimiento normales, el rendimiento real de la planta está muy por debajo de estos valores teóricos. Los factores que conspiran para reducir el rendimiento cuántico de la fotosíntesis incluyen las limitaciones impuestas por las reacciones bioquímicas en la planta y las condiciones ambientales que limitan el rendimiento fotosintético. Una de las plantas de cultivo más eficientes es la caña de azúcar, que se ha demostrado que almacena hasta el 1% de la radiación visible incidente en un período de un año. Sin embargo, la mayoría de los cultivos son menos productivos. La eficiencia de conversión anual del maíz, el trigo, el arroz, las patatas y la soja oscila típicamente entre el 0,1% y el 0,4%.

5.4.9. Fotosíntesis oxigénica en algas

Las algas son organismos eucariotas fotosintéticos que, al igual que las plantas, desarrollan O_2 y reducen el CO_2 . Representan un grupo diverso que incluye los dinoflagelados, los euglenoides, las algas verde-amarillas, las algas doradas, las diatomeas, las algas rojas, las algas pardas y las algas verdes. El aparato fotosintético y las vías bioquímicas de reducción de carbono de las algas son similares a las plantas. La fotosíntesis ocurre en los cloroplastos que contienen fotosistemas II y I, el complejo citocromo bf, las enzimas del ciclo de Calvin y los complejos pigmento-proteína que contienen clorofila ay otros pigmentos de antena (por ejemplo, clorofila b en algas verdes, clorofila c y fucaxanthol en algas pardas y diatomeas y ficobilinas en algas rojas). Se cree que las algas verdes son el grupo ancestral a partir del cual evolucionaron las plantas terrestres. Las algas son abundantes y están muy extendidas en la tierra, y viven principalmente en agua dulce y salada. Algunas algas viven como organismos unicelulares, mientras que otras forman organismos multicelulares, algunos de los cuales pueden crecer bastante grandes, como algas marinas y algas marinas. El fitoplancton en el océano está compuesto de algas y bacterias fotosintéticas oxigénicas. La mayor parte de la fotosíntesis en el océano se debe al fitoplancton, que es una fuente importante de alimento para la vida marina.

5.4.10. Fotosíntesis oxigénica en bacterias

Las cianobacterias son organismos procariotas fotosintéticos que desarrollan O_2 . La evidencia fósil indica que las cianobacterias existieron hace más de 3 mil millones de años y se cree que fueron los primeros organismos que evolucionan con oxígeno en la Tierra. Se presume que las cianobacterias han evolucionado en el agua en una atmósfera que carecía de O_2 . Inicialmente, el O_2 liberado por las cianobacterias reaccionó con hierro ferroso en los océanos y no se liberó a la atmósfera. La evidencia geológica indica que el Fe ferroso se agotó hace alrededor de 2 mil millones de años, y la atmósfera de la tierra se volvió aeróbica. La liberación de O_2 a la atmósfera por cianobacterias ha tenido un profundo efecto en la evolución de la vida.

El aparato fotosintético de las cianobacterias es similar al de los cloroplastos. La principal diferencia está en el sistema de antena. Las cianobacterias dependen de la clorofila a y de los complejos proteicos especializados (filobilisomas) para reunir energía lumínica. No contienen clorofila b. Al igual que en los cloroplastos, la clorofila a se encuentra en proteínas unidas a la membrana. Los ficobilisomas están unidos al lado externo de la membrana fotosintética y actúan para canalizar la energía del excitón al centro de reacción del fotosistema II. Están compuestos de ficobiliproteínas, subunidades proteicas que contienen estructuras de anillo abierto unidas covalentemente conocidas como bilinas que son los pigmentos que absorben la luz. La fotoquímica primaria, el transporte de electrones, la fosforilación y la reducción de carbono ocurren de forma muy similar a como lo hacen en los cloroplastos. Las cianobacterias tienen un sistema genético más simple que las plantas y las algas que les permiten modificarse genéticamente fácilmente. Debido a esto, las cianobacterias se han utilizado como modelo para comprender la fotosíntesis en las plantas. Al alterar genéticamente las proteínas fotosintéticas, los investigadores pueden investigar la relación entre la estructura molecular y el mecanismo.

En las últimas tres décadas se han descubierto varios tipos de bacterias oxigénicas conocidas como proclorofitas (u oxiclوروبacterias) que tienen complejos proteicos que capturan la luz que contienen clorofila a y b, pero que no contienen fibrobilisomas. Debido a que los proclorofitos tienen proteínas de cosecha ligera de clorofila a / b como los cloroplastos, se están investigando como modelos para la fotosíntesis de plantas.

5.5. Fotosíntesis anoxigénica

Las bacterias fotosintéticas anoxigénicas difieren de los organismos oxigenados en que cada especie tiene solo un tipo de centro de reacción. En algunas bacterias fotosintéticas, el centro de reacción es similar al fotosistema II y en otros es similar al fotosistema I. Sin embargo, ninguno de estos dos tipos de centro de reacción bacteriana

es capaz de extraer electrones del agua, por lo que no desarrollan O_2 . Muchas especies solo pueden sobrevivir en ambientes con baja concentración de O_2 . Para proporcionar electrones para la reducción de CO_2 , las bacterias fotosintéticas anoxigénicas deben oxidar las moléculas inorgánicas u orgánicas disponibles en su entorno. Por ejemplo, la bacteria púrpura *Rhodobacter sphaeroides* puede usar succinato para reducir el NAD⁺ mediante una transferencia de electrones. Aunque muchas bacterias fotosintéticas dependen del RuBisCO y del ciclo de Calvin para la reducción de CO_2 , algunas pueden reducir el CO_2 atmosférico por otras vías bioquímicas.

A pesar de estas diferencias, los principios generales de la transducción de energía son los mismos en la fotosíntesis oxigénica y anoxigénica. Las bacterias fotosintéticas anoxigénicas dependen del bacterioclorofilo, una familia de moléculas que son similares a la clorofila, que absorben fuertemente en el espectro del infrarrojo entre los 700 y 1000 nm. El sistema de antena consiste en bacterioclorofila y carotenoides que sirven a un centro de reacción donde ocurre la separación de carga primaria. Los portadores de electrones incluyen quinona (por ejemplo, ubiquinona, menaquinona) y el complejo citocromo bc, que es similar al complejo citocromo bf del aparato fotosintético oxigénico. Al igual que en la fotosíntesis oxigénica, la transferencia de electrones se combina con la generación de un potencial electroquímico que impulsa la fosforilación por ATP sintasa y la energía requerida para la reducción de CO_2 es proporcionada por ATP y NADH, una molécula similar a NADPH.

5.6. Fotosíntesis a nivel global

La cantidad de CO_2 eliminado de la atmósfera cada año por organismos fotosintéticos oxigénicos es muy grande. Se estima que los organismos fotosintéticos eliminan 100×10^{15} gramos de carbono al año. Esto es equivalente a 4×10^{18} kJ de energía libre almacenada en carbono reducido, que es aproximadamente el 0.1% de la energía radiante incidente en la tierra por año. Cada año, el carbono fotosintéticamente reducido se oxida, ya sea por organismos vivos para su supervivencia o por combustión. El resultado es que se libera más CO_2 de la biota a la atmósfera que la fotosíntesis. La cantidad de carbono liberado por la biota se estima en $1-2 \times 10^{15}$ gramos de carbono por año. A esto se agrega el carbono liberado por la quema de combustibles fósiles, que equivale a 5×10^{15} gramos de carbono por año.

Los océanos mitigan este aumento al actuar como un sumidero de CO_2 atmosférico. Se estima que los océanos eliminan aproximadamente 2×10^{15} gramos de carbono por año de la atmósfera. Este carbono finalmente se almacena en el fondo del océano. Aunque estas estimaciones de fuentes y sumideros son inciertas, la concentración mundial neta de CO_2 está aumentando. Las mediciones directas

muestran que cada año el contenido de carbono en la atmósfera aumenta en aproximadamente 3×10^{15} gramos. En los últimos doscientos años, el CO_2 en la atmósfera ha aumentado en aproximadamente 280 partes por millón (ppm) a su nivel actual de 360 ppm. Con base en el uso previsto de combustibles fósiles y la gestión de la tierra, se estima que la cantidad de CO_2 en la atmósfera alcanzará las 700 ppm en el próximo siglo. Las consecuencias de este cambio rápido en nuestra atmósfera son desconocidas. Debido a que el CO_2 actúa como un gas de efecto invernadero, algunos modelos climáticos predicen que la temperatura de la atmósfera terrestre puede aumentar en 2 a 8 grados $^{\circ}C$. Un aumento de temperatura tan grande conduciría a cambios significativos en los patrones de lluvia. Poco se sabe sobre el impacto de estos cambios atmosféricos y climáticos tan drásticos en las comunidades de plantas y cultivos. La investigación actual está dirigida a comprender la interacción entre el cambio climático global y los organismos fotosintéticos.

5.7. Conclusión

A lo largo de este capítulo se ha hecho un análisis profundo sobre los aspectos fundamentales en la reacción química de la fotosíntesis mediante la cual las plantas, las algas y las bacterias fotosintéticas utilizan la energía de la luz para sintetizar compuestos orgánicos.

También clasificamos el proceso, en oxigénico y anoxigénico desarrollándolo desde que la luz interactúa en el organismo o tejido hasta la generación de energía.

Finalmente, se ha querido tener en cuenta el impacto que tiene la fotosíntesis a nivel mundial.

Capítulo 6. La óptica en la agricultura

6.1. Introducción

Alrededor de todo el mundo, los agricultores buscan continuamente como mejorar el rendimiento de sus cultivos a un menor coste y generando, a su vez, productos de mayor calidad. Actualmente se está logrando avanzar con la utilización de tecnologías de iluminación y detección óptica.

A lo largo de la historia, los agricultores han dependido de corazonadas, pronósticos y observaciones cualitativas para mejorar sus cultivos, los productores de hoy en día pueden recopilar los datos de sus cultivos con una precisión sin precedentes. En el interior de invernaderos, la iluminación a un bajo costo está impulsando el rendimiento de los cultivos e incluso permitiendo que los biólogos ajusten la respuesta de las plantas a la luz para obtener vegetales más nutritivos.

6.2. Eficiencia en la agricultura

La inseguridad alimentaria de hoy en día es generalmente un problema de economía más que de sequía; a mediados de 2017, solo cuatro países se consideraban en estado de hambre. Sin embargo, la población de la Tierra sigue creciendo, lo suficientemente rápido como para que, según las estimaciones de las Naciones Unidas, para el año 2100 casi 4.000 millones de personas más necesiten alimentos y ropa.

En la gran agroindustria, la eficiencia de la producción se traduce comúnmente en la velocidad a la que se puede procesar un campo. Para maximizar esa velocidad, los agricultores confiaban en un enorme equipo de recolecta que trataba todas las partes del campo por igual. Sin embargo, cuando el GPS se abrió al uso civil en la década de 1980, creó la oportunidad para la "agricultura de precisión": registrando datos del campo de sección en sección, para permitir a los agricultores administrar los cultivos de acuerdo con las necesidades de la planta en ubicaciones determinadas. Desde ese momento entran en funcionamiento las tecnologías ópticas que se basan en la recopilación de datos con sensores ópticos que nos permiten comprender la variación en los suelos, las plantas, las malezas, los insectos, las enfermedades, el estrés en las plantas y demás factores contribuyentes al buen estado de los cultivos.

La mayoría de los sensores remotos se realizan con cámaras visibles o multiespectrales, que se extienden hasta el rango infrarrojo cercano. La teledetección agrícola puede incluir todo, desde la teledetección satelital hasta el uso de drones que vuelan a unos cien metros de altura sobre el suelo.

6.3. Influencia en el mundo textil

La agricultura de precisión ha ido más allá de los cultivos alimenticios y también se implanta en los textiles, para el algodón, por ejemplo, que crece en aproximadamente el 2,5 por ciento de la tierra cultivable del planeta. Cuantos más datos adquieran los agricultores sobre sus cultivos, y cuanto más rápido puedan adquirir esos datos, mejores serán sus márgenes de beneficio.

El factor determinante del precio del algodón es la calidad de su fibra (Fig. 6.1): color, contenido de basura, longitud, resistencia y madurez. El último criterio, la madurez, es una medida de cuánta celulosa se ha depositado en el tubo de fibra, inicialmente hueco durante los 40-50 días de crecimiento de la cápsula del algodón (funda protectora que contiene la carga útil de la fibra del algodón). Una fibra de algodón típica tiene aproximadamente 15 μm de diámetro, un tercio del grosor de un cabello humano. Los agricultores no recolectan datos sobre la madurez de las fibras de forma individual. En su lugar, consideran el "micronaire" una medida adimensional que determina la finura y madurez de la fibra de algodón. El aparato mide la permeabilidad del aire de una masa constante de fibras de algodón comprimidas a un volumen fijo, e intentan optimizar esa cantidad para el hilado.

El micronaire generalmente se mide con fibra de algodón limpia. Si queremos la calidad de la fibra en el punto de cosecha, conectada a las semillas, hojas, ramas, tallos y otros, se debe hacer una estimación óptica. La estimación óptica requiere el uso de análisis de la imagen para diferenciar entre la fibra de algodón real y todo lo demás. La calidad de la fibra en la imagen puede determinarse por su reflectancia a ciertas longitudes de onda, tales como longitudes de onda específicas del infrarrojo cercano.



Figura 6.1: Recogida de la fibra de algodón

Con técnicas de agricultura de precisión que podrían incluir la implementación de un sensor de imagen en una cosechadora de algodón, los productores de algodón podrían comenzar a mapear los ingresos o la rentabilidad de un campo determinado, en función del rendimiento de las plantas de algodón y la calidad de la fibra en cada posición del campo. Los agricultores pueden usar los datos para evaluar los métodos para mejorar sus cultivos. Además, dado que los productores de algodón pueden vender su producción en mercados futuros antes de procesarlo, predecir la calidad de un cultivo durante la cosecha brinda a los agricultores una ventaja adicional.

6.4. Fenotipado de alto rendimiento

Antes de todo cabe definir un par de conceptos. En primer lugar, lo que es el genotipo, referido a la información genética que posee un organismo en particular, en forma de ADN. Y en segundo lugar lo que es el fenotipo, que define cualquier característica o rasgo observable de un organismo, como su morfología, desarrollo, propiedades bioquímicas, fisiología y comportamiento. La comparación de genotipos de plantas con fenotipos ayuda a los biólogos a identificar los genes que producen estas características, de modo que los científicos puedan desarrollar cultivos futuros con las características deseables: alta tasa de crecimiento, resistencia a la sequía, resistencia a plagas y enfermedades, etc.

Históricamente, todo el trabajo de fenotipado de plantas se ha hecho a mano. Ahora que los científicos han secuenciado los genomas de varias plantas agrícolas importantes es relativamente fácil y barato el genotipificar, pero lo más difícil es: ¿qué significan esos genes?

6.5. Avances en la iluminación en invernaderos

La agricultura en algunas regiones, y para algunos cultivos, se lleva a cabo principalmente en interiores, en invernaderos (Fig. 6.2), que son mucho más que instalaciones de vidrio. Pueden ser, por ejemplo, estructuras completamente cerradas de plástico o parcialmente cerradas para proteger los cultivos delicados de los aguaceros.



Figura 6.2: Cultivo en interiores

Mientras que los invernaderos se crearon para explotar la luz del sol, la iluminación artificial se ha convertido en un complemento importante para los cultivos que no pueden obtener suficientes fotones solares durante los días de invierno (o nublados). Típicamente, los invernaderos comerciales a gran escala usan lámparas de descarga de alta intensidad de sodio (HPS) o haluro metálico. Sin embargo, al igual que con otras innumerables aplicaciones, los investigadores y fabricantes de iluminación están ansiosos por explorar la iluminación LED para la horticultura.

Al igual que con la iluminación de la oficina o una habitación, las luces de LED crean mucho menos calor residual que las lámparas de descarga de gas. Para un negocio con 5 hectáreas (ha) de invernaderos con una intensidad de iluminación deseada de 200 micromoles (μmol) de fotones por metro cuadrado y por segundo, los LED podrían reducir el consumo de energía de la iluminación, sin mencionar la ventilación por la acumulación excesiva de calor. Estudios revelan que la eficiencia energética de las lámparas HPS es de aproximadamente $1.85 \mu\text{mol} / \text{J}$, pero los LED más eficientes de hoy en día son de aproximadamente $2.7 \mu\text{mol} / \text{J}$, lo que supone un aumento del 50%.

De acuerdo, la conversión inicial de invernaderos de lámparas de descarga de gas a accesorios LED tendría unos costes muy altos, pero con el tiempo se ahorraría más.

Las luces HPS se utilizan con frecuencia para la iluminación nocturna al aire libre, pero su emisión rojo-amarilla se adapta mejor a la visión humana que a las necesidades de las plantas. Debido a sus moléculas de clorofila, las hojas de los cultivos absorben las longitudes de onda rojas y azules, por lo que los productores pueden iluminar las plantas con luces de crecimiento LED rojas y azules. Ajustar las proporciones de luces rojas y azules puede cambiar la forma en que crecen las plantas, por ejemplo, agregar más luz azul puede hacer que ciertas plantas con flores ornamentales crezcan a voluntad propia

al tamaño deseado. Un estudio de 2012 descubrió que agregando durante un período un LED de luz roja suplementaria a la iluminación de HPS se aumentaba el contenido de antioxidantes de las verduras de hoja como la espinaca, el perejil y el eneldo.

El pequeño tamaño de los LED, además de su fácil integración con controles digitales y sus bajos niveles de calor residual, los hace ideales para la investigación hortícola. Los biólogos están estudiando la respuesta de las plantas vegetales a la luz roja lejana, que puede producir tomates más grandes y más nutritivos, y a la llamada iluminación "intra-dosel". En esta última, los LED se colocan para iluminar las hojas inferiores en plantas altas de tomate (u otras) para la producción adicional de fruta; Las lámparas HPS en las mismas posiciones causarían estrés por calor. Varios estudios observaron que la iluminación dentro del dosel aumentó la producción de pepino en un 11 por ciento y la producción de frijol en un 50 por ciento.

6.6. Conclusión

Este capítulo cuenta a grandes rasgos la situación actual en la agricultura y de qué manera puede afectar la misma, tanto en la economía, como en el sustento alimenticio y textil que todos necesitamos para nuestra existencia.

Al final del capítulo se cuentan los avances de la iluminación en la agricultura y las líneas futuras que se pretenden perseguir.

Capítulo 7. Iluminación LED para la horticultura

7.1. Introducción

Una de las áreas de más rápido crecimiento durante los últimos años ha sido la iluminación LED asociada a diversas aplicaciones en la producción en invernaderos. Hay varias razones por las que está ocurriendo esto, una de ellas es el precio de la iluminación artificial, que forma una parte sustancial del coste de producción en invernaderos, y otra es la posibilidad de realizar varios modos de iluminación y automatización de control.

El uso de una iluminación compuesta de dispositivos LED ofrece muchas ventajas: una reducción significativa en los costos de energía, diferentes opciones para seleccionar la potencia apropiada y la composición espectral de la radiación según el tipo de plantas cultivadas, posibilidades para gestionar las características del flujo radiante dependiendo de la etapa de desarrollo, etc. Al mismo tiempo, la vida de los equipos de iluminación LED con una gestión térmica adecuada es mucho más larga que los utilizados anteriormente y su rendimiento es mayor.

Cabe aclarar que la elección de la iluminación adecuada para una planta en particular no es una tarea sencilla y no existe una única solución.

Encontrar las características óptimas del equipo de iluminación: la eficiencia energética, la potencia y la distribución espectral apropiada del flujo radiante requieren una investigación exhaustiva y un preciso control del equipo usado.

7.2. Planteamiento del problema

Los espectros de absorción típicos de los pigmentos que determinan la eficiencia del proceso de fotosíntesis se muestran en la Fig. 7.1. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos espectros son aproximados. En realidad, la situación es mucho más complicada. [Wei17]

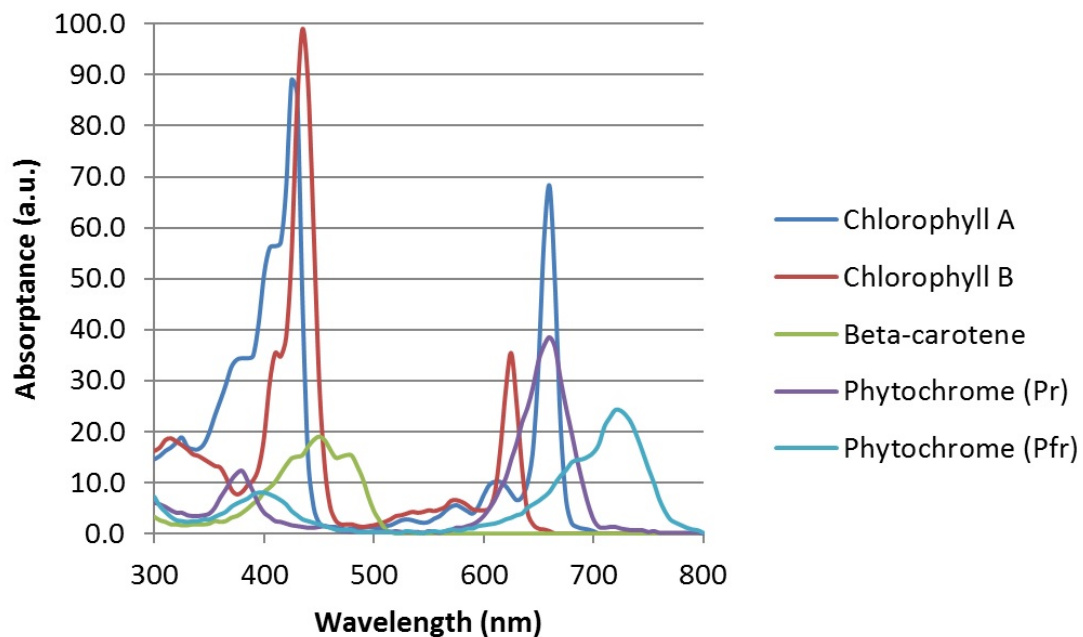


Figura 7.1: Fotopigmento de absorción espectral

McCree en 1972 midió la absorbancia espectral en el rango de longitud de onda de los 400 nm a los 700 nm (Fig. 7.2), en las hojas de 22 variedades de plantas de cultivo. Esta medición fue tomada en diferentes condiciones como la especie, variedad, edad de la hoja, condiciones de crecimiento, temperatura, concentración de CO_2 , flujo de radiación monocromática, flujo de radiación blanca suplementaria o superficie de la hoja expuesta. Con todos los resultados McCree estableció la curva de rendimiento cuántico relativo ponderado por fotones (Fig. 7.3) que es representativa de la mayoría de las plantas de cultivo. Para todas las especies y condiciones la curva de rendimiento cuántico tuvo dos máximos, centrados a 440 y 620 nm. La altura promedio del pico azul fue del 70 % la del pico rojo, aproximadamente. [Hristov17].

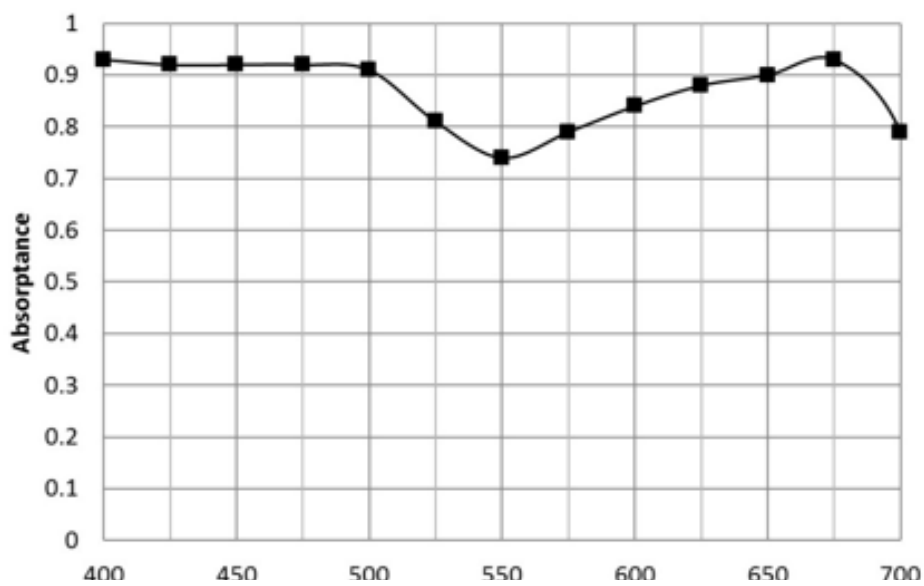


Figura 7.2: Absorción espectral media de la planta de cultivo

Para evaluar la efectividad del flujo luminoso en el proceso de la fotosíntesis, definimos el término radiación fotosintéticamente activa (PAR): métrica para la radiación electromagnética total en el rango espectral entre los 400 nm y los 700 nm que los organismos fotosintéticos pueden usar en el proceso de la fotosíntesis. Una unidad para la medición PAR es la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD): el número de fotones PAR que caen en una superficie determinada durante un tiempo dado, medido en unidades de moles partido de metro cuadrado por segundo ($\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$).

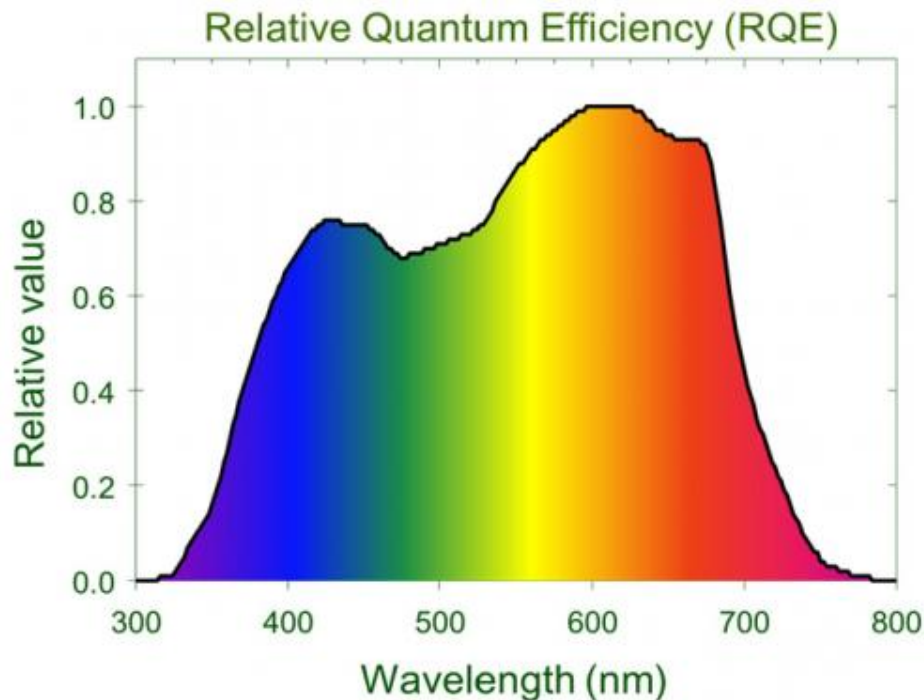


Figura 7.3: Curva de eficiencia cuántica relativa de la fotosíntesis

De acuerdo con la ley de Stark-Einstein, cada fotón en el intervalo de los 400 nm a los 700 nm que se absorbe excitará un electrón, independientemente de la energía del fotón. Por lo tanto, PPFD es el parámetro preferido para evaluar las propiedades del flujo luminoso en el proceso de la fotosíntesis cuando se usan fuentes con diferentes distribuciones de potencia espectral.

7.3. Aplicación de los LED en la producción en invernaderos

Elegir una buena iluminación (artificial o solar) es importante para tener los mejores resultados.

Hasta ahora, la iluminación artificial más utilizada en el cultivo de plantas indoor ha sido las lámparas de vapor de sodio a alta presión (HPS). Hoy en día, la tecnología LED evoluciona rápidamente y reemplaza las HPS en la iluminación en invernaderos. Su objetivo es desarrollar equipos de iluminación que sean tan buenos como las HPS, pero con un consumo energético inferior.

7.3.1. Color de la luz

Si dividimos el espectro electromagnético en fragmentos de interés para las plantas tenemos uno azul, uno verde (color que no absorben las plantas y por ese

motivo las vemos de color verde) y uno rojo, que incluye el llamado rojo lejano. Además, la eficiencia cuántica relativa de la fotosíntesis de las plantas de cultivo tiene dos picos a 440 nm y 620 nm aproximadamente (Fig. 7.3).

Concretamente el color azul (400-500 nm) es responsable del crecimiento vegetativo (el que se da tras germinar y hasta la floración). Cuando le damos a una planta únicamente luz azul, crecen dando una estatura baja y tienen un color más oscuro. Por otro lado, el color rojo o rojo lejano (600-700 nm) es interpretado por las plantas como la proporción de color de uno con respecto a otro. Esta relación influencia la elongación del tallo, especialmente en cultivos de luz directa. Las plantas reflejan mucho más el rojo lejano que el rojo. Una consecuencia de esto es que cuando hay muchas plantas juntas, la cantidad de rojo lejano aumenta (baja la proporción rojo/rojo lejano) y esto hace que las plantas alarguen sus tallos (por ejemplo, para captar la luz mejor ya que hay competencia).

Se sabe que la fotosíntesis en presencia de dos o más radiaciones de longitud de onda simultáneas puede ser más efectiva que la suma de las longitudes de onda por separado. En particular, la adición de luz blanca con la roja (con una longitud de onda inferior a los 680 nm) o rojo lejano (mayor de 680 nm) puede contribuir favorablemente en el proceso de la fotosíntesis.

En el proceso de la fotosíntesis, la radiación en la parte verde del espectro también juega un papel importante (Fig. 7.3). Utilizar diferentes fuentes lumínicas puede influenciar en el desarrollo morfológico de las hojas, con la luz verde las plantas aumentan más el espesor de sus hojas que por la radiación del haz rojo o azul. Además, los insectos usados en invernaderos ven mejor en las áreas verdes y ultravioletas del espectro. Sin embargo, los LED verdes rara vez se utilizan debido a su baja eficiencia de radiación.

7.3.2. ¿Qué tipo de luz necesito?

Lo primero a tener en cuenta sería el tipo de planta que tenemos, si tienes algo de luz solar o no tienes nada de luz solar. Son las distintas situaciones que nos podemos encontrar. En cada una de ellas la diferencia será la potencia de luz que necesitemos. [Web2].

Hemos visto que las plantas necesitan luz azul y luz roja, dependiendo de cuanta luz azul y roja emitamos favoreceremos el crecimiento de la planta, así como su floración.

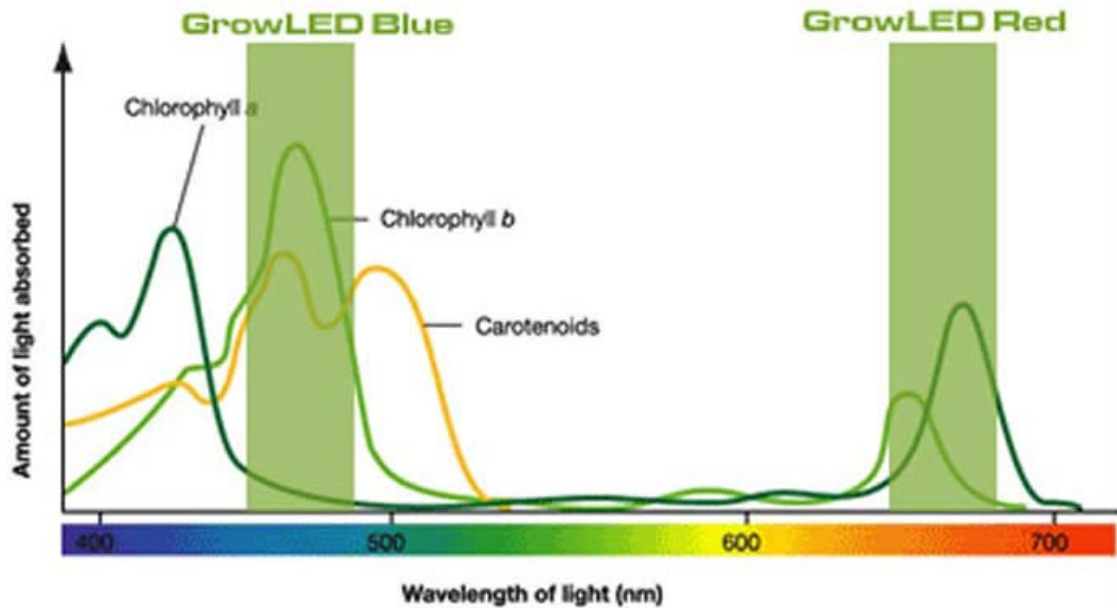


Figura 7.4: Longitud de onda LED correspondiente al efecto del crecimiento de la planta

Con la iluminación LED podemos satisfacer estas necesidades de crecimiento y floración sin hacer un consumo energético elevado (Fig. 7.4). En la siguiente figura (Fig. 7.5) podemos ver el espectro electromagnético adecuado de una lámpara LED para el crecimiento de plantas en interiores. [Web4].

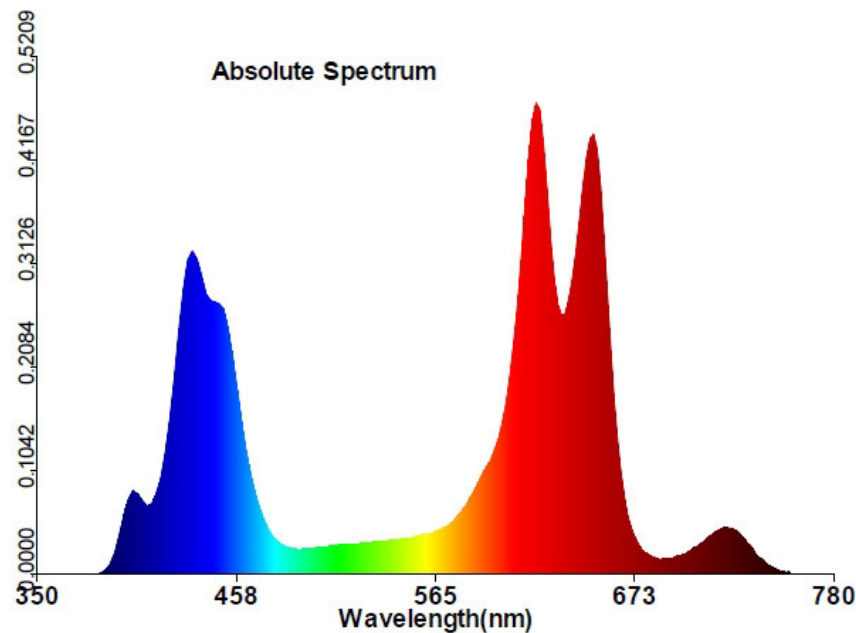


Figura 7.5: Espectro electromagnético adecuado de una lámpara LED

Hoy en día, se desarrollan y comercializan potentes LED de color azul intenso de nitruro de galio e indio (InGaN) de 450 nm y LED en rojos de 660 nm de fosfuro de aluminio y calcio (AlInGaP). Estos productos son bastante eficaces, convirtiendo aproximadamente el 45% de su potencia eléctrica de entrada en luz visible. En los últimos años, los sistemas de iluminación especializados para la producción de cultivos en invernaderos han aparecido sobre la base de eficientes módulos de LED blancos. La combinación de módulos de LED blancos con LED rojo y lejano permite la creación de fuentes de iluminación eficientes con características espectrales apropiadas para el cultivo de plantas. En la Fig. 7.6 se presentan las características espectrales de dicha fuente en comparación con la curva de McCree y las características de una lámpara HPS. El consumo de energía de la lámpara LED es dos veces menor que el de la lámpara HPS. [Web3].

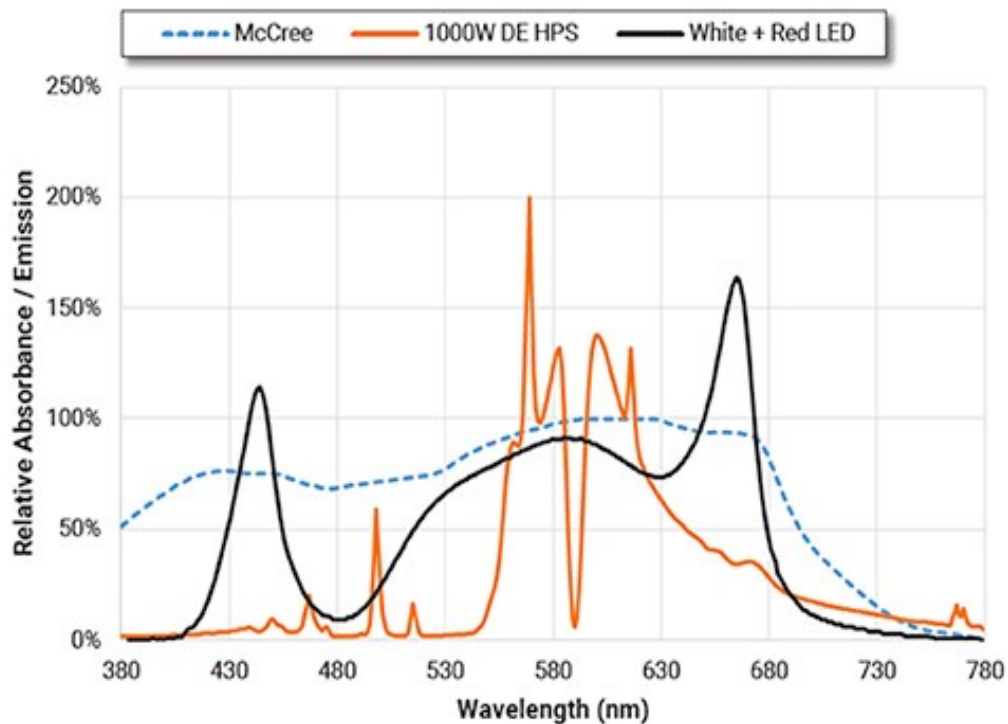


Figura 7.6: Curva de McCree y características espectrales de lámparas HPS y LED

7.4. Experimento

7.4.1. Exposición

Existen muchos datos contradictorios sobre las características espectrales y de potencia requeridas para los diferentes tipos de plantas; Es por eso por lo que creemos que los sistemas de iluminación deben ser portadores de las siguientes características:

- La potencia de radiación emitida en diferentes regiones espectrales (azul, rojo, amarillo y verde) debe ser totalmente controlable.
- Debería ser posible realizar un flujo de luz variable con diferentes características espectrales y diferentes coeficientes de carga de impulsos de luz.
- Las posibles variaciones del flujo luminoso PPFD deben variar fácilmente de 0 a los 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ aproximadamente (límite de saturación para la mayoría de las plantas).

Para ello, como en muchas otras industrias, reducir el tamaño de los productos finales es un desafío constante. Esto también es cierto para las aplicaciones de iluminación hortícola donde la diversidad de métodos de cultivo está aumentando. En los últimos años, crece el interés de los consumidores en la creación de métodos de cultivo locales, sostenibles, de un año de duración, tales como el uso de bastidores

verticales múltiples para maximizar el rendimiento de los cultivos en la cantidad mínima de espacio.

7.4.2. Diseño de una instalación LED

En este apartado diseñaremos una instalación de luminarias LED en el interior de un invernadero de 12 m^2 para favorecer la fotosíntesis en horticultura.

Realizando una búsqueda en la web encontramos diversas variedades de tipos de LED. Por ejemplo, el fabricante de LED Cree ofrece su serie XLAMP XQ de emisores, creada especialmente para aplicaciones en horticultura, de $1,6\text{ mm} \times 1,6\text{ mm}$ que facilitan el diseño de las luminarias más pequeñas y de mayor densidad disponibles. Sin embargo, nosotros queremos proponer una instalación sencilla que cualquier persona a nivel de usuario pueda armar en su casa.

7.4.2.1. Requerimientos del cultivo

El propósito a conseguir no es más que imitar la luz natural aplicando luz artificial. De toda la radiación visible, nuestras plantas solo utilizan aproximadamente un 50%, que corresponden solo a los 400-500 nm y los 600-700 nm. Lo más curioso del asunto, es que son las radiaciones menos luminosas (el verde y amarillo es mucho más luminoso que el rojo y el azul). Para no errar en nuestra apreciación y aunque las radiaciones que no utilizan son mucho más luminosas que las utilizadas, podemos afirmar que, de toda la luminosidad (brillo) de la iluminación visible, nuestras plantas utilizan solo la mitad y con la mitad del brillo que proporciona la luz blanca. Por lo tanto, nuestras plantas de interior no necesitan luces especialmente brillantes (comparado con la luz del sol) y tampoco más que las radiaciones que aprovechan ya mencionadas. De esta manera, si una planta se da bien en un ambiente de 5000 lux al exterior, en teoría son necesarios 2500 lux en interior según los cálculos que habíamos obtenido de brillo y luminosidad. Puestos a investigar en huertas artesanales con altas producciones, investigamos que para cultivar tomates tenemos:

Es decir, en luz natural:

- Luz del sol en verano: 22 000 lux.
- Luz del sol en invierno: 11 000 lux.
- Sombras medias de la plantación: 5500-2500 lux.
- Sombras profundas de la plantación: 700 lux.

Que en luz artificial equivale a:

- Máxima luz (en la parte alta de la planta): 11 000 lux (floración)- 5000 lux (crecimiento).
- Luz media (en la parte media de la planta): 2800-1400 lux.
- Sombra profunda de la planta (en la parte baja de la planta): 350 lux.

7.4.2.2. Características de la lámpara LED

Por ello, decidimos utilizar el siguiente LED COB, por su adecuado tamaño que hace que sea manejable sin disponer de complicada tecnología y utensilios para su montaje, y las altas prestaciones que nos ofrece.

El LED COB (Fig. 7.7), creado específicamente para el cultivo de plantas, está hecho de una carcasa de aluminio de alta calidad que mantiene la temperatura a un nivel apropiado, eficaz para el crecimiento y la protección de las plantas. Este tipo de LED nos ofrece una alta eficiencia luminosa, una larga vida útil de hasta 50 000 horas, un gran ahorro de energía, luz de espectro completo y un ángulo de incidencia de 120 grados. En la siguiente tabla (Tabla 7.1.) se muestran las características más relevantes [Web6]:

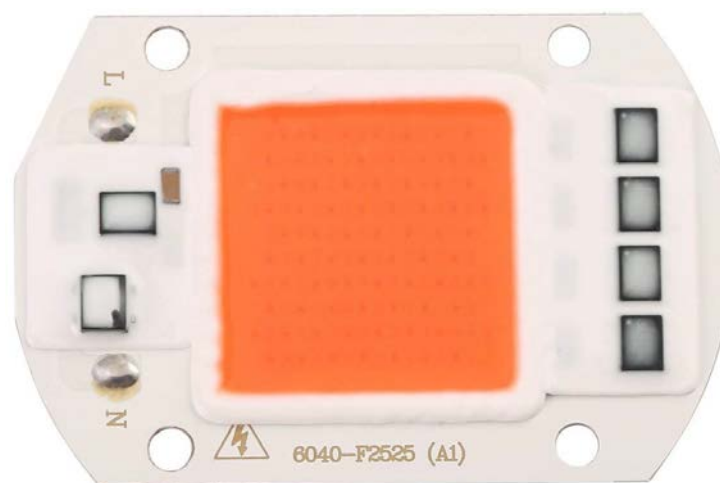


Figura 7.7: LED COB

CARACTERÍSTICAS	
Tipo	LED COB
Potencia consumida	50 W
Voltaje	220 V
Color	Espectro visible completo
Ángulo de emisión	120°
Intensidad luminosa	110-120 lm/W
Tamaño	60x40 mm
Área de emisión	24x24 mm

Tabla 7.1: Características de un LED COB dadas por el fabricante

Para la creación de una de las lámparas LED disponemos sobre una placa disipadora 4 LED COB (Fig. 7.8), la cual nos consumirá un total de 200 W. La configuración sobre la placa es la siguiente:



Figura 7.8: Configuración de 4 LED COB sobre una placa

Fórmula para convertir de lumen a lux

Los parámetros que intervienen son (Fig. 7.9):

L_m = Lumen de la bombilla LED (flujo luminoso)

D = Distancia a la superficie a iluminar.

A = Ángulo del haz luminoso o ángulo sólido.

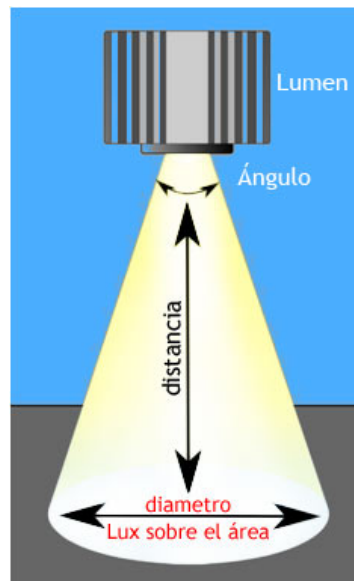


Figura 7.9: Factores determinantes de una lámpara

Con esto se determina la iluminancia en lux:

$$I_V = \frac{L_m}{\Omega} \quad (7.1)$$

$$E_V = \frac{I_V}{r^2} \quad (7.2)$$

Donde I_V es la intensidad de luz (candela-cd), Ω es el ángulo sólido (estereorradianes), E_V la iluminancia sobre una superficie (lux) y r^2 el radio o la distancia al cuadrado.

Para poder saber la cantidad de luz (L_m) real que es capaz de generar nuestra lámpara LED, obtenemos primero los lúmenes reales que emite una bombilla LED COB, para ello aplicamos la siguiente formula:

$$\text{Lúmenes reales de una bombilla LED COB} = n^\circ \text{ de vatios} \times 70 = 50 \times 70 = 3500 \text{ lm}$$

El número setenta, no es un valor arbitrario ni al azar, sino que coincide con una medida establecida entre todos los fabricantes.

Con lo cual, la lámpara LED emitirá:

$$L_m = 4 \text{ LED COB} \times \frac{3500 \text{ lm}}{\text{LED COB}} = 14\,000 \text{ lm} \quad (7.3)$$

Calculamos también el ángulo sólido Ω :

$$\Omega = (2\pi)(1 - \cos \theta) = 2\pi(1 - \cos(\frac{2,09}{2})) = 3,1296 \text{ est.} \quad (7.4)$$

Donde 2,09 es el ángulo de emisión en radianes.

A continuación, ya tenemos todos los datos para aplicar las fórmulas:

$$I_V = \frac{L_m}{\Omega} = \frac{14\,000}{3,1296} = 4473,35 \text{ cd} \quad (7.5)$$

Con esto observamos que si una planta necesita recibir 5000 lux debemos colocar la lámpara LED a una distancia entre 0,9 a 1 m².

$$E_V = \frac{I_V}{r^2} = \frac{4473,35}{1^2} = 4473,35 \text{ lux} \quad (7.6)$$

$$E_V = \frac{I_V}{r^2} = \frac{4473,35}{0,9^2} = 5522,65 \text{ lux} \quad (7.7)$$

7.4.2.3. Cálculo del flujo luminoso total necesario en la instalación

En este apartado vamos a exponer el método de los lúmenes para establecer el número de luminarias necesario en un determinado local que precise una iluminación uniforme. Se debe conocer antes cuales son las dimensiones de la instalación, así como el tipo de lámpara y luminaria que se utiliza, de manera que no solo se pueda calcular su número sino también evaluar si ofrecen el nivel de iluminancia adecuado o no.

En primer lugar, haremos el cálculo del flujo luminoso total necesario, para ello aplicaremos la fórmula:

$$\Phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_m} \quad (7.8)$$

Dónde:

E_m = Nivel de iluminación medio (lux)

Φ_T = Flujo luminoso que un determinado local o zona necesita (lúmenes)

S = Superficie a iluminar (m²)

Este flujo luminoso se ve afectado por unos coeficientes de utilización (C_u) y de mantenimiento (C_m), que se definen a continuación:

C_U = Coeficiente de utilización. Es la relación entre el flujo luminoso recibido por un cuerpo y el flujo emitido por la fuente luminosa. Lo proporciona el fabricante de la luminaria.

C_m = Coeficiente de mantenimiento. Es el cociente que indica el grado de conservación de una luminaria.

Para averiguar el flujo luminoso que necesito que aporten las lámparas, analizamos el tipo de habitáculo que tenemos, su forma y sus acabados influyen notoriamente en cómo se reflexiona la luz en ese determinado espacio.

7.4.2.3.1. Datos de entrada

En primer lugar, examinamos el local obteniendo los datos que necesitamos:

7.4.2.3.1.1. Dimensiones de la zona a iluminar

a= ancho (en m) = 3 m

b= largo (en m) = 4 m

H= altura (en m) = 2,5 m

7.4.2.3.1.2. Altura del plano de trabajo (h')

Debemos fijar la altura del plano de trabajo, que siempre dependerá del tipo de actividad que realicemos en esa zona determinada. En este caso cultivaremos plantas de tomates con una altura media de 1 m (Fig. 7.10). Hay que tener en cuenta que esta altura será variable a medida que las plantas vayan creciendo, por lo que lo mejor sería que las lámparas fueran de altura regulable para un máximo aprovechamiento de la energía lumínica.

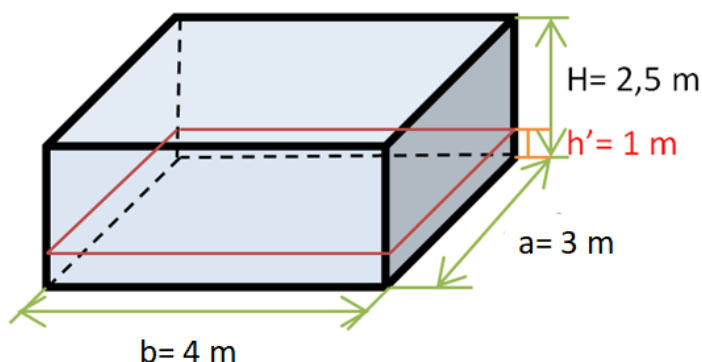


Figura 7.10: Dimensiones de la sala y altura del plano de trabajo

7.4.2.3.1.4. Nivel de iluminancia media (E_m)

En cuanto al nivel de iluminancia media (E_m) depende del tipo de actividad que se vaya a realizar en la zona. Los valores del nivel de iluminancia media se pueden encontrar tabulados en la Norma Europea UNE-EN 12464-1:2003. Esta norma define los parámetros recomendados para los distintos tipos de áreas, tareas y actividades.

Como ya hemos visto, el nivel de iluminancia necesario por el cultivo de tomates es de 5000 lux.

7.4.2.3.1.5. Altura de suspensión de las luminarias

Determinamos la altura de suspensión a la que vamos a colocar las luminarias. Como hemos dicho anteriormente establecemos que las plantas de tomate miden una altura media de 1 m. Líneas atrás también establecimos que las lámparas debían estar a una distancia media de nuestro cultivo de $0,9-1 \text{ m}^2$.

7.4.2.3.2. Coeficiente de utilización (C_u)

El coeficiente de utilización nos indica el número de lúmenes emitidos por la lámpara y los que llegan efectivamente al plano ideal de trabajo. Los fabricantes de luminarias proporcionan para cada modelo unas tablas que son denominadas tablas de factor de utilización. Este coeficiente será tanto más grande cuanto mayor sean los coeficientes de reflexión, y dimensiones de la sala. También influirá si el alumbrado es directo o no, pues una distribución concentrada dirigirá la luz unitariamente hacia abajo, originando que una menor proporción de luz incida en las paredes y techos, obteniendo así una considerable mejora en rendimiento de las instalaciones.

El coeficiente de utilización, por tanto, se encuentra tabulado y es un dato que nos debe de dar el fabricante en función de los coeficientes de reflexión y el índice local.

Para calcular el índice local (k) aplicamos la siguiente formula dedicada a la iluminación directa, semidirecta, directa-indirecta y general difusa:

$$k = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{3 \cdot 4}{1,5 \cdot (3 + 4)} = 1,14 \quad (7.9)$$

Los coeficientes de reflexión de techo, paredes y suelo se encuentran tabulados para los diferentes tipos de materiales, superficies y acabados. Podemos tomar por defecto (Tabla 7.2):

Pintura/color	COEF. REFL.
Techo (blanco)	0,7
Paredes (blanco)	0,5
Suelo (gris oscuro)	0,2

Tabla 7.2: Coeficientes de reflexión de la sala

Con estos datos ya podemos obtener el coeficiente de utilización (C_u). Buscamos la tabla del fabricante, la lectura directa no es posible, así que interpolamos la tabla con los datos obtenidos (Fig. 7.11): $(99 + 75 + 116 + 86)/4 \cong 94$

Como este valor es un porcentaje, en realidad estamos hablando de $C_u = 0,94$

Tabla de corrección

Techo	0.70	0.70	0.70	0.50	0
Pared	0.70	0.50	0.20	0.20	0
Suelo	0.50	0.20	0.20	0.10	0
k 0.6	77	56	46	46	42
k 1.0	99	75	65	63	58
k 1.5	116	89	80	77	72
k 2.5	131	100	93	88	83
k 3.0	136	104	98	92	87

Figura 7.11: Tabla de corrección

7.4.2.3.3. Coeficiente de mantenimiento (C_m)

Este coeficiente hace referencia a la influencia que tiene en el flujo que emiten las lámparas el grado de limpieza de la luminaria. Dependerá, por consiguiente, del grado de suciedad ambiental y de la frecuencia de la limpieza local.

Suponemos una limpieza periódica, por lo que podemos tomar el siguiente valor (Tabla 7.3):

Ambiente	Coeficiente de mantenimiento (C_m)
Limpio	0,8
Sucio	0,6

Tabla 7.3: Coeficiente de mantenimiento

Dentro de la instalación suponemos un ambiente limpio por que tomamos $C_m = 0,8$.

Con todos los cálculos obtenidos, calculamos el flujo total necesario sustituyendo los datos en la formula expuesta anteriormente:

$$\phi_T = \frac{E_m \cdot S}{C_u \cdot C_m} = \frac{5000 \cdot 12}{0,94 \cdot 0,8} = 79787,23 \text{ Flujo luminoso total (7.9)}$$

7.4.2.4. Cálculo del número de iluminarias

Se calcula aplicando la siguiente formula:

$$NL = \frac{\phi_T}{n \cdot \phi_L} \quad (7.10)$$

Dónde:

NL = Número de luminarias

ϕ_T = Flujo luminoso total necesario en la instalación

ϕ_L = Flujo luminoso de una lámpara (se toma del catálogo)

n = Número de lámparas que tiene la luminaria

$$NL = \frac{\phi_T}{n \cdot \phi_L} = \frac{79787,23}{1 \cdot 14000} = 5,69 \cong 6 \quad (7.11)$$

Este decir, en el habitáculo debemos calcular 7 lámparas LED.

7.4.2.5. Disposición de las iluminarias

Una vez que hemos calculado el número de iluminarias que nos hacen falta, procedemos a distribuir las en la habitación para conseguir una iluminación uniforme.

Con las siguientes fórmulas obtenemos el número de lámparas que se reparten de forma uniforme en filas paralelas a los ejes de simetría del local, donde N_{ancho} es el número de filas de luminarias a lo ancho del local (a) y N_{largo} el número de columnas de luminarias a lo largo del local (b), por lo tanto:

$$N_{ancho} = \sqrt{\frac{N_{total}}{b} \cdot a} = \sqrt{\frac{5,69}{4} \cdot 3} = 2,06 \cong 2 \quad (7.12)$$

$$N_{largo} = N_{ancho} \cdot \left(\frac{b}{a}\right) = 2,06 \cdot \frac{4}{3} = 2,75 \cong 3 \quad (7.13)$$

Con los anteriores cálculos determinamos la disposición de las luminarias en el habitáculo, siendo 2 el número de filas de luminarias que tenemos a lo ancho del local y 3 el número de columnas de luminarias que tenemos a lo largo del local.

Por lo tanto, el esquema de colocación de las luminarias en el local, es el siguiente:

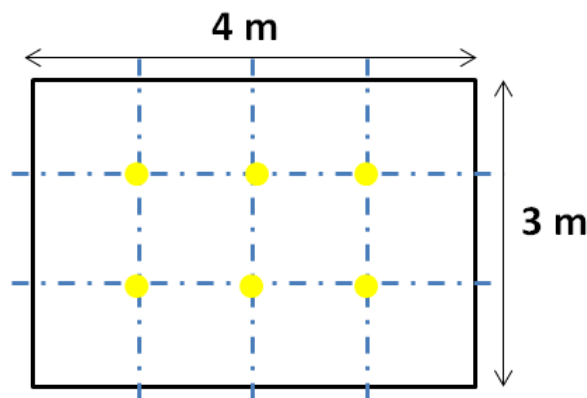


Figura 7.12: Distribución de luminarias en la sala

7.5. Conclusión

Como hemos visto en la introducción, el propósito de este trabajo es diseñar una lámpara LED energéticamente eficiente y sustentable en la producción de invernaderos o laboratorios.

En este capítulo se justifica el uso óptimo de la fuente de luz LED para la iluminación de cultivos en base a los estudios expuestos, demostrando que la eficiencia

energética, la potencia y la distribución apropiada del flujo radiante que emiten es la más próxima a la que los cultivos requieren.

Se plantea iluminar una sala de 12 metros cuadrados, para ello se diseña una luminaria LED de 200 W compuesta de 4 LED COB de 50 W. Posteriormente, se calcula la distancia que debe de haber entres las lámparas y las plantas, el flujo luminoso total que necesita la sala, el número de iluminarias que debemos colocar y su distribución en la misma.

Capítulo 8. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se dan todas las herramientas teóricas necesarias para el diseño de una instalación LED en entornos cerrados. Este tipo de instalaciones se podrá llevar a cabo tanto en grandes explotaciones agrícolas como en pequeños locales dedicados al consumo propio.

Para ello, el trabajo comienza con un capítulo introductorio donde se relata la importancia de la óptica en diferentes ámbitos y se exponen las motivaciones y objetivos que han llevado a la elaboración del mismo.

Tras el primer capítulo, que sirve de introducción se ha explicado cómo se comporta la luz en su interacción con la materia, a través del estudio de las propiedades ópticas básicas que ocurren. También se han repasado diversos teoremas y postulados, que han sido utilizados ampliamente a lo largo de la historia para estudiar las propiedades ópticas de la materia, y se han visto diferentes técnicas y métodos empleados para medir dichas propiedades.

A continuación, se ha estudiado el comportamiento del tejido biológico al ser expuesto a la luz, considerando fundamental en esta interacción los diferentes tipos e intensidades de luz y el tiempo de exposición a la misma. También se explican las modificaciones a las que se ven expuestos estos tejidos al entrar en contacto con la luz.

Después de abordar el comportamiento de la luz en su interacción con la materia, se han recogido todos los tipos de fuentes de luz disponibles en el mercado, que se pueden utilizar en sustitución a la fuente de luz natural, el Sol. También se recogen lo aspecto básicos que conlleva el proceso químico de la fotosíntesis.

Con toda la información recogida anteriormente, se propone una fuente de luz LED energéticamente eficiente y sustentable en la producción de invernaderos o laboratorios, demostrando que la eficiencia energética, la potencia y la distribución apropiada del flujo radiante que emiten es la más próxima a la que los cultivos requieren.

Finalmente, se ha querido dar un enfoque más experimental incluyendo un estudio teórico de cómo distribuir, a lo largo de un pequeño local, el diseño de una lámpara LED constituida a partir de placas tipo LED COB. Para ello, se plantea iluminar una sala de 12 metros cuadrados, diseñando antes una luminaria LED de 200 W compuesta de 4 LED COB de 50 W full-spectrum. Posteriormente, se hacen los cálculos para averiguar que distancia debe de haber entre las lámparas y las plantas, el flujo luminoso total que necesita la sala, el número de luminarias que debemos colocar y su distribución en la misma. Como resultado obtenemos, un flujo luminoso de 79787,23 lúmenes a una distancia de nuestras plantas entre 0,9- 1 metros cuadrados y el número de luminarias totales 6.

Con el fin de completar el trabajo, a continuación, se adjunta un anexo que muestra una comparativa entre las lámparas LED y las lámparas de vapor de sodio, utilizadas convencionalmente en invernaderos, resaltando las mejoras evidentes que nos ofrece una iluminación LED.

Capítulo 9. Anexos

9.1. Anexo I. Comparativa lámpara LED vs lámpara vapor de sodio (HPS)

Se considera interesante complementar este documento con una comparación rápida entre las lámparas LED, con las que se ha trabajado, y las lámparas de vapor de sodio (HPS) convencionales, comentando sus principales diferencias.

Una lámpara de vapor de sodio alcanza altas temperaturas. El LED, sin embargo, mantiene una temperatura estable y acorde para la planta, por lo que con las HPS tendríamos que hacer grandes inversiones en refrigeración, lo que conlleva un mayor consumo de energía y, por lo tanto, un mayor gasto económico por parte del cultivador.

La principal diferencia es el consumo, por ejemplo, una lámpara de vapor de sodio de 200 w frente a un LED de 200 w consume lo mismo pero el LED produce más lúmenes y tiene mucho más rendimiento.

Otra diferencia clara es la fragilidad de una lámpara HPS, si se golpean podrían romperse ya que son de vidrio. Sin embargo, los LED COB pueden golpearse y no sucede nada.

Si utilizamos luminarias HPS para alumbrar nuestro cultivo necesitamos un foco para crecimiento y otro distinto para floración. En cambio, en una instalación LED con una sola lámpara para todas las etapas alcanza. El color que tiene cada pastilla de LED es full-spectrum (el espectro completo), lo que quiere decir que está seleccionado para operar exclusivamente en la frecuencia y la banda de color que la planta necesita, desde un rojo a un azul, descartando los colores verdes que la planta no usa.

Otra de las diferencias que podemos encontrar es el balastro, utilizado en las de sodio, que es un transformador que requiere conexiones complejas para usuarios con poco conocimiento en electricidad. La lámpara LED se conecta directamente a 220 v, no quiere ninguna conexión compleja.

La vida útil del sodio es de aproximadamente de un año, en cambio un LED puede durarnos tres años utilizándolo al máximo y después por un desgaste común de las potencias tendríamos que hacer un recambio que no supondría grandes inversiones.

Es por todas estas diferencias el cambio recomendable a las lámparas LED.

A continuación, mostramos una tabla (Tabla 7.1) comparativa con las diferencias más destacadas entre una lámpara de vapor de sodio y otra LED.

	LED COB GROW 200 W	Lámpara de vapor de sodio (HPS)
Lúmenes	24 000	16 000
Tiempo de vida	50 000 horas	20 000 horas
Mantenimiento	No requiere	Requiere cambio
Resistencia del material	Muy resistente	Sensibles a los golpes
Generación de calor	No genera calor	Genera mucho calor
Bajo consumo	Sí	No
Encendido instantáneo	Sí	No
Conexión	220 v directo	Requiere balastro

Tabla 7.1: Principales diferencias entre una lámpara LED y una HPS

Capítulo 9. Bibliografía

Libros:

[Niemz07] Niemz, Markolf H. (2007). Laser-Tissue Interactions Fundamentals and Applications. University of Heidelberg, Germany: Springer.

[Daukantas17] Daukantas, Patricia. (2017). Optics in Agriculture. Optics and photonics news.

[Waymant00] Waymant, Ronald W.; Ediger, Marwood N. (2000). Electro-Optics Handbook. New York.

[Vo-Dinh03] Vo-Dinh, Tuan. (2003). Biomedical Photonics. Tennessee.

[Fer10] Fernández, Benjamín Alonso. (2010). El láser, la luz de nuestro tiempo. Salamanca.

[Perez09] Pérez, Elena. (2009). Fotosíntesis. Universidad Complutense de Madrid.

[Hristov17] Hristov Mashkov, Petko. (2017). LED equipment fot light influence on photosynthesis investigations. Bulgaria.

[Wei17] Wei, He; Xiaoxiao, Wang. (2017). Effect Different Spectral LED on Photosynthesis and Distribution of Photosynthate of Cherry Tomato Seedlings. China.

Webs:

[Web0]<http://laplace.us.es/campos/optica/Optica%20-%20Tema%203%20-%20Fuentes%20de%20luz%20y%20emision%20laser%20-%202010-11.pdf>

[Web1]<https://es.solarlightsmanufacturer.com/comparacion-entre-la-luz-solar-led-y-la-luz-convencional/>

[Web2]http://www.canna.es/nuevos_sistemas_iluminaci%C3%B3n

[Web3]<https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2018/jan/solid-state-lighting-and-the-growth-of-leds-for-horticultural-applications>

[Web4]<https://blog.ledbox.es/ledbox-2/productos/cual-es-la-mejor-luz-artificial-para-plantas>

[Web5]http://oa.upm.es/7044/2/INVE_MEM_2010_76665.pdf

[Web6]<https://www.cree.com/led-components/applications/horticulture>

[Web7]<https://www.life.illinois.edu/govindjee/paper/gov.html>

[Web8]<https://www.tnuda.org.il/en/physics-radiation/infrared-visible-light-and-soft-ultraviolet-radiation-%E2%80%93-introduction/artificial>

[Web9]http://my.ilstu.edu/~gjin/p2/Lighting_P2_in_Energy/Lighting_P2_in_Energy7.html

[Web10]<https://www.e-education.psu.edu/egee102/node/2048>