

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y
COMPUTACIÓN**

**“SISTEMA DE ILUMINACIÓN LATERAL USANDO FIBRA
ÓPTICA DIFUSA PARA EL CRECIMIENTO DE LA
PLANTA SOLANUM TUBEROSUM L.”**

TESINA DE SEMINARIO

Previa a la obtención del título:

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

Presentado por:

HENRY XAVIER PONCE SOLÓRZANO

GLENN OSCAR VALDIVIESO ULLOA

GUAYAQUIL – ECUADOR

2010

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Germán Vargas
Profesor del Seminario, por su
invaluable ayuda y aceptación
de este trabajo.

DEDICATORIA

A Dios por haber sido mi guía,
a mis Padres y a mis Hermanos
Verónica, Xavier y Andrés por
el impulso y confianza que me
proporcionaron.

Henry

A Dios, mis padres, tíos y
hermanas que apoyaron e
impulsaron a seguir siempre
adelante.

Glenn

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

MSc. Germán Vargas López

PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

MSc. Sara Ríos Orellana

PROFESORA DELEGADA POR EL DECANO DE LA FACULTAD

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesina de Seminario de Graduación, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Henry Ponce Solórzano

Glenn Valdivieso Ulloa

Resumen

La iluminación ejerce una enorme influencia en nuestra percepción de un entorno, de manera que un sistema de iluminación bien diseñado contribuye a crear una sensación de calidad en cualquier espacio interior, pero para la creación de tal ambiente, es necesaria una buena combinación de factores técnicos y subjetivos, tales como la percepción y la valoración del espacio.

Por esta razón hemos decidido experimentar el comportamiento de un cultivo de papas usando la iluminación lateral, pero ya no aplicando el método tradicional de las lámparas fluorescentes. Se va a reemplazar a estas lámparas por la fibra óptica, con el fin de poder manipular la longitud de onda de la luz y usar los colores que más le favorecen a las plantas en general para su crecimiento.

Se sabe que existen otros sistemas para iluminar un cultivo, el más común es el de iluminación natural aunque éste es muy dependiente del clima y de la época del año. El otro método es el ya antes mencionado el cual es el sistema de iluminación basado en lámparas fluorescentes, en este método existen ya sistemas de alumbrado lateral, pero lo que se pretende lograr con este proyecto es llegar más allá de el hecho de iluminar bajo un cierto color de luz.

Con la fibra y su respectivo iluminador se va a tratar de controlar el color de la luz y su respectiva temperatura del color a más de que con la fibra óptica no existirá calor alguno que se genere por la radiación de la luz.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	X

CAPÍTULO 1

LA LUZ EN LAS PLANTAS.....	1
1.1 Crecimiento hacia la luz.....	2
1.2 Iluminación común y lateral.....	2
1.3 Factores lumínicos que afectan al crecimiento de las plantas.....	3
1.4 Intensidad de luz.....	4
1.5 Calidad de luz.....	4
1.6 Tiempo de exposición a la luz.....	7
1.7 La papa (<i>Solanum Tuberosum</i> L.).....	8
1.8 Condiciones ambientales requeridas por la papa.....	9

CAPÍTULO 2

LA FIBRA ÓPTICA DIFUSA.....	10
2.1 Lo que se transporta es luz.....	11
2.1.1 Fundamentos y leyes de la luminotecnia.....	11
2.2 Leyes Fundamentales.....	14
2.2.1 Ley de la inversa del cuadrado de la distancia.....	14
2.2.2 Ley del coseno.....	15
2.3 Fibras normales, difusas y “cintas” de fibras ópticas difusas.....	16
2.4 Reflexión total interna.....	17
2.5 El principio de la fibra difusa.....	18
2.6 Fibra óptica de vidrio o de plástico.....	19
2.7 La fibra óptica de plástico (FOP).....	20
2.8 La longitud de la fibra.....	21
2.9 Limitaciones de la fibra.....	22
2.10 Los rayos de luz dentro de la fibra difusa.....	24
2.10.1 Flujo incoherente de luz.....	24
2.10.2 Trayectoria de rayos.....	26
2.11 Forma transversal de la fibra.....	28
2.12 Modelos matemáticos para la fibra difusa.....	28

CAPÍTULO 3

TIPOS DE FUENTES DE LUZ..... 36

3.1 Fuente de luz natural y artificial.....	37
3.2 Sistemas híbridos de iluminación.....	38
3.3 Luminancia vs. Iluminancia.....	40
3.4 Fuentes de luz artificial.....	41
3.5 Componentes de las fuentes de luz artificial.....	42
3.6 Comparaciones de diferentes tipos de lámparas.....	44
3.7 Distribución espectral de cada lámpara.....	46
3.8 Fuentes de fibra óptica de emisión lateral en el mercado.....	48

CAPÍTULO 4

EL SISTEMA DE ILUMINACIÓN LATERAL USANDO

FIBRA ÓPTICA DIFUSA (SILFOD)..... 50

4.1 El sistema SILFOD.....	51
4.1.1 Diagrama de Bloques del Sistema SILFOD.....	51
4.2 El escenario.....	53

4.3	La fibra óptica difusa.....	54
4.4	El iluminador.....	55
4.5	Cubículos extraíbles.....	57
4.6	Repisa cámara de crecimiento.....	57
4.7	Instructivo de instalación de la cámara de crecimiento.....	59
4.8	Análisis de costos.....	62
4.9	Mantenimiento del Sistema.....	66

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	La planta sigue a la luz.....	2
Figura 1.2	Iluminación desde arriba y lateral.....	2
Figura 1.3	Eficiencia relativa de varios colores de la luz en la fotosíntesis.....	5
Figura 1.4	Estructura de la Solanum Tuberosum L.....	8
Figura 2.1	Distribución del flujo luminoso sobre distintas superficies.....	15
Figura 2.2	Fibra óptica normal y difusa.....	17
Figura 2.3	Configuraciones comunes para iluminar con fibra.....	18
Figura 2.4	Atenuación de las FOP a diferentes longitudes de onda.....	21
Figura 2.5	Esquema de los problemas de doblaje de la FOP.....	23
Figura 2.6	Tendencia del coeficiente de transmisión en doblaje.....	24
Figura 2.7	Incidencia de rayos en el cono de aceptación de la fibra.....	25
Figura 2.8	Trayectoria de rayos secuencial y no secuencial.....	27
Figura 2.9	Aproximación lineal de la constante de iluminación.....	29
Figura 2.10	Diferentes modelos con una y dos fuentes en los extremos.....	32
Figura 2.11	Distribución de la intensidad de luz a lo largo de la fibra.....	33
Figura 2.12	Forma de cómo se mide la intensidad de brillo.....	33
Figura 2.13	Modelo de espejo reflectante al final de la fibra.....	34
Figura 2.14	Distribución de la intensidad de luz con espejo final.....	35
Figura 3.1	Antena parabólica concentradora de rayos solares.....	38
Figura 3.2	Componentes de la fuente de luz para fibra óptica.....	42

Figura 3.3	Presencia de pérdidas en mecanismo de concentración y filtro.....	43
Figura 3.4	Potencia lumínica de diferentes lámparas de fuentes de luz.....	45
Figura 3.5	Distribución espectral de diferentes tipos de lámparas.....	47
Figura 3.6	El Iluminador Halógeno H-100 de Optic Fibre Lighting.....	48
Figura 3.7	El Iluminador Halógeno al aire libre: Kinetic.....	49
Figura 3.8	El Iluminador Fled 2111 de Optic Fiber Lighting.....	49
Figura 4.1	Diagrama de bloques del sistema SILFOD.....	51
Figura 4.2	Previsualización del escenario.....	52
Figura 4.3	Otra perspectiva del escenario.....	52
Figura 4.4	Dimensiones ideales para los cubículos extraíbles.....	56
Figura 4.5	El iluminador con la fibra óptica común y difusa.....	58
Figura 4.6	Representación esqueleto de la cámara de crecimiento.....	59
Figura 4.7	Relación de número de plantas con el número de pisos.....	60
Figura 4.8	Ilustración del área con diferente perspectiva.....	61
Figura 4.9	La fuente DEL-250-8.....	63
Figura 4.10	Tipos de acople entre dos fibras.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I	Plantas que necesitan mucha, media y poca luz a una temperatura mínima de 18°C.....	6
Tabla II	Tipos de luz artificial y sus efectos en las plantas.....	8
Tabla III	Razón de transmisión para diferentes ángulos de doblaje de la fibra óptica de plástico.....	25
Tabla IV	Principales características de las fuentes de luz artificial.....	43
Tabla V	Diferentes tipos de lámpara.....	45
Tabla VI	Costo de los equipos y materiales del sistema.....	67
Tabla VII	Carga mensual y anual de energía eléctrica para la cámara de crecimiento.....	68

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, sabemos que la fibra óptica juega un papel importante en el campo de las telecomunicaciones a larga distancia, sin embargo, ésta no sólo es ventajosa en este campo, sino también nos puede ser útil para aplicaciones de sistemas de iluminación.

El presente trabajo plantea el diseño técnico de un sistema de iluminación distribuida en un cultivo de papas a base de fibras ópticas difusas y sus respectivos problemas tanto de diseño como de implementación, con la finalidad de dar a este cultivo una mejor luminosidad, la cual apunta a mejorar la calidad de desarrollo de esta especie y aumentar la producción en espacios reducidos.

Hoy en día la mayoría de los cultivos son iluminados con lámparas fluorescentes, y muchos de éstos son iluminados desde arriba. Pero existen estudios (12) en los que se demuestran mejores resultados si la iluminación es lateral o de costado en lo que respecta al desarrollo de las hojas inferiores y al crecimiento del tallo. Además, al utilizar a la fibra óptica como medio difusor de luz, se tendrá otra ventaja con respecto a los sistemas basados en luz fluorescente, como es la reducción del calor generado.

En el capítulo 1 se abarcarán los conceptos de la importancia de la luz en el desarrollo de las plantas en general y como éstas crecen en dirección a su fuente de luz, así

como también se hablará de los factores que pueden mejorar o empeorar el progreso de las mismas; también aquí se planteará la idea de la iluminación lateral como alternativa para darle a las plantas una mejor captación de luz. Al final particularizaremos en los requerimientos de la papa.

En el capítulo 2 hablaremos de nuestro medio difusor de luz que es la fibra óptica y sobre algunos conceptos importantes de la luminotecnia para poder entender más de las terminologías y unidades usadas en la misma; también se incluirá en este capítulo los tipos de fibras que existen, modelos matemáticos, los materiales con los que hoy en día son fabricadas y por ende decir qué material es el más adecuado en lo que a iluminación concierne.

El capítulo 3 contendrá los tipos de fuentes de luz que existen y sus características, así como también las distribuciones espectrales de las fuentes artificiales y sus comparaciones en eficiencia lumínica.

En el capítulo 4 se unirán todas las ideas planteadas en los capítulos anteriores y se hablará sobre el Sistema de Iluminación Lateral usando Fibras Ópticas Difusas, el escenario y sus características, tipo de iluminador y material del que debe estar hecha la cámara de crecimiento, y por último un instructivo de instalación del sistema con resultados hallados en base a los modelos matemáticos discutidos en el capítulo 3.

CAPÍTULO 1

1. La luz en las plantas

Las plantas y la luz están fuertemente relacionadas. Con la luz, las plantas, producen la fotosíntesis, una reacción físico-química muy importante para la producción de oxígeno, dióxido de carbono, frutos y hojas. En este capítulo abordaremos como la luz influye en la planta y daremos características de una planta seleccionada para el Sistema de Iluminación Lateral usando Fibra Óptica Difusa (SILFOD).

1.1 Crecimiento hacia la luz

Todas las plantas sin excepción, experimentan un comportamiento basado en la luz en el crecimiento de las mismas.



Figura 1.1: La planta sigue a la luz (1).

Como podemos ver en la figura 1.1 las plantas experimentan el fototropismo, que es el mecanismo de seguimiento y respuesta adaptativa de las plantas. Estas siguen la luz de una manera vertical, por ello, su crecimiento es hacia arriba (2).

1.2 Iluminación Común y Lateral

Iluminación Común es la que se da naturalmente y es la que más conocemos, pero existe otro método la cual hace que las plantas capten más cantidad de luz que es la iluminación lateral.

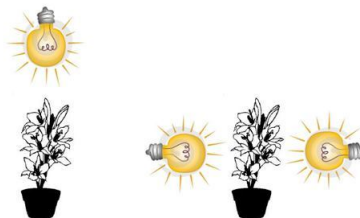


Figura 1.2: Iluminación desde arriba y lateral

La iluminación lateral tiene una ventaja muy importante en el ámbito de captación de energía en su área foliar¹. En la figura 1.2 vemos como la iluminación lateral hace que la luz llegue más hacia la planta.

1.3 Factores lumínicos que afectan al crecimiento de las plantas

Algunos de los factores que afectan al crecimiento de una planta son la intensidad, la calidad y el tiempo de exposición a la luz, ya que de ello depende su proceso de fotosíntesis. Pero no todas las plantas deben recibir la misma intensidad de luz, unas las requieren más que otras, y si no se contempla la importancia de la iluminación en las plantas es probable que el crecimiento de las mismas sufra o cese (3).

La intensidad de luz que recibe la planta, es muy importante para el desarrollo, floración y producción de frutos. Se sabe que las plantas necesitan al menos 200 lux de intensidad de luz para producir la fotosíntesis, que es lo que mantiene a la planta con vida (4). Se ha encontrado que la cantidad en lux de un día soleado es de 150000 lux, cantidad requerida por la planta para llegar a la etapa de floración.

¹ Área Foliar: se refiere a la cantidad de superficie de hoja que ella posee.

1.4 Intensidad de luz

Al hablar de intensidad, nos referimos a la luminosidad o el nivel de luz que demandan las plantas. Según la intensidad de luz que las plantas necesitan (5), podemos dividir las en:

Mucha luz	Luz media	Poca Luz
Tomatera	Papa	Calatea
Ananás o Piñas	Maranta	Cissus
Senecio	Crotón	Kentia

Tabla I: Plantas que necesitan mucha, media y poca luz a una temperatura mínima de 18°C.

En la tabla I podemos ver las diferentes plantas que están acostumbradas a diferentes proporciones de luz.

1.5 Calidad de la luz

La calidad de la luz no es más que referirse al color o longitud de onda que recibe la superficie de la planta. Es un factor a tener en cuenta en caso de que se quiera iluminar artificialmente una planta. Tanto el rojo como el azul causan un gran impacto en el crecimiento de las plantas, el azul es el responsable del crecimiento de las hojas mientras que, la luz roja ayuda a la floración de la planta (6). El color verde sólo hace que se refleje en las hojas para luego ser vistas de ese color.

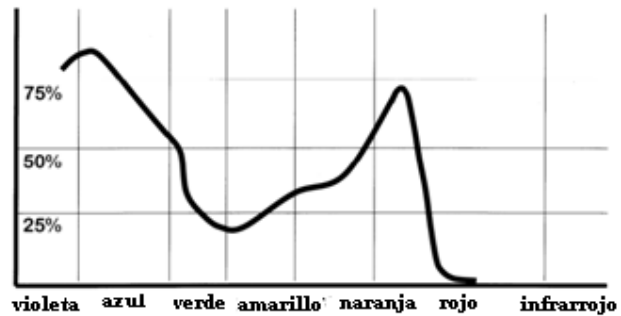


Figura 1.3: Eficiencia relativa de varios colores de la luz en la fotosíntesis (6)

En la figura 1.3 se puede observar que existe una gran eficiencia de los colores azul y rojo, mientras que el verde es el de menor eficiencia. También se puede notar que la luz infrarroja tiene una eficiencia nula, es decir que este tipo de luz daña a las plantas.

Se sabe que las lámparas fluorescentes están muy cerca del rango de la luz azul y se las considera una buena opción para el cultivo de plantas. Pero éstas al igual que las lámparas incandescentes producen calor, asunto que se puede controlar usando la fibra óptica.

Las luces artificiales pueden ser de numerosos tipos, cada uno de ellas produce diferentes efectos en el crecimiento de la planta, así como en el desarrollo de las hojas, las flores, los tallos o los rebotes, tal como puede apreciarse en el cuadro siguiente:

Tipo	Hojas	Tallos	Rebrotos	Floración
Lámparas fluorescentes frías: Ricas en azules y pobres en rojos Calientes: Ricas en rojos y pobres en azules	Paralelas debajo de la luz	Lento	Múltiples	Prolongada
Lámparas incandescentes Ricas en rojo e infrarrojos	Pálidas y más delgadas	Muy alargados	Inexistentes, solo crecimiento vertical	Muy rápida y corta
Lámparas de mercurio Ricas en azules y pobres en rojo	Pálidas y más delgadas	Muy alargados	Inexistentes, solo crecimiento vertical	Muy rápida y corta
Lámparas de alta presión de mercurio Halogenuros metálicos Ricas en azules y pobres en rojo	Crecimiento equilibrado de las hojas	Lento	Múltiples	Prolongada
Sodio de alta presión Ricas en infrarrojos	Más amplias que en las de mercurio	Lento con mucho grosor	Múltiples	Tardía, peciolo ² floral corto
Sodio de baja presión	Muy verdes, más gruesas y amplias en las demás iluminaciones	Muy lento	Exuberante	Normal, Peciolo corto

Tabla II. Tipos de luz artificial y sus efectos en las plantas (5)

² El **peciolo** o **pecíolo** es el rabillo que une la lámina de una hoja a su base foliar o al tallo.

1.6 Tiempo de Exposición a la luz

Se refiere a la cantidad de tiempo en el que la planta es expuesta a la luz para conseguir un crecimiento abundante. Unas plantas son más sensibles al fotoperiodo³ que otras. La respuesta de las plantas al fotoperiodo puede ser dividida en tres partes (6):

- Plantas de fotoperiodos cortos
- Plantas de fotoperiodos largos
- Plantas de fotoperiodos neutrales

Plantas de fotoperiodos cortos: tienen mejor crecimiento en días de corta duración. Por ejemplo los árboles de navidad.

Plantas de fotoperiodos largos: tienen mejor floración en días de larga duración. Por ejemplo la espinaca y la cebolla.

Plantas de fotoperiodos neutrales: dentro de este grupo están las fresas.

³ *Fotoperiodo:* El fotoperiodo es la relación entre horas de luz y de oscuridad que interviene durante la vida de la planta.

1.7 La papa (*Solanum Tuberosum* L.)

La papa es una planta que no presenta crecimiento vertical prolongado, por lo tanto es idónea para el sistema en lo que a tamaño se refiere. Esta planta presenta características que requieren fotoperiodos cortos y largos (7). Para el crecimiento de la planta, esta requiere un fotoperiodo largo de 15 a 16 horas. Para el crecimiento del tubérculo, éste requiere de un fotoperiodo corto, ya que la planta al detectar esto, entra en un estado de hibernación, y en la raíz se forma lo que es el depósito de carbohidratos, con esto, la generación del tubérculo, que es la papa en sí.

La raíz es una parte importante de la estructura de la papa, ya que ésta produce el tubérculo, por lo que requiere una profundidad considerable.



Figura 1.4: Estructura de la Solanum Tuberosum L. (8)

Como vemos en la figura 1.4, en la raíz es que está el producto más importante de la planta de la papa.

1.8 Condiciones ambientales requeridas por la papa

Los cultivos de papa se conservan bajo las siguientes condiciones (9):

- Temperatura: 18 – 22°C.
- Fotoperiodo largo: 16 horas/luz.
- Humedad Relativa: 60 – 70 %
- Intensidad Luminosa: 3000 lux

CAPÍTULO 2

2. La fibra óptica difusa

En este capítulo abordaremos ampliamente sobre las fibras ópticas, ya sea en este caso, las difusas, que son las que permiten que los haces de luz escapen hacia el exterior y también veremos de qué material pueden estar hechos. Se presentará una breve introducción acerca de las características de la luz, su longitud de onda, frecuencia e intensidad.

2.1 Lo que se transporta es luz

La luz es una onda electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano y que necesita un medio para su propagación.

La longitud de onda es la distancia recorrida por la onda en un periodo.

$$\lambda = v \cdot T \quad (2.1)$$

Donde λ es la longitud de onda, v la velocidad de propagación y T el periodo.

La frecuencia es el número de periodos que tienen lugar en cada unidad de tiempo.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2.2)$$

Tanto la longitud de onda como la frecuencia nos sirven para clasificar las ondas electromagnéticas.

Las lámparas emiten una mezcla de ondas de diferentes frecuencias.

Las lámparas incandescentes emiten según una distribución espectral continua. Los fabricantes suelen dar entre los 380nm y 780nm, rango que comprende la luz visible.

2.1.1 Fundamentos y Leyes de la Luminotecnia

En la técnica de la iluminación intervienen tres elementos básicos: la fuente de luz, transporte de la luz hacia el objetivo y el objeto a iluminar. Las magnitudes y unidades usadas para dar valor y

comparar las cualidades y los efectos de las fuentes de luz son las siguientes (3):

- Flujo Luminoso
- Eficiencia Luminosa
- Cantidad de Luz
- Intensidad Luminosa
- Iluminancia
- Luminancia
- Temperatura del Color

Flujo Luminoso o Potencia Luminosa: La energía transformada por fuentes luminosas no se puede aprovechar totalmente para la producción de la luz. Por ejemplo, una lámpara incandescente consume una determinada energía eléctrica que se transforma en energía radiante, de la cual solo una pequeña parte es percibida por el ojo en forma de luz, mientras que el resto se pierde en calor. A esta pequeña parte de energía radiante es lo que se llama Flujo Luminoso. Se representa por la letra ϕ y su unidad es el lumen lm (10).

Eficiencia Luminosa: Indica el flujo que emite la fuente por cada unidad de potencia eléctrica consumida para su obtención. Se

representa por la letra η o por la letra ε y su unidad es el lumen/vatio (lm/W).

$$\eta = \frac{\phi}{W} \quad (2.3)$$

Cantidad de Luz o Energía Luminosa: Es el flujo luminoso emitido en una unidad de tiempo. Se representa por la letra Q, siendo su unidad el lumen por hora (lm·h)

$$Q = lm \cdot h \quad (2.4)$$

Intensidad Luminosa: Es una característica fundamental de la fuente de luz, viene dada por el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido ω en una dirección especificada.

Su unidad es el candela (cd) donde $cd = lm/sr$ (*sr: estereorradián*) y su símbolo es la letra I.

Iluminancia: Es el flujo luminoso que incide sobre una superficie, dividido por el tamaño de dicha superficie (S). La iluminancia es la magnitud de valoración del nivel de iluminación de una superficie o de una zona espacial (11). Su unidad es el lux (lm/m²).

⁴ El **estereorradián (sr)** se define haciendo referencia a una esfera de radio r. Si el área de una porción de esta esfera es r², entonces un estereorradián es el ángulo sólido comprendido entre esta porción y el centro de la esfera.

$$E = \frac{\phi}{s} \quad (2.5)$$

Luminancia (Brillo): Es la relación entre la intensidad luminosa en dicha dirección y la superficie aparente⁵. Su unidad es la candela por metro cuadrado (cd/m²) y se representa por la letra L (10).

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha} \quad (2.6)$$

Siendo ($S \cdot \cos \alpha$) la superficie aparente.

Temperatura del color: Esta se define comparando su color negro dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro⁶ calentado a una temperatura determinada. Esta se expresa en Kelvin a pesar de no reflejar expresamente una medida de temperatura (10).

2.2 Leyes Fundamentales

Para el entendimiento de cómo la luz se comporta, con respecto a su distancia recorrida, es necesario cubrir la Ley de la inversa del cuadrado de la distancia y la ley del Coseno.

⁵ Superficie aparente: Superficie vista por el observador situado en la misma dirección.

⁶ Cuerpo negro: Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él.

2.2.1 Ley de la inversa del cuadrado de la distancia

La iluminancia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y la superficie normal al vector distancia. Esta ley se cumple cuando se trata de una fuente puntual de superficies perpendiculares a la dirección del flujo luminoso y cuando la distancia es grande en relación al tamaño del foco (10).

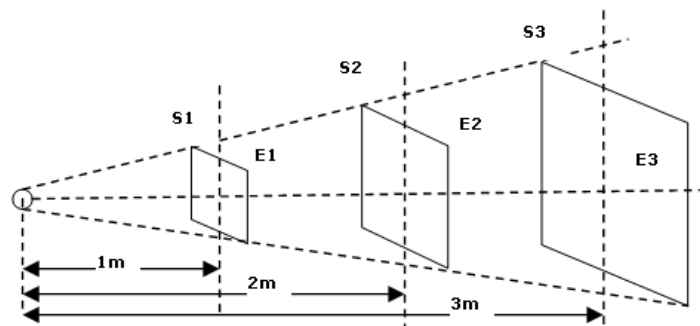


Figura 2.1. Distribución del Flujo Luminoso sobre distintas superficies (10)

2.2.2 Ley del coseno

En el caso anterior la superficie estaba situada perpendicularmente a los rayos luminosos, pero cuando esto no se da, es decir que existe un cierto ángulo de inclinación, entonces a la ley del inverso de la distancia al cuadrado hay que multiplicarla por el coseno del ángulo de inclinación formado.

Esto constituye la ley del coseno de iluminación, la cual se enuncia de la siguiente manera:

“La iluminancia en un punto cualquiera de una superficie es proporcional al coseno del ángulo de incidencia de los rayos luminosos en el punto iluminado” según Czajkowski (10).

2.3 Fibras normales, difusas y “cintas” de fibras ópticas difusas

Fibras ópticas normales: es una guía de onda óptica hecha a base de un material dieléctrico, como plástico o vidrio. Consiste en un núcleo y en una envoltura, donde el índice de refracción del núcleo debe de ser mayor que el de la envoltura. De esta forma, la onda se propagará dentro de la fibra siguiendo el concepto de la reflexión total interna o TIR (12).

Fibras ópticas difusas: normalmente es usada como una fuente de luz de línea fina, para esto se usa la fibra normal, pero aquí la envoltura es rasgada químicamente a cierto ángulo, para que así los fotones puedan salir gradualmente a lo largo de la fibra. Es así como se produce la emisión lateral de luz (12).

Cintas de fibras ópticas difusas: es básicamente una cinta plana compuesta de 90 fibras ópticas difusas juntas y fijadas con el fin de crear una especie de “cinta” de luz. Cuando la luz emitida por las lámparas se envía a través de los dos extremos de la cinta, este conjunto de fibras actúan como una fuente de luz (12).

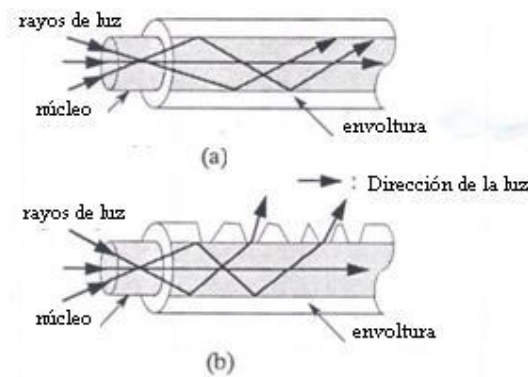


Figura 2.2(a) Ejemplo de fibra óptica normal. (b) Ejemplo de fibra óptica difusa (12)

2.4 Reflexión total interna

Se denomina reflexión total interna (TIR por sus siglas en inglés) al fenómeno que se produce cuando un rayo de luz, atravesando un medio de índice de refracción n más grande que el índice de refracción⁷ en el que este se encuentra, se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente (13).

⁷ Índice de Refracción: el índice de refracción de un medio homogéneo es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio.

2.5 El principio de la fibra difusa

El principio de la fibra difusa consiste en transformar una fuente de luz casi puntual en una fuente de luz extendida a lo largo de la fibra. Esta luz puede ser natural o artificial. Como podemos observar en la Figura. 2.2b, la fibra tiene rasgaduras con el fin de dejar escapar la luz. El tamaño y forma de la fibra, así como la distribución de las rasgaduras, se eligen teniendo en cuenta el control de la distribución de la iluminación (14).

Al hablar del control de distribución de la iluminación, nos referimos al objeto a ser iluminado que, en nuestro caso, es un cultivo de papas.

Existen tres formas comunes de distribuir la luz en la fibra difusa las cuales son: lineal, circular y en un plano. Esta última es usada para iluminar las pantallas de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) (14).

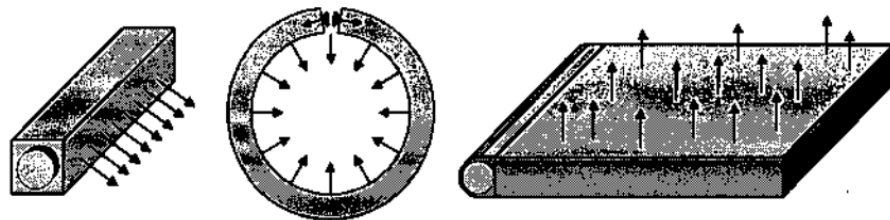


Figura 2.3. Configuraciones comunes para iluminar con fibra.
(a) Lineal (b) Circular (c) Plano (14)

En nuestro caso optamos por usar la configuración lineal para distribuir la luz de forma lateral dentro del cultivo *In Vitro* de la papa.

2.6 Fibra óptica de vidrio o de plástico

Para que exista un buen transporte de luz, es necesario que la guía de onda óptica sea totalmente transparente. Existen dos tipos de materiales en que se puede aplicar un fiel transporte de luz: el vidrio y el plástico. En el mundo de las telecomunicaciones se usa más fibra óptica de vidrio, ya que este posee una baja atenuación con respecto al plástico. La fibra óptica de plástico tiene aplicaciones en (15):

- Equipos ópticos de tamaño pequeño
- Iluminación
- Automóviles
- Sistema de música
- Entre otros sistemas electrónicos.

Lo que impulsa el uso de la fibra óptica de plástico, es debido a dos razones de peso:

1. La alta atenuación relativa al vidrio, la cual no sería un problema serio para conexiones cortas e iluminación.
2. La ventaja del costo y fabricación.

2.7 La fibra óptica de plástico

Como se ha dicho anteriormente, una de las principales ventajas que tiene la fibra óptica de plástico (FOP) es su precio. Las FOP por lo general están fabricadas por polimetilmetacrilato, más conocido como PMMA.

Las características importantes de este plástico para la aplicación en este proyecto son (16):

- Transparencia de alrededor del 93%.
- Irrompible. Alta resistencia al impacto, 10 o 20 veces más que la del vidrio.
- Insoluble en el agua.
- Resistente a la intemperie y a los rayos ultravioletas. No hay envejecimiento apreciable en 10 años de exposición exterior.
- Funciona con temperaturas que van desde -40 a los 85°C.

Como la fibra óptica de vidrio, la FOP tiene tres ventanas de transmisión correspondientes a los mínimos de atenuación: 525 nm (luz verde), 575 nm (luz ámbar), 650 nm (luz roja).

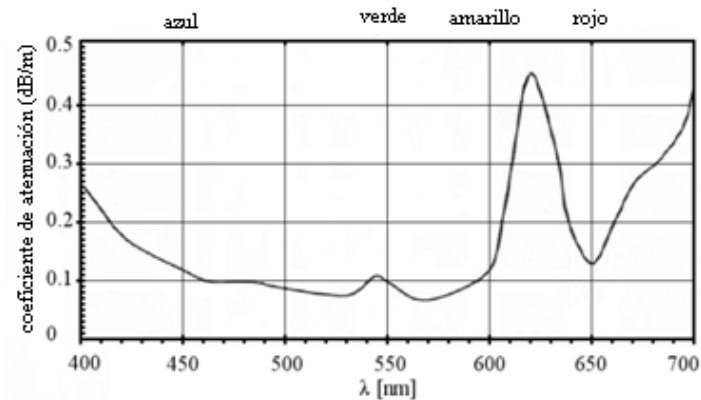


Figura 2.4. Atenuación de las FOP a diferentes longitudes de onda (17).

En la figura 2.4 se ilustra como ciertas longitudes de onda del espectro de luz visible, se atenúan con respecto a las otras. Vemos que la luz comprendida entre amarillo y rojo, tiene un alto nivel de atenuación, mientras que el azul y el verde poseen la mínima atenuación.

Otra ventaja de la FOP es la elevada atenuación de la radiación infrarroja, por tanto es la solución ideal para generar y transportar luz fría, o bien cuando se requiere una fuente de elevada luminosidad y que no genere calor.

2.8 La longitud de la fibra

Uno de los puntos importantes, en cuanto a diseño se refiere, es que se tiene que conocer el coeficiente de atenuación de la fibra difusa. Con ello, podemos hallar el coeficiente de transmisión de la fibra (18):

$$T = 10^{-(\alpha d)/10} \quad (2.7)$$

α : Coeficiente de transmisión de la fibra óptica en db/m

d: Distancia de la fibra expresada en metros.

El coeficiente de atenuación de las FOP puede variar alrededor de 0.25 dB/m (18).

2.9 Limitaciones de la fibra

Uno de los problemas que enfrenta en la instalación de la fibra óptica, es el doblado de la misma. Esto puede alterar ligeramente el ángulo de incidencia, y puede llegar al punto de que los rayos que están dentro del núcleo se escapan, perdiendo así la condición de reflexión total interna.

Para demostrar las pérdidas que inciden en el doblaje de la fibra, mostraremos el siguiente resultado experimental con una fibra de plástico de 1.78 cm de diámetro y 23 metros de longitud, realizados por los Drs. Grisé y Patrick (18).

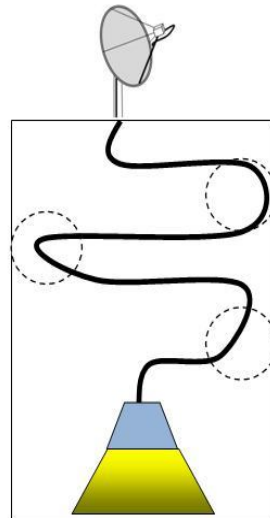


Figura 2.5: Esquema de los problemas de doblaje de la FOP.

En este experimento se realizaron pruebas con diferentes ángulos de incidencia y usando una fuente de halogenuro metálico (19):

Ángulo de doblaje	Intensidad de incidencia (LUX)	Intensidad transmitida (LUX)	Coefficiente de transmisión
0°	15500	3350	0.21
30°	18000	4200	0.23
45°	18400	4570	0.25
60°	17250	4350	0.25
90°	16000	4110	0.26
135°	16100	3400	0.21
150°	16250	3300	0.20
180°	16100	3600	0.22

Tabla III: Razón de transmisión para diferentes ángulos de doblaje de la fibra óptica de plástico.

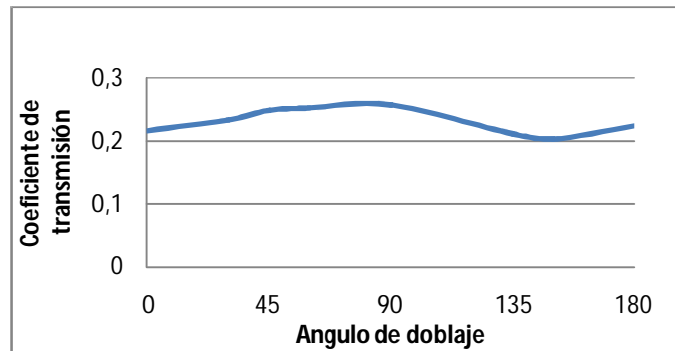


Figura 2.6: Gráfica correspondiente a la tabla III.

Como podemos ver en la figura 2.6, el coeficiente de transmisión varía entre el 20 y el 26%, lo que quiere decir que no existe mucha variación en la pérdida de la transmisión de luz a medida en que se modifica el ángulo de doblaje.

2.10 Los rayos de luz dentro de la fibra óptica difusa

En las fibras ópticas difusas, es importante ver cuánta luz se propaga en el interior de la misma y en qué dirección viaja.

2.10.1 Flujo incoherente de luz

Por lo general, las fuentes de luz son incoherentes y tienen una superficie extendida de emisión de luz. Esto quiere decir que los rayos producidos por una fuente de luz, no son perfectamente perpendiculares a la superficie del “foco”; estos se escapan a diferentes direcciones, y eso se lo corrige por medio del uso de

espejos o lentes que ayuden a que los rayos converjan o sigan un patrón centralista para así acoplarlos a la fibra difusa.

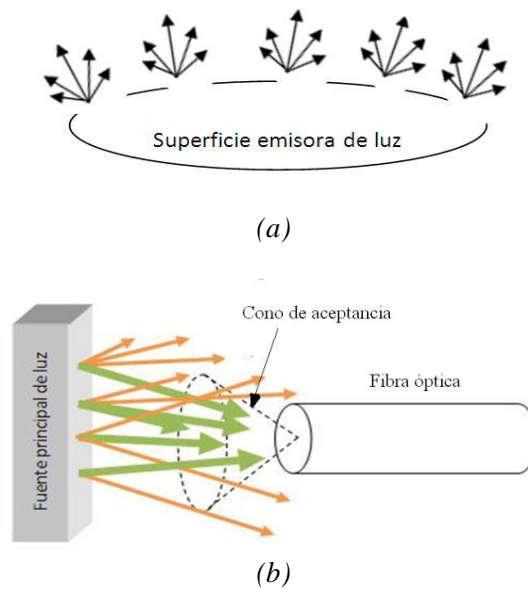


Figura 2.7: (a) Rayos de luz emitidos por una superficie. (b) Representación de cómo los rayos de luz inciden sobre el cono de aceptación de la fibra óptica.

La propagación y desviación de luz esta descrita por las leyes de geometría óptica ya sean reflexión, refracción y difracción. Las propiedades físicas como índice de refracción, composición atómica, hacen de que se cumplan las leyes antes mencionadas, para dar así cambios en la trayectoria de los rayos de luz.

El efecto scattering es de vital importancia para el diseño de terminales (foco) de luz para así tener una amplia y equilibrada emisión de luz hacia el objetivo.

2.10.2 Trayectoria de rayos

El modelo de rayos se viene estudiando siglos atrás para conocer mejor cómo se comporta el haz de luz en un medio. Gracias a las leyes de la física, se puede predecir la dirección de la luz cuando pasa de un medio a otro, y eso es medible sabiendo el índice de refracción del material a la cual incide la luz. Otra de las características es su composición atómica, que permite el paso o no del rayo de luz a lo largo de la fibra dependiendo de su naturaleza.

Una guía de onda en general, tiene que tener características importantes acerca de su aspecto funcional, esto es cuánta luz se transporta en el interior de la misma y en qué dirección esta se propaga.

Las trayectorias de rayos son importantes para conocer los haces de luz que se producirán si estos pasan de un medio a otro. Si decimos que un rayo incide sobre un material con diferente índice de refracción, y este se transmite completamente, se llamará trayectoria de rayo secuencial (14).

En el caso que éste se transmitiera y genere un tercer rayo, se llamará trayectoria de rayo no secuencial.

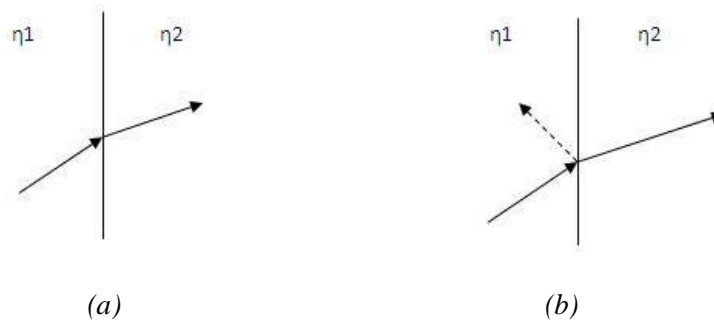


Figura 2.8: (a) Trayectoria de rayo secuencial (b) Trayectoria de rayo no secuencial

El ámbito de trayectoria de rayos secuenciales, se lo aplica más para sistemas de imágenes, ya que estos requieren un perfecto acople de la luz incidente. En cambio en el ámbito de trayectoria no secuencial, éste es empleado en los terminales de luz, que permite que algo se quede en el difusor de luz y parte sea para la iluminación del objetivo.

Al referirnos a la fibra óptica difusa, ésta tiene que cumplir la condición de reflexión total interna, produciéndose que todos los rayos se mantengan en el interior de la fibra, pero esto es algo que físicamente no es apegado a la realidad. Parte de los rayos son absorbidos por el cladding de la fibra, aumentando así su

percepción de atenuación. No existe una fibra que transmita el 100% de la potencia incidida.

2.11 Forma transversal de la fibra

La fibra como la conocemos, se presenta en una forma circular; este tipo de fibra es más factible en su producción y recubrimiento. Pero para un uso en particular, ésta puede ser de otra forma. Esto ayuda a modificar la dirección de propagación de los rayos de luz. Dependiendo de su sección transversal, esta fibra puede tener mayor o menor ángulo espectral de iluminación.

2.12 Modelos matemáticos para la fibra difusa

Es importante entender como matemáticamente se comporta la luz dentro de la fibra óptica difusa. Es necesario tener una estrecha relación acerca de las asunciones matemáticas que se imparten a este proyecto, con los resultados empíricos que se puedan dar en el caso de experimentos.

Para este modelo matemático, se va a particionar la fibra en segmentos cortos de longitud d . La intensidad de la radiación transmitida en el core (núcleo) para cada segmento, puede ser expresado como (19):

$$I_{TX} = I_0 \cdot e^{-kx} \quad (2.8)$$

Siendo:

k : Coeficiente de eficiencia de dispersión lateral

I_0 : Intensidad de la radiación en la entrada

El valor de k nos indica prácticamente cómo se comporta la curva intensidad brillo lateral vs. longitud recorrida de la fibra. Este valor tiene que ser lo más pequeño posible para tener así, menos variación de la intensidad lumínica lateral con respecto a la distancia recorrida desde la fuente.

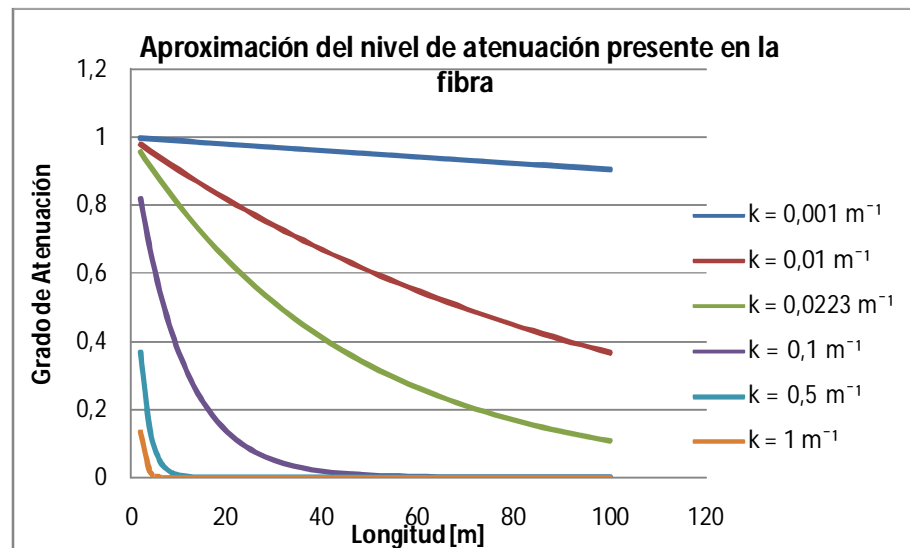


Figura 2.9: Como interfiere el valor de k en el grado de intensidad lumínica por cada metro recorrido en la fibra

La intensidad emitida de brillo lateral está dada por la fórmula:

$$I_s = \frac{I_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot d})}{4\pi} \quad (2.9)$$

Con (2.9), la intensidad de iluminación lateral con respecto a la longitud de la fibra después de conversiones puede ser expresada como:

$$I_s = A e^{-k \cdot x} \quad (2.10)$$

Donde la constante A, si se tiene una unidad de fibra de longitud $d = 1$, es:

$$A = \frac{I_0 \cdot (e^{-k'} - 1)}{4\pi} \quad (2.11)$$

Donde k' es la eficiencia de dispersión lateral por unidad de longitud ($d = 1$).

Podemos concluir que ambas ecuaciones (2.8) y (2.10) decaen exponencialmente para el caso de intensidad transmitida por el núcleo (2.8) e intensidad de brillo lateral.

Sin embargo esto es un problema para asuntos prácticos, porque queremos que la fibra óptica transmita casi toda la luz hacia al objetivo. Es por eso que se necesita que haya uniformidad lumínica en todo el trayecto de la fibra. Para lograr esto, nos vamos a basar en un

ejemplo que nos indica cómo se interactúa con las diferentes variables antes mencionadas.

Vamos a crear un escenario en la cual se necesita que 10 metros de fibra mantenga uniformidad a lo largo de ella. Para ello vamos a encontrar un valor de k acorde a las características expuestas en el problema. Se tiene una reducción del 20% de la intensidad inicial en la entrada (20). Usaremos (2.8) para este análisis:

$$I_{TX} = I_0 \cdot e^{-kd} \quad I_{TX} = 0.8 \cdot I_0$$

$$k = 0.0223 \text{ m}^{-1}$$

Existe otra aproximación de diseño pero conectando los extremos de la fibra óptica con fuentes de luz, como se puede apreciar en la figura 2.10a, aunque suene técnicamente difícil. Pero este modelo ofrece más uniformidad lumínica a lo largo de la fibra difusa y más brillo lateral si lo comparamos con el modelo anterior.

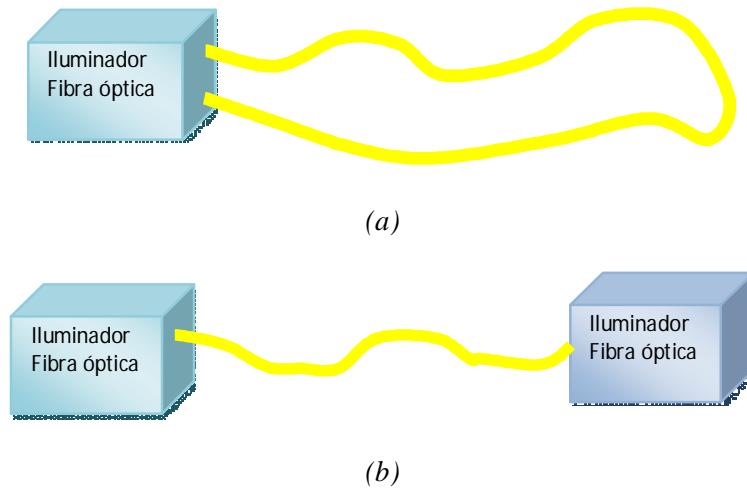


Figura 2.10: Gráficos representativos del segundo modelo con (a) una sola fuente de luz y (b) dos fuentes de luz unidas con la fibra óptica difusa.

La aproximación que se hará en este modelo con alimentación de fuentes de luz en cada extremo de la fibra, es la siguiente (19):

$$I_{s2}(x) = A\{e^{-k \cdot x} + e^{-k(L-x)}\} \quad (2.12)$$

Donde A esta dado por (2.11). $I_{s2}(x)$ es una función dependiente de la posición en que nos ubiquemos. Usando este modelo en un segmento de fibra de 100 metros de longitud con un valor k supuesto de 0.01 m^{-1} es presentado en la siguiente figura:

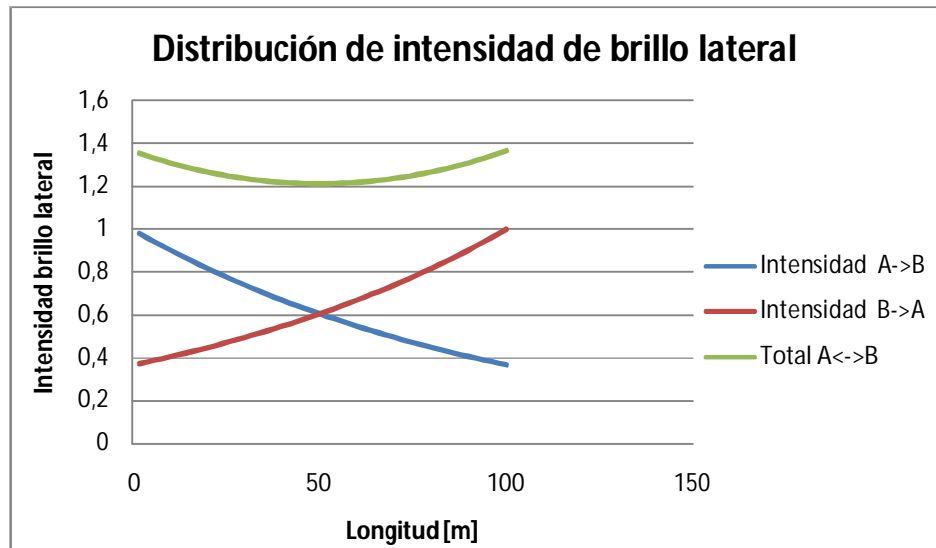


Figura. 2.11: Gráfico de la distribución intensidad de luz a lo largo de la fibra difusa



Figura 2.12: Forma de cómo se mide la intensidad de brillo lateral

Otro modelo a seguir para el estudio de la atenuación presentada en la fibra difusa es el de adicionar un espejo al final de la fibra (ver figura 2.13) para así reflejar los “últimos” rayos de vuelta y así evitar el uso de otra fuente. Es necesario un espejo que tenga una reflectividad del 100% para evitar pérdidas (19).

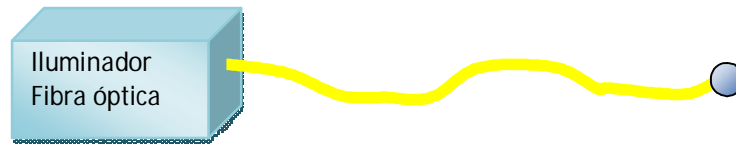


Figura 2.13. Espejo al final de la fibra para reflejar últimos rayos hacia la fuente

Una aproximación matemática para este modelo de trayectoria de rayos es:

$$I_{sr}(x) = A\{e^{-k \cdot x} + R \cdot e^{-k(2L-x)}\} \quad (2.13)$$

La variable R es la reflectividad del espejo que está ubicado al final de la fibra, L es la longitud de la fibra que nosotros conocemos. La intensidad de emisión lateral en cada punto ubicado a lo largo de la fibra puede ser calculada por medio de (2.13).

Un ejemplo para representar este modelo, es con una fibra de 50 m de longitud, con un espejo de 100% de reflectividad.

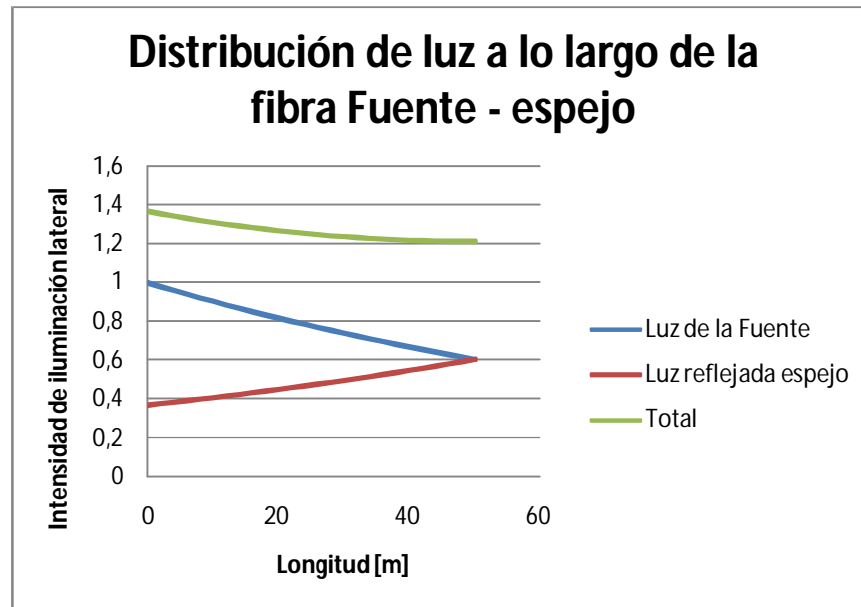


Figura 2.14: Gráfico de la distribución de luz a lo largo de la fibra con un espejo ubicado al otro extremo de la fibra

Como vemos en la figura 2.14, este modelo representa una sustancial mejora, comparado con el modelo de dos fuentes. Con ello, se pretende ahorrar un conjunto de iluminadores para su respectiva aplicación.

CAPÍTULO 3

3. Tipos de Fuentes de Luz

En el sistema de iluminación lateral usando fibra óptica difusa, es importante resaltar qué parámetros hacen que las plantas sean susceptibles a las fuentes de luz. Con ello se podrá ver la fuente de luz que hará más factible el crecimiento de la planta.

El sol actúa como una fuente de luz en las plantas que se encuentran naturalmente, y esto hace que dependan de ello. En este capítulo se va a tocar el tema de las fuentes de luz artificial y natural; y sus características de peso que hacen de que sean la mejor fuente para el Sistema de Iluminación lateral usando fibra óptica difusa (SILFOD).

En el capítulo 2, se ha abordado sobre el tema de la fibra difusa, que es la que permite el transporte de la luz hacia el objetivo. Pero para el caso de la generación de luz, es importante como se puede concatenar estas dos partes del sistema: la fuente de luz y la fibra óptica difusa.

3.1 Fuente de luz natural y artificial

Existen dos maneras de iluminar un ambiente: natural y artificialmente. Para el caso de luz natural, ésta tiene que ser generada por el sol y con ello, transportarla hacia el objetivo. Existe la manera de “guiar” la luz captada hacia el objetivo, por medio de un concentrador de luz, o físicamente una antena parabólica con superficie reflectante. Esta antena, hace que los rayos de luz se enfoquen o se concentren en un área determinada (foco), para así, transportarlo hacia la fibra.

Esta antena parabólica debe poseer las siguientes propiedades:

- Muy resistente a la intemperie, liviano y resistente al viento.
- Total impermeabilización, película anticorrosiva y con aislante térmico para días muy húmedos y soleados.
- Seguimiento electro–mecánico del sol de este a oeste.

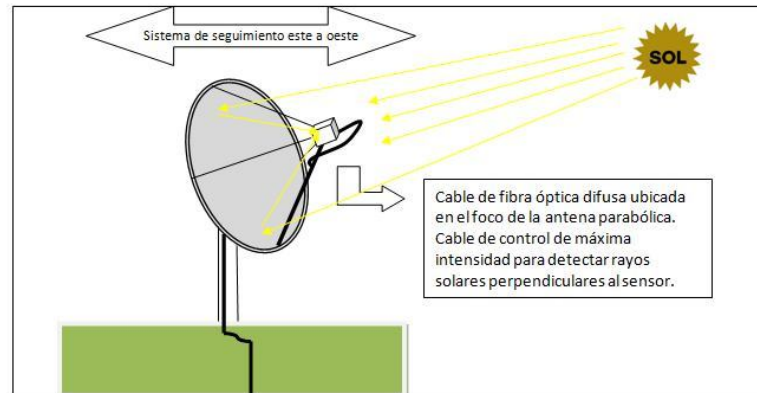


Figura 3.1: Antena parabólica concentradora de rayos solares

En la figura 3.1, se tiene una representación gráfica de cómo sería la antena captadora de luz. Dicha antena, debe tener un sistema electro-mecánico de máxima captación de luz solar, con ayuda de servomotores y sensores de máxima iluminancia que permitan ubicar la antena “mirando” al sol. En el foco, se encuentra posicionado un lente que permite que los rayos sean centralizados en un cono (cono de aceptación) que permite que los rayos inducidos a la fibra óptica, cumplan la condición de reflexión total interna. La fibra conectada a la antena, tiene que ser la fibra común, con un núcleo de un diámetro considerable, para después acoplarlo a la fibra difusa.

3.2 Sistemas híbridos de iluminación

Un sistema híbrido de iluminación (SHI), es aquel que proporciona luz usando dos tipos de energía; eléctrica y solar. Un sistema solamente eléctrico, tiene la desventaja de que usa energía eléctrica, por lo tanto,

se tiene que pagar el consumo demandado y depender de él totalmente para funcionar. En cambio un sistema de iluminación solar, posee la limitación de solo poseer 9 horas efectivas de luz, pero con la ventaja de ser un sistema que no requiere consumo eléctrico de ningún tipo. Una manera de tomar ventaja de los dos sistemas, es haciendo un sistema que trabaje con los dos tipos de iluminación; haciéndolo un sistema híbrido de iluminación (20).

Los componentes que debe tener un sistema híbrido de iluminación son:

1. Subsistema de captación de energía lumínica solar
2. Fuente de luz eléctrica
3. Control de iluminación
4. Difusor de luz.

El difusor de luz, es la fibra óptica difusa o de iluminación lateral que hace escapar la luz por medio de su superficie lateral.

El control de iluminación es el encargado de ver cuánta intensidad y calidad de luz se quiere para el objetivo. Al poseer dos tipos de iluminación, que son natural y artificial, este sistema necesita ser controlado de una manera tal que se reciba la cantidad necesaria de luz.

Una manera de hacerlo, es creando un control mecánico de luz, a través de la fibra óptica difusa que permita graduar la cantidad de luz que pasa por la misma y al final del trayecto, adicionar la fuente de luz artificial. Claro está que estos dos procedimientos de iluminación, no estarán todo el tiempo emitiendo luz, por lo tanto, tienen que ser controlados y limitados, para que el objetivo perciba una cantidad fija de luz.

3.3 Luminancia vs. Iluminancia

Una característica importante en un sistema de iluminación, es la intensidad lumínica que éste proveerá. Mientras que la iluminancia nos describe la potencia luminosa que incide en una superficie, vemos que la luminancia nos describe la luz que procede de esa misma superficie. A su vez dicha luz puede ser procedente de la superficie misma.

También vemos que la luminancia se encuentra definida como la relación entre la intensidad luminosa y la superficie proyectada sobre el plano perpendicularmente a la dirección de irradiación.

Pero es posible que la luz sea reflejada o transmitida por la superficie. En el caso de materiales que reflejan en forma dispersa (mateados) y que transmiten en forma dispersa (turbios), es posible averiguar la

luminancia a base de la iluminancia y el grado de reflexión (reflectancia) o transmisión (transmitancia).

La luminosidad está en relación con la luminancia; no obstante, la impresión verdadera de luminosidad está bajo la influencia del estado de adaptación del ojo, del contraste circundante y del contenido de información de la superficie a la vista.

3.4 Fuentes de luz artificial

Una de las partes importantes en un sistema de iluminación, es la fuente de luz, ya que ésta permite la producción de la misma y con la opción de poder personalizarla. Existen en el mercado diferentes opciones para la fuente deseada. Las características que sobresalen de cada uno son:

Físicas	Técnicas y Eléctricas	Lumínicas	Personalización
Tamaño	Consumo Eléctrico	Eficiencia Lumínica	Color Wheel
Peso	Interfaz con el usuario	Temperatura del Color	Dimming
Forma	Método de Operación	Tamaño de apertura para acoplamiento de la fibra	
Color	Temperaturas de Operación	Distribución espectral	
	Disipador de calor		
	Seguridad Eléctrica		

Tabla IV: Principales características de las fuentes de luz artificial

3.5 Componentes de las fuentes de luz artificial

Una fuente típica de luz está compuesta de las siguientes sub-partes

(15):

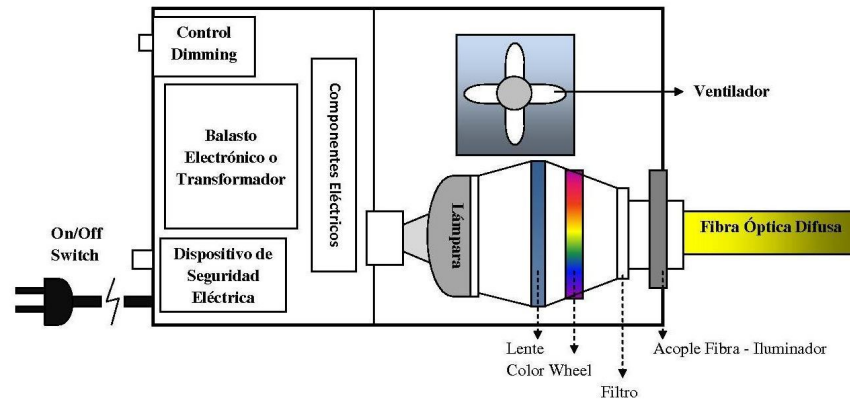


Figura 3.2. Componentes de una fuente de luz para un sistema de iluminación de fibra óptica

(15)

- Fuente de alimentación

Dependiendo de la potencia a consumir, este puede ser de 110V y 220V. Con respecto al tipo de foco, las fuentes de luz tienen incorporado un balasto. Este último permite que la lámpara se le extienda el tiempo de uso y ahorre energía.

- Tipos de Lámpara

Existen diferentes opciones en lo que iluminación respecta. Entre ellas son:

Lámparas incandescentes	Lámpara de descarga	Lámpara de inducción electromagnética	Lámpara de LED (<i>Light-Emitting Diode</i>)
Normal Halógena de Tungsteno	Sodio de Baja presión Sodio de Alta presión Mercurio de baja presión Mercurio de Alta presión Halogenuros metálicos		

Tabla V: Diferentes tipos de lámpara

Cada uno de los tipos antes mencionados, tienen sus características relevantes, ya sea su contenido espectral, eficiencia lumínica, potencia que consume, etc.

Lo más importante, en lo que economía respecta, es su eficiencia lumínica. El ser humano ha ido innovando sistemas de iluminación que permiten que la energía consumida por un iluminador, sea totalmente consumida en intensidad luminosa, y tratar de generar al mínimo energía calórica.

- Concentración de luz emitida por el foco

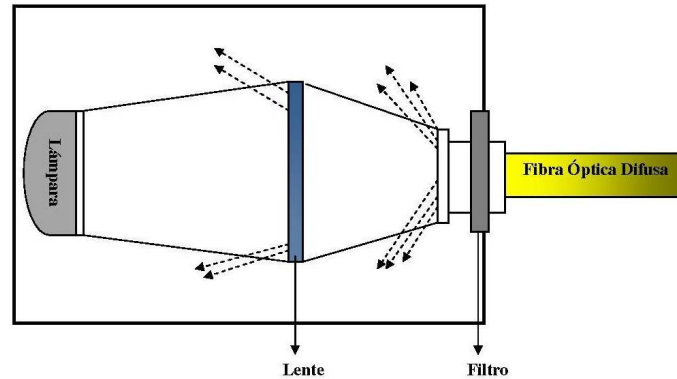


Figura 3.3. Presencia de pérdidas en mecanismos de concentración y alteración de la luz dentro del iluminador (15).

Dependiendo del tipo de lámpara, este necesita tener un concentrador de haces de luz, un conjunto de reflectores y espejos que permita guiar el 100% de la luz, en una dirección específica y así evitar pérdidas desde la fuente de luz. Pero en la vida real, las pérdidas no se las puede suprimir completamente, siempre en un sistema habrán pérdidas, por lo que deben ser mínimas en lo posible.

- Acoplador al cable de fibra óptica difusa

Esta parte es llamada “common end” o “port”. Este permite acoplar los rayos de luz, a la fibra óptica difusa o de iluminación lateral. Es importante saber qué apertura numérica y qué cono de aceptación posee la fibra, para así, no tener pérdidas en esta parte y tener un acople adecuado.

3.6 Comparación de diferentes tipos de lámparas

Los criterios de comparación de diferentes lámparas van a ser su potencia consumida y la cantidad de lúmenes que producen. Con ello, tienen una pendiente que es su eficiencia lumínica (Lumen por Vatios).

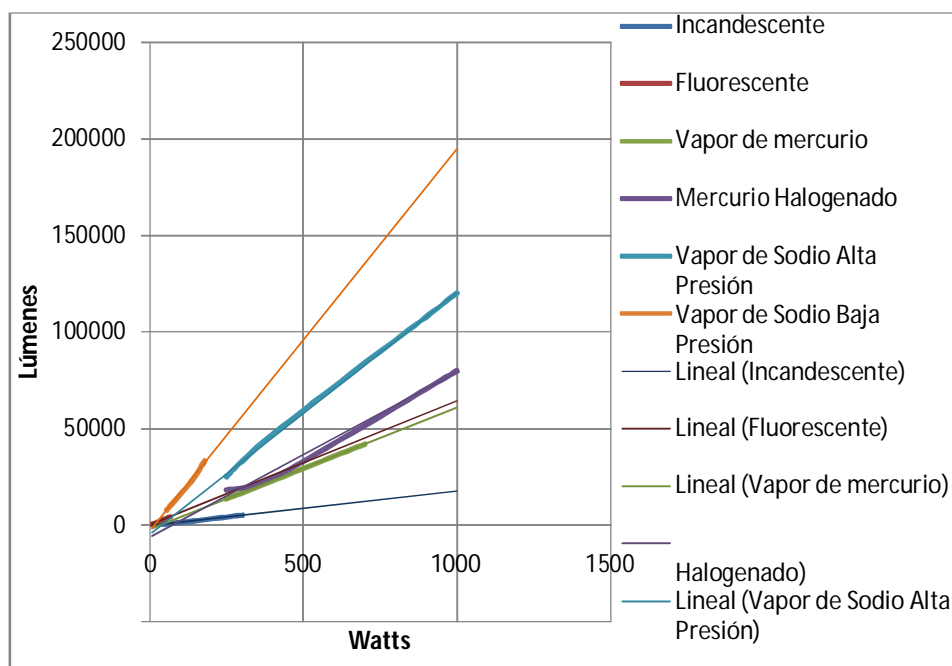


Figura 3.4. Potencia eléctrica consumida vs. los lúmenes producidos por la fuente.

En la figura 3.4, podemos ver una tendencia del rendimiento luminoso de cada tipo de lámpara. Como vemos, existen pocos datos para el caso de vapor de sodio, existiendo sólo 3 o 4 tipos de potencia eléctrica consumida en algunos de los casos. Por ello, se hizo una aproximación lineal, de su rendimiento luminoso, para un amplio dominio continuo en su potencia eléctrica consumida (Watts).

En la gráfica se puede sintetizar, que mientras la pendiente sea alta, mejor es la fuente, ya que tiene una amplia ventaja de que a pocos Watts de diferencia, se obtiene un amplio rango de Lúmenes producidos (mejor rendimiento luminoso). Las lámparas incandescentes tienen menos variación de lúmenes producidos mientras aumenta su valor de potencia eléctrica consumida.

3.7 Distribución espectral de cada lámpara

Cada tipo de lámpara posee ciertas longitudes de onda que predominan más que otras con respecto a su potencia (21). Esta característica es de suma importancia ya que la planta es susceptible a ciertas longitudes de onda.

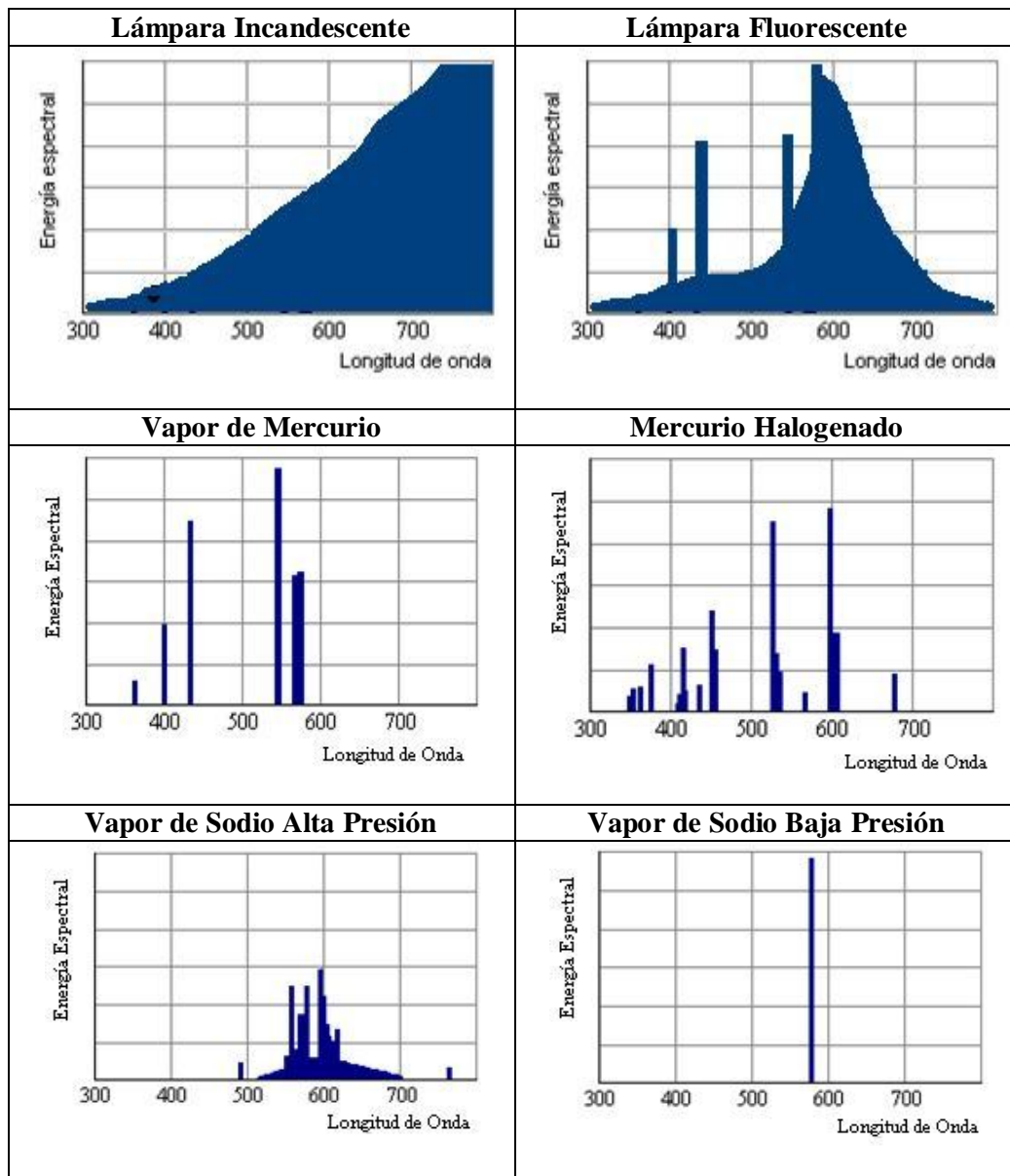


Figura 3.5. Distribución espectral de diferentes fuentes de luz artificial

Como vemos en la Figura 3.5, la lámpara de sodio de baja presión, posee una mayor energía espectral en una longitud de onda de 589 nm, es decir un color amarillo. Este tipo de lámparas es la que se usa ampliamente en la vía pública para iluminación.

Con la distribución espectral conocida de cada lámpara, podemos resaltar que longitud de onda sería favorable para cierta planta.

Tengamos en cuenta que los colores o energía espectral de cierta longitud de onda, son los responsables de las transiciones de ciertas plantas, que son etapa de floración, producción de hojas, flores y frutos.

3.8 Fuentes de fibra óptica de emisión lateral en el mercado

Presentaremos algunas opciones que existen en el mercado internacional en iluminadores de fibra óptica (22):



Figura 3.6: El Iluminador Halógeno “H-100” de Optic Fibre Lighting (22)

- H-100:
 - 130 W de consumo
 - Filtro UV e IR
 - Color Wheel
 - Osram 100W; Lámpara Halógena Foto-Óptica



Figura 3.7: El Iluminador Halógeno al aire libre “Kinetic” de Optic Fibre Lighting (22)

- Características del Kinetic:
 - 130 W de potencia eléctrica
 - Resistente al agua
 - Para uso exterior
 - Peso 2.5 Kg
 - Osram 100W; Lámpara Halógena Foto-Óptica



Figura 3.8: El Iluminador Fled 2111 de Optic Fiber Lighting (22)

- Fled 2111:
 - Voltaje de entrada: 12 V
 - Corriente de alimentación: 3.3A
 - Lámpara de LED
 - Capacidad máxima de fibra 14mm
 - 280g de peso

CAPÍTULO 4

4. Sistema de iluminación lateral usando Fibra Óptica Difusa.

En este capítulo explicaremos en qué consiste este sistema, de ahora en adelante llamado SILFOD. Este sistema está diseñado como una cámara de crecimiento para una especie que necesita una cantidad media de luz que es la *Solanum Tuberosum L*, más conocida como la papa. Este sistema es capaz de hacer crecer la planta de una manera que sea maximizada, transfiriéndole ciertos rangos de longitud de onda de luz, que permiten que esta sólo crezca.

4.1 El sistema SILFOD

El Sistema de Iluminación Lateral usando Fibra Óptica Difusa (SILFOD) está compuesto por los siguientes componentes:

- La Fibra óptica difusa
- El iluminador
- Cubículos extraíbles
- Repisa Cámara de Crecimiento

Estos componentes son fundamentales para el sistema antes escrito y se los abordará con detalle en subcapítulo 4.7.

4.1.1 Diagrama de bloques del sistema

El sistema se lo representara por medio de un diagrama de bloques, para poder así tener una previsualización del sistema.

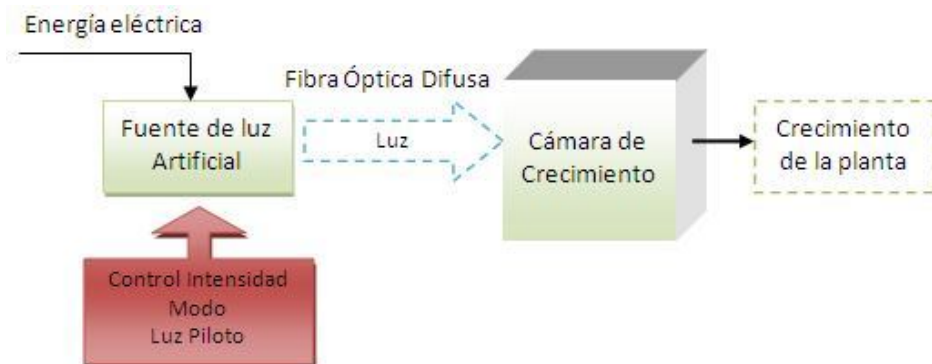


Figura 4.1: Diagrama de bloques del Sistema de Iluminación

En la figura 4.1, podemos ver cómo el sistema depende totalmente de la fuente de luz. Esta tiene que ser controlada de varias maneras como se ha dicho en un capítulo anterior, como su intensidad, modo de crecimiento/desarrollo y entre otras funciones.



Figura 4.2: Pre visualización del escenario



Figura 4.3: Otra perspectiva del escenario.

Como se puede observar en las figuras 4.2 y 4.3, el sistema propuesto está usando una fuente de luz artificial en donde la fibra es distribuida lateralmente a lo largo de los cubículos extraíbles con el objetivo de ahorrar espacio y de iluminar más a los cultivos, de manera que éstos crezcan de una mejor forma.

Las dimensiones de los cubículos es de 5.62 x 0.54 x 0.55 metros, mientras que las dimensiones de toda la vitrina es de 5.73 x 4.22 x 1.91 metros (largo, ancho y alto respectivamente) teniendo un área de alrededor de 24 m² .

Cabe resaltar que este sistema puede ser usado con fuente de luz artificial o natural, pero para usar la luz natural, es necesario que exista un colector solar con un sistema de seguimiento de luz, para así no desperdiciar la luz captada por el colector.

4.2 El escenario

El escenario que se desea plantear para el crecimiento controlado de la papa, es de un área de construcción de **130 m²** para permitir un mejor uso de los equipos. Las plantas se alojarán en cubículos transparentes para que la luz emitida por la fibra difusa, sea ampliamente captada. Estos cubículos tienen que tener orificios para permitir que la planta

haga su intercambio de gases para su correcta producción de fotosíntesis.

Los cubículos tendrán una dimensión de 5.62 x 0.54 x 0.55 metros para poder alojar a las plantas de papa. Lo importante de este sistema es que se aprovecha dos importantes beneficios de la iluminación lateral: más captación de luz a nivel de hojas y más cantidad de cosecha (varios pisos) con respecto a la siembra común (de un solo piso). En este sistema se planea un escenario de 3 pisos, pero con la opción de ser un sistema escalable.

4.3 La fibra óptica difusa

En el mercado existen diferentes tipos de fibra óptica difusa, dependiendo de su precio, grado de flexibilidad, y el tipo de ambiente en que sería instalado. En el mercado local, resultó más que imposible haber encontrado un lugar donde se pueda comprar dicha fibra. En cambio, en el mercado extranjero, se ha encontrado una amplia variedad de productos, las cuales son afines a iluminación, usando fibra óptica.

En Sudamérica, existe poco mercado para la iluminación artificial usando fibra óptica, pero en Estados Unidos, es donde existe una

amplia variedad de productos, ya sean iluminadores, y la misma fibra óptica.

En la mayoría de los casos, se ha encontrado tres tipos de fibra óptica difusa. Estas son:

- End giow.- fibra óptica común, para aplicaciones lumínicas
- Side giow.- Fibra óptica difusa, cubierta de material plástico transparente.
- Solid Core.- Fibra óptica con solo un núcleo sólido.

4.4 El iluminador

El iluminador tiene que poseer controles que permitan variar la intensidad y color de la luz. Con ello se permite obtener un control en el crecimiento de la planta.

En el mercado existe una amplia variedad de iluminadores, ya sea por su potencia eléctrica consumida y la cantidad de lúmenes presentes en el “foco”. Es muy importante saber qué tipo de iluminador se necesita, ya que en el mercado existen diferentes tipos de fibra, y el acopie fibra-iluminador, es una pauta importante en el momento de escoger los materiales.

El iluminador de fibra óptica tiene que estar lo mas cerca posible de la cámara de sembrado para no tener pérdidas por longitud. Estando cerca de la cámara de sembrado, ésta puede estar situado en la parte superior de la misma, para evitar que sea una molestia en el cuarto de crecimiento. Otra característica que vale resaltar, es conocer a qué longitud de onda la *Solanum Tuberosum L.* es más susceptible.

La calidad de luz que genera la fuente es de vital importancia para el crecimiento de la planta. Entre las reacciones que la calidad de luz produce, están en la cantidad de hojas, tamaño y grosor del tallo y número de tubérculos a producirse.

Para que la planta pueda crecer bien, la raíz requiere al menos 60 cm de profundidad, pero ésta se la puede limitar a 35 cm, ya que el cubículo tiene sólo 55 cm de altura.

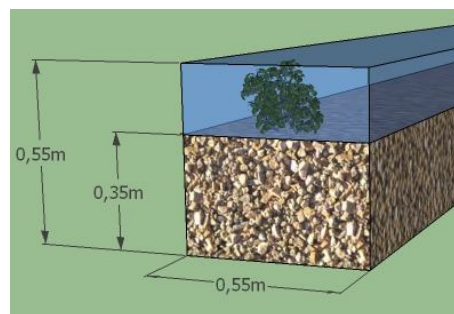


Figura 4.4: Dimensiones ideales para el crecimiento de la planta dentro del cubículo

4.5 Cubículos extraíbles

Para el almacenamiento de la planta, esta necesita estar exenta del ambiente exterior y dejar pasar la luz emitida por la fibra. Estos cubículos tienen que tener una transparencia superior al 90% para así, ser iluminadas correctamente. Sobre el material de los cubículos, no sería práctico vidrio, por su fragilidad, aunque sería un método económico pero altamente delicado, impráctico y peligroso. Existen placas de plástico de acrílico (PMMA), que son excelentes en dureza, transparencia y flexibilidad.

4.6 Repisa cámara de crecimiento

La cámara de crecimiento debe tener una estructura en base a pilares y soportes, y con las medidas suficientes para que quepan los cubículos extraíbles. Tiene que ser una estructura que sea resistente a la humedad, la luz y por supuesto al peso que tiene que sostener.

El material más adecuado, sería el aluminio. Un material fuerte y resistente a la luz, que es usado ampliamente en los negocios y vitrinas para la muestra de productos.

Con la iluminación lateral, la planta engrosa su tallo, ya que el fototropismo positivo de la planta, es aliterado. Esto permite a que la planta se acopie al sistema, controlando así su tamaño por medio de la luz lateral.

La fibra óptica difusa, estará desde su inicio, acopiada ópticamente con la fuente de luz, o iluminador para transportar los rayos a la cámara de crecimiento.

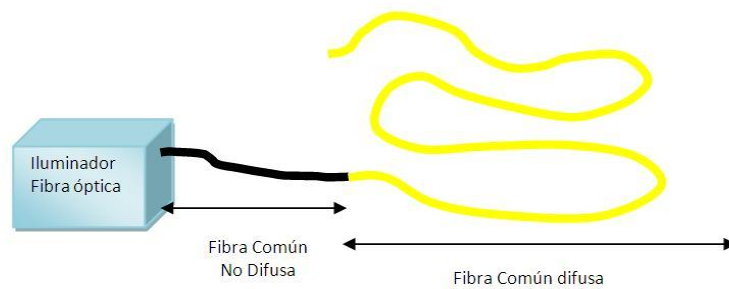


Figura 4.5. Longitud total de fibra difusa y no difusa

En el capítulo 2 se hizo énfasis acerca de diferentes modelos de cómo la fibra difusa, tiene pérdidas dependiendo de la distancia de la fuente. Se planteará el tercer modelo, que involucra un espejo en el final de la fibra difusa. El detalle del modelo antes mencionado, se lo abordó más en el capítulo 2.

4.7 Instructivo de instalación de la cámara de crecimiento

La parte técnicamente difícil del sistema, es la instalación de la fibra óptica. Esta requiere ser instalada de una manera en la que se pueda ahorrar el uso de la misma en longitud. Usando de referencia el tamaño de la cámara de sembrado, ésta debe tener la longitud de 136 metros, 21 segmentos de 5.85 m y 22 de 0.6 m.

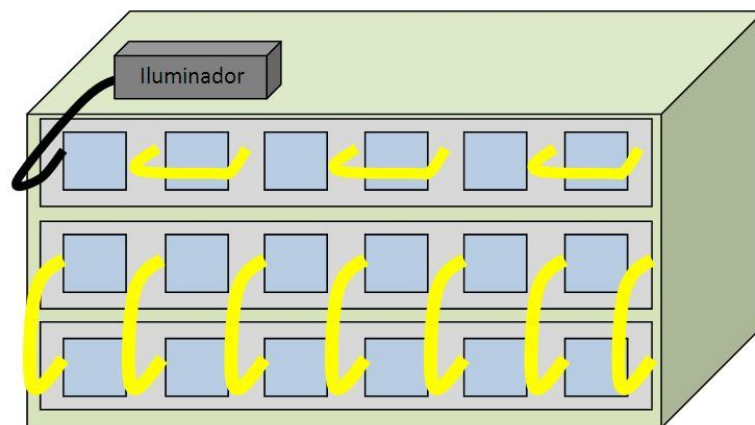


Figura 4.6: Representación "esqueleto" de la fibra óptica difusa dentro de la cámara de crecimiento

En la figura 4.6, podemos ver cómo sería el arreglo de las fibras ópticas, de forma tal que no se interrumpa la extracción de los cubículos, ya que se tiene que cultivar o sembrar las semillas de papa y después del periodo de crecimiento sacarlas.

La instalación de la fibra óptica difusa, es la parte más importante debido a que se tiene que maximizar su uso. Las partes en que la fibra

tiene que permanecer oscura, es en los dobleces, ya que aquí la iluminación es innecesaria. Por ello, se requiere agregarle una película interior altamente reflectante para la luz siga su camino al siguiente cubículo o piso.

La cámara de crecimiento tiene que ser ventilada para evitar que se acumulen gases que son producidos por las hojas de las plantas.

Este sistema tiene la opción de ser escalable, es decir, que se puede aumentar la relación de plantas sembrados versus el área de la cámara de crecimiento.

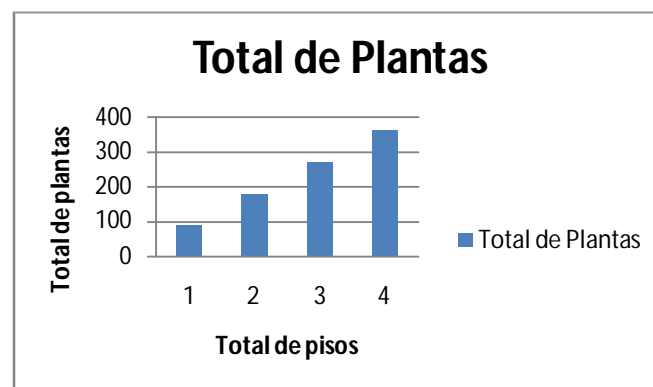


Figura 4.7: Relación de número de plantas con respecto al número de pisos

La cantidad total de plantas que se pueden sembrar y cultivar en la cámara de crecimiento, dependiendo del número de pisos, se lo demuestra en la figura 4.7.

Si en cada cubículo entran alrededor de 15 plantas, y con la capacidad de 6 cubículos en cada piso, se obtiene que por cada piso se obtengan 90 plantas. También cabe destacar que área es la que se ahorra mientras más se aumenta el número de pisos.

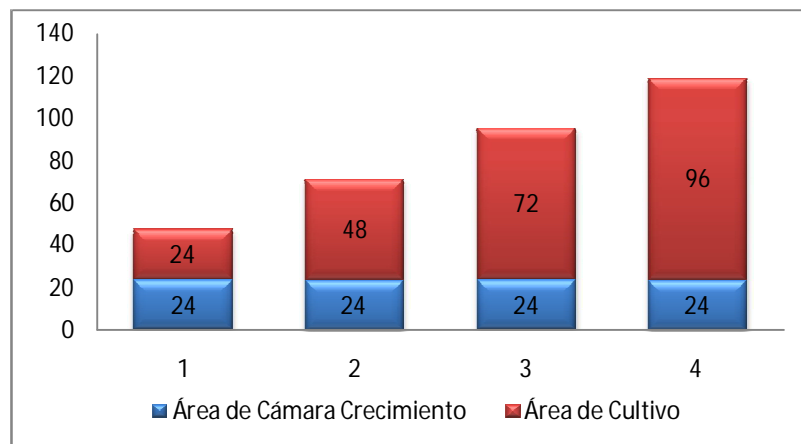


Figura. 4.8: Ilustración de áreas desde diferente perspectiva

Como se ilustra en la Figura 4.8, los números 1, 2, 3, y 4, son la cantidad de pisos de los diferentes escenarios en que se quiere comparar el área de crecimiento con el área de cultivo. Vemos que mientras más pisos haya, nosotros tenemos mayor área de cultivo, pero manteniendo la misma área de la cámara de crecimiento.

El sistema es escalable, por la situación de que se pueden agregar más pisos que permiten producir más plantas en la misma área de construcción, pero a su vez requiere que se posea más cantidad de fuentes y longitud de fibra.

4.8 Análisis de costos

Como vemos en la figura 4.2, el escenario requiere dos materiales importantes que son: la fuente de luz y la fibra óptica difusa. Según la empresa americana *Del-Lighting*, presentaremos una fuente de luz para fibra óptica en la cual puede ser instalado al sistema, dado sus características técnicas.

La fuente de luz que seleccionamos es el modelo DEL-250-8, y sus características son:

- Lámpara de halogenuro metálico
- Tiempo de vida útil de la lámpara de 4000 horas
- 25000 Lúmenes de intensidad de luz
- Color Wheel



Figura 4.9: La fuente DEL-250-8

El precio de esta fuente es de US\$ 1,899.00 y la potencia que consume es de 250 Watts.

La empresa *TriNorthLighting* ofrece una amplia variedad de fibras ópticas difusas. El escenario de 3 pisos, requiere de 136 metros (aproximadamente 446.2 pies) de fibra óptica difusa y un pie de fibra óptica normal (End emitting) que estará entre la fuente y la fibra óptica difusa. Esta parte no requiere de iluminación exterior en la cámara de crecimiento, ya que sería un desperdicio de intensidad de luz al inicio de la fibra óptica en general.

La fibra óptica difusa que se puede instalar en la cámara de crecimiento, es del tipo COFS-60-60, que es de 9.4 mm de diámetro y a un costo en el mercado de US\$ 2.74 el pie. Esta fibra es del tipo de núcleo sólido.

Para la fibra óptica que va entre el iluminador y la fibra óptica difusa, es necesaria la End-Emitting. Este tipo de fibra tiene que ser del mismo diámetro para que exista un acople adecuado entre las dos fibras.

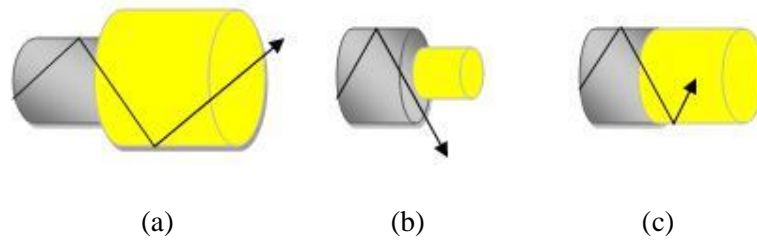


Figura 4.10: Tipos de acople entre dos fibras (a) Fibra de menor a mayor diámetro; (b) Fibra de mayor a menor diámetro (c) Acople adecuado

Como vemos en la figura 4.10, los dos tipos de fibra tienen que ser del mismo diámetro, para que se presente el mínimo grado de pérdida. En el caso de (a) de la figura 4.10, aunque los rayos incidentes entran a la fibra de mayor diámetro, igual se presenta pérdida para los rayos que regresan al punto inicial. En el caso (b) de la figura 4.10, sucede lo contrario; presenta pérdidas para los rayos que inciden en la de menor diámetro. El costo de la fibra óptica no difusa es de US\$ 3.50 el pie.

El costo estimado del proyecto, referente a equipos y materiales para la iluminación, viene indicado en la siguiente tabla:

Artículo	Valor Unitario	Subtotal
Fuente de luz DEL-250-8	\$1,899.00	\$3,798.00
Fibra óptica Difusa COFS-60-60	\$2.74	\$1,224.78
Fibra óptica No Difusa SCE-6	\$3.50	\$3.50
Total		\$5,026.28

Tabla VI. Costo de los equipos y materiales del sistema

En la tabla VI podemos ver sólo el costo de los materiales de iluminación. La fuente de luz antes mencionada, es de tipo halógena metálica. Este tipo de lámparas son relativamente caras, pero dan una radiación de gran intensidad y con características espectrales monocromáticas.

Cabe recordar que estos 3 elementos son de origen extranjero, por lo que es necesario importarlos a nuestro país y por consiguiente pagar un impuesto de ingreso que abarca en equipos tecnológicos.

Sobre los servicios de terceras personas, está la de proveer de energía eléctrica a la cámara de crecimiento. El cargo mensual y anual que existirá por mantener la fuente de luz operativa en 16 horas diarias, se lo presentara en la siguiente tabla:

Equipo	Potencia (Watts)	Horas mensuales	Consumo Mensual ⁸	Consumo Anual
Fuente de luz 1	250	480	\$12.00	\$144.00
Fuente de luz 2	250	480	\$12.00	\$144.00
Total Carga anual				\$288.00

Tabla VII. Carga mensual y anual de energía eléctrica para la cámara de crecimiento.

En la Tabla VII, podemos ver cuanta luz se tendría que proveer a la cámara de crecimiento con ayuda de las 2 fuentes de luz para fibra óptica difusa. Es necesario especificar que estos datos son para el caso de que la planta necesita 16 horas diarias de luz, los 365 días del año. Pero la *Solanum Tuberosum L.* necesita fotoperiodos largos y cortos para su posterior producción de tubérculos, como se vio en el subcapítulo 1.6.

4.9 Mantenimiento del sistema

El cuidado del sistema debe de ser periódico por ser un ambiente que estará expuesto a la humedad, luz y componentes orgánicos que posteriormente pueden alterar el crecimiento y desarrollo de la planta.

La fuente de luz es el componente mas critico si a mantenimiento nos referimos. Una característica importante es el tiempo de vida útil de la lámpara, que estará directamente asociada con la cantidad de horas luz impuesta a la planta. Con los datos recopilados sobre cuánto tiempo la

⁸ En base a \$0.10 el KWh en categoría comercial. Fuente: CNEL – Regional Guayas Los Ríos.

planta debe de recibir luz, es necesario que este tiempo sea de larga duración. Si la planta recibe 16 horas de luz en su fotoperiodo largo, se tiene que en cada año, se la usara alrededor de 6000 horas. Según los datos de la empresa que nos proveerá la fuente de luz DEL-250-8 (4000 horas de vida útil), esta podrá estar operativa 8 meses. Según la empresa *Del-Lighting*, el costo de reemplazo de la lámpara de la fuente de luz tiene un costo de US\$ 400.

El reemplazo de la lámpara no requiere de personal técnico especializado, pero si de seguridad en instalación de componentes eléctricos. Tomando como analogía el cambio de bombilla en una linterna, sólo es asunto de enroscar o acopiar la lámpara dentro del sistema de la fuente de luz y teniendo el mayor cuidado posible.

El mantenimiento de la fibra óptica sería casi nulo, al ser un componente pasivo que solo irradia luz. Pero es importante una limpieza periódica que permita que la luz no sea “atrapada” dentro de la fibra por motivo de agentes externos como polvo, humedad, humus que están presentes en el ambiente.

Los cubículos extraíbles si requieren un mantenimiento especial, al estar contacto con la tierra de sembrar o en el mejor de los casos, con cultivo hidropónico. Luego de un tiempo prolongado, pueden dañar el ambiente y llenarse de una colonia bacteriana que no permita un buen desarrollo del tubérculo y por consiguiente, la putrefacción del producto.

CONCLUSIONES

1. SILFOD es un sistema que permite maximizar el uso de suelo y es un camino en el que se depende mucho de la iluminación artificial. En nuestros tiempos, la naturaleza está sufriendo cambios que no son aptos ni recomendables a futuro. Es necesario crear tecnologías que permitan no depender de ello y beneficiarse de la misma.
2. Lo relevante del sistema es asunto espacio, como se ilustra en las figuras 4.2 y 4.3; y con ello nos permite tener una mínima área de construcción, pero obteniendo más área de cultivo. La relación de área de cultivo es directamente proporcional al número de pisos.
3. Una propiedad importante en que las plantas son muy susceptibles, es acerca de la longitud de onda, que estas pueden recibir, tolerar y hasta

evitar. Por ello es necesario saber el espectro lumínico de cada lámpara, y poder así, seleccionar la mejor fuente con mejores niveles de color rojo y azul, que son los necesarios para el crecimiento y desarrollo de la planta.

4. Con este sistema, podemos tener un control más automatizado con el fotoperiodo de la planta, calidad y cantidad de luz de la que recibe.
5. Sobre el iluminador, es importante resaltar acerca de qué tipo de lámpara usa y cuál es su vida útil, ya que eso trae consigo una percepción costo-beneficio sobre el sistema a largo plazo.
6. Según datos recopilados de diferentes sitios de venta de fibra óptica difusa, el costo de la fibra de *Solid Core*, es más barato que la fibra *Stranded*; un punto importante si es que a economía se refiere.
7. El sistema SILFOD tiene la ventaja de poseer menos grado de mantenimiento, como se indico en la sección 4.9, ya que la fibra puede estar ahí en un largo tiempo, ya que no necesita de ser reemplazada como en el caso de iluminación artificial con lámparas fluorescentes. En el caso de la lámpara del iluminador, si es necesario hacer cambios periódicos, dependiendo de la cantidad de horas de vida útil.

8. En el presente proyecto solo se abarca lo que son costos tecnológicos con respecto al sistema SILFOD. Las características biológicas, físicas y fotoquímicas de la papa, se las recopiló a través de la Web. Es necesario tener un soporte agronómico y personal dedicado a esta rama, ya que se puede complementar diferentes maneras para que la planta se desarrolle de una manera correcta.

RECOMENDACIONES

1. El sistema tiene que ser completamente ventilado para que haya un intercambio de gases desde la cámara de crecimiento, de no ser así, la planta no estaría respirando correctamente. También es aconsejable hacer los chequeos respectivos para mantener un buen desarrollo en el ambiente de trabajo.
2. Es necesario que la fibra óptica difusa sea instalada de una manera ordenada y fija para que existe uniformidad en la iluminación de las plantas.
3. La fuente tiene que poseer características que permitan su respectivo uso; ya sean estas, protección contra la humedad, temperatura y lo que es más importante aún, una efectiva y segura instalación eléctrica.

4. Para un adecuado desarrollo de la planta es necesario tener un cuarto que tenga un ambiente controlado para estar acorde a las características ambientales de la planta.

5. Dependiendo del tipo de lámpara, es necesario hacer una agenda de mantenimiento que permita saber y controlar la vida útil de la lámpara. Por ello es recomendable que la fuente de luz sea bien equipada, es decir que esté con un balasto electrónico, el cual permite un ahorro muy significativo a largo plazo y prolonga la vida útil de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) BRAGA NEWTON C., Fototropismo, <http://www.saberelectronica.com.br/secoes/leitura/117>, accesada en diciembre del 2009.
- (2) CAMPBELL NEIL A., Biología, Conceptos y Relaciones. 3ra Edición Pág. 660, año 2001.
- (3) RICHFORD N., Plant Growth Factors, www.ehow.com, accesada en enero del 2010
- (4) ECHARRI L., Libro Electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/02Tierra/120EnVid.htm>, accesada en enero del 2010.

- (5) BOTANICAL, La luz en las plantas de interior, *www.botanical-online.com*,
accesada en Diciembre del 2009.
- (6) WHITING D., ROLL M., VICKERMAN L., JOHNSON S., Plant Growth
Factors: Light, Cmg GardenNotes #142, Colorado State University Extension,
Diciembre del 2009.
- (7) WIKIPEDIA, Solanum Tuberosum,
es.wikipedia.org/wiki/Solanum_tuberosum, accesada en febrero del 2010.
- (8) SAN CARLO,
*http://www.sancarolo.it/common/imgpub/mat_prime_la_patata_note_botanich
e.gif*, accesada en febrero del 2010.
- (9) ESPINOZA N., LIZÁRRAGA R., SIGÜEÑAS C., BUITRÓN F., BRYAN J.,
DODDS J.H., Cultivo de Tejidos: Micropropagación, conservación y
exportación de germoplasma de papa, Guía de Investigación CIP 1, año 1992.
- (10) CZAJKOWSKI J., Luminotecnia e iluminación artificial, Instalaciones,
febrero del 2006.
- (11) GALÁN GARCÍA J. L., Sistemas de unidades físicas, Universidad de Murcia:
Ciencias, Vol. XVII, Núm. 1-2, año 1987.
- (12) KOZAI T., KITAYA Y., FUJIWARA K., KINO S., KINOWAKI M, Use of
diffusive optical fibers for plant lighting, Faculty of Horticulture, Chiba
University, Chiba – Japan, 1995, pages 747 – 755.
- (13) WIKIPEDIA, Reflexión Interna Total,
es.wikipedia.org/wiki/Reflexión_interna_total, accesada en mayo del 2010.

- (14) TEIJIDO J. M., Conception and design of illumination light pipes, Tesis # 1498 de Microtécnica de la Universidad de Neuchâtel de Suiza, año 2000.
- (15) DEVEAU RUSSEL L., Fiber Optic Lighting: A Guide for Specifiers, 2nd Ed. The Fairmont Press, año 2001
- (16) WIKIPEDIA, Polimetilmetacrilato, *es.wikipedia.org/wiki/Polimetilmetacrilato*, accesada en Enero del 2010.
- (17) PLASTIC OPTICAL FIBER TRADE ORGANIZATION (POFTO), Present State-of-the-art of Plastic Optical Fiber (POF) Components and Systems, 2004.
- (18) GRISÉ W., PATRICK C., Passive Solar Lighting Using Fiber Optics, Journal of Industrial Technology Volume 19, No. 1, November 2002 to January 2003.
- (19) SPIGULIS J., PFAFRODS D., Clinical Potential of the side-glowing Optical Fibers, Spie, 1997, 2977: 84 – 88.
- (20) MUHS J., Oak Ridge National Laboratory. Design and Analysis of Hybrid Solar Lighting and Full-Spectrum Solar Energy Systems, American Solar Energy Society SOLA R2000 Conference, Paper #33, June 16 – 21, 2000
- (21) GARCÍA FERNÁNDEZ JAVIER, Lámparas y luminarias, *http://edison.upc.edu*. Accesada en Diciembre del 2009
- (22) OPTIC FIBRE LIGHTING *http://www.opticfibrelighting.com.au/Illuminators.html*, accesada en marzo del 2010.