



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA

TRANSMITANCIA DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN DIFERENTES MEDIOS PARA SU APLICACIÓN EN PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

PRESENTA

LOURDES ANGÉLICA QUIÑONES JUÁREZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO

MÉXICO, D.F

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres y hermana.

Gracias por haberme dado la vida y por siempre estar ahí cuando los he necesitado.

Renunciaron a muchos de sus deseos por siempre darme lo mejor,

Amor es un sentimiento que conocí gracias a su ejemplo.

Conseguir mis metas a su lado vale más para mí que

Ir por la vida sola, cosechando grandes éxitos.

Apenas ayer recordaba, cuando mamá decía: “Algún día vendrán a esta grandiosa universidad”. ¡Mami lo logramos!

Son la mejor familia del mundo. Los Adoro.

Noviembre del 2009

Agradecimientos.

A Dios por ser la presencia divina, que me ha permitido conocer a todos los ángeles que me han ayudado a lo largo de mi vida.

A mi Madre

Gracias por confiar en mí, porque con tu ejemplo aprendí a ser independiente, gracias por siempre aconsejarme y darme ejemplos de entereza, amor y responsabilidad. Te Adoro.

A mi Padre

Por llenar de amor y respeto a mi Madre, por creer en mí y nunca limitarme por cuestiones de género. Gracias por siempre ser ese ejemplo de honestidad. Estoy profundamente orgullosa de ti. Te Adoro.

A mi Hermana

Gracias por siempre estar ahí, no sólo eres mi hermana eres mi mejor amiga. Sabes que siempre vas a contar conmigo. Te adoro

A Rodrigo Figueroa

Gracias porque con tu apoyo y cariño, hemos terminado éste sueño juntos. Te amo.

A mi Abuelo Raúl Quiñones (Q.E.P.D)

Abuelito siempre has estado presente en mi vida. Gracias por la ternura que me brindaste de niña.

A mi Abuelita Carmen

Gracias por haber educado a un hombre como mi Padre. La quiero mucho.

A mi Abuelita Sara

Gracias por ser mi abuelita. La quiero mucho.

A la familia Juárez Baltadano

Por todos esos gratos momentos que hemos compartido, y porque siempre han estado ahí apoyándome. Los quiero a todos muchísimo. Son una familia Sensacional. Espero este mensaje también le llegue a esa personita que está en el cielo.

A la familia Quiñones López

Gracias por estar ahí cuando los he necesitado, pero sobre todo gracias por todos esos momentos que hemos compartido. Los quiero mucho.

A mi gran amigo Julio Alberto González Medina

Gracias por apoyarme tanto en el desarrollo de este trabajo, pero sobre todo por brindarme tú amistad. Quiero que sepas que siempre puedes contar conmigo. Eres mi gran amigo.

Al Dr. Rafael Almanza Salgado

Gracias por darme la oportunidad de trabajar con usted y por brindarme su amistad, confianza y apoyo. Le estoy profundamente agradecida.

Al Dr. Agustín Mulhía (Q.E.P.D.)

Por haber sido un ejemplo de amor a la profesión. Gracias por haberme ayudado en el desarrollo de este proyecto. Donde quiera que esté Gracias.

Al Dr. Arturo Reinking Cejudo.

Gracias por sus enseñanzas a lo largo de mis estudios universitarios. Créame que para mi usted es un ejemplo a seguir.

A la familia Figueroa Salazar.

Gracias por haberme abierto las puertas de su hogar. Son una gran familia.

A todos mis profesores

Gracias por compartir sus conocimientos conmigo.

A mis amigos

Porque a lo largo de la carrera siempre recibí su apoyo y motivación.

A mis sinodales

Por el tiempo que invirtieron en la revisión de este trabajo, y por sus críticas, que siempre fueron constructivas.

A todo el equipo del Instituto de Ingeniería que me ayudó para la realización de este trabajo, principalmente Don Julio y Don Ceferino. Somos un gran equipo. Gracias

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Gracias por ser mi Alma Mater. Estoy profundamente agradecida con esta gran Institución. Mi deseo es siempre poner su nombre muy en alto.

Al Instituto de Ingeniería

Por apoyarme en la culminación de mis estudios profesionales. Mi estancia en esta institución me ha llenado de grandes motivaciones.

Al Instituto de Geofísica

Por darme muchas facilidades para desarrollar este trabajo.

A la DGAPA

Por el apoyo que me brindó para la culminación de mi tesis.

Al CONACYT

Por el apoyo que me brindó para la culminación de mi tesis.

“Por mi raza hablará el espíritu”

Lourdes Angélica Quiñones Juárez.

Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	3
Introducción.....	5
Capítulo I	
Radiación ultravioleta.....	6
1.1 Conceptos generales.....	6
1.2 Espectro electromagnético.....	8
1.3 Leyes de la radiación.....	10
1.4 Características de la radiación ultravioleta.....	12
1.5 Factores que influyen en los niveles de radiación.....	13
2 Cuantificación de la energía de la radiación solar.....	14
3 Posibles daños a la salud debidos a la radiación ultravioleta.....	16
Capítulo II	
Fuentes de la radiación ultravioleta.....	17
1.1 Radiación ultravioleta proveniente del sol.....	17
1.2 Fuentes artificiales de radiación ultravioleta.....	20
1.2.1 Principio de funcionamiento de la lámpara de descarga.....	20
1.3 Tipos de lámpara de descarga.....	22
1.4 Lámparas de vapor de mercurio.....	23
1.5 Características de la lámpara B-100SP.....	24
1.6 Medidas de seguridad al utilizar fuentes de radiación ultravioleta.....	25
Capítulo III	
Medición de la radiación ultravioleta.....	26
1.1 Sensores para el registro de la radiación ultravioleta.....	27
1.2 Radiómetro EPPLEY.....	28
1.2.1 Instalación.....	29

Capítulo IV

Espectroradiometría.....	30
1.1 Transmitancia	30
1.2 Reflectancia.....	31
1.3 Respuesta espectral.....	32
1.4 Instrumentación radiométrica.....	32
1.5 Espectroradiómetro Field Spec Pro.....	36

Capítulo V

Características físicas y químicas de los vidrios.....	37
1.1 Fabricación del vidrio.....	37
1.2 Vidrios sílico-cálcicos-sódicos.....	39
1.3 Transmisión de la radiación por el vidrio.....	42
1.3.1 Reflexión y radiación.....	42
1.4 Absorción del vidrio.....	45
1.5 Dependencia espectral de la transmitancia.....	47

Capítulo VI

Estudio de la transmitancia en diferentes medios.....	50
Tablas de Resultados.....	85
Conclusiones y recomendaciones.....	88
Índice figuras.....	90
Índice tablas.....	94
Referencias y Bibliografía.....	95

Resumen

La radiación ultravioleta siempre ha jugado un papel importante para la evolución de la vida en la tierra, principalmente en la atmósfera, debido a que el mayor espectro de la radiación ultravioleta es absorbido por ésta.

Actualmente su estudio es sumamente importante debido al deterioro de la capa de ozono, y como ya se mencionó, la atmósfera es la encargada de absorber la radiación ultravioleta; debido a esto la humanidad debe de estar preparada para afrontar el riesgo que esto genera para su salud. Afortunadamente no todo es negativo; es un hecho que la intensidad de la radiación ultravioleta recibida es muy alta, pero ¿Por qué no aprovechar tanta energía? Y una de las respuestas ha sido utilizarla para la desintoxicación del agua¹.

La oxidación fotocatalítica (PCO por sus siglas en inglés) es un proceso altamente efectivo para la degradación de una gran variedad de contaminantes en aguas ligeramente contaminadas o aguas residuales. La absorción de la radiación ultravioleta por un semiconductor fotocatalítico permite la degradación de sustratos orgánicos en una solución. El catalizador comúnmente utilizado, es el dióxido de titanio (TiO₂), debido a que es abundante, barato y no tóxico.

¹ La desintoxicación fotocatalítica Solar, consiste en la utilización de la parte más energética del espectro solar (longitud de onda inferior a 400 nm) para provocar una reacción oxidante muy energética. Esto tiene lugar cuando dicha radiación ultravioleta activa un semiconductor en presencia de oxígeno. En este contexto, el semiconductor se llama fotocatalizador, porque éste no se consume en el proceso. En estas circunstancias cualquier otra sustancia (tóxica o no) que se encuentre en el mismo medio es sometida a un proceso de oxidación. El semiconductor a partir de la adsorción de un fotón, se comporta como catalizador produciendo radicales reactivos, principalmente radicales hidroxilos, que alternadamente pueden oxidar compuestos orgánicos y mineralizarlos completamente. Este tipo de moléculas orgánicas se descomponen para formar Dióxido de Carbono (CO₂), agua y ácidos minerales como productos finales.

Para el modelado y optimización de fotoreactores (que son los dispositivos en los cuales se lleva a cabo la fotocatalisis² y pueden tener diseños variados) es esencial conocer la distribución de la radiación en el interior de estos, dado que la cinética de las reacciones fotoquímicas o fotocatalíticas dependen principalmente de la radiación local incidente.

En este trabajo, se obtuvo el comportamiento espectral de la lámpara B-100SP de UVP (Ultra Violet Products), el estudio se realizó con un espectroradiómetro Field Spec Pro de ASD (Analytical Spectral Devices). Dicho estudio permitió identificar la distancia óptima entre la lámpara y el sensor para obtener la irradiancia³ máxima. Además se identificó que la irradiancia máxima se obtiene en el rango de 362-364 nm. Para el estudio espectral de la lámpara se diseñó un arreglo con una gráfica polar en un plano, la cual sirvió para ir colocando el sensor en diferentes posiciones, con el objetivo de obtener la distribución de la irradiancia de la lámpara en dicho plano. Esto permitió la construcción de una gráfica tridimensional con la distribución de las irradiancias en función de la posición con respecto a la lámpara.

Con los valores de irradiancia obtenidos con el espectroradiómetro Field Spec Pro, se pudo realizar el estudio de la transmitancia⁴ de la radiación ultravioleta en diferentes medios, mismo que será de gran utilidad para el diseño de fotoreactores con niveles de eficiencia más altos.

² La fotocatalisis es una reacción fotoquímica que involucra la absorción de luz ultravioleta por parte de un catalizador o sustrato consistente en un material semiconductor. Durante el proceso tienen lugar reacciones tanto de oxidación como de reducción.

³La irradiancia o densidad de flujo de energía de radiación, se define como la razón a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de área.

⁴La transmitancia es la razón de la radiación transmitada entre el flujo de la radiación incidente.

Abstract

Solar Ultraviolet (UV) irradiance and its variations significantly affect the evolution of the Earth, particularly its atmosphere. Because of a large portion of the solar UV irradiance is absorbed well above the Earth's surface.

Currently its study is extremely important due to the ozone layer deterioration, as already mentioned, the atmosphere is responsible for absorbing ultraviolet radiation; because of this, humanity must be prepared to face the risk that this represent for health. Fortunately not all bad, it is a fact that the ultraviolet radiation intensity received is very high, but Why not take advantage of this kind of energy? And the answer has been to use it for water detoxification.

Photocatalytic oxidation (PCO) is a highly effective process for the degradation of wide variety pollutants in lightly contaminated water and wastewater. The absorption of UV radiation by a semiconductor photocatalyst allows the degradation of organic substrates in solutions. The most commonly used photocatalyst is titanium dioxide (TiO₂), which is inexpensive, abundant and non-toxic.

For modeling and optimization of photoreactors (they are devices where the photocatalytic reaction occurs and they can have different designs) knowing radiation distribution inside the reactor is essential because the kinetics of photochemical and photocatalytic reactions are strongly dependent on the local incident radiation.

In this work, we obtained the spectrum of the B-100SP lamp from UVP (Ultra Violet Products), the study was performed using a Field Spec Pro spectroradiometer ASD (Analytical Spectral Devices). This study revealed the optimum distance between the lamp and the sensor in order to get the value of maximum irradiance. Furthermore it allowed us to identify the range (362-364 nm) where is the maximum irradiance. The spectral lamp study was made with a polar graph in a plane, which was used to put the sensor in different positions in order to obtain the distribution of the irradiance of the lamp in the plane. This allowed the construction of a three-dimensional graph with the distribution of irradiance versus position on the lamp.

The spectroradiometer Field Spec Pro was used to get a study of irradiance which allowed realizing the transmittance study in different means.

Keywords: detoxification, photocatalyst, spectroradiometer, photoreactors

Introducción

En 1666 Isaac Newton al hacer incidir un haz de luz dentro de un prisma descubrió que esta se descomponía en varios colores, dicho experimento marcó una nueva era para la ciencia de la óptica. Pero no fue sino hasta 1801 cuando Johan Ritter descubrió la radiación ultravioleta (UV) que es una región del espectro solar. Este experimento consistió en exponer al cloruro de plata debajo de la luz violeta donde la luz no puede ser distinguida por el ojo humano, este descubrimiento demostró que aunque nuestros ojos no pueden ver esa luz existen otros niveles de energía como la radiación ultravioleta (más allá del violeta) [1].

La radiación ultravioleta constituye el 5% de los rayos del espectro solar que son emitidos hacia la tierra, debido a esto se ha puesto especial atención para su utilización como germicida en la desintoxicación del agua.

El presente trabajo contribuirá a dicha manera de utilizar esa energía, planteando un panorama general de lo que es radiación ultravioleta, conocer las fuentes que la generan, posteriormente mostrar qué instrumentos nos pueden servir para cuantificarla, y finalmente se muestra un estudio de transmitancia en diferentes medios, mismo que será de gran importancia para el diseño de fotoreactores con niveles de eficiencia más altos.

Capítulo I

Radiación Ultravioleta. (UVR)

Conceptos generales

La radiación es una forma de energía y nosotros estamos expuestos a ella constantemente, nos damos cuenta de su existencia debido a que nuestros sentidos la perciben en forma de calor [1].

La luz visible es solo una derivación del espectro solar, el hecho de que los humanos no podamos ver otros tipos de energía, no quiere decir que estas no existan, entre las formas de energía electromagnética se encuentran las ondas de radio, la radiación infrarroja, la radiación ultravioleta o los rayos X entre las más comunes.

Estas formas de energía se comportan siguiendo el principio de la teoría ondulatoria, que no es más que la energía viajando a lo largo de una trayectoria sinusoidal con una velocidad enorme como es la de la luz.

$$v\lambda = c \dots \dots \dots 1.1$$

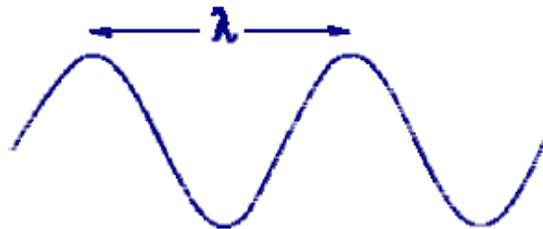


Figura 1.1 Comportamiento ondulatorio de la radiación electromagnética

En donde

$c = \text{velocidad de la luz, } 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$\nu = \text{frecuencia [Hz]}$

$\lambda = \text{longitud de onda}$

El espectro de la radiación electromagnética se puede tomar como una larga cuerda, continua y de acuerdo al nivel energético va cambiando su comportamiento debido a su energía. Para fines prácticos la longitud de onda dentro de la radiación ultravioleta por lo regular será medida en nanómetros (nm), pero es importante mencionar que ésta también puede estar expresada en Angstroms (\AA) o en micrómetros (μm).

La conversión es la siguiente:

$$1 \text{ nm} = 10 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ metros}$$

Para el estudio de la radiación electromagnética es importante no pasar por alto su naturaleza corpuscular descrita por la teoría cuántica, esta teoría se refiere que esa trayectoria sinusoidal es seguida por cientos de partículas muy pequeñas conocidas como cuantos o fotones.

De acuerdo a esta teoría la energía de cada fotón está dada en Julios y la ecuación que lo describe es la siguiente:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \dots \dots \dots (1.2)$$

En donde

$h; \text{es la constante de planck} = 6.6260 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6.6260 \times 10^{-27} \text{ ergs} \cdot \text{s}.$

Otra expresión que nos da la cantidad de energía de los fotones es la siguiente:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = kT \dots \dots \dots (1.3)$$

En donde

$$k, \text{ constante de Boltzman} = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}$$

Se puede concluir de estas ecuaciones que la energía de un fotón es inversamente proporcional a la longitud de onda; esto es, a una mayor longitud de onda menor será la cantidad de energía que tenga el fotón.

I.2 Espectro Electromagnético.

Se ha mencionado el concepto de radiación electromagnética, pero ¿de dónde se origina este término? Este proviene del espectro electromagnético, que es la manera en cómo se divide la energía, tomando en cuenta ya sea su longitud de onda o su nivel energético.

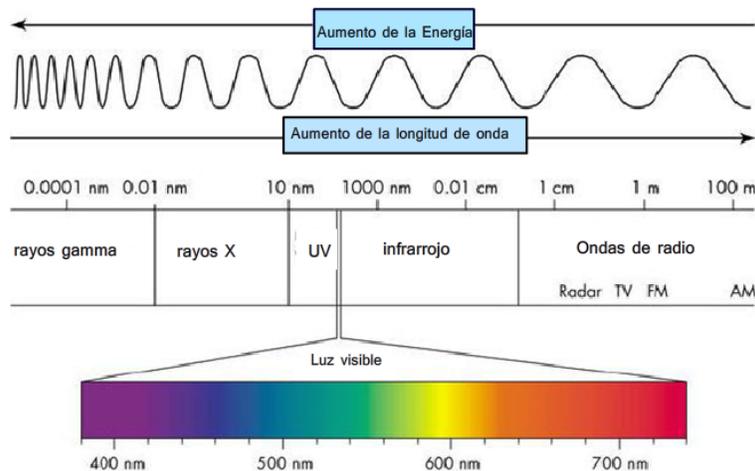


Figura 1.2.1 División del Espectro electromagnético, de acuerdo a su nivel de energía y a su longitud de onda

Como podemos observar en la figura 1.2.1, la región que es captada por nuestro sistema ocular es mínima a comparación de toda la capacidad del espectro electromagnético; esta abarca de los 400 nm a los 700 nm, la radiación ultravioleta está comprendida de los 10 nm a los 400 nm. Por conveniencia o referencia, se tomará la división espectral realizada por Joint Committee para Espectroscopia Aplicada [6], que se ilustra en la tabla 1.2.

Región	Longitud de onda (nm)
Ultravioleta lejano	10-200
Ultravioleta cercano	200-380
Visible	380-780
Infrarrojo cercano	780-3000
Infrarrojo medio	3000-30,000
Infrarrojo lejano	30,000-300,000
Microondas	300,000-1,000,000,000

Tabla 1.2 División del espectro electromagnético realizada por *Joint Committe para la Espectroscopia Aplicada

1.3 Leyes de la Radiación.

Sólo se hará mención a las siguientes leyes de la radiación, debido a que para el objetivo de este tema de tesis únicamente se utilizarán conceptos de la mecánica clásica.

Ley de Wien. Al incrementar la temperatura de un cuerpo negro, la cantidad de energía que emite se incrementa. También, al incrementar la temperatura, el máximo de la distribución de energía se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas. Se encontró que este desplazamiento obedece a la siguiente relación, llamada ley de desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{m\acute{a}x}T = 2897.8(\mu m K) \dots \dots \dots (1.3.3)$$

Donde $\lambda_{m\acute{a}x}$ es la longitud de onda que corresponde al máximo de la curva y T es la temperatura absoluta del objeto que emite la radiación.

La ley de Wien, afirma que para la radiación de un cuerpo negro la longitud de onda de máxima emisión es inversamente proporcional a la temperatura absoluta. Con esta ley se demuestra que la emisión de la radiación de la superficie terrestre tiene un máximo en cerca de $9.9 \mu m$, que corresponde a la región infrarroja del espectro. También muestra que la temperatura del Sol, si el máximo de emisión de radiación solar ocurre en $0.474 \mu m$, es del orden de 6100 K.

Ley de Kirchhof. En general un cuerpo puede absorber y reflejar la radiación, y emitir lo que queda de ésta. En términos de la razón de radiación absorbida, reflejada y transmitida con respecto a la intensidad de radiación monocromática I_λ incidente en las capas, se tiene que:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \dots \dots \dots (1.3.4)$$

Cuando se incluyen valores promedio sobre todo el espectro, el subíndice referente a la longitud de onda puede eliminarse. Por otra parte, no se ha de perder de vista que una simplificación común es la consideración de fenómenos superficiales, cuando en la realidad se tienen sistemas volumétricos.

1.4 Características de la radiación Ultravioleta

La radiación ultravioleta ocupa una pequeña porción del espectro electromagnético. Ésta comprende de los 400 a los 100 nm, para fines prácticos y para agilizar los estudios se ha realizado una subdivisión del espectro de la radiación ultravioleta, la idea de realizar esta subdivisión nació porque al decrecer su longitud de onda, la radiación UV impacta de manera significativa la biología de los seres vivos [1].

La radiación UV es dividida en tres grupos: radiación Ultravioleta tipo C, Radiación Ultravioleta tipo B y Radiación Ultravioleta tipo A.

De acuerdo al Segundo congreso Internacional sobre Luz realizado en Agosto de 1932 la radiación UV fue dividida de la siguiente manera:

Tipo de radiación	Longitud de Onda
UVA	400-315 nm
UVB	315-280 nm
UVC	280-100 nm

Tabla 1.4.1 Clasificación de la radiación ultravioleta de acuerdo al segundo congreso de la luz, agosto de 1932

La división de la radiación Ultravioleta dependerá de acuerdo a su aplicación o para lo que se quiera estudiar.

A continuación se da una descripción de cada división

Ultravioleta tipo A ó Ultravioleta Cercano (400-315 nm): Esta longitud de onda tiene la característica de tener frontera con la luz visible y llegar hasta longitudes de onda que alcanzan la superficie de la tierra.

Ultravioleta tipo B ó Ultravioleta Medio (315-280 nm): Ésta se encuentra en el límite de la onda corta que incide en la superficie terrestre y la porción de mayor absorción de oxígeno molecular.

Ultravioleta tipo C ó Ultravioleta lejano (280-100 nm): Ésta se extiende a partir de la zona de mayor absorción de oxígeno molecular hasta el límite de transmisión de longitudes de onda del fluoruro de litio.

1.5 Factores que influyen en los niveles de radiación UV

El nivel de radiación UV en cierto lugar de la superficie terrestre depende de factores como:

- Posición del Sol.
- La altitud.
- La latitud.
- Nubosidad.
- Cantidad de ozono en la atmósfera.
- Niveles de contaminación.

Los mayores niveles de radiación ultravioleta se presentan cuando el Sol alcanza su elevación máxima, esto es, cuando los rayos están en una posición normal a la superficie expuesta [3].

En zonas diferentes a los trópicos, la máxima radiación ultravioleta se presentará en el verano al medio día.

Es importante tener en cuenta que:

- Cerca del 90% de la radiación UV-B es absorbida en la atmósfera.
- Cerca del 60% de la radiación UV es recibida entre las 10am y 2pm del día.
- La sombra puede reducir cerca del 50% de la radiación UV.

1.6 Cuantificación de la Energía de Radiación Solar.

Se conoce como radiometría a la ciencia encargada de la medición de la radiación.

Los conceptos radiométricos más comunes son los siguientes:

Energía de radiación (ϵ): Es la energía total emitida por un cuerpo radiante, dada en Joule (J).

Potencia de radiación o Flujo de energía de radiación: Se define como la razón a la cual emite o recibe un objeto la energía de radiación por unidad de tiempo, expresada como:

$$P = \frac{d\epsilon}{dt}, W \dots \dots \dots (1.6.1)$$

La irradiancia o densidad de flujo de energía de radiación, se define como la razón a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de área:

$$I = \frac{d}{dA} \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) = \frac{dP}{dA}, \left[\frac{W}{m^2} \right] \dots \dots \dots (1.6.2)$$

La Radiancia se define como la densidad de flujo de energía de radiación por unidad de ángulo sólido (expresado en Estereorradianes, Sr), la cual es emitida o recibida por la superficie de un objeto, perpendicular a la dirección de propagación, esto es:

$$L = \frac{d}{d\omega} \frac{d}{\cos\theta} \frac{d\varepsilon}{dA dt}, W/m^2 \text{ Sr} \dots \dots \dots (1.6.3)$$

La Irradiación se mide como la densidad de flujo de energía de radiación que emite o recibe un objeto durante un cierto tiempo, dicho en otras palabras, es la integral de la irradiancia a lo largo de un cierto tiempo, esto es:

$$R = \int_{t1}^{t2} \frac{d}{dA} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) dt = \frac{d}{dA} \left[\int_{t1}^{t2} d\varepsilon \right], J/m^2 \dots \dots \dots (1.6.4)$$

La irradiación también se acostumbra expresar en Watt-Hora/m²(WH/m²) y en Horas Pico (HP). Estas unidades tienen su equivalente en el SI.

$$1 WH/m^2 = (3600s)(1 W/m^2) = 3.6 KJ/m^2$$

$$1 HP = 1000 WH/m^2 = 3.6 MJ/m^2,$$

1.7 Posibles daños a la salud debidos a la Radiación UV.

Mientras más corta sea la longitud de onda, es más peligrosa y es causa de daños irreversibles para la salud [4].

Radiación UV-A

Este tipo es el menos peligroso de la radiación ultravioleta, aunque llega a la Tierra en forma considerable.

Alguno de los daños biológicos que puede causar son los siguientes:

- Inmunosupresión
- Lesiones crónicas producidas por la luz (arrugas)
- Formación de radicales libres que producen alergias solares (fotodermatitis poliforme)

Radiación UV-B

Este tipo de radiación es potencialmente dañina, ya que causa problemas como:

- Subyuga el crecimiento de las plantas

Una exposición prolongada a este tipo de radiación puede causar daños a la salud humana tales como:

- Cataratas.
- Inflamaciones en los ojos.
- Cáncer de piel.
- Debilitamiento del sistema inmunológico, por lo tanto crece la probabilidad de contraer infecciones.

-Disminuye la eficacia de las vacunas, debido a que la radiación ultravioleta tipo B actúa como un inmunodepresor.

Es importante señalar que la cantidad de radiación ultravioleta tipo B es proporcional al deterioro de la capa de ozono ya que una reducción en esta capa implica un aumento en la radiación en la superficie terrestre.

Radiación UV-C

Debido a que los rayos ultravioleta tipo C poseen un alto nivel energético es la forma más dañina de la radiación ultravioleta, afortunadamente esta radiación es absorbida por el ozono y el oxígeno de la estratósfera.

Capítulo II

Fuentes de Radiación Ultravioleta

2.1 Radiación Ultravioleta proveniente del sol.

La radiación solar es la energía emitida por el Sol y que se propaga en forma de radiación de ondas electromagnéticas o fotones. Esta energía que llega a la tierra es la más abundante y proviene de una fuente única y prácticamente inagotable. El Sol es una esfera gaseosa que produce una enorme cantidad de energía de radiación y solo una pequeña parte de la cual es interceptada por nuestro planeta. La energía se produce en el Sol debido a la continua reacción termonuclear que en su interior se lleva a cabo con temperaturas de varios millones de grados. La reacción nuclear básica en el interior del Sol es la fusión nuclear en la cual cuatro protones de Hidrógeno se combinan para formar un átomo de Helio; como consecuencia la masa perdida es alrededor de 4 megatoneladas por

segundo aproximadamente, lo cual se convierte en energía de radiación electromagnética[3].

El espectro extraterrestre de la radiación solar se aproxima a un cuerpo negro de aproximadamente 5800 K. La irradiancia emitida hacia la atmósfera es aproximadamente de 1370 W/m^2 , y alrededor del 9% es radiación ultravioleta ($\lambda < 400 \text{ nm}$).

La emisión de radiación solar no es constante debido a que ésta varía cada 27 días debido al movimiento aparente del sol y por los cambios que sufre la fotosfera, estas variaciones afectan principalmente a las longitudes de onda corta que por lo regular son absorbidas por la atmósfera terrestre ($\lambda < 290 \text{ nm}$); debido a esto los efectos nocivos de la radiación UVB y UVC son mínimos.

Debido a la forma elíptica de la órbita solar, la distancia del sol a la tierra cambia alrededor de 3.4%, teniendo su mínimo en el Perihelio, que es aproximadamente el 3 de enero y un máximo en el Afelio alrededor del 5 de Julio. Esto da como resultado una variación en la intensidad alrededor de un 7% entre ambas fechas. Lo anterior aunado a la inclinación del eje de rotación de la tierra tiene como resultado un ligero incremento de los niveles de la radiación ultravioleta en el verano del hemisferio sur, mientras que son menores en el verano del hemisferio norte.

Es importante destacar que tanto la cantidad como la calidad de radiación UV recibida por la tierra sufren variaciones con la elevación del Sol sobre el horizonte, lo que se conoce como Altitud Solar (figura 2.1)

2.2 Fuentes artificiales de radiación ultravioleta.

Principio de funcionamiento de las lámparas de descarga.

En las lámparas de descarga, la emisión se consigue estableciendo una corriente eléctrica entre dos electrodos situados en un tubo lleno con gas o vapor ionizado.

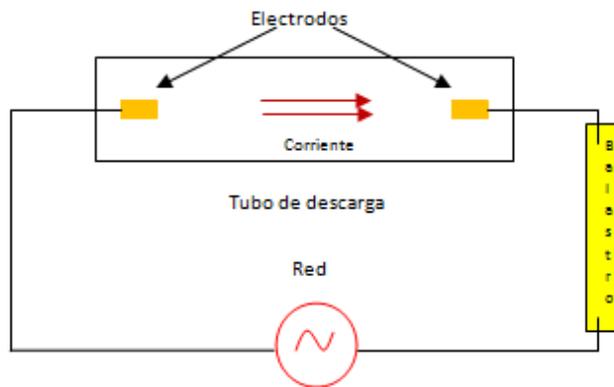


Figura 2.2.1 Funcionamiento de una lámpara de descarga

En el interior del tubo, se producen descargas eléctricas como consecuencia de la diferencia de potencial entre los electrodos. Estas descargas provocan un flujo de electrones que atraviesan el gas. Cuando uno de ellos choca con los electrones de las capas externas de los átomos, les transmiten energía y pueden suceder dos cosas: una sería que la energía transmitida en el choque sea lo suficientemente elevada para poder arrancar al electrón de su orbital, y éste a su vez puede chocar con los electrones de otros átomos. Es importante destacar que si el proceso no es limitado se puede producir la destrucción de la lámpara debido a un exceso de corriente. La otra posibilidad es que el electrón no reciba suficiente energía para ser arrancado; en este caso el electrón pasa a

ocupar otro orbital de mayor energía. Este nuevo estado acostumbra a ser inestable y rápidamente se vuelve a la situación inicial. Al hacerlo, el electrón libera la energía extra en forma de radiación electromagnética, principalmente radiación ultravioleta.

Un electrón no puede tener un estado energético cualquiera, sino que sólo puede ocupar unos pocos estados que vienen determinados por su estructura atómica; como la longitud de onda de la radiación emitida es proporcional a la diferencia de energía entre los estados inicial y final del electrón, los estados posibles no son infinitos, el espectro de este tipo de lámparas es discontinuo [11].

Elementos Auxiliares.

Para que la lámpara de descarga funcione correctamente es necesario, en la mayoría de los casos, la presencia de elementos auxiliares conocidos como cebadores y balastos. Los cebadores o ignitores son dispositivos que suministran un breve pico de tensión entre los electrodos del tubo, esto es necesario para iniciar la descarga y vencer así la resistencia inicial del gas a la corriente eléctrica; después de encender la lámpara comienza un periodo transitorio, durante el cual, el gas se estabiliza y existe un consumo de potencia superior al nominal.

Los balastos son dispositivos que sirven para limitar la corriente que atraviesa la lámpara y evitar así un exceso de electrones circulando por el gas, lo que aumentaría el valor de la corriente hasta producir la destrucción de la misma.

Eficiencia.

Al establecer la eficiencia de este tipo de lámparas, hay que diferenciar entre la eficiencia de la fuente y la de los elementos auxiliares necesarios para su funcionamiento; esto depende de cada fabricante. En las lámparas las pérdidas pueden ser debidas a dos aspectos; la pérdida debido a la temperatura y por radiaciones no visibles, esto dependerá de cada tipo de lámpara [13].

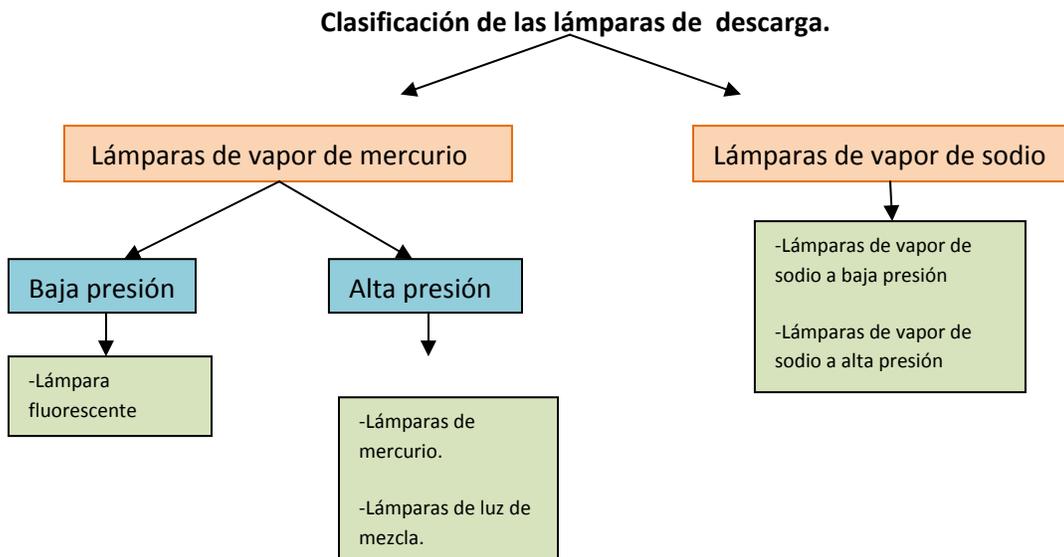
Tipo de lámpara	Eficiencia sin balastro (lm/W)
Fluorescente	38-91
Luz de mezcla	19-28
Mercurio a alta presión	40-63
Halógenos metálicos	75-95
Sodio a baja presión	100-183
Sodio a alta presión	70-130

Tabla 2.2.1 Eficiencias de acuerdo al tipo de lámpara

Tipos de lámparas de descarga.

La radiación ultravioleta se produce por medio de lámparas de vapor de mercurio de alta y baja presión, siendo más populares las últimas; estas lámparas se asemejan a las conocidas lámparas fluorescentes. A continuación se da una descripción de este tipo de lámparas.

Las lámparas de descarga se pueden clasificar según el gas utilizado: éste puede ser vapor de mercurio o vapor de sodio, también se clasifican de acuerdo a la presión a la que se encuentra dicho vapor. Es importante conocer estas propiedades porque esto permitirá hacer una selección adecuada de las lámparas según el uso que se le quiera dar.



Lámparas de vapor de mercurio

Lámparas fluorescentes

En este tipo de lámparas de vapor de mercurio a baja presión (0.8 Pa), debido a sus condiciones de funcionamiento en el espectro de emisión del mercurio, predominan las radiaciones ultravioleta en la longitud de onda de 253.7 nm.

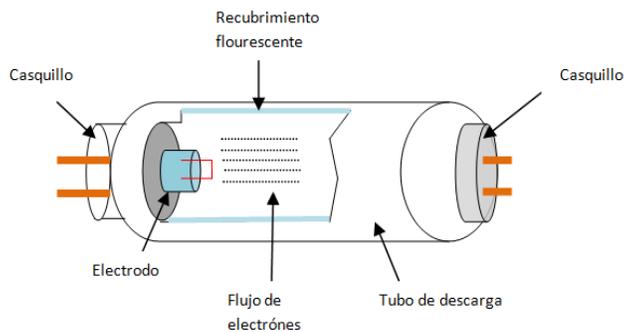


Figura 2.2.2 Diagrama de funcionamiento de una lámpara de mercurio

El tubo de descarga contiene vapor de mercurio a baja presión y una pequeña cantidad de un gas inerte que sirve para facilitar el encendido y controlar la descarga de electrones.

Las lámparas de vapor de mercurio tienen un globo de forma elipsoidal, dentro del cual se halla un tubo de descarga, de cuarzo, con dos electrodos; dicho tubo de descarga contiene vapor de mercurio. El encendido se efectúa por medio de dos electrodos de encendido, directamente a la tensión de 220 V. La lámpara cuenta con una reactancia con el fin de limitar la corriente, esto tiene como consecuencia una reducción en el factor de potencia de aproximadamente 0.5

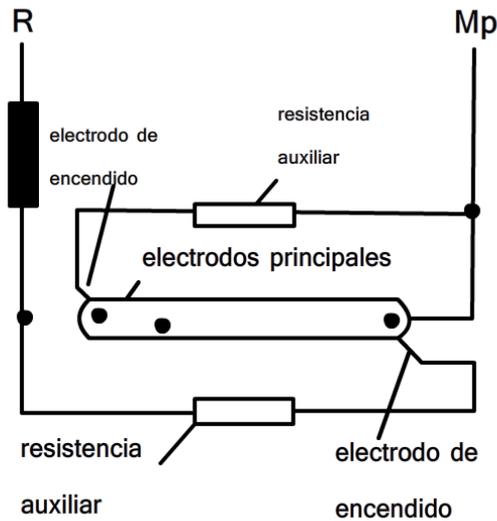


Figura 2.2.3 Conexiones de una lámpara de mercurio.

Este tipo de lámparas necesitan un periodo de arranque de entre 3 y 5 minutos, y una vez apagadas necesitan tener un periodo de reposo para que disminuya su temperatura y así tengan un óptimo desempeño [14].

Características de la Lámpara B-100SP UVP



Este tipo de lámpara, que se utilizará para el desarrollo del estudio de transmitancia en diferentes medios, fue adquirida debido a su nivel de emisión de potencia alto. Ésta funciona con vapor de mercurio, y tiene las siguientes características:

Fuente radiación UV: 365 nm

Potencia: 160 W

Vida útil: 2000 hr

Voltaje nominal: 115 V

Frecuencia: 60 Hz

Corriente: 1.3 A

2.3 Medidas de seguridad al utilizar fuentes de radiación ultravioleta.

- 1.- Antes de realizar cualquier operación, lea cuidadosamente el manual de las lámparas que utilizará
2. Asegúrese que el filtro con el que cuentan las lámpara no esté roto, si este es el caso reemplácelo inmediatamente.
- 3.- Para evitar el riesgo de una descarga eléctrica, desconecte la lámpara antes de prestarle algún tipo de servicio.
- 4.- La bombilla puede alcanzar altas temperaturas, por lo tanto espere a que se enfríe la lámpara antes de comenzar a manipularla.
- 5.- Es importante que si la lámpara se rompe por algún motivo, usted use guantes antes de tomarla ya que la bombilla contiene mercurio.
- 6.- El personal que manipule este tipo de lámparas debe asegurarse de utilizar algún tipo de protector solar con un factor de protección UV alto, también no debe de olvidar utilizar ropa adecuada de preferencia una bata de algodón gruesa y es importante que se utilice lentes o careta con filtro para radiación UV.



Figura 2.3.1. Lentes y careta para el manejo de radiación ultravioleta

Capítulo III

3.1 Medición de la radiación ultravioleta

Es importante conocer el funcionamiento de los sensores que miden la radiación solar, estos sensores pueden ser de dos tipos: sensores termoeléctricos (termopilas), o sensores fotovoltaicos [9].

Sensores termoeléctricos.

El elemento principal de los sensores termoeléctricos es el termopar, y con estos se construyen las termopilas. Un termopar está compuesto por dos diferentes conductores con los cuales se hacen un par de juntas alternando los conductores para formar un circuito cerrado. Si las juntas se ponen en contacto con diferentes fuentes de calor y se establece un gradiente de temperatura, se generará una fuerza electromotriz térmica. Una termopila es un conjunto de termopares conectados en serie, de tal forma que la fuerza electromotriz total será la suma de las fuerzas electromotrices de los elementos que la forman. El arreglo de los termopares se realiza configurando áreas conocidas como de “juntas frías” (a temperatura ambiente) y áreas de “juntas calientes” (calentados por radiación). El área de la juntas calientes es la que constituye realmente el sensor de radiación, es por esta razón, que además de ser altamente absorbente, debe de ser

fabricado con un material no selectivo a la radiación de diferentes longitudes de onda, por lo tanto su absorción espectral debe ser constante en todas las longitudes de onda del espectro ($0.3 \mu m$ a $4 \mu m$) y ser lo más próxima a 100%.

Un sensor termoelectrico se caracteriza por ser uno de los mejores instrumentos para medir los flujos de energía de la radiación; sin embargo siempre se deben de calibrar respecto de instrumentos con características físicas y de diseño capaces de medir de forma absoluta los flujos de radiación, con niveles altos de exactitud.

Sensores fotovoltaicos.

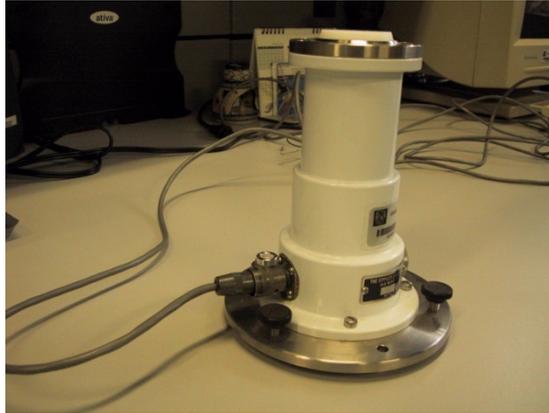
Los sensores fotovoltaicos por lo regular son fotodiodos de silicón, los cuales por sus características físicas han resultado ser buenos simuladores de piranómetros, esto porque las comparaciones con los piranómetros de primera clase a los que se ha sometido bajo diferentes condiciones de cielo, han dado como resultado un alto grado de correlación estadística, lo cual establece que con este tipo de sensores se puede tener una precisión dentro de un $\pm 5\%$ para días nublados y hasta un $\pm 2\%$ para días despejados[3].

El principal problema que presentan los sensores fotovoltaicos se deriva del manejo de la energía entrante, ya que cuando existe un flujo mayor los sensores pueden llegar a su capacidad límite y no mostrarán de manera correcta el monitoreo del flujo de la radiación solar.

3.1 Sensores para el registro de la radiación Ultravioleta.

Para el monitoreo de la radiación UV no existen muchas compañías que se dediquen a la fabricación de sensores de este tipo, ya que para su fabricación se tiene que poner énfasis en el estudio de de la selectividad en las longitudes de onda. Para lograr esto los desarrolladores de instrumentos han tenido que realizar grandes investigaciones sobre materiales que tengan alta sensibilidad en longitudes de onda específicas.

3.2 Radiómetro EPPLEY



Éste es un instrumento que fue desarrollado para la medición de la radiación solar UV. Las principales características de diseño son que es de fácil operación y se combina con su óptimo desempeño que se compara con los piranómetros meteorológicos destinados a registro de la radiación total de onda corta emitida por el Sol y el cielo sobre una superficie horizontal. Otra característica importante es que este radiómetro prescinde de métodos sofisticados para amplificar la señal, ya que utiliza potenciómetros.

El radiómetro Eppley UV utiliza un recipiente herméticamente cerrado de selenio y una celda fotoeléctrica, que está protegida por una ventana de cuarzo.

Opera a bajos niveles de luz y en condiciones de mínima fuga de corriente eléctrica, a fin de garantizar un rendimiento alto en la estabilidad en periodos largos de exposición.

El radiómetro EPPLEY tiene un disco compuesto de cuarzo opaco que al actuar como receptor, no sólo reduce el flujo de radiación en niveles aceptables, sino que también proporciona datos mediante la ley del coseno de Lambert.

El encapsulado de banda estrecha filtra la respuesta espectral de la celda fotoeléctrica para el intervalo de 295-385 nanómetros de longitud de onda, con una insignificante transmisión secundaria.

Por estar construido de latón cromado, es ideal para soportar las inclemencias del tiempo. Este radiómetro contiene un tornillo nivelador ajustable y un nivel de burbuja circular.

La calibración del sensor se realiza bajo condiciones de exposición naturales.

Los radiómetros se han diseñado para mediciones precisas de la radiación ultravioleta de la atmósfera para tres diferentes rangos espectrales. Todos los modelos miden la radiación UV global, es decir, la suma directa de la radiación solar y la radiación que ha sido dispersada por las partículas o moléculas en el aire.

La respuesta angular sigue al coseno del ángulo cenital como un ideal de la superficie de Lambert, el filtro óptico interno controla la temperatura de 25 °C, independiente a la temperatura externa, esto elimina las variaciones de la sensibilidad espectral causadas por el cambio de temperaturas.

3.2.1 Instalación.

Al instalar el radiómetro se debe considerar lo siguiente:

1. El radiómetro debe instalarse lo más alto posible para minimizar la proyección de sombras producidas por árboles, edificios, etc.
2. El radiómetro deben ser cuidadosamente instalado en el plano horizontal, con visibilidad plena de todo el horizonte. Utilice el nivel de burbuja incorporado para encontrar la posición correcta.
3. La instalación del radiómetro deben garantizar la ventilación natural para disipar el calor causado por la radiación solar y la energía eléctrica, para evitar algún daño al equipo.

Capítulo IV

Espectroradiometría.

Se conoce como radiometría a la ciencia y tecnologías encargadas de medir la energía de la radiación electromagnética [7]. Es común escuchar simplemente que es la encargada de medir la radiación óptica. Sin embargo la radiometría mide toda la energía emitida por una fuente de radiación que incide en una entrada del espectro óptico, mientras que la espectroradiometría está relacionada con el contenido espectral de una fuente de radiación [8].

Transmitancia

La transmitancia es la razón de la radiación transmitida entre el flujo de la radiación incidente.

$$\text{Transmitancia luminosa: } \tau_v = \phi_v^t / \phi_v^i \dots \dots \dots (4.1)$$

$$\text{Transmitancia espectral: } \tau(\lambda) = \phi^t(\lambda) / \phi^i(\lambda) \dots \dots (4.2)$$

Donde el superíndice t se refiere al flujo de la radiación transmitida y el superíndice i se refiere al flujo incidente.

Si la radiación o el flujo de radiación viaja a través de una superficie lisa y su ángulo puede ser calculado mediante la ley de Snell, la transmitancia se conoce como regular, mientras que cuando el flujo es disperso y la superficie es rugosa no podemos aplicar simplemente la ley de Snell para conocer su ángulo de refracción, y a esto se le conoce como transmitancia difusa. En consecuencia, el comportamiento de una fuente de radiación

debe ser determinado mediante la transmitancia fotométrica del medio. Por ejemplo, la transmitancia fotométrica de un filtro azul tenderá a ser considerablemente mayor cuando la fuente de radiación es una lámpara de arco de xenón que cuando la fuente de radiación sea una lámpara de tungsteno.

Reflectancia.

Se conoce como reflectancia a la razón de la radiación reflejada entre el flujo de radiación incidente.

$$\text{Reflectancia luminosa } \rho_v = \phi_v^r / \phi_v^i \dots \dots \dots (4.3)$$

$$\text{Transmitancia espectral } \rho(\lambda) = \phi^r(\lambda) / \phi^i(\lambda) \dots \dots \dots (4.4)$$

Donde el superíndice “r” se refiere al flujo de radiación reflejada y el superíndice “i” se refiere al flujo de radiación incidente.

La reflectancia total de una superficie (ρ) consta de dos componentes: reflectancia especular (ρ_s) y reflectancia difusa (ρ_d) por lo tanto,

$$\rho = \rho_s + \rho_d \dots \dots \dots (4.4)$$

La reflectancia especular es el flujo de la radiación reflejada cuando la superficie es lisa, mientras tanto la reflectancia difusa existe cuando la superficie en donde incide la radiación no es totalmente lisa.

Dado que la transmitancia fotométrica y la reflectancia fotométrica dependen de la composición espectral de la fuente de radiación, la composición espectral de la fuente siempre debe ser determinada para así poder obtener los parámetros antes mencionados.

Respuesta Espectral.

La respuesta espectral, $R(\lambda)$, generalmente se refiere a una señal eléctrica generada por un fotodetector ($s(\lambda)$) cuando es sometido al flujo de energía de la radiación que genera una fuente específica ($\phi(\lambda)$) por lo tanto está determinada por la siguiente relación.

$$R(\lambda) = s(\lambda) / \phi(\lambda) \dots \dots \dots (4.5)$$

La salida de la señal del detector puede estar generada en amperes, volts, etc.

La respuesta espectral de un fotodetector puede estar dada como una respuesta en potencia (W) o como irradiancia (W/m^2).

4.1 Instrumentación Espectroradiométrica.

La función de un espectroradiómetro es descomponer la radiación óptica en sus respectivos componentes espectrales. El mecanismo encargado de esta labor se conoce como monocromador. En esta sección se explicará el funcionamiento de las partes que conforman el monocromador, también se mencionarán las especificaciones típicas que el usuario debe de tomar en cuenta para elegir un sistema adecuado a sus necesidades.

Un monocromador típico es como el que se muestra en la figura 4.1, éste tiene rendijas que funcionan como entradas o salidas, tiene un colimador, un foco óptico y un dispersor de longitud de onda, que por lo regular es un prisma. Otros mecanismos pueden estar incluidos en este sistema como filtros ópticos y por lo regular se encuentran dentro del monocromador.

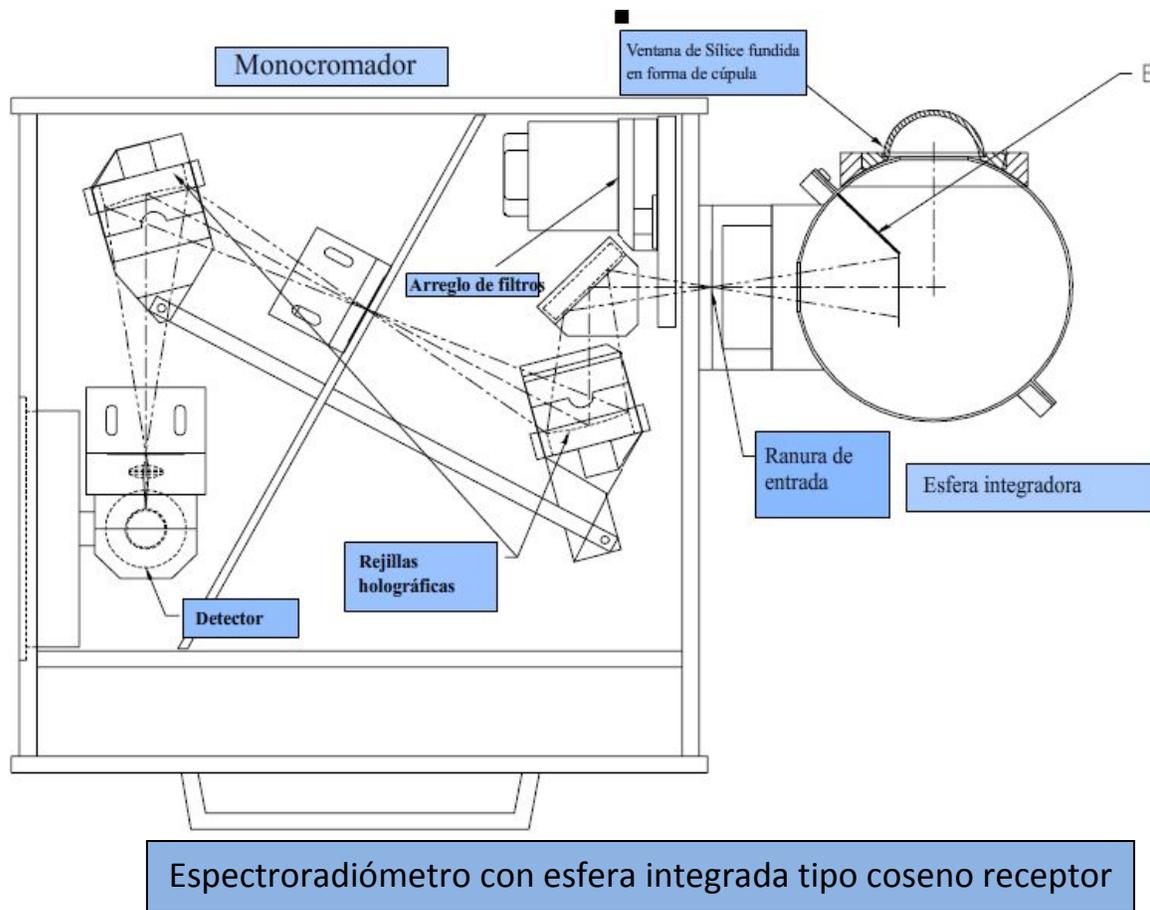


Figura 4.1 Espectroradiómetro con esfera integrada tipo coseno receptor
(Spectroradiometry methods by Optronic laboratories).

- **Rendija de entrada:** Sirve como una fuente para el monocromador. Es un rectángulo largo y estrecho que proporciona una mayor resolución de la longitud de onda de la energía dispersada, y su longitud permite tener suficiente energía en el sistema, como para producir una señal manejable posteriormente.
- **Rendija de salida:** Determina la banda de paso en términos de la longitud de onda de la energía que alcanza el detector de la muestra.

- **Colimador:** Permite dirigir los rayos que emanan de la rendija de entrada, de forma que los rayos provenientes de todas las posiciones de la rendija, llegan al elemento de dispersión con el mismo ángulo. El segundo colimador forma una imagen de la rendija de entrada, después de que ha sido dispersada como función de la longitud de onda, en la rendija de salida.
- **Elemento de dispersión:** Es la parte más importante del monocromador. En los monocromadores convencionales, se utiliza un retículo o un prisma como elemento de dispersión de la luz y se selecciona la longitud de onda deseada a través de una rendija estrecha. La distribución óptica simple que utiliza un prisma como elemento de dispersión aparece en la siguiente figura:

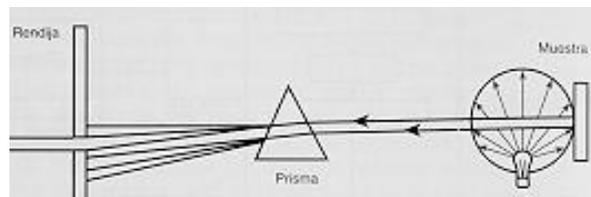


Figura 4.2 El prisma como elemento de dispersión.

La longitud de onda requerida en las radiaciones puede obtenerse, bien girando los elementos de dispersión, o bien moviendo la rendija situada en el plano focal del espectro. La anchura de banda de las radiaciones monocromáticas se decide a partir de la anchura de la rendija. La dispersión del prisma varía con las longitudes de onda. Por esa razón, la anchura de banda de las radiaciones monocromáticas obtenidas con una anchura de rendija de salida constante, varían con la longitud de onda. En la práctica, los monocromadores de prisma se consideran obsoletos.

Los monocromadores que emplean un retículo como elemento de dispersión son superiores a los que emplean un prisma. La capacidad de dispersión del retículo es independiente de la longitud de onda.

- **Fotodetector:** Se utilizan para convertir la señal luminosa en señal eléctrica, y así transmitir información al procesador de la señal. El fotodetector puede ser de fotocelda, fotomultiplicador o de detectores de estado sólido.

Los instrumentos de la generación actual emplean generalmente detectores de estado sólido, tipo fotodiodo de silicio, que dan un resultado mejor que el detector convencional.

En los instrumentos modernos está dispuesta una serie de 16 detectores para percibir la señal de manera simultánea en las 16 longitudes de onda que cubren por completo la región visible (400 nm-700 nm). Esto reduce el tiempo de registro, así como minimiza las partes móviles de los instrumentos. Para el caso de la espectroradiometría se incorporan en el fotocátodo tubos múltiples para una apropiada respuesta espectral. Sin embargo, si la intensidad de la radiación no es un problema, se podrán usar fotodiodos de estado sólido, ya que estos requieren un circuito electrónico simple y barato [1].

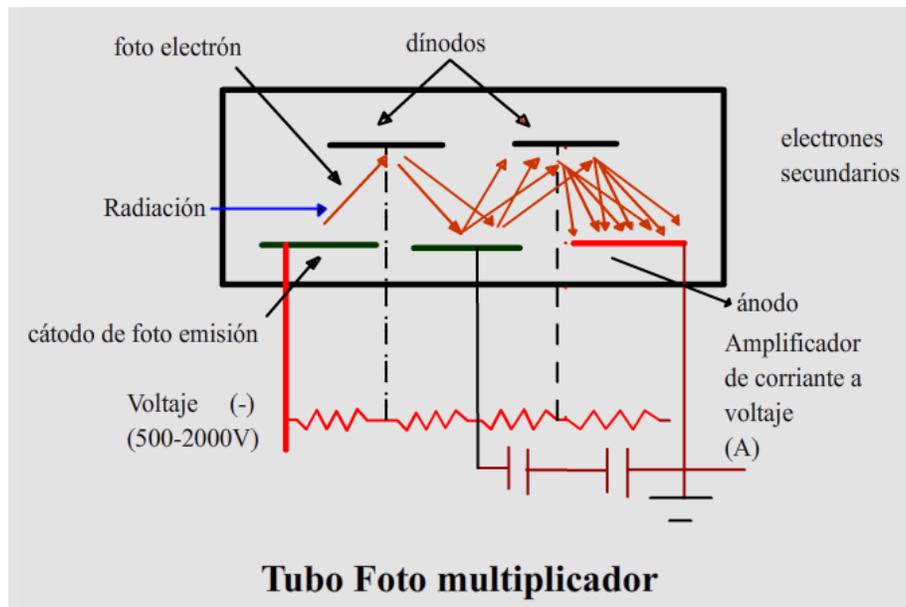


Figura 4.3 Esquema del funcionamiento de un tubo foto multiplicador.

4.2 Espectroradiómetro Field Spec Pro

Este espectroradiómetro es un instrumento portátil, diseñado para ser utilizado en aplicaciones que requieran mediciones absolutas o relativas de la energía luminosa [20].

El Field Spec Pro opera en el rango de 350 a 1050 nm. Utiliza un haz de fibra óptica para realizar la recolección de la luz. En el interior del instrumento la luz es proyectada desde la fibra óptica sobre un retículo de difracción, donde se separan las diferentes longitudes de onda y se reflejan para realizar medidas independientemente por los detectores. Cada detector convierte los fotones incidentes en electrones que se almacenan hasta ser leídos por el detector. La corriente fotoeléctrica de un detector es convertida en un voltaje y es digitalizada por un convertidor analógico digital de 16 bits. Los datos digitales se transfieren directamente a la memoria de la computadora utilizando el puerto paralelo EPP (Enhanced Parallel Port) y estos datos pueden ser procesados utilizando el software de control (View Spec pro).



Figura 4.2.1 Espectroradiómetro Fiel Spec Pro (Analytical Spectral Devices)

Capítulo V

Características Físicas y Químicas de los vidrios.

Un vidrio es una mezcla de arenas que consiste en sílice de alta calidad, piedra caliza, dolomita, feldespatos, carbonato de sodio entre otros [17].

El vidrio como tal se obtiene de la fusión y de enfriamiento de dicha mezcla; cuando ésta se enfría, se convierte en un material sólido, sin la formación de cristales y así se obtiene un material transparente.

Este material transparente tiene propiedades físicas y químicas muy útiles; estas propiedades son las siguientes: aislantes eléctricos, pueden ser expuestos a un choque térmico, no son afectados por la oxidación ni por la corrosión y cuentan con buenas propiedades mecánicas.

Para el caso de nuestro estudio la propiedad que tomará mayor relevancia es su transparencia a la luz ultravioleta. Es importante destacar que para realizar la selección de un vidrio se deben tomar en cuenta sus propiedades ópticas. Como ya se mencionó los vidrios, al tener diferentes composiciones, tendrán un comportamiento diferente en el espectro ultravioleta, es por eso que es de vital importancia contar con un estudio de transmitancia para conocer ese comportamiento para la selección del tipo de vidrio.

Fabricación del vidrio

El vidrio es un producto inorgánico fundido que se ha enfriado sin cristalizarse (definición de la American Society for Testing Materials) [18].

En la preparación de una composición vítrea se puede proceder de la siguiente forma: se añade el nuevo constituyente al vidrio base, el cual se calcula como el 100%; o de otra forma se pone también arena igual al 100% y se añade a ésta las demás sustancias. Sin

embargo, la mayor parte de las veces se prepara un nuevo vidrio sustituyendo gradualmente uno de los constituyentes, lo cual tiene como ventaja que sólo experimentará variación uno de los óxidos que constituyen el vidrio.

Al dejar enfriar una masa fundida de materia vítrea, se alcanza finalmente la temperatura de la primera formación de cristales, siempre que el enfriamiento sea lo suficiente lento.

Si este proceso se lleva a cabo en varias masas fundidas de igual composición cualitativa, pero cuantitativamente diferentes, y se unen las temperaturas correspondientes a la primera aparición de cristales, se obtiene la llamada “curva de solidus”. En los sistemas de tres o más componentes ya no se obtienen curvas, sino superficies. Si la temperatura desciende todavía más, muchos de los cristales formados experimentan transformaciones, pasando de las variedades estables a altas temperaturas a las estables a bajas temperaturas. Si la masa fundida se enfría, por último, a la temperatura ambiente, se forman agregados cristalinos que son productos de desvitrificación típicos para cada composición química de la masa fundida. [18]

Clasificación de las sustancias vítreas.

- 1.- Vidrios, exclusivamente inorgánicos.
- 2.- Plásticos, exclusivamente orgánicos.
- 3.- Sustancias intermedias, por ejemplo, siliconas, sustancias órgano-metálicas.

Tipos de Vidrios.

Vidrio Comercial: Este vidrio es transparente y sin colores. La principal característica de este tipo de vidrios es proveer protección de elementos ajenos, y también permite que pase casi en su totalidad la luz visible, claro que esto dependerá principalmente del grosor del cristal.

Vidrio tintado o absorbedor de calor. Este tipo de vidrio contiene componentes especiales para darles ciertos colores, este efecto no solo es estético sino que también

logra reducir la energía en forma de calor de la radiación solar, por lo regular éste absorbe de un 40% a 50% de esta energía. Este tipo de vidrio disminuye su transmitancia en el espectro de la radiación ultravioleta.

Vidrio Refractivo: Este tipo de vidrio está diseñado para refractar la radiación y el calor, debido a las placas de óxido de metal que los conforman. Este tipo de vidrio tiene la apariencia de un espejo además que este efecto lo hace poseer una baja transmitancia en el espectro de radiación ultravioleta UV.

Estos tienen una aplicación comercial fundamentalmente para la construcción de edificios.

Vidrios Sílico-Cálcicos- Sódicos.

En los vidrios industriales se hacen variar las composiciones para conseguir condiciones de elaboración más sencillas o para modificar algunas propiedades: la mayor parte de las veces se consigue añadiendo Fe_xO_y ($FeO + Fe_2O_3$), Al_2O_3 , MgO , B_2O_3 , ZnO , etc. Sin embargo, se pueden conseguir también las propiedades deseadas eligiendo una composición adecuada del sistema base.

Para esto se emplean vidrios que reblandezcan a bajas temperaturas y solidifiquen lentamente, con elevado contenido en álcali, bajo contenido en cal y alto contenido en sílice. El álcali está constituido únicamente por Na_2O . El K_2O sólo se emplea en aquellos casos en los que sean necesarios calentamientos frecuentes para el afinado del vidrio. Para la obtención del semicristal, un sucedáneo del cristal del plomo, se utilizan vidrios que contienen los dos álcalis.

Para una determinada cantidad de SiO_2 , el coeficiente de dilatación viene determinado por la cantidad de álcali. A mayor cantidad de álcali, más elevado coeficiente de dilatación, y viceversa.

El punto de transformación y el punto de reblandecimiento disminuyen linealmente al aumentar la cantidad de Na. En la representación triangular, las líneas de igual

temperatura de transformación y del mismo coeficiente de dilatación se cortan formando una red, lo cual se representa en el diagrama de la figura.

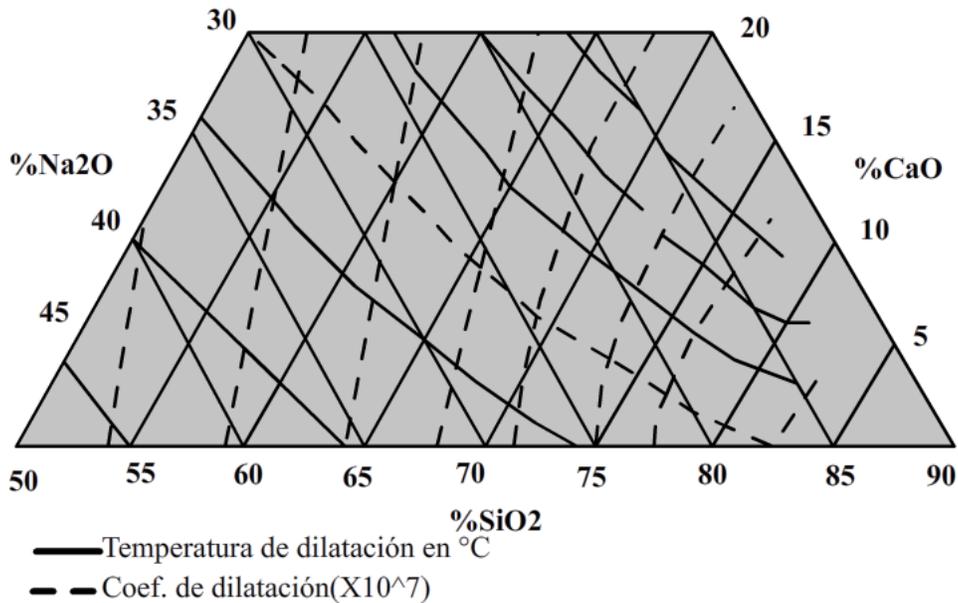


Figura 5.1 Diagrama de líneas de reblandecimiento

Si se añade MgO(óxido de magnesio), la temperatura de “liquidus” y la velocidad de cristalización disminuye en un 10% por cada 1% de MgO. Si se añade B₂O₃(trióxido de boro) hasta un 1.5%, disminuye ligeramente la temperatura de fusión y el coeficiente de dilatación. Al incorporar BaO (monóxido de bario) en pequeñas cantidades, disminuye la resistencia química al principio y después con rapidez, disminuyendo la temperatura de reblandecimiento y la dilatación térmica aumenta; la densidad crece linealmente con el aumento de BaO; el módulo de elasticidad, el índice de refracción y la duración de la fusión disminuye ligeramente; mientras que las propiedades de elaboración se mejoran.

La determinación de la temperatura de reblandecimiento por lo regular no se lleva a cabo ópticamente, sino con ayuda de un dilatómetro o también se puede determinar con la temperatura a la que empieza a alargarse una fibra de vidrio suspendida [23].

Este método tiene la ventaja de que puede realizarse a una determinada viscosidad. Esta temperatura de reblandecimiento depende del tratamiento térmico previo. En la tabla 5.1

se ven ejemplos del intervalo de temperatura entre reblandecimiento y congelación para diferentes vidrios.

<i>Tipo de vidrio</i>	<i>Temperatura de congelación [°C]</i>	<i>Temperatura de reblandecimiento [°C]</i>
<i>Pyrex</i>	<i>440</i>	<i>580</i>
<i>de botella</i>	<i>440-490</i>	<i>500-580</i>
<i>de borato</i>	<i>370</i>	<i>480</i>
<i>de cristal</i>	<i>350</i>	<i>435</i>
<i>de termómetro</i>	<i>390-450</i>	<i>520-540</i>

Tabla 5.1. Temperaturas de congelación y reblandecimiento para diferentes vidrios.

Con esta tabla podemos poner en evidencia la influencia de la composición química en un par de propiedades de los vidrios. La figura 5.1 es un diagrama que muestra las relaciones entre los coeficientes de dilatación y las temperaturas de reblandecimiento para los vidrios calcio-sódicos.

5.2 Transmisión de la radiación por el vidrio.

La transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar en las diferentes partes que conforman un reactor solar son de importancia para el adecuado diseño de estos.

La transmitancia, reflectancia y absortancia son funciones de la radiación proveniente del Sol, el grosor, índice de refracción y el coeficiente K del material. Generalmente, el índice de refracción y el coeficiente K del material dependen de la longitud de onda.

Algunos materiales tienen una significativa variación con la longitud de onda, por lo tanto se tiene que considerar su dependencia espectral [23].

Reflexión y Radiación.

Para superficies lisas Fresnel dedujo las siguientes ecuaciones que determinan la reflexión de una superficie cuando incide en ella radiación sin polaridad, esto es la radiación que pasa por el medio 1 con un índice de refracción n_1 a un medio 2 con un índice de refracción n_2 :

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \dots \dots \dots 5.2.1$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \dots \dots \dots 5.2.2$$

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2}(r_{\perp} + r_{\parallel}) \dots \dots \dots 5.2.3$$

Donde θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y de refracción. Como se puede observar en la figura, la ecuación 5.2.1 representa la componente perpendicular de la radiación, r_{\perp} , la ecuación 5.2.2 representa la componente paralela de la radiación, r_{\parallel} , estas ecuaciones están referidas al plano que forman el ángulo de incidencia y la superficie normal. La ecuación 5.2.3 representa la reflexión de la radiación haciendo un promedio de las dos componentes.

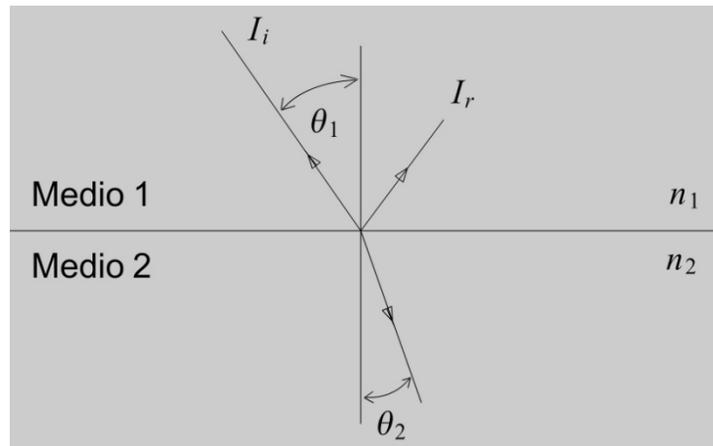


Figura 5.2 Ley de Snell

Los ángulos θ_1 y θ_2 están relacionados con los índices de refracción que se enuncian en la ley de Snell.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} \dots \dots \dots (5.1.4)$$

Sin embargo si el ángulo de incidencia y el índice de refracción son conocidos estas ecuaciones son suficientes para determinar la reflectancia de una superficie.

Para la radiación de incidencia normal $\theta_1 = \theta_2 = 0$ y podríamos expresar a la ecuación 5.1.3 como

$$r(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \dots \dots \dots (5.1.5)$$

Si uno de los medios es aire podemos considerar su índice de refracción como la unidad y tendríamos la siguiente ecuación

$$(0) = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \dots \dots (5.1.6)$$

En aplicaciones para energía solar, la transmisión por lo regular es a lo largo de películas que tienen por lo menos dos interfaces, debido a esto se generan grandes pérdidas de la transmitancia debido a la reflectancia.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de la transmitancia de 4 diferentes tipo de vidrios “no absorbedores” que tienen un índice de refracción promedio de 1.526, esto ha sido calculado para varios ángulos de incidencia.

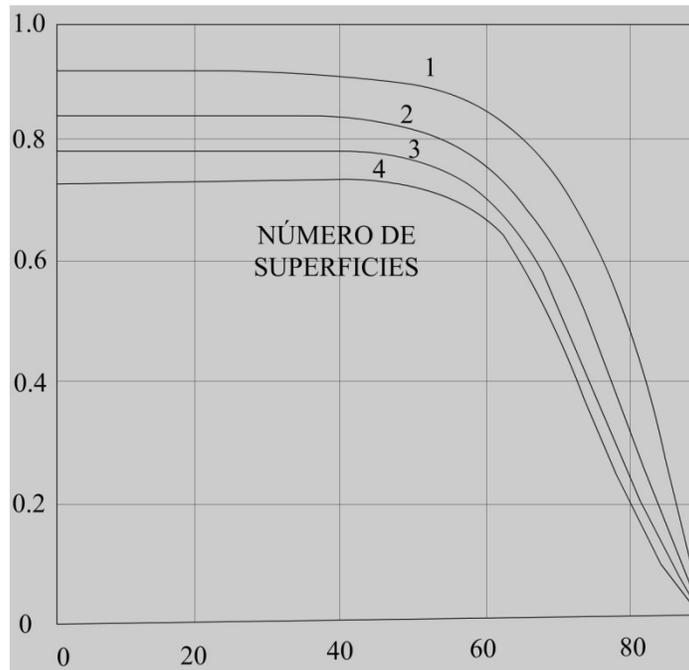


Figura 5.2.1. Comportamiento de la Transmitancia de 4 diferentes tipos de vidrios “no absorbedores” [Beckman Duffie, Solar Engineering of thermal processes].

En la siguiente tabla se muestran los índices de refracción de algunos materiales que han sido utilizados para la construcción de foto-reactores.

Material	Índice de refracción promedio \bar{n}
Vidrio	1.526
Metacrilato de Polimetilo	1.49
Fluoruro de Polivinilo	1.45
Poliflorinato de Etileno Propileno	1.34
Politetrafluoroetileno	1.37
Policarbonato	1.60

Tabla 5.2 Índice de refracción de algunos materiales.

5.2.1 Absorción del vidrio

La absorción de la radiación en un medio transparente es descrita por la ley de Bouguer. La cual se basa en el principio de que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad en el lugar sobre el medio y la distancia por donde viaja la radiación en el medio.

$$dI = -IKdx \dots \dots (5.2.1)$$

donde K es una constante de proporcionalidad, correspondiente al espectro solar. Integrando la distancia recorrida en el medio se tiene

$$\tau_a = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} = \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \dots \dots \dots (5.2.2)$$

Para el vidrio, el valor de la constante K varía aproximadamente de 4 m^{-1} para el vidrio con bajo contenido de Hierro y 32 m^{-1} para el que tiene altas concentraciones de Hierro.

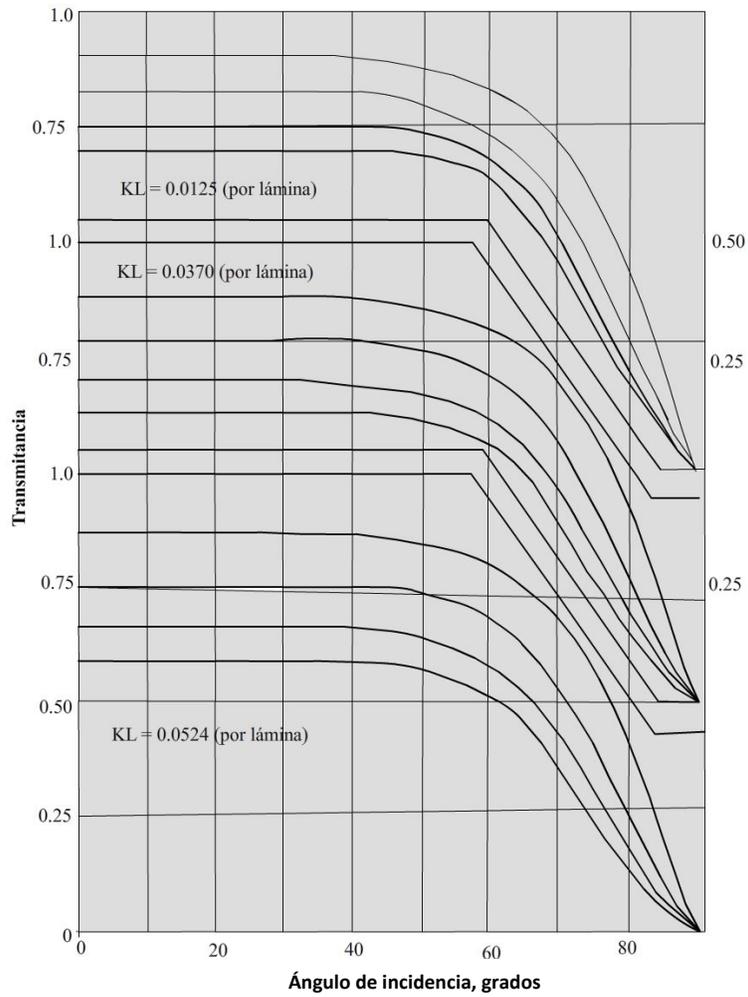


Figura 5.2.2 Variación de la transmitancia respecto al ángulo de incidencia [Beckman Duffie, Solar Engineering of thermal processes]

5.3 Dependencia Espectral de la Transmitancia.

La mayoría de los medios transparentes transmiten selectivamente, esto es, la transmitancia es una función de la longitud de onda de la radiación incidente. El vidrio, por ser un material de uso común para la construcción de colectores solares, debe absorber un poco de ese espectro solar si en su composición existe un bajo contenido de

Fe_2O_3 , mientras que si la presencia de éste es alta, el vidrio tendería a absorber parte del infrarrojo del espectro solar.

En la siguiente figura se muestra la transmitancia de diferentes vidrios variando su contenido de hierro.

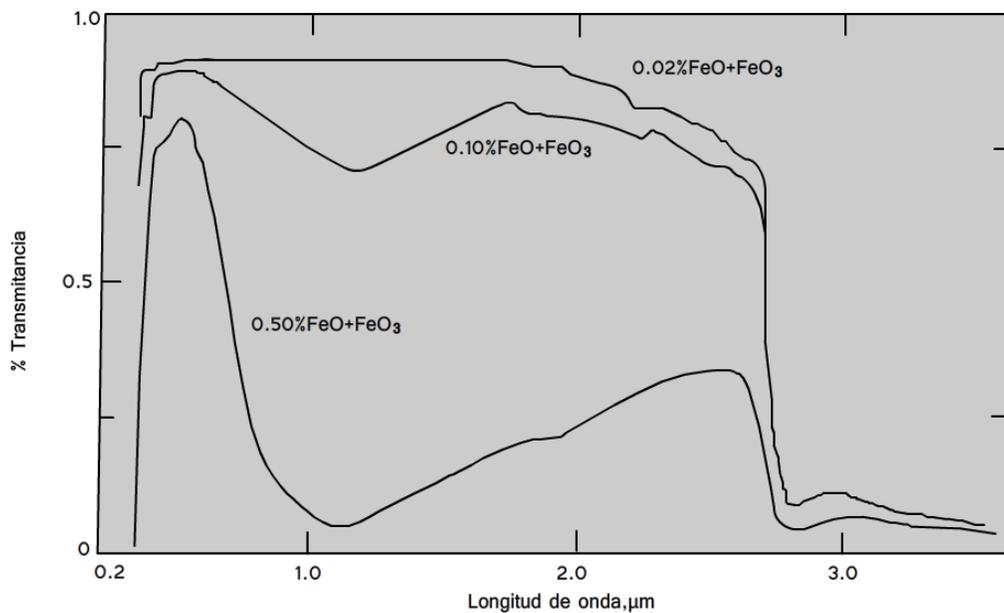


Figura 5.3.1 Transmitancia de diferentes vidrios al variar su composición de Hierro. [23]

Esta figura muestra claramente que cuando el vidrio tiene un bajo contenido de hierro, es un buen transmisor, en cambio los vidrios que contienen altas concentraciones de hierro

tienen una transmisión muy limitada. La transmitancia no es una función de la longitud de onda en el espectro solar, excepto en el caso de los vidrios “absorbedores de calor” El vidrio comienza a ser ampliamente opaco en longitudes de onda larga aproximadamente mayores a $3 \mu m$, y pueden ser considerados como opacos para la radiación de onda más larga.

Si existe una dependencia angular de la transmitancia τ_λ , la transmitancia total respecto al ángulo θ puede ser escrita como

$$\tau(\theta) = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda(\theta) I_{\lambda i}(\theta) d\lambda}{\int_0^\infty I_{\lambda i}(\theta) d\lambda} \dots \dots \dots (5.3.1)$$

Donde $\tau_\lambda(\theta)$ se calcula mediante la ecuación

$$\tau = \sum_{j=1}^n \tau_{\lambda,j} \Delta f_j, \dots \dots \dots (5.3.2)$$

usando valores monocromáticos del índice de refracción y del coeficiente de absorción, y $I_{\lambda i}(\theta) d\lambda$ es la intensidad monocromática incidente que incide en la superficie del foto-reactor a un ángulo θ

Para la mayoría de los plásticos la transmitancia comienza a ser significativa en el espectro infrarrojo para $\lambda > 3 \mu m$.

La siguiente figura 5.3.2 muestra una curva de transmitancia de una película de Fluoruro de Polivinilo para longitudes de onda mayores a $2.5 \mu m$

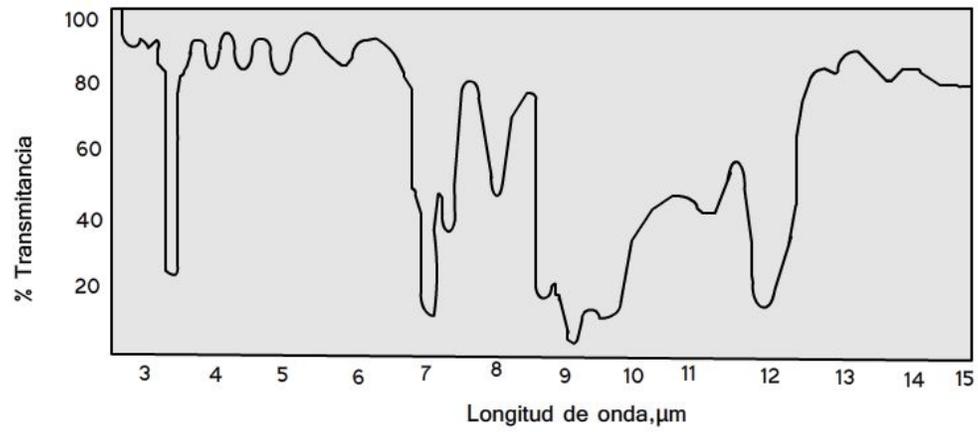


Figura 5.3.2 Transmitancia espectral en el infrarrojo de la película Fluoruro de Polivinilo.

Capítulo VI

Estudio de la Transmitancia en diferentes medios.

Para el desarrollo de este experimento se recurrió al Instituto de Geofísica; debido a que ellos cuentan con un espectroradiómetro Field Spec Pro (350-1050 nm) y ahí se comenzó a realizar el experimento. Es importante destacar que la comunicación y la adquisición de datos se hacía con un software que operaba en ambiente MS-DOS en una computadora con capacidad de procesamiento sumamente limitada; lo cual hacía que el proceso fuera muy lento, principalmente para el procesamiento de datos.

En el Instituto de Geofísica se instaló el siguiente montaje experimental



Figura 6.1 Fotos del montaje experimental instalado en el Instituto de Geofísica UNAM

Para obtener el espectro de radiación de la lámpara se tomaban mediciones con el sensor colocado en el centro y desplazándolo algunos centímetros del centro, para obtener la irradiancia a través de las superficies se construyó una base en donde se ponían los materiales para su respectivo análisis.

Después de todo esto, se pensó en la posibilidad de modernizar el sistema para la adquisición de datos, para que esto se pudiera realizar con un software que se manejara en Windows '98 o Windows Vista. Por lo tanto se solicitó el aparato en préstamo al Instituto de Geofísica para trasladarlo al Laboratorio de Energías Renovables del Instituto de Ingeniería, en donde se realizaría su respectiva modernización. Después de una minuciosa investigación se encontró que el fabricante proporcionaba un software con estas características que se llama RS³ de ASD (Analytical Spectral Devices). Para operar el equipo con este software se tuvo que volver a programar el espectroradiómetro; esto es primero se configuró el puerto paralelo de la computadora a la cual se iba a conectar el aparato, y posteriormente se tuvieron que modificar los programas de calibración del instrumento para adaptarlos al nuevo ambiente de trabajo.

A continuación se da una breve descripción del software **RS³**

RS³

Es la tercera versión del software de aplicación que la compañía ASD ofrece con sus espectroradiómetros.

Con RS³ es posible:

- Controlar la operación de los espectroradiómetros ASD.
- Recibir y guardar los datos espectrales transmitidos por el espectroradiómetro.

Características que debe tener la computadora para que se pueda operar RS³

La computadora será el instrumento de control ya que guardará datos y ayudará al procesamiento de los resultados.

Los requerimientos mínimos para este instrumento de control son los siguientes:

- Procesador Pentium 1.2Ghz
- Memoria RAM de 256 MB o mayor.

“Transmitancia de la Radiación Ultravioleta en diferentes medios para su aplicación en proyectos de Energía Solar.”

- 20 GB de espacio en disco duro.
- Sistema operativo Microsoft Windows (95,98,ME,NT,2000,XP)
- Monitor de 1024x768 o una mejor resolución gráfica.
- Sistema operativo de 32 bits.
- Internet Explorer 6.0 o superior

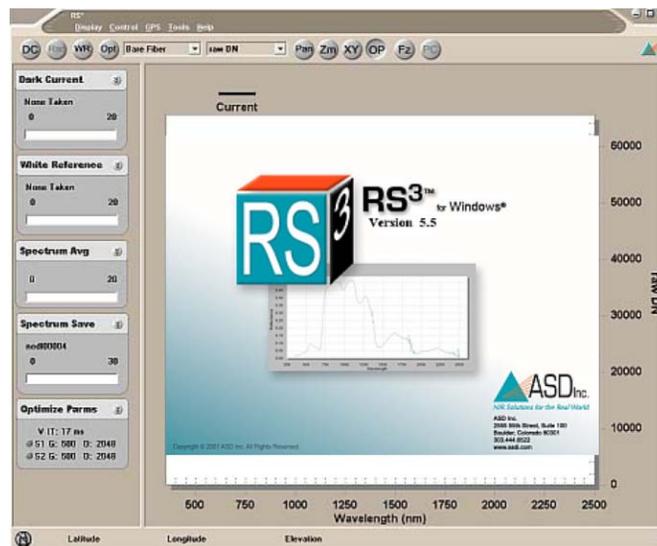


Figura 6.2. Pantalla de operación de RS³

RS³ también permite:

- Establecer la comunicación con el espectroradiómetro
- Elegir qué tipo de sensor se utilizará
- Seleccionar el intervalo de tiempo
- Elegir la manera en que los datos serán procesados para obtener ya sea radiancia, irradiancia, reflectancia o simplemente los datos en crudo para realizar posteriormente su procesamiento.

Para el procesamiento de los datos se encontró el software también de ASD llamado View Spec Pro.

View Spec Pro.

Este software permite procesar los datos obtenidos con RS3. Se pueden diseñar gráficas, obtener información de cómo los datos fueron adquiridos, exportar los datos para que puedan ser procesados en Excel. Siempre que el aparato esté programado se pueden realizar algunos cálculos radiométricos.

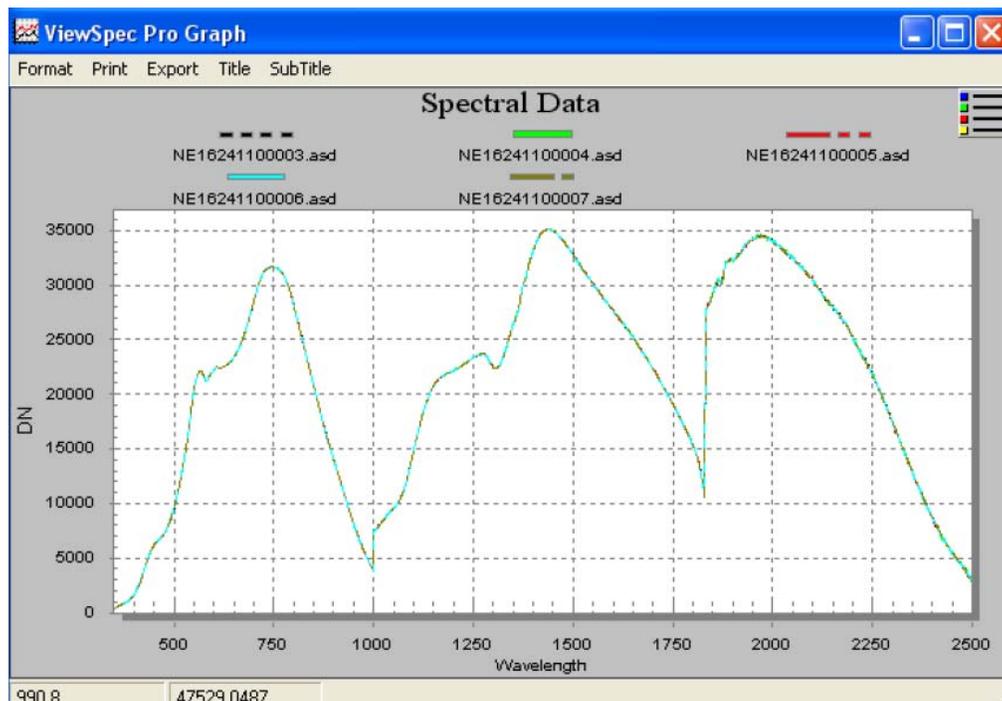


Figura 6.3 Ejemplo del diseño de gráficas con View Spec Pro.

El arreglo realizado en el Instituto de Geofísica sufrió cambios debido a que después de observar los datos obtenidos, se concluyó que la lámpara no posee tanta potencia, por lo que no tenía sentido efectuar mediciones a distancias que fueran más allá de cierto límite. Con estos avances se comenzó con el estudio de la Transmitancia en diferentes medios.

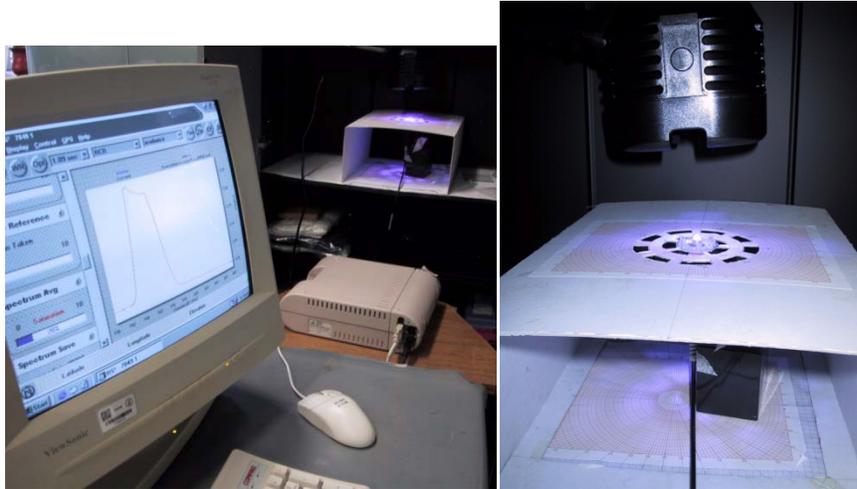


Figura 6.4 Montaje experimental Instalado en el Laboratorio de Energías Renovables del Instituto de Ingeniería.

Como se puede observar se diseñó una plantilla en donde se puede cuantificar la potencia emitida por la lámpara en diferentes radios, se hicieron sólo dos radios debido a que como ya se había observado antes la lámpara pierde mucha potencia al alejar el sensor del centro.

Este arreglo nos permitió utilizar el centro para poner las superficies que se requerían estudiar.

Las materiales que se requieren estudiar son vidrio comercial (vidrio- cal -sosa), Pilkington (vidrio recubierto con TiO_2) y acrílico. Estos por ser los principales materiales con los cuales se quieren construir los foto-reactores, el vidrio pyrex se requiere estudiar debido a que en algunos sistemas se necesitan tubos de este material porque es el medio en donde pasa el fluido de trabajo. Las esferas que posteriormente serán recubiertas con TiO_2 (dióxido de titanio), se someterán a este estudio debido a que será el medio que circulará por los fotoreactores para producir la fotocatalisis.

Antes de realizar cualquier experimento con el radiómetro Fiel Spec pro se tiene que seguir el siguiente algoritmo para su adecuada operación:

- 1.-Es importante que siempre se encienda el espectroradiómetro Fiel Spec Pro antes de encender la computadora.
- 2.- Encienda la computadora. Una vez que el espectroradiómetro ha sido encendido, éste comenzará a transmitir los datos recibidos, incluso aunque la computadora no esté encendida.
- 3.- Ejecute el software de control RS³, después de que el sistema configure los parámetros correspondientes para su ejecución, aparecerá una pantalla (figura 6.5) con datos del equipo tales como número de serie, número de calibración y el tipo de espectroradiómetro.

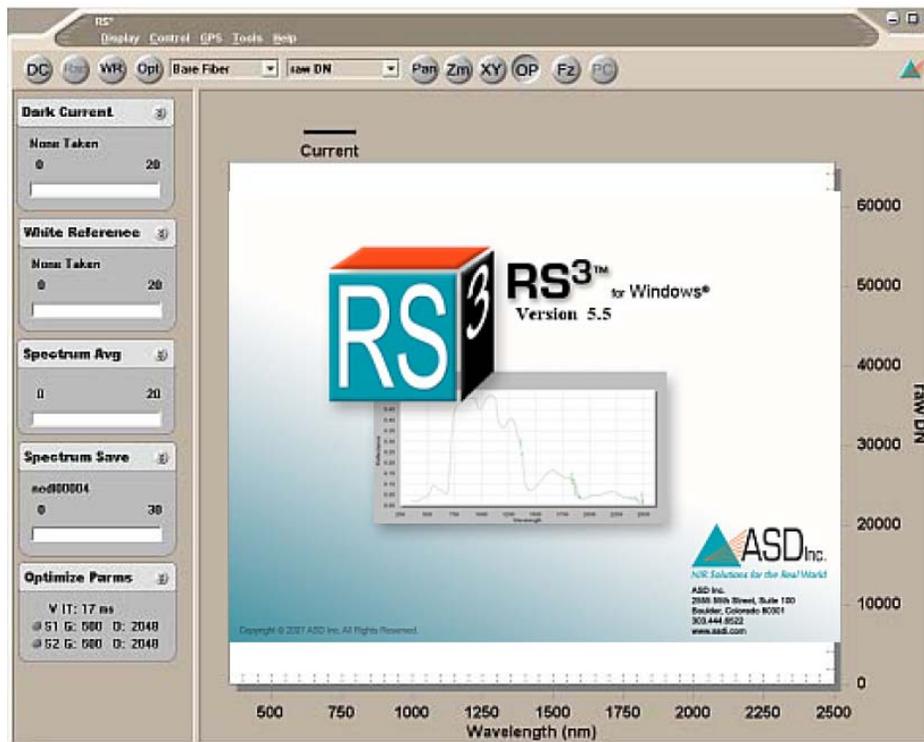


Figura 6.5. RS3, pantalla de inicio

4.- para la adquisición de datos confiables, se debe poner especial cuidado en observar que los datos de calibración y número de serie correspondan al instrumento que se está manejando.

5.- Cuando la configuración del espectroradiómetro con el sistema de control ha sido finalizada, aparecerá una pantalla (figura 6.6), que nos indicará que nuestro sistema está listo para la adquisición y procesamiento de la información.

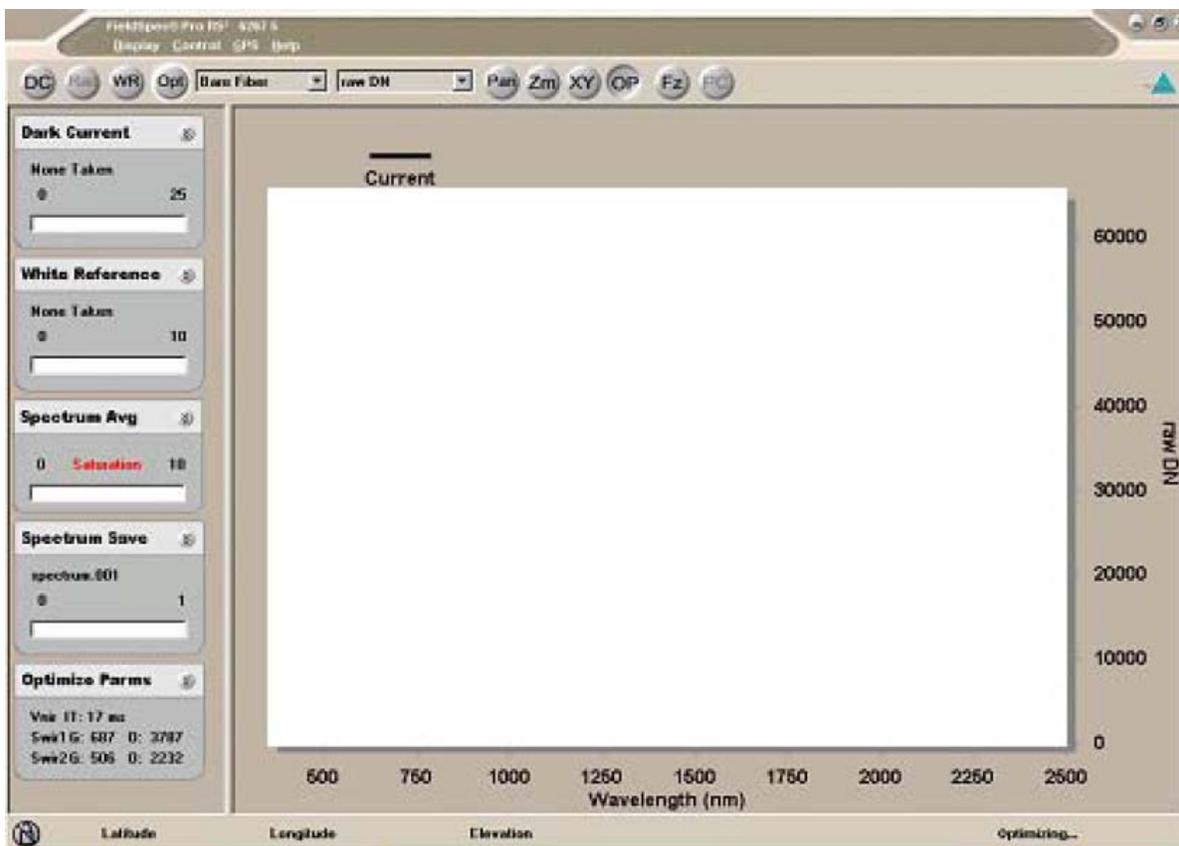


Figura 6.6 Vista de aplicación de RS³

Estudio espectral de la lámpara B-100SP a diferentes distancias del centro, el procesamiento de datos se realizó con el Software View Spec Pro.

Para el estudio espectral de la lámpara se pensó en registrar el espectro de radiación de la lámpara en círculos concéntricos. El primer registro fue obtener el espectro de Irradiancia en el centro de la lámpara, posteriormente en un círculo con 2.7 cm de radio y el siguiente círculo se realizó a 5.7 cm respecto del centro, estos registros se obtuvieron de la siguiente forma:

1.- Primero se construyó una plantilla con un sistema polar de coordenadas en donde fueron trazados los círculos antes mencionados.



Figura 6.7 Plantilla para la obtención del espectro de la lámpara

2.-Se enciende la lámpara y se dejan pasar aproximadamente 5 min, antes de tomar mediciones ya que este tiempo es tomado por el mecanismo de la lámpara para su estabilización.

“Transmitancia de la Radiación Ultravioleta en diferentes medios para su aplicación en proyectos de Energía Solar.”

Irradiancia W/m ²		Irradiancia W/m ²	
λ nm		λ nm	
350	0.009	376	0.006
351	0.01	377	0.006
352	0.01	378	0.006
353	0.011	379	0.005
354	0.011	380	0.008
355	0.011	381	0.021
356	0.01	382	0.029
357	0.016	383	0.037
358	0.039	384	0.048
359	0.109	385	0.037
360	0.2	386	0.031
361	0.275	387	0.036
362	0.278	388	0.041
363	0.266	389	0.043
364	0.26	390	0.037
365	0.256	391	0.021
366	0.253	392	0.025
367	0.252	393	0.036
368	0.252	394	0.039
369	0.2	395	0.02
370	0.129	396	0.019
371	0.073	397	0.038
372	0.037	398	0.035
373	0.017	399	0.031
374	0.009	400	0.032
375	0.007		

Tabla 6.1 Respuesta espectral de la lámpara B-100SP

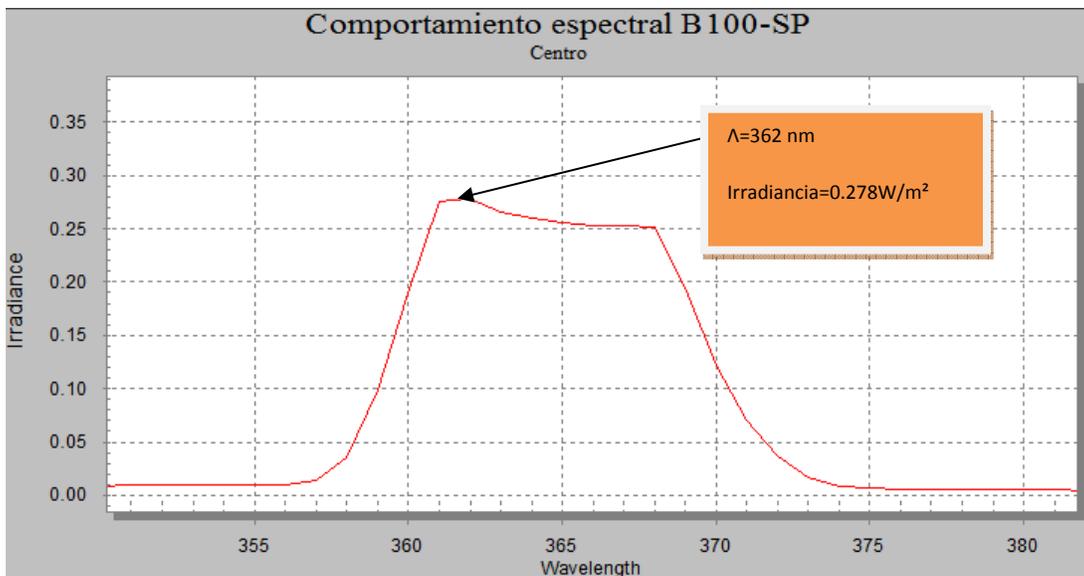


Figura 6.7. Comportamiento espectral de la lámpara B-100SP, utilizando View Spec Pro.

Los datos obtenidos para obtener la respuesta espectral en el centro de la lámpara con el espectroradiómetro Fiel Spec Pro, se muestran en la tabla 6.1

En éstos, se puede ver que el nivel de emisión de potencia más alto de la lámpara B-100SP está en el rango de longitud de onda de 360-369 nm, alcanzado su pico en la longitud de onda de 362 nm con una Irradiancia de 0.278 W/m^2 y se tiene un promedio de irradiancia espectral de 0.07229 W/m^2 . En la figura 6.7 se ilustra el comportamiento espectral de la lámpara B-100SP.

Después de hacer esta prueba, se pensó en tomar el nivel de potencia de la lámpara tomando como base círculos concéntricos, y los resultados fueron los siguientes: para el primer círculo con radio de 2.7 cm respecto del centro.

En el punto de referencia 0° se obtuvo el siguiente espectro

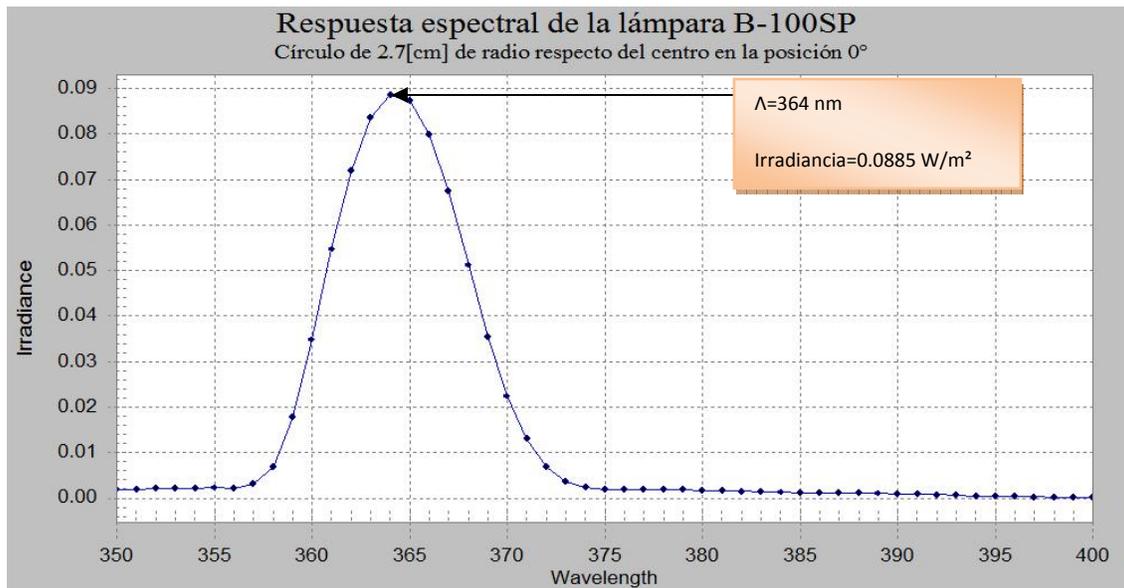


Figura 6.8. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP , círculo 2.7 cm posición 0°

Como se observa en la gráfica (figura 6.8), el punto de mayor irradiancia se encuentra en la longitud de onda 364 nm y hay una potencia de 0.0885 W/m². El promedio de irradiancia del espectro es de 0.0157 W/m².

En la posición $r= 2.7$ cm y $\theta=40^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

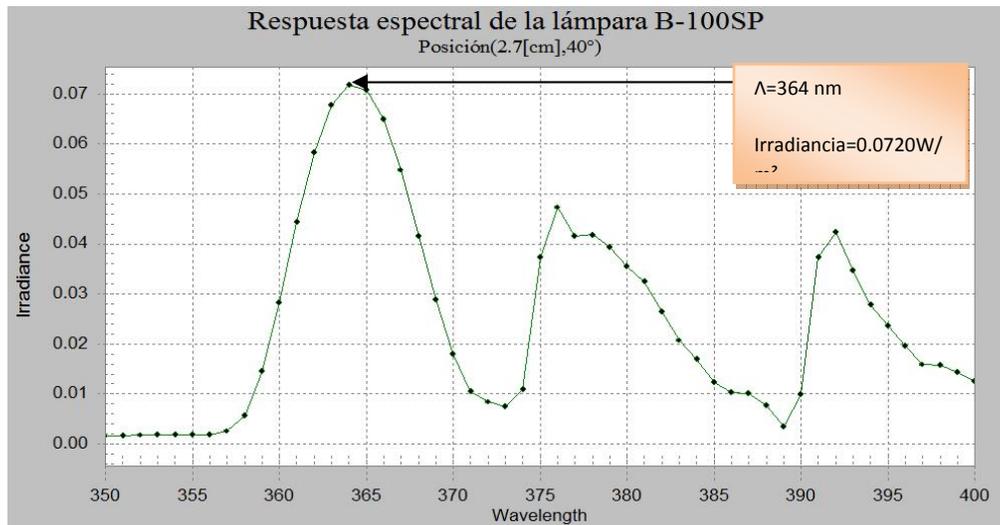


Figura 6.9. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica (figura 6.9) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0720 W/m²) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.02472549 W/m².

En la posición $r= 2.7$ cm y $\theta=80^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

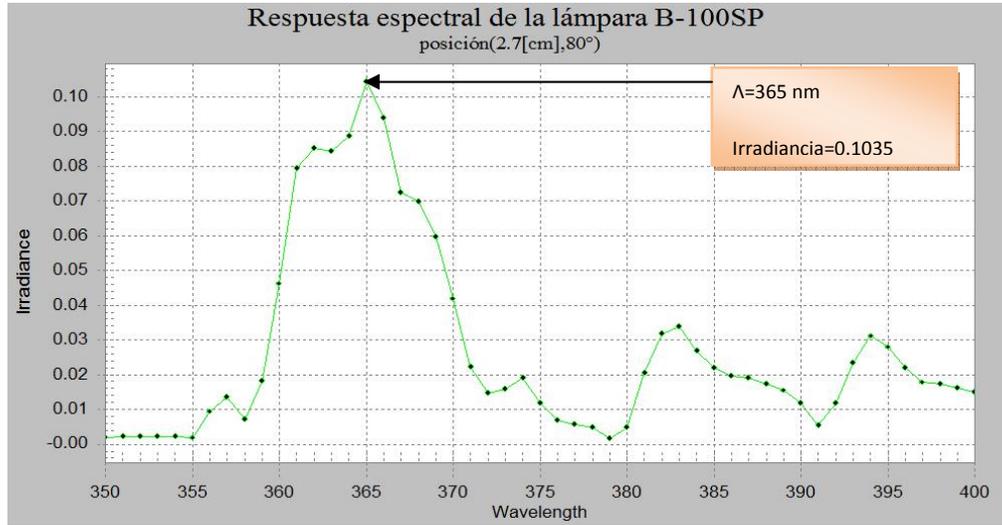


Figura 6.10. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica (figura 6.10) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.1035 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 365 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.02745098 W/m^2 .

En la posición $r = 2.7 \text{ cm}$ y $\theta = 120^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

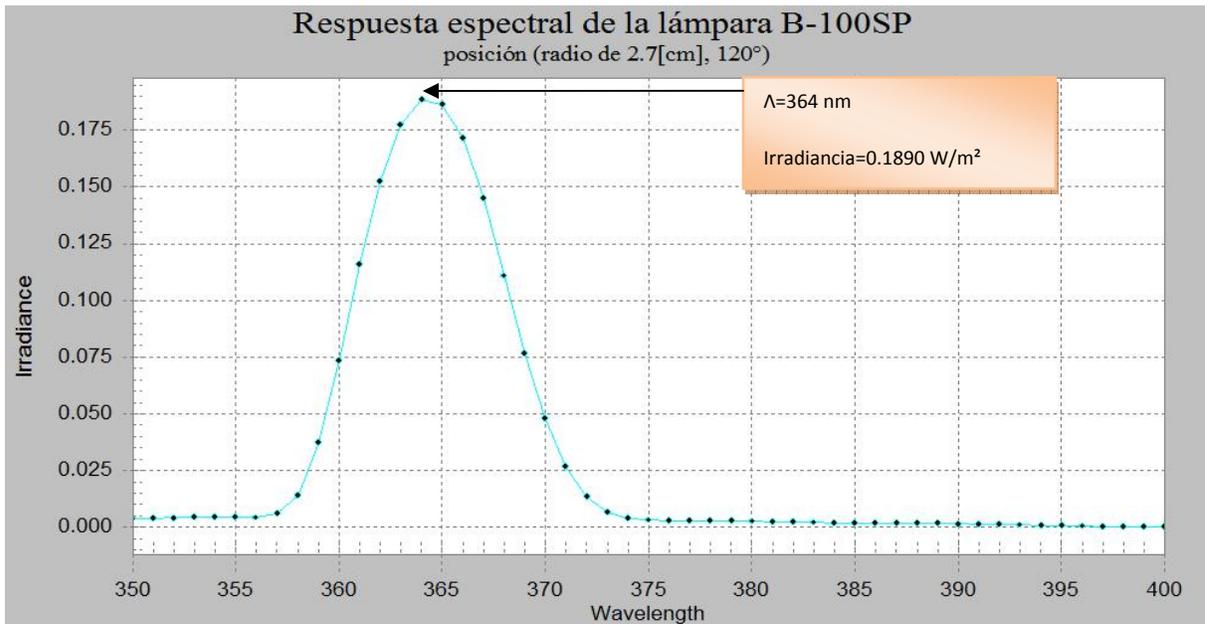


Figura 6.11. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica (figura 6.11) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.1890 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.03182353 W/m^2 .

En la posición $r= 2.7 \text{ cm}$ y $\theta=160^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

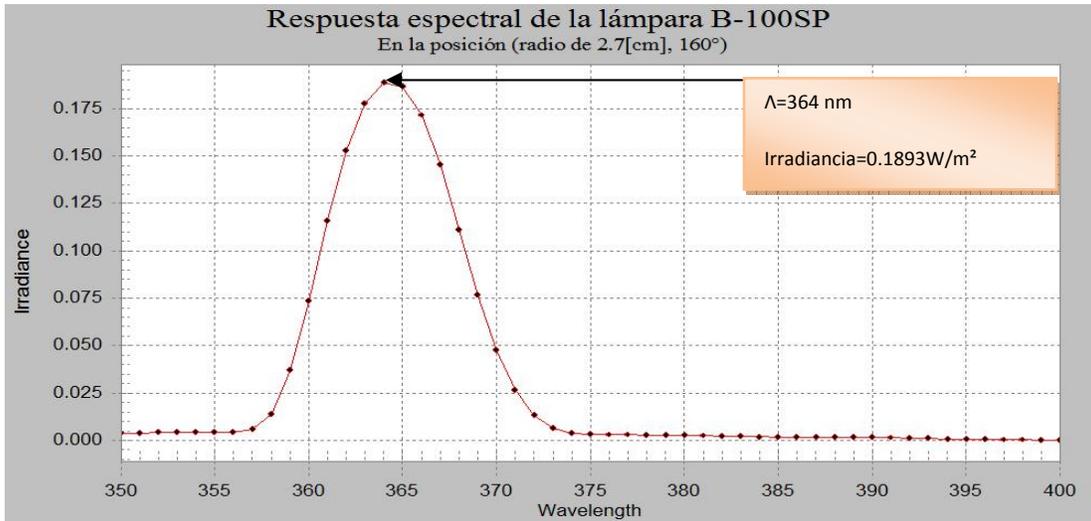


Figura 6.12. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.1893 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.03188235 W/m^2 .

En la posición $r= 2.7 \text{ cm}$ y $\theta=200^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

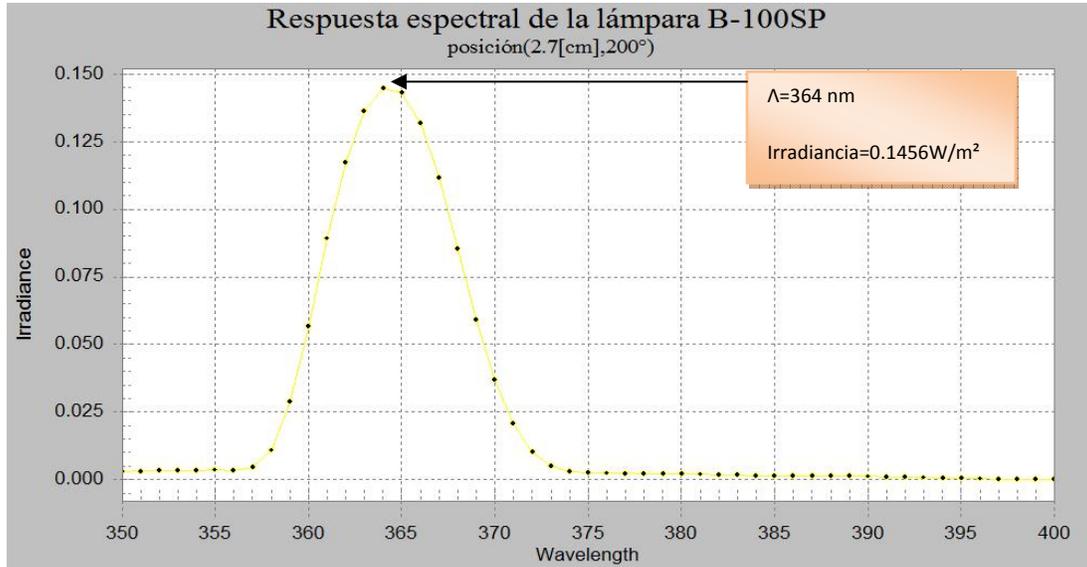


Figura 6.13. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica(figura 6.13) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.1456 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.0244902 W/m^2 .

En la posición $r = 2.7\text{ cm}$ y $\theta = 240^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

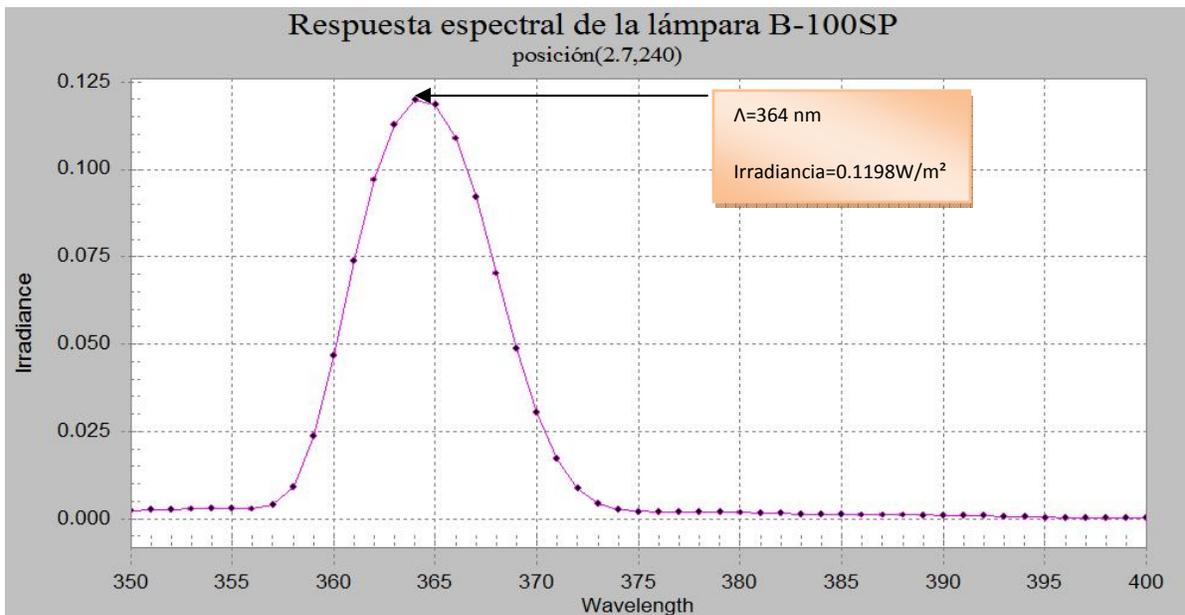


Figura 6.14. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP .

En la gráfica(figura6.14) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.1198 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.020333 W/m^2 .

En la posición $r= 2.7 \text{ cm}$ y $\theta=280^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

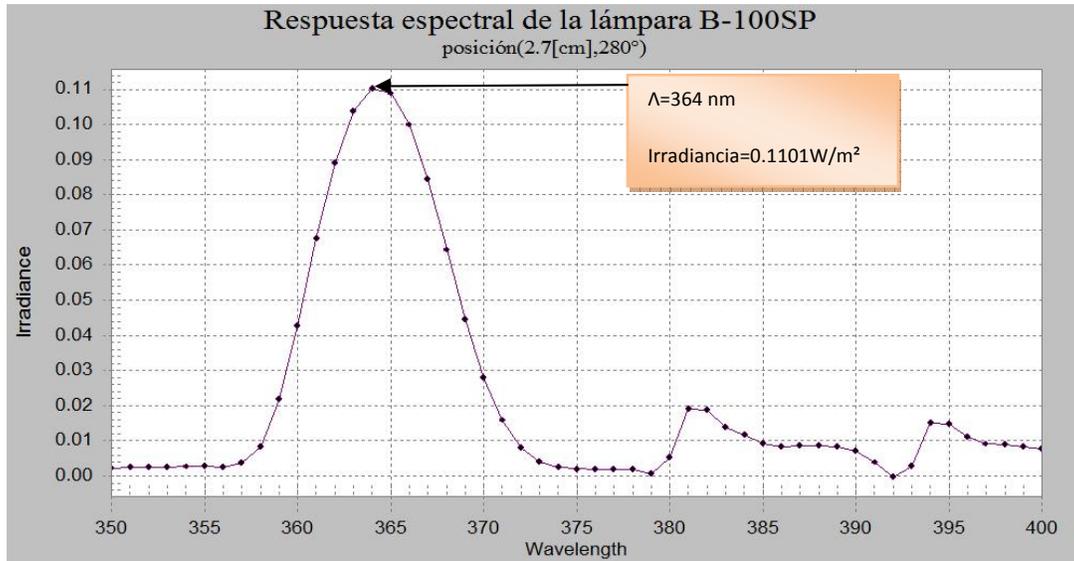


Figura 6.15. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica(figura 6.15) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.1101 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.02227451 W/m^2 .

En la posición $r= 2.7 \text{ cm}$ y $\theta=320^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

En la gráfica(figura 6.16) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.1058 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.01786275 W/m^2 .

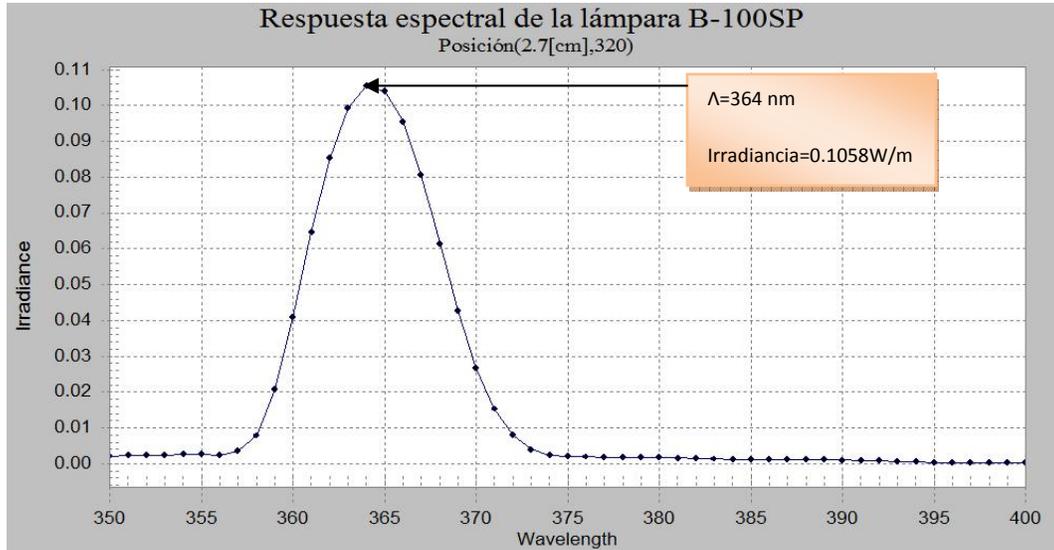


Figura 6.16. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la posición radio de 2.7 cm, 360°, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

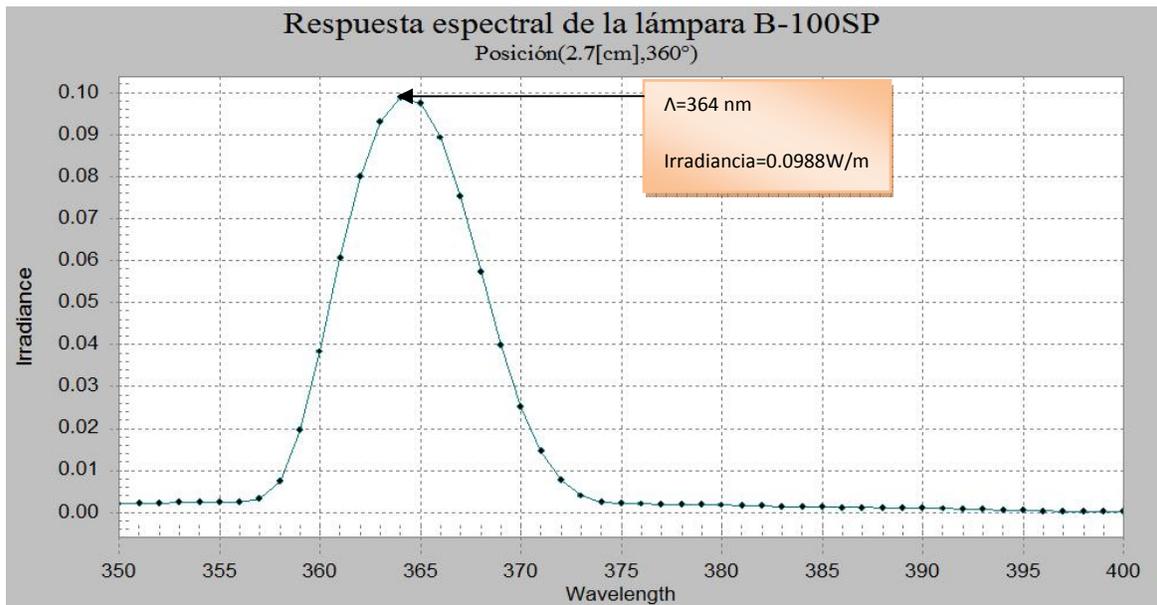


Figura 6.17. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica(6.17) podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0988 W/m²) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.01674 W/m².

Se realizó el mismo proceso para el círculo concéntrico de 5.7 cm de radio con respecto al centro.

En la posición $r= 5.7$ cm y $\theta=0^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

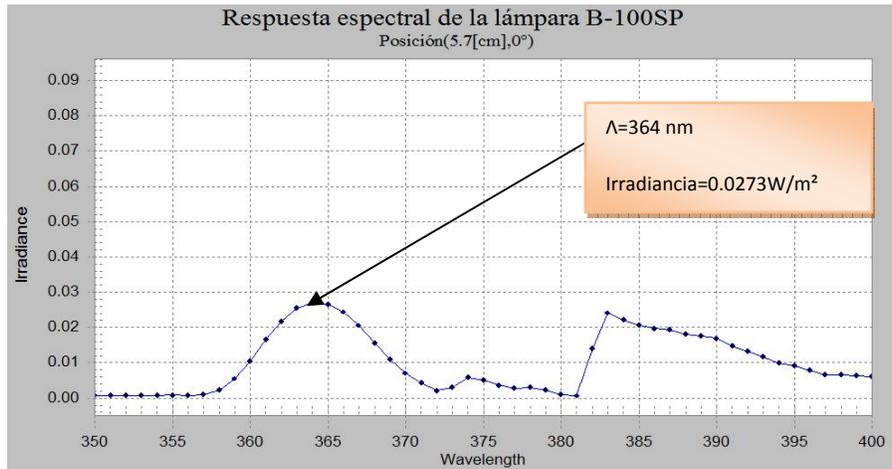


Figura 6.18. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

Como se observa en la gráfica el punto de mayor irradiancia se encuentra en la longitud de onda 364 nm y hay una potencia de 0.02733 W/m². El promedio de irradiancia del espectro es de 0.01017 W/m².

En la posición $r= 5.7$ cm y $\theta=40^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

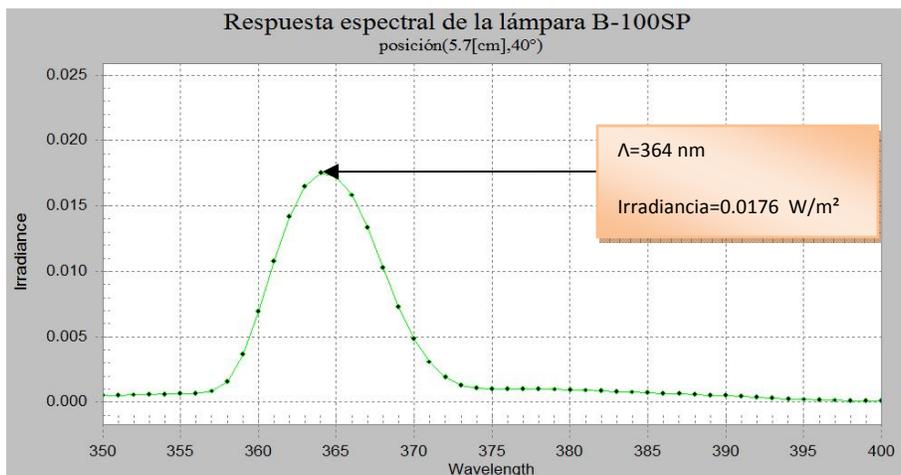


Figura 6.19. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0176 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.003352 W/m^2 .

En la posición $r= 5.7 \text{ cm}$ y $\theta=80^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

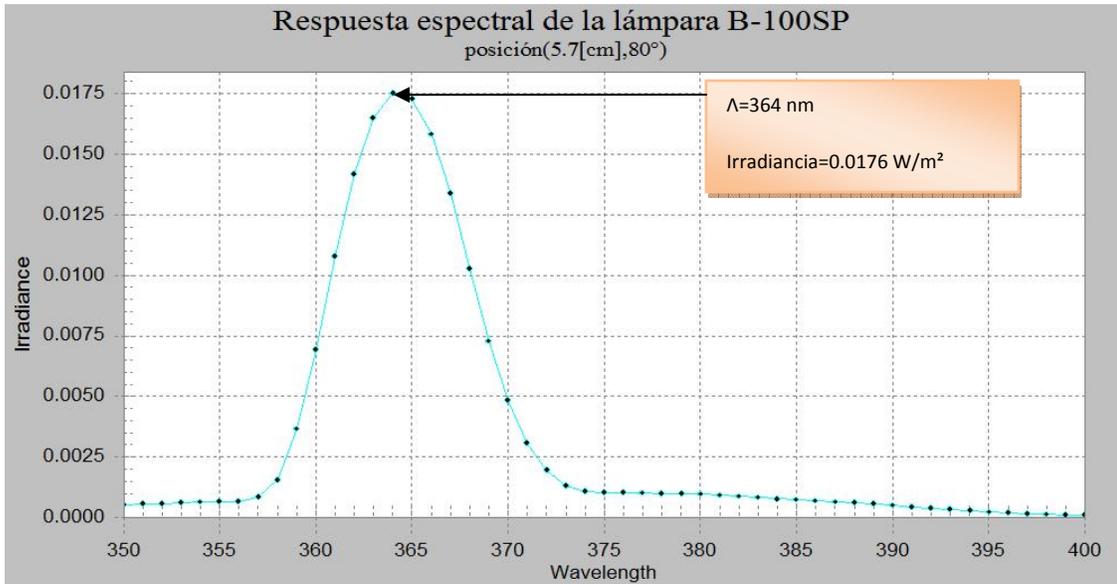


Figura 6.20. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0176 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.0051 W/m^2 .

En la posición $r= 5.7 \text{ cm}$ y $\theta=120^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0291 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.005158 W/m^2 .

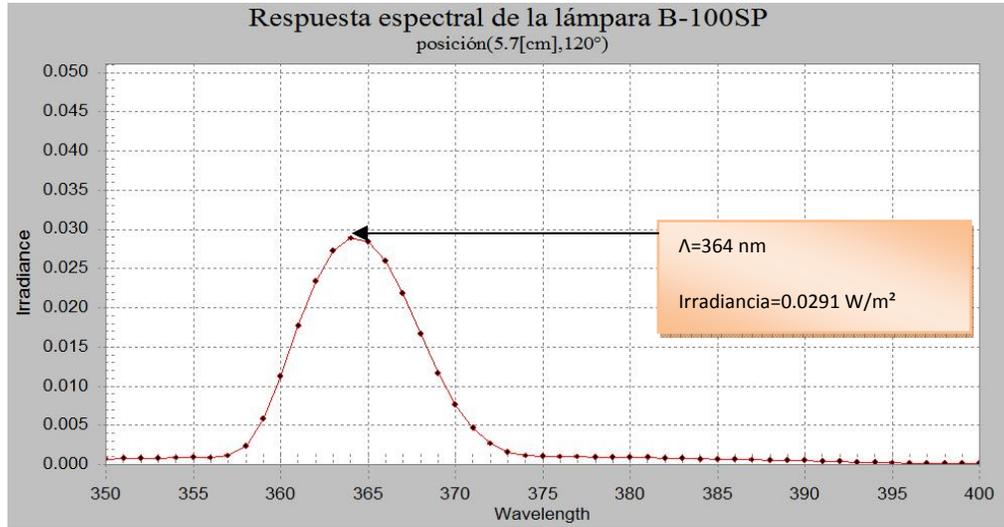


Figura 6.21. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la posición $r=5.7\text{ cm}$ y $\theta=160^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

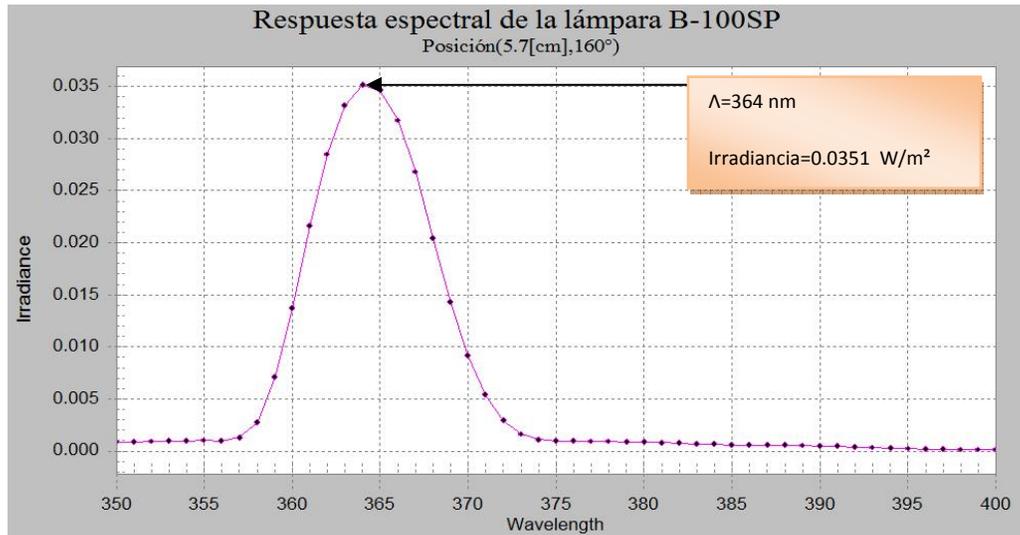


Figura 6.22. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0351 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.006137 W/m^2 .

En la posición $r=5.7\text{ cm}$ y $\theta=200^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

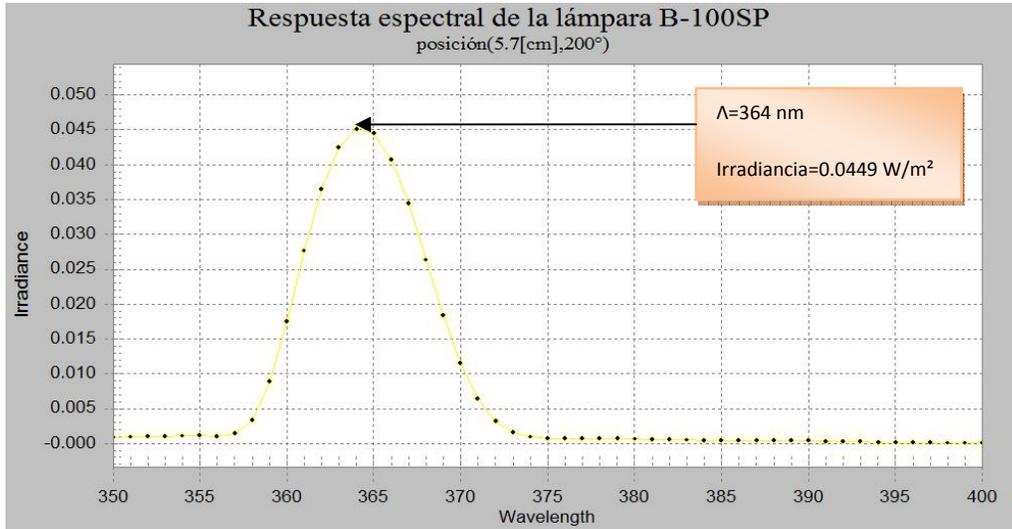


Figura 6.23. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0449 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.0074902 W/m^2 .

En la posición $r=5.7 \text{ cm}$ y $\theta=240^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

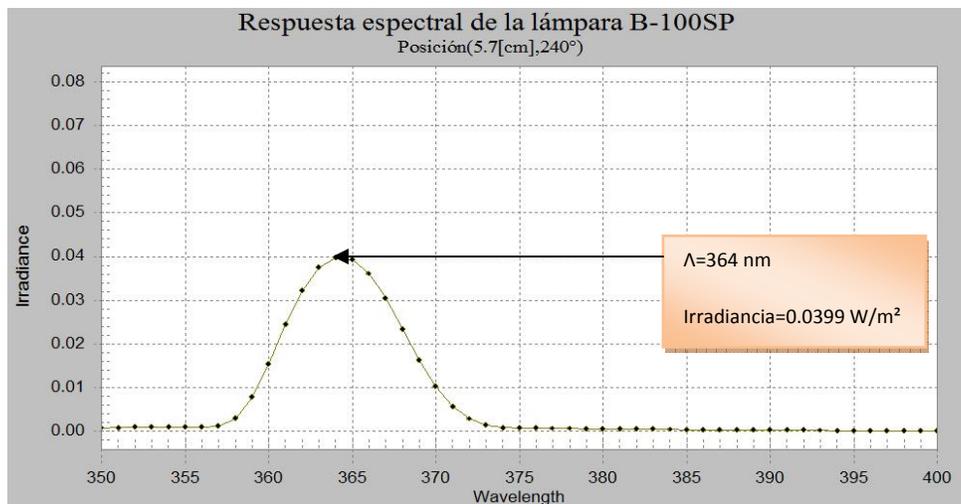


Figura 6.24. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0399 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.0066 W/m^2 .

En la posición $r= 5.7 \text{ cm}$ y $\theta=280^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

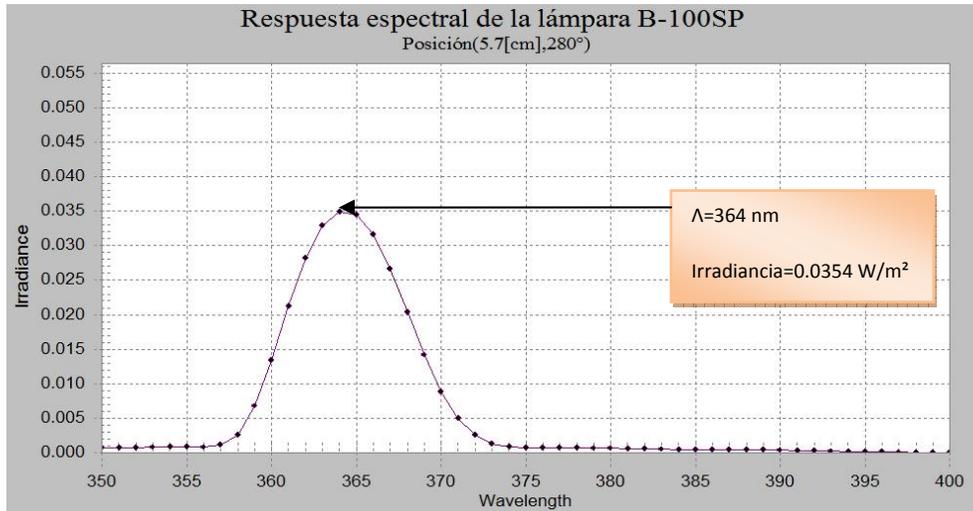


Figura 6.25. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.0354 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.00594 W/m^2 .

En la posición $r= 5.7 \text{ cm}$ y $\theta=320^\circ$, se obtuvo la siguiente respuesta espectral.

En la gráfica podemos observar que la Irradiancia máxima (0.065 W/m^2) se encuentra a una longitud de onda de 382 nm y la Irradiancia promedio de este espectro es de 0.02045 W/m^2 .

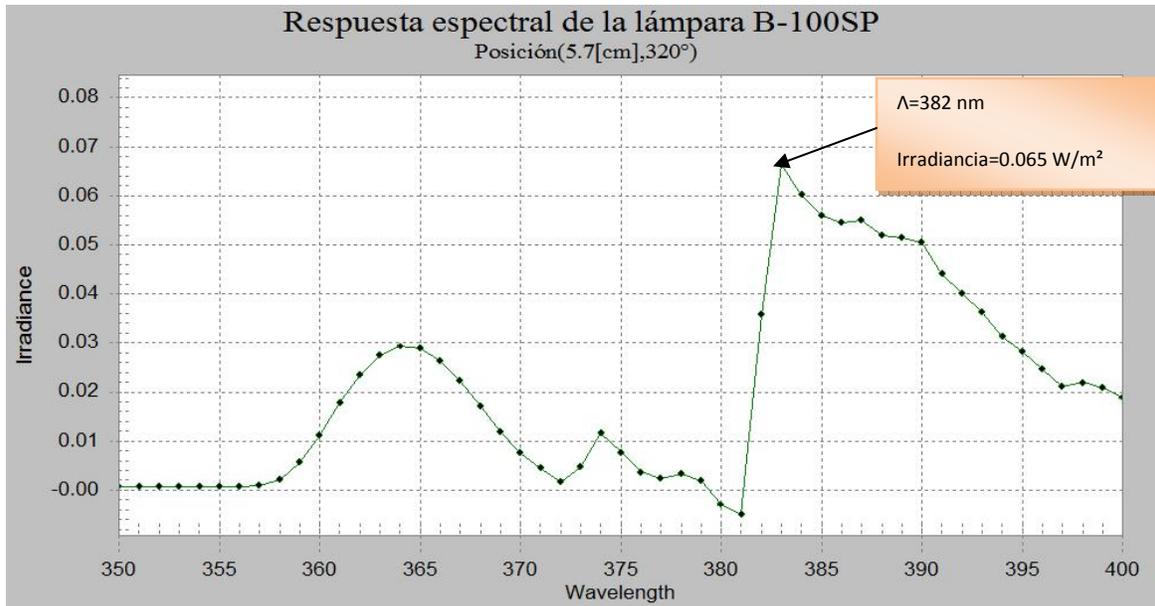


Figura 6.26. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.

Gráfica de todo el comportamiento en el círculo a 2.7 cm respecto del centro.

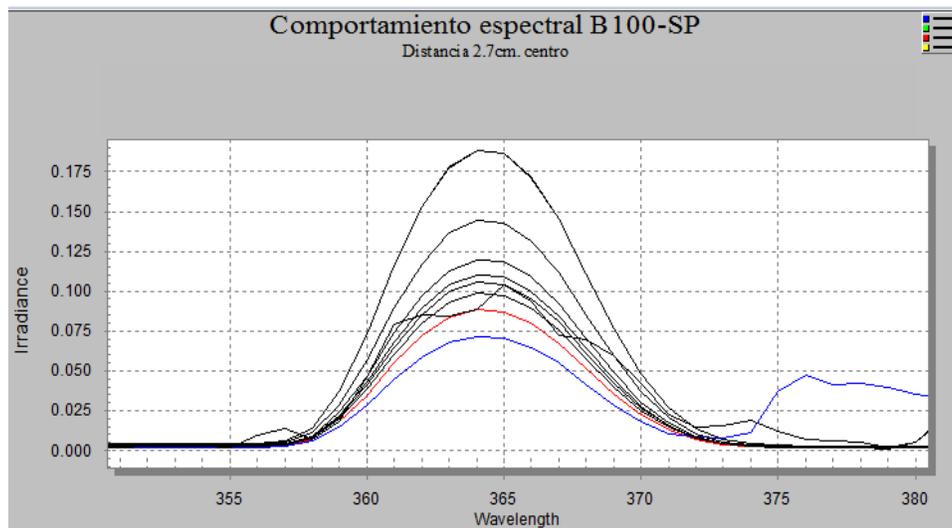


Figura 6.27. Gráficas del comportamiento espectral de la lámpara a 2.7 cm del centro.

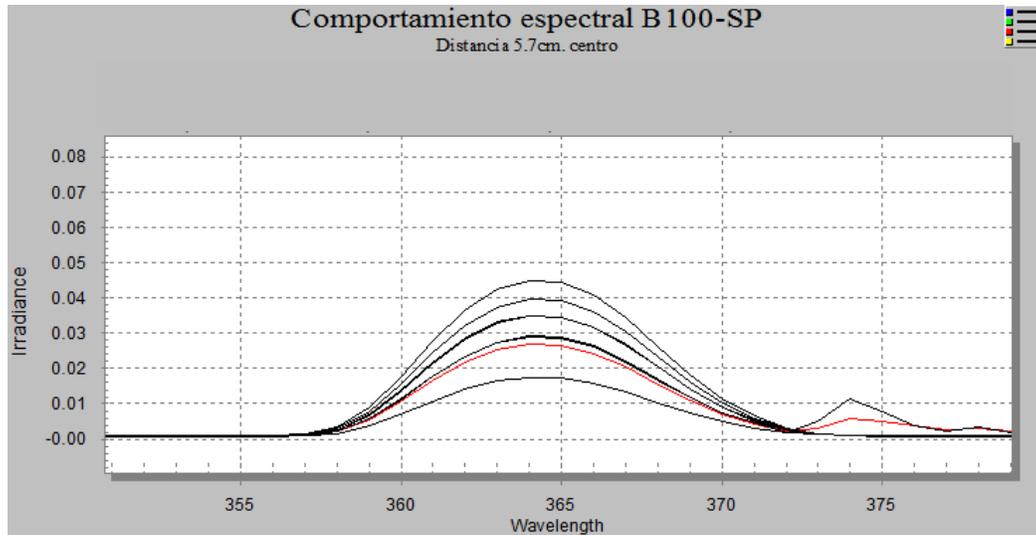


Figura 6.28. Gráficas del comportamiento espectral de la lámpara a 5.7 cm del centro.

Estudio de Irradiancia de diferentes medios.

El presente experimento se realizó utilizando el arreglo diseñado para el estudio espectral de la lámpara, y todas las mediciones se hicieron en el centro del arreglo, debido a que es el lugar con mayor densidad de flujo de energía de radiación espectral. El espectroradiómetro fue programado para tomar 10 muestras para cada superficie con un tiempo de integración de 1.08 seg. (Figura 6.29)

Se debe de recordar que la Irradiancia o densidad de flujo de energía de radiación, se define como la razón a la cual la energía de radiación es emitida o recibida por un objeto por unidad de tiempo y por unidad de área.

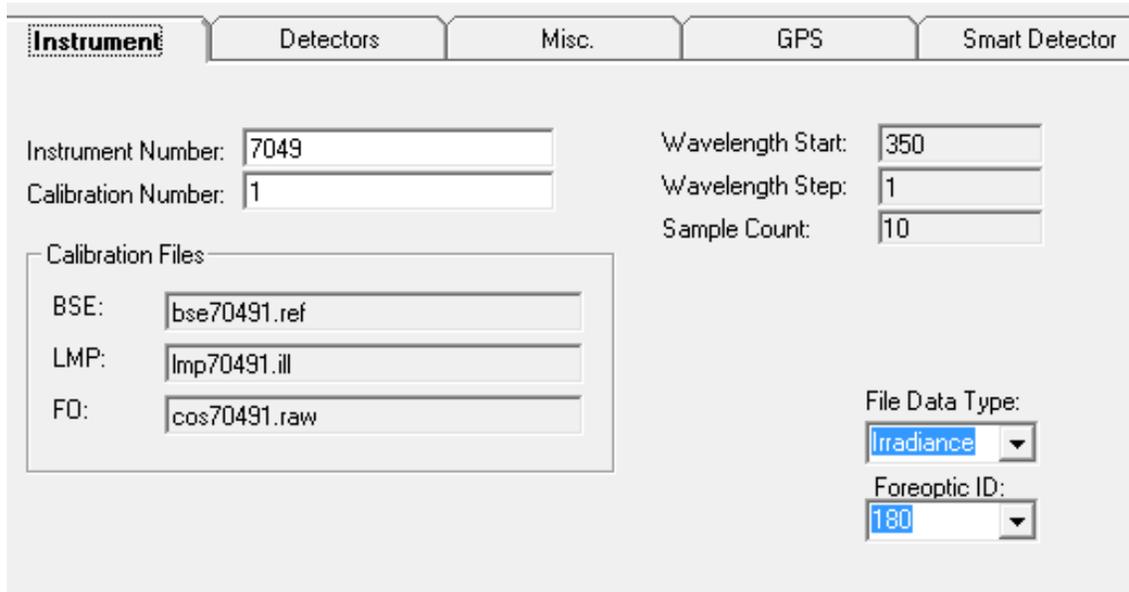


Figura. 6.29 Pantalla generada por View Spec Pro, en donde se muestran las condiciones en las cuales se generaron los datos.

El procesamiento de datos se realizó utilizando View Spec Pro.

Irradiancia Vidrio comercial

En la gráfica se puede observar que el vidrio comercial no absorbe radiación UV, éste permite el paso de toda la radiación UV emitida por la lámpara.

$$I_{m\acute{a}x_l\acute{a}mpara} = 0.2783 \text{ W/m}^2$$

$$I_{m\acute{a}x_vidrio_comercial} = 0.2769 \text{ W/m}^2$$

Irradiancia promedio del espectro de la lámpara= 0.05933 W/m²

Irradiancia promedio del espectro con vidrio comercial=0.05839 W/m²

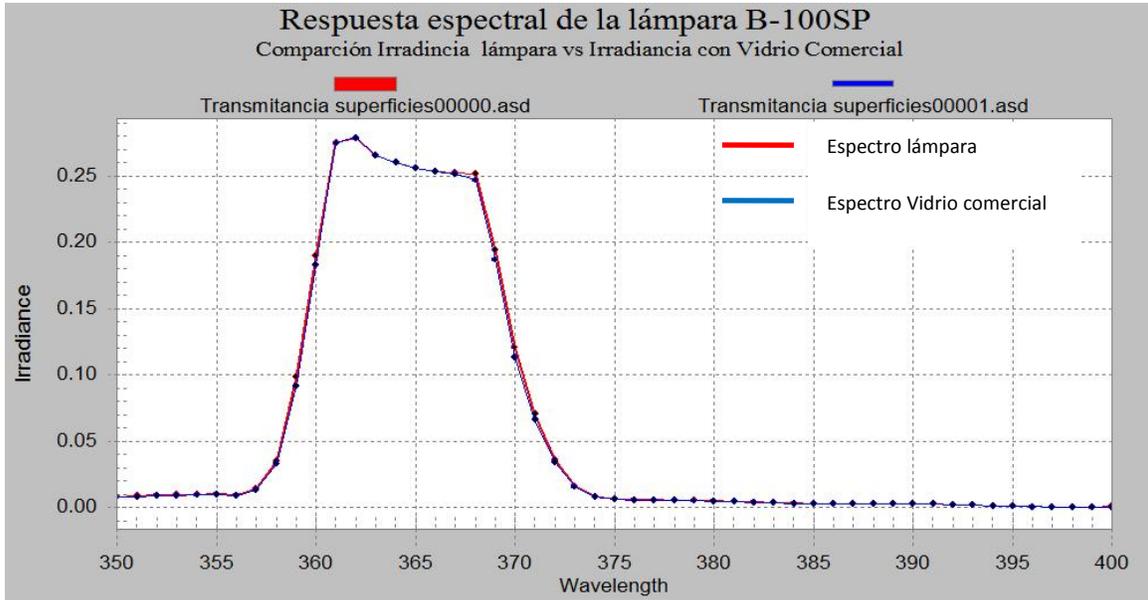


Figura. 6.30 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con vidrio comercial.

Irradiancia acrílico.

En la gráfica se puede observar que el acrílico prácticamente absorbe toda la radiación Ultra Violeta emitida por la lámpara.

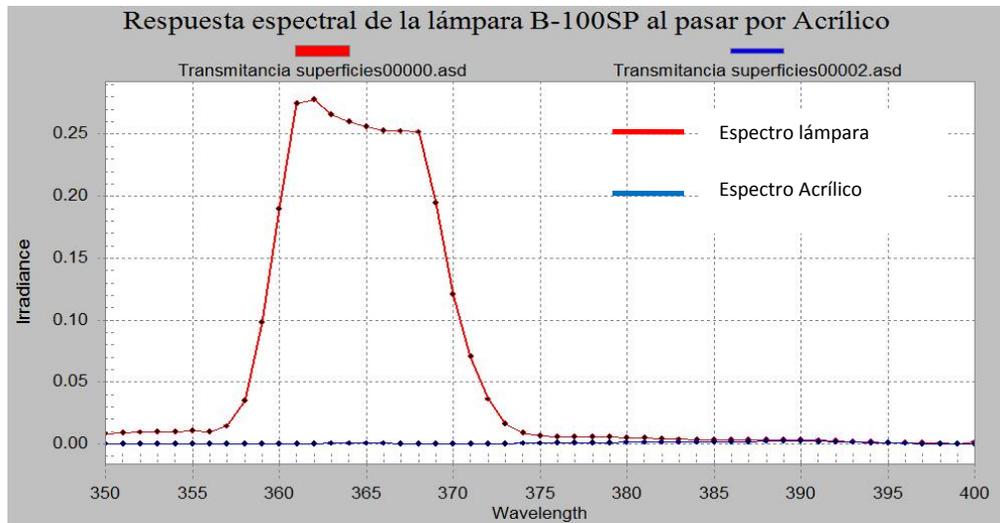


Figura. 6.31 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con acrílico.

Irradiancia Pilkington cara 1

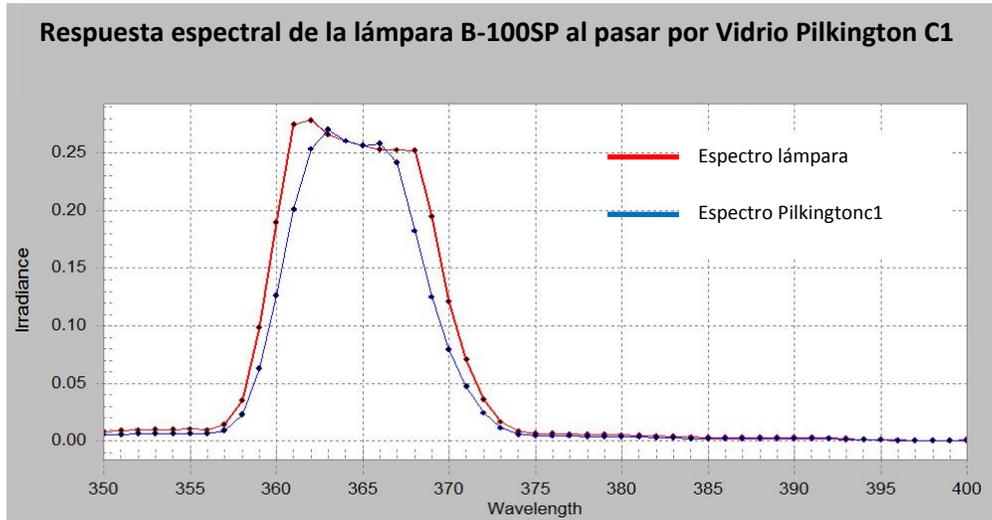


Figura. 6.32 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con vidrio Pilkington c1.

De la gráfica se obtiene que la irradiancia después de pasar por un medio como es el caso del vidrio Pilkington se tiene una $I_{m\acute{a}x_pilkingtonC1} = 0.2697 \text{ W/m}^2$ en una longitud de onda de 363 nm y la Irradiancia promedio del espectro emitido por la lámpara al pasar por este medio es de $I_{promedio} = 0.04968 \text{ W/m}^2$

Irradiancia Pilkington Cara 2.

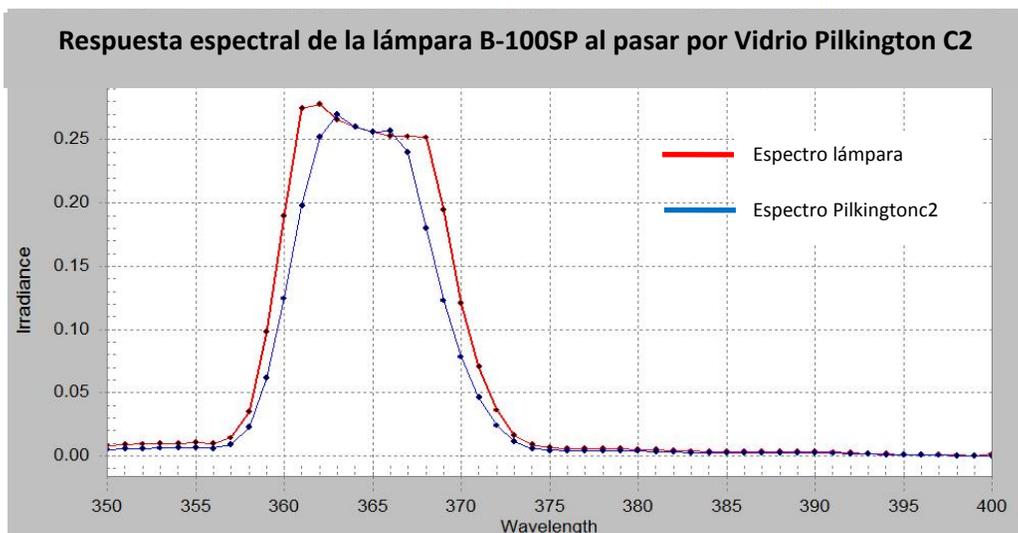


Figura. 6.33 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con vidrio Pilkington c2.

De la gráfica se obtiene que la irradiancia después de pasar por un medio como es el caso del vidrio Pilkington se tiene una $I_{m\acute{a}x_pilkingtonC2} = 0.2699 \text{ W/m}^2$ en una longitud de onda de 363 nm y la Irradiancia promedio del espectro emitido por la lámpara al pasar por este medio es de $I_{promedio} = 0.04968 \text{ W/m}^2$

Irradiancia esferas.

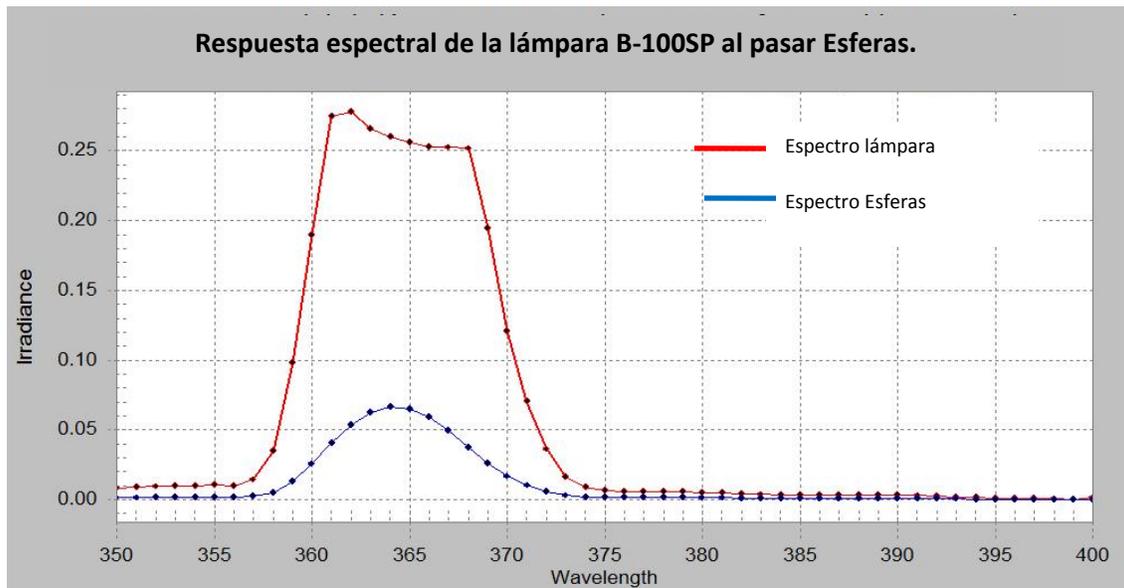


Figura. 6.34 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con esferas.

De la gráfica se obtiene que la irradiancia después de pasar por un medio como es el caso de las esferas recubiertas con TiO₂ se tiene una $I_{m\acute{a}x_esferas} = 0.0659 \text{ W/m}^2$ en una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio del espectro emitido por la lámpara al pasar por este medio es de $I_{promedio} = 0.01127 \text{ W/m}^2$

Irradiancia Pyrex.

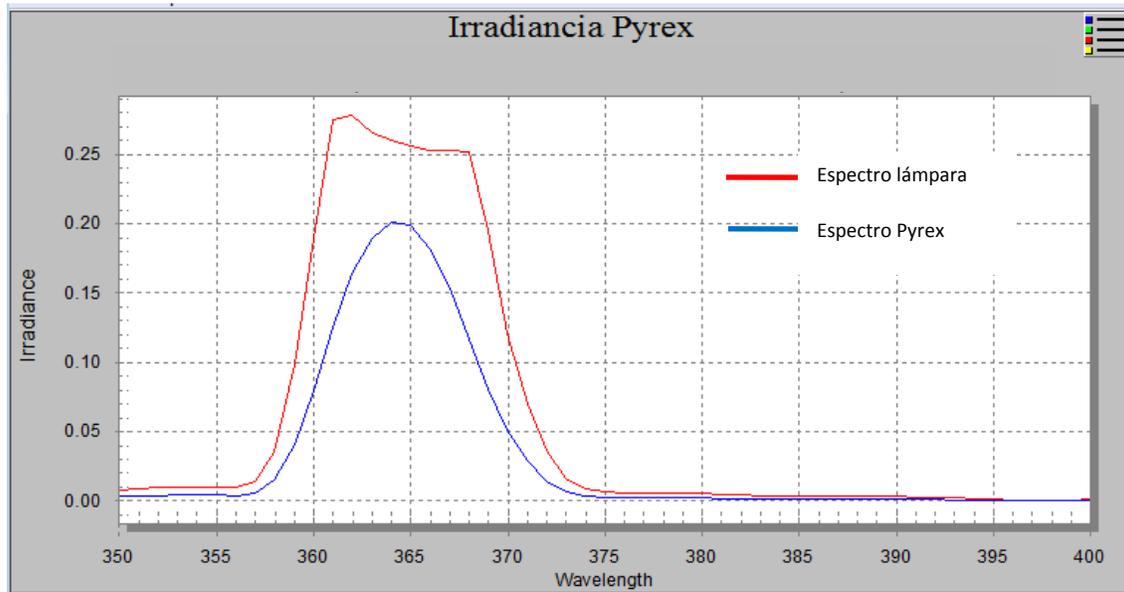


Figura. 6.35 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con Pyrex.

De la gráfica se obtiene que la irradiancia después de pasar por un medio como es el caso del Pyrex se tiene una $I_{m\acute{a}x_pyrex} = 0.2012 \text{ W/m}^2$ en una longitud de onda de 364 nm y la Irradiancia promedio del espectro emitido por la lámpara al pasar por este medio es de $I_{promedio} = 0.03368 \text{ W/m}^2$

Cálculo de la Transmitancia de cada superficie.

Ya teniendo los datos de irradiancia, se puede proceder a realizar el cálculo de la transmitancia. Esto se pensó en realizarlo en Excel pero dadas las facilidades de manejo se optó por usar una herramienta de simulación de MATLAB conocida como Simulink.

Es importante destacar que los datos para ser procesados en MATLAB primero se tienen que exportar como valores .csv, y ya que tengamos todas nuestras variables en este formato en MATLAB, procederemos a su respectiva simulación.

En Simulink se diseñó nuestro sistema de acuerdo al siguiente algoritmo:

- 1.-Generamos nuestras señales de irradiancia, tanto la patrón como la del material en estudio.
2. Se procede a realizar la integración de cada una de las funciones.
- 3.- Para obtener el valor patrón de la transmitancia de la lámpara expresada como porcentaje, se efectúa la división entre su mismo valor.
- 4.-Para obtener el valor de la transmitancia para cada superficie se efectúa la división del valor obtenido entre el valor de la transmitancia de la lámpara. Así, se logra que la transmitancia de cada superficie se pueda expresar como un porcentaje de la total emitida por la lámpara.

El porcentaje de transmisión se determinó como:

$$T = (T_t / T_o) 100$$

donde T_t es la transmitancia de las muestras al tiempo t de exposición en condiciones naturales o de laboratorio (en %) y T_o la transmitancia inicial de las mismas sin exponer (en %).

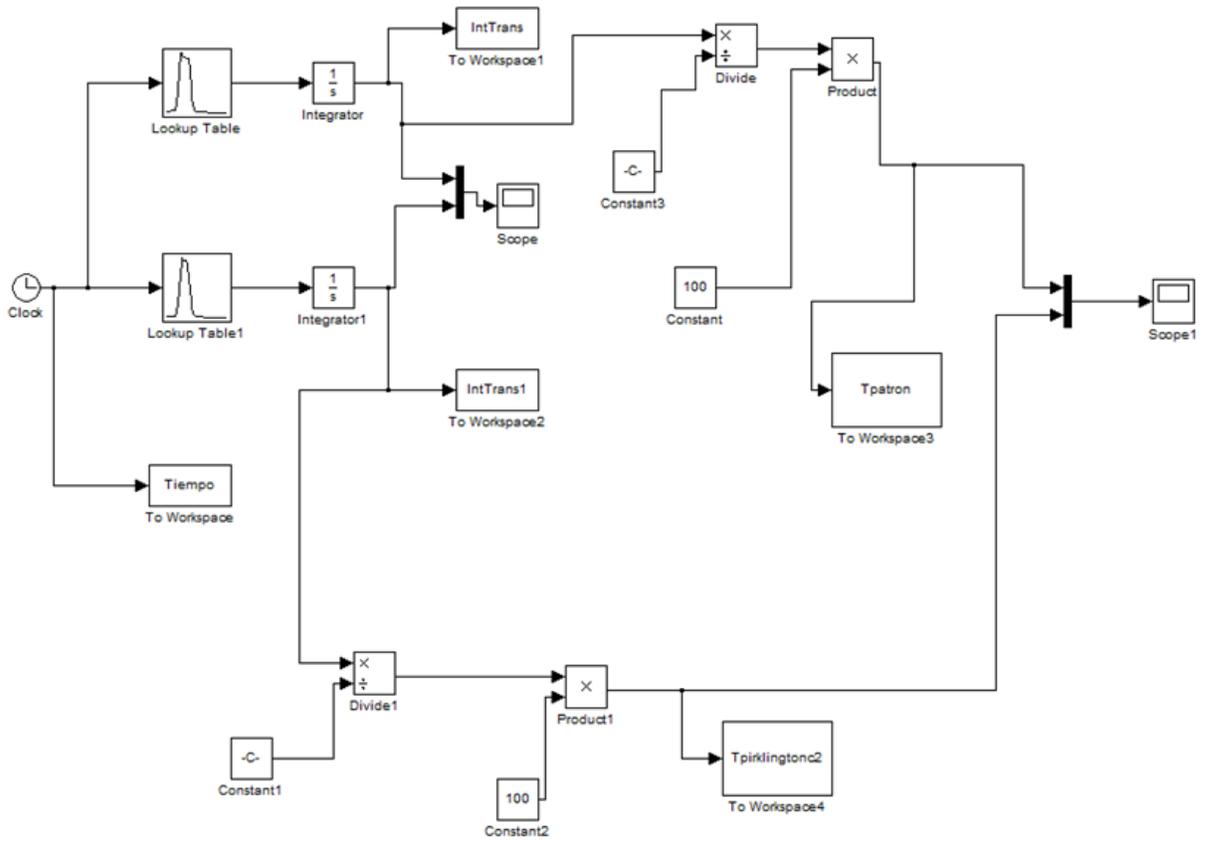


Figura 6.34. Diagrama diseñado con Simulink

Transmitancia Vidrio Comercial.

La muestra de este material es del tipo comercial y cuenta con un espesor de 0.4 cm

En la gráfica se puede observar que el Vidrio comercial prácticamente se traslapa a la transmitancia de la lámpara emitida sin ningún medio que absorba ésta. La transmitancia para el vidrio comercial es %T=100

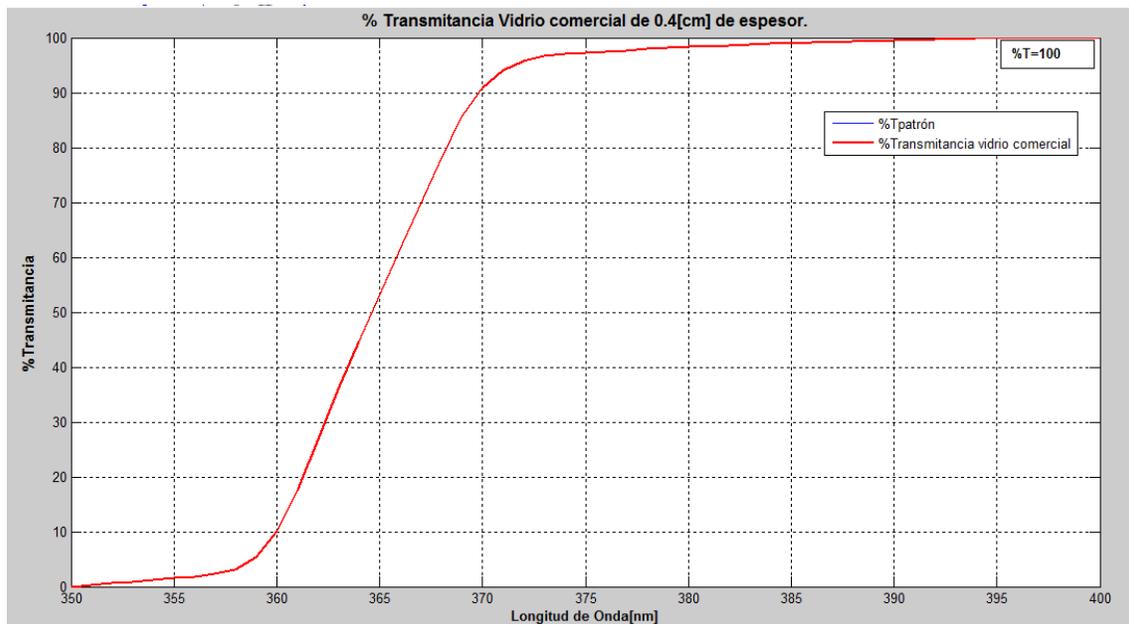


Figura 6.35. Comportamiento de la Transmitancia del vidrio comercial.

Transmitancia Acrílico.

La muestra de acrílico que se tomó para este estudio es del tipo comercial y cuenta con un espesor de 0.4 cm

En la gráfica se observa claramente que este acrílico funciona como un inhibidor de la radiación ultravioleta, ya que sólo es transparente en un 0.9598%.

“Transmitancia de la Radiación Ultravioleta en diferentes medios para su aplicación en proyectos de Energía Solar.”

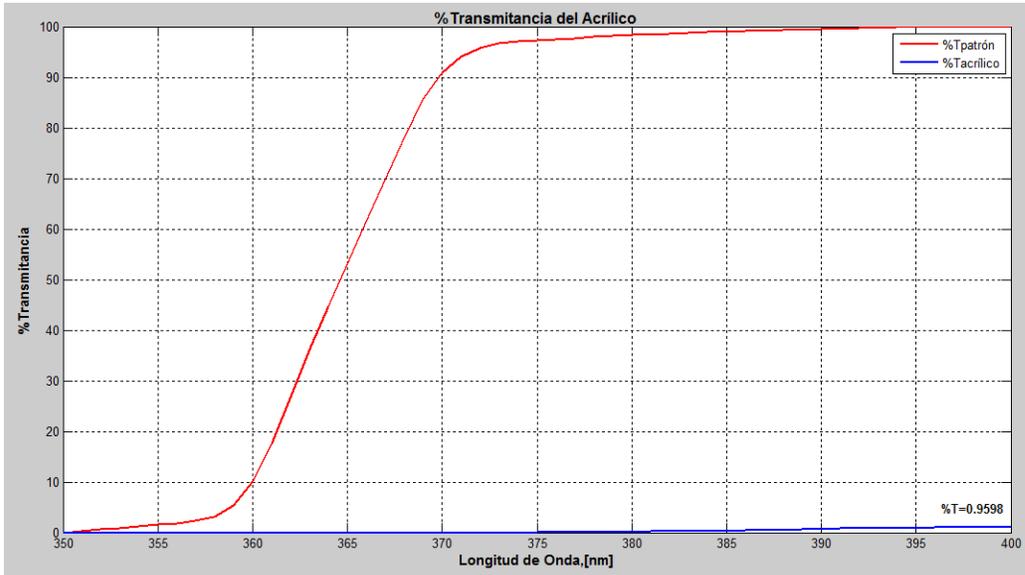


Figura 6.36. Comportamiento de la Transmitancia del acrílico.

Transmitancia Pyrex.

Las pruebas de transmitancia fueron realizadas sobre un vaso de precipitados que tiene un espesor de 0.35 cm

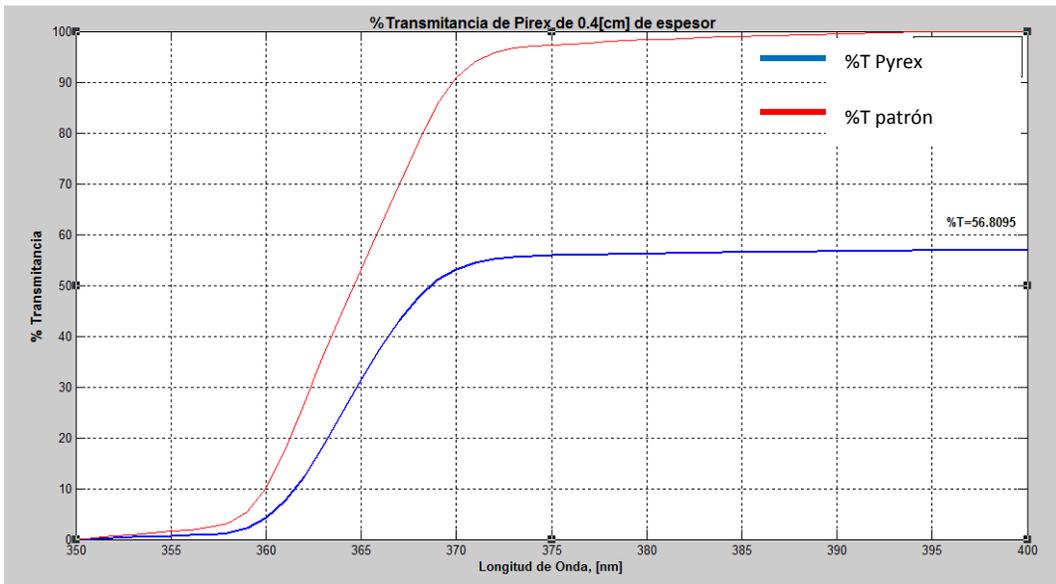


Figura 6.37. Comportamiento de la Transmitancia del Pyrex.

Transmitancia Esferas.

Estas esferas que serán con Dióxido de Titanio, serán introducidas en los fotoreactores para descontaminar el agua. Éstas presentaron una transmitancia baja ya que solo es de %T=19.0131.

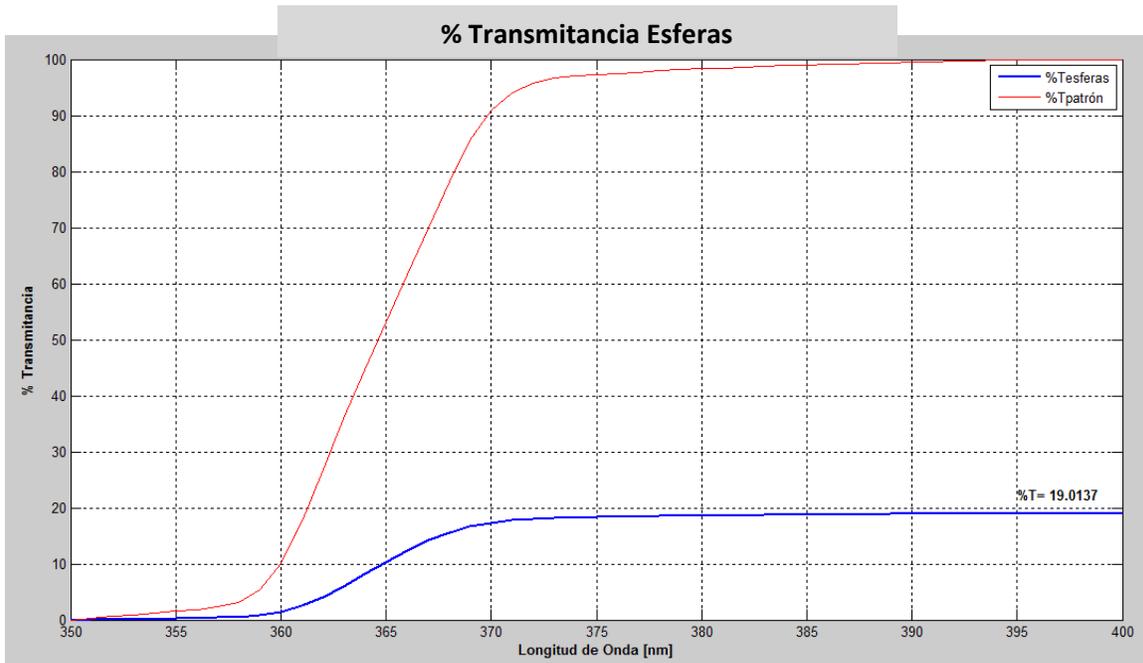


Figura 6.38. Comportamiento de la Transmitancia de las esferas.

Transmitancia vidrio Pilkington.

Este tipo de vidrio tiene características de ser autolimpiable, debido al recubrimiento de TiO₂ que posee. Se realizó el estudio de transmitancia tanto en la cara recubierta con el TiO₂ así como en la que no lo tiene; esto, con el objetivo de saber cuál será su comportamiento como principal material para la construcción de fotoreactores a la hora de ser sometido a radiación ultra violeta.

Como se puede ver en las gráficas la superficie que contiene TiO₂ no tiene grandes variaciones en su transmitancia respecto a la que no lo tiene. Ya que la transmitancia de la superficie recubierta con TiO₂ es de %T=83.18, mientras que para la que no cuenta con esta superficie es de %T=83.78

Cara1 No recubierta con TiO2

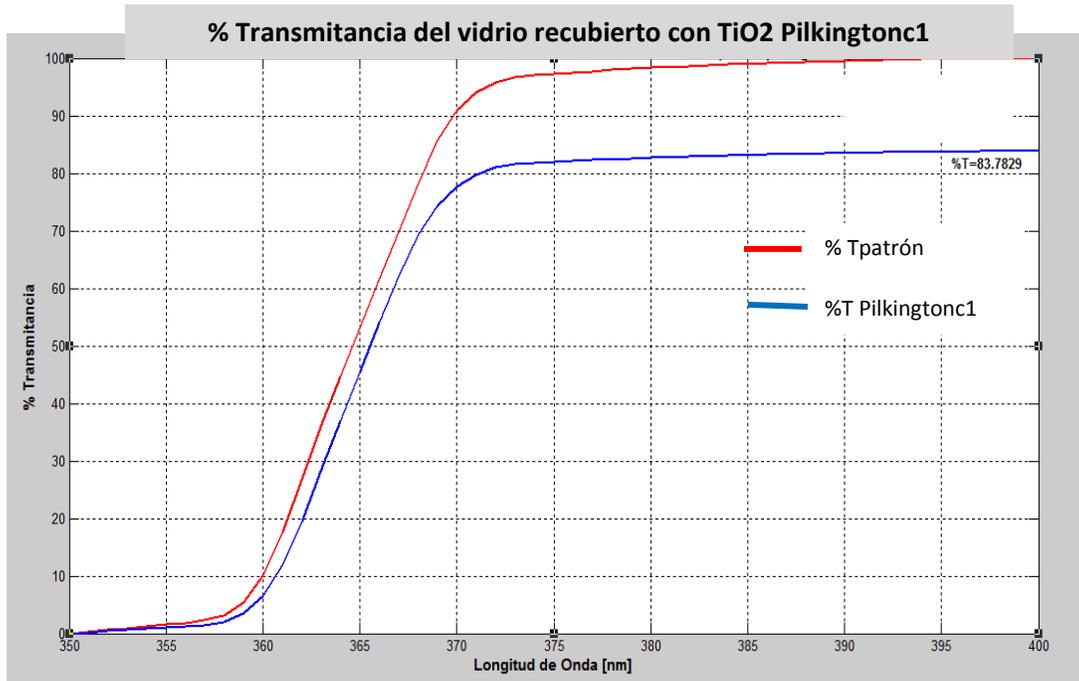


Figura 6.39. Comportamiento de la Transmitancia del vidrio Pilkington cara 1.

Cara2 Recubierta con TiO2

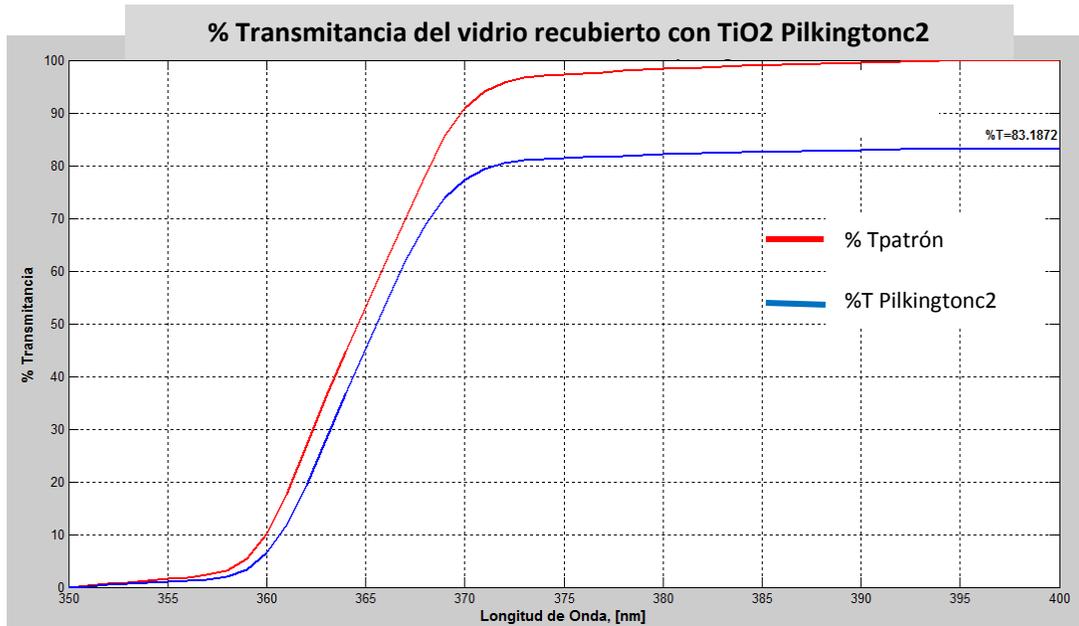


Figura 6.40. Comportamiento de la Transmitancia del vidrio Pilkington cara 2.

Con esta herramienta pudimos tener los parámetros suficientes para la construcción de la siguiente gráfica

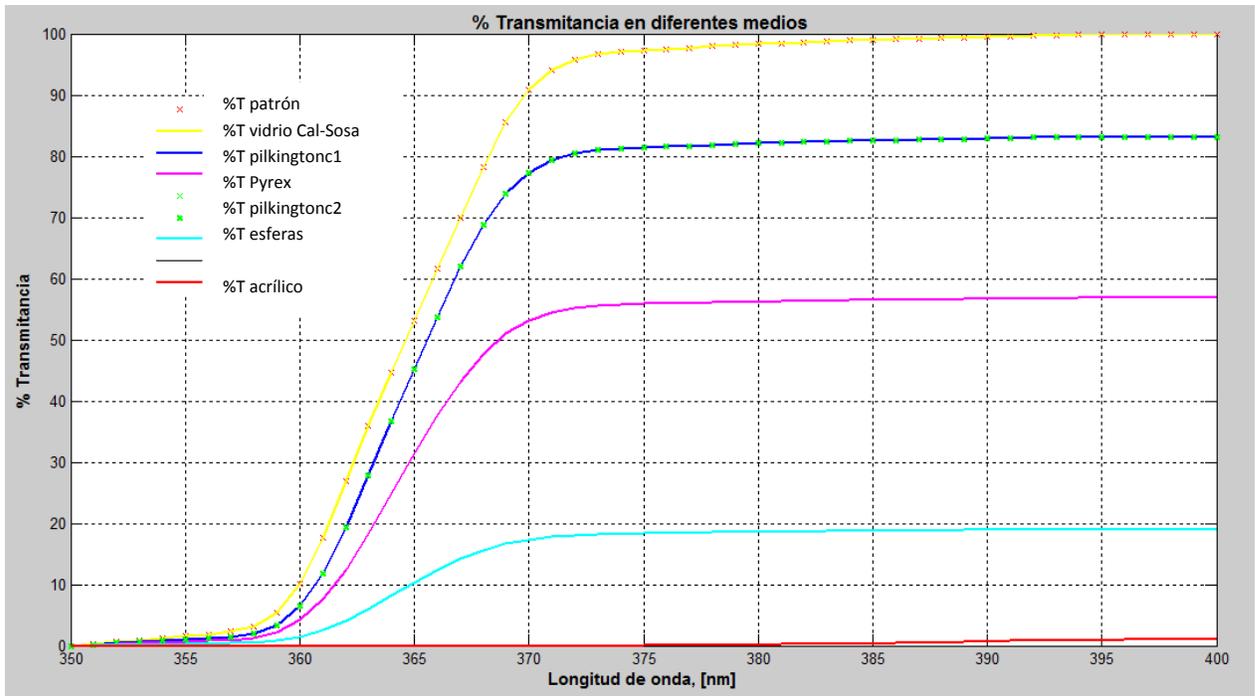


Figura 6.41. Transmitancia en diferentes medios.

Tablas de Resultados

Espectro de Emisión de la lámpara B-SP100

1.1 Centro de la lámpara.

$\theta_{posición}$	$\lambda_{I_{máx}}$ [nm]	$I_{máx}$ [W/m ²]	$\tilde{I}_{espectral_promedio}$ [W/m ²]
centro	362	0.278	0.0722

1.2 Posición r=2.7 cm

$\theta_{posición}$ [0°]	$\lambda_{I_{máx}}$ [nm]	$I_{máx}$ [W/m ²]	$\tilde{I}_{espectral_promedio}$ [W/m ²]
0	364	0.0885	0.0157
40	364	0.0720	0.02475
80	365	0.1035	0.02745
120	364	0.1890	0.03182
160	364	0.1893	0.03188
200	364	0.1456	0.02449
240	364	0.1198	0.02033
280	364	0.1101	0.02227
320	364	0.1058	0.01789
360	364	0.0988	0.01674

1.3 Posición r=5.7 cm

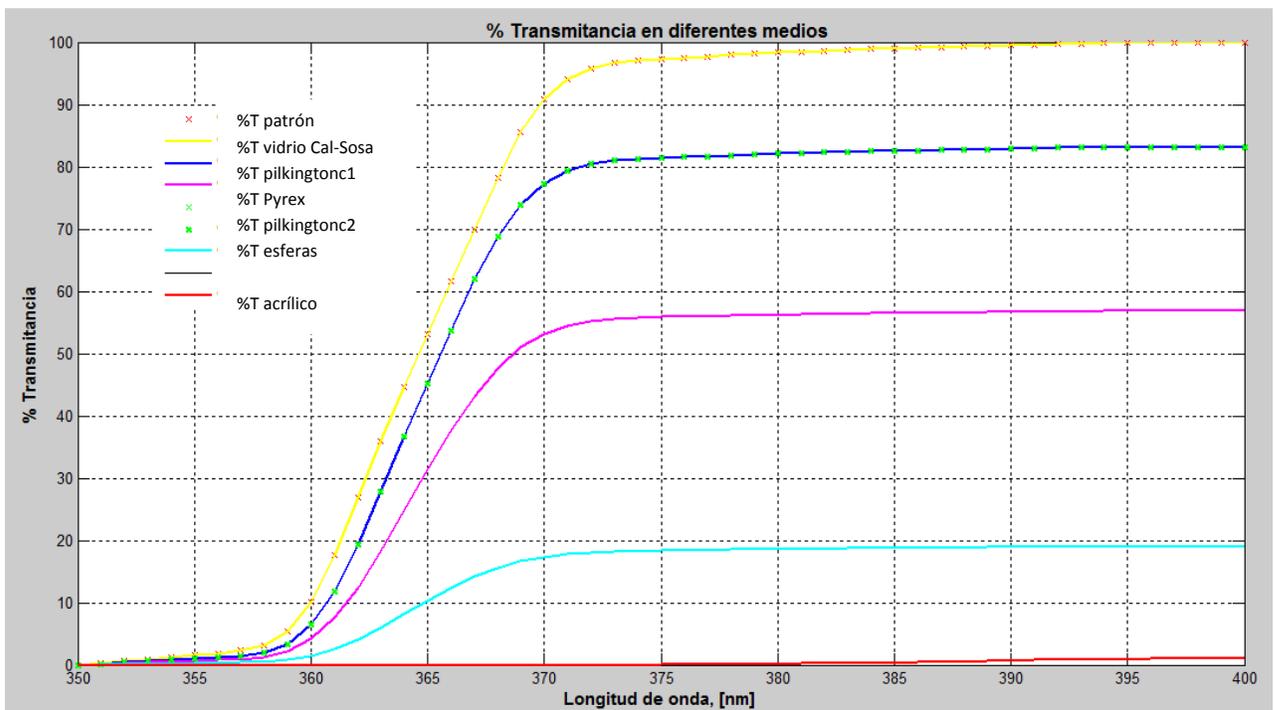
$\theta_{posición} [0^\circ]$	$\lambda_{I_{máx}} [nm]$	$I_{máx} [W/m^2]$	$\tilde{I}_{espectral_promedio} [W/m^2]$
0	364	0.0273	0.01017
40	364	0.0176	0.003352
80	365	0.0176	0.0051
120	364	0.0291	0.005158
160	364	0.0351	0.006137
200	364	0.0449	0.0074902
240	364	0.0399	0.0066
280	364	0.0354	0.00594
320	364	0.0296	0.02045

1.4 Tabla de resultados Irradiancia

Medio	Espesor cm	$\lambda_{I_{máx}} [nm]$	$I_{máx} [W/m^2]$	$\tilde{I}_{espectral_promedio} [W/m^2]$
	-----	362	0.2783	0.05933
Vidrio	0.4	362	0.2769	0.05839
Acrílico	0.4	-----	-----	-----
PilkingtonC1	0.42	363	0.2697	0.04968
PilkingtonC2	0.42	363	0.2699	0.04968
Esferas	1.1	364	0.0659	0.01127
Pyrex	0.35	364	0.2012	0.03368

1.5 Tabla de Resultados Transmitancia

Medio	Espesor cm	%Transmitancia
Patrón	-----	100
Vidrio comercial	0.4	100
Acrílico	0.4	0.9598
Pyrex	0.35	56.8095
Esferas	1.1	19.0131
PilkingtonC1	0.42	83.7829
PilkingtonC2	0.42	83.1872



Conclusiones.

Con el presente trabajo de tesis se logró definir el patrón de radiación emitido por la lámpara B-100SP de UVP (Ultra Violet Products). Esto permitirá diseñar un arreglo de las lámparas más eficiente para los fotoreactores. El resultado espectral de la lámpara muestra que el nivel de irradiancia máximo ($I_{m\acute{a}x}$) está en el centro de la lámpara siendo un valor de $I_{m\acute{a}x} = 0.278 \text{ W/m}^2$ a una longitud de onda de 362 nm.

También se pudo comprobar experimentalmente que el patrón de emisión radiométrico de la lámpara depende de la posición debido al ángulo de incidencia.

Se puede decir que este tipo de lámparas tiende a ser puntual debido a la atenuación de su potencia al variar la distancia respecto del centro de ésta. Sin embargo mediante un arreglo de varias lámparas el nivel de potencia de éstas puede ser amplificado notablemente.

El estudio de Irradiancia en diferentes medios, nos permite darnos cuenta de la variación de la atenuación espectral de la fuente de radiación ultravioleta, al pasar por determinados medios. En la tabla de resultados 1.4 se observa que la mayor irradiancia se encuentra en el rango de 362-364 nm de longitud de onda.

Se puede concluir que en el caso del acrílico, éste actúa como un inhibidor para la radiación de longitud de onda de 350-400 nm.

En la tabla 1.4 también se observa que los vidrios recubiertos con TiO₂ (Pilkington) tienen el mismo comportamiento espectral tanto en la cara recubierta con TiO₂ así como la cara que no la contiene.

Con el estudio de la transmitancia es más fácil entender el comportamiento espectral de la irradiancia, debido a que es más comprensible tener datos en porcentaje que valores espectrales.

En la tabla de resultados 1.5, se pueden observar los resultados obtenidos del estudio de la transmitancia para diferentes medios. Por lo tanto, podemos concluir que el vidrio comercial (Vidrio- Cal-Sosa) es totalmente transparente al espectro de radiación ultravioleta de longitud de onda entre 350-400 nm, esto puede ser debido a sus bajas concentraciones de hierro. El acrílico tiene una la más baja transmitancia de los materiales estudiados, con un valor de 0.9598 %, lo que lo hace prácticamente opaco a la radiación ultravioleta. El Pyrex registró una transmitancia intermedia con 56.895 %. Las esferas tiene una baja transmitancia con un valor de 19.0131 %, mientras que los vidrios Pilkington en ambas caras presentan un transmitancia similar del orden de 83.7829-83.1872 %.

Recomendaciones.

El obtener el espectro de radiación de la lámpara nos permite diseñar un arreglo de lámparas tal que se logre concentrar en un punto una irradiancia mayor.

La distancia de la lámpara a la superficie nunca debe ser mayor a 10 cm ni menor a ésta, ya que esto afecta el espectro de radiación emitido por la lámpara a través de los medios.

Para la protección de la radiación ultravioleta en el rango de 350-400 nm se pueden construir caretas con el acrílico aprovechando su propiedad de inhibidor del ultravioleta, también estas películas pueden ser un buen material para aislar los fotoreactores que funcionen con este tipo de lámpara.

ÍNDICE FIGURAS

Capítulo I

Figura 1.1 Comportamiento ondulatorio de la radiación electromagnético.....	6
Figura 1.2.1 División del Espectro electromagnético, de acuerdo a su nivel de energía y a su longitud de onda.....	8

Capítulo II

Figura 2.1 Coordenadas locales y las coordenadas geocéntricas del Sol son origen común en la tierra	19
Figura 2.2.1 Funcionamiento de una lámpara de descarga.....	20
Figura 2.2.2 Diagrama de funcionamiento de una lámpara de mercurio	23
Figura 2.2.3 Conexiones de una lámpara de mercurio.....	24
Figura 2.3.1. Lentes y careta para el manejo de radiación ultravioleta.....	26

Capítulo IV

Figura 4.1 Espectroradiómetro con esfera integrada tipo coseno receptor (Spectroradiometry methods by Optronic laboratories).....	33
Figura 4.2 El prisma como elemento de dispersión.....	34
Figura 4.3 Esquema del funcionamiento de un tubo foto multiplicador.....	35
Figura 4.2.1 Espectroradiómetro Fiel Spec Pro (Analytical Spectral Devices).....	36

Capítulo V

Figura 5.1 Diagrama de líneas de reblandecimiento.....	40
Figura 5.2 Ley de Snell.....	43

Figura 5.2.1. Comportamiento de la Transmitancia de 4 diferentes tipos de vidrios “no absorbedores”	44
Figura 5.2.2 Variación de la transmitancia respecto al ángulo de incidencia	46
Figura 5.3.1 Transmitancia de diferentes vidrios al variar su composición de Fierro	47
Figura 5.3.2 Transmitancia espectral en el infrarrojo de la película Fluoruro de Polivinilo.....	49

Capítulo VI

Figura 6.1 Fotos del montaje experimental instalado en el Instituto de Geofísica UNAM.....	50
Figura 6.2. Pantalla de operación de RS ³	52
Figura 6.4 Montaje experimental Instalado en el Laboratorio de Energías Renovables del Instituto de Ingeniería.....	54
Figura 6.5. RS3, pantalla de inicio.....	55
Figura 6.6 Venta de aplicación de RS ³	56
Figura 6.7. Comportamiento espectral de la lámpara B-100SP, utilizando View Spec Pro.....	58
6.8. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP , círculo 2.7 cm posición 0°.....	59
Figura 6.9. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	60
Figura 6.10. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	61
Figura 6.11. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	61

Figura 6.12. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	62
Figura 6.13. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	63
Figura 6.14. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP	63
Figura 6.15. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	64
Figura 6.16. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	65
Figura 6.17. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	65
Figura 6.18. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	66
Figura 6.19. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	66
Figura 6.20. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	67
Figura 6.21. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	68
Figura 6.22. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	68
Figura 6.23. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	69
Figura 6.24. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	69
Figura 6.25. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	70
Figura 6.26. Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	71
Figura 6.27. Gráficas del comportamiento espectral de la lámpara a 2.7 cm del centro.....	71
Figura 6.28. Gráficas del comportamiento espectral de la lámpara a 5.7 cm del centro.....	72
Figura. 6.29 Pantalla generada por View Spec Pro, en donde se muestran las condiciones en las cuales se generaron los datos.....	73
Figura. 6.30 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con vidrio comercial.....	74

Figura. 6.31 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con acrílico.....	74
Figura. 6.32 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con vidrio Pilkington c1.....	75
Figura. 6.33 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con vidrio Pilkington c2.....	75
Figura. 6.34 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con esferas.....	76
Figura. 6.35 Comparación Irradiancia lámpara vs Irradiancia con Pyrex.....	77
Figura 6.34. Diagrama diseñado con Simulink.....	79
Figura 6.35. Comportamiento de la Transmitancia del vidrio comercial.....	80
Figura 6.36. Comportamiento de la Transmitancia del acrílico.....	81
Figura 6.37. Comportamiento de la Transmitancia del Pyrex.....	81
Figura 6.38. Comportamiento de la Transmitancia de las esferas.....	82
Figura 6.39. Comportamiento de la Transmitancia del vidrio Pilkington cara 1.....	83
Figura 6.40. Comportamiento de la Transmitancia del vidrio Pilkington cara 2.....	83
Figura 6.41. Transmitancia en diferentes medios.....	84

ÍNDICE DE TABLAS.

Capítulo I

Tabla 1.2 División del espectro electromagnético realizada por *Joint Committe para la Espectroscopia Aplicada.....	9
Tabla 1.4.1 Clasificación de la radiación ultravioleta de acuerdo al segundo congreso de la luz, agosto de 1932.....	12

Capítulo II

Tabla 2.2.1 Eficiencias de acuerdo al tipo de lámpara.....	22
--	----

Capítulo V

Tabla 5.2 Índice de refracción de algunos materiales.....	45
---	----

Capítulo VI

Tabla 6.1 Respuesta espectral de la lámpara B-100SP.....	58
Tablas de Resultados	85

Referencias

- [1] Diffey, Brian L. “Sources and measurements of ultraviolet radiation” *Journal Methods* No. 28, 2002, 4-12
- [2] Basalud Cruz Roberto, “Determinación de emisiones de SO₂ y NO₂ en fuentes puntuales por espectroscopia pasiva de radiación UV” Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, 2005, 39-42
- [3] Mulhia Agustín, “Apuntes de Solarimetría”, 2008.
- [4] Jones Lydia, “Ultraviolet light”, G.A. Colditz et al. (eds.), *Cancer Prevention: The Causes and Prevention of Cancer- Volume I*, pp 111-122, 2003.
- [5] Cockell Charles, “The Ultraviolet History of the terrestrial planets-implication for biological evolution”, *Journal Planetary and Science* 48(2000) 203-214.
- [6] Thermo Spectronic, “Concepts and Applications” , Manual Basic-Vis theory.
- [7] MECASYS, CO. UV/VIS Spectrophotometric Applications. Manual
- [8] Schneider William, “A guide to Photometry and Visible Spectroradiometry”, Application Note (A14), 1998.
- [9] Blumthaler M. “Human solar ultraviolet radiant exposure in high mountains”, *Journal of Atmospheric Environment* Vol.22, No4 pp 749-753, 1988
- [10] Imoberdorf Gustavo E. “Radiation field modeling of multi-lamp homogeneous photo reactors”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*; 198 (2008)169- 178.
- [11] T.C. Chang, “The fate and management of high mercury- containing lamps from high technology industry”, *Journal of Hazardous Materials* 141 (2007) 784-792 .
- [12] Heisler Gordon M., “Individual and scattered tree influences on ultraviolet irradiance”, *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 120(2003)113-126.

- [13] Jang Min, “Characterization and recovery of mercury from spent fluorescent lamps”, Journal of Waste Management 25(2005)5-14.
- [14] Optronic laboratories, Application Note Discrepancies Associated with using UVA and UVB Meters to measure output of sunlight, solar simulators.
- [15] Diffey Brian, “Ultraviolet radiation Dosimetry”, Manual Optronic Laboratories 1998
- [16] Ultraviolet Irradiance and Radiance Standar.
- [17] Tuchinda Chanisada, “Photo protection by window glasses, automobile glass, and sun glasses” J Am Acad. Dermatol(2006) 846-853.
- [18] Salmang Herman, “Fundamentos físicos y químicos de la fabricación del vidrio”. Aguilar (Ed.) 1962.
- [19] Chavez- Galan Jesus, Almanza Rafael, “Solar filters based on iron oxides used as efficient windows for energy savings” Journal of Solar Energy (2007), Vol. 81, 13-19 .
- [20] Analytical Spectral Devices, User’s Guide Field Spec Pro.
- [21] Curtiss Brian, Field Spectrometry Techniques and Instrumentation.
- [22] Beal Dave, “Wavelength and Radiometric Calibration Methods”.
- [23] Beckman Duffie, “Solar Engineering of Thermal Processes”. 1991
- [24] Manual de operación lámparas UVP.
- [25] Floyd Linton, “Solar Ultraviolet irradiance Origins, Measurements and Models” Interferometrics Inc. J.P. Rozelot (Ed): LNP599, pp. 109-128, 2003
- [26] Navntoft C. “A methodology for assessing UV-A (315-400nm) irradiance and irradiation estimation from measurements at 380 nm for environmental solar energy applications”, Journal Solar Energy (2008).