



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO FINAL DE CARRERA

**TÍTULO DEL TFC:** Estudio de Viabilidad de un sistema de iluminación de interiores mediante fibra óptica

**TITULACIÓN:** Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad Telemática

**AUTOR:** José Sánchez Bartolomé

**DIRECTOR:** Alejandro Rodríguez Gómez

**FECHA:** 8 de Febrero de 2013



**Título:** Estudio de Viabilidad de un sistema de iluminación de interiores mediante fibra óptica

**Autor:** José Sánchez Bartolomé

**Director:** Alejandro Rodríguez Gómez

**Fecha:** 8 de Febrero de 2013

## **Resumen**

El presente documento contiene información de las características de un sistema de captación de luz solar y su distribución mediante fibra óptica para iluminación. Dicho sistema se divide en dos partes principales. La primera detalla las particularidades del sol, la orientación del captador y los materiales que se necesitan utilizar. La segunda parte se basa en el diseño.

Esta primera parte del documento intenta esclarecer que características se deben conocer sobre el espectro de la luz solar, así como determinar con que potencia contaremos de inicio. Se define un algoritmo para orientar el sistema y de esta manera maximizar el aprovechamiento de irradiancia solar. En este primer bloque también se determinan las principales peculiaridades de las lentes (elemento captador), la fibra óptica (elemento distribuidor) y los difusores (atribuir mayor apertura a la luz en la salida de la fibra óptica) que serán incluidas en el diseño.

En la segunda parte se implementa el diseño del sistema de captación y distribución de luz. De cada parte del primer bloque se detallan propiedades concretas. Además, se determinan las pérdidas de cada elemento y se obtiene la cantidad de luminosidad que puede ofrecer cada lente. Se tendrá en cuenta el lugar y la fecha para el cálculo. Finalmente, como el sistema depende de la luz solar, y esta no está siempre disponible, se documentan especificaciones sobre un sistema complementario e alternativo. Un equipo que mediante sensores es capaz de adaptar la cantidad de luz en los espacios.

Como punto final del proyecto hay un estudio de ambientalización. En él hay un pequeño estudio del ahorro que supondría tener el sistema implementado en un edificio.

**Title:** Feasibility study of an interior lighting system using fiber optics

**Author:** José Sánchez Bartolomé

**Director:** Alejandro Rodríguez Gómez

**Date:** February, 8th 2013

## Overview

This document contains information about the features of a system for capturing sunlight and its distribution by means of fiber optic lighting. This system is divided into two main parts. The first, details the features of the sun, the orientation of the sensor and the materials must be used. The second part is based about the design.

This first part of the paper attempts to highlight what features should be known about the spectrum of sunlight and how to determine with what power we will count in the beginning. It defines an algorithm to guide the system and so maximizing the use of solar irradiance. In this first block defines the main features of the lens (sensor element), the optical fiber (manifold) and the diffusers (to attribute greater opening to output the light in the fiber optic) these will be included in the design.

In the second part implements the collection system design and light distribution. In each of the first block specific properties are detailed. In addition, losses are determined for each item and it get the amount of light that each lens can offer. It will take into account the location and the date for the calculation. Finally, as the system depends on sunlight and this is not always an available, documented specification about a complementary and alternative system. This equipment, through sensors, is able to adapt the amount of light in spaces.

As a final point of the project, there is a study of greening. It's a small study of the savings that could be implemented in a system building.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. LUZ SOLAR.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Características de la energía solar .....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Radiación solar .....	3
1.1.2. Potencia de radiación por zonas (según localización) .....	5
<b>CAPÍTULO 2. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO SOLAR.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Orientación y características según localización .....</b>	<b>7</b>
2.1.1. Algoritmo para calcular la posición solar respecto a la tierra .....	8
<b>CAPÍTULO 3. MATERIALES.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Lentes .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 Niveles de pérdida en las lentes.....	22
<b>3.2 Fibras ópticas .....</b>	<b>25</b>
3.2.1 Características principales .....	25
3.2.2 Leyes físicas .....	26
3.2.3 Pérdidas en transmisión y dispersión .....	29
<b>3.3 Difusores .....</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL SISTEMA .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1 Diseño de la superficie captadora .....</b>	<b>35</b>
4.1.1 Características lentes .....	36
4.1.2 Características del seguidor solar .....	37
<b>4.2 Características del cableado de fibra .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Iluminaria.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4 Cálculo de pérdidas .....</b>	<b>41</b>
<b>4.5 Flujo luminoso .....</b>	<b>45</b>
<b>4.6 Niveles de iluminación característicos .....</b>	<b>46</b>
<b>4.7 Niveles de iluminación del sistema .....</b>	<b>47</b>
<b>CAPÍTULO 5. SISTEMA DE ILUMINACIÓN COMPLEMENTARIA .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Elementos del sistema de iluminación complementaria.....</b>	<b>49</b>
<b>CAPÍTULO 6. ESTUDIO AMBIENTALIZACIÓN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>6.1 Estudio de ambientalitzación .....</b>	<b>52</b>

<b>6.2 Conclusiones .....</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO A. PROPIEDADES DE LA LUZ SOLAR .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO B. LENTES FRESNELL.....</b>	<b>64</b>
<b>ANEXO C. FIBRA ÓPTICA.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO D. ALGORITMO DE POSICIÓN SOLAR .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO E. ILUMINACIÓN .....</b>	<b>96</b>

# INTRODUCCIÓN

Desde años atrás, uno de los propósitos tanto de empresas, países y usuarios es buscar nuevas técnicas de ahorro energético. El desarrollo industrial y económico de un país depende en gran medida de su consumo energético. Por este motivo, en los últimos años se han comenzado a utilizar alternativas a fuentes energéticas contaminantes como: carbón, petróleo, uranio y se apuesta por las energías renovables.

Uno de los sectores en que más se ha investigado su disminución de consumo es la iluminación. En los últimos 30 años se han desarrollado nuevas tecnologías como las bombillas LED, que permiten reducir el consumo emitiendo los mismos niveles de luz.

Aunque estas tecnologías aportan grandes niveles de ahorro hay lugares que tanto en horas nocturnas como diurnas necesitan iluminación. Como por ejemplo: el metro, habitaciones interiores en viviendas, lugares de trabajo, garajes, subterráneos, etc. Estos lugares al necesitar estar iluminados siempre tienen un consumo elevado de energía.

El objetivo de este TFC es proponer una solución económica a estas situaciones, captando la luz que proporciona el sol para introducirla en espacios interiores mediante fibra óptica.

Para conseguir dar una alternativa realista a esta casuística es necesario estudiar técnicamente los factores que pueden permitir esta tecnología. Para ello, se estudiarán temas como: la radiación solar, las fibras ópticas, lentes, tipos de materiales necesarios, posibles captadores, seguidores solares y difusores. Así como realizar unos cálculos teóricos en una zona geográfica concreta, ya que esta tecnología depende en gran parte de la cantidad de luz solar que tenga un país durante el día.

Por último y según la información recogida, se modelará el sistema completo detallando las pérdidas que se pueden llegar a producir. Esto nos dará una visión general sobre la cantidad de energía que se puede llegar a transmitir.

# CAPÍTULO 1. LUZ SOLAR

El sol principalmente proporciona a la tierra radiación en forma de luz y calor.

En este apartado se realizará un estudio de las características principales de esta energía. Se determinará si es técnicamente posible concentrar suficiente luz en el tejado de un edificio para hacerla llegar al interior en niveles razonables.

Uno de los puntos importantes es conocer la irradiación solar y determinar si los márgenes de frecuencia en los que emite el sol se pueden introducir y distribuir dentro de una fibra óptica.

## 1.1. Características de la energía solar

La energía que emite el sol se genera en las reacciones de fusión nuclear producidas en su interior, donde la temperatura estimada es del orden de 10 a 40 millones de grados Celsius. Esta energía se absorbe y se transmite de las diversas capas solares y finalmente se emite en la cromosfera en forma de radiación electromagnética y viento solar.<sup>i</sup>

El parámetro que indica la intensidad de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre es la llamada constante solar. Las últimas determinaciones de la constante solar, realizadas mediante satélites artificiales, proporcionan un valor de  $1366 \text{ W/m}^2$ .<sup>ii</sup>



**Fig. 1.1** Nivel de intensidad de radiación solar y proporción sol-tierra<sup>iii</sup>

### 1.1.1. Radiación solar

La energía de la radiación solar se distribuye desigualmente en las distintas longitudes de onda del espectro.

Esta energía solar en el espacio se distribuye con más fuerza en la longitud de onda del espectro visible por el ojo humano. El pico de intensidad se obtiene aproximadamente en 550 nm de longitud de onda que corresponde al verde-amarillo.<sup>ii</sup>

Al atravesar la atmósfera terrestre, la radiación solar sufre una serie de interacciones con los componentes de ésta, produciéndose los efectos siguientes:

- Absorción de la radiación solar en ciertas longitudes de onda originada fundamentalmente por la acción de las moléculas de agua y de dióxido de carbono.
- Dispersión de la radiación solar motivada por las siguientes causas: la acción de las nubes, el polvo existente en la atmósfera y las moléculas de los componentes de la atmósfera

En el siguiente esquema se pueden ver los efectos de los fenómenos explicados:

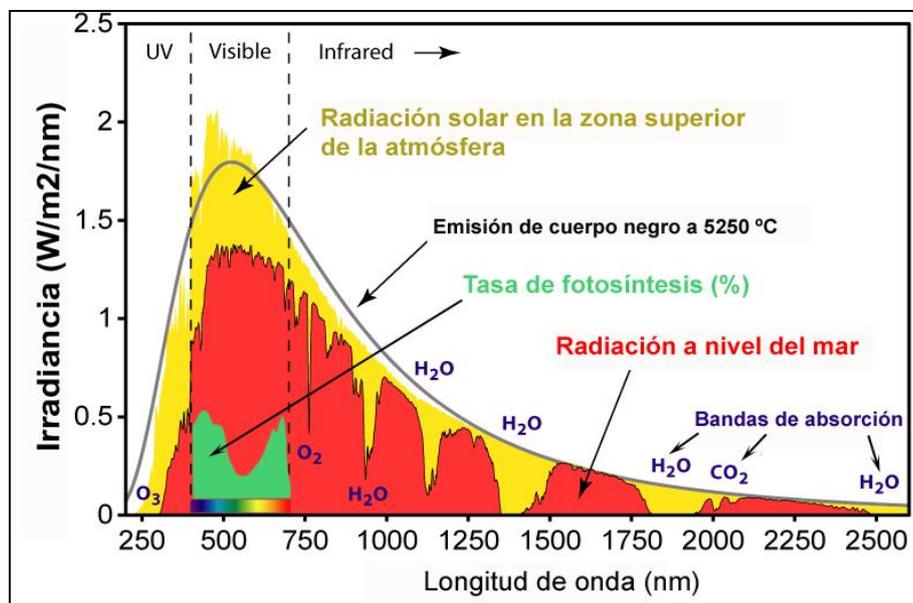


Fig. 1.2 Espectro de radiación solar en la tierra<sup>iv</sup>

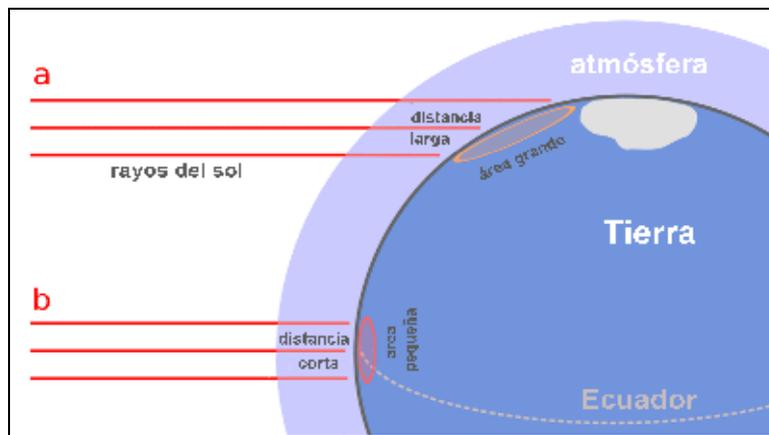
La dispersión de la radiación solar por la atmósfera hace que se distingan dos tipos de radiación solar, que se definen a continuación:

- Radiación directa: es la que proviene del disco solar sin sufrir variaciones en su dirección original.
- Radiación difusa: es la que proviene de cualquier dirección por haberse reflejado en cualquier material (un día cubierto puede ser 100% difusa).

Como se puede ver en la figura 1.2, la mayor parte de la radiación solar está en el espectro visible de la luz que comprende longitudes de onda entre los 0,4 y 0,8  $\mu\text{m}$ .

Hay dos razones para que esta energía no alcance íntegramente cada metro cuadrado de la superficie terrestre<sup>ii</sup>. Las razones son:

- La Geometría de la Tierra: la Tierra no es un disco frente al Sol sino una esfera. Por lo tanto, el sol no irradia a la Tierra verticalmente sino que en la mayoría de las regiones lo hace con un cierto ángulo. Cuando es de noche de un lado de la Tierra, no hay irradiación alguna.



**Fig. 1.3** Nivel de intensidad de radiación solar y proporción sol-tierra<sup>v</sup>

- La luz del sol que alcanza la superficie de la Tierra encuentra pequeñas desviaciones y obstáculos. Las pequeñas partículas que se pueden encontrar en el aire como polvo, agua,... hacen que la luz sufra desviaciones. En algunos casos hay obstáculos (como por ejemplo las nubes) hacen que gran parte de la luz no alcance la superficie terrestre.

En la tabla 1.1 que se muestra a continuación se muestran los valores de irradiancia solar que alcanza la superficie terrestre dependiendo del ángulo de ascensión solar. El momento de más irradiación se da cuando los rayos solares forman un ángulo de  $90^\circ$  con la superficie. Los valores más bajos vienen dados por tener que atravesar una mayor sección de la atmósfera terrestre.

**Tabla 1.1.** Irradiación en función del ángulo de elevación solar<sup>vi</sup>

Elevation angle of the Sun $\gamma_s$	Irradiance $E_{glob}$ in $W/m^2$
5°	41.9
10°	112.8
20°	290.7
30°	472.1
40°	636.0
50°	781.4
60°	901.1
70°	991.8
80°	1,043
90°	1,063

### 1.1.2. Potencia de radiación por zonas (según localización)

Como se ha comentado en el punto anterior no toda la irradiación (o potencia radiante) que llega al planeta es la que finalmente alcanza la superficie, debido a fenómenos tales como: la reflexión, la absorción o la difusión.

Así por ejemplo, la difusión debida al polvo y a la contaminación del aire depende bastante del lugar donde se mida, siendo mayor en los lugares industriales y en las ciudades. Los efectos meteorológicos locales como nubosidad, lluvia o nieve, también afectan a la potencia radiante que puede ser aprovechada en un lugar determinado.

Los valores de radiación según la estación del año se ven modificados, dándose los valores extremos en verano. Así pues en España existen diferencias regionales claras de irradiación solar global media anual, teniendo la zona sur los mayores valores que las de las zonas del norte. En parte por la proximidad al ecuador, pero sobre todo por la meteorología.

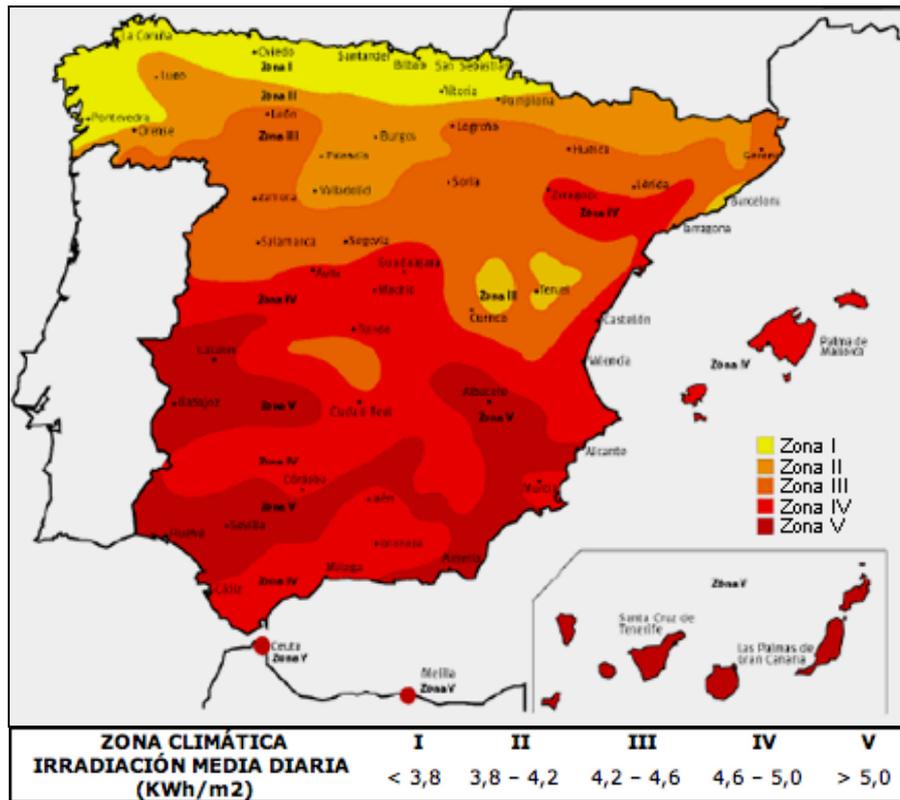


Fig. 1.4 Irradiación solar en España<sup>vii</sup>

## CAPÍTULO 2. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO SOLAR

Una vez recopiladas las principales características de la luz solar, se argumenta en este segundo capítulo como maximizar el aprovechamiento de la energía.

Para conseguir recoger la mayor energía, el captador deberá adaptarse a la posición del sol. El sistema conseguirá mayor irradiancia solar si la energía incide perpendicularmente a la superficie de las lentes. Por este motivo, el dispositivo de captación deberá adaptar su inclinación y acimut.

Este seguimiento solar se realizará mediante un algoritmo pensado por Jean Meeus en su libro *Astronomical Algorithms*. Este astrónomo francés documentó como realizar un seguidor solar que depende de múltiples factores como posición, altitud, fecha, localización, etc.

El captador estará compuesto de una lente por un grupo de fibras ópticas. El conjunto de lente y fibra óptica deberá moverse como un único elemento. Esta característica del diseño es importante para introducir la mayor cantidad de luz en el sistema.

Para determinar unos valores reales de los cálculos, se establece la ciudad de Barcelona como base para realizar mediciones. De esta manera se recopilan datos como posición, altitud, irradiancia solar, horas de sol, etc.

### 2.1. Orientación y características según localización

Como la incidencia del sol se ve modificada en función de la estación y de la zona geográfica se han de conocer ciertos términos<sup>viii</sup>:

Latitud: se define como la distancia angular que hay desde un punto de la superficie terrestre al Ecuador. Se puede obtener este valor haciendo uso de la base de datos PVGIS.

Azimut se define como el ángulo de desviación respecto al sur geográfico de una superficie. El sur geográfico no es lo mismo que el sur magnético. Como normal general los captadores situados en el hemisferio norte se orientarán hacia el sur y los situados en el hemisferio sur se orientarán hacia el norte.

Inclinación: se define como el ángulo que forma el plano de la superficie captadora y la horizontal.

Incidencia: se define como el ángulo que forma la radiación directa sobre la superficie captadora y la perpendicular del captador.

Para conseguir un completo seguimiento del sol es necesario que el captador pueda variar su orientación (o azimut) y su inclinación.

El sol dibuja trayectorias diferentes según la estación del año. En invierno sube poco y en verano mucho, lo que hace que las sombras sean diferentes en unas estaciones y en otras.

Para la zona de Barcelona (latitud de  $41.388^{\circ}$ ) se detalla la posición óptima media del captador según el mes del año y la hora.<sup>ix</sup>



**Fig. 2.1.** Localización de los datos de la tabla 2.1<sup>ix</sup>

### 2.1.1. Algoritmo para calcular la posición solar respecto a la tierra<sup>x</sup>

Hay distintos artículos publicados que describen algoritmos para calcular la posición solar. Estos son utilizados para realizar seguidores solares de aprovechamiento de energía. El grado de incertidumbre en la mayoría de artículos es mayor que  $\pm 0,01$  en el cálculo del cenit solar y ángulos de acimut. Otra limitación de muchos artículos es que es válido durante unos determinados años (entre 15 y centenares). En este apartado del proyecto se detalla el algoritmo descrito por Jean Meeus que documentó un cálculo de la posición solar válido desde el año -2000 AC hasta el 6000DC con una incertidumbre de  $\pm 0,0003$  en el cálculo del cenit solar y del ángulo de acimut.

#### 2.1.1.1. Escala de tiempo

Se utiliza escala de tiempo universal (UT) basada en la rotación de la tierra y se cuenta desde el número 0 que representa la hora de medianoche. Para ajustar este tiempo universal se tiene en consideración la rotación irregular de la tierra. Por este motivo, y como adaptación, se utiliza la escala UT que puede dar como resultado valores positivos o negativos.

Otra escala de tiempo a utilizar será el tiempo dinámico terrestre (TDT o TT). Esta es la escala de tiempo utilizada en la observación y variación de la superficie terrestre.

Para calcular la posición solar desde cualquier punto del planeta pasaremos esta UT a fecha juliana (JD) que convierte una determinada fecha en un número a modo de identificador único.

### 2.1.1.2. Adaptación de días y milenios en fecha juliana

Los días julianos identifican la fecha con un número. Este recuento continuo comienza en el año -4712. Por tradición, los días julianos cuentan desde las 12 del mediodía en el meridiano de Greenwich. Si esta medida se utiliza en una escala de tiempo dinámico (sistema de tiempo uniforme y constante utilizada en astronomía para realizar cálculos de movimientos orbitales) se le llama días efemérides julianos.

El JD se calcula con la siguiente formula:

$$JD = INT(365,25*(Y + 4716)) + INT(30,6001*(M + 1)) + D + B - 1524,5 \quad (2.1)^x$$

- INT es el número entero de los términos calculados (por ejemplo, 8.7 = 8, -8,7= - 8 ...)
- Y es el año (por ejemplo, 2001, 2002, etc.).
- M es el mes del año (por ejemplo, 1 de enero,.. etc.) se debe tener en cuenta que si M > 2, entonces Y y M no se cambian, pero si M = 1 ó 2, entonces Y = Y-1 y M = m + 12.
- D es el día del mes con el tiempo decimal (por ejemplo, para el segundo día de cada mes a las 12:30:30 UT, D = 2,521180556).
- B es igual a 0, para el calendario Julian si la fecha está dentro del calendario Julian (es decir, anterior a 5 de octubre de 1585 o JD < 2299160) y es igual a (2 - A + INT (A / 4)) si es posterior o JD > 2299160), donde A = INT (Y/100).

Se calcula el día Julian Efemérides JDE:

$$JDE = JD \frac{AT}{86400} \quad (2.2)^x$$

El siglo efemérides Julian se subdivide en 36525 días (1 día=86400 seg).

Calcular el siglo Julian (JC) y el siglo efemérides Julian (JCE):

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (2.3)^x$$

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (2.4)^x$$

Calcular el Julian Efemérides del Milenio (JME):

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (2.5)^x$$

Este cambio a fecha Juliana nos permite trabajar con el tiempo con un número y así incluirlo en otros cálculos.

2.1.1.3. *Calcular la longitud heliocéntrica de la Tierra, la latitud y radio vector (A, B y R)*

La longitud heliocéntrica nos permite conocer la posición de la tierra respecto al sol. Por cada fila de la tabla D.1 de los anexos se calcula el término  $L0_i$  (en radianes).

$$L0_i = A_i \cdot \cos(B_i + C_i \cdot JME) \quad (2.6)^x$$

- $i$  es la  $i$ -ésima fila de  $L0$  en la tabla D.1
- $A_i$ ,  $B_i$ , y  $C_i$  son los valores de la  $i$ -ésima fila.  $A$ ,  $B$  y  $C$  son las columnas de A4.2, para el término  $L0$  (en radianes).

Calcular el término  $L0$  (en radianes):

$$L0 = \sum_{i=0}^n L0_i \quad (2.7)^x$$

Donde  $n$  es el número de filas para el término  $L0$  en la tabla D.1 de los anexos.

Se calculan los términos  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ ,  $L4$ , y  $L5$  mediante el uso de las ecuaciones para calcular  $L0$  y  $L0_i$ . Además, se realiza el cambio para los valores 0,1, 2, 3, 4, y 5 correspondientes en las columnas A, B, y C en tabla D.1 (en radianes).

Cálculo la longitud heliocéntrica Tierra  $L$  (en radianes):

$$L = \frac{L0 + L1 * JME + L2 * JME^2 + L3 * JME^3 + L4 * JME^4 + L5 * JME^5}{10^8} \quad (2.8)^x$$

Calculó de  $L$  (en grados):

$$L(\text{grados}) = \frac{L(\text{radianes}) * 180}{\pi} \quad (2.9)^x$$

Para limitar el intervalo de  $L$  en un rango entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  se divide  $L$  por 360 y se guarda la fracción decimal como  $F$ . Si  $L$  es positiva entonces  $L = 360 * F$ . Si  $L$  es negativa entonces el límite será:  $L = 360 - 360 * F$ .

El Cálculo de la latitud heliocéntrica de la tierra,  $B$  (en grados), se realiza con los valores de la tabla D.1 y los cálculos de  $L_0$  y  $L$  (en grados) y reemplazando todas las  $L_s$  en  $B_s$  para todas las ecuaciones. Hay que tener en cuenta que no hay de  $B_2$  a  $B_5$ , en consecuencia, se reemplazan por cero en los cálculos de  $L_0$  y  $L$  en radianes.

Se Calcula el radio vector de la tierra,  $R$  (en Unidades Astronómicas, AU), repitiendo los cálculos del párrafo anterior y reemplazando todas  $L_s$  por  $R_s$  en todas las ecuaciones. Hay que tener en cuenta que no hay  $R_5$ , en consecuencia, se sustituye por cero en los cálculos de  $L_0$  y  $L$  en radianes.

#### 2.1.1.4. Calcular la latitud y la longitud geocéntrica ( $\Theta$ y $\beta$ )

Geocéntrico significa que la posición del sol se calcula con respecto al centro de la Tierra.

Calcular la longitud geocéntrica  $\Theta$  (en grados):

$$\theta = L + 180 \quad (2.10)^x$$

Limitar  $\Theta$  en un rango entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Esto se puede conseguir dividiendo  $\Theta$  por 360 y guardando la fracción decimal como  $F$ . Si  $L$  es positiva entonces  $\Theta = 360 * F$ . Si  $\Theta$  es negativa entonces el límite será:  $\Theta = 360 - 360 * F$ .

Calcular la latitud geocéntrica  $\beta$  (en grados):

$$\beta = -B \quad (2.11)^x$$

La longitud geocéntrica y la longitud heliocéntrica permiten calcular la distancia entre el sol y la tierra dependiendo del tiempo. Este cálculo es importante para la posición solar del captador. El sol en invierno alcanza una menor altura con lo que su movimiento hace que el captador deba moverse con periodos de tiempo menores.

### 2.1.1.5. Calcular la nutación en longitud y oblicuidad ( $\Delta\psi$ y $\Delta\varepsilon$ )

La nutación es una oscilación periódica del eje de rotación de la tierra calculada según su posición media. Esta oscilación es tan cambiante que para calcularla se tiene en cuenta el tiempo y un grupo de valores observados.

Calcular la media de la elongación de la luna desde el sol,  $X_0$  (en grados):

$$X_0 = 297,85036 + 445267,111480 * JCE - 0,0019142 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474} \quad (2.12)^x$$

Cálculo de la anomalía media del Sol (Tierra),  $X_1$  (en grados):

$$X_1 = 357,52772 + 35999,050340 * JCE - 0,0001603 * JCE^2 - \frac{JCE^3}{300000} \quad (2.13)^x$$

Cálculo de la anomalía media de la luna,  $X_2$  (en grados):

$$X_2 = 134,96298 + 477198,867398 * JCE + 0,0086972 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{56250} \quad (2.14)^x$$

Calcular el argumento de latitud de la luna,  $X_3$  (en grados):

$$X_3 = 93,27191 + 483202,017538 * JCE + 0,0036825 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{327270} \quad (2.15)^x$$

Calcular la longitud del nodo ascendente de la órbita media de la Luna sobre la eclíptica. Esto es uno de los elementos orbitales utilizados para especificar la órbita de un objeto en el espacio.  $X_4$  (en grados):

$$X_4 = 125,04452 - 1934,136261 * JCE + 0,0020708 * JCE^2 + \frac{JCE^3}{450000} \quad (2.16)^x$$

Por cada fila de la tabla D.2 de los anexos, calcular los términos  $\Delta\psi$  y  $\Delta\varepsilon$  (en 0.0001 de arc segundos),

$$\Delta\psi_i = (a_i + b_i * JCE) * \sin\left(\sum_{j=0}^4 X_j * Y_{i,j}\right) \quad (2.17)^x$$

$$\Delta\varepsilon_i = (c_i + d_i * JCE) * \cos\left(\sum_{j=0}^4 X_j * Y_{i,j}\right) \quad (2.18)^x$$

- $A_i, B_i, C_i$  y  $D_i$  son los valores listados en la filas y columnas de la tabla D.2.
- $X_j$  es el valor j-ésimo calculado en las ecuaciones de  $X_0$  a la  $X_5$
- $Y_{ij}$  es el valor listado en la i-ésima fila y columna j de la tabla D.2.

Calcular la nutación en longitud  $\Delta\Psi$  (en grados):

$$\Delta\Psi = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\Psi_i}{36000000} \quad (2.19)^x$$

Donde n es el número de filas en la tabla D.2 de los anexos.

Calcular la nutación en oblicuidad,  $\Delta\varepsilon$  (en grados):

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^n \Delta\varepsilon_i}{36000000} \quad (2.20)^x$$

El cálculo de la nutación sirve para eliminar los errores que se incluirían en la posición solar debidos al eje rotacional de la tierra.

#### 2.1.1.6. Cálculo de la verdadera oblicuidad eclíptica $\varepsilon$

Cálculo de la media de la oblicuidad,  $\Delta\varepsilon$  (en arc seg):

$$\varepsilon_0 = 84381,448 - 4680,93U - 1,55U^2 + 1999,25U^3 - 51,38U^4 - 249,67U^5 - 39,05U^6 + 7,12U^7 + 27,87U^8 + 5,79U^9 + 2,45U^{10} \quad (2.21)^x$$

Donde  $U = JME/10$

Cálculo de la verdadera oblicuidad eclíptica (en grados):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon \quad (2.22)^x$$

2.1.1.7. *Cálculo para la corrección de la aberración,  $\Delta t$  (en grados):*

$$\Delta t = -\frac{20,4898}{3600 * R} \quad (2.23)^x$$

Esta aberración se tiene en cuenta para calcular el cambio de dirección de los rayos solares al incidir en la atmosfera terrestre.

2.1.1.8. *Cálculo de la longitud aparente del sol,  $\lambda$  (en grados):*

$$\lambda = \Theta + \Delta\psi + \Delta t \quad (2.24)^x$$

2.1.1.9. *Calcular el tiempo aparente dado cualquier tiempo respecto Greenwich,  $V$  (en grados):*

Calcular la media de tiempo respecto Greenwich,  $V_0$  (en grados),

$$v_0 = 280,46061837 + 360,98564736629 * (JD - 2451545) + 0,000387933 * JC^2 - \frac{JC^3}{38710000} \quad (2.25)^x$$

Limitar  $v_0$  en un rango entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Esto se puede conseguir dividiendo  $v_0$  por 360 y guardando la fracción decimal como F. Si L es positiva entonces  $v_0 = 360 * F$ . Si  $v_0$  es negativa entonces el límite será:  $v_0 = 360 - 360 * F$ .

Calcular el tiempo aparente dado cualquier tiempo respecto Greenwich,  $V$  (en grados)

$$v = v_0 + \Delta\psi * \cos(\varepsilon) \quad (2.26)^x$$

El cálculo de este valor  $V$  de la fórmula 2.26 permite saber la posición del sol para cualquier posición mundial ya que sino dependería de la franja horaria de cada lugar.

2.1.1.10. *Calcular la ascensión solar respecto la tierra,  $\alpha$  (en grados)*

La ascensión solar es muy importante para determinar los valores de energía que se pueden obtener. Además nos permite conocer el ángulo en el que se debe orientar el captador. En la tabla 1.1 de este proyecto se observa como dependiendo de la distancia de atmosfera que la luz debe atravesar la irradiación aumenta o disminuye.

El cálculo de la ascensión solar nos permite conocer su posición respecto al tiempo.

Calcular la ascensión solar,  $\alpha$  (en radianes)

$$\alpha = \text{Arc tan}2\left(\frac{\sin \lambda * \cos \varepsilon - \tan \beta * \sin \varepsilon}{\cos \lambda}\right) \quad (2.27)^x$$

Donde arctan2 es una función arco tangente que se aplica para el numerador y el denominador (en lugar de la división real) para mantener el cuadrante correcto de la posición.  $\alpha$  está en el rango  $\pi, -\pi$ .

$$\alpha(\text{grados}) = \frac{\alpha(\text{radianes}) * 180}{\pi} \quad (2.28)^x$$

Limitar el intervalo de  $\alpha$  a un rango entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Esto se puede conseguir dividiendo  $\alpha$  por 360 y guardando la fracción decimal como F. Si  $\alpha$  es positiva entonces  $\alpha = 360 * F$ . Si  $\alpha$  es negativa entonces el límite será:  $\alpha = 360 - 360 * F$ .

#### 2.1.1.11. Calcular la declinación solar respecto la tierra, $\delta$ (en grados)

Del mismo modo que en el apartado anterior es necesario conocer como el ángulo de posición solar va disminuyendo. Este valor es importante para orientar el captador y determinar la energía solar que llega a la superficie terrestre.

$$\delta = \text{Arc sin}(\sin \beta * \cos \varepsilon + \cos \beta * \sin \varepsilon * \sin \lambda) \quad (2.29)^x$$

Donde  $\delta$  es positivo o negativo si el sol está al norte o al sur del ecuador celeste respectivamente.

$$\delta(\text{grados}) = \frac{\delta(\text{radianes}) * 180}{\pi} \quad (2.30)^x$$

#### 2.1.1.12. Cálculo del ángulo del observador en la hora local, H (en grados)

$$H = \nu + \sigma - \alpha \quad (2.31)^x$$

Donde  $\sigma$  es la longitud geográfica, positiva o negativa para el este o el oeste de Greenwich respectivamente.

Limitar el intervalo de H a un rango entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Esto se puede conseguir dividiendo H por 360 y guardando la fracción decimal como F. Si H es positiva entonces  $H = 360 * F$ . Si H es negativa entonces el límite será:  $H = 360 - 360 * F$ . Hay que tener en cuenta que se mide hacia el oeste desde el sur en este algoritmo.

#### 2.1.1.13. Cálculo de la ascensión topocéntrica del sol, $\alpha'$ (en grados)

Topocéntrico significa que la posición del sol se calcula con respecto a la posición del observador local en la superficie de la Tierra. Dicho de otro modo, se determina como el sol asciende dependiendo de la posición en la tierra.

Calcular el paralaje horizontal ecuatorial del sol,  $\xi$  (en grados):

$$\xi = \frac{8,794}{3600 * R} \quad (2.32)^x$$

Calcular R como L en el punto 2.1.1.3 cambiando los valores por los de R de la tabla D.2 de los anexos.

Calcular el término u (en radianes):

$$u = \text{Arc tan}(0,99664719 * \tan \varphi) \quad (2.33)^x$$

Donde  $\varphi$  es la latitud geográfica, positiva o negativa si está al norte o al sur del ecuador, respectivamente. Hay que tener en cuenta que el número 0.99664719 es igual a  $(1 - f)$ , donde f es el coeficiente de aplanamiento de la tierra.

Calcular el término x:

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} * \cos \varphi \quad (2.34)^x$$

Donde E es la elevación del observador (en metros). Hay que tener en cuenta que x es igual a  $\rho * \cos \varphi$  donde  $\rho$  es la distancia del observador al centro de la Tierra, y  $\varphi$  es latitud geocéntrica del observador.

Calcular el término y:

$$y = 0,99664719 * \sin u + \frac{E}{6378140} * \sin \varphi \quad (2.35)^x$$

y es igual a  $\rho * \sin \varphi$ .

Calcular la paralaje en la ascensión respecto el sol,  $\Delta\alpha$  (en grados):

$$\Delta\alpha = \text{Arc tan} 2\left(\frac{-x * \sin \xi * \sin H}{\cos \delta - x * \sin \xi * \cos H}\right) \quad (2.36)^x$$

Entonces cambiar  $\Delta\alpha$  a grados con:

$$\Delta\alpha(\text{grados}) = \frac{\Delta\alpha(\text{radianes}) * 180}{\pi} \quad (2.37)^x$$

2.1.1.14. Calcular el ángulo topocéntrico según la hora local,  $H'$ (en grados)

$$H' = H - \Delta\alpha \quad (2.38)^x$$

2.1.1.15. Calcular el ángulo cenital topocéntrico,  $\Theta$  (en grados)

Es en este apartado donde se calcula el ángulo de elevación que deberá tener el captador para su orientación con el sol.

Calcular el ángulo de elevación topocéntrico sin corrección de la refracción atmosférica,  $e_0$  (en grados)

$$e_0 = \text{Arc sin}(\sin \varphi * \sin \delta' + \cos \varphi * \cos \delta' * \cos H') \quad (2.39)^x$$

Entonces pasar a grados:

$$e_0(\text{grados}) = \frac{e_0(\text{radianes}) * 180}{\pi} \quad (2.40)^x$$

Calcular la corrección de la refracción atmosférica,  $\Delta e$  (en grados)

$$\Delta e = \frac{P}{1010} * \frac{283}{273 + T} * \frac{1,02}{60 * \tan(e_0 + \frac{10,3}{e_0 + 5,11})} \quad (2.41)^x$$

- P es la presión media anual local (en milibares).
- T es la temperatura media anual local (en °C).
- $e_0$  es en grados.

Calcular el ángulo topocéntrico de elevación, e (en grados):

$$e = e_0 + \Delta e \quad (2.42)^x$$

Calcular el ángulo cenital respecto el centro de la tierra,  $\theta$  (en grados):

$$\theta = 90 - e \quad (2.43)^x$$

Con este parámetro se obtiene la elevación en la que deberá estar colocado el captador para recibir la máxima irradiación. El ángulo cenital es el medido 90°C respecto a la superficie mientras que e es directamente la elevación.

2.1.1.16. Calcular el ángulo de azimut topocéntrico,  $\Phi$  (en grados)

Es en este apartado donde se calcula el ángulo acimutal que deberá tener el captador para su orientación con el sol.

Calcular el ángulo de azimut topocéntrico,  $\Gamma$  (en grados)

$$\Gamma = \text{Arc tan} 2\left(\frac{\sin H'}{\cos H' * \sin \varphi - \tan \delta' * \cos \varphi}\right) \quad (2.44)^x$$

Para pasar  $\Gamma$  a grados usar:

$$\Gamma(\text{grados}) = \frac{\Gamma(\text{radianes}) * 180}{\pi} \quad (2.45)^x$$

Limitar el intervalo de  $\Gamma$  a un rango entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Esto se puede conseguir dividiendo  $\Gamma$  por 360 y guardando la fracción decimal como F. Si  $\Gamma$  es positiva entonces  $\Gamma = 360 * F$ . Si  $\Gamma$  es negativa entonces el límite será:  $H = 360 - 360 * F$ .

Calcular el ángulo de azimut topocéntrico,  $\Phi$  para los seguidores de radiación solar (en grados):

$$\phi = \Gamma + 180 \quad (2.46)^x$$

Limitar el intervalo de  $\Phi$  a un rango entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Esto se puede conseguir dividiendo  $\Phi$  por 360 y guardando la fracción decimal como F. Si  $\Phi$  es positiva entonces  $\Phi = 360 * F$ . Si  $\Phi$  es negativa entonces el límite será:  $\Phi = 360 - 360 * F$ .

Con este parámetro conseguimos la orientación o acimut en grados donde deberemos apuntar el captador.

## CAPÍTULO 3. MATERIALES

En este tercer capítulo se recopila información de los materiales que forman el sistema de captación, distribución e iluminaria.

Una vez definido como el captador es capaz de orientarse, se muestran las características del material de captación. En este sistema son lentes. Las lentes convergentes son capaces de concentrar la luz que incide en una de sus caras y unirlos en un único punto.

Concentrada toda la energía de la superficie de la lente en un punto, se utiliza una fibra óptica de alta calidad y un núcleo de gran tamaño (1,5mm) para distribuir esta luz hasta el lugar deseado.

Finalmente, la luz llega al final de la fibra óptica. Se necesita distribuir esta luz en un ángulo más extenso con tal de iluminar una mayor superficie. Por ello, en el final de la distribución se añade un difusor que nos permita distribuir la luz con ángulos de hasta 60°.

### 3.1 Lentes

Se necesita una superficie capaz de reflejar lo mínimo posible la luz y a su vez agrupar la irradiación que incide en su superficie. El objeto más adecuado para realizar esta función son las lentes.

Una lente es un dispositivo óptico típicamente hecho de vidrio o plástico transparente con la capacidad de conseguir formar la imagen de un objeto enfocado a través de ella transmitiendo y refractando la luz. La forma de la lente generalmente tiene forma circular, con dos superficies pulidas que permiten que distintos haces de luz converjan o diverjan según su tipo. <sup>xi</sup>

- Lentes convergentes: son todas aquellas lentes que su punto focal sea mayor que 0. Lo que significa que los rayos que incidan paralelos a la superficie de la lente serán desviados al mismo punto.
- Lentes divergentes: son todas aquellas lentes que su punto focal es menor que 0. Todos los rayos paralelos que inciden sobre ella, salen divergiendo de la misma, de forma que parecen que parten de un mismo punto anterior a la lente.

Para este estudio queremos concentrar la luz en un único punto con tal de obtener la mayor cantidad dentro de la fibra óptica, por tanto, se necesitará una lente convergente.

La distancia focal de una lente está determinada por la ecuación de lensmaker. Para este proyecto es de gran importancia, dado que necesitamos que el ángulo que forma el punto focal con los extremos de la lente deba ser

inferior a la apertura numérica de la fibra óptica. Así se consigue que toda la luz que incida en el medio se propague. La distancia focal se calcula de la siguiente manera:

$$P = \frac{1}{f} = \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (3.1)^{xii}$$

Dónde:

P: es la potencia de la lente (inversa de la distancia focal)

F: es la distancia focal de la lente

R<sub>1</sub>: es el radio de curvatura de la superficie de la lente más cercana a la fuente de luz.

R<sub>2</sub>: es el radio de curvatura de la superficie de la lente más alejada a la fuente de luz

N: es el índice de refracción del material de la lente

D: es el espesor de la lente.

Para reducir la distancia focal y la cantidad de material requerido se utilizan las lentes Fresnell. Estas lentes aportan más potencia en comparación con una lente esférica convencional. Se consigue dividiendo la lente en un conjunto de secciones anulares concéntricas conocidas como "zonas de Fresnell". El material utilizado puede ser vidrio o plástico flexible de un espesor menor de 5mm.

Esta división permite una reducción sustancial en el espesor (y por lo tanto la masa y el volumen de material), pero por el contrario se reduce la calidad de formación de la imagen, por lo que las aplicaciones que se precisen para la formación de imágenes como la fotografía todavía utilizan lentes convencionales.

La elección del material es importante según el dominio espectral, temperatura, si el material estará condicionado a situaciones meteorológicas, etc. Hay tres materiales con el que se hacen la mayoría de estas lentes<sup>xiii</sup>:

Acrílico: es el material plástico más ampliamente aplicable para aplicaciones ópticas. Su transmitancia es casi plana dejando pasar hasta un 92% de la radiación ultravioleta, resistente a los impactos y a las condiciones meteorológicas entre otras características.

Vinilo rígido: de material plástico tiene características que lo hacen muy asequible. Da un alto índice de refracción, también es apropiado para porque puede alcanzar altas temperaturas. Aunque no es útil para aplicaciones en que se necesite un alto nivel de transmitancia ni de precisión en la longitud focal.

Policarbonato: este material es muy similar al acrílico teniendo mejores características en lo que a temperaturas se refiere y con gran resistencia a los golpes.

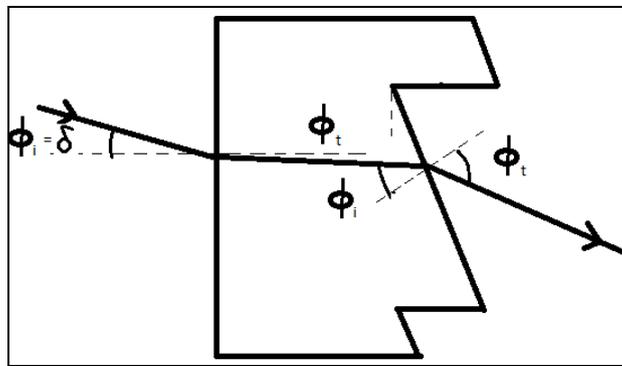
En este tipo de lentes es muy importante controlar como cambia de dirección la luz con los cambios de material (aire, plástico, aire) y la inclinación del material.

La transmisividad para la incidencia de la luz solar entre dos medios ópticos viene dado por:

$$T(\phi_i, \phi_t) = \frac{\sin 2\phi_i \cdot \sin 2\phi_t [1 + \sec^2(\phi_i - \phi_t)]}{2 \sin^2(\phi_i + \phi_t)} \quad (3.2)^{xiv}$$

Donde  $\Phi_i$  es el ángulo de incidencia y  $\Phi_t$  el ángulo de refracción.

En la siguiente figura podemos ver las características de como incide y como sale un rayo de luz solar en una lente de Fresnell.



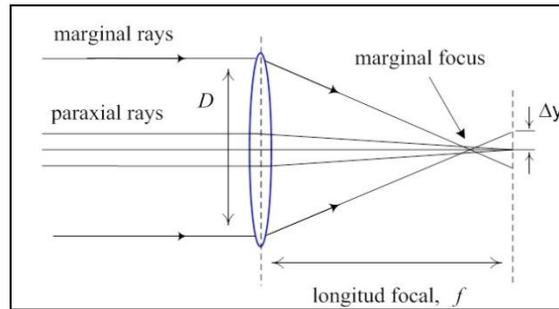
**Fig. 3.1.** Luz a través de lente de Fresnell<sup>xiv</sup>

### 3.1.1 Niveles de pérdida en las lentes

Las lentes no forman imágenes perfectas, y siempre hay algún grado de distorsión o aberración introducida por la lente. Esta provoca que la imagen sea una réplica imperfecta del objeto o la distancia focal varíe al incidir luces de distinta longitud de onda. El diseño cuidadoso del sistema de lentes para una aplicación particular asegura que la aberración se minimice. Hay varios tipos diferentes de aberración que pueden afectar a la calidad de imagen.

- Aberración esférica

Esta tipo de aberración se produce porque las superficies esféricas de la lente no tienen una forma precisa. Esto tiene como consecuencia que según en qué lugar de la lente incida un rayo de luz este haga cambiar el punto focal. Puede minimizarse mediante la elección cuidadosa de la curvatura de las superficies para una aplicación particular.



**Fig. 3.2.** Aberración esférica<sup>xv</sup>

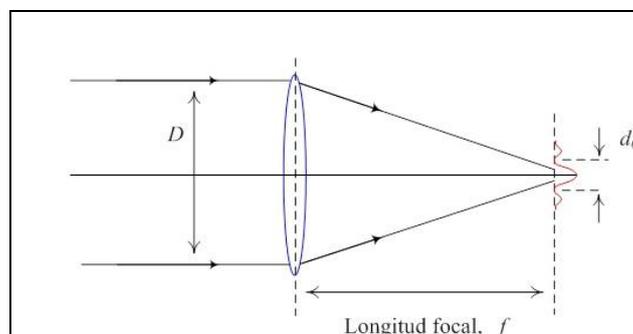
$$\Delta y = A_3 \left( \frac{D}{2} \right)^3 \quad (3.3)^{xv}$$

Donde  $A_3$  es el coeficiente de aberración esférica. Para una lente plano-convexa es:

$$\Delta_3(f)_{n=1.5} = \frac{-0.292}{f^2} m^{-2} \quad (3.4)^{xv}$$

- Difracción límite

Esta difracción determina la resolución de un sistema óptico de formación de una imagen a través de una lente. Hay un máximo fundamental para la resolución de cualquier sistema óptico. Este máximo fundamental está limitado por la difracción. Un sistema óptico con la capacidad de producir imágenes con una resolución angular tan buena como el límite teórico del instrumento se dice que es de difracción limitada y se determina de la siguiente manera:



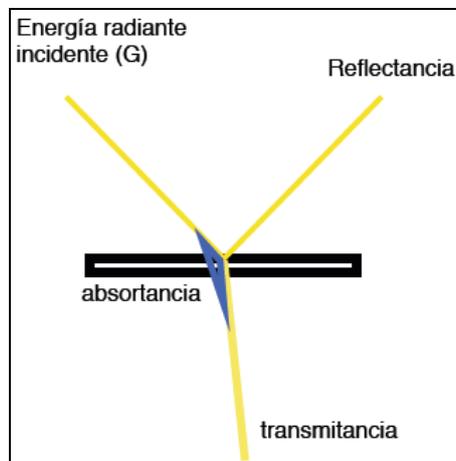
**Fig. 3.3.** Difracción límite<sup>xv</sup>

$$d_0 = 2.44 \frac{\lambda f}{D} \quad (3.5)^{xv}$$

- Aberración cromática

Esta aberración está causada por la dispersión que produce el material de la lente por la variación de su índice de refracción,  $n$ , con la longitud de onda de la luz. Como la fórmula de lensmaker determina la distancia focal  $f$  depende del índice de refracción este cambiará según el rango de longitudes de onda que incidan en el material. Para reducir este efecto se pueden añadir un doblete acromático en el que dos materiales con diferente dispersión se unen entre sí para formar una única lente.

Considerando que una energía radiante incide sobre la superficie de un cuerpo como el siguiente:



**Fig. 3.4.** Transmitancia, absortancia y reflectancia <sup>xvi</sup>

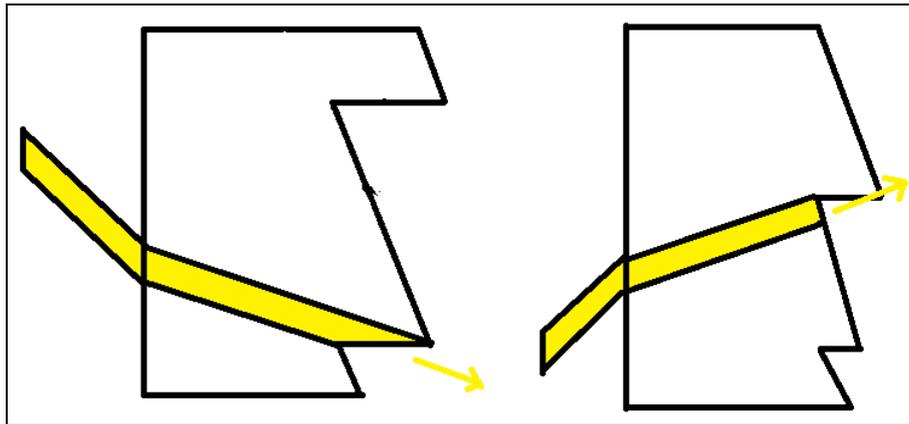
Absortancia: como la fracción de la radiación incidente absorbida por el material.

Reflectancia: como la fracción de la energía incidente reflejada por el material.

Transmitancia: como la fracción de la radiación incidente transmitida a través del material.

Estas radiaciones dependen principalmente de la longitud de onda de la fuente de radiación y del tipo de material en el que se incide.

Además de estas posibles pérdidas, las lentes de Fresnell tienen una pérdida significativa de luz por culpa de sus pliegues. Como se representa en los siguientes dibujos hay varias posibles "sombras" con la incidencia de la luz.



**Fig. 3.5.** Pérdida en las zonas de Fresnel<sup>xiv</sup>

En el supuesto de que los rayos siempre incidan de manera perpendicular este efecto se minimiza.

## 3.2 Fibras ópticas

En el siguiente apartado se van a detallar las características del material que va a permitir la distribución de luz. La fibra óptica colocada en la distancia focal de la lente es capaz de captar esa energía y hacerla rebotar en sus paredes hasta el final del recorrido. Es de gran importancia que el núcleo de la fibra sea lo más amplio posible para conseguir captar toda esa luz.

Otra característica fundamental es tener en cuenta las pérdidas para los niveles de longitud de onda de la luz y así elegir la fibra que mejor se adapte a las particularidades de diseño.

### 3.2.1 Características principales<sup>xvii</sup>

La fibra óptica está constituida por dos cilindros coaxiales de materiales plásticos o vidriosos de alta pureza, que por medio de la reflexión de luz se logra transmitir información (o en este caso sólo el haz de luz), presentando ventajas con respecto a los conductores de materiales metálicos, entre las principales figuran:

- Transmite luz, en consecuencia no se introduce interferencia.
- Tiene gran capacidad de transmisión (180 a 200 comunicaciones telefónicas a la vez) con respecto a los conductores de cobre.
- La transmisión no es interferida por campos eléctricos y/o magnéticos.
- La energía puesta en juego en la transmisión es muy baja.
- Gran ancho de banda.
- Diámetro reducido.
- Peso reducido.

- Material totalmente dieléctrico: no existe posibilidad de tensiones inducidas que pueden producir chispas o cortocircuitos.

Las fibras ópticas logran conducir radiación en una región del espectro electromagnético entre 200 nm y 2000nm. El sol irradia la mayor cantidad de energía comprendida en longitudes de onda entre 250nm y 2500nm aproximadamente.

Por tanto, se puede utilizar este elemento para la conducción de la luz visible que engloba longitudes de onda entre 380 nm y 780nm.

Para el caso de comunicaciones las longitudes de onda más utilizadas son: 780, 850, 1300, 1550 y 1625 nm. Esto es así porque las pérdidas son mayores a longitudes de onda más cortas.

Las fibras ópticas se suelen clasificar en dos tipos según el número de modos de propagación que permitan transportar:

Fibras monomodo: sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño (8,3 a 10 micrones) que sólo permite un modo de propagación. Su transmisión es paralela al eje de la fibra. Este tipo de fibras permiten alcanzar grandes distancias (hasta 400 km máximo, mediante un láser de alta intensidad) y transmitir elevadas tasas de información (decenas de Gb/s) con un ancho de banda de hasta 50 GHz. Para las transmisiones de datos se utilizan longitudes de onda nominales comprendidas entre los 850nm y los 1550nm (infrarrojo).

Fibra multimodo: es aquella en la que los haces de luz pueden circular por más de un modo o camino. Esto supone que no llegan todos a la vez. Se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 1 km, es simple de diseñar y económico y con un ancho de banda de hasta 1 GHz. Para las transmisiones de datos se utilizan longitudes de onda nominales comprendidas entre los 850nm y los 1300nm. El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento.

Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión. Con estas características, la fibra óptica utilizada en el sistema de captación es multimodo.

### 3.2.2 Leyes físicas<sup>xviii</sup> <sup>xix</sup>

En este apartado se determinan las características físicas que se deben cumplir para la transmisión del haz de luz por la fibra óptica:

### 3.2.2.1 Ley de Snell

Desde el punto de vista de la óptica, los dos elementos necesarios de una fibra óptica son el núcleo y su recubrimiento. El núcleo es la parte interior de la fibra óptica a través de la cual la luz es guiada. El recubrimiento, por otra parte, es un material que envuelve al núcleo y que presenta un índice de refracción menor. Así la diferencia entre los índices de refracción de los materiales permite el fenómeno de la reflexión interna total.

Reflexión total: cuando el rayo luminoso incide con ángulo cada vez mayor desde una sustancia ópticamente más densa con un índice de refracción  $n_1$  sobre la superficie de separación con una sustancia ópticamente menos densa con ángulo de incidencia  $\alpha$  puede llegar a ser igual a  $90^\circ$ .

Para determinar el ángulo límite:

$$\text{sen } \alpha = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.6)^{\text{xviii}}$$

Ejemplo:

Para el vidrio ( $n_1 = 1,5$ ) y aire ( $n_0 = 1$ ):

$$\text{sen } \alpha = \frac{n_2}{n_1} \approx 0,67 \quad (3.7)^{\text{xviii}}$$

$$\alpha = 42^\circ \quad (3.8)^{\text{xviii}}$$

La sustancia más densa, es aquella que tiene un índice de refracción mayor y una velocidad de la luz menor.

El índice de refracción  $n$  de una sustancia depende fundamentalmente de la correspondiente longitud de onda de la luz. En el caso del vidrio de cuarzo y las longitudes de onda del infrarrojo (muy utilizadas para las comunicaciones ópticas) este índice decrece continuamente cuando se incrementa la longitud de onda.

La magnitud del índice de refracción vale para ondas luminosas que se propagan solamente con una única longitud de onda y con amplitud constante.

En estas condiciones las ondas no pueden transmitir informaciones, lo cual se logra sólo cuando se aplica modulación a las mismas. En las comunicaciones ópticas (digitales) la modulación se efectúa por medio de pulsos luminosos, se trata de grupo de ondas de corta duración que contienen ondas luminosas de diferentes longitudes. Las diferentes ondas integrantes de estos grupos no se

propagan con la misma velocidad ya que sus longitudes de onda difieren entre sí. La velocidad de propagación de un grupo de ondas se denomina velocidad grupal, para la cual se define el índice de refracción del grupo  $n_g$  por medio de la relación:

$$n_g = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (3.9)^{xviii}$$

### 3.2.2.2 Apertura numérica

En los conductores de fibras ópticas se utiliza el efecto de la reflexión total para conducir el rayo luminoso en su centro. Esto se produce en el "núcleo" formado por vidrio con un índice de refracción  $n_1$  y, envolviéndolo un "recubrimiento" formado por un vidrio con un índice de refracción  $n_2$ .

Así que analizando la expresión:

$$\text{sen} \alpha = \frac{n_2}{n_1} = n_0 \quad (3.10)^{xvii}$$

Se concluye que todos los rayos luminosos que incidan con un ángulo menos que  $(90^\circ - \alpha_0)$  con respecto al eje de fibras ópticas son conducidos en el núcleo.

Para acoplar al núcleo un rayo luminoso desde el exterior de la fibra (aire  $n_0 = 1$ ) el ángulo entre el rayo luminoso y el eje de la fibra se rige de acuerdo con la ley de refracción:

$$\frac{\text{sen} \Theta}{\text{sen}(90^\circ - \alpha_0)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.11)^{xvii}$$

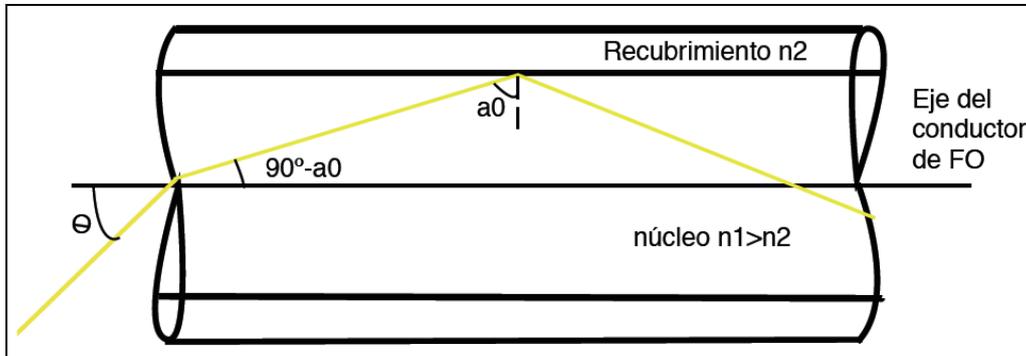
y con ello:

$$\text{sen} \Theta = n_1 - \cos \alpha_0 = n_1 - \sqrt{1 - \text{sen}^2 \alpha_0} \quad (3.12)^{xvii}$$

Considerando la condición del ángulo límite se obtiene:

$$\text{sen} \Theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.13)^{xvii}$$

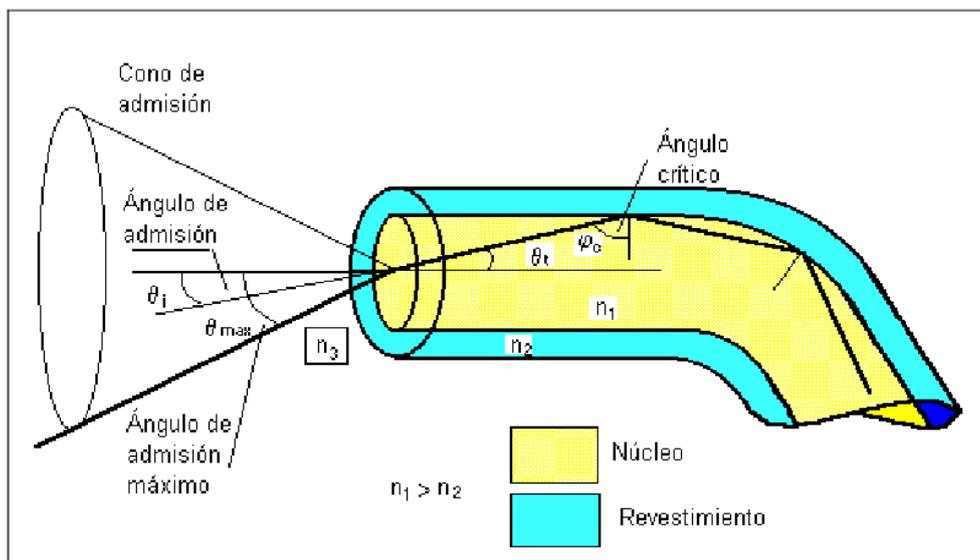
Es únicamente función de los índices e refracción  $n_1$  y  $n_2$  del conductor de fibras ópticas.



**Fig. 3.6.** Apertura numérica

El máximo ángulo de acoplamiento  $\Theta_{max}$  se denomina ángulo de aceptación del conductor de fibras ópticas y el seno del ángulo de aceptación se denomina apertura numérica (AN) del conductor de fibras ópticas:

$$AN = \text{sen}\Theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \tag{3.14}^{xvii}$$



**Fig. 3.7.** Admisión en una fibra óptica<sup>xx</sup>

### 3.2.3 Pérdidas en transmisión y dispersión <sup>xxi</sup>

La señal o luz que se envía a través de la fibra óptica y la que se recibe deberían ser exactamente iguales, pero a continuación se muestran las causas habituales de que esto no siempre ocurra. A la pérdida se le conoce como atenuación, su unidad de lectura son los decibelios (dB). La pérdida viene dada por varias causas o factores, se explican brevemente a continuación las más habituales:

- Pérdida por absorción: pueden existir impurezas en la fibra óptica que absorben la luz y la convierten en calor, existiendo tres factores que contribuyen a las pérdidas por absorción: Absorción UV, IR y resonancia de ion. El dióxido de silicio tiene picos de resonancia de absorción en la longitud de onda de ultravioleta (transiciones electrónicas) y en el infrarrojo más allá de 1,6  $\mu\text{m}$  pero es altamente transparente en el visible e infrarrojo cercano. Por lo que para la transmisión de luz la absorción no es un problema.
- Dispersión modal: es la diferencia en tiempo de la llegada de los haces de luz hasta su destino (en el caso de transmisión de luz no es importante).
- Dispersión por radiación:

*Microcurvaturas*: son causadas por los procesos de fabricación, y las causas pueden ser pequeñas diferencias de diámetro en el núcleo debido a tensiones en el cable, irregularidades entre el recubrimiento y el núcleo, torsiones o presiones entre otras causas.

*Macrocurvaturas*: vienen dadas de curvas producidas en el cable, consecuentemente hacen que los modos no puedan seguir su trayectoria correctamente.

Estas pérdidas radiativas se mantienen bajas con un revestimiento de espesor suficiente. Se utiliza un recubrimiento comprimible para proteger la fibra de fuerzas externas, y una estructura de cable que evita las curvas cerradas.

- Perdidas por acoplamiento

Son las pérdidas resultantes de los empalmes ya sean de unión mecánica, por pegamentos especiales o por fusión de arco.

- La dispersión

Se le conoce como el esparcimiento de un pulso a lo largo del recorrido por la fibra óptica. Su aparición causa un retardo en la recepción entre los diferentes modos, conocido como (Differential Mode Delay, DMD).

Este suceso aumenta cuanto más larga es la transmisión. El problema está en la sucesión de pulsos que recibe el receptor, que al encontrarse un

cúmulo de pulsos solapados, no es capaz de decodificar la señal y por ende saber si está en estado alto o bajo.

La solución se halla en una construcción interna del núcleo llamada índice gradual. Los modos viajan de forma sinusoidal a través del núcleo, llegando a su destino de forma sincronizada.

Estas pérdidas pueden ser críticas cuando se trata de enviar datos pero no en el caso de transmisión de luz.

- La dispersión Rayleigh<sup>xix</sup>

Se produce por una estructura inusual del vidrio que hace que resulte distinto el índice de refracción de la luz en distancias pequeñas en comparación con la longitud de onda. El núcleo de la fibra puede no ser perfecto pudiendo existir microscópicas irregularidades en su longitud que afectan a los modos, estos viajan por el núcleo, pero si se encuentran con estas irregularidades el haz de luz se abre y consecuentemente viaja en direcciones erróneas.

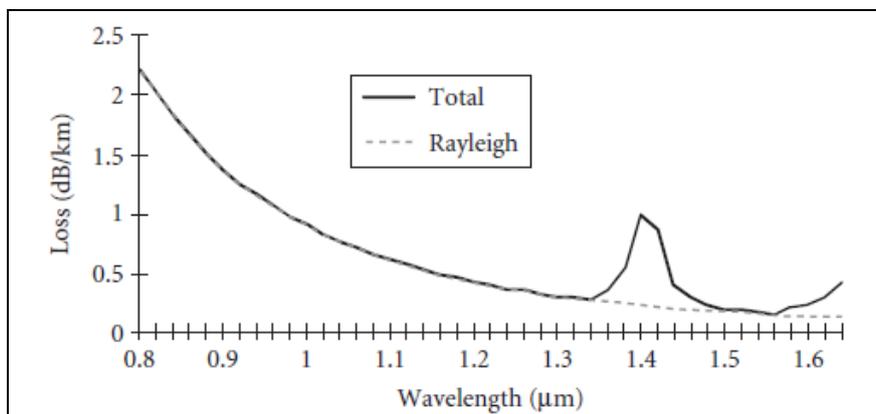
Esto conduce a una pérdida definida como:

$$\alpha = \frac{B}{\lambda^4} \quad (3.15)$$

Donde B es:

$$B \approx 0,9 \frac{db}{km} \mu m \quad (3.16)$$

La atenuación en función de la longitud de onda se muestra en la figura:



**Fig. 3.8.** Curva pérdidas fibra óptica<sup>xix</sup>

El pico de atenuación en  $\lambda = 1,4$  micras es una absorción de resonancia debido a pequeñas cantidades de agua en la fibra. Para la longitud de onda de la luz

(entorno a las 0,5  $\mu\text{m}$ ) las pérdidas provocadas en este tipo de atenuación son muy altas respecto a otras longitudes de onda y pueden llegar a 20db/km.

### 3.3 Difusores

Una vez la luz llegue al extremo final de la fibra óptica, se debe distribuir. Esta distribución debe ofrecer un cierto ángulo para iluminar puntos de luz que abarquen una mayor superficie. Por este motivo, se utilizarán difusores para conseguir que la luz se esparza consiguiendo un alumbramiento más completo.

En óptica, un difusor es un dispositivo que dispersa la luz que recibe para darla de manera uniforme en una superficie mayor. La luz difusa se puede obtener fácilmente haciendo reflejar un haz de luz en una superficie blanca, mientras otro tipo de difusores ópticos más compactos pueden utilizar objetos translúcidos con materiales como el vidrio esmerilado, teflón, difusores holográficos, difusores de vidrio opalino, y otros con distintos tipos de cristales. Substrae determina el nivel de pérdida debido a la dispersión.

- Difusores holográficos

Los difusores holográficos<sup>xxii</sup> se utilizan para controlar el área de iluminación difusa manteniendo la eficiencia de transmisión entorno al 90%. Esta iluminación puede proceder de distintas fuentes lumínicas como lámparas incandescentes, LEDs, etc. La dispersión de este tipo de difusores depende en gran parte del haz de entrada y de los diferentes ángulos de incidencia en el material que harán divergir angularmente de distinta manera.

La formación de elementos ópticos holográficos (HOE) permite difundir la luz en la dirección del haz de luz que proporciona la fuente obteniendo una retrodifusión mínima.

A diferencia de muchos elementos holográficos, estos componentes específicos de policarbonato se pueden utilizar en todo el espectro visible e infrarrojo.

- Difusores de vidrio esmerilado

Los difusores de vidrio molido son utilizados por una gran variedad de aplicaciones industriales. Estos difusores están en parte compuestos por sustrato de vidrio de sosa y cal con una gran propiedad para reflejar luz en la longitud de onda visible creando una superficie difusa en el cristal y es ideal para aplicaciones generales de difusión. Dependiendo de la cantidad de sosa y cal se establece un compromiso entre bajas pérdidas por dispersión y distintos niveles de difusión (mayor cantidad más difusión aunque más pérdidas). Las aplicaciones típicas incluyen el uso en pantallas, iluminación, etc.

- Difusores de vidrio opalino

Estos difusores son parecidos a los de vidrio esmerilado pero con una superficie de color blanco llamado "opal" que permite difundir la luz uniformemente. El nivel de difusión en vidrio opal ocasiona una gran cantidad de pérdida por dispersión.

## CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL SISTEMA

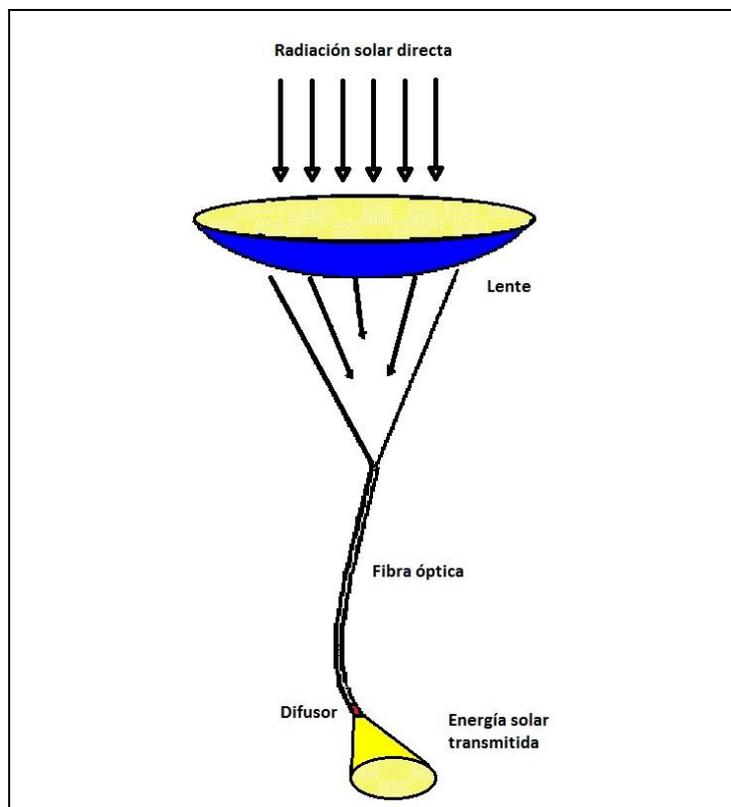
Una vez agrupadas las características necesarias en un sistema de captación, se crea un diseño a partir de las especificaciones anteriores.

Las propiedades singulares de la luz solar son a las que se deben adecuar todas las partes de este sistema.

Las lentes deberán tener la capacidad de concentrar la luz en el punto más reducido posible. Otra característica imprescindible de la lente es que el material no absorba ni refleje la gran parte de la irradiancia que recibe en su superficie. Estas lentes deben adecuarse a la posición solar que depende del momento temporal. Por ello se implementa un seguidor solar, de manera que la energía siempre incida perpendicularmente a la superficie captadora.

Concentrada toda la energía en un punto, es necesario un material capaz de distribuirla. Las fibras ópticas en este caso permiten transportar luz haciendo rebotar en su núcleo las ondas electromagnéticas.

La luz al final del recorrido se presenta con el mismo ángulo con el que rebota en la fibra óptica. Este ángulo es demasiado pequeño para iluminar un espacio. Se añade un difusor que permita darle mayor obertura al ángulo de salida.



**Fig. 4.1.** Esquema final del captador

En los apartados posteriores se detalla el sistema para conocer la viabilidad de la captación y distribución de luz solar.

#### 4.1 Diseño de la superficie captadora

El captador está formado por la superficie captadora (lente) y un seguidor solar capaz de mover la lente en orientación y elevación. El tamaño del captador depende en gran medida de la distancia focal de la lente.

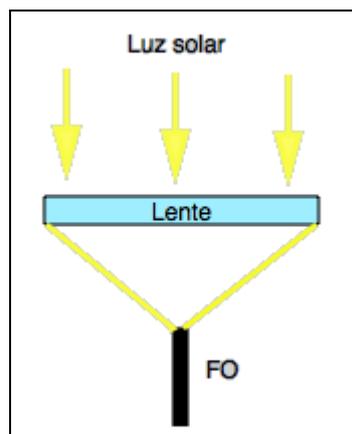
Este elemento, además, debe permitir que la lente y el primer tramo de fibra óptica se muevan a la vez.

La lente debe ser capaz de concentrar toda su energía en un único punto. El tamaño del núcleo de la fibra óptica determinará en gran parte la elección de nuestra lente. La aberración esférica que añaden las lentes a la agrupación de luz determinará el número de fibras ópticas por cada lente con tal de perder la menor cantidad de energía.

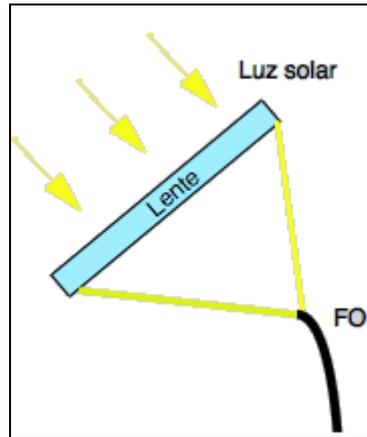
Utilizar una lente en cada captador permite que las pérdidas por transmisividad y refracción sean menores al diseño de un sistema con varias lentes.

La distancia focal necesaria entre la lente y la fibra óptica es un aspecto a tener en cuenta. Esta propiedad debe adecuarse a la apertura numérica de la fibra óptica con la finalidad de que toda la luz que penetre en la fibra sea distribuida.

En la figuras 4.2 y 4.3 se muestran esquemas orientativos de como la fibra óptica y la lente deben corregirse según la posición solar.



**Fig. 4.2.** Luz solar perpendicular a la lente



**Fig. 4.3.** Movilidad del captador

El cable de fibra y la lente deben mantener siempre la misma distancia e inclinación para obtener las menores pérdidas. Si la fibra óptica no se moviese, la luz no incidiría con el ángulo deseado y no se proyectaría con suficiente potencia lumínica para el alumbrado. El resultado de esto es que la fibra óptica no puede estar completamente recta y se necesita de un espacio suficiente para que el cable de fibras no sufra desperfectos (aumentan las pérdidas por distancia).

Como resultado final del diseño, es indispensable utilizar una armadura que mantenga a la misma distancia y con la misma inclinación el extremo principal de la fibra óptica y la lente. Con este sistema se mantendrán siempre los valores de AN y distancia adecuados.

#### 4.1.1 Características lentes

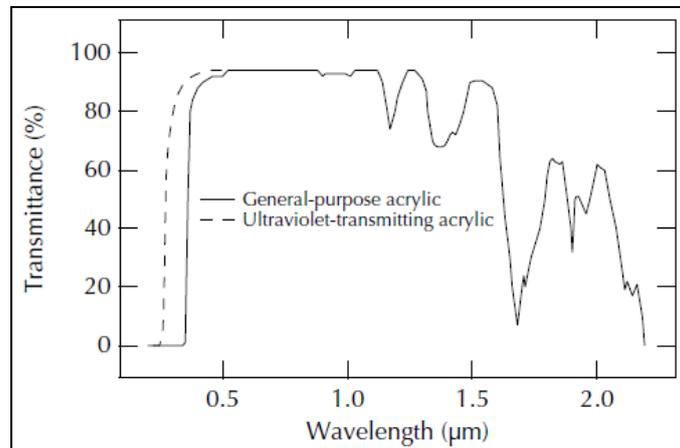
En este apartado se detallan las distancias concretas y materiales para conseguir realizar el captador definido en el apartado 4.1.

- Lente de Fresnell

La lente pensada para el diseño es una lente de Fresnell de 32,7 cm de diámetro. Estas lentes son capaces, con una reducida superficie, recrear lentes de mucho mayor tamaño y mayor curvatura. Esto permite captar mayor potencia. Otra característica importante es que la mayoría de las lentes de Fresnell están hechas en materiales plásticos lo que reduce su precio dando pérdidas de un 8% del total de irradiación ( $w/m^2$ ) para el material acrílico.<sup>xxiii</sup>

El material de estas lentes tiene un índice de refracción de 1.5168 en 587.6nm y una transmitancia de 92%. Estas lentes están diseñadas para una longitud de onda de 546,1nm.

En la figura 4.4 se muestra la curva de pérdidas para este material. Las pérdidas dependen de la longitud de onda. En este caso, la luz solar tiene la longitud de onda entre 400 y 750 nm.



**Fig. 4.4.** Transmisividad de lentes acrílicas<sup>xxiii</sup>

Como se muestra en la tabla 4.1 la lente escogida tiene una distancia focal de 61cm:

**Tabla 4.1.** Características de lente de Fresnel<sup>xxiii</sup>

Item #	Focal Length		Fresnel Size		Overall Size		Thickness		Grooves per		Conjugate	
	inches	mm	inches	mm	inches	mm	inches	mm	inch	mm	groove	flat
56	24	610	12.9	327	14	355	0.11	2.8	200	8	∞	24

#### 4.1.2 Características del seguidor solar

Para el seguidor solar se deben tener en cuenta muchas características. El algoritmo utilizado está descrito en el apartado 2 de este documento.

Un integrado programable será el encargado de ejecutar los cálculos para que el motor se oriente. El algoritmo debe programarse para cada captador en su posición instalada. Los principales datos a tener en cuenta son la orientación, elevación, latitud, longitud, presión, temperatura media, la refracción atmosférica además de la fecha exacta. Este último dato es el que varía para cada cálculo de un mismo captador.

La programación de este algoritmo consta de dos archivos. Uno se utiliza de librería para definir las principales variables. Esto se define así por la gran cantidad de variables intermedias que son necesarias.

El programa principal declara esa librería, además de las necesarias para el cálculo de las fórmulas. Se declaran el resto de variables y se añaden las tablas que serán utilizadas con arrays para los cálculos que las utilizan (longitud heliocéntrica, nutación en longitud y oblicuidad). Después de tener añadidos todos los parámetros, se calcula en el orden del apartado 2 cada

variable. Los cálculos de paso de radianes y grados (entre otros) son creados en una función para que sea llamada cuando se necesite.

En el anexo D está el código del seguidor.

En la tabla 4.2 se calcula la posición que debe adoptar el captador según la hora y el mes para la zona de Barcelona.

**Tabla 4.2.** Posición solar en azimut y elevación para la zona de Barcelona

	9:00		11:00		13:00		15:00		17:00	
	Elevación	Azimut								
<b>Enero</b>	6,6°	124,8°	22°	149°	28,2°	177,9°	22,5°	209,9°	7,4°	234,4°
<b>Febrero</b>	11,7°	119°	28,5°	144,5°	35,8°	175,2°	29,8°	229,5°	13,7°	238,9°
<b>Marzo</b>	20°	112°	38,4°	140°	46,3°	178°	38,6°	230°	20,5°	247°
<b>Abril</b>	20,4°	92°	42,1°	116°	58°	156°	56,4°	211,7°	39°	248°
<b>Mayo</b>	27,6°	82°	50°	103°	69°	145°	67°	223°	47°	260°
<b>Junio</b>	25,8°	83°	48°	104°	67°	144°	66,4°	219°	47°	247°
<b>Julio</b>	20,9°	90°	43°	113°	59,6°	152°	59°	211°	42°	249°
<b>Agosto</b>	26°	87°	48,1°	109°	65,6°	152°	63°	220°	43,8°	256°
<b>Septiembre</b>	16°	100°	36,8°	123°	51°	161°	49°	208°	33°	242°
<b>Octubre</b>	8,7°	111°	27,4°	136°	38°	169°	35°	206°	21°	235°
<b>Noviembre</b>	2,3°	118°	19°	141°	28°	170°	26°	202°	13°	228°
<b>Diciembre</b>	6,9°	129°	21°	154°	25°	184°	18°	212°	2,7°	235°

## 4.2 Características del cableado de fibra

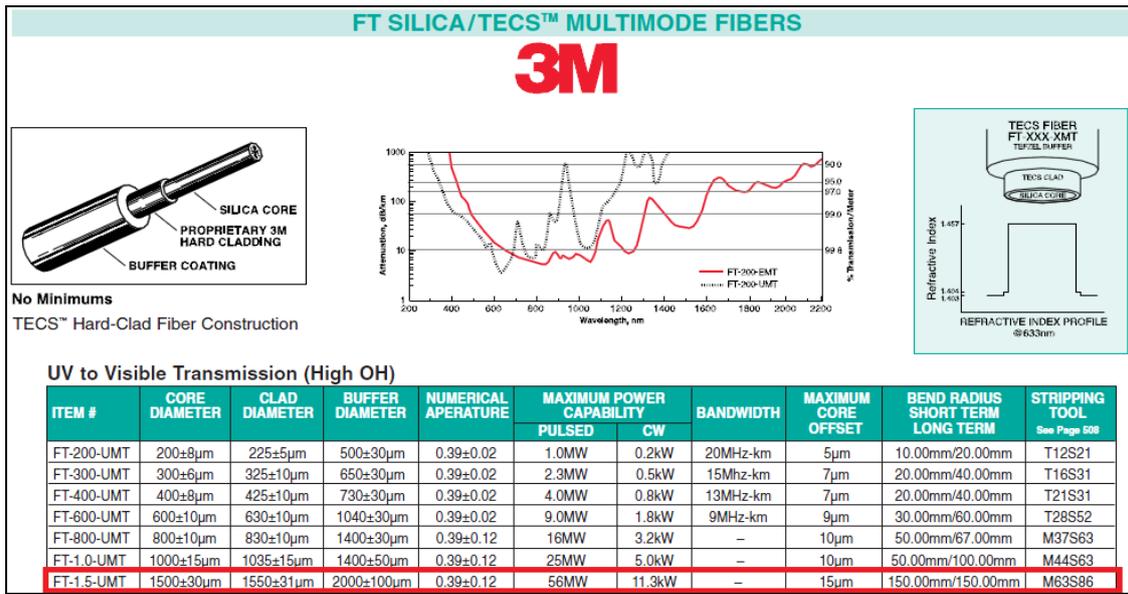
El sistema de distribución basado en fibra óptica es el mejor sistema para transportar la luz en poco espacio. En este apartado se detallan las características de este material.

La elección de la fibra óptica dependerá de la distancia focal de la lente. Esta distancia focal debe ser la adecuada para no superar el ángulo de apertura numérica.

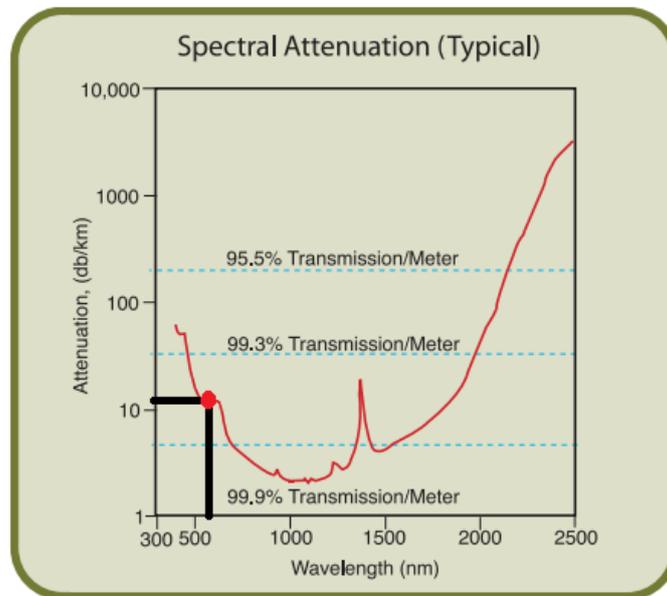
Para el diseño se utiliza una fibra óptica de alta calidad capaz de aceptar luz con ángulos de hasta 46 grados.

En la tabla 4.3 se detallan las características más significativas del diseño como son: Diámetro del núcleo de 1,5 mm, pérdidas de 15db/km en longitud de onda de 550 nm y un ángulo de aceptación de 46 grados como principales características.<sup>xxiv</sup>

**Tabla 4.3.** Especificaciones fibra óptica<sup>xxiv</sup>



Según la gráfica de pérdidas de 2 distintos modelos aproximadamente para una longitud de onda de 550 nm tendríamos pérdidas entorno a los 15db/km. En la figura 4.5 se observa la curva de pérdidas dependiendo de la longitud de onda. La gran parte del detrimento de energía es por las pérdidas por dispersión de Rayleigh descritas en el punto 3.2.3 y por acoplamiento.



**Fig. 4.5.** Curva de pérdidas de fibra óptica FT-1,5UMT<sup>xxiv</sup>

### 4.2.1 Apertura numérica

Determinadas la lente y la fibra es necesario comprobar el ángulo de apertura numérica. La fibra óptica elegida es capaz de captar ángulos de hasta  $46^\circ$  y el diámetro total de la lente es de 32,27 cm.

Cálculo de la distancia dado el ángulo máximo AN de la fibra óptica tenemos:

$$\tan 23^\circ = \frac{16,35\text{cm}}{\text{adyacente}} \quad (4.1)$$

Por tanto, tenemos una distancia mínima de 38,51 cm con la que conseguiríamos introducir la luz con la AN deseada. Como la distancia focal de la lente es de 61 cm el ángulo con el que incidirá será el definido en la fórmula 4.2:

$$\tan X = \frac{16,35\text{cm}}{61\text{cm}} \quad (4.2)$$

La luz incidirá en la fibra óptica con un ángulo de  $15^\circ$ . Por debajo del máximo que permite la fibra.

## 4.3 Iluminaria

Como se explica en la introducción de este capítulo es necesario tratar la luz de algún modo para darle un mayor ángulo de apertura. La iluminaria del sistema cuenta con difusores para conseguir esta característica.

- Difusores

Los difusores utilizados son los holográficos. Estos se utilizan para controlar el área de iluminación difusa manteniendo la eficiencia de transmisión del 82%. Además, son capaces de difundir luz en un ángulo de  $50^\circ$ .

Estos difusores están diseñados para longitudes de onda entre 380 y 1500 nm y son comúnmente utilizados en pantallas LED, displays e iluminación.

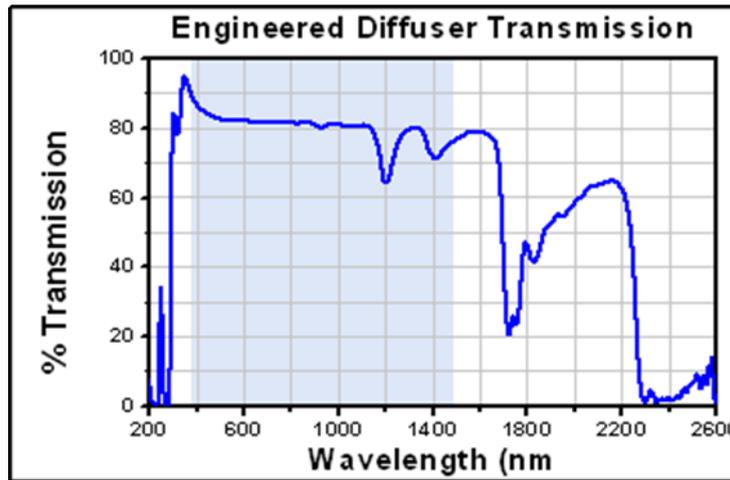


Fig. 4.6. Curva de pérdidas del difusor<sup>xxv</sup>

#### 4.4 Cálculo de pérdidas

Para conocer la viabilidad del sistema es necesario estudiar los valores finales de iluminación que proporciona el sistema. En este apartado se van a realizar dos cálculos. El primero con la irradiancia más alta que podemos recibir y el segundo cálculo con el valor de irradiancia a las 11 de la mañana de un día de mayo. De esta manera se pueden comparar los distintos valores que se obtienen al final del sistema.

Los datos para realizar los cálculos son:

- Superficie de captación de 32,7 cm de diámetro.
  - Edificio de 30 metros de altura.
  - Pérdidas ocasionadas por la fibra óptica de 15 db/km y 1,5mm de diámetro de núcleo.
  - Transmitancia de la lente superior a 92% (8 % de absorción).
  - Índice de refracción del plástico de 1,5168.
  - Pérdidas en difusor del 18%.
- Cálculo de pérdidas con irradiancia de 1063 W/m<sup>2</sup>

El nivel de irradiación máximo que alcanza la tierra es de 1063 W/m<sup>2</sup>.

Recibimos una irradiancia directa que alcanza la tierra de 1063 W/m<sup>2</sup>. El resto de la irradiancia (280 W/m<sup>2</sup> aproximadamente) se pierde en la atmósfera y en el resto de partículas del aire.

El área de captación para una lente de 32,7 cm de diámetro es:

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$A = \pi \cdot 0,1635^2 m = 83,98 \cdot 10^{-3} m^2 \quad (4.3)$$

Por lo que la potencia que se puede captar con esta lente es de:

$$P_{\text{captación}} = 1063W / m^2 \cdot 83,98 \cdot 10^{-3} = 89,27W \quad (4.4)$$

La lente de captación pierde hasta un 8% entre el cambio de medio debido al material, las hendiduras de la lente de Fresnell y una pequeña pérdida por refracción. En total tenemos una potencia de captación de 82,129W

Las pérdidas de la fibra óptica utilizada para una longitud de onda de 546nm son de 15db/km. La distancia a recorrer por la luz es de 30 metros que es la altura del edificio. Para calcular las pérdidas de la fibra óptica utilizamos la fórmula que determina la potencia de salida respecto a la entrada en las fibras multimodo:

$$P(L) = P(0) \cdot 10^{-\frac{\alpha L}{10}} \quad (4.5)^{xvii}$$

Donde,

P(L) es la potencia luminosa que existe en el conductor al cabo de una longitud L.

P(0) es la potencia luminosa que se acopla a la fibra.

$\alpha$  es el coeficiente de atenuación en dB/km.

L es la longitud en km.

$$P(L) = 82,129 \cdot 10^{-\frac{15 \cdot 0,03}{10}} = 74,045W \quad (4.6)$$

Se ha perdido el 9,84% de potencia lumínica en la fibra óptica al pasar los 30 metros.

Comprobamos si existen pérdidas por aberración esférica y difracción límite

$$\Delta y = A_3 \left( \frac{D}{2} \right)^3 \quad (4.7)^{xiii}$$

$A_3$  es el coeficiente de aberración esférica. Para una lente plano-convexa es:

$$\Delta_3(f)_{n=1.5} = \frac{-0.292}{f^2} m^{-2} \quad (4.8)^{xiii}$$

Por tanto, tenemos que:

$$\Delta y = \frac{-0,292}{0,61^2} \left( \frac{0,327}{2} \right)^3 = 3,43 \text{mm} \quad (4.9)^{\text{xiii}}$$

La difracción límite se calcula:

$$d_0 = 2.44 \frac{\lambda f}{D} \quad (4.10)^{\text{xiii}}$$

$$d_0 = 2.44 \frac{0,55 \cdot 10^{-6} \cdot 0,61}{0,327} = 2,5 \mu\text{m} \quad (4.11)^{\text{xiii}}$$

A causa de la gran distancia focal se ocasionan pérdidas por aberración esférica que pueden ser considerables entre el tamaño del núcleo y el punto creado por la lente. Para reducir este problema se puede ajustar la cercanía con la fibra óptica aumentando el ángulo de apertura.

El uso de una única fibra óptica hace que se pierda aproximadamente el 80% de la luz. Al final del sistema solo recibiríamos 14,809W. Estas pérdidas harían bajar considerablemente el rendimiento del sistema. Por ello es imprescindible utilizar otro sistema.

El punto que se crea es de 3,43 mm de diámetro. Lo que supone un área de 9,23mm<sup>2</sup>.

El núcleo de la fibra óptica es de 1,5mm de diámetro. Esto forma un área de 1,767mm<sup>2</sup>. El área que se forma al final de la lente es de 5,22 veces mayor que el núcleo de la fibra.

Para no obtener esas pérdidas se añaden grupos de 5 fibras por cada lente. En total se perderá el 4,27% de la energía. En total 70,9W (14,17W por cada fibra óptica).

En cambio, la difracción límite no ocasionará ninguna pérdida para este tipo de fibra.

Por último, tenemos una pérdida del 18% de la potencia lumínica en difundir la lente en el difusor y tener un ángulo de salida mayor de hasta 50°. En total a la salida 58,14W. Lo que supone 11,63W por cada punto de luz.

En total se pierde un 34,87% de lo que recibe la superficie de la lente.

Se necesitará agrupar varios puntos de luz cercanos para conseguir una iluminación óptima o utilizar un bundle de fibras para eliminar la mayoría de las pérdidas por aberración esférica.

Determinada la potencia que recibimos al final del sistema se requiere de una equivalencia entre potencia y flujo luminoso. La eficiencia luminosa que nos permite pasar los valores de potencia luminosa (W) a flujo luminoso (lúmenes) es de 683lm/W.

La potencia por cada uno de los 5 cables de fibra es de 11,63 W. En total, tenemos 7943,54 lúmenes.

- Cálculo de pérdidas con irradiancia de 472 W/m<sup>2</sup>

El nivel de irradiación que alcanza la tierra cuando la ascensión del sol es de 30° es de 472 W/m<sup>2</sup>.

Recibimos una irradiancia directa que alcanza la tierra de 472 W/m<sup>2</sup>. El resto de la irradiancia (850 W/m<sup>2</sup> aproximadamente) se pierde en la atmósfera y en el resto de partículas del aire. Este valor de pérdidas es mayor que en los cálculos de la máxima irradiancia. Esto sucede porque los rayos solares deben traspasar más cantidad de atmósfera para llegar a la superficie.

El área de captación para una lente de 32,7 cm de diámetro y utilizando las fórmulas 4.3 y 4.4 obtenemos una potencia de captación de:

$$\text{Potencia captación} = 39,6\text{W}$$

La lente de captación pierde hasta un 8% entre el cambio de medio debido al material, las hendiduras de la lente de Fresnell y una pequeña pérdida por refracción. En total tenemos una potencia de captación de 36,47W

Las pérdidas de la fibra óptica utilizada para una longitud de onda de 546nm son de 15db/km. La distancia a recorrer por la luz es de 30 metros que es la altura del edificio. Para calcular las pérdidas de la fibra óptica utilizamos la fórmula que determina la potencia de salida respecto a la entrada en las fibras multimodo (fórmula 4.5 y 4.6):

$$P(L) = 32,88\text{W}$$

Se ha perdido el 16,96% de potencia lumínica en la fibra óptica al pasar los 30 metros.

Las pérdidas por aberración esférica y difracción límite son las mismas que para el caso de 1063W/m<sup>2</sup> (fórmulas 4.7-4.11).

Aberración esférica de 3,43mm y difracción límite de 2,5µm.

El punto que se crea es de 3,43 mm de diámetro. Lo que supone un área de 9,23mm<sup>2</sup>.

El núcleo de la fibra óptica es de 1,5mm de diámetro. Esto forma un área de  $1,767\text{mm}^2$ . El área que se forma al final de la lente es de 5,22 veces mayor que el núcleo de la fibra.

Para no obtener esas pérdidas se añaden grupos de 5 fibras por cada lente. En total se perderá el 4,27% de la energía. En total 31,48W (6,29W por cada fibra óptica).

En cambio, la difracción límite no ocasionará ninguna pérdida para este tipo de fibra.

Por último, tenemos una pérdida del 18% de la potencia lumínica en difundir la lente en el difusor y tener un ángulo de salida mayor de hasta  $50^\circ$ . En total a la salida 25,81W. Lo que supone 5,16W por cada punto de luz.

Se pierde un 34,82% de lo que recibe la superficie de la lente.

Se necesitará agrupar varios puntos de luz cercanos para conseguir una iluminación óptima o utilizar un bundle de fibras para eliminar la mayoría de las pérdidas por aberración esférica.

Utilizamos la misma equivalencia entre potencia y flujo luminoso que en el subapartado anterior. La eficiencia luminosa que nos permite pasar los valores de potencia (W) a flujo luminoso (lúmenes) es de 683lm/W. La potencia por cada uno de los 5 cables de fibra es de 5,16 W. En total, tenemos 3524,28 lúmenes.

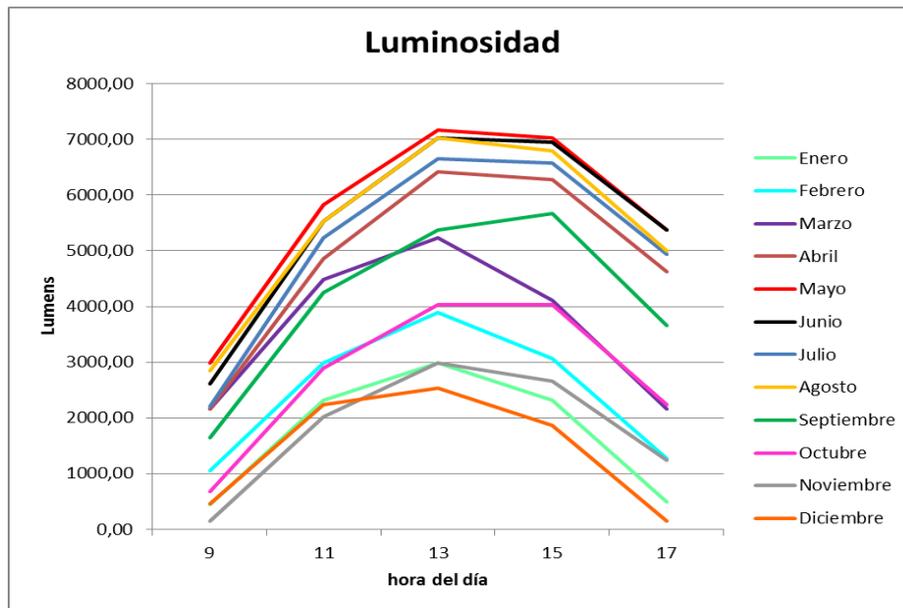
## 4.5 Flujo luminoso

**Tabla 4.4.** Flujo luminoso mes/hora

	9:00		11:00		13:00		15:00		17:00	
	Elevación	lm/Fib								
<b>Enero</b>	6,6°	448,15	22°	2315,46	28,2°	2987,70	22,5°	2315,46	7,4°	492,97
<b>Febrero</b>	11,7°	1045,69	28,5°	2987,70	35,8°	3884,00	29,8°	3062,39	13,7°	1269,77
<b>Marzo</b>	20°	2166,08	38,4°	4481,54	46,3°	5228,47	38,6°	4108,08	20,5°	2166,08
<b>Abril</b>	20,4°	2166,08	42,1°	4855,00	58°	6423,54	56,4°	6274,16	39°	4630,93
<b>Mayo</b>	27,6°	2987,70	50°	5833,48	69°	7170,47	67°	7021,08	47°	5377,85
<b>Junio</b>	25,8°	2614,23	48°	5527,24	67°	7021,08	66,4°	6946,39	47°	5377,85
<b>Julio</b>	20,9°	2203,43	43°	5228,47	59,6°	6647,62	59°	6572,93	42°	4929,70
<b>Agosto</b>	26°	2838,31	48,1°	5527,24	65,6°	7021,08	63°	6797,01	43,8°	5004,39
<b>Septiembre</b>	16°	1643,23	36,8°	4257,47	51°	5377,85	49°	5676,62	33°	3659,93
<b>Octubre</b>	8,7°	672,23	27,4°	2898,06	38°	4033,39	35°	4033,39	21°	2240,77
<b>Noviembre</b>	2,3°	149,38	19°	2016,69	28°	2987,70	26°	2651,58	13°	1232,42
<b>Diciembre</b>	6,9°	455,62	21°	2240,77	25°	2539,54	18°	1867,31	2,7°	149,38

A modo de resumen, se muestra la tabla 4.4 que determina los niveles de flujo luminoso de cada fibra según el mes y la hora.

A partir de la tabla 4.4, las pérdidas en el cableado, lentes y difusor y los valores de la tabla 1.1 se obtiene el gráfico de la figura 4.7. En él se muestra la cantidad de lúmenes que proporciona cada fibra óptica dependiendo del mes y de la hora (calculado siempre en días soleados).



**Fig. 4.7.** Gráfico nivel de luminosidad

Como se observa en el gráfico de la figura 4.7, los niveles de luminosidad más altos se obtienen entre Mayo y Junio. Mientras que los niveles más bajos se obtienen en Enero y Diciembre.

En el apartado del anexo A.2 están explicadas las unidades de medida de la luz. La más interesante en este caso es la relación lúmenes-lux. La cantidad de luz necesaria en un espacio se determina en lux. Esta relación es:  $1\text{lux} = 1\text{lm}/\text{m}^2$ . Por tanto, dependerá del espacio a iluminar que la cantidad de luz sea suficiente.

## 4.6 Niveles de iluminación característicos

En este apartado se determinan los niveles necesarios de iluminación. Utilizaremos estos valores para compararlos con los obtenidos en el apartado de diseño.

En la siguiente tabla se pueden ver niveles de iluminancia típicos:

**Tabla 4.5.** Niveles de iluminancia típicos<sup>xxvi</sup>

Lugares	Niveles iluminancia (Lux)
Noche sin luna	0,01
Noche de luna llena	0,2
Pasillo	50
Dormitorio	100
Aula	300
Laboratorio	1000
Galería comercial	1500
Quirófano hospitalario	2000

En el REAL DECRETO 486/1997, de 14 de abril en su Anexo IV: Iluminación de los lugares de trabajo determina los valores iluminación que debe tener una zona de trabajo. Esta variará según la actividad que se efectúe:

**Tabla 4.6.** Niveles de luz estipulados en el real decreto 486/1997<sup>xxvii</sup>

Zona o parte del lugar de trabajo (*)	Nivel mínimo de iluminación (lux)
Bajas exigencias visuales	100
Exigencias visuales moderadas	200
Exigencias visuales altas	500
Exigencias visuales muy altas	1000

## 4.7 Niveles de iluminación del sistema

Una vez se conocen los niveles necesarios para una buena iluminación, comparamos estos con los obtenidos en los apartados de diseño.

En primer lugar, se muestra en la siguiente tabla valores medios de luminosidad entre las 9 y las 17 horas en la zona de Barcelona. Estos valores se han obtenido a partir de la tabla 4.4.

**Tabla 4.7:** luminosidad media entre las 9 y las 17

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov	Dic
Media Im/fibra	1712	2449,9	3630	4870	5678	5497	5116	5437,6	4123,02	2775,6	1807,6	1450,5

La luminosidad media que aporta el sistema está entorno a los 3700 lúmenes por cada fibra óptica para los meses más soleados. Mientras que para los meses de menos sol este valor está entorno a los 2000 lúmenes por cada cable.

Esta luminosidad será suficiente dependiendo del espacio que se desee iluminar. Si se pretende iluminar un espacio de  $10\text{m}^2$  con 500 lux serán necesarios 5000 lúmenes. Conseguir esta luminosidad con este diseño, en el mes de Junio requeriría de una media de 2 fibras ópticas. Sin embargo, si realiza la misma medición en el mes de Noviembre, se requerirían 3 fibras ópticas. Todos estos datos están calculados en días soleados. En días nublados los niveles pueden ser prácticamente nulos.

La cantidad de puntos de luz varía mucho según el mes. Por ello, se determina en qué casos es imprescindible agregar un sistema que regule y añada más luz. Añadir luz dependerá de la hora, el mes, el espacio a iluminar y de la meteorología.

Es necesario añadir luz en:

- Meses de octubre a marzo (siempre que no se agrupen muchos cables de fibra).
- Entre las 19:00 y las 9:00 de todos los días.
- Días nublados o lluviosos.
- Si el dimensionamiento de los puntos de luz en un espacio es insuficiente. Esto puede depender de la cantidad de puntos de luz y la iluminación determinada en el apartado 4.6

En el siguiente capítulo se determinan las características de un sistema de iluminación complementaria. Dependiendo del dimensionamiento de puntos de luz será necesario acoplar más luminosidad a los espacios.

## **CAPÍTULO 5. SISTEMA DE ILUMINACIÓN COMPLEMENTARIA**

A partir de lo obtenido en el punto 4.7 se obtiene la necesidad de un sistema de iluminación complementaria.

En este apartado se van a definir los principales elementos que forman este sistema complementario. Además, se añaden elementos específicos que permiten completar todo un diseño de iluminación.

### **5.1 Elementos del sistema de iluminación complementaria**

Este sistema se basa en utilizar luz LED de bajo consumo complementado con sensores para conocer el nivel de luz que se debe aplicar y reguladores de potencia para que las luces se adapten al nivel de luz.

#### **5.1.1 Luces LED**

En primer lugar, se debe tener en cuenta que las luces LED deberán tener la capacidad de iluminarse a distinta intensidad lumínica según sea necesario. Además de estar controladas mediante un regulador, la idea es conseguir un sistema manual o automático para el usuario.

Para iluminar con 500 lux un espacio de  $5\text{m}^2$  se necesita una cantidad de 2500 lúmenes de flujo luminoso. Lo que significa tener un grupo de 3 bombillas capaces de proporcionar 830 lúmenes (aproximadamente) cada una.

Con una bombilla LED de 12W de consumo se pueden ahorrar hasta 48W. Otras características interesantes es su durabilidad, el color blanco hace que se pueda combinar bien con la salida de luz del captador.

La eficiencia de este tipo de bombillas está entorno a los 70lm/W. Mucho más alta que la eficiencia de las bombillas incandescentes (13lm/W).

Como ejemplo concreto de bombilla a utilizar se determinan las especificaciones de un modelo de la marca Philips:

**Tabla 5.1.** Especificaciones bombilla LED<sup>xxviii</sup>

Especificaciones técnicas			
	<b>Especificaciones técnicas</b>	Índice de rendimiento cromático (IRC): 80	Voltaje: 220 - 240 V
	Contenido en mercurio: 0 mg	Dimensiones de la lámpara (altura): 108 mm	Etiqueta de bajo consumo: A
	Factor de potencia: 0,7	Lumen: 806	Forma: Bombilla
	Vatios: 12 W	Tasa de flujo luminoso: 806 lm	Casquillo: E27
	Tasa de potencia: 12,5 W	Temperatura del color: 2700 K	Efecto de iluminación/acabado: Esmerilada
	Vida útil de la lámpara: 25 año(s)	Número de ciclos de apagado y encendido: 20000	Tiempo de calentamiento para el 60% de salida de luz: 0 s
	Vida útil estimada: 25 año(s)	Vida útil de la lámpara: 25000 hora(s)	Color: Blanca cálida
	Dimensiones de la lámpara (anchura): 58 mm	Vida útil estimada: 25000 hora(s)	Regulable: Sí
	Equivalencia en vatios: 60 W	Tiempo de encendido: <0,5 s	Vatios de bombilla estándar: 60 W
	Corriente de la lámpara: 77 mA	Factor de mantenimiento lumínico: 0,7 (al final de la vida útil nominal) %	

En total se necesitan 500 bombillas LED para iluminar 2500m<sup>2</sup> con 500 lux.

### 5.1.2 Regulador y sensores de luz

Se necesitaran varios sensores de niveles de luz por cada sistema de captación. La característica principal es que entre ellos sean capaces de realizar comparaciones entre los distintos sensores y en cuanto se determine una media inferior a 500 lux se active el regulador.

Es necesario el regulador para adaptar el nivel de luz que proporciona el captador con la iluminación interior de la habitación. El regulador deberá adaptarse según la media de intensidad lumínica recogida por los sensores. Este regulador constará de una pequeña placa capaz de determinar la media de los sensores y de adaptar la potencia de salida necesaria para la iluminación de la bombilla.

**Fig. 5.1.** Especificaciones sensor y regulador<sup>xxix</sup>

**Tabla 5.2.** Especificaciones reguladores de potencia<sup>xxix</sup>

	RE DMS 001	RE DMS 002
Tensión alimentación	230V~ 50Hz	
Consumo	2W	
Carga	Hasta 80 reactancias electrónicas regulables 1/10Vcc	
Tensión maniobra relé	250Vca	
Poder corte relé	16A	
Máxima corriente absorción	500mA	
Máxima corriente inyección	40mA	
Campo detección movimiento	360º - Ø6m a 2,4m de altura	
Nº detectores movimiento	1	15 (DM SEN T03)
Nivel luminosidad	100 - 1000Lux	
Tiempo conexión	10 - 30min	
Dimensiones sensor	Ø65mm	
Dimensiones control	107 x 53 x 34mm	
Peso conjunto	205g	
Tª funcionamiento	0º ~ +40ºC	
Tª almacenamiento	-10º ~ +45ºC	
Grado de protección	IP20 según UNE 20324	
De acuerdo a la Norma	UNE-EN 60730	

Para marcar el nivel de luminosidad que se debe añadir en cada espacio sería conveniente añadir un sensor por cada bombilla. Como este sistema es muy caro y dependería en gran parte de la superficie de cada habitáculo, se añadirán un sensor y un regulador por cada 5m<sup>2</sup>. Cada regulador controla grupos de 3 bombillas LED.

En este punto del documento ya se han definido todos los puntos del sistema de iluminación. Implementando todas las partes explicadas en los apartados 4 y 5 se puede conseguir una iluminación que aporte un ahorro económico.

## CAPÍTULO 6. Estudio ambientalización y conclusiones

### 6.1 Estudio de ambientalización

La idea principal del proyecto es idear un sistema para el ahorro del consumo energético, lo que a su vez permite también producir menor energía lo que produce contaminar menos.

A partir de la media de luminosidad que proporciona el sistema dependiendo del mes obtenida en el capítulo 4 realizamos una media del ahorro para Junio y para Diciembre.

Se tiene en cuenta el siguiente supuesto:

Superficie de 2500 m<sup>2</sup>, con 320 paneles y cada panel tiene 4 fluorescentes (1280 fluorescentes). El consumo de cada fluorescente es de 18W-h<sup>xxx</sup>. Se necesita iluminar este espacio durante 10 horas diarias, 30 días al mes.

A continuación calculamos el consumo de energía:

Consumo hora = 1280 fluorescentes \* 18W-h = 23,04 kW-h

Consumo día = 23,04 kW-h \* 10 horas = 230,4 kW-h/día

Consumo mensual = 230,4 kW-h/día \* 30 días = 6912kW-h/mes

En Diciembre se ahorrará 5 horas diarias tenemos un consumo de 115,2kW-h/día y 3456 kW-h/mes.

El precio actual del kW-h es de 0,15€ aproximadamente. Esto permite un ahorro económico de 518,4€/mes.

En Junio en el mismo edificio se ahorrarían 9 horas de consumo durante 30 días. Ahorrando 9 horas diarias tenemos un consumo de 25,6kW-h/día y 768 kW-h/mes.

El precio actual del kW-hora es de 0,15€ aproximadamente. Esto permite un ahorro económico de 921,6€/mes.

De media mensual tenemos un ahorro de 720 €/mes.

### 6.2 Conclusiones

A continuación se detallan las conclusiones a las que se ha llegado al finalizar este proyecto.

En primer lugar, comentar que el proyecto ha surgido de la necesidad de ahorrar energía que destinamos a la iluminación, dado que cada vez más el precio de esta aumenta. Otros métodos muy utilizados actualmente necesitan de un sistema complementario de almacenaje de energía para su uso, como por ejemplo la energía solar. Lo positivo de estos sistemas en contra del sistema de captación diseñado, es que a la energía se le puede dar cualquier uso.

Finalmente concluimos con las siguientes reflexiones:

- Las condiciones del lugar condicionan el sistema.

La rentabilidad del sistema estará determinada por la cantidad de horas de luz diarias de las que se pueda disponer.

- Gran importancia en los materiales usados.

Los materiales utilizados en el sistema de captación y su precisión marcarán las pérdidas totales del sistema. Si estas son demasiado grandes el sistema no tiene valor.

- Rayos solares siempre deben incidir perpendiculares a la lente.

Para que el sistema ofrezca siempre iluminación interior es imprescindible que el captador esté siempre correctamente orientado al sol.

- Sistema útil en grandes superficies.

El sistema es muy voluminoso y necesitaría hasta 1 metro de altura entre la lente y el suelo para permitir un cierto grado de movilidad de la fibra óptica para el cambio de orientación.

- Permite un gran ahorro.

El ahorro no sólo se produce en las horas en las que no se necesite iluminación artificial, sino también cuando los dos sistemas se combinen adaptándose mediante sensores.

Como punto negativo del sistema es la necesidad de elementos complementarios para conseguir una buena iluminación. Este punto negativo puede ser un problema dado que se requieren dos instalaciones

## Bibliografía

---

<sup>i</sup> Pareja Aparicio, M. “La radiación solar”, Cap. 1 en Radiación solar y su aprovechamiento energético, pp. 319, Marcombo, Barcelona (2010).

<sup>ii</sup> Méndez, Muñiz J.M & Cuervo García, R “ Radiación solar”, Cap. 1.2 en Energía solar fotovoltaica, pp. 307, Bureau veritas formación, Madrid (2009).

<sup>iii</sup> Figura 1.1 obtenida de:

<http://nuevacaravana.blogspot.com.es/2012/07/radiacion-solar.html>

<sup>iv</sup> Figura 1.2 obtenida de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Luz\\_solar](http://es.wikipedia.org/wiki/Luz_solar)

<sup>v</sup> Figura 1.3 obtenida de:

[http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Cambio\\_clim\\_tico\\_clases\\_ss/ss\\_Energ\\_a\\_del\\_sol\\_6fg.html](http://www.atmosphere.mpg.de/enid/Cambio_clim_tico_clases_ss/ss_Energ_a_del_sol_6fg.html)

<sup>vi</sup> Tabla 1.1 sobre irradiación respecto a la ascensión solar obtenida del libro: Stefan C.W. Krauter, “Energy Yield”, capítulo 7 en Solar Electric power generation, pp137, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Viladasens (2006).

<sup>vii</sup> Figura 1.4. Mapa de radiación solar en España.: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> .

<sup>viii</sup> Definiciones de latitud, orientación, inclinación e incidencia obtenidas de: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Latitud-y-Longitud/2877848.html>

<sup>ix</sup> Información de posición de la figura 2.1 obtenidas de <http://www.golden-hour.com/>

<sup>x</sup> Datos y Fórmulas entre 2.1 y 2.47 del apartado 2.1.1 obtenidas de la fuente: Jean Meeus, “Astronomical Algorithms & technical”, Cap2 en “Astronomical Algorithms”, pp25, Willam-Bell(1991).

<sup>xi</sup> Información Lentes del apartado 3.1 obtenida de: Malacaea H D and Veas, F and Latorre,V “ Optica geometrica-teoria paraxial”, Cap. 5 en *Óptica* , pp. 576, Addison-Wesley Iberoamericana, E.U.A (1987).

<sup>xii</sup> Fórmula 3.1 obtenida de: <http://www.crbond.com/papers/lensmaker.pdf>

<sup>xiii</sup> Propiedades de los materiales de las lentes apartado 3.1: Eric W.Rogala, “Properties of Crystals and Glasses”, Cap 2 en “*Handbook of optics Volume IV Optical propierties of Materials, nonlinear optics, quantum optics*”, pp 86, McGrawHill (2010).

<sup>xiv</sup> Fórmula 3.2 y figuras 3.1 , 3.5 obtenidas de estudio de la NASA: The linear fresnel lens solar concentrator: Transverse tracking error effects

<sup>xv</sup> Figuras 3.2, 3.3 y fórmulas 3.3, 3.4, 3.5 obtenidas de Imaging Radiometers.

<sup>xvi</sup> Figura 3.4 y definiciones absortancia, reflectancia y transmitancia obtenidas de: <http://es.scribd.com/doc/54357128/2/A-1-1-Conceptos-de-calor-absorbancia-reflectancia-y-transmitancia>

<sup>xvii</sup> Información sobre las fibras ópticas del apartado 3 obtenidas de: Günther, M and Peter, G, "Principios físicos del conductor de fibra óptica", Cap. 2 en *Conductores de fibras ópticas*, pp. 14-29, Coming cable systems, Munich, (2000).

<sup>xviii</sup> Fórmulas del apartado 3.2.2 (3.6, 3.7, 3.8, 3.9) obtenidas del libro: *Conductores de fibras ópticas*.

<sup>xix</sup> Datos, formulas del apartado 3.2.2 (3.6, 3.7, 3.8, 3.9) y figura 3.8 también obtenidas de: John A.Buck, "Nonlinear effects in optical fibers", Cap 10 en "*Handbook of optics Volume V Atmospheric optics, modulators, Fiber optics, x-ray and neutron optics*", pp 374, McGrawHill (2009).

<sup>xx</sup> Figura 3.7 obtenida de: tesis sobre Acoplamiento fibra-concentrador y estudio térmico de Oscar Alfredo Jaramillo

<sup>xxi</sup> Datos del punto 3.2.3 sobre pérdidas obtenidas del libro "cableado de fibra óptica para comunicaciones de datos".

<sup>xxii</sup> Información sobre Difusores Holográficos:  
<http://www.edmundoptics.com/optics/windows-diffusers/optical-diffusers/holographic-uv-diffusers/2265>

<sup>xxiii</sup> Características lentes de Fresnell incluidas figura 4.4 y la tabla 4.1 obtenidas de: un estudio de fresnel technologies inc. Web de la empresa: <http://www.fresneltech.com>

<sup>xxiv</sup> Tabla 4.3 y figura 4.5 obtenidas de: Especificaciones fibra óptica 3M: 3M US Utilities & Telecommunications: Optical Transport Systems: TECS Coated Silica:  
[http://solutions.productos3m.es/wps/portal/3M/es\\_ES/EU2/Country/](http://solutions.productos3m.es/wps/portal/3M/es_ES/EU2/Country/)

<sup>xxv</sup> Tabla 4.6 sobre las características de difusores holográficos obtenida de: [http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9\\_PF.cfm?Guide=10&Category\\_ID=185&ObjectGroup\\_ID=1660](http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9_PF.cfm?Guide=10&Category_ID=185&ObjectGroup_ID=1660)

<sup>xxvi</sup> Tabla 4.5 información sobre valores de iluminación típicos:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Iluminaci%C3%B3n\\_f%C3%ADsica](http://es.wikipedia.org/wiki/Iluminaci%C3%B3n_f%C3%ADsica)

<sup>xxvii</sup> Iluminación en puestos de trabajo real decreto 486/1997. Se puede encontrar este real decreto en el link:  
[http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Laboral/rd486-1997.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Laboral/rd486-1997.html)

<sup>xxviii</sup> Tabla 5.1: [http://www.philips-tienda.es/store/catalog/bombillas-led/normales/myambiance-blanca-calida-de-12-w-60-w-con-casquillo-normal/productdetail/872790091838000\\_ES\\_SHOPPUB/ES/es](http://www.philips-tienda.es/store/catalog/bombillas-led/normales/myambiance-blanca-calida-de-12-w-60-w-con-casquillo-normal/productdetail/872790091838000_ES_SHOPPUB/ES/es)

<sup>xxix</sup> Figura 5.1 y Tabla 5.2 extraídas de:  
<http://www.dinuy.com/pages/es/productos/reguladores-de-luz/sistema-automatico-de-regulacion/re-dms-001.php>

<sup>xxx</sup> Información consumo fluorescente obtenido del catálogo Osram LUMILUX T8:  
<http://catalog.myosram.com/zb2b/b2b/start.do?browsername=mozilla%2F5.0%2520%2528windows%2520nt%25206.0%2529%2520applewebkit%2F537.17%2520%2528khtml%252C%2520like%2520gecko%2529%2520chrome%2F24.0.1312.57%2520safari%2F537.17&browsermajor=5&browserminor=5>



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# ANEXOS

**Títol:** Estudio de Viabilidad de un sistema de iluminación de interiores mediante fibra óptica

**Titulació:** Ingeniería Técnica en Telecomunicaciones, especialidad en Telemática

**Autor:** José Sánchez Bartolomé

**Director:** Alejandro Rodríguez Gómez

**Fecha:** 8 de Febrero de 2013



## Anexo A. Propiedades de la luz solar

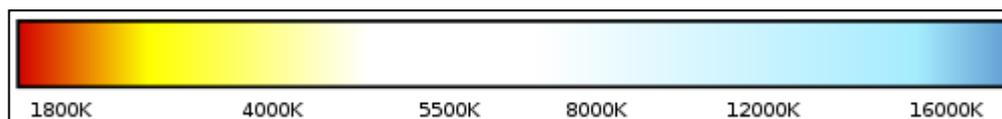
Este proyecto principalmente se basa en el transporte de luz solar a través de un cable de fibra óptica. Por ello es necesario conocer las propiedades de la luz solar para tener la máxima información sobre sus características y saber si se pueden concentrar y transportar.

### Anexo A.1 El sol

El sol es la fuente de energía electromagnética más grande que recibe la tierra. Esta energía radiada es capaz de sustentar las formas de vida en el planeta a través de la fotosíntesis y determinar la climatología de la tierra.

El sol se comporta como un cuerpo negro el cual emite energía siguiendo la ley de Planck (la intensidad de radiación de energía depende de la temperatura del cuerpo) a la temperatura que tiene (6000K de media).

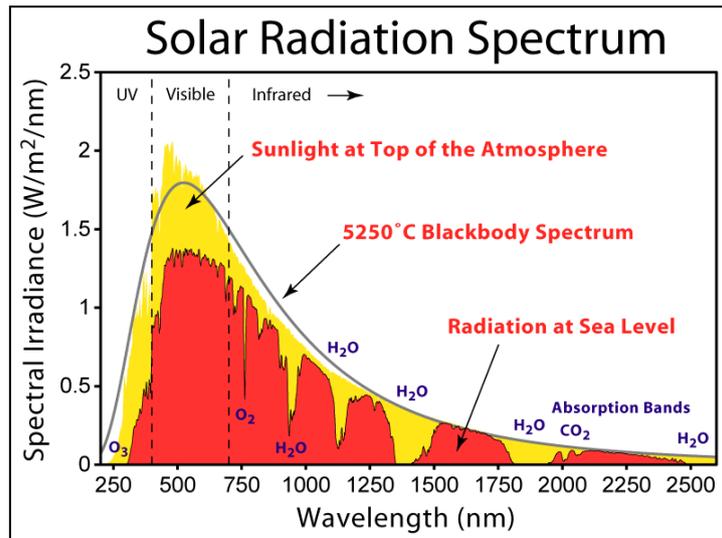
Se puede definir una tonalidad de color según la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada.



**Fig. A.1** Tonalidades según luz emitida

**Cuerpo negro:** Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro. A pesar de su nombre, el cuerpo negro emite luz y constituye un sistema físico idealizado para el estudio de la emisión de radiación electromagnética.

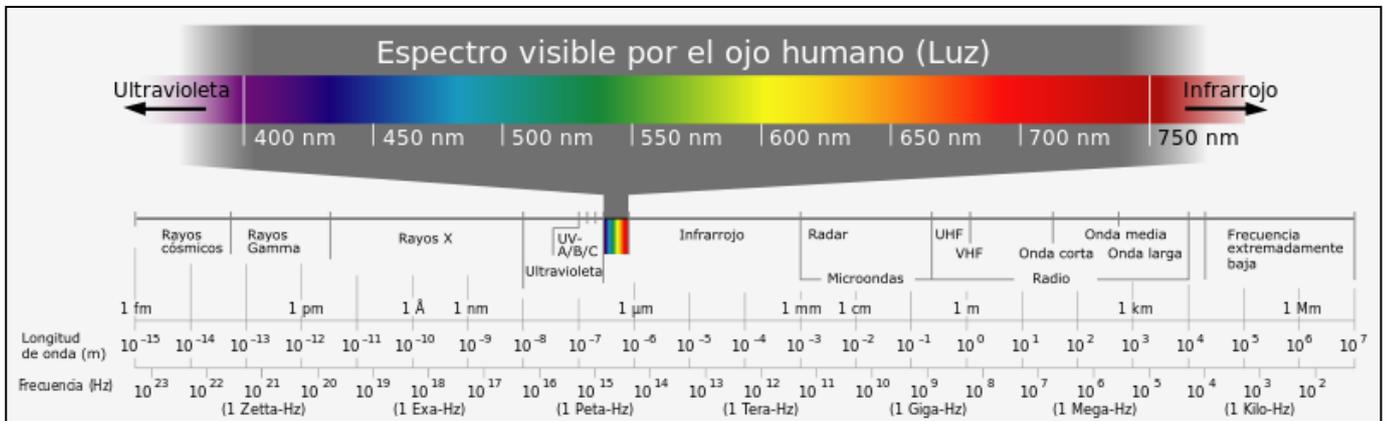
Esta energía que desprende el sol está distribuida con el siguiente espectro electromagnético:



**Fig. A.2** Espectro electromagnético del sol

El espectro electromagnético nos permite observar la distribución energética de los distintos tipos de ondas según su longitud de onda y frecuencia.

Como se observa en la figura A.3 en el amplio espectro de las ondas electromagnéticas solo una pequeña parte corresponde al espectro visible por el ojo humano. Este espectro aproximadamente está determinado entre los 380nm y los 780nm de longitud de onda.



**Fig. A.3** Espectro electromagnético

Comparando las dos figuras se puede observar como el sol irradia (energía / superficie) con mayor cantidad en el espectro visible por el ojo humano. Este hecho hace que podamos distinguir amplias variedades de colores.

**Anexo A.2** Magnitudes y unidades de medida

Radiometría es la medición del contenido de energía de los campos de radiación electromagnética y determina cómo esta energía se transfiere de una fuente, a través de un medio.

Los resultados de una medición radiométrica se obtienen normalmente en unidades de potencia, es decir, en vatios.

Sin embargo, el resultado puede expresarse también como flujo de fotones (fotones por segundo) o en unidades de energía (julios) o la dosis (fotones). La medición del efecto del medio sobre la transmisión de la radiación, es decir, la absorción, reflexión, dispersión o, generalmente se llama espectrofotometría y no será tratada aquí. Más bien, se hace la suposición de que la potencia radiante se transfiere a través de un medio sin pérdidas.

**Energía radiante** es la energía emitida, transferida o recibida en forma de radiación electromagnética.

Símbolo: Q, Unidad: joule (J)

**Potencia radiante o flujo radiante** es la potencia (energía por unidad de tiempo t) emitida, transferida, o recibida en forma de radiación electromagnética.

Símbolo:  $\Phi$ , Unidad: watt (W)

$$\phi = \frac{dQ}{dt}$$

**Irradiancia** es la relación de la potencia radiante que incide en un elemento infinitesimal de una superficie para el área proyectada de dicho elemento,  $dA_d$ , cuya normal es un ángulo  $\Theta_d$  a la dirección de la radiación.

Símbolo: E, Unidad: vatios/m<sup>2</sup> (W m<sup>-2</sup>).

$$E = \frac{d\phi}{\cos\theta_d dA_d}$$

**Exitancia** es la relación de potencia radiante dejando un elemento infinitesimal de una fuente a la área proyectada de dicho elemento, de área  $dA_s$  cuya normal es un  $\Theta_s$  ángulo con la dirección de la radiación.

Símbolo: M, Unidad: vatios/m<sup>2</sup> (W m<sup>-2</sup>).

$$M = \frac{d\phi}{\cos\theta_s dA_s}$$

**Intensidad radiante** (a menudo simplemente "intensidad") es la relación de la potencia radiante dejando una fuente a un elemento de ángulo sólido  $d\Omega$  en la que propaga en la dirección dada.

Símbolo:  $I$ , Unidad: vatios/estereorradianes ( $W\ sr^{-1}$ )

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$$

**Ángulo sólido** es la relación de una parte de la zona de la superficie de una esfera al cuadrado del radio  $r$  de la esfera.

Símbolo:  $\Omega$ , Unidad: estereorradianes (sr)

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2}$$

De la definición que el ángulo sólido subtendido por un cono de ángulo medio  $\phi$ , el vértice de que está en el centro de la esfera:

$$\Omega = 4\pi \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

**La radiancia** es la relación de la energía radiante, en una cantidad suficiente ángulo respecto a la normal del elemento de superficie, a los elementos infinitesimales de tanto la proyección del área y el ángulo sólido. Resplandor se puede definir en un punto en la superficie de cualquiera de una fuente o un detector, o en cualquier punto de la trayectoria de un rayo de radiación.

Símbolo:  $L$ , Unidad:  $W / sr \cdot m^2$  ( $W\ sr^{-1}m^{-2}$ ).

$$L = \frac{d\phi}{\cos \theta_s dA_s d\Omega}$$

**Flujo luminoso** (equivalente en fotometría al poder radiante y la unidad que es equivalente a la vatio es el lumen). El flujo luminoso es el flujo radiante espectral ponderado por la función de la respuesta ocular.

Símbolo:  $\Phi_v$ , Unidad: lumen (lm).

$$\phi_v = K_m \int \phi_\lambda V(\lambda) d\lambda$$

Donde  $V(\lambda)$  es la función espectral de la eficiencia luminosa y  $K_m$  es la eficacia luminosa por visión fotópica. La eficacia luminosa espectral se define cerca del máximo,  $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ , de la función de eficacia fotópica es aproximadamente  $683 \text{ lm W}^{-1}$ .

### A.2.1 Definiciones de la densidad de flujo luminoso

**La iluminancia** es el equivalente fotométrico de la irradiancia, es decir, la iluminancia es el flujo luminoso por unidad de área.

Símbolo:  $E_v$ , Unidad: lumen/metro<sup>2</sup> ( $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ )

$$E_v = \frac{d\phi_v}{\cos\theta_d dA_d}$$

La intensidad luminosa es el equivalente fotométrico de la intensidad luminosa.

**La intensidad luminosa** es el flujo luminoso por ángulo sólido. Por razones históricas, la unidad de luminosidad intensidad, la candela se define como la unidad base de la fotometría. Sin embargo, las unidades de intensidad luminosa o bien puede ser presentado como candelas o lúmenes / estereorradián.

Símbolo:  $I_v$ , Unidad: Candela o lumen/estereorradianes ( $\text{cd}$  o  $\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}$ ).

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

**La luminancia** es el equivalente fotométrico de radiación. La luminancia es el flujo luminoso por unidad de área por el ángulo sólido.

Símbolo:  $L_v$ , Unidad: candela/metro<sup>2</sup> ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

$$L_v = \frac{d\phi_v}{\cos\theta_s dA_s d\Omega}$$

**Eficiencia luminosa:** No toda la energía eléctrica consumida por una lámpara (bombilla, fluorescente, etc.) se transformaba en luz visible. Parte se pierde por calor, parte en forma de radiación no visible (infrarrojo o ultravioleta), etc.

Para hacernos una idea de la porción de energía útil definimos el rendimiento luminoso como el cociente entre el flujo luminoso producido y la potencia eléctrica consumida, que viene con las características de las lámparas (25 W, 60 W...). Mientras mayor sea mejor será la lámpara y menos gastará. La unidad es el lumen por watt ( $\text{lm/W}$ ).

**Energía lumínica:** Esta magnitud sólo tiene importancia para conocer el flujo luminoso que es capaz de dar un flash fotográfico o para comparar diferentes lámparas según la luz que emiten durante un cierto periodo de tiempo. Su símbolo es Q y su unidad es el lumen por segundo (lm·s).

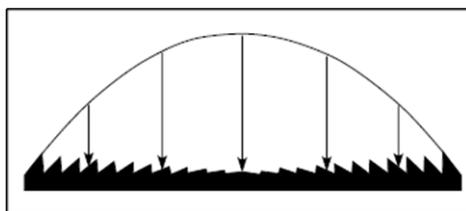
## Anexo B. Lentes Fresnell

Se detallan distintos aspectos de las lentes de Fresnell como las pérdidas que ocasiona, el nivel de concentración de la luz, etc. También se detallarán las especificaciones de la lente utilizada en el sistema de captación.

### Anexo B.1 Propiedades lentes Fresnell

Hace siglos se reconocieron las propiedades de las lentes centrándose en sus características. Se demostró que el único efecto que producía que una lente fuese más gruesa era las pérdidas por absorción.

En una lente de Fresnell se reduce el grueso creando una gran cantidad de secciones o ranuras cilíndricas de material como se muestra en la figura B.1.



**Fig B.1** Lente Fresnell

Se crean las ranuras dependiendo de la cantidad de cortes y de la curvatura cilíndrica que se quiera dar. La superficie inclinada de cada ranura es la porción correspondiente de la superficie esférica original, traducido hacia la superficie plana de la lente. En el interior de la lente las ranuras son casi paralelas a la cara plana mientras que en el borde exterior las superficies pueden llegar a tener la misma inclinación que el cilindro que se quiere imitar. La cantidad de inclinación que se quiera simular hará que varíe la distancia focal.

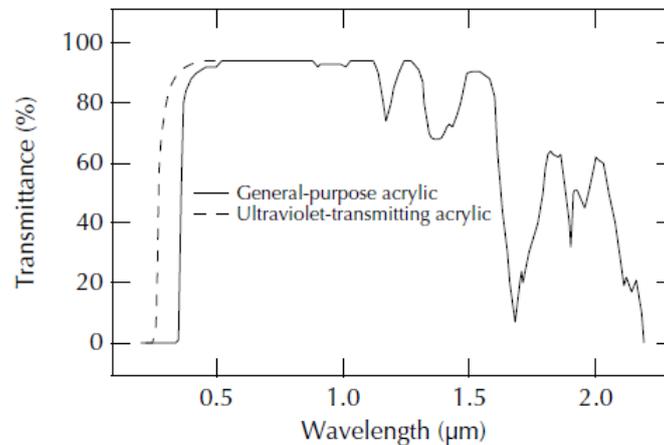
### Anexo B.2 Características lentes fresnell

En este apartado se detallan las características de las lentes utilizadas. A continuación se muestra la tabla con las propiedades de los materiales.

	Acrylic	Rigid vinyl	Polycarbonate
Index of refraction	1.49	1.54	1.586
Tensile modulus (10 <sup>3</sup> PSI)	325—470	350—600	345
Flexural modulus (10 <sup>3</sup> PSI)	390—470	300—500	340
Hardness	M80—M100 (Rockwell)	D65—85 (Shore)	M70—M72 (Rockwell)
Thermal expansion (10 <sup>-6</sup> /°C)	76	76	68
Service temp., °C	80	70	120
Specific gravity	1.19	1.45	1.20
Effect of sunlight	none	yellowes	yellowes slowly

**Fig B.2** propiedades materiales lentes

En la gráfica B.3 se muestra la curva de transmisividad que tiene el material acrílico para distintas longitudes de onda:



**Fig B.3** Transmisividad para acrílico

Aquí se muestran las características que más nos interesan para el sistema junto con la transmisividad del material. El tamaño de 32,7 cm de diámetro y una distancia focal de 61 cm. Con estos datos se podrá determinar el ángulo de incidencia con la fibra óptica.

Item #	Focal Length		Fresnel Size		Overall Size		Thickness		Grooves per		Conjugate	
	inches	mm	inches	mm	inches	mm	inches	mm	inch	mm	(inches)	groove flat
56	24	610	12.9	327	14	355	0.11	2.8	200	8	∞	24

**Tabla B.4** Características lente fresnell

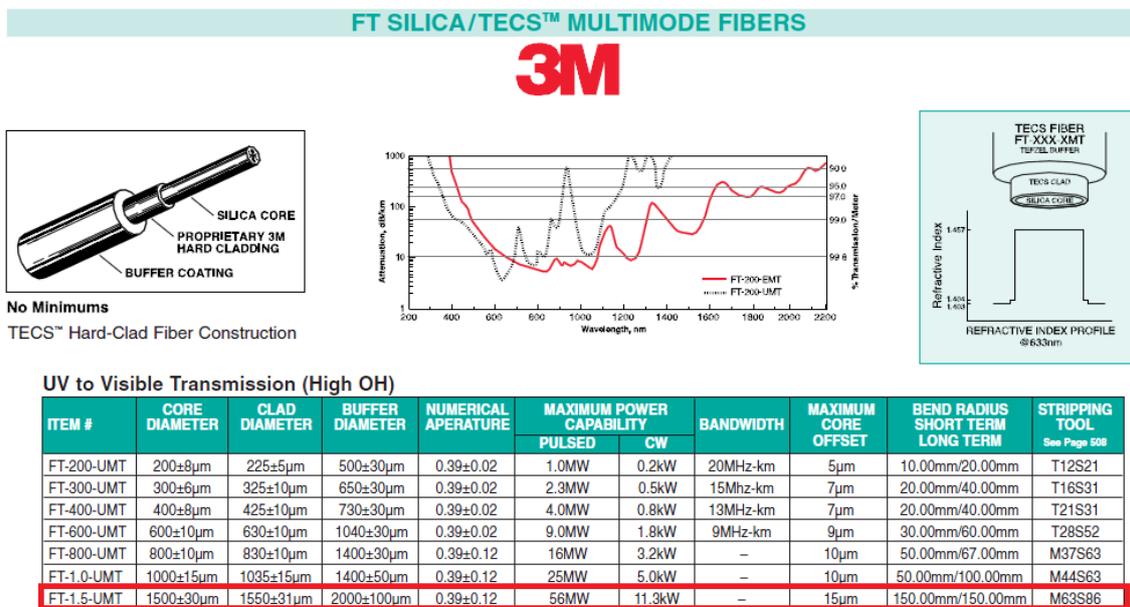
## Anexo C. Fibra óptica

La fibra óptica esta hecha de un hilo muy fino de material transparente que puede ser plástico, material vidrioso (cuarzo, silicio,...) o cerámico. Este medio de transmisión es el más utilizado en los últimos años para la transmisión de datos debido al gran ancho de banda y velocidad que se puede conseguir.

### Anexo C.1 Especificaciones fibra óptica utilizada

Las especificaciones de la fibra idónea para la utilización de un sistema de captación de luz son fibras con un gran diámetro de núcleo. De esta forma no se necesitan lentes con aberraciones mínimas. El problema de utilizar este tipo de fibras es su baja torsión.

En la figura C.1, C.2 y C.3 se muestran las características de la fibra que se utilizaría para un montaje de este tipo, con un diámetro del núcleo de 1,5mm.



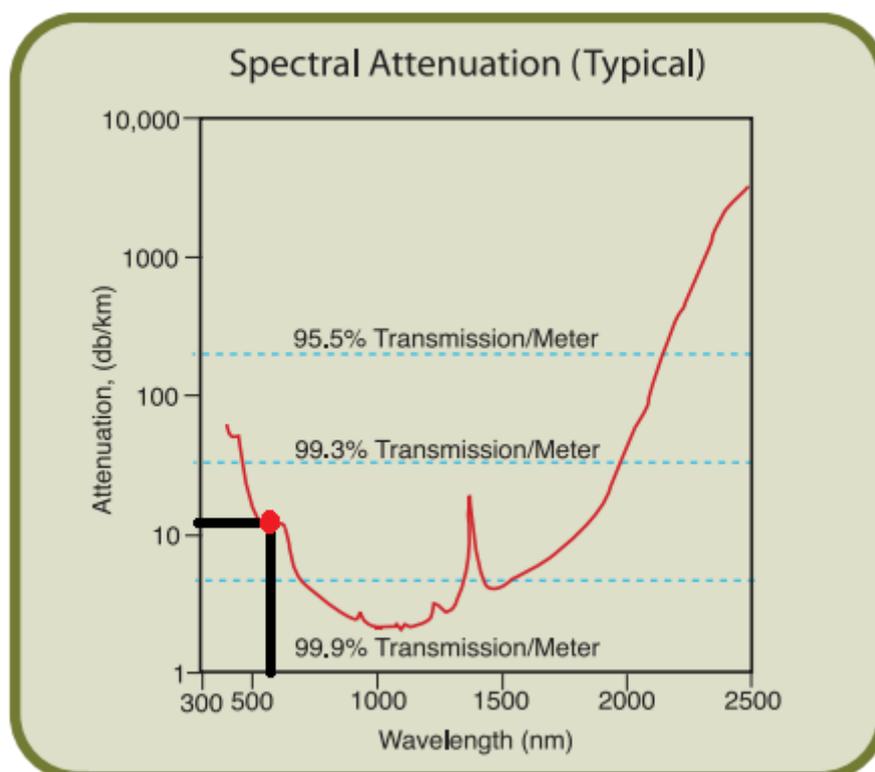
**Fig. C.1** Características fibras sistema

El ángulo de aceptación es alto (hasta 46°). Esto hará que no se necesite un captador demasiado extenso dado que la distancia entre la fibra y la lente será relativamente pequeña.

Core Diameter	1500 ± 30		
Clad Diameter	1550 ± 31		
Buffer Diameter1	2000 ± 100		
Bandwidth @ 820nm	—		
Maximum Core Offset	15		
Acceptance Angle (Full)			
– TECS 39	46°		
– TECS 48	—		
Maximum Power Capability			
– CW2	11.3		
– Pulsed3	56.6		
Operating Temperature @ 820nm	-65 to +125		
Proof Test Level	—		
Minimum Bend Diameter			
– Recommended Short Term5	150		
– Recommended Long Term6	300		
<b>Fiber</b>	<b>Type</b>	<b>Numerical Aperture4</b>	
	High-OH <sup>-</sup>	0.39 ± 0.02	FT-1.5-UMT* 98-0400-1363-7 18

**Fig. C.2** Características fibra FT 1.5-UMT

En la figura C.3 se muestra la curva de atenuación según la longitud de onda utilizada en la transmisión. Se puede observar que aproximadamente para una longitud de 550nm se pierden 15db/km.



**Fig. C.3** Curva de atenuación para FT1.5-UMT

## Anexo D. Algoritmo de posición solar

En este anexo se añaden las tablas con los términos periódicos de la tierra y los términos periódicos para la nutación en longitud y oblicuidad. Estas tablas son utilizadas para el cálculo de la posición solar para determinar las variables sumatorio de un término global de la nutación en longitud y oblicuidad ( $\Delta\epsilon$  y  $\Delta\Psi$ ).

Term	Row Number	A	B	C
<i>L0</i>	0	175347046	0	0
	1	3341656	4.6692568	6283.07585
	2	34894	4.6261	12566.1517
	3	3497	2.7441	5753.3849
	4	3418	2.8289	3.5231
	5	3136	3.6277	77713.7715
	6	2676	4.4181	7860.4194
	7	2343	6.1352	3930.2097
	8	1324	0.7425	11506.7698
	9	1273	2.0371	529.691
	10	1199	1.1096	1577.3435
	11	990	5.233	5884.927
	12	902	2.045	26.298
	13	857	3.508	398.149
	14	780	1.179	5223.694
	15	753	2.533	5507.553
	16	505	4.583	18849.228
	17	492	4.205	775.523
	18	357	2.92	0.067
	19	317	5.849	11790.629
	20	284	1.899	796.298
	21	271	0.315	10977.079
	22	243	0.345	5486.778
	23	206	4.806	2544.314
	24	205	1.869	5573.143
	25	202	2.458	6069.777
	26	156	0.833	213.299
	27	132	3.411	2942.463
	28	126	1.083	20.775
	29	115	0.645	0.98
	30	103	0.636	4694.003
	31	102	0.976	15720.839
	32	102	4.267	7.114

	33	99	6.21	2146.17
	34	98	0.68	155.42
	35	86	5.98	161000.69
	36	85	1.3	6275.96
	37	85	3.67	71430.7
	38	80	1.81	17260.15
	39	79	3.04	12036.46
	40	75	1.76	5088.63
	41	74	3.5	3154.69
	42	74	4.68	801.82
	43	70	0.83	9437.76
	44	62	3.98	8827.39
	45	61	1.82	7084.9
	46	57	2.78	6286.6
	47	56	4.39	14143.5
	48	56	3.47	6279.55
	49	52	0.19	12139.55
	50	52	1.33	1748.02
	51	51	0.28	5856.48
	52	49	0.49	1194.45
	53	41	5.37	8429.24
	54	41	2.4	19651.05
	55	39	6.17	10447.39
	56	37	6.04	10213.29
	57	37	2.57	1059.38
	58	36	1.71	2352.87
	59	36	1.78	6812.77
	60	33	0.59	17789.85
	61	30	0.44	83996.85
	62	30	2.74	1349.87
	63	25	3.16	4690.48
<i>LI</i>	0	628331966747	0	0
	1	206059	2.678235	6283.07585
	2	4303	2.6351	12566.1517
	3	425	1.59	3.523
	4	119	5.796	26.298
	5	109	2.966	1577.344
	6	93	2.59	18849.23
	7	72	1.14	529.69
	8	68	1.87	398.15
	9	67	4.41	5507.55
	10	59	2.89	5223.69
	11	56	2.17	155.42
	12	45	0.4	796.3
	13	36	0.47	775.52
	14	29	2.65	7.11

	15	21	5.34	0.98
	16	19	1.85	5486.78
	17	19	4.97	213.3
	18	17	2.99	6275.96
	19	16	0.03	2544.31
	20	16	1.43	2146.17
	21	15	1.21	10977.08
	22	12	2.83	1748.02
	23	12	3.26	5088.63
	24	12	5.27	1194.45
	25	12	2.08	4694
	26	11	0.77	553.57
	27	10	1.3	6286.6
	28	10	4.24	1349.87
	29	9	2.7	242.73
	30	9	5.64	951.72
	31	8	5.3	2352.87
	32	6	2.65	9437.76
	33	6	4.67	4690.48
<i>L2</i>	0	52919	0	0
	1	8720	1.0721	6283.0758
	2	309	0.867	12566.152
	3	27	0.05	3.52
	4	16	5.19	26.3
	5	16	3.68	155.42
	6	10	0.76	18849.23
	7	9	2.06	77713.77
	8	7	0.83	775.52
	9	5	4.66	1577.34
	10	4	1.03	7.11
	11	4	3.44	5573.14
	12	3	5.14	796.3
	13	3	6.05	5507.55
	14	3	1.19	242.73
	15	3	6.12	529.69
	16	3	0.31	398.15
	17	3	2.28	553.57
	18	2	4.38	5223.69
	19	2	3.75	0.98
<i>L3</i>	0	289	5.844	6283.076
	1	35	0	0
	2	17	5.49	12566.15
	3	3	5.2	155.42
	4	1	4.72	3.52
	5	1	5.3	18849.23
	6	1	5.97	242.73

<i>L4</i>	0	114	3.142	0
	1	8	4.13	6283.08
	2	1	3.84	12566.15
<i>L5</i>	0	1	3.14	0
<i>B0</i>	0	280	3.199	84334.662
	1	102	5.422	5507.553
	2	80	3.88	5223.69
	3	44	3.7	2352.87
	4	32	4	1577.34
<i>B1</i>	0	9	3.9	5507.55
	1	6	1.73	5223.69
<i>R0</i>	0	100013989	0	0
	1	1670700	3.0984635	6283.07585
	2	13956	3.05525	12566.1517
	3	3084	5.1985	77713.7715
	4	1628	1.1739	5753.3849
	5	1576	2.8469	7860.4194
	6	925	5.453	11506.77
	7	542	4.564	3930.21
	8	472	3.661	5884.927
	9	346	0.964	5507.553
	10	329	5.9	5223.694
	11	307	0.299	5573.143
	12	243	4.273	11790.629
	13	212	5.847	1577.344
	14	186	5.022	10977.079
	15	175	3.012	18849.228
	16	110	5.055	5486.778
	17	98	0.89	6069.78
	18	86	5.69	15720.84
	19	86	1.27	161000.69
	20	65	0.27	17260.15
	21	63	0.92	529.69
	22	57	2.01	83996.85
	23	56	5.24	71430.7
	24	49	3.25	2544.31
	25	47	2.58	775.52
	26	45	5.54	9437.76
	27	43	6.01	6275.96
	28	39	5.36	4694
	29	38	2.39	8827.39
	30	37	0.83	19651.05
	31	37	4.9	12139.55
	32	36	1.67	12036.46
	33	35	1.84	2942.46
	34	33	0.24	7084.9

	35	32	0.18	5088.63
	36	32	1.78	398.15
	37	28	1.21	6286.6
	38	28	1.9	6279.55
	39	26	4.59	10447.39
<b>R1</b>	0	103019	1.10749	6283.07585
	1	1721	1.0644	12566.1517
	2	702	3.142	0
	3	32	1.02	18849.23
	4	31	2.84	5507.55
	5	25	1.32	5223.69
	6	18	1.42	1577.34
	7	10	5.91	10977.08
	8	9	1.42	6275.96
	9	9	0.27	5486.78
<b>R2</b>	0	4359	5.7846	6283.0758
	1	124	5.579	12566.152
	2	12	3.14	0
	3	9	3.63	77713.77
	4	6	1.87	5573.14
	5	3	5.47	18849.23
<b>R3</b>	0	145	4.273	6283.076
	1	7	3.92	12566.15
<b>R4</b>	0	4	2.56	6283.08

Fig. D.1 tabla de términos periódicos de la tierra

Coefficients for Sin terms					Coefficients for $\Delta\psi$		Coefficients for $\Delta\epsilon$	
Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	a	b	c	d
0	0	0	0	1	-171996	-174.2	92025	8.9
-2	0	0	2	2	-13187	-1.6	5736	-3.1
0	0	0	2	2	-2274	-0.2	977	-0.5
0	0	0	0	2	2062	0.2	-895	0.5
0	1	0	0	0	1426	-3.4	54	-0.1
0	0	1	0	0	712	0.1	-7	
-2	1	0	2	2	-517	1.2	224	-0.6
0	0	0	2	1	-386	-0.4	200	
0	0	1	2	2	-301		129	-0.1
-2	-1	0	2	2	217	-0.5	-95	0.3
-2	0	1	0	0	-158			
-2	0	0	2	1	129	0.1	-70	
0	0	-1	2	2	123		-53	
2	0	0	0	0	63			

0	0	1	0	1	63	0.1	-33	
2	0	-1	2	2	-59		26	
0	0	-1	0	1	-58	-0.1	32	
0	0	1	2	1	-51		27	
-2	0	2	0	0	48			
0	0	-2	2	1	46		-24	
2	0	0	2	2	-38		16	
0	0	2	2	2	-31		13	
0	0	2	0	0	29			
-2	0	1	2	2	29		-12	
0	0	0	2	0	26			
-2	0	0	2	0	-22			
0	0	-1	2	1	21		-10	
0	2	0	0	0	17	-0.1		
2	0	-1	0	1	16		-8	
-2	2	0	2	2	-16	0.1	7	
0	1	0	0	1	-15		9	
-2	0	1	0	1	-13		7	
0	-1	0	0	1	-12		6	
0	0	2	-2	0	11			
2	0	-1	2	1	-10		5	
2	0	1	2	2	-8		3	
0	1	0	2	2	7		-3	
-2	1	1	0	0	-7			
0	-1	0	2	2	-7		3	
2	0	0	2	1	-7		3	
2	0	1	0	0	6			
-2	0	2	2	2	6		-3	
-2	0	1	2	1	6		-3	
2	0	-2	0	1	-6		3	
2	0	0	0	1	-6		3	
0	-1	1	0	0	5			
-2	-1	0	2	1	-5		3	
-2	0	0	0	1	-5		3	
0	0	2	2	1	-5		3	
-2	0	2	0	1	4			
-2	1	0	2	1	4			
0	0	1	-2	0	4			
-1	0	1	0	0	-4			
-2	1	0	0	0	-4			
1	0	0	0	0	-4			
0	0	1	2	0	3			
0	0	-2	2	2	-3			
-1	-1	1	0	0	-3			
0	1	1	0	0	-3			
0	-1	1	2	2	-3			
2	-1	-1	2	2	-3			
0	0	3	2	2	-3			
2	-1	0	2	2	-3			

Fig. D.2 tabla de términos periódicos para la nutación en longitud y oblicuidad

El código del programa de orientación solar se añade a continuación:

```

//////////////////////////////////// //
// Posicion solar//
// Definicion de variables//

#ifdef __solar_position_algorithm_header
#define __solar_position_algorithm_header
//Distintas funciones de los resultados finales:
enum {
SPA_ZA, //Calculo de elevación y azimut
SPA_ZA_INC, //Calculo de elevación y azimut y angulo de incidencia
SPA_ZA_RTS, //Calculo de elevación y azimut y "sun rise/transit/set
values"
SPA_ALL, //Calculo de todos los valores (tambien intermedios)
};
typedef struct
{
//-----Valores de entrada-----
int year; // 4-digitos para el año, rango valido: -2000 to 6000
int month; // 2-digitos mes, rango valido: 1 a 12
int day; // 2-digitos dia, rango valido: 1 a 31
int hour; // hora , rango valido: 0 a 24
int minute; // minutos, rango valido: 0 a 59
int second; // segundos, rango valido: 0 a 59
double delta_t; // Diferencia temporal entre la rotacion de la tierra
y tiempo terrestre
// Esto solo se puede sacar de la observacion del tiempo de rotacion
de la tierra
// Donde: delta_t = 32.184 + (TAI-UTC) + DUT1
// rango valido: -8000 a 8000 segundos
double timezone; // Zona horaria segun mapa (negativo al este del
greenwich)
// rango valido: -12 a 12 horas
double longitude; // longitud (negativo al este del greenwich)
// rango valido: -180 a 180 grados
double latitude; // latitud (negativo al sur del ecuador)
// rango valido: -90 a 90 grados
double elevation; // elevacion del lugar [metros]
// rango valido: -6500000 a mas ...
double pressure; // Media de presion anual [milibars]
// rango valido: 0 a 5000 milibars
double temperature; // Media de temperatura de lugar [grados celsius]
// rango valido: -273 a 6000 grados celsius
double slope; // angulo de la superficie(pendiente) (medida desde
plano horizontal)
// rango valido: -360 a 360 grados
double azm_rotation; // angulo azimut rotacional (medida desde el sur
de la proyeccion en el plano horizontal, este negativo)
// rango valido: -360 a 360 grados
double atmos_refract; // refraccion atmosferica (0.5667 deg
normalmente)
// rango valido: -5 to 5 degrees
int function; // funcion de salida (los 4 valores)
//-----Valores intermedios -----
double jd; //Dias julianos
double jc; //Siglo juliano
double jde; //Dia efemeride juliano
double jce; //Siglo efemeride juliano
double jme; //Milenio efemeride juliano
double l; //longitud heliocentrica de la tierra [grados]

```

```

double b; //latitud heliocentrica respecto la tierra [grados]
double r; //vector radio tierra [unidades astronomicas, AU]
double theta; //latitud geocentrica [grados]
double beta; //latitud geocentrica [grados]
double x0; //elongacion [grados]
double x1; //anomalias? [grados]
double x2; //anomalias? [grados]
double x3; //latitud [grados]
double x4; //longitud ascension[grados]
double del_psi; //longitud nutacional [grados]
double del_epsilon; //obliquidad nutacional[grados]
double epsilon0; //obliquidad eliptica[arc segundos]
double epsilon; //obliquidad eliptica [grados]
double del_tau; //correccion de aberracion [grados]
double lamda; //longitud solar aparente[grados]
double nu0; //Greenwich sidereal [grados]
double nu; //Greenwich sidereal [grados]
double alpha; //ascension geocentrica del sol [grados]
double delta; //declinacion geocentrica del sol[grados]
double h; //angulo de observacion solar [grados]
double xi; //posicion solar equatorial parallax [grados]
double del_alpha; //ascension solar [grados]
double delta_prime; //declinacion topocentrica del sol[grados]
double alpha_prime; //ascension topocentrica del sol[grados]
double h_prime; //angulo hora topocentrico [grados]
double e0; //angulo elevacion topocentrico (uncorrected) [grados]
double del_e; //correccion atmosferica [grados]
double e; //angulo elevacion topocentrico(corrected) [grados]
double eot; //ecuacion de tiempo [minutos]
double srha; //sunrise[grados]
double ssha; //sunset [grados]
double sta; // transit altitud [grados]
//-----valores finales-----
double zenith; //angulo zenith (elevacion) [grados]
double azimuth180; //azimut angulo (de sur a oeste) [-180 a 180
grados]
double azimuth; //azimut angulo (de norte a este) [ 0 a 360 grados]
double incidence; //angulo de incidencia solar [grados]
double suntransit; //transit [fraccion de horas]
double sunrise; //sunrise (+/- 30 segundos) [fraccion de horas]
double sunset; //sunset (+/- 30 segundos) [fraccion de horas]
} spa_data;

int spa_calculate(spa_data *spa);
#endif

```

Fig. D.3 código APS.h

```

////////////////////////////////////
//Algoritmo Posicion solar//
// //

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include "windows.h"
#include "APS.h"
#define PI 3.1415926535897932384626433832795028841971
#define SUN_RADIUS 0.26667
#define L_COUNT 6

```

```

#define B_COUNT 2
#define R_COUNT 5
#define Y_COUNT 63
#define L_MAX_SUBCOUNT 64
#define B_MAX_SUBCOUNT 5
#define R_MAX_SUBCOUNT 40
enum {TERM_A, TERM_B, TERM_C, TERM_COUNT};
enum {TERM_X0, TERM_X1, TERM_X2, TERM_X3, TERM_X4, TERM_X_COUNT};
enum {TERM_PSI_A, TERM_PSI_B, TERM_EPS_C, TERM_EPS_D, TERM_PE_COUNT};
enum {JD_MINUS, JD_ZERO, JD_PLUS, JD_COUNT};
enum {SUN_TRANSIT, SUN_RISE, SUN_SET, SUN_COUNT};
#define TERM_Y_COUNT TERM_X_COUNT
//numero de lineas de cada tabla definida
const int l_subcount[L_COUNT] = {64,34,20,7,3,1};
const int b_subcount[B_COUNT] = {5,2};
const int r_subcount[R_COUNT] = {40,10,6,2,1};
////////////////////////////////////
/// Terminos periodicos de la tierra (tablas del documento en arrays)
////////////////////////////////////
const double L_TERMS[L_COUNT][L_MAX_SUBCOUNT][TERM_COUNT]=
{
{
{175347046.0,0,0},
{3341656.0,4.6692568,6283.07585},
{34894.0,4.6261,12566.1517},
{3497.0,2.7441,5753.3849},
{3418.0,2.8289,3.5231},
{3136.0,3.6277,77713.7715},
{2676.0,4.4181,7860.4194},
{2343.0,6.1352,3930.2097},
{1324.0,0.7425,11506.7698},
{1273.0,2.0371,529.691},
{1199.0,1.1096,1577.3435},
{990,5.233,5884.927},
{902,2.045,26.298},
{857,3.508,398.149},
{780,1.179,5223.694},
{753,2.533,5507.553},
{505,4.583,18849.228},
{492,4.205,775.523},
{357,2.92,0.067},
{317,5.849,11790.629},
{284,1.899,796.298},
{271,0.315,10977.079},
{243,0.345,5486.778},
{206,4.806,2544.314},
{205,1.869,5573.143},
{202,2.458,6069.777},
{156,0.833,213.299},
{132,3.411,2942.463},
{126,1.083,20.775},
{115,0.645,0.98},
{103,0.636,4694.003},
{102,0.976,15720.839},
{102,4.267,7.114},
{99,6.21,2146.17},
{98,0.68,155.42},
{86,5.98,161000.69},
{85,1.3,6275.96},
{85,3.67,71430.7},
{80,1.81,17260.15},

```

```
{79,3.04,12036.46},
{75,1.76,5088.63},
{74,3.5,3154.69},
{74,4.68,801.82},
{70,0.83,9437.76},
{62,3.98,8827.39},
{61,1.82,7084.9},
{57,2.78,6286.6},
{56,4.39,14143.5},
{56,3.47,6279.55},
{52,0.19,12139.55},
{52,1.33,1748.02},
{51,0.28,5856.48},
{49,0.49,1194.45},
{41,5.37,8429.24},
{41,2.4,19651.05},
{39,6.17,10447.39},
{37,6.04,10213.29},
{37,2.57,1059.38},
{36,1.71,2352.87},
{36,1.78,6812.77},
{33,0.59,17789.85},
{30,0.44,83996.85},
{30,2.74,1349.87},
{25,3.16,4690.48}
},
{
{628331966747.0,0,0},
{206059.0,2.678235,6283.07585},
{4303.0,2.6351,12566.1517},
{425.0,1.59,3.523},
{119.0,5.796,26.298},
{109.0,2.966,1577.344},
{93,2.59,18849.23},
{72,1.14,529.69},
{68,1.87,398.15},
{67,4.41,5507.55},
{59,2.89,5223.69},
{56,2.17,155.42},
{45,0.4,796.3},
{36,0.47,775.52},
{29,2.65,7.11},
{21,5.34,0.98},
{19,1.85,5486.78},
{19,4.97,213.3},
{17,2.99,6275.96},
{16,0.03,2544.31},
{16,1.43,2146.17},
{15,1.21,10977.08},
{12,2.83,1748.02},
{12,3.26,5088.63},
{12,5.27,1194.45},
{12,2.08,4694},
{11,0.77,553.57},
{10,1.3,6286.6},
{10,4.24,1349.87},
{9,2.7,242.73},
{9,5.64,951.72},
{8,5.3,2352.87},
{6,2.65,9437.76},
{6,4.67,4690.48}
```

```

},
{
{52919.0,0,0},
{8720.0,1.0721,6283.0758},
{309.0,0.867,12566.152},
{27,0.05,3.52},
{16,5.19,26.3},
{16,3.68,155.42},
{10,0.76,18849.23},
{9,2.06,77713.77},
{7,0.83,775.52},
{5,4.66,1577.34},
{4,1.03,7.11},
{4,3.44,5573.14},
{3,5.14,796.3},
{3,6.05,5507.55},
{3,1.19,242.73},
{3,6.12,529.69},
{3,0.31,398.15},
{3,2.28,553.57},
{2,4.38,5223.69},
{2,3.75,0.98}
},
{
{289.0,5.844,6283.076},
{35,0,0},
{17,5.49,12566.15},
{3,5.2,155.42},
{1,4.72,3.52},
{1,5.3,18849.23},
{1,5.97,242.73}
},
{
{114.0,3.142,0},
{8,4.13,6283.08},
{1,3.84,12566.15}
},
{
{1,3.14,0}
}
};
const double B_TERMS[B_COUNT][B_MAX_SUBCOUNT][TERM_COUNT]=
{
{
{280.0,3.199,84334.662},
{102.0,5.422,5507.553},
{80,3.88,5223.69},
{44,3.7,2352.87},
{32,4,1577.34}
},
{
{9,3.9,5507.55},
{6,1.73,5223.69}
}
};
const double R_TERMS[R_COUNT][R_MAX_SUBCOUNT][TERM_COUNT]=
{
{
{100013989.0,0,0},
{1670700.0,3.0984635,6283.07585},
{13956.0,3.05525,12566.1517},

```

```
{3084.0,5.1985,77713.7715},
{1628.0,1.1739,5753.3849},
{1576.0,2.8469,7860.4194},
{925.0,5.453,11506.77},
{542.0,4.564,3930.21},
{472.0,3.661,5884.927},
{346.0,0.964,5507.553},
{329.0,5.9,5223.694},
{307.0,0.299,5573.143},
{243.0,4.273,11790.629},
{212.0,5.847,1577.344},
{186.0,5.022,10977.079},
{175.0,3.012,18849.228},
{110.0,5.055,5486.778},
{98,0.89,6069.78},
{86,5.69,15720.84},
{86,1.27,161000.69},
{65,0.27,17260.15},
{63,0.92,529.69},
{57,2.01,83996.85},
{56,5.24,71430.7},
{49,3.25,2544.31},
{47,2.58,775.52},
{45,5.54,9437.76},
{43,6.01,6275.96},
{39,5.36,4694},
{38,2.39,8827.39},
{37,0.83,19651.05},
{37,4.9,12139.55},
{36,1.67,12036.46},
{35,1.84,2942.46},
{33,0.24,7084.9},
{32,0.18,5088.63},
{32,1.78,398.15},
{28,1.21,6286.6},
{28,1.9,6279.55},
{26,4.59,10447.39}
},
{
{103019.0,1.10749,6283.07585},
{1721.0,1.0644,12566.1517},
{702.0,3.142,0},
{32,1.02,18849.23},
{31,2.84,5507.55},
{25,1.32,5223.69},
{18,1.42,1577.34},
{10,5.91,10977.08},
{9,1.42,6275.96},
{9,0.27,5486.78}
},
{
{4359.0,5.7846,6283.0758},
{124.0,5.579,12566.152},
{12,3.14,0},
{9,3.63,77713.77},
{6,1.87,5573.14},
{3,5.47,18849.23}
},
{
{145.0,4.273,6283.076},
{7,3.92,12566.15}
```

```
},
{
{4,2.56,6283.08}
}
};
////////////////////////////////////
/// Terminos periodicos para la nutacion en longitud y obliquidad
/// (terminos Y)
////////////////////////////////////
const int Y_TERMS[Y_COUNT][TERM_Y_COUNT]=
{
{0,0,0,0,1},
{-2,0,0,2,2},
{0,0,0,2,2},
{0,0,0,0,2},
{0,1,0,0,0},
{0,0,1,0,0},
{-2,1,0,2,2},
{0,0,0,2,1},
{0,0,1,2,2},
{-2,-1,0,2,2},
{-2,0,1,0,0},
{-2,0,0,2,1},
{0,0,-1,2,2},
{2,0,0,0,0},
{0,0,1,0,1},
{2,0,-1,2,2},
{0,0,-1,0,1},
{0,0,1,2,1},
{-2,0,2,0,0},
{0,0,-2,2,1},
{2,0,0,2,2},
{0,0,2,2,2},
{0,0,2,0,0},
{-2,0,1,2,2},
{0,0,0,2,0},
{-2,0,0,2,0},
{0,0,-1,2,1},
{0,2,0,0,0},
{2,0,-1,0,1},
{-2,2,0,2,2},
{0,1,0,0,1},
{-2,0,1,0,1},
{0,-1,0,0,1},
{0,0,2,-2,0},
{2,0,-1,2,1},
{2,0,1,2,2},
{0,1,0,2,2},
{-2,1,1,0,0},
{0,-1,0,2,2},
{2,0,0,2,1},
{2,0,1,0,0},
{-2,0,2,2,2},
{-2,0,1,2,1},
{2,0,-2,0,1},
{2,0,0,0,1},
{0,-1,1,0,0},
{-2,-1,0,2,1},
{-2,0,0,0,1},
{0,0,2,2,1},
{-2,0,2,0,1},
```

```
{-2,1,0,2,1},
{0,0,1,-2,0},
{-1,0,1,0,0},
{-2,1,0,0,0},
{1,0,0,0,0},
{0,0,1,2,0},
{0,0,-2,2,2},
{-1,-1,1,0,0},
{0,1,1,0,0},
{0,-1,1,2,2},
{2,-1,-1,2,2},
{0,0,3,2,2},
{2,-1,0,2,2},
};
//terminos a,b,c,d de lo y0,y1,y2 y y3
const double PE_TERMS[Y_COUNT][TERM_PE_COUNT]={
{-171996,-174.2,92025,8.9},
{-13187,-1.6,5736,-3.1},
{-2274,-0.2,977,-0.5},
{2062,0.2,-895,0.5},
{1426,-3.4,54,-0.1},
{712,0.1,-7,0},
{-517,1.2,224,-0.6},
{-386,-0.4,200,0},
{-301,0,129,-0.1},
{217,-0.5,-95,0.3},
{-158,0,0,0},
{129,0.1,-70,0},
{123,0,-53,0},
{63,0,0,0},
{63,0.1,-33,0},
{-59,0,26,0},
{-58,-0.1,32,0},
{-51,0,27,0},
{48,0,0,0},
{46,0,-24,0},
{-38,0,16,0},
{-31,0,13,0},
{29,0,0,0},
{29,0,-12,0},
{26,0,0,0},
{-22,0,0,0},
{21,0,-10,0},
{17,-0.1,0,0},
{16,0,-8,0},
{-16,0.1,7,0},
{-15,0,9,0},
{-13,0,7,0},
{-12,0,6,0},
{11,0,0,0},
{-10,0,5,0},
{-8,0,3,0},
{7,0,-3,0},
{-7,0,0,0},
{-7,0,3,0},
{-7,0,3,0},
{6,0,0,0},
{6,0,-3,0},
{6,0,-3,0},
{-6,0,3,0},
{-6,0,3,0},
```

```

{5,0,0,0},
{-5,0,3,0},
{-5,0,3,0},
{-5,0,3,0},
{-5,0,3,0},
{4,0,0,0},
{4,0,0,0},
{4,0,0,0},
{-4,0,0,0},
{-4,0,0,0},
{-4,0,0,0},
{3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
{-3,0,0,0},
};
////////////////////////////////////
// Funciones comunes que se repiten por ejemplo para pasar de radianes
// a grados y al revés
// normalizar los grados, etc
double rad2deg(double radians)
{
return (180.0/PI)*radians;
}
double deg2rad(double degrees)
{
return (PI/180.0)*degrees;
}
double limit_degrees(double degrees)
{
double limited;
degrees /= 360.0;
limited = 360.0*(degrees - floor(degrees));
if (limited < 0) limited += 360.0;
return limited;
}
double limit_degrees180pm(double degrees)
{
double limited;
degrees /= 360.0;
limited = 360.0*(degrees-floor(degrees));
if (limited < -180.0) limited += 360.0;
else if (limited > 180.0) limited -= 360.0;
return limited;
}
double limit_degrees180(double degrees)
{
double limited;
degrees /= 180.0;
limited = 180.0*(degrees-floor(degrees));
if (limited < 0) limited += 180.0;
return limited;
}
double limit_zero2one(double value)
{
double limited;
limited = value - floor(value);
if (limited < 0) limited += 1.0;
}

```

```
return limited;
}
double limit_minutes(double minutes)
{
double limited=minutes;
if (limited < -20.0) limited += 1440.0;
else if (limited > 20.0) limited -= 1440.0;
return limited;
}
double dayfrac_to_local_hr(double dayfrac, double timezone)
{
return 24.0*limit_zero2one(dayfrac + timezone/24.0);
}
double third_order_polynomial(double a, double b, double c, double d,
double x)
{
return ((a*x + b)*x + c)*x + d;
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
int validate_inputs(spa_data *spa)
{
return 0;
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//calculo de los tiempos en julianos para darles un ID unico y regular
el tiempo para todos
//los lugares donde se emplee
double julian_day (int year, int month, int day, int hour, int minute,
int second, double tz)
{
double day_decimal, julian_day, a;
day_decimal = day + (hour - tz + (minute + second/60.0)/60.0)/24.0;
if (month < 3) {
month += 12;
year--;
}
julian_day = floor(365.25*(year+4716.0)) + floor(30.6001*(month+1)) +
day_decimal - 1524.5;
if (julian_day > 2299160.0) {
a = floor(year/100);
julian_day += (2 - a + floor(a/4));
}
return julian_day;
}
double julian_century(double jd)
{
return (jd-2451545.0)/36525.0;
}
double julian_ephemeris_day(double jd, double delta_t)
{
return jd+delta_t/86400.0;
}
double julian_ephemeris_century(double jde)
{
return (jde - 2451545.0)/36525.0;
}
double julian_ephemeris_millennium(double jce)
{
return (jce/10.0);
}
```

```

}
// 3.2 Calculate the Earth heliocentric longitude, latitude, and
// radius vector (L, B, and R)
double earth_periodic_term_summation(const double terms[][TERM_COUNT],
int count, double jme)
{
int i;
double sum=0;
for (i = 0; i < count; i++)
sum += terms[i][TERM_A]*cos(terms[i][TERM_B]+terms[i][TERM_C]*jme);
return sum;
}
double earth_values(double term_sum[], int count, double jme)
{
int i;
double sum=0;
for (i = 0; i < count; i++)
sum += term_sum[i]*pow(jme, i);
sum /= 1.0e8;
return sum;
}
double earth_heliocentric_longitude(double jme)
{
double sum[L_COUNT];
int i;
for (i = 0; i < L_COUNT; i++)
sum[i] = earth_periodic_term_summation(L_TERMS[i], l_subcount[i],
jme);
return limit_degrees(rad2deg(earth_values(sum, L_COUNT, jme)));
}
double earth_heliocentric_latitude(double jme)
{
double sum[B_COUNT];
int i;
for (i = 0; i < B_COUNT; i++)
sum[i] = earth_periodic_term_summation(B_TERMS[i], b_subcount[i],
jme);
return rad2deg(earth_values(sum, B_COUNT, jme));
}
double earth_radius_vector(double jme)
{
double sum[R_COUNT];
int i;
for (i = 0; i < R_COUNT; i++)
sum[i] = earth_periodic_term_summation(R_TERMS[i], r_subcount[i],
jme);
return earth_values(sum, R_COUNT, jme);
}
//3.3. Calculate the geocentric longitude and latitude

double geocentric_longitude(double l)
{
double theta = l + 180.0;
if (theta >= 360.0) theta -= 360.0;
return theta;
}
double geocentric_latitude(double b)
{
return -b;
}
// 3.4. Calculate the nutation in longitude and obliquity

```

```

double mean_elongation_moon_sun(double jce)
{
return third_order_polynomial(1.0/189474.0, -0.0019142, 445267.11148,
297.85036, jce);
}
double mean_anomaly_sun(double jce)
{
return third_order_polynomial(-1.0/300000.0, -0.0001603, 35999.05034,
357.52772, jce);
}
double mean_anomaly_moon(double jce)
{
return third_order_polynomial(1.0/56250.0, 0.0086972, 477198.867398,
134.96298, jce);
}
double argument_latitude_moon(double jce)
{
return third_order_polynomial(1.0/327270.0, -0.0036825, 483202.017538,
93.27191, jce);
}
double ascending_longitude_moon(double jce)
{
return third_order_polynomial(1.0/450000.0, 0.0020708, -1934.136261,
125.04452, jce);
}
double xy_term_summation(int i, double x[TERM_X_COUNT])
{
int j;
double sum=0;
for (j = 0; j < TERM_Y_COUNT; j++)
sum += x[j]*Y_TERMS[i][j];
return sum;
}
void nutation_longitude_and_obliquity(double jce, double
x[TERM_X_COUNT], double *del_psi,
double *del_epsilon)
{
int i;
double xy_term_sum, sum_psi=0, sum_epsilon=0;
for (i = 0; i < Y_COUNT; i++) {
xy_term_sum = deg2rad(xy_term_summation(i, x));
sum_psi += (PE_TERMS[i][TERM_PSI_A] +
jce*PE_TERMS[i][TERM_PSI_B])*sin(xy_term_sum);
sum_epsilon += (PE_TERMS[i][TERM_EPS_C] +
jce*PE_TERMS[i][TERM_EPS_D])*cos(xy_term_sum);
}
*del_psi = sum_psi / 36000000.0;
*del_epsilon = sum_epsilon / 36000000.0;
}

//3.5. Calculate the true obliquity of the ecliptic

double ecliptic_mean_obliquity(double jme)
{
double u = jme/10.0;
return 84381.448 + u*(-4680.96 + u*(-1.55 + u*(1999.25 + u*(-51.38 +
u*(-249.67 +
u*(-39.05 + u*( 7.12 + u*( 27.87 + u*( 5.79 + u*2.45)))))))));
}
double ecliptic_true_obliquity(double delta_epsilon, double epsilon0)

```

```
{
return delta_epsilon + epsilon0/3600.0;
}

//3.6. Calculate the aberration correction

double aberration_correction(double r)
{
return -20.4898 / (3600.0*r);
}

//3.7. Calculate the apparent sun longitude

double apparent_sun_longitude(double theta, double delta_psi, double
delta_tau)
{
return theta + delta_psi + delta_tau;
}

//3.8. Calculate the apparent sidereal time at Greenwich at any given
time

double greenwich_mean_sidereal_time (double jd, double jc)
{
return limit_degrees(280.46061837 + 360.98564736629 * (jd - 2451545.0)
+
jc*jc*(0.000387933 - jc/38710000.0));
}
double greenwich_sidereal_time (double nu0, double delta_psi, double
epsilon)
{
return nu0 + delta_psi*cos(deg2rad(epsilon));
}

//3.9. Calculate the geocentric sun right ascension

double geocentric_sun_right_ascension(double lamda, double epsilon,
double beta)
{
double lamda_rad = deg2rad(lamda);
double epsilon_rad = deg2rad(epsilon);
return limit_degrees(rad2deg(atan2(sin(lamda_rad)*cos(epsilon_rad) -
tan(deg2rad(beta))*sin(epsilon_rad), cos(lamda_rad))));
}

//3.10. Calculate the geocentric sun declination

double geocentric_sun_declination(double beta, double epsilon, double
lamda)
{
double beta_rad = deg2rad(beta);
double epsilon_rad = deg2rad(epsilon);
return rad2deg(asin(sin(beta_rad)*cos(epsilon_rad) +
cos(beta_rad)*sin(epsilon_rad)*sin(deg2rad(lamda))));
}

//3.11. Calculate the observer local hour angle

double observer_hour_angle(double nu, double longitude, double
alpha_deg)
{
```

```

return limit_degrees(nu + longitude - alpha_deg);
}

//3.12. Calculate the topocentric sun right ascension

double sun_equatorial_horizontal_parallax(double r)
{
return 8.794 / (3600.0 * r);
}

void sun_right_ascension_parallax_and_topocentric_dec(double latitude,
double elevation,
double xi, double h, double delta, double *delta_alpha, double
*delta_prime)
{
double delta_alpha_rad;
double lat_rad = deg2rad(latitude);
double xi_rad = deg2rad(xi);
double h_rad = deg2rad(h);
double delta_rad = deg2rad(delta);
double u = atan(0.99664719 * tan(lat_rad));
double y = 0.99664719 * sin(u) + elevation*sin(lat_rad)/6378140.0;
double x = cos(u) + elevation*cos(lat_rad)/6378140.0;
delta_alpha_rad = atan2(- x*sin(xi_rad) *sin(h_rad),
cos(delta_rad) - x*sin(xi_rad) *cos(h_rad));
*delta_prime = rad2deg(atan2((sin(delta_rad) -
y*sin(xi_rad))*cos(delta_alpha_rad),
cos(delta_rad) - x*sin(xi_rad) *cos(h_rad)));
*delta_alpha = rad2deg(delta_alpha_rad);
}

double topocentric_sun_right_ascension(double alpha_deg, double
delta_alpha)
{
return alpha_deg + delta_alpha;
}

//3.13. Calculate the topocentric local hour angle

double topocentric_local_hour_angle(double h, double delta_alpha)
{
return h - delta_alpha;
}

//3.14. Calculate the topocentric zenith angle

double topocentric_elevation_angle(double latitude, double
delta_prime, double h_prime)
{
double lat_rad = deg2rad(latitude);
double delta_prime_rad = deg2rad(delta_prime);
return rad2deg(asin(sin(lat_rad)*sin(delta_prime_rad) +
cos(lat_rad)*cos(delta_prime_rad) * cos(deg2rad(h_prime))));
}

double atmospheric_refraction_correction(double pressure, double
temperature,
double atmos_refract, double e0)
{
double del_e = 0;
if (e0 >= -1*(SUN_RADIUS + atmos_refract))
del_e = (pressure / 1010.0) * (283.0 / (273.0 + temperature)) *
1.02 / (60.0 * tan(deg2rad(e0 + 10.3/(e0 + 5.11))));
return del_e;
}

```

```

}
double topocentric_elevation_angle_corrected(double e0, double
delta_e)
{
return e0 + delta_e;
}
double topocentric_zenith_angle(double e)
{
return 90.0 - e;
}

//3.15. Calculate the topocentric azimuth angle

double topocentric_azimuth_angle_neg180_180(double h_prime, double
latitude, double delta_prime)
{
double h_prime_rad = deg2rad(h_prime);
double lat_rad = deg2rad(latitude);
return rad2deg(atan2(sin(h_prime_rad),
cos(h_prime_rad)*sin(lat_rad) -
tan(deg2rad(delta_prime))*cos(lat_rad)));
}
double topocentric_azimuth_angle_zero_360(double azimuth180)
{
return azimuth180 + 180.0;
}

//3.16. Calculate the incidence angle for a surface oriented in any
direction

double surface_incidence_angle(double zenith, double azimuth180,
double azm_rotation,
double slope)
{
double zenith_rad = deg2rad(zenith);
double slope_rad = deg2rad(slope);
return rad2deg(acos(cos(zenith_rad)*cos(slope_rad) +
sin(slope_rad)*sin(zenith_rad)*cos(deg2rad(azimuth180 -
azm_rotation))));
}
double sun_mean_longitude(double jme)
{
return limit_degrees(280.4664567 + jme*(360007.6982779 +
jme*(0.03032028 + jme*(1/49931.0 + jme*(-1/15300.0 + jme*(-
1/2000000.0))))) );
}
double eot(double m, double alpha, double del_psi, double epsilon)
{
return limit_minutes(4.0*(m - 0.0057183 - alpha +
del_psi*cos(deg2rad(epsilon))));
}
double approx_sun_transit_time(double alpha_zero, double longitude,
double nu)
{
return (alpha_zero - longitude - nu) / 360.0;
}
double sun_hour_angle_at_rise_set(double latitude, double delta_zero,
double h0_prime)
{
double h0 = -99999;
double latitude_rad = deg2rad(latitude);

```

```

double delta_zero_rad = deg2rad(delta_zero);
double argument = (sin(deg2rad(h0_prime)) -
sin(latitude_rad)*sin(delta_zero_rad)) /
(cos(latitude_rad)*cos(delta_zero_rad));
if (fabs(argument) <= 1) h0 =
limit_degrees180(rad2deg(acos(argument)));
return h0;
}

//sun rise and set

void approx_sun_rise_and_set(double *m_rts, double h0)
{
double h0_dfrac = h0/360.0;
m_rts[SUN_RISE] = limit_zero2one(m_rts[SUN_TRANSIT] - h0_dfrac);
m_rts[SUN_SET] = limit_zero2one(m_rts[SUN_TRANSIT] + h0_dfrac);
m_rts[SUN_TRANSIT] = limit_zero2one(m_rts[SUN_TRANSIT]);
}

double rts_alpha_delta_prime(double *ad, double n)
{
double a = ad[JD_ZERO] - ad[JD_MINUS];
double b = ad[JD_PLUS] - ad[JD_ZERO];
if (fabs(a) >= 2.0) a = limit_zero2one(a);
if (fabs(b) >= 2.0) b = limit_zero2one(b);
return ad[JD_ZERO] + n * (a + b + (b-a)*n)/2.0;
}

double rts_sun_altitude(double latitude, double delta_prime, double
h_prime)
{
double latitude_rad = deg2rad(latitude);
double delta_prime_rad = deg2rad(delta_prime);
return rad2deg(asin(sin(latitude_rad)*sin(delta_prime_rad) +
cos(latitude_rad)*cos(delta_prime_rad)*cos(deg2rad(h_prime))));
}

double sun_rise_and_set(double *m_rts, double *h_rts, double
*delta_prime, double latitude,
double *h_prime, double h0_prime, int sun)
{
return m_rts[sun] + (h_rts[sun] - h0_prime) /
(360.0*cos(deg2rad(delta_prime[sun]))*cos(deg2rad(latitude))
*sin(deg2rad(h_prime[sun])));
}

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
// Calculate required SPA parameters to get the right ascension
(alpha) and declination (delta)
// Note: JD must be already calculated and in structure
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

void calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination(spa_data
*spa)
{
double x[TERM_X_COUNT];
spa->jc = julian_century(spa->jd);
spa->jde = julian_ephemeris_day(spa->jd, spa->delta_t);
spa->jce = julian_ephemeris_century(spa->jde);
spa->jme = julian_ephemeris_millennium(spa->jce);
spa->l = earth_heliocentric_longitude(spa->jme);
spa->b = earth_heliocentric_latitude(spa->jme);
}

```

```

spa->r = earth_radius_vector(spa->jme);
spa->theta = geocentric_longitude(spa->l);
spa->beta = geocentric_latitude(spa->b);
x[TERM_X0] = spa->x0 = mean_elongation_moon_sun(spa->jce);
x[TERM_X1] = spa->x1 = mean_anomaly_sun(spa->jce);
x[TERM_X2] = spa->x2 = mean_anomaly_moon(spa->jce);
x[TERM_X3] = spa->x3 = argument_latitude_moon(spa->jce);
x[TERM_X4] = spa->x4 = ascending_longitude_moon(spa->jce);
nututation_longitude_and_obliquity(spa->jce, x, &(spa->del_psi), &(spa-
>del_epsilon));
spa->epsilon0 = ecliptic_mean_obliquity(spa->jme);
spa->epsilon = ecliptic_true_obliquity(spa->del_epsilon, spa-
>epsilon0);
spa->del_tau = aberration_correction(spa->r);
spa->lamda = apparent_sun_longitude(spa->theta, spa->del_psi, spa-
>del_tau);
spa->nu0 = greenwich_mean_sidereal_time (spa->jd, spa->jc);
spa->nu = greenwich_sidereal_time (spa->nu0, spa->del_psi, spa-
>epsilon);
spa->alpha = geocentric_sun_right_ascension(spa->lamda, spa->epsilon,
spa->beta);
spa->delta = geocentric_sun_declination(spa->beta, spa->epsilon, spa-
>lamda);
}
//
// Calculate Equation of Time (EOT) and Sun Rise, Transit, & Set (RTS)
//
void calculate_eot_and_sun_rise_transit_set(spa_data *spa)
{
spa_data sun_rts = *spa;
double nu, m, h0, n;
double alpha[JD_COUNT], delta[JD_COUNT];
double m_rts[SUN_COUNT], nu_rts[SUN_COUNT], h_rts[SUN_COUNT];
double alpha_prime[SUN_COUNT], delta_prime[SUN_COUNT],
h_prime[SUN_COUNT];
double h0_prime = -1*(SUN_RADIUS + spa->atmos_refract);
int i;
m = sun_mean_longitude(spa->jme);
spa->eot = eot(m, spa->alpha, spa->del_psi, spa->epsilon);
sun_rts.hour = sun_rts.minute = sun_rts.second = sun_rts.timezone = 0;
sun_rts.jd = julian_day (sun_rts.year, sun_rts.month, sun_rts.day,
sun_rts.hour, sun_rts.minute, sun_rts.second, sun_rts.timezone);
calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination(&sun_rts);
nu = sun_rts.nu;
sun_rts.delta_t = 0;
sun_rts.jd--;
for (i = 0; i < JD_COUNT; i++) {
calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination(&sun_rts);
alpha[i] = sun_rts.alpha;
delta[i] = sun_rts.delta;
sun_rts.jd++;
}
m_rts[SUN_TRANSIT] = approx_sun_transit_time(alpha[JD_ZERO], spa-
>longitude, nu);
h0 = sun_hour_angle_at_rise_set(spa->latitude, delta[JD_ZERO],
h0_prime);
if (h0 >= 0) {
approx_sun_rise_and_set(m_rts, h0);
for (i = 0; i < SUN_COUNT; i++) {

```

```

nu_rts[i] = nu + 360.985647*m_rts[i];
n = m_rts[i] + spa->delta_t/86400.0;
alpha_prime[i] = rts_alpha_delta_prime(alpha, n);
delta_prime[i] = rts_alpha_delta_prime(delta, n);
h_prime[i] = limit_degrees180pm(nu_rts[i] + spa->longitude -
alpha_prime[i]);
h_rts[i] = rts_sun_altitude(spa->latitude, delta_prime[i],
h_prime[i]);
}
spa->srha = h_prime[SUN_RISE];
spa->ssha = h_prime[SUN_SET];
spa->sta = h_rts[SUN_TRANSIT];
spa->suntransit = dayfrac_to_local_hr(m_rts[SUN_TRANSIT] -
h_prime[SUN_TRANSIT] / 360.0,
spa->timezone);
spa->sunrise = dayfrac_to_local_hr(sun_rise_and_set(m_rts, h_rts,
delta_prime,
spa->latitude, h_prime, h0_prime, SUN_RISE), spa->timezone);
spa->sunset = dayfrac_to_local_hr(sun_rise_and_set(m_rts, h_rts,
delta_prime,
spa->latitude, h_prime, h0_prime, SUN_SET), spa->timezone);
} else spa->srha= spa->ssha= spa->sta= spa->suntransit= spa->sunrise=
spa->sunset= -99999;
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
// Calculo de los valores
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
int spa_calculate(spa_data *spa)
{
int result;
result = validate_inputs(spa);
if (result == 0)
{
spa->jd = julian_day (spa->year, spa->month, spa->day,
spa->hour, spa->minute, spa->second, spa->timezone);
calculate_geocentric_sun_right_ascension_and_declination(spa);
spa->h = observer_hour_angle(spa->nu, spa->longitude, spa->alpha);
spa->xi = sun_equatorial_horizontal_parallax(spa->r);
sun_right_ascension_parallax_and_topocentric_dec(spa->latitude, spa-
>elevation, spa->xi,
spa->h, spa->delta, &(spa->del_alpha), &(spa->delta_prime));
spa->alpha_prime = topocentric_sun_right_ascension(spa->alpha, spa-
>del_alpha);
spa->h_prime = topocentric_local_hour_angle(spa->h, spa->del_alpha);
spa->e0 = topocentric_elevation_angle(spa->latitude, spa->delta_prime,
spa->h_prime);
spa->del_e = atmospheric_refraction_correction(spa->pressure, spa-
>temperature,
spa->atmos_refract, spa->e0);
spa->e = topocentric_elevation_angle_corrected(spa->e0, spa->del_e);
spa->zenith = topocentric_zenith_angle(spa->e);
spa->azimuth180 = topocentric_azimuth_angle_neg180_180(spa->h_prime,
spa->latitude,
spa->delta_prime);
spa->azimuth = topocentric_azimuth_angle_zero_360(spa->azimuth180);
if ((spa->function == SPA_ZA_INC) || (spa->function == SPA_ALL))
spa->incidence = surface_incidence_angle(spa->zenith, spa->azimuth180,
spa->azm_rotation, spa->slope);
if ((spa->function == SPA_ZA_RTS) || (spa->function == SPA_ALL))

```

```

calculate_eot_and_sun_rise_transit_set(spa);
}
return result;
}

// introduccion de datos y comprobacion

int main () {

    spa_data data;
    int
byear=1,bmonth=0,bday=0,bhour=0,bminute=0,bsecond=0,bdelta_t=0,btimezo
ne=0,blongitude=0,

    blatitude=0,belevation=0,bpressure=0,btemperature=0,bslope=0,baz
m=0,batmos=0,bfuction=0,bend=0;
    while (bend == 0) {

        float aux;
        if(bfuction == 1) {
            aux=4;
            fflush(stdout);
            if (aux >= 1 && aux <= 4) {
                if (aux == 1) {
                    data.function = SPA_ZA;
                }
                if (aux == 2) {
                    data.function = SPA_ZA_INC;
                }
                if (aux == 3) {
                    data.function = SPA_ZA_RTS;
                }
                if (aux == 4) {
                    data.function = SPA_ALL;
                }
                bfuction = 0;
                bend = 1;
            } else {
                printf("el dato no cumple el rango\n");
            }
        }
        if(batmos == 1) {
            printf("Refraccion atmosferica (0.5667 grados
normalmente) (valor entre -5 y 5):\n");
            scanf("%f", &aux);
            fflush(stdout);
            if (aux >= -5 && aux <= 5){
                batmos = 0;
                bfuction = 1;
                data.atmos_refract = aux;
            } else {
                printf("el dato no cumple el rango\n");
            }
        }
        if(bazm == 1) {
            printf("Angulo azimuth rotacional (medida desde el sur
de la proyeccion en el plano horizontal, este negativo)rango valido: -
360 a 360 grados:\n");
            scanf("%f", &aux);
            fflush(stdout);
        }
    }
}

```

```
        if (aux >= -360 && aux <= 360) {
            bazm = 0;
            batmos = 1;
            data.azm_rotation = aux;
        } else {
            printf("el dato no cumple el rango\n");
        }
    }
    if(bslope == 1) {
        printf("Angulo de la superficie(pendiente) (medida
desde plano horizontal)rango valido: -360 a 360 grados:\n");
        scanf("%f", &aux);
        fflush(stdout);
        if (aux >= -360 && aux <= 360) {
            bslope = 0;
            bazm = 1;
            data.slope = aux;
        } else {
            printf("el dato no cumple el rango\n");
        }
    }
    if(btemperature == 1) {
        printf("Media de temperatura de lugar [grados
celsius]rango valido: -273 a 6000 grados celsius:\n");
        scanf("%f", &aux);
        fflush(stdout);
        if (aux >= -273 && aux <= 6000) {
            btemperature = 0;
            bslope = 1;
            data.pressure = aux;
        } else {
            printf("el dato no cumple el rango\n");
        }
    }
    if(bpressure == 1) {
        printf("Media de presion anual [milibars] rango
valido: 0 a 5000 milibars :\n");
        scanf("%f", &aux);
        fflush(stdout);
        if (aux >= 0 && aux <= 5000) {
            bpressure = 0;
            btemperature = 1;
            data.pressure = aux;
        } else {
            printf("el dato no cumple el rango\n");
        }
    }
    if(belelevation == 1) {
        printf("Elevacion del lugar [metros] rango valido: -
6500000 a mas :\n");
        scanf("%f", &aux);
        fflush(stdout);
        if (aux >= -6500000) {
            belelevation = 0;
            bpressure = 1;
            data.elevation = aux;
        } else {
            printf("el dato no cumple el rango\n");
        }
    }
    if(blatitude == 1) {
```

```
printf("Latitud (negativo al sur del ecuador) rango  
valido: -90 a 90 grados:\n");  
scanf("%f", &aux);  
fflush(stdout);  
if (aux >= -90 && aux <= 90){  
    blatitude = 0;  
    belevation = 1;  
    data.latitude = aux;  
} else {  
    printf("el dato no cumple el rango\n");  
}  
}  
if(blongitude == 1) {  
    printf("Longitud (negativo al este del greenwich)  
rango valido: -180 a 180 grados:\n");  
    scanf("%f", &aux);  
    fflush(stdout);  
    if (aux >= -180 && aux <= 180){  
        blongitude = 0;  
        blatitude = 1;  
        data.longitude = aux;  
    } else {  
        printf("el dato no cumple el rango\n");  
    }  
}  
if(bttimezone == 1) {  
    printf("Zona horaria segun mapa (negativo al este del  
greenwich) rango valido: -12 a 12 horas:\n");  
    scanf("%f", &aux);  
    fflush(stdout);  
    if (aux >= -12 && aux <= 12){  
        bttimezone = 0;  
        blongitude = 1;  
        data.timezone = aux;  
    } else {  
        printf("el dato no cumple el rango\n");  
    }  
}  
if(bdelta_t == 1) {  
    printf("Diferencia temporal entre la rotacion de la  
tierra y tiempo terrestre rango valido: -8000 a 8000 segundos:\n");  
    scanf("%f", &aux);  
    fflush(stdout);  
    if (aux >= -8000 && aux <= 8000){  
        bdelta_t = 0;  
        bttimezone = 1;  
        data.delta_t = aux;  
    } else {  
        printf("el dato no cumple el rango\n");  
    }  
}  
if(bsecond == 1) {  
    printf("Segundos, rango valido: 0 a 59:\n");  
    scanf("%f", &aux);  
    fflush(stdout);  
    if (aux >= 0 && aux <= 59){  
        bsecond = 0;  
        bdelta_t = 1;  
        data.second = aux;  
    } else {  
        printf("el dato no cumple el rango\n");  
    }  
}
```

```
    }
}
if(bminute == 1) {
    printf("Minutos, rango valido: 0 a 59:\n");
    scanf("%f", &aux);
    fflush(stdout);
    if (aux >= 0 && aux <= 59){
        bminute = 0;
        bsecond = 1;
        data.minute = aux;
    } else {
        printf("el dato no cumple el rango\n");
    }
}
if(bhour == 1) {
    printf("Hora , rango valido: 0 a 24:\n");
    scanf("%f", &aux);
    fflush(stdout);
    if (aux >= 0 && aux <= 24){
        bhour = 0;
        bminute = 1;
        data.hour = aux;
    } else {
        printf("el dato no cumple el rango\n");
    }
}
if(bday == 1) {
    printf("2-digitos dia, rango valido: 1 a 31:\n");
    scanf("%f", &aux);
    fflush(stdout);
    if (aux >= 1 && aux <= 31){
        bday = 0;
        bhour = 1;
        data.day = aux;
    } else {
        printf("el dato no cumple el rango\n");
    }
}
if(bmonth == 1) {
    printf("2-digitos mes, rango valido: 1 a 12:\n");
    scanf("%f", &aux);
    fflush(stdout);
    if (aux >= 1 && aux <= 12){
        bmonth = 0;
        bday = 1;
        data.month = aux;
    } else {
        printf("el dato no cumple el rango\n");
    }
}
if(byear == 1) {
    printf("4-digitos para el año, rango valido: -2000
to 6000:\n");
    scanf("%f", &aux);
    fflush(stdout);
    if (aux >= -2000 && aux <= 6000){
        byear = 0;
        bmonth = 1;
        data.year = aux;
    } else {
        printf("el dato no cumple el rango\n");
    }
}
```

```
        }
    }
}

spa_calculate(&data);

printf("\n\nValores Finales\n\n");

printf("Elevacion [grados] %f\n", data.zenith);
printf("Azimut (de sud a oeste) [-180 a 180 grados] %f\n",
data.azimuth180);
printf("Azimut (de norte a este) [ 0 a 360 grados] %f\n",
data.azimuth);
printf("Grado de incidencia [grados] %f\n", data.incidence);

Sleep(1000000);

return 0;
}
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
```

Fig. D.4 código APS.h

## Anexo E. Iluminación

Se detallan una serie de puntos que se deben tener en cuenta para iluminar un espacio de trabajo.

### Anexo E.1 Requisitos iluminación

Un sistema de iluminación debe cumplir los siguientes requisitos:

- La iluminación tiene que ser suficiente y la necesaria para cada tipo de trabajo. La iluminación óptima para el ojo humano, es aquella que consigue una luminancia (densidad de iluminación) de 100 Cd/m<sup>2</sup> (candelas por metro cuadrado). Una diferencia de luminancia mayor de 10:1 produce deslumbramiento.
- 
- La iluminación tiene que ser constante y uniformemente distribuida para evitar la fatiga de los ojos, que deben acomodarse a la intensidad variable de la luz. Deben evitarse contrastes violentos de luz y sombra, y las oposiciones de claro y oscuro. El contraste máximo recomendado para la luz es de 3:1, esto es que la iluminación en las zonas "centrales" no supere en más de tres veces a la iluminación de las zonas oscuras (para evitar problemas de adaptación a la luz, que en una sala sería de 5 minutos de tiempo de adaptación a la luz). (Normativa DIN 5035).

A esto hay que tener en cuenta que la eficiencia de nuestra visión cambia con la intensidad lumínica (luminancia); por ejemplo, a 75 lux es del 78%, a 100 lux es del 82 %, a 250 lux es del 85%, a 500 lux es del 88%, a 1000 lux es del 90%, a 2000 lux es del 95%, y a 10.000 lux sería el supuesto de eficiencia del 100%. Además, hay que tener en cuenta la importancia del contraste.

## **Anexo E.2 Características de las bombillas**

**Lámpara incandescente:** es un dispositivo que produce luz mediante el calentamiento por efecto Joule de un filamento metálico, en la actualidad wolframio, hasta ponerlo al rojo blanco, mediante el paso de corriente eléctrica. Con la tecnología existente, actualmente se consideran poco eficientes ya que el 90% de la electricidad que consume la transforma en calor y solo el 10% restante en luz.

La lámpara incandescente es la de más bajo rendimiento luminoso de las lámparas utilizadas: de 12 a 18 lm/W (lúmenes por vatio de potencia) y la que menor vida útil o durabilidad tiene: unas 1000 horas, pero es la más difundida, por su bajo precio y el color cálido de su luz.

**Lámparas fluorescentes** tienen un rendimiento luminoso que puede estimarse entre 50 y 90 lúmenes por vatio (lm/W).

Una cuestión curiosa es que la luminosidad de la lámpara depende no solamente del revestimiento luminiscente, sino de la superficie emisora, de modo que al variar la potencia varía el tamaño, por ejemplo, la de 20 W mide unos 60 cm, la de 40 W, 1,20 m y la de 60 W 1,50 m (realmente serían de 18, 36 y 58 W respectivamente).

Su vida útil es también mucho mayor que la de las lámparas de incandescencia, pudiendo variar con facilidad entre 5000 h y más de 15000 h (entre 5 y 15 veces más), lo que depende de diversos factores, tales como el tipo de lámpara fluorescente o el equipo complementario que se utilice con ella.

**Lámparas LEDs** hoy en día, se están desarrollando y empezando a comercializar leds con prestaciones muy superiores a las de hace unos años y con un futuro prometedor en diversos campos, incluso en aplicaciones generales de iluminación. Como ejemplo, se puede destacar que Nichia Corporation ha desarrollado leds de luz blanca con una eficiencia luminosa de 150 lm/W, utilizando para ello una corriente de polarización directa de 20 miliamperios (mA). Esta eficiencia, comparada con otras fuentes de luz solamente en términos de rendimiento, es aproximadamente 1,7 veces superior a la de la lámpara fluorescente con prestaciones de color altas (90 lm/W) y aproximadamente 11,5 veces la de una lámpara incandescente (13 lm/W). Su eficiencia es incluso más alta que la de la lámpara de vapor de sodio de alta presión (132 lm/W), que está considerada como una de las fuentes de luz más eficientes.

Para comprobar el consumo de energía que producen estas bombillas se muestra la siguiente tabla donde se comparan 3 bombillas de que ofrecen aproximadamente la misma cantidad de luz:

	Flujo luminoso	Potencia	Vida útil (h)	Precio bombilla	Precio consumo 5h día(0,15€ kwh)	Precio consumo anual
Bombilla incandescente	800lm	60 W	1500	1 €	0,05 €	16,43 €
Fluorescente	830lm	18W	10000	6 €	0,01 €	4,90 €
LED	806lm	12W	25000	45 €	0,009	3,27 €

**Tabla E.1** tabla comparativa bombillas