



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

CARACTERIZACIÓN DE UN SIMULADOR SOLAR

TESIS RECEPCIONAL

Para obtener el Grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

GREGORIO MARTÍN CANALES BE

DIRECTOR DE TESIS

M.C. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

Chetumal, Quintana Roo, Diciembre 2004

043743



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
División de Ciencias e Ingeniería

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ

Director: M.C. Freddy Ignacio Chan Puc

Asesor: M.E.S. Roberto Acosta Olea

Asesor: Dr. Vicente Flores Lara

Chetumal, Quintana Roo, Diciembre de 2004

AGRADEZCO

Al M.E.S. **Roberto Acosta Olea** por la asesoría y apoyo brindado.

Al Dr. **Vicente flores Lara** por su confianza y apoyo.

Al DR. **Omar Yam Gamboa** por su confianza y apoyo brindado.

En especial al M.C. **Freddy Ignacio Chan Puc** por involucrarme en este proyecto que me ha dado grandes satisfacciones, por la confianza y facilidades que me brindó.

A todos mis compañeros de generación

A todo el personal académico y administrativo de la División de Ciencias e Ingenierías.

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a todos aquellos que de una u otra manera influyeron en la decisión de superarme. También a los maestros y que me dieron los conocimientos y me motivaron a llevar a feliz termino este proyecto.

A mi familia en especial por su comprensión y apoyo incondicional por que efectuaron un esfuerzo muy grande para cumplir con la meta que me propuse.

gracias

CONTENIDO

Simbología	I
Lista de Figuras	II
Lista de Tablas	III
Resumen.	1
Capítulo 1.- Conceptos básicos de Iluminación	3
1.1. Introducción.	3
1.2. Iluminación natural.	3
1.2.1. Distribución espectral.	4
1.2.2. La energía solar.	5
1.3. Iluminación artificial.	5
1.4. Lámpara incandescente.	6
1.5. Lámparas incandescentes no halógenas.	8
1.6. Lámparas incandescentes halógenas de alta y baja tensión.	9
1.7. Lámparas de descarga.	9
1.7.1. Funcionamiento.	10
1.7.2. Eficiencia.	11
1.7.3. Características cromáticas.	12
1.7.4. Componentes de una lámpara de descarga.	12
1.7.5. Clases de lámparas de descarga.	13
1.8. Clasificación de las lámparas de acuerdo a sus características ópticas.	14
1.9. Clasificación de las lámparas de acuerdo a sus características mecánicas.	15
1.10. Clasificación de las lámparas de acuerdo a sus características eléctricas.	16
1.11. Otras clasificaciones.	16
1.12. Comparativo de características.	16

Capítulo 2.- Diseño del simulador solar	17
2.1. Introducción.	17
2.2. Antecedentes.	17
2.3. Normas de Iluminantes para Simulador Solar.	19
2.4. Criterios de diseño.	20
2.4.1. Cálculo de conductores.	21
2.5. Metodología para la construcción del Simulador Solar.	22
Capítulo 3.- Caracterización del simulador solar	26
3.1. Introducción	26
3.2. Procedimiento preliminar.	26
3.3. Caracterización del simulador solar primer paso.	27
3.4. Caracterización del simulador solar segundo paso.	27
3.5. Resultados de la distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una separación entre el área de medición y la fuente, de 0.37 m.	29
3.6. Resultados de la distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una separación entre el área de medición y la fuente, de 0.74 m.	31
3.7. Resultados de la distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una separación entre el área de medición y la fuente, de 1.10 m.	33
3.8. Configuraciones.	35
3.8.1 Configuración 1.	35
3.8.2. Configuración 2.	36
3.8.3. Configuración 3.	38
3.8.4. Configuración 4.	40
3.8.5. Configuración 5.	42
Capítulo 4.- Conclusiones	45
Bibliografía	49
Apéndice	50

SIMBOLOGIA

Descripción	Símbolo
Metro	m
Kilómetro	km.
Tonelada	Ton.
Hidrógeno	H
Helio	He
Temperatura Absoluta	k
Radiación Solar	W/m ²
Masa de Aire sobre la superficie de la Tierra	AM
Longitud de onda(Nanómetro = 10 ⁻⁹ metros)	nm
Watt(Potencia)	W
Amstrong	
Eficacia lumínica	m/W
Hora	h
Temperatura Celsius centígrada	°C
Eficacia luminosa de la lámpara	lm/W
Dibromometano	CH ₂ Br ₂
Volframio	W
Bromo	Br
Radiación ultravioleta	UV
Pascal (Presión)	Pa
Cuarzo, tungsteno, halógena	QTH
Corriente	I
Potencia	P
Volt	V
Amper	A
Ohm	Ω

LISTA DE FIGURAS

Número	Descripción	Página
1	Gráfico Irradiancia Solar Espectral en la Tierra, según NASA para una masa de aire(AM) 1,5 y radiación solar de 1000 W/m ² .	4
2	Espectro electromagnético.	6
3	Rendimiento de una lámpara incandescente.	7
4	Partes de una lámpara incandescente	8
5	Ciclo del halógeno.	9
6	Diagrama de conexión de una lámpara de descarga.	10
7	Balance energético de una lámpara de descarga.	11
8	Ejemplo del espectro de una lámpara de descarga.	12
9	Principales partes de una lámpara de descarga.	13
10	Clasificación según grado de protección mecánica.	15
11	Emisión espectral de los iluminantes A y C.	20
12	Circuitos de conducción monofásicos del armado matricial dividido en dos circuitos (circuito 1 y 2).	21
13	a) Armado matricial de los soquets y cableado en la mampara y b) Colocación de lámparas.	23
14	Configuración de plano fuente y plano receptor, como podemos ver es idéntica para ambos.	24
15	Prueba de funcionamiento de las lámparas y del cableado.	25
16	Vista de planta del área de experimentación.	26
17	Vista de planta del procedimiento para la caracterización.	27
18	Vista de perfil del procedimiento para la caracterización.	27
19	Caracterización del simulador solar.	28
20	a) Fotografía del Piranómetro y b) Tipo de gafas utilizados en la experimentación.	29
21	Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.37 m.	30
22	Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.74 m.	32
23	Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 1.10 m.	34
24	Configuración 1 arreglo de 16 lámparas.	35
25	Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 1 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m.	36

Número	Descripción	Página
26	Configuración 2 arreglo de 12 lámparas.	37
27	Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 2 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m.	38
28	Configuración 3 arreglo de 12 lámparas.	39
29	Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 3 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m.	40
30	Configuración 4 arreglo de 16 lámparas.	40
31	Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 4 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m.	41
32	Configuración 5 arreglo de 20 lámparas.	42
33	Gráfica distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 5 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m.	43
34	Gráfica de área uniforme obtenida para la configuración 3 en la parte central de la malla.	44

LISTA DE TABLAS

Número	Descripción	Página.
1	Comparación de lámparas de gas con lámparas de vacío.	8
2	Eficiencia de diferentes tipos de lámparas.	11
3	Clasificación según la distribución de la luz.	14
4	Clasificación para las luminarias destinadas al alumbrado público.	15
5	Clasificación según su protección eléctrica.	16
6	Potencias, flujos y eficacias de fuentes de luz.	17
7	Lecturas de cada uno de los puntos del arreglo matricial para una separación entre el plano de medición y la fuente de 0.37 m.	29
8	Lecturas de cada uno de los puntos del arreglo matricial para una separación entre el plano de medición y la fuente de 0.74 m.	31
9	Lecturas de cada uno de los puntos del arreglo matricial para una separación entre el plano de medición y la fuente de 1,11 m.	33
10	Resultado de lecturas de configuración número 1.	35
11	Resultado de lecturas de configuración número 2.	37
12	Resultado de lecturas de configuración número 3.	39
13	Resultado de lecturas de configuración número 4.	41
14	Resultado de lecturas de configuración número 5.	42

Resumen

En la caracterización de diversos dispositivos, prototipos o equipos es necesario tener un ambiente con variables controladas. En la caracterización de conversión fotovoltaica una herramienta indispensable es el simulador solar, dado que este presenta condiciones controladas de la radiación.

Las pruebas a la intemperie con luz natural no siempre son prácticas por desventajas obvias, tales como luz del día limitada por interferencias de nubes y por otras inclemencias del tiempo, restricción del periodo de pruebas a las horas del Sol, etc.

Por estas razones las pruebas en laboratorio, bajo condiciones controladas, pueden proporcionar información más confiable. La variación de la radiación de un simulador solar puede realizarse mediante diversas técnicas dependiendo de las características técnicas de las lámparas empleadas en su construcción.

Se puede realizar este control de radiación desde esquemas tan sencillos como son la variación de la distancia entre la fuente de radiación y el equipo a caracterizar, hasta otros más sofisticados como uso de reóstatos en serie o paralelo, balastos electrónicos o variadores de frecuencia.

Simular la Radiación Solar para la realización experimentos en condiciones controladas de laboratorio es de mucha utilidad con respecto a los experimentos realizados a la intemperie utilizando luz natural debido a la variabilidad del clima, la interferencia de nubes y otras condiciones climáticas.

En este trabajo se presenta el diseño, implementación y caracterización de un simulador solar basado en lámparas incandescentes tipo PAR. Así como un análisis del comportamiento que presenta el perfil de irradiancia ante variaciones de la distribución de las lámparas sobre el plano del simulador.

Para la obtención de un espectro electromagnético semejante al de la radiación solar y caracterizar la operación de diversos dispositivos ante esta, tales como las celdas fotovoltaicas, los concentradores solares, las cocinas solares, etc; se recurre a la iluminación artificial utilizando lámparas que cumplan con las características para el tipo de aplicación en que se vaya a utilizar.

Ya que las lámparas no abarcan todo el espectro electromagnético debido a una gran cantidad de parámetros(material con que están fabricados, forma geométrica,

tipo de excitadores, tipo de cubierta, etc), es importante la selección del tipo de lámpara en base al propósito específico requerido.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se describen conceptos básicos de iluminación tales como son: Energía solar, distribución espectral, iluminación natural, iluminación artificial, lámparas incandescentes, (clasificación, características), etc, estos conceptos plantean la base para una mayor comprensión de los capítulos posteriores.

En el capítulo 2 se presenta un estudio del estado del arte de los simuladores, con el objetivo de tener un marco de referencia para este trabajo. Por otro lado se abordan los criterios de diseño, así como el cálculo de algunos elementos que se utilizaron en la implementación del simulador, y de igual manera, la metodología empleada para la construcción del mismo.

En el capítulo 3 se describen los procedimientos que se utilizaron para la caracterización del simulador, tanto la variación de la distancia del plano de medición, como las diversas configuraciones de distribución de las lámparas.

Finalmente en el capítulo 4 se presentan las conclusiones del trabajo.

CAPITULO 1.- CONCEPTOS BÁSICOS DE ILUMINACIÓN.

1.1 Introducción

En este capítulo se presentan conceptos básicos de iluminación y una descripción detallada de tipos de lámparas incandescentes. Cabe mencionar que existen otros tipos de lámparas que funcionan con un principio diferente a las lámparas incandescente pero no se abordan a detalle debido a que sólo se utilizó un tipo de lámpara incandescente para este proyecto después del análisis de factibilidad técnico-económico.

1.2. ILUMINACIÓN NATURAL

El Sol puede considerarse como una estrella típica de la Vía Láctea. El Sol es una esfera de material gaseoso caliente con una temperatura superficial de aproximadamente 5,800 k, un diámetro de 1.39×10^9 m y se encuentra a 150 millones de kilómetros separado de la Tierra. Su masa se estima que es 2.2×10^{27} toneladas.

El Sol se asemeja a un reactor de fusión mantenido por fuerzas gravitacionales. Se han sugerido las siguientes etapas en la generación de la energía radiante. El hidrógeno se combina para formar helio, la masa de los cuatro átomos de H es mayor que la del átomo de helio, por lo tanto la masa perdida en la reacción se convierte en energía de acuerdo con la ecuación $E=m \cdot c^2 \cdot n$ donde "m" es igual al exceso de masa, "c" la velocidad de la luz y "h" un factor de eficiencia. Esta energía producida en el centro de la esfera solar a temperaturas de muchos millones de grados es transportada a la superficie del Sol después de sufrir una serie de emisiones, absorciones y reradiaciones sucesivas. Se considera la radiación en un rango de longitud de onda de 0.3 a 3.0 nanómetros cuya porción del espectro incluye la mayor parte de la energía radiada por el sol. La capa externa de la zona convectiva es llamada fotosfera la cual se caracteriza por ser opaca compuesta de gases ionizados que absorben y emiten un espectro continuo de radiación. La fotosfera es la región de donde proviene la radiación que nos llega a la tierra [1].

A cientos de kilómetros se encuentra una capa llamada cromosfera con un espesor de aproximadamente 10,000 km con temperaturas más altas que la fotosfera y con menor densidad. Aún más alejada del núcleo se encuentra la

corona de más baja densidad y con más alta temperatura, aproximadamente 10^6 K. La radiación solar emitida es el resultado de varias capas que emiten y absorben radiación a varias longitudes de onda. La radiación solar extraterrestre y su distribución espectral pueden ser medidos por varios métodos.

1.2.1. Distribución espectral

Del total de la radiación solar que llega a la atmósfera terrestre, puede asignarse aproximadamente el 6% a la radiación ultravioleta en un rango de longitud de onda de 0.01 a 0.38 *nanómetros*, un 47% al rango de radiación visible desde 0.38 a 0.78 *nanómetros* de longitud de onda y el 47% al infrarrojo en un rango de 0.78 a 3.0 *nanómetros*. La curva de irradiancia espectral que ha sido compilada por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos) está basada en mediciones hechas en el espacio.

En la Figura 1 se representa gráficamente esta distribución espectral estándar de la radiación solar dada por la NASA a $1.5 AM^1$. Se puede observar la existencia de un máximo pronunciado para longitudes de onda cercanas a 0,46 *nanómetros* ($10^{-6} m$) y que prácticamente 70 % del total de la irradiancia cae en el intervalo de 0,3 a 2,5 *nanómetros*, que es precisamente el rango aprovechable para las aplicaciones fotovoltaicas.

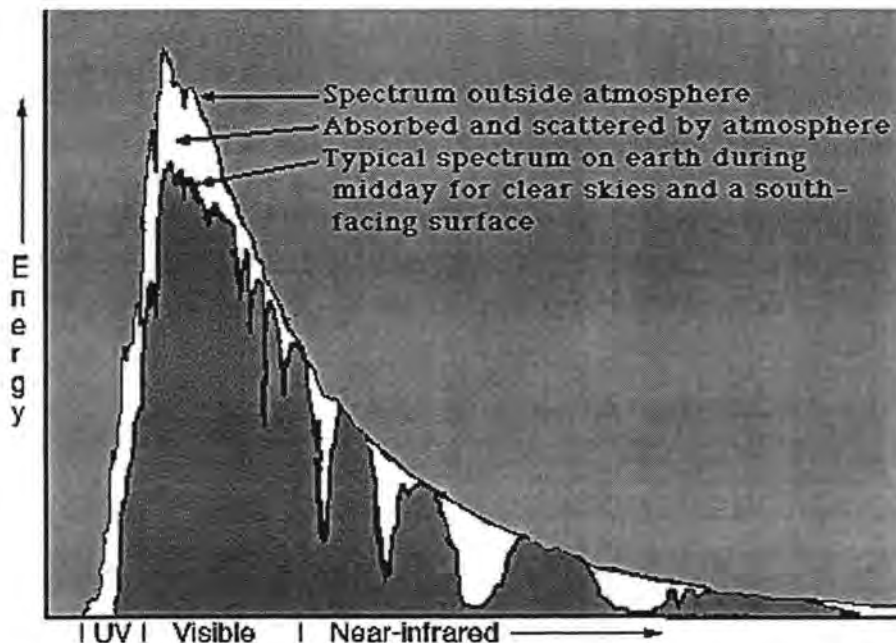


Figura 1.-Gráfico de Irradiancia Solar Espectral según NASA en la Tierra, para una masa de aire (AM) 1,5 y radiación solar de $1000 W/m^2$.

¹ AM = Masa de Aire sobre la superficie de la Tierra.

1.2.2. La energía solar.

La energía solar hace posible que las plantas, al combinar el agua con el carbono, liberen el oxígeno necesario para la vida. La energía que se libera al quemar el carbón y el petróleo es la energía solar que han captado las plantas en millones de años. La utilización de la energía eólica también es una consecuencia de la energía solar. El hombre aprendió muy pronto a utilizar la fuerza del viento en los veleros y molinos de viento [2].

Cuando el cielo está claro y el Sol cae verticalmente sobre la tierra, al nivel del mar se suministran aproximadamente 870 W en forma de radiaciones luminosas y térmicas. Estos 870 W coinciden aproximadamente con el consumo medio por habitante de un país desarrollado.

A mayor altura sobre el nivel del mar la radiación de energía también es mayor, ya que la parte que absorbe la capa de aire, al ser más fina, es menor. A una altura de 4,400 m. la cantidad de energía que se suministra por metro cuadrado es de 1.16 kW, es decir, un 35 % más que al nivel del mar. Fuera de la atmósfera terrestre, los satélites en órbitas cercanas a la Tierra alcanzan valores de 1,35 kW., es decir, un 50 % más que al nivel del mar, en otras palabras, el 1/2500 de la energía solar que recibe constantemente la Tierra bastaría para cubrir el consumo de energía de toda la humanidad en el año 2,000. Para este cálculo se han supuesto unas necesidades energéticas en función de las necesidades actuales, teniendo en cuenta el crecimiento de la población y los avances tecnológicos, y una eficiencia del 20 % en el proceso de transformación de energía. Este cálculo resulta tranquilizador ante la perspectiva de que las fuentes clásicas de energía, el carbón y petróleo suban de precio.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre tiene una composición energética, en longitudes de onda, que corresponde a diferentes zonas del espectro electromagnético, tales como: luz visible; radiación ultravioleta, radiación infrarroja y también como ondas de radio.

1.3. Iluminación artificial.

Las lámparas eléctricas son aparatos capaces de producir, de un modo artificial, energía radiante visible para el ojo humano. Las lámparas producen una energía radiante electromagnética que varía en función de la longitud de onda a la que se produce la emisión.

Parte de la energía producida es captada por el ojo humano, concretamente la energía que se produce entre las longitudes de onda de los 400 a los 700 nanómetros en mayor o menor medida según se aproxime a la longitud de onda de los 550 nanómetros, longitud para la cual se tiene la máxima sensibilidad.

1.4. Lámpara incandescente.

Las lámparas incandescentes fueron las primeras formas de generar luz a partir de la energía eléctrica. Desde que fueron inventadas, la tecnología ha cambiado mucho produciéndose sustanciosos avances en la cantidad de luz producida, el consumo y la duración de las lámparas. Su principio de funcionamiento es simple, se pasa una corriente eléctrica por un filamento hasta que este alcanza una temperatura tan alta que emite radiaciones visibles por el ojo humano.

Todos los cuerpos calientes emiten energía en forma de radiación electromagnética. Mientras más alta sea su temperatura mayor será la energía emitida y la porción del espectro electromagnético ocupado por las radiaciones emitidas. Si el cuerpo pasa la temperatura de incandescencia una buena parte de estas radiaciones caerán en la zona visible del espectro y se obtiene luz, como se aprecia en la figura 2.

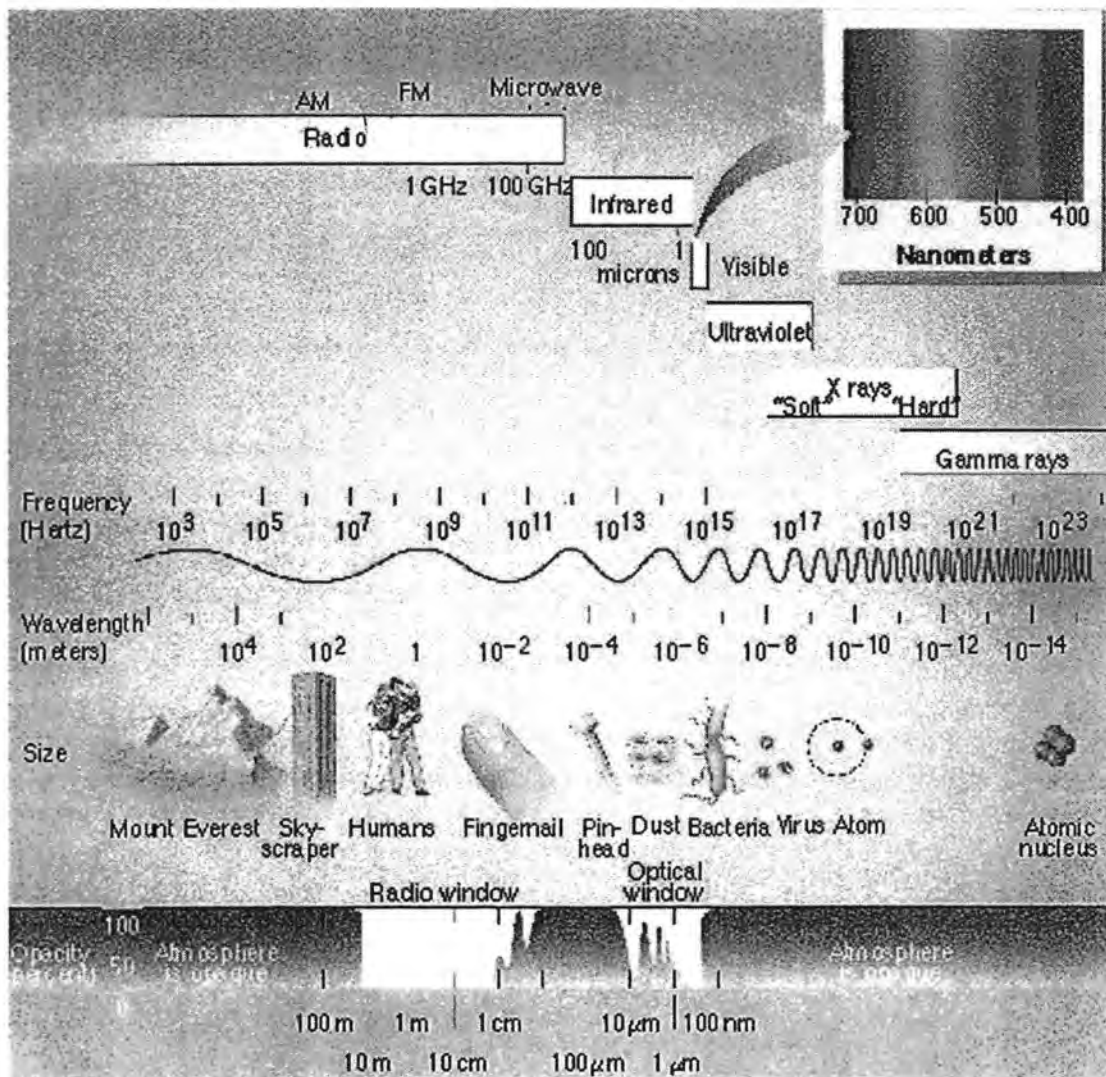


Figura 2.- Espectro electromagnético.

La incandescencia se puede obtener de dos maneras. La primera es por combustión de alguna sustancia, ya sea sólida como una antorcha de madera, líquida como en una lámpara de aceite o gaseosa como en las lámparas de gas. La segunda es pasando una corriente eléctrica a través de un hilo conductor muy delgado como ocurre en las bombillas corrientes. Tanto de una forma como de otra, obtenemos luz y calor (ya sea calentando las moléculas de aire o por radiaciones infrarrojas). En general los rendimientos de este tipo de lámparas son bajos debido a que la mayor parte de la energía consumida se convierte en calor como se observa en la Figura 3.

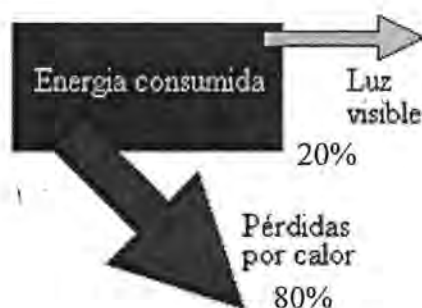


Figura 3.-Rendimiento de una lámpara incandescente.

La producción de luz mediante la incandescencia tiene una ventaja adicional respecto a las lámparas fluorescentes, y es que la luz emitida contiene todas las longitudes de onda que forman la luz visible o dicho de otra manera, su espectro de emisiones es continuo[2]. De esta manera se garantiza una buena reproducción de los colores de los objetos iluminados. Las lámparas incandescentes están formadas por un hilo de wolframio que se calienta por efecto joule alcanzando temperaturas tan elevadas que empieza a emitir luz visible. Para evitar que el filamento se queme en contacto con el aire, se rodea con una ampolla de vidrio a la que se le ha hecho el vacío o se ha rellenado con un gas. El conjunto se completa con unos elementos con funciones de soporte y conducción de la corriente eléctrica y un casquillo normalizado que sirve para conectar la lámpara a la luminaria, como se observa en la figura 4.

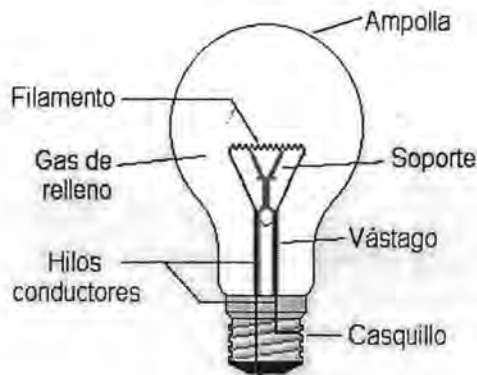


Figura 4.-Partes de una lámpara incandescente.

Existen dos tipos de lámparas incandescentes: las que contienen un gas halógeno en su interior y las que no lo contienen:

1.5. Lámparas incandescentes no halógenas.

Entre las lámparas incandescentes no halógenas podemos distinguir las que se han rellenado con un gas inerte de aquellas en que se ha hecho el vacío en su interior. La presencia del gas supone un notable incremento de la eficiencia luminosa de la lámpara dificultando la evaporación del material del filamento y permitiendo el aumento de la temperatura de trabajo del filamento. Las lámparas incandescentes tienen una duración promedio de 1000 horas, una potencia entre 25 y 2000 W y unas eficiencia entre 7.5 y 11 lm/W para las lámparas de vacío y entre 10 y 20 lm/W para las rellenas de gas inerte. En la actualidad predomina el uso de las lámparas con gas, reduciéndose el uso de las de vacío a aplicaciones ocasionales en alumbrado general con potencias de hasta 40 W, en la tabla 1 se observa una comparación de lámparas de gas con vacío.

	Lámparas con gas	Lámparas de vacío
Temperatura del filamento	2500 °C	2100 °C
Eficiencia luminosa de la lámpara	10-20 lm/W	7.5-11 lm/W
Duración	1000 horas	1000 horas
Pérdidas de calor	Convección y radiación	Radiación

Tabla 1.- Comparación de lámparas de gas con lámparas de vacío.

1.6. Lámparas incandescentes halógenas de alta y baja tensión.

En las lámparas incandescentes normales, con el paso del tiempo, se produce una disminución significativa del flujo luminoso. Esto se debe, en parte, al ennegrecimiento de la ampolla por debido a la evaporación de partículas de wolframio del filamento y su posterior condensación sobre la ampolla.

Agregando una pequeña cantidad de un compuesto gaseoso con halógenos (cloro, bromo o yodo), normalmente se usa el CH_2Br_2 (Dibromometano), al gas de relleno se consigue establecer un ciclo de regeneración del halógeno que evita el ennegrecimiento. Cuando el tungsteno (W) se evapora se une al bromo formando el bromuro de wolframio (WBr_2). Como las paredes de la ampolla están muy calientes (más de $260\text{ }^\circ\text{C}$) no se deposita sobre estas y permanece en estado gaseoso. Cuando el bromuro de wolframio entra en contacto con el filamento, que está muy caliente, se descompone en wolframio que se deposita sobre el filamento y Br que pasa al gas de relleno[2]. Y así, el ciclo vuelve a empezar, este ciclo se puede apreciar gráficamente en la figura 5.

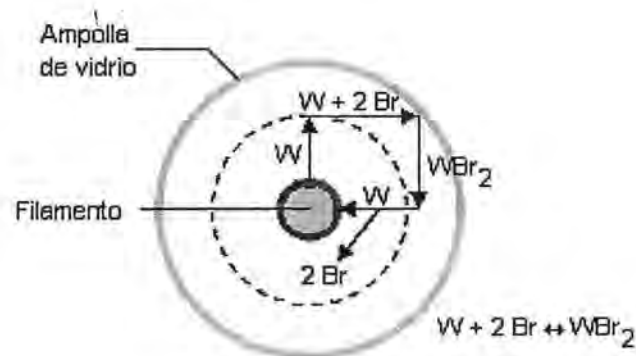


Figura 5.-Ciclo del halógeno.

Las lámparas halógenas tienen una eficiencia luminosa de 22 lm/W con una amplia gama de potencias de trabajo (150 a 2000 W) según el uso al que estén destinadas. Las lámparas halógenas se utilizan normalmente en alumbrado por proyección y cada vez más en iluminación doméstica.

1.7. Lámparas de descarga.

Las lámparas de descarga constituyen una forma alternativa de producir luz de una manera más eficiente y económica que las lámparas incandescentes. Por eso, su uso está tan extendido hoy en día. La luz emitida se consigue por excitación de un gas sometido a descargas eléctricas entre dos electrodos. Según el gas contenido en la lámpara y la presión a la que esté sometido tendremos

diferentes tipos de lámparas, cada una de ellas con sus propias características luminosas.

1.7.1. Funcionamiento.

En las lámparas de descarga, la luz se consigue estableciendo una corriente eléctrica entre dos electrodos situados en un tubo lleno con un gas o vapor ionizado, como se observa en la figura 6.

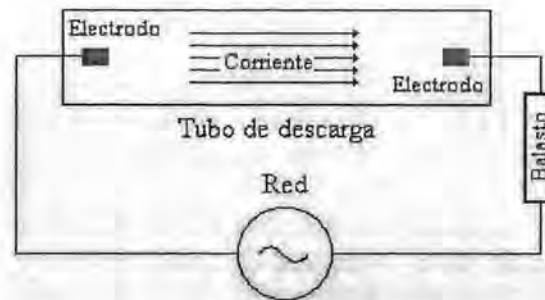


Figura 6.- Diagrama de conexión de una lámpara de descarga.

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 atraviesa el gas. Cuando uno de Estos Electrones choca con los electrones de las capas externas de los átomos, les transmite energía y pueden suceder dos cosas:

- i) La energía transmitida en el choque es lo suficientemente elevada para poder arrancar al electrón de su orbital. Este, puede a su vez, chocar con los electrones de otros átomos repitiendo el proceso. Si este proceso no se limita la presión interna de la lámpara aumenta y se puede provocar la destrucción de la lámpara por un exceso de corriente.
- ii) El electrón no recibe suficiente energía para ser arrancado. En este caso, el electrón pasa a ocupar otro orbital de mayor energía. Este nuevo estado al ser inestable provoca que descargue rápidamente a la situación inicial. Al hacerlo, el electrón libera la energía extra en forma de radiación electromagnética, principalmente ultravioleta (UV) o visible.

Un electrón ligado a un átomo no puede tener un estado energético cualquiera, sino que sólo puede ocupar unos pocos estados que vienen determinados por la estructura atómica del átomo. Como la longitud de onda de la radiación emitida es inversamente proporcional a la diferencia de energía entre los estados inicial y final del electrón y los estados posibles son infinitos, es fácil comprender que el espectro de estas lámparas sea discontinuo.

La consecuencia de esto es que la luz emitida por la lámpara no es blanca (por ejemplo en las lámparas de sodio a baja presión es amarillenta). Por lo tanto, la capacidad de reproducir los colores de estas fuentes de luz es, en general, peor que en el caso de las lámparas incandescentes que tienen un espectro continuo. Es posible, recubriendo el tubo con sustancias fluorescentes, mejorar la reproducción de los colores y aumentar la eficacia de las lámparas convirtiendo las nocivas emisiones ultravioletas en luz visible.

1.7.2. Eficiencia.

Para determinar la eficiencia de este tipo de lámparas hay que diferenciar entre la eficiencia de la fuente de luz y la de los elementos auxiliares necesarios para su funcionamiento que depende del fabricante. En las lámparas, las pérdidas se centran en dos aspectos: las pérdidas por calor (infrarrojo) y las pérdidas por radiaciones no visibles (ultravioleta). El porcentaje de cada tipo dependerá de la clase de lámpara con que se trabaje, se aprecia esto en la figura 7.



Figura. 7.- Balance energético de una lámpara de descarga.

La eficiencia de las lámparas de descarga oscila entre los 19-28 lm/W de las lámparas de luz de mezcla a diferencia de los 100-183 lm/W de las de sodio a baja presión, se observa en la Tabla 2.

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

Tabla 2.- Eficiencia de diferentes tipos de lámparas.

1.7.3. Características cromáticas.

Debido a la forma discontinua del espectro de estas lámparas, la luz emitida es una mezcla de unas pocas radiaciones monocromáticas; en su mayor parte en la zona ultravioleta (UV) o visible del espectro. Esto hace que la reproducción del color no sea muy buena debido a que solo abarcan una pequeña parte del espectro, se puede observar esto en la figura 8.

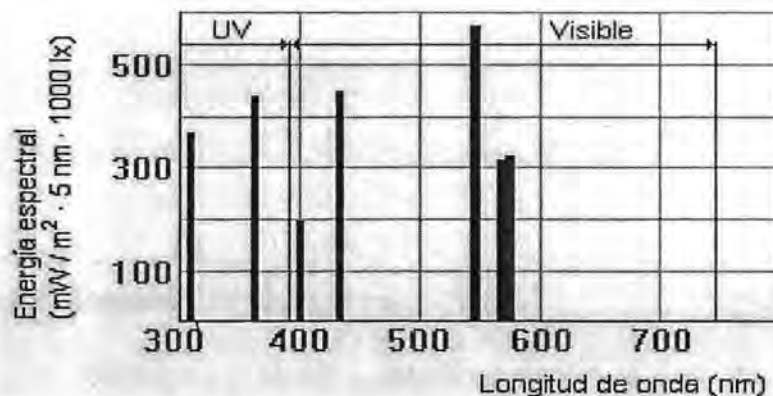


Figura. 8.- Ejemplo del espectro de una lámpara de descarga.

Para solucionar este problema se puede tratar de completar el espectro con radiaciones de longitudes de onda distintas a las de la lámpara. La primera opción es combinar en una misma lámpara dos fuentes de luz con espectros que se complementen como ocurre en las lámparas de luz de mezcla (incandescencia y descarga). También se puede aumentar la presión del gas. De esta manera se consigue aumentar la anchura de las líneas del espectro de manera que formen bandas anchas y más próximas entre sí, aunque no es práctico porque se necesita mucha presión para esto y la bombilla no resistiría.

1.7.4. Componentes de una lámpara de descarga.

Las formas de las lámparas de descarga varían según la clase de lámpara con que se trate. De todas maneras, todas tienen una serie de elementos en común como el tubo de descarga, los electrodos, la ampolla exterior o el casquillo, estas partes se pueden apreciar en la Figura 9.

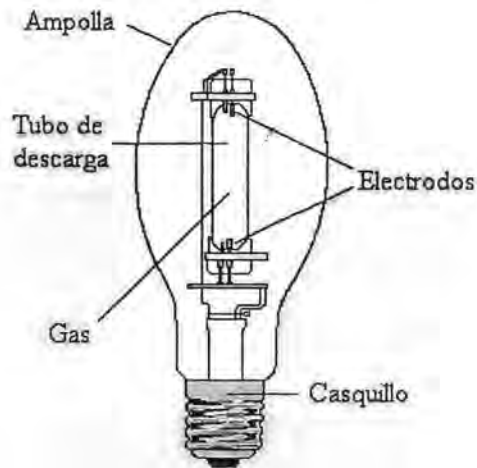


Figura 9.- Principales partes de una lámpara de descarga.

1.7.5. Clases de lámparas de descarga.

Las lámparas de descarga se pueden clasificar según el gas utilizado (vapor de mercurio o sodio) o la presión a la que este se encuentre (alta o baja presión). Las propiedades varían mucho de unas a otras y esto las hace adecuadas para unos usos u otros, a continuación se lista la clasificación de las lámparas de descarga:

- Lámparas de vapor de mercurio:
 - Baja presión:
 - Lámparas fluorescentes
 - Alta presión:
 - Lámparas de vapor de mercurio a alta presión
 - Lámparas de luz de mezcla
 - Lámparas con halogenuros metálicos
- Lámparas de vapor de sodio:
 - Lámparas de vapor de sodio a baja presión
 - Lámparas de vapor de sodio a alta presión

Las lámparas fluorescentes corresponden a la clasificación de las lámparas de vapor de mercurio a baja presión, 0.8 Pascales(Pa) de presión manométrica, en su mayoría.

1.8. Clasificación de lámparas de acuerdo a sus características de flujo luminoso.

Una manera de clasificar las luminarias es según el porcentaje del flujo luminoso emitido por encima y por debajo del plano horizontal que atraviesa la lámpara. Es decir, dependiendo de la cantidad de luz que ilumine hacia el techo o al suelo esta clasificación se presenta en la Tabla 3 Según esta clasificación se distinguen seis clases.

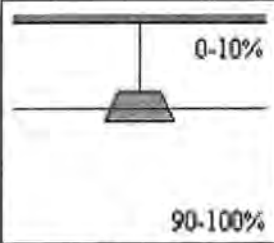
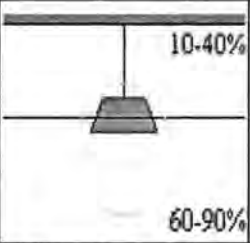
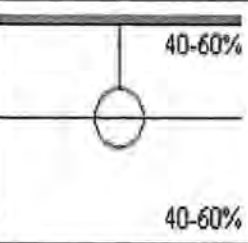
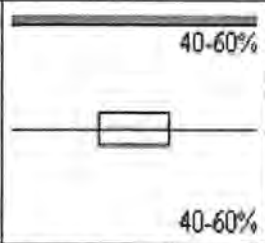
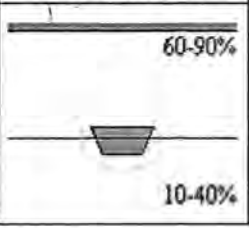
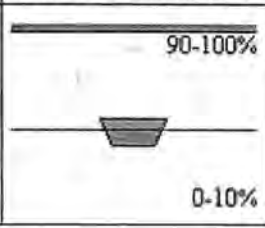
			
Directa	Semi-directa	General difusa	Directa-indirecta
Semi-directa		Indirecta	

Tabla 3.-Clasificación según la distribución de la luz.

Otra clasificación posible es atendiendo al número de planos de simetría que tenga el sólido fotométrico. Así, se pueden tener luminarias con simetría de revolución que tienen infinitos planos de simetría y por tanto nos basta con uno de ellos para conocer lo que pasa en el resto de planos (por ejemplo un proyector o una lámpara tipo globo), con dos planos de simetría (transversal y longitudinal) como los fluorescentes y con un plano de simetría (el longitudinal) como ocurre en las luminarias de alumbrado diario (Tabla 4).

 <p>Eje de revolución</p>	 <p>Plano longitudinal Plano transversal</p>	 <p>Plano longitudinal</p>
<p>Luminaria con infinitos planos de simetría</p>	<p>Luminaria con dos planos de simetría</p>	<p>Luminaria con un plano de simetría</p>

Tabla 4.-Clasificación para las luminarias destinadas al alumbrado público.

1.9. Clasificación de lámparas de acuerdo a sus características mecánicas.

Las luminarias se clasifican según el grado de protección contra el polvo, los líquidos y los golpes. En estas clasificaciones, según las normas nacionales (UNE 20324) e internacionales, las luminarias se designan por las letras **IP** seguidas de tres dígitos. El primer número va de 0 (sin protección) a 6 (máxima protección) e indica la protección contra la entrada de polvo y cuerpos sólidos en la luminaria. El segundo va de 0 a 8 e indica el grado de protección contra la penetración de líquidos. Por último, el tercero da el grado de resistencia a los choques, esto se ilustra en la Figura 10.

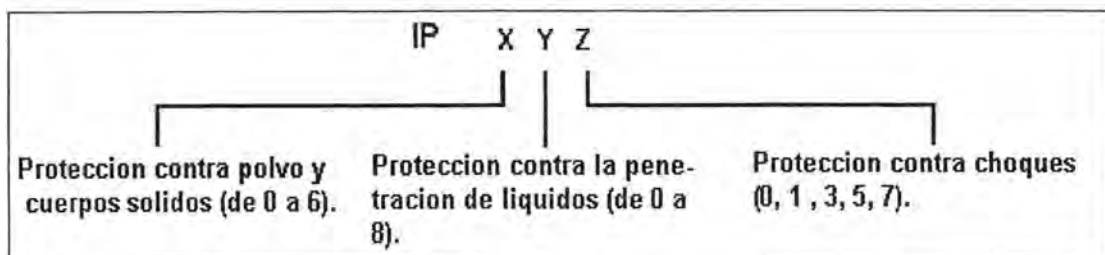


Figura 10.- Clasificación según grado de protección mecánica.

1.10. Clasificación de lámparas de acuerdo a sus características eléctricas.

Según el grado de protección eléctrica que ofrezcan las luminarias se dividen en cuatro clases (0, I, II, III), las cuales se ven en la tabla 5.

Clase	Protección eléctrica
0	Aislamiento normal sin toma de tierra
I	Aislamiento normal y toma de tierra
II	Doble aislamiento sin toma de tierra.
III	Luminarias para conectar a circuitos de muy baja tensión, sin otros circuitos internos o externos que operen a otras tensiones distintas a la mencionada.

Tabla 5.- Clasificación según su protección eléctrica.

1.11. Otras clasificaciones.

Otras clasificaciones posibles son según la aplicación a la que esté destinada la luminaria (alumbrado diario, alumbrado peatonal, proyección, industrial, comercial, oficinas, doméstico, etc.) o según el tipo de lámparas empleado (para lámparas incandescentes o fluorescentes).

1.12. Comparativo de características.

De todos los tipos de lámparas descritos anteriormente, cinco son los más utilizados: Fluorescentes, Incandescentes, Mercurio, Halogenuros metálicos y Sodio como se muestra en la Tabla 6.

Tipo	Potencias(W)	Flujos(lm)	Eficacias(lm/W)
Incandescencia	1 - 2000	6 - 40000	8 - 20
Incandescencia con halógenos	3 - 10000	36 - 220000	18 - 22
Fluorescentes tubulares	4 - 215	1000 - 15500	40 - 93
Fluorescentes compactas	5 - 36	250 - 2900	50 - 82
Vapor de mercurio	50 - 2000	1800 - 125000	40 - 58
Halogenuros metálicos	75 - 3500	5000 - 300000	60 - 95
Sodio a alta presión	50 - 1000	3500 - 130000	66 - 130
Sodio a baja presión	18 - 180	1800 - 33000	100 - 183

Tabla 6.- Potencias, flujos y eficacias de fuentes de luz.

CAPITULO 2.- DISEÑO DEL SIMULADOR SOLAR

2.1. Introducción.

En el capítulo anterior se mencionaron los conceptos básicos de iluminación artificial, así como las características principales de diversas lámparas eléctricas; en este capítulo se presenta el diseño del simulador solar. Y se abordan de manera general algunas investigaciones afines al tema recopilados de diversos trabajos realizados. De igual manera, se mencionan normas relacionadas con lámparas incandescentes para la simulación solar; posteriormente se describen los criterios de diseño que se siguieron para realizar una caracterización óptima del simulador solar; Se describen los cálculos de conductores para proveer de energía eléctrica a las lámparas incandescentes, y por último se realiza una descripción de la metodología seguida para el proyecto.

2.2. Antecedentes

En 1979, se reportaron pruebas de una simulación solar utilizando lámparas de cuarzo del tipo Halógeno-Tungsteno y filtros ópticos [3]. El simulador que reportan, hace uso de una lámpara Silvana de Halógeno-Tungsteno. La temperatura de trabajo que alcanza el filamento es de 3,200 K. Consume 650 W, entrega 16,500 lúmenes y tiene un promedio de vida de algunas horas. Utiliza un filtro principal CS1-75 y un filtro adicional CS0-56. El segundo se instala entre el primero y la lámpara con la finalidad de proteger al filtro principal de un calentamiento excesivo. Este simulador proporciona una iluminación de 740 W/m^2 , sobre un plano a una separación de 15 cm de la lámpara. El área del plano es un círculo con diámetro de 6 cm. La altura de la lámpara puede ser ajustada para reproducir la misma iluminación si es que existen variaciones.

En 1983, analizaron las propiedades de las lámparas CSI (Compact Source Lodide) y las compararon con los requerimientos de ASHRAE, para usarlas como simuladores solares [4]. Es evidente que las lámparas CSI, las de Tungsteno y las de Xenón, no cumplen exactamente con los requerimientos de ASHRAE, sin embargo son utilizadas para simular la luz del Sol. Las lámparas de Xenón tienen mejor distribución espectral, pero aún requieren filtros, enfriamientos por agua y controles complejos. Las lámparas CSI y las de Tungsteno son fáciles de manejar pero emiten demasiada energía cerca de la zona infra-roja (IR). El uso de algunos filtros con discos de cristal y capas delgadas de agua circulante permiten absorber

pequeñas cantidades de energía en el espectro visible y grandes cantidades cerca de la radiación IR. Tales filtros se utilizan en el simulador solar de la Universidad de Sydney.

En 1988, Govaer [5] realizó pruebas de un simulador en laboratorio con un simulador incandescente. El simulador usado consiste de un arreglo de 66 lámparas incandescentes Silvana PS 30/8 cada una de 300 W a 120 V. Las lámparas tienen una temperatura de cuerpo negro efectiva entre 2800 K y 3000 K a 120 V. Las lámparas llevan una hoja de aluminio como reflector de tamaño 1.22 m por 2.44 m y se dividen en 11 módulos controlados independientes, de tal forma que puedan recibir un voltaje regulable mayor que el nominal. Las lámparas y sus bases se enfrían por convección forzada por dos ventiladores de $0.189 \text{ m}^3/\text{s}$ logrando que la temperatura donde va montando el bulbo sea inferior a $93 \text{ }^\circ\text{C}$. Esto está por debajo de la temperatura máxima de operación recomendada por los fabricantes, de esta forma se incrementa la vida útil del bulbo.

En 1994, se diseñaron un simulador solar de gran escala mediante el empleo de Lámparas-Múltiples[6]. El simulador utiliza 28 lámparas de descarga de mercurio llamada fuente compacta de yoduro (CSI). Irradia en una superficie de prueba de 1.22 m por 2.44 m con un promedio de irradiancia de 1080 W/m^2 . La distancia de las lámparas al plano colector es de 3.5 m, y hace uso de una pantalla de sombra para colimar la luz, que se localiza a 1.02 m de la 28 lámparas de 1.0 kW (CSI). El radio de los orificios de la pantalla de sombra es de 0.15 m. en el arreglo, el cual está compuesto de 4 columnas de 7 lámparas cada una con espacios entre ellas de 0.45 m. La distancia entre columnas también es de 0.45 m. La pantalla de sombra está construida de triplay. Este simulador ha sido usado principalmente para pruebas de colectores. Las variables X, Y, y Y', son dimensiones variadas en la simulación de 28 lámparas.

En 1998, en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) de Cuernavaca Morelos, se realizó un estudio teórico experimental del comportamiento térmico de vidrios laminados con dos filtros solares [7]. Para simular las condiciones de irradiancia a las que están sometidos los vidrios, se utilizó una lámpara de Halógeno-Tungsteno de 1000W como simulador solar, y un intercambiador de calor que se colocó en la parte posterior de la caja, el flujo radiativo normal que se hizo incidir sobre el vidrio fue de 750 W/m^2 . Una desventaja de utilizar una sola lámpara es que el perfil de irradiancia no es uniforme, con una mayor concentración de la intensidad en el centro.

En 1999 el CENIDET se diseñó y caracterizó un arreglo de 4 lámparas QTH (Cuarzo, tungsteno, halógena) de 1 kW cada una, para utilizarlo como un simulador solar [8]. Se encontró que la uniformidad y la intensidad de la irradiancia dependen de la configuración del arreglo empleado, de la distancia de separación entre la fuente y el plano receptor, y que varía en forma inversa al cuadrado de la distancia. Lograron controlar la potencia de salida desde 0 al 100% de Watts, regulando el control de encendido. Para controlar la potencia se utilizó un control por fase, el cual consiste en dos circuitos, uno de control y otro de fuerza. Con el

primero se genera un tren de pulsos como señal de control y con el segundo se emplea un Triac de 40 A, ambos circuitos están acoplados por un Opto-Triac(MOC3011), lo que permite aislar perfectamente la señal de control de aquella de la fuerza. Le desventaja de esta propuesta es la no linealidad del control electrónico, ya que en el control por fase empleado, las variaciones del voltaje aplicado a las lámparas, no son proporcionales a la radiación emitida por las mismas.

En 2002 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, se construyó un simulador solar para la caracterización térmica de techumbres, utilizaron lámparas incandescentes de tungsteno de 150W[9], aunque el espectro de longitud de onda no completa todo el espectro de la radiación solar se utilizaron estas lámparas por cuestiones económicas, se generó un arreglo de lámparas de 5 X 5 distribuidas uniformemente en el área de 1.20 x 1.20 m² de la muestra, a una distancia de 0.5 m del área de medición. La simulación se alcanzó solamente a nivel de intensidad, sin lograr obtener el espectro solar, ya que las lámparas especiales para simular la región ultravioleta del espectro son caras y no se consiguieron. Sin embargo este simulador permite simular la energía que pasa a través de los elementos de techumbre en forma de conducción. Su principal ventaja es el bajo costo de las lámparas, así como la simplicidad de su conexión

2.3. Normas de Iluminantes para la Simulación Solar.

Normas CIE

Un pequeño número de iluminantes elegidos por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) son utilizados en colorimetría: Iluminante A relativo a una fuente incandescente típica, radiando según la ley de Planck; iluminantes C y D que representan algunos aspectos característicos de la luz natural; iluminantes F que seleccionan fuentes fluorescentes.

El iluminante A (representante de las lámparas incandescentes) está definida como la radiación donde el espectro de energía en el dominio del visible está dado por la ley de Planck a una temperatura de 2855,54 K. La norma CIE/ISO 10526 lo da con seis cifras significativas de 380 a 830 nm en intervalos de 1 nm.

La fuente correspondiente, llamada *fuentes A*, designada por la CIE en 1931, es una lámpara de incandescencia típica con gas y filamento de tungsteno en espiral funcionando a una temperatura de color de 2855,5 K. La fuente A (Figura 11) puede ser reproducida con las lámparas actuales de filamento de tungsteno con la condición de regular su tensión de alimentación y su corriente a los valores convenientes.

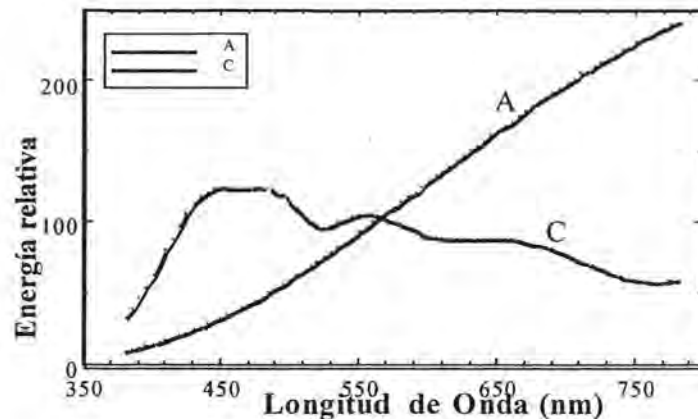


Figura 11.- Emisión espectral de los iluminantes A y C.

En 1931 el CIE había definido dos tipos de iluminantes representativos de la luz natural: el *iluminante B* destinado a representar la radiación solar directa a mediodía, con una temperatura de color próxima a los 4870 K; el *iluminante C* destinado a representar la luz media del día, con una temperatura de color próxima a los 6770 K. Las dos fuentes correspondientes podían ser fabricadas artificialmente con ayuda de la fuente A, intercalando en el haz los filtros líquidos azules apropiados.

2.4. Criterios de diseño:

Se seleccionó la "lámpara incandescente" para el simulador solar tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Debido a que cubre todo espectro visible (aunque con una tendencia hacia el infrarrojo).
- Apoyándose en las Normas de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) Norma CIE/ISO 10526, que aprueba el uso de lámparas incandescentes para la simulación solar.
- Por lo sencillo de su conexión.
- Lo económico, las lámparas incandescentes tuvieron preferencia debido a su precio bajo.
- Potencia alta dentro de los parámetros requeridos, tomando en cuenta esto se escogió la de mayor potencia en el mercado la cual fue de 250 Watts.

Se determinó un número de 25 lámparas de 250 Watts para el simulador solar considerando superar un poco la radiación requerida la cual es la radiación solar normal más alta (1000 W/m^2), el área del Simulador se determinó tomando en cuenta que la distancia entre lámparas sea corta pero que pudieran dispersar el calor para no sobrecalentarse. El tamaño del panel fue de 1 m de ancho x 1.60 m de altura, pero como se observa en la Figura 13 sólo se utiliza la parte superior para el arreglo matricial. El arreglo fue de 5 x 5 lámparas en un área de 0.84 m^2 ($0.92 \times 0.92 \text{ m}$) utilizando sólo la parte superior central del panel.

2.4.1. Cálculo de conductores.

A continuación se presenta el dimensionamiento de conductores de acuerdo a las cargas de las lámparas, para un correcto funcionamiento del Simulador Solar.

Potencia de luminarias(P) igual a 250 Watts.

Para calcular la corriente I:

$$I = P / V = 250 \text{ W} / 127\text{V} = 1.96 \text{ A} \approx 2 \text{ A}$$

Para calcular la resistividad:

$$R = P / I^2 = 250 \text{ W} / 4 = 62.5 \Omega$$

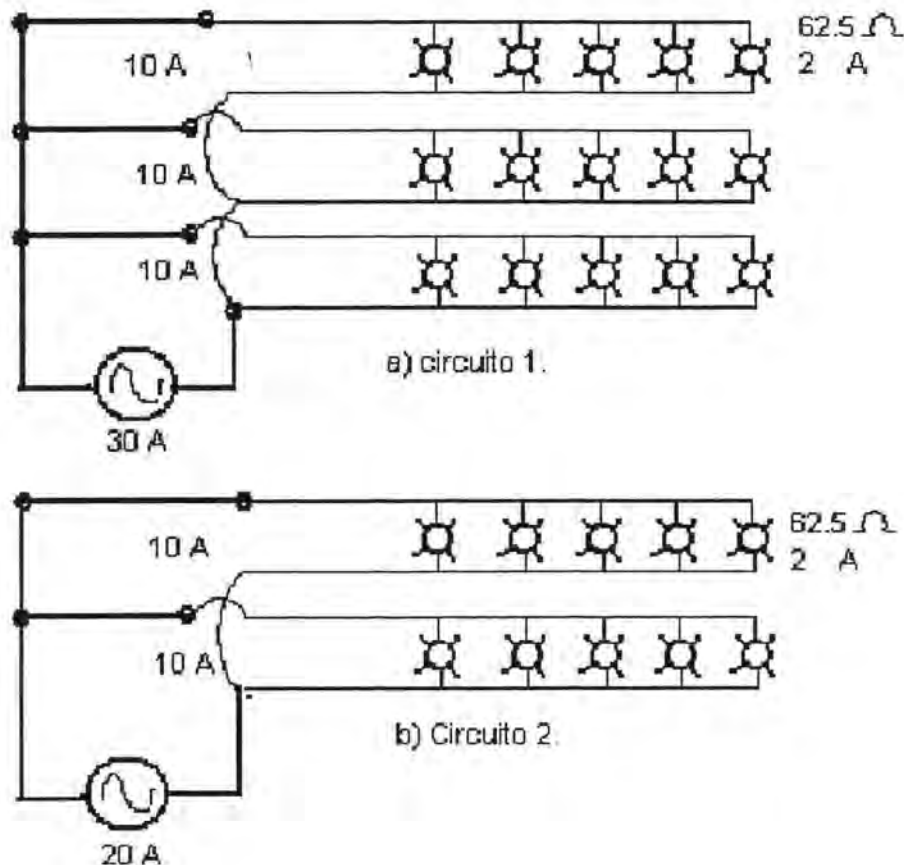


Figura 12.- Circuitos de conducción monofásicos del armado matricial dividido en dos circuitos (circuito 1 y 2).

Los conductores que van de las lámparas a el circuito central tienen una corriente de 10 A, y de acuerdo a la (tabla 210-24 de la) Norma Oficial Mexicana para Instalaciones Eléctricas (NOM)[10], referente a los requisitos para circuitos derivados, el calibre del conductor debe de ser de 14 AWG, para los conductores del circuito central que tienen una carga de 20 y 30 A para el circuito 1 y 2, y de acuerdo a la tabla 210-24 de la Norma NOM para instalaciones eléctricas, referente a los requisitos para circuitos derivados, el calibre del conductor debe de ser de 10 AWG.

2.5. Metodología para la Construcción del Simulador Solar:

Inicialmente, se realizó una investigación de tipos de lámparas incandescentes, teniendo como prioridad las de mayor voltaje, se solicitaron informes de las lámparas incandescentes disponibles en el mercado. Se analizó la información sobre lámparas incandescentes, y al final se escogió el reflector incandescente de 250W marca "Solar", por ser el de mayor potencia. La característica principal de la lámpara de incandescencia elegida es la ampolla de vidrio que tiene la forma de un foco común, pero de tamaño un poco mayor. En el interior tiene una capa reflectora. Se recibieron las lámparas y los soquets, luego se eligió un panel, y se determinó la forma de orden de las lámparas.

El armado de soquets y lámparas fue matricial de 5x5 a una distancia de 0.23m entre centro de cada soquet; antes de atornillarse, a cada soquet se conectaron dos cables de 15 cm cada uno atravesando la mampara, luego se atornillaron los soquets hasta completar la matriz. Ya atornillados se realizó la conexión eléctrica en paralelo formando 5 columnas de 5 soquets(Figura 13a), por último se colocaron las lámparas quedando como se muestra en la Figura 13b.

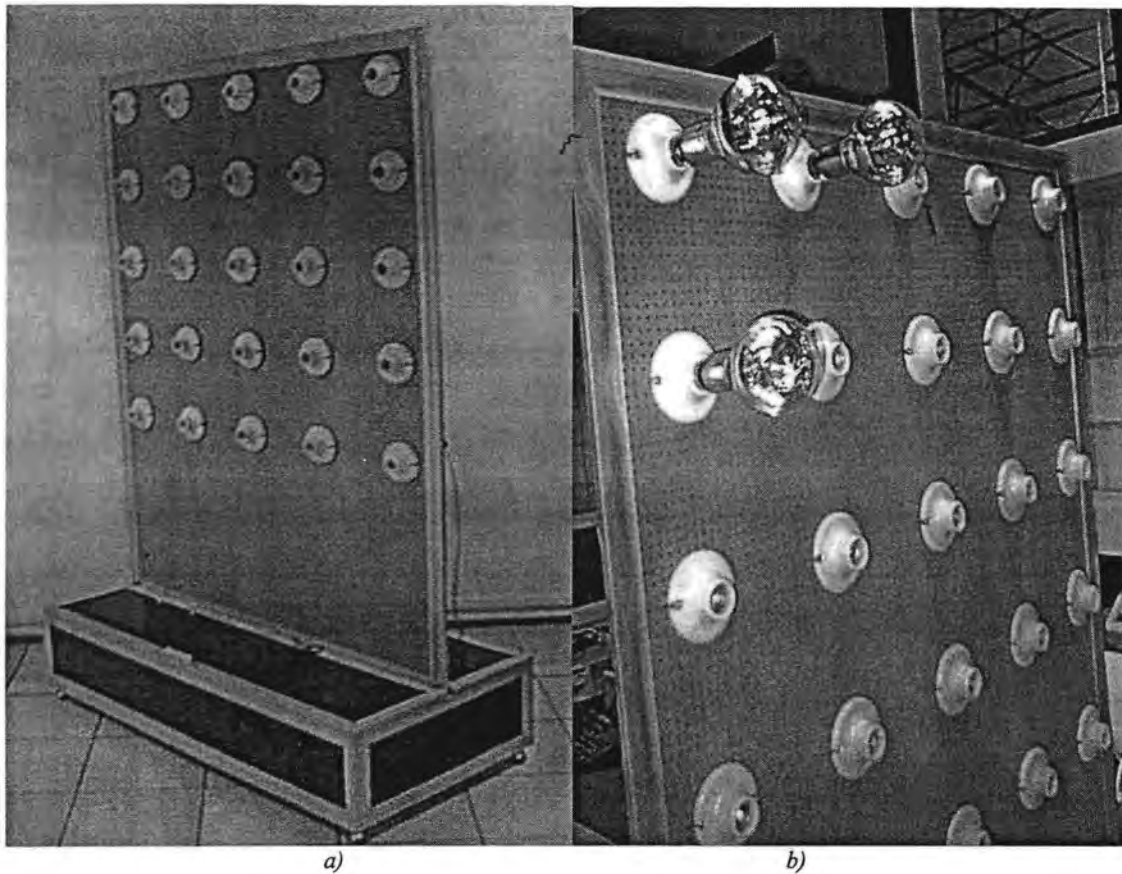


Figura 13.- a) Armado matricial de los soquets y cableado en la mampara y b) Colocación de lámparas.

La configuración quedó de esta manera: un plano de fuente de irradiancia de 25 lámparas en un arreglo matricial 5 x 5, con un área de 0.92 m X 0.92 m como se puede ver en la figura 14, y el plano receptor de medición al frente del plano de fuente de irradiancia a una distancia variable, idéntico tanto en área de medición como en nodos y sonde se colocó el piranómetro para registrar las mediciones. Para fines prácticos se designaron nombres a las filas de focos, la fila A en la parte superior con 5 focos, la fila B debajo de la A con 5 focos, la C con 5 focos, la d con 5 focos y la E con 5 focos igual; también las columnas se nombraron con números, de derecha a izquierda comenzando con el número 1 hasta el cinco, quedando la configuración como se observa en la Figura 14.

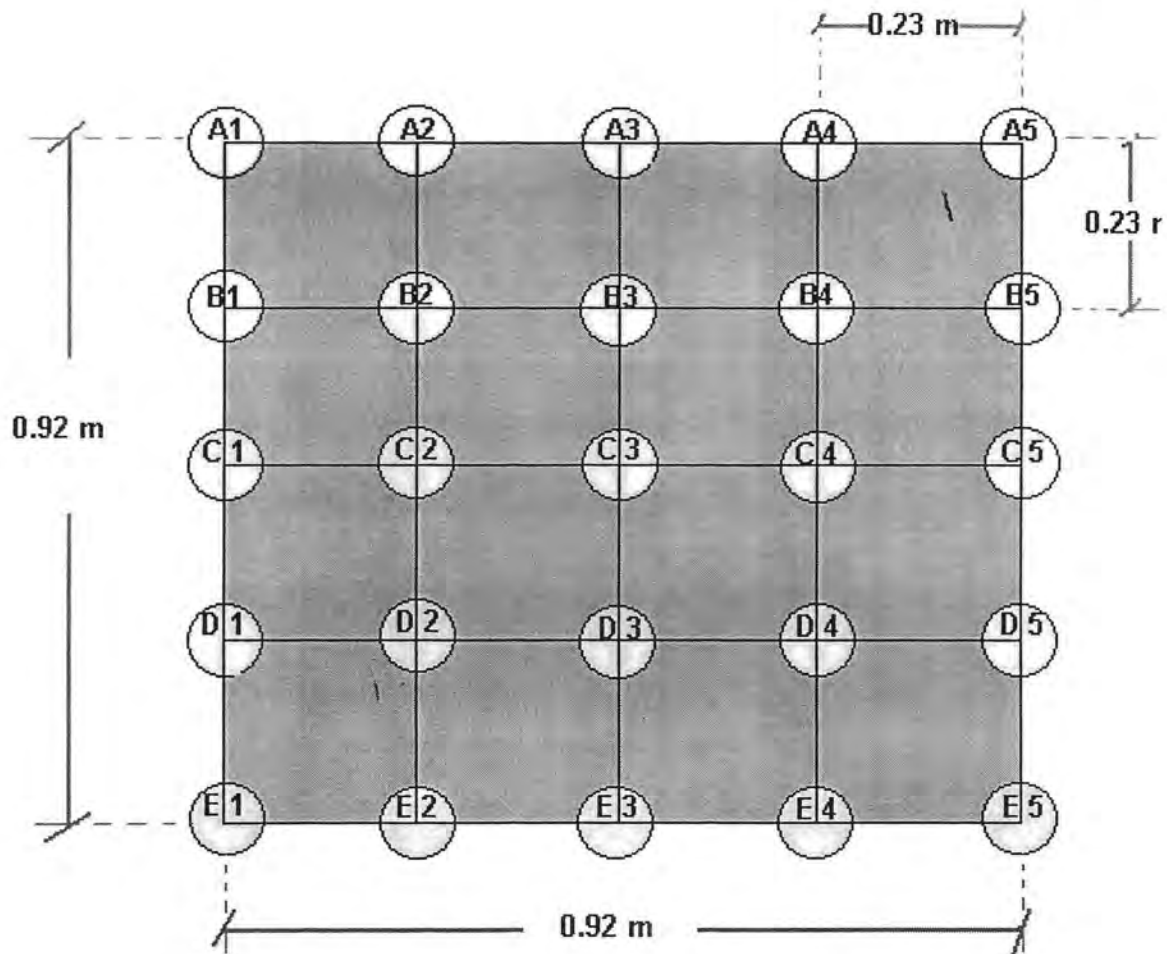


Figura. 14.- Configuración de plano fuente y plano receptor, para ambos es idéntica.

Armado el arreglo² se realizó una prueba de encendido de lámparas, se probó el encendido de cada columna una por una, para verificar que soportaran la carga y no hubiera fallas eléctricas(ver Figura 15). Luego se hicieron dos arreglos en paralelo, uno con dos columnas y otro con tres columnas para conectarse individualmente al momento de efectuar las pruebas.

² Durante el armado del arreglo surgieron problemas debido al peso de los soquets y las lámparas lo cual generó una ligera inclinación del panel, esto se solucionó sujetando la parte posterior contraria a las lámparas con la base, auxiliado con un nivel; otro problema fue el pandeo del panel debido también al peso de los soquets y las lámparas y a la falta de rigidez del panel, siendo este de madera delgada, esto se solucionó sujetando dos tablas rectas al panel.



Figura 15.- Prueba de funcionamiento de las lámparas y del cableado.

CAPITULO 3.- CARACTERIZACIÓN DEL SIMULADOR SOLAR

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los procedimientos utilizados para la caracterización del simulador solar. Para esta caracterización se usaron diversos arreglos variándose la distancia entre la fuente de irradiancia y el plano receptor de medición. Se realizaron mediciones de radiación en diversos puntos para caracterizar el comportamiento del simulador.

3.2. Procedimiento preliminar

El procedimiento para la caracterización del Simulador Solar consistió en montar el panel de la matriz de focos frente al plano de medición, este mismo sobre 4 ruedas para tener facilidad de movimiento, un tope, y un panel fijo donde se montó un piranómetro. Se determinó la distancia entre el sensor del piranómetro y las bombillas; esta configuración se muestra en la Figura 16, después se colocó una mesa como tope fijo para que al mover el piranómetro(a la derecha o izquierda) éste no se moviera hacia atrás o hacia delante.



Figura 16.- Vista de planta del área de experimentación.

3.3. Caracterización del simulador solar

- Primer paso

Al tope fijo³ se le marcó un punto de referencia donde se trazó una línea perpendicular al plano de medición y alineado al sensor del piranómetro, a este punto se le nombró "X", a los puntos de la fuente en el centro del haz de las bombillas fueron de la fila A(A1, A2, A3, A4, y A5); para efectuar las mediciones se alineó el punto "X" con el punto "A1" y se tomó la lectura, luego se alineó el punto "X" con el punto "A2" y se tomó la lectura, así sucesivamente se realizó el mismo procedimiento con los puntos A3, A4, y A5(Figura 17).

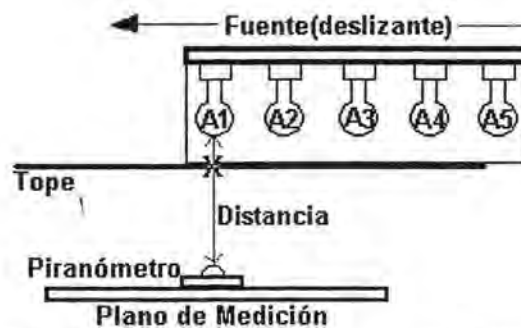


Figura 17.- Vista de planta del procedimiento para la caracterización.

3.4. Caracterización del simulador solar

- Segundo paso

El procedimiento anterior se realizó con el piranómetro alineado a la fila "A(A1, A2, A3, A4 y A5)". Para el segundo paso se deslizó el piranómetro hacia la fila "B" y se repitió el paso 1 con las filas C, D y E, completando así la medición en todos los puntos de la matriz, como se puede observar en la Figura 18.

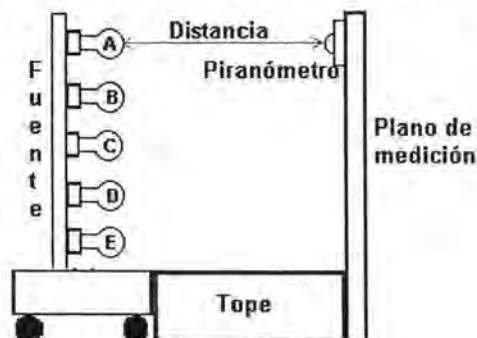


Figura 18.- Vista de perfil del procedimiento para la caracterización.

³ Cabe Mencionar que la distancia del tope fijo se determina con base en la distancia entre el sensor del piranómetro y las bombillas.

Se realizó la medición siguiendo el procedimiento antes mencionado, posteriormente se cambió la separación entre las lámparas y el detector y se repitieron los pasos uno y dos. Así se obtuvo una malla: para cada una de las distancias de separación entre la fuente de irradiancia y el plano de medición. Las mediciones se realizaron a muy baja luz ambiental para que no interfirieran con los experimentos; el proceso de medición se puede observar en la Figura 19.

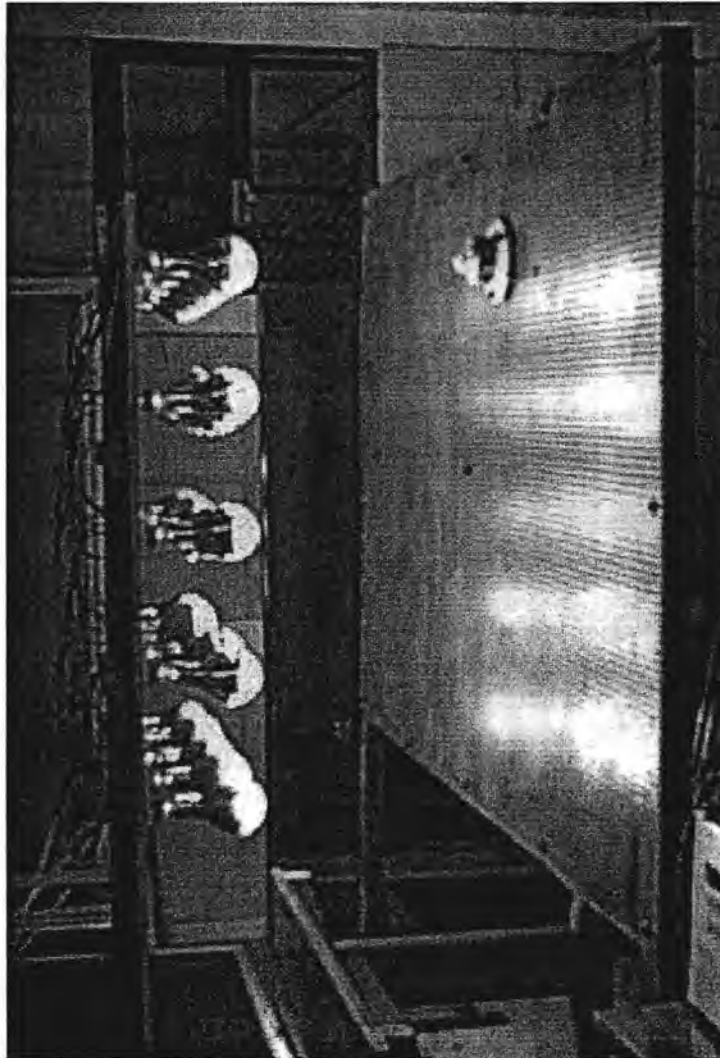


Figura 19.-Caracterización del simulador solar.

Como instrumentos de medición de la radiación se utilizaron, un piranómetro marca Eppley Mod. 8-48 que mide la radiación total, un multímetro digital marca Fluke Mod. 1WT65⁴, por último se utilizaron gafas oscuras con sombra No. 5 como protección visual del instrumentista, las gafas y el piranómetro pueden observarse en la Figura 20.

⁴ Para registrar los datos del piranómetro en mili-Volts para luego convertirlos en W/m^2 dividiendo los datos con un factor de 9.88×10^{-6} establecido de fábrica para el piranómetro.

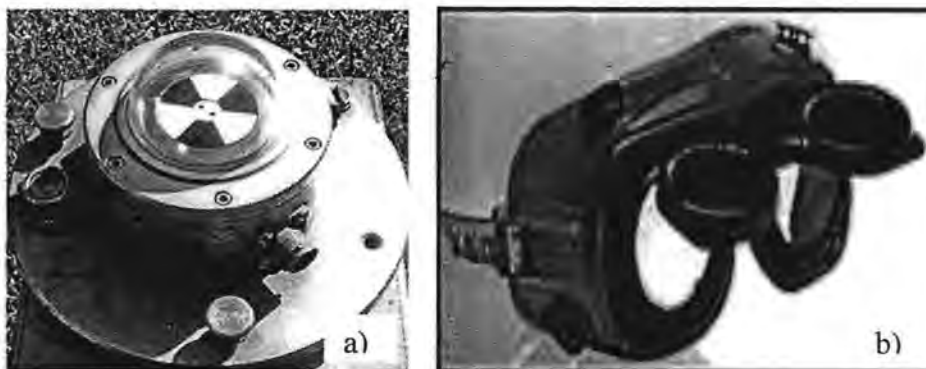


Figura 20.- a) Fotografía del Piranómetro y b) tipo de gafas utilizados en la experimentación.

3.5. Resultados de la distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una separación entre el área de medición y la fuente, de 0.37 m.

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para el arreglo matricial de 5 X 5 reflectores de 250 W de potencia cada uno a una distancia de separación de 0.37 m entre la superficie de medición y la fuente de luz. Se esperaba el máximo de radiación en el punto (C, 3) sin embargo a diversas condiciones externas las cuales no se pueden controlar, como la calidad de las lámparas, una fuente externa de luz (ventana) o el reflejo que puede dar alguna superficie como paredes o piso y propiciar una ganancia de radiación indeseable, en el caso de que el máximo de radiación se desplazó al punto (D,3) se debe al reflejo del piso.

Filas/Columnas	Irradiancia W/m ² (0.37 m)				
	1	2	3	4	5
A	799.5	1002.0	1255.0	910.9	860.3
B	981.7	1386.6	1821.8	1609.3	1143.7
C	1163.9	1508.0	1973.6	1791.4	1255.0
D	1123.4	1538.4	2054.6	1649.7	1275.3
E	931.1	1285.4	1336.0	1224.6	1022.2

Tabla 7.-Lecturas de cada uno de los puntos del arreglo matricial para una separación entre el plano de medición y la fuente de 0.37 m.

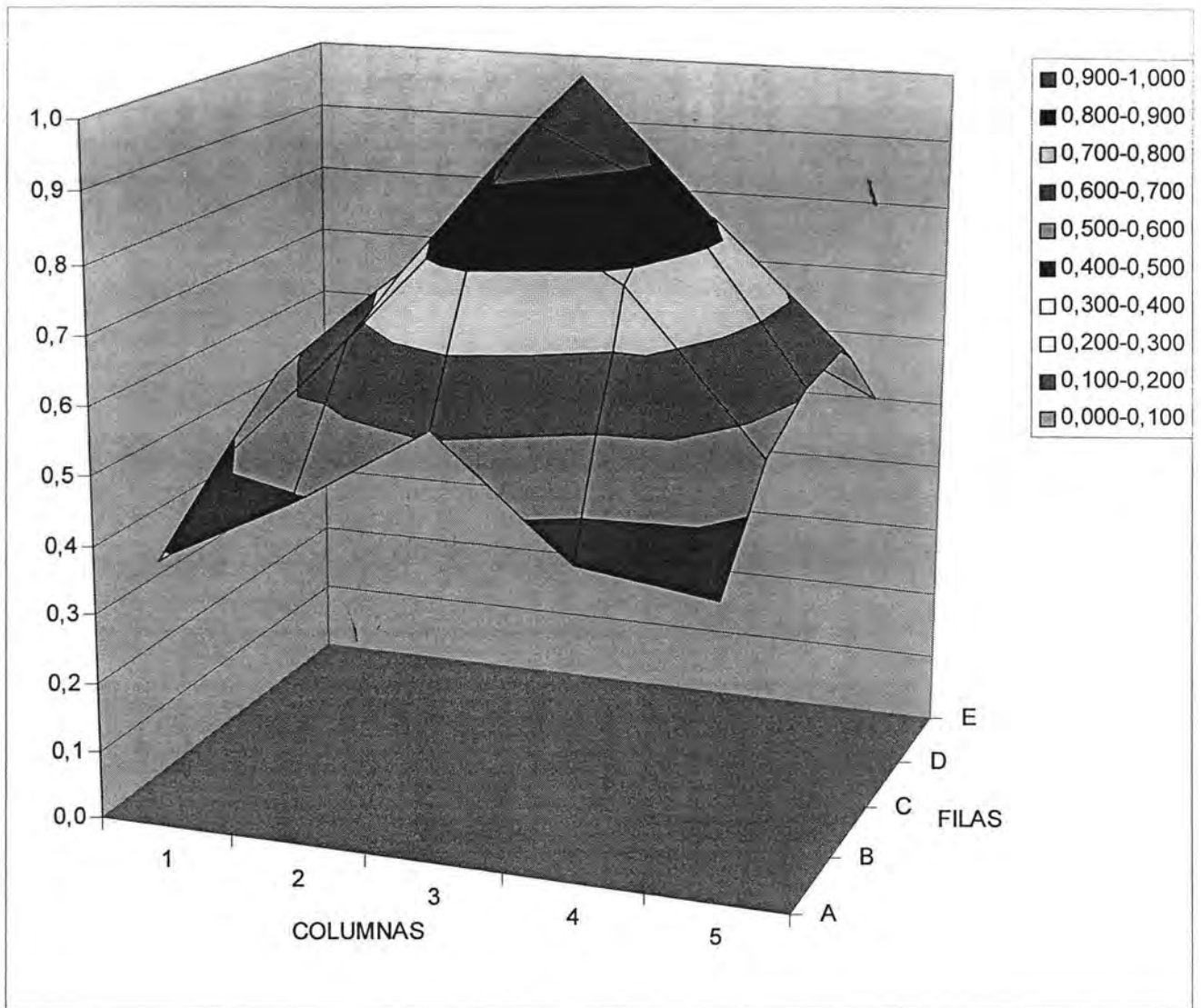


Figura 21.- Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.37 m(Los valores se presentan normalizados).

Los resultados obtenidos en la Tabla 7 permiten observar la distribución de los diferentes niveles de irradiancia del simulador y se muestran en la Figura 21. El máximo obtenido con esta configuración a una distancia de separación entre la fuente de luz y el plano de medición a 0.37 metros, se obtiene un máximo de $2,050 \text{ W/m}^2$. El perfil de irradiancia muestra diferentes niveles de irradiancia más curvos en la figura 21, indicando que la mayor parte de la luz que llega a la superficie de $0.92\text{m} \times 0.92\text{m}$ de área, se acumula en la parte central, además que existe una diferencia muy alta entre las lectura máxima y mínima de 160 %.

3.6. Resultados de la distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una separación entre el área de medición y la fuente, de 0.74 m.

En la Tabla 8 se muestran los resultados para el arreglo matricial de 5 X 5 reflectores de 250 Watts cada uno a una distancia de separación de 0.74 m entre la superficie de medición y la fuente de luz.

	Irradiancia W/m ² (0.74m)				
Filas/Columnas	1	2	3	4	5
A	536.4	678.1	759.1	668.0	587.0
B	607.3	819.8	941.3	830.0	617.4
C	688.3	880.6	1002.0	799.6	657.9
D	819.8	991.9	931.2	738.9	576.9
E	708.5	708.5	708.5	708.5	617.4

Tabla 8.-Lecturas de cada uno de los puntos del arreglo matricial para una separación entre el plano de medición y la fuente de 0.74 m.

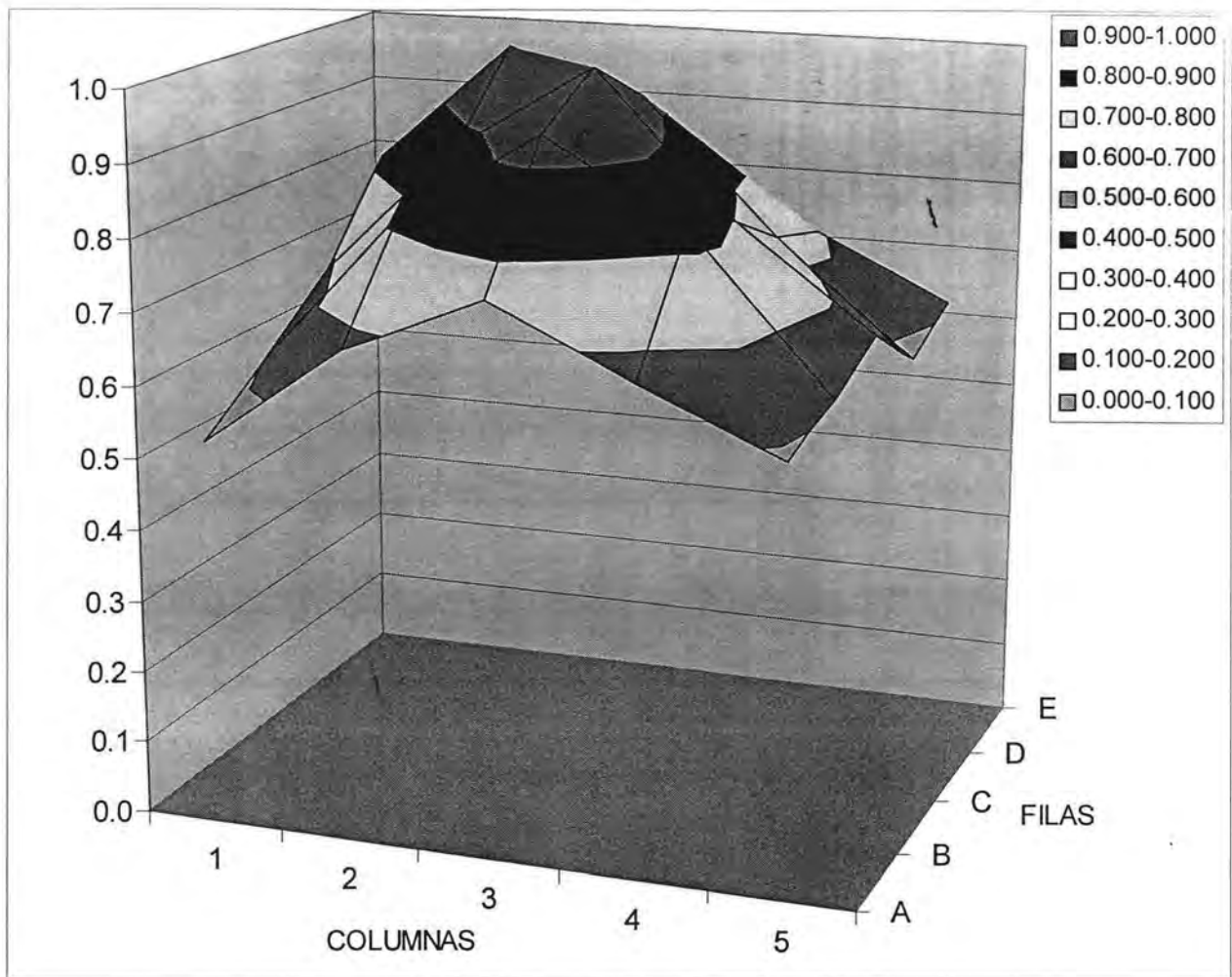


Figura 22.- Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.74 m (Los valores se presentan normalizados).

Los resultados observados en la Tabla 8 se pueden ver graficados en la Figura 22 en donde se observa la distribución de los diferentes niveles de irradiancia. En esta gráfica se deduce que utilizando el armado matricial de reflectores antes mencionado a una distancia de separación entre la fuente de luz y el plano de medición a 0.74 metros, se obtiene un máximo de $1,000 \text{ W/m}^2$. La distribución de los diferentes niveles de irradiancia muestra niveles menos curvos que la obtenida a 0.37m, indicando que la mayor parte de la luz que llega a la superficie de medición es relativamente aceptable ya que existe una diferencia entre la lectura máxima y mínima de 87%, esto a que hay mayor dispersión en la superficie de irradiancia global debido a que la distancia es mayor.

3.7. Resultados de la distribución de los diferentes niveles de irradiancias para una separación entre el área de medición y la fuente, de 1.11 m.

En la Tabla 9 se observan los resultados para el arreglo matricial de 5 X 5 reflectores de 250 Watts cada uno a una distancia de separación de 1.11 metros entre la superficie de medición y la fuente de separación.

	Irradiancia W/m ² (1.11m)				
Filas/Columnas	1	2	3	4	5
A	384.6	435.2	475.7	455.5	374.5
B	435.2	506.1	556.7	516.2	445.3
C	435.2	546.6	637.7	587.0	526.3
D	445.3	506.1	587.0	566.8	506.1
E	394.7	455.5	526.3	506.1	465.6

Tabla 9.-Lecturas de cada uno de los puntos del arreglo matricial para una separación entre el plano de medición y la fuente de 1.11 m.

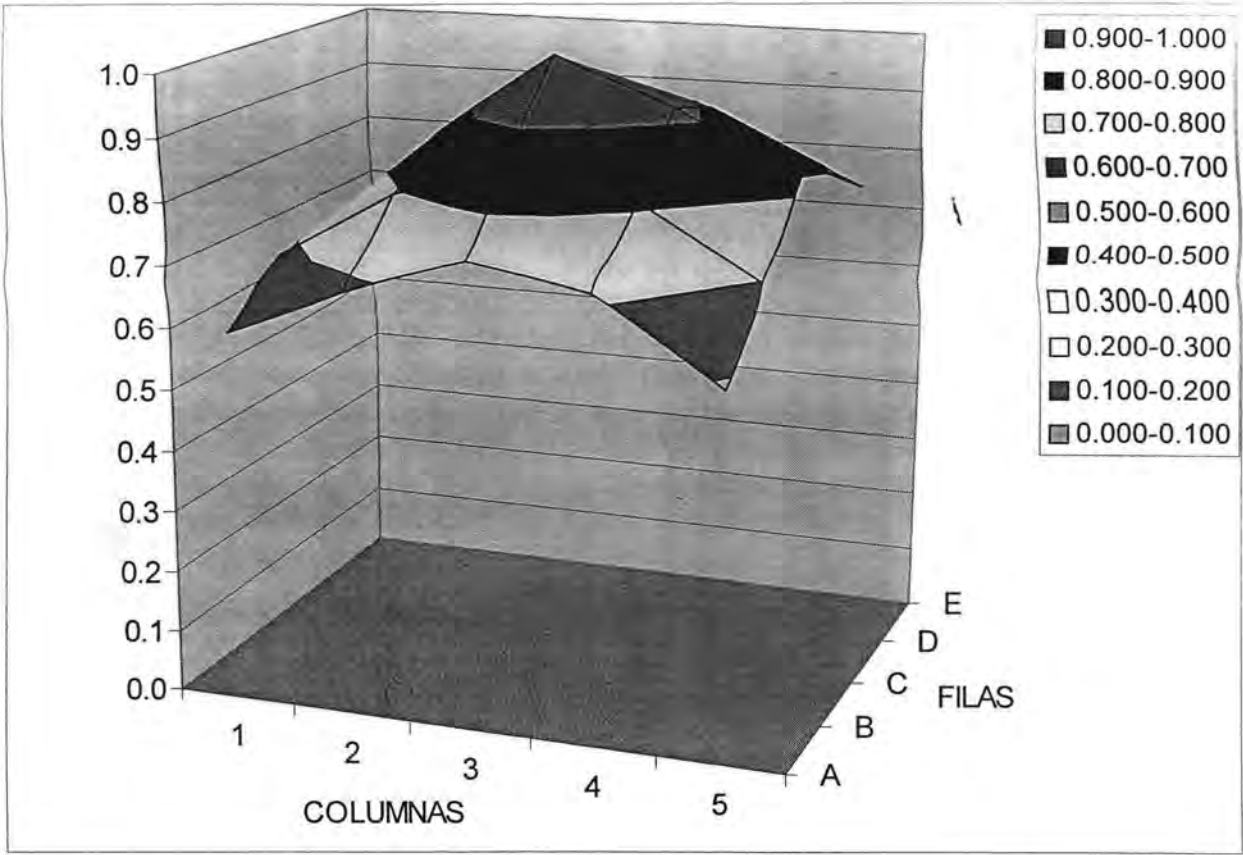


Fig. 23.- Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 1.11 m(Los valores se presentan normalizados).

Los resultados obtenidos en la Tabla 9 y que se observan en la distribución de los diferentes niveles de irradiancia en la Figura 23 permite deducir que utilizando el armado matricial de reflectores antes mencionado a una distancia de separación entre la fuente de luz y el plano de medición a 1.11 metros, se obtiene un máximo de 638 W/m^2 , la diferencia entre la lectura máxima y mínima es de 70 %.

La distribución de los diferentes niveles de irradiancia es menos curvo que los anteriores niveles de irradiancia, indicando que la mayor parte de la luz que llega a la superficie de $0.92\text{m} \times 0.92 \text{ m}$ de área, se acumula en la parte central. Se observa que la irradiancia es más uniforme que las anteriores debido a que la distancia es mayor que las anteriores gráficas entre el plano receptor y la fuente de luz. Estas caracterizaciones muestran niveles de irradiancia con concentración de lecturas altas en el centro y dispersión en los alrededores, estas se van haciendo más uniformes conforme mayor es la distancia entre el plano de medición y la fuente, sin embargo si se encuentra una distancia donde las lecturas sean uniformes la irradiancia será muy baja, por ello se han realizados pruebas cambiando la configuración de distribución de las lámparas, las cuales se describen a continuación.

3.8. Configuraciones.

Después de analizar los resultados obtenidos de las caracterizaciones se procedió a probar con distintas configuraciones a una distancia de 0.70 m, esta distancia anterior fue determinada tomando en cuenta el resultado de las configuraciones anteriores, porque se necesitaba obtener lecturas un tanto inferiores a la configuración con una distancia con 0.74 m de distancia entre la fuente y el plano de medición. Además es probable uniformizar las lecturas ya que no se encuentran muy alejadas entre sí. El objetivo principal de probar con distintas configuraciones es tratar de obtener un área uniforme de lecturas con el piranómetro. El criterio se basó tomando en cuenta que la configuración debe ser simétrica, las lámparas del centro deben tener la misma distancia de separación y no ser numerosas para no dar lecturas altas en las mediciones. El orden de las lámparas de la periferia debe ser simétrica, más numerosa de lámparas y más juntas para compensar las bajas lecturas observadas en la periferia de las caracterizaciones anteriores.

3.8.1. Configuración 1.

Esta primera configuración es un arreglo que consta de 16 lámparas, éste se observa en la Figura 24. Los resultados de las mediciones anotados en la Tabla 10 muestran que las filas A, B, C, que se cruzan con las columnas 2, 3, 4, son muy similares entre sí y se acercan mucho al objetivo perseguido. En la configuración mostrada en la Figura 25 se observa que se obtienen valores (ver tabla 10) en lugares sin lámparas pero esto es debido a que quedan dentro del campo de los haces de las lámparas de los alrededores.

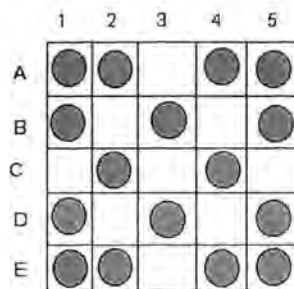


Figura 24.- Configuración 1 arreglo de 16 lámparas.

Filas /columnas	Irradiancia W/m ²				
	1	2	3	4	5
A	354	435	421	405	344
B	405	496	516	476	405
C	385	476	476	476	385
D	385	476	516	476	421
E	344	385	435	395	395

Tabla 10.- Resultado de lecturas de configuración número 1.

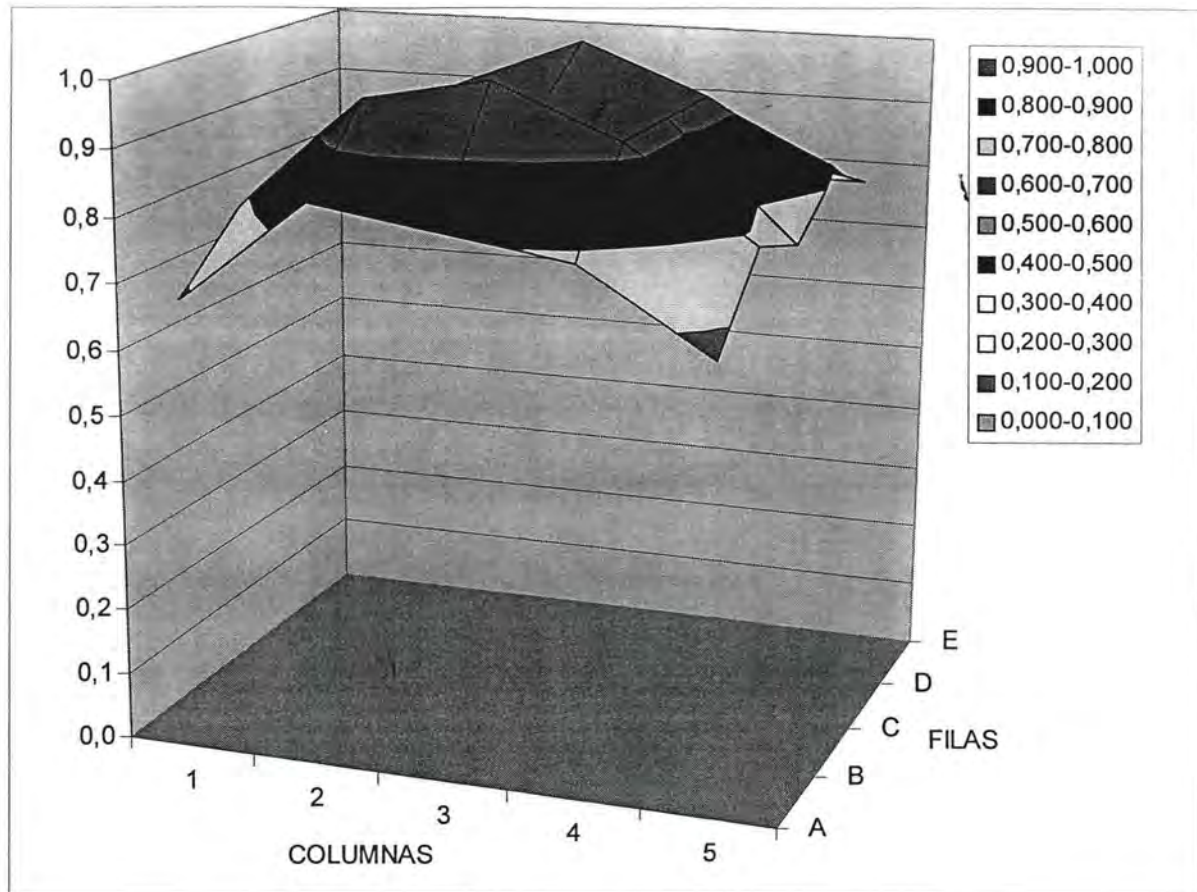


Figura 25 .- Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 1 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m(Los valores se presentan normalizados).

3.8.2. Configuración 2.

La segunda configuración es un arreglo que consta de 12 lámparas como se observa en la Figura 26. Los resultados de las mediciones anotados en la Tabla 11 muestran que las filas B, C, D, que se cruzan con las columnas 2, 3, 4, son muy similares, pero en el centro se observa una lectura muy alta(ver Figura 27); esta configuración no se acerca mucho al objetivo perseguido.

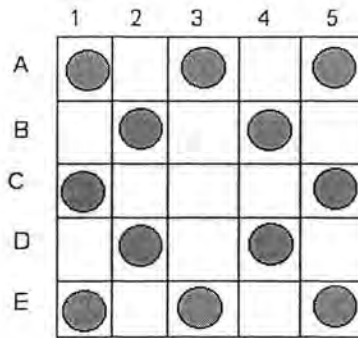


Figura 26 .- Configuración 2 arreglo de 12 lámparas.

Filas/Columnas	Irradiancia W/m ²				
	1	2	3	4	5
A	263	314	354	283	243
B	314	374	374	364	294
C	354	374	435	364	324
D	324	374	374	364	294
E	304	324	354	314	263

Tabla 11 .- Resultado de lecturas de configuración número 2.

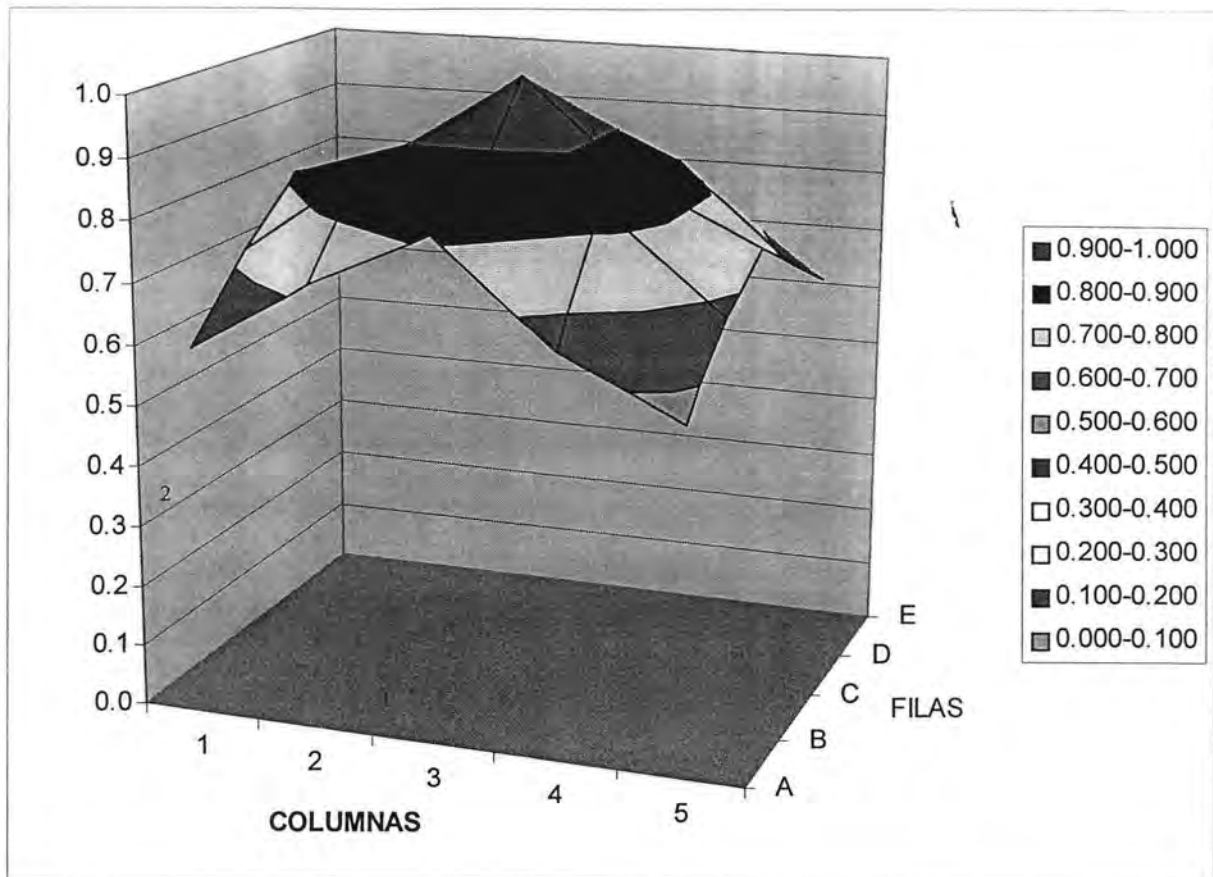


Figura 27.- Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 2 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m(Los valores se presentan normalizados).

3.8.3. Configuración 3.

La tercera configuración es un arreglo que consta de 12 lámparas como se observa en la Figura 28 . Los resultados de las mediciones anotados en la Tabla 12 muestran que las filas B, C, D, que se cruzan con las columnas 2, 3, 4, son similares; esta configuración se acerca al objetivo perseguido, pero por ser una configuración de pocas lámparas, se obtuvieron en general lecturas muy bajas como se observa en la Figura 29.

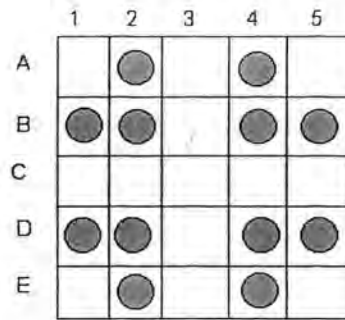


Figura 28 .- Configuración 3 arreglo de 12 lámparas.

Filas/Columnas	Irradiancia W/m ²				
	1	2	3	4	5
A	304	334	364	324	294
B	354	374	395	385	344
C	354	395	395	395	364
D	334	385	395	374	334
E	314	324	364	324	304

Tabla 12.- Resultado de lecturas de configuración número 3.

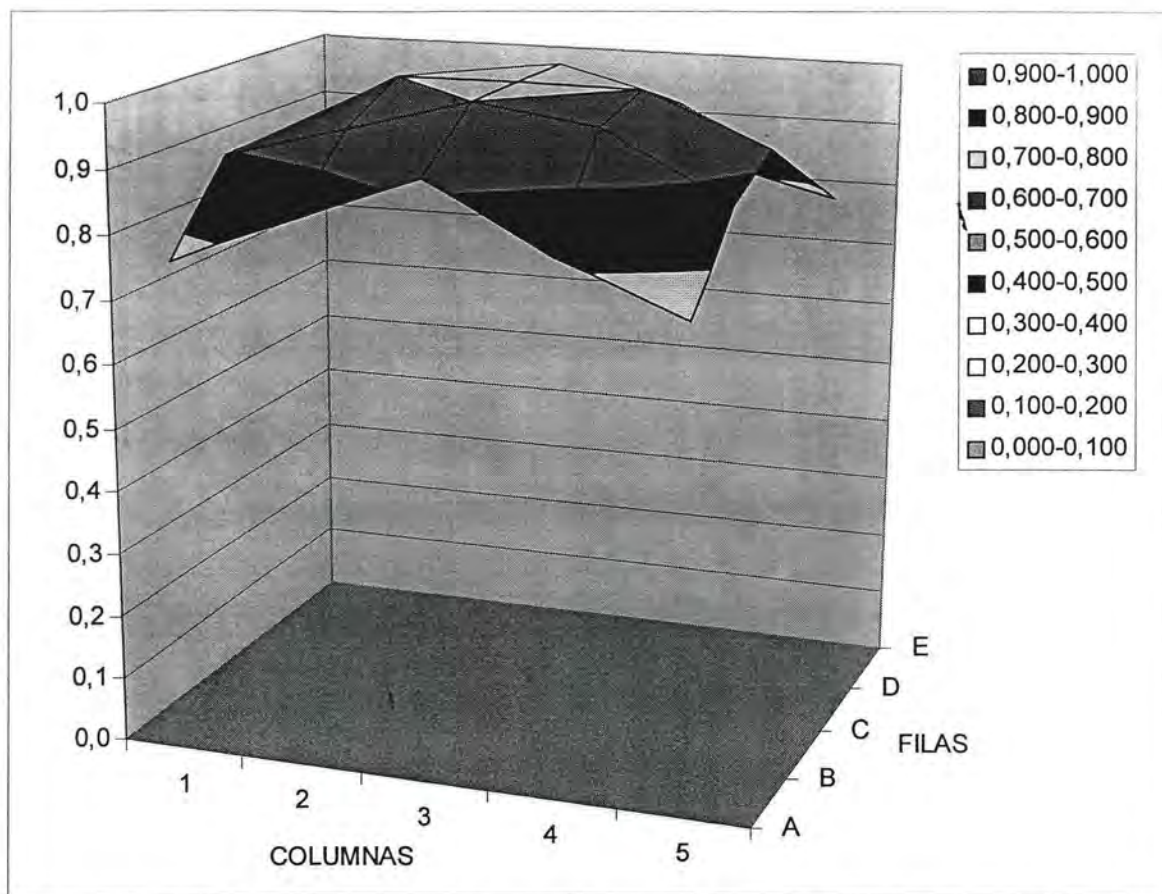


Figura 29.- Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia configuración 3 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m(Los valores se presentan normalizados).

3.8.4. Configuración 4.

Esta cuarta configuración es un arreglo que consta de 16 lámparas como se observa en la Figura 30 . Los resultados de las mediciones anotados en la Tabla 13 muestran que las filas A, B, C, que se cruzan con las columnas 2, 3, 4, no son similares; esta configuración no se acerca al objetivo perseguido, como puede observarse más gráficamente en la Figura 31.

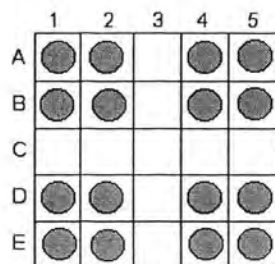


Figura 30.- Configuración 4 arreglo de 16 lámparas.

Filas/Columnas	Irradiancia W/m ²				
	1	2	3	4	5
A	394	425	435	384	364
B	414	455	465	445	404
C	425	506	485	485	404
D	404	455	455	445	404
E	394	425	435	384	364

Tabla 13.- Resultado de lecturas de configuración número 4.

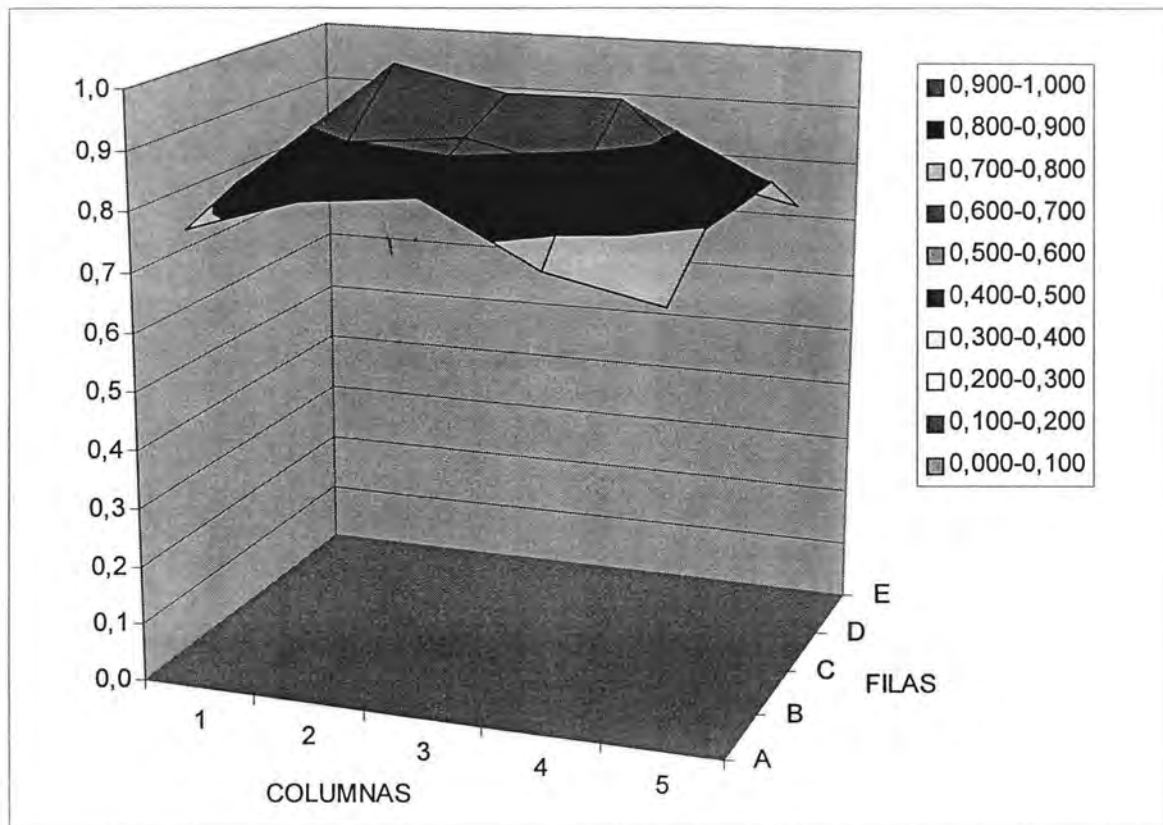


Figura 31.- Gráfica de *distribución de los diferentes niveles de irradiancia* de configuración 4 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m (Los valores se presentan normalizados).

3.8.5. Configuración 5.

Esta quinta configuración es un arreglo que consta de 20 lámparas, 16 de ellas distribuidas alrededor del borde y 4 en el centro; como se observa en la Figura 32.

Los resultados de las mediciones anotados en la Tabla 14 muestran que las filas B, C, D, que se cruzan con las columnas 2, 3, 4, no son uniformes; esta configuración no se acerca al objetivo perseguido, como puede observarse gráficamente en la Figura 33.

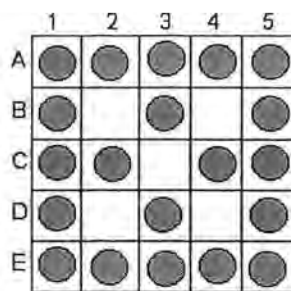


Figura 32.- Configuración 5 arreglo de 20 lámparas.

Irradiancia W/m ²					
Filas/Columnas	1	2	3	4	5
A	435	506	536	556	506
B	506	556	607	627	607
C	506	607	597	698	546
D	556	617	657	627	607
E	475	546	587	546	506

Tabla 14.- Resultado de lecturas de configuración número 5.

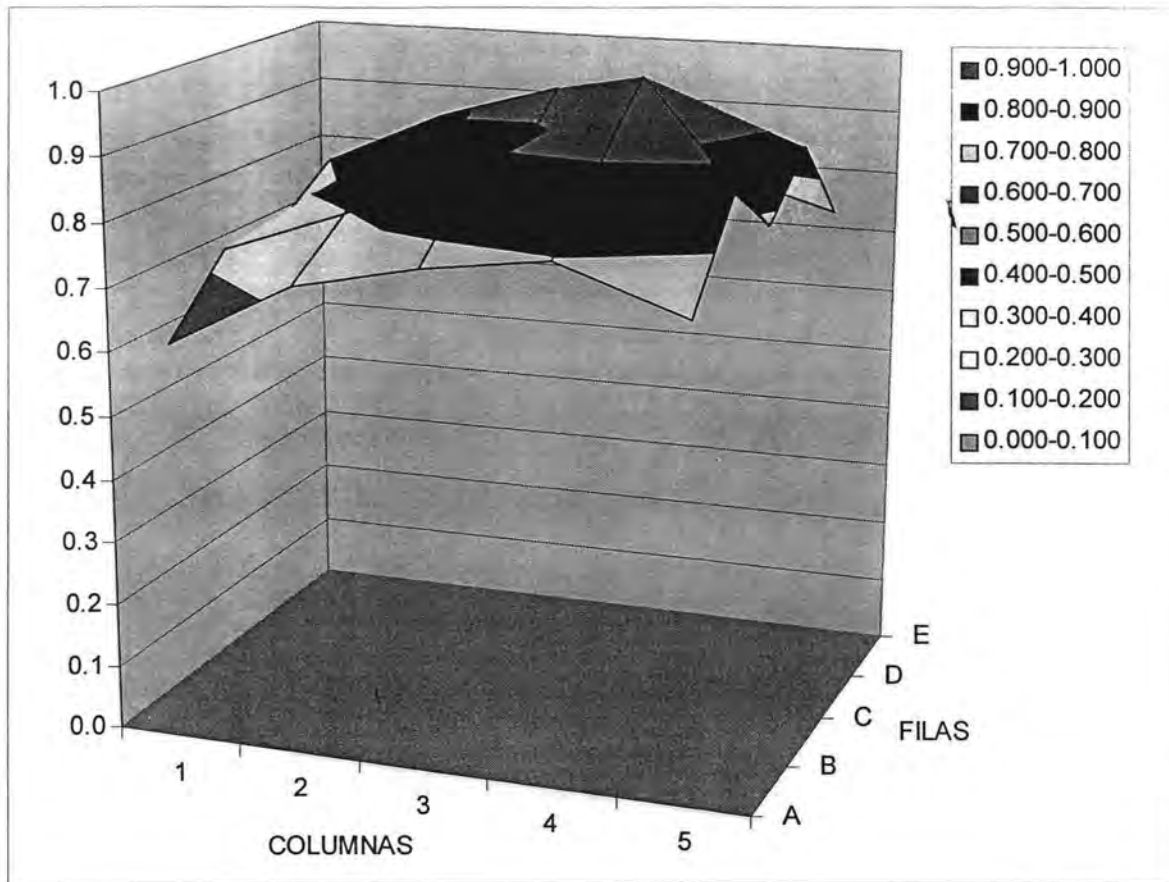


Figura 33.- Gráfica de distribución de los diferentes niveles de irradiancia de configuración 5 para una distancia de separación entre el plano de medición y la fuente de luz de 0.7 m (Los valores se presentan normalizados).

En la figura 33 se observa una distribución no homogénea de diferentes niveles de irradiancia por lo que se considera inadecuada esta distribución para realizar experimentos.

De las cinco configuraciones la configuración 3 fue la de mejor distribución debido a que presenta un área uniforme de 0.1056 m^2 en la parte central con 0.325 m de lado y lecturas altas de un máximo de $395 \text{ W /m}^2 \text{ } ^\circ$ como puede observarse de color azul en la Figura 34, por lo que se puede afirmar que es un excelente área para realizar experimentos.

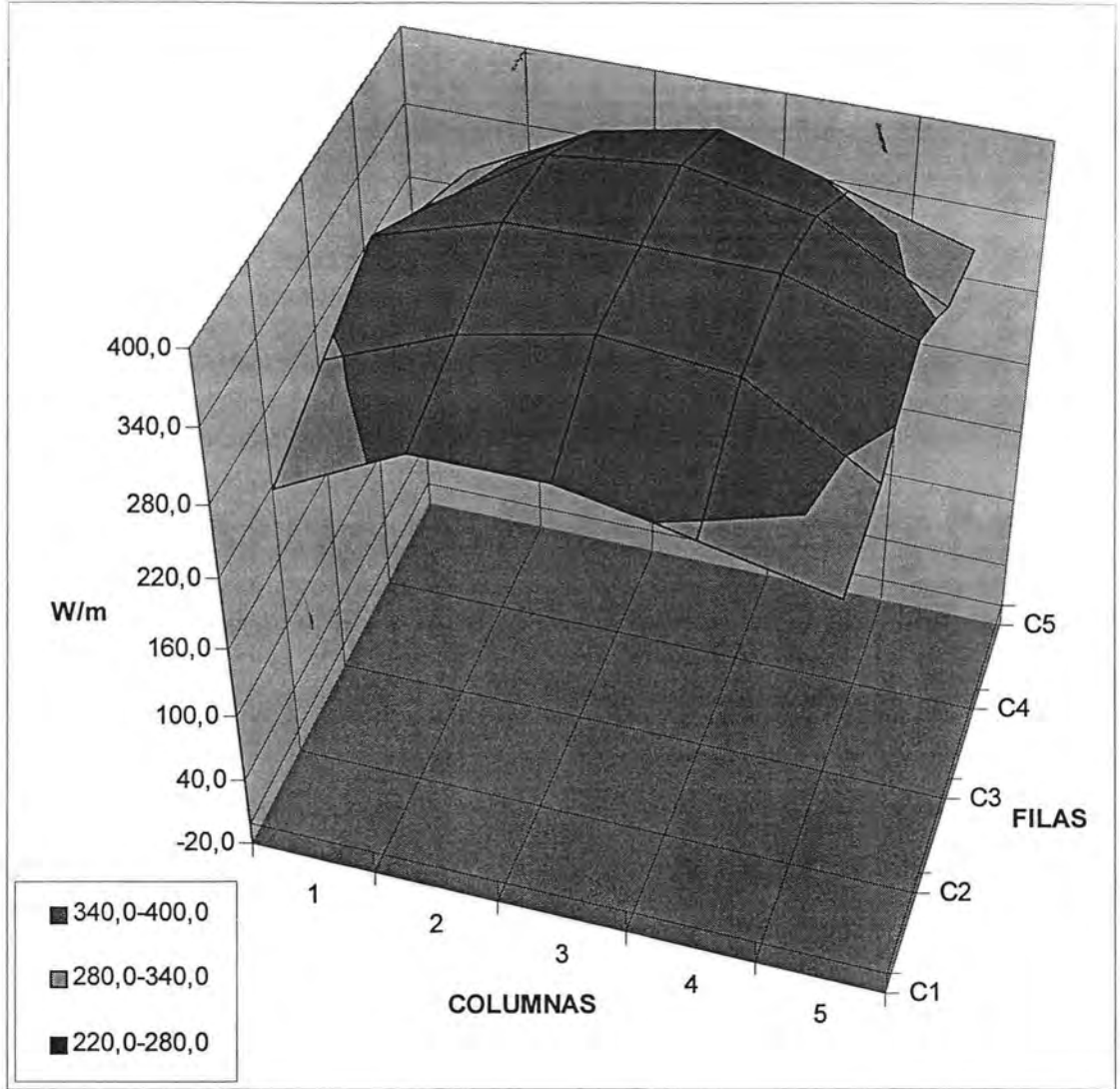


Figura 34.- Gráfica de área uniforme obtenida para la configuración 3 en la parte central de la malla.

CAPITULO 4.- Conclusiones

Se diseñó, construyó y caracterizó un simulador solar con un arreglo de lámparas incandescentes PAR (Reflector de Aluminio Parabólico), para establecer su comportamiento en distintos niveles de irradiancia, realizar distintas configuraciones, y como consecuencia determinar la mejor configuración donde las lecturas sean uniformes en un área de tamaño razonable y se puedan efectuar experimentos de simulación solar.

Para el diseño del simulador solar que se construyó, se eligió la lámpara incandescente debido a su factibilidad técnica, la conexión, el costo y el mantenimiento además que cubre el espectro de radiación visible requerido para nuestro objetivo y la tendencia a la frecuencia infrarroja de este tipo de lámparas, que da como resultado el problema de calor no deseado pero a la vez que puede ser tolerado. Debido a que el objetivo del trabajo es el aprendizaje, que este trabajo puede dar, tiene una gran importancia porque es el primer proyecto de este tipo que se realiza en la División de Ciencias e Ingenierías y puede servir como base para ser perfeccionado, o se realicen más trabajos de este tipo.

Se realizó una búsqueda de antecedentes acerca de otros trabajos relacionados con simulación solar, los cuales nos dieron una buena referencia para la realización correcta del proyecto, a continuación se realizó una investigación de normas de iluminantes para simular la radiación del Sol. Se encontraron las Normas de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) las cuales nos dieron bases para la utilización de lámparas incandescentes para simular la radiación visible del Sol. Como siguiente paso se determinó el orden y el número de lámparas en orden matricial, esto se determinó previamente para realizar el cálculo de los conductores que proporcionaron energía eléctrica a las lámparas para el funcionamiento adecuado del simulador solar.

Para la metodología del simulador Solar se eligieron lámparas incandescentes de mayor voltaje del mercado de marca "Solar" de 250 W. Se eligió un panel el cual se midió y determinó el orden de cómo serían montadas las lámparas: primero se montaron los soquets en el panel, luego se realizó la instalación eléctrica de los conductores la conexión correspondiente, de último se colocaron las lámparas. Ya realizados estos pasos se procedió a probar el funcionamiento correcto de el simulador solar dándole tensión eléctrica a las lámparas por columnas de a cinco, hasta de último se realizó una prueba con todas las lámparas juntas.

Como procedimiento preliminar para la caracterización se instaló un panel fijo frente al simulador solar en el cual se monto el piranómetro, mismo al que se le dio el nombre de plano de medición con un área igual a la de la fuente de irradiancia donde se encontraban las lámparas, la fuente se monto en un plano movable para adecuarse a las distancias a las que se realizaron las mediciones.

La primera caracterización se realizó a una distancia de separación entre el área de medición y la fuente, de 0.37 m, donde los valores de la gráfica se presentan normalizados, en la gráfica se puede observar un cono invertido en donde el valor máximo se encuentra en el centro y es de valor 1, también se observa que los valores van siendo menores en la periferia, hasta un poco menor de 0.4, es claro que existe una diferencia notoria entre los valores máximos y mínimos. La segunda caracterización se realizó a una distancia de separación entre el área de medición y la fuente, de 0.74 m, donde los valores de la gráfica se presentan normalizados, se observa que la altura del cono es menor arriba del 0.5 hasta 1, vemos que la distancia afecta de esta manera haciendo menos pronunciado el cono. La tercera caracterización se realizó a una distancia de separación entre el área de medición y la fuente, de 1.10 m, donde los valores de la gráfica se presentan normalizados, se observa que a esta distancia la dispersión de la irradiancia es mayor debido a que el cono es mas pequeño de 0.6 hasta 1 con respecto a las caracterizaciones anteriores.

Esta caracterización nos dio información muy importante en la cual se observa que a medida que se aleja el plano de medición de la fuente disminuye la radiación y el cono se vuelve más plano debido a la dispersión de la luz, también ayudaron a determinar la distancia para la realización de las caracterizaciones, esta distancia se determinó teniendo en cuenta que en las caracterizaciones hay una reducción de lámparas aproximadamente de entre un 40 y 60%, dependiendo de la caracterización, debido a eso la irradiancia se reduce bastante y la dispersión es mayor.

Cabe mencionar que aunque se esperaba que la relación de radiaciones dependiera de manera inversa con el cuadrado de la distancia, esto no ocurrió, sino que se aproxima más a un comportamiento polinomial tal como se ve en la Figura 35. Esta curva corresponde a la medición en el nodo central C3

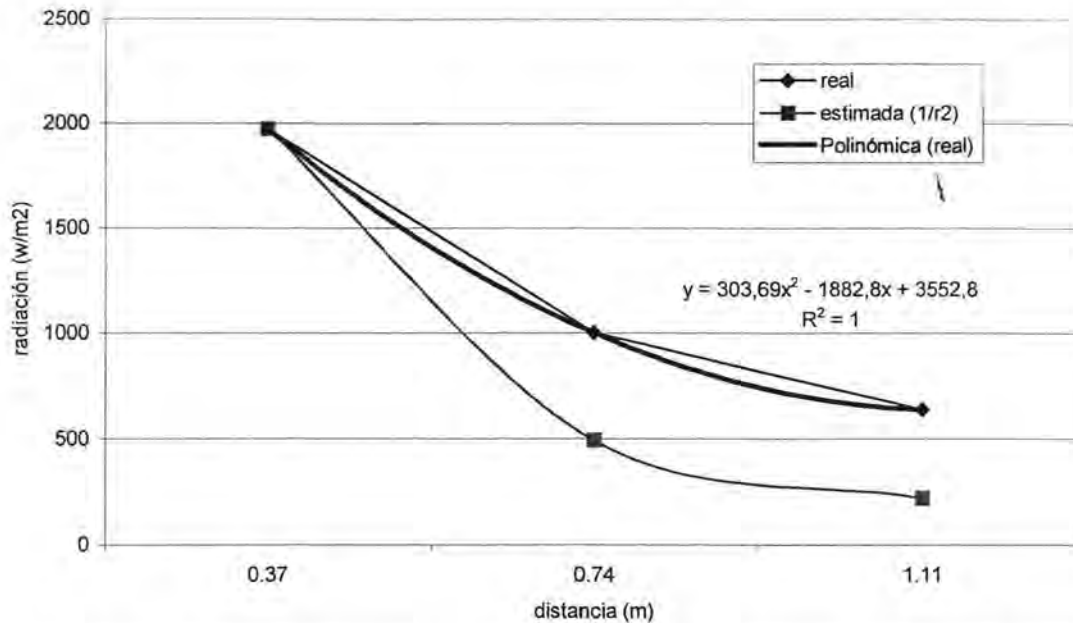


Figura 35.- Gráfica de área uniforme obtenida para la configuración 3 en la parte central de la malla.

Esto se debe principalmente a la suma de los efectos de las lámparas adyacentes.

$$y = a(x - (b/a))^2 + (c - (b^2/4a))$$

$$a = 303.69$$

$$b = 1882.8$$

$$c = 3552.8$$

Así $c - (b^2/4a)$; es la luz parásita en el experimento
 "a" sería por la distribución de las lámparas

$$c - (b^2/4a) = 2921.13$$

Después de analizar los resultados obtenidos de las caracterizaciones se procedió a probar con distintas configuraciones a una distancia de 0.70 m, el objetivo de probar con distintas configuraciones fue tratar de obtener un área uniforme de lecturas con el piranómetro, como se presentaría con irradiancia natural, esta área no tiene que ser la totalidad del área de medición, sino que puede de un tamaño relativamente pequeño donde se puedan realizar experimentos.

A las configuraciones se les nombro por números comenzando por el número 1 y así sucesivamente hasta la 5, la configuración 1 se realizó con 16 lámparas de

manera que estuvieran ordenadas simétricamente, fueran más numerosas en la periferia y menos numerosas en el centro para revertir la experiencia de lecturas mayores del centro tomadas de las caracterizaciones. Como resultado se obtuvo una gráfica con lecturas que mostraron una diferencia de 121 W/m^2 , entre la lectura mayor y la menor, el resultado no fue óptimo para el objetivo perseguido.

La configuración 2 se realizó con un arreglo de 12 lámparas siguiendo los mismos parámetros, y se obtuvo una gráfica con lecturas que mostraron una diferencia de 199 W/m^2 , entre la lectura mayor y menor, el resultado tampoco fue óptimo para el objetivo perseguido.

La configuración 3 se realizó con un arreglo de 12 lámparas siguiendo los mismos parámetros, y se obtuvo una gráfica con lecturas que mostraron una diferencia de 91 W/m^2 , entre la lectura mayor y menor, la diferencia fue relativamente alta, pero presenta un área de lecturas uniformes en el centro siendo óptima para nuestro objetivo perseguido.

La configuración 4 se realizó con un arreglo de 16 lámparas siguiendo los mismos parámetros, y se obtuvo una gráfica con lecturas que mostraron una diferencia de 142 W/m^2 , entre la lectura mayor y menor, el resultado tampoco fue óptimo para el objetivo perseguido.

La configuración 5 se realizó con un arreglo de 20 lámparas siguiendo los mismos parámetros, y se obtuvo una gráfica con lecturas que mostraron una diferencia de 236 W/m^2 , entre la lectura mayor y menor, el resultado tampoco fue óptimo para el objetivo perseguido.

Con estas distintas configuraciones a la misma distancia y se encontró que la uniformidad y la intensidad de la irradiancia dependen de la configuración del arreglo empleado, y el número de lámparas en cada configuración.

De 5 configuraciones que se realizaron se obtuvo una con muy buenos resultados, la configuración 3 en un área de $0.46 \times 0.46 \text{ m}$ en la parte central del plano de medición, en la que se obtuvieron lecturas muy parejas pero muy bajas (395 W/m^2) de acuerdo a la radiación solar normal máxima de 1000 W/m^2 que se pretendía llegar sin embargo con este proyecto se aporta bases de gran utilidad para el mejoramiento futuro del simulador solar ya que es el primer trabajo de este tipo

Este trabajo es solo una parte de otro proyecto más grande que integra otros proyectos relacionados con el tema, por lo que puede tener continuación y ser perfeccionado en un futuro. Como recomendación para el perfeccionamiento del Simulador solar es necesario la que se encuentre aislado de toda radiación que pueda afectar las lecturas, para esto puede ser aislado con cortinas negras, así como pintar de negro tanto el plano de medición como el panel de la fuente de luz dado que este color absorbe la luz y no la refleja.

Bibliografía.

- [1] Fuente de Luz., Antonio de la Cruz Castillo. Editorial Paraninfo, 1992. pp 15-70.
- [2] <http://edison.upc.es/curs/llum/indice0.html> Página web o sitio de internet de información de tipos de lámparas.
- [3] McMillan , J.A., Peterson, Technical Note., SOLAR SIMULATION WITH TUNGSTEN-HALOGEN QUARZ LAMPS AND OPTICAL FILTERS, Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439, U.S.A. Solar Energy, Vol.22, pp. 467-469, 1979.
- [4] Krusi, P. And Schimid, R., THE SC1100 W LAMP AS A SOURCE FOR SOLAR RADATION SIMULATION, Solar Energy, Vol. 30, No. 5, pag., 445-462, Department of Mechanical Engineering, University of Sydney, Sydney. N.S.W. 2006, Australia, 1983.
- [5] Govaer, David , INDOOR COLLECTOR TESTING UIT AN INCANDESCENT SIMULATOR, Solar Energy, Vol. 40, No. 4, p. 363-368. Center for Energy Research/ Education / Service, Ball State University, Muncie, IN 47306, U.S.A. 1988.
- [6] Kenny, S.P. y Davidson, J.H., DESIGN OF A MULTIPLE-LAMP LARGE-SCALE SOLAR SIMULATOR., Transactions of the ASME., Vol. 116 pág., 200-205,1994.
- [7] *Determinación de coeficientes de sombreado de vidrios laminados con dos vidrios solares.* XXIII Semana Nacional de Energía Solar. Memoria descriptiva. Asociación Nacional de Energía Solar, A.C. 1999. Pág. 280-284.
- [8] *Estudio de los patrones de flujo radiativo de lámparas de Tungsteno-Halógeno para un simulador solar,* G. Alvarez, XXII Semana Nacional de Energía Solar. Memoria descriptiva. Asociación Nacional de Energía Solar, A.C. 1999. Pág. 411-416.
- [9] SIMULADOR SOLAR PARA LA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE TECHUMBRES. XXVI Semana Nacional de Energía Solar. Memoria descriptiva. Asociación Nacional de Energía Solar, A.C. 2002. Pág. 21- 24.
- [10] Norma NOM (Norma de Instalaciones Eléctricas Mexicanas).

Apéndice.

La luz, al igual que las ondas de radio, los rayos X o los gamma es una forma de energía. La energía se mide en joules (J) en el Sistema Internacional. No toda la luz emitida por una fuente llega al ojo y produce sensación luminosa, ni toda la energía que consume, por ejemplo, una bombilla se convierte en luz. Todo esto se ha de evaluar de alguna manera y para ello definiremos nuevas magnitudes: el flujo luminoso, la intensidad luminosa, la iluminancia, la luminancia, el rendimiento o eficiencia luminosa y la cantidad de luz.

Flujo luminoso.

Para hacerte una primera idea se considera dos bombillas, una de 25 W y otra de 60 W. Está claro que la de 60 W dará una luz más intensa. Pues bien, esta es la idea: ¿cuál luce más? o dicho de otra forma ¿cuánto luce cada bombilla?



Cuando se habla de 25 W o 60 W nos referimos sólo a la potencia consumida por la bombilla de la cual solo una parte se convierte en luz visible, es el llamado flujo luminoso. Se podría medir en watts (W), pero parece más sencillo definir una nueva unidad, el **lumen**, que tome como referencia la radiación visible. Empíricamente se demuestra que a una radiación de 555 nm de 1 W de potencia emitida por un cuerpo negro le corresponden 683 lumen.

Se define el **flujo luminoso** como la potencia (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su símbolo es Φ y su unidad es el lumen (lm). A la relación entre watts y lúmenes se le llama **equivalente luminoso de la energía** y equivale a:

$$1 \text{ watt-luz a } 555 \text{ nm} = 683 \text{ lm}$$


Flujo luminoso	Símbolo: Φ
	Unidad: lumen (lm)

Intensidad luminosa.

El flujo luminoso nos da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente de luz, por ejemplo una bombilla, en todas las direcciones del espacio. Por contrario, si pensamos en un proyector es fácil ver que sólo ilumina en una dirección. Parece claro que se necesita conocer cómo se distribuye el flujo en cada dirección del espacio y para eso se define la intensidad luminosa.



Se conoce como **intensidad luminosa** al flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta. Su símbolo es I y su unidad la candela (cd).

<p>Intensidad luminosa</p> $I = \frac{\Phi}{\omega}$	<p>Símbolo: I</p> <p>Unidad: candela (cd)</p>	
--	---	--

Iluminancia.

Como ejemplo, si se pone la mano delante de la linterna podemos ver esta fuertemente iluminada por un círculo pequeño y si se ilumina una pared lejana el círculo es grande y la luz débil. Esta sencilla experiencia recoge muy bien el concepto de iluminancia.



Concepto de iluminancia.

Se define **iluminancia** como el flujo luminoso recibido por una superficie. Su símbolo es E y su unidad el lux (lx) que es un lm/m^2 .

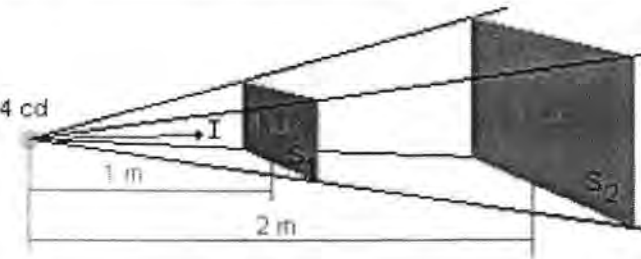
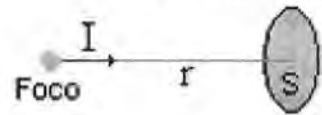
<p>Iluminancia</p> $E = \frac{\Phi}{S}$	<p>Símbolo: E</p> <p>Unidad: lux (lx)</p>	$\text{lux} = \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$
---	---	--

Existe también otra unidad, el *foot-candle* (fc), utilizada en países de habla inglesa cuya relación con el lux es:

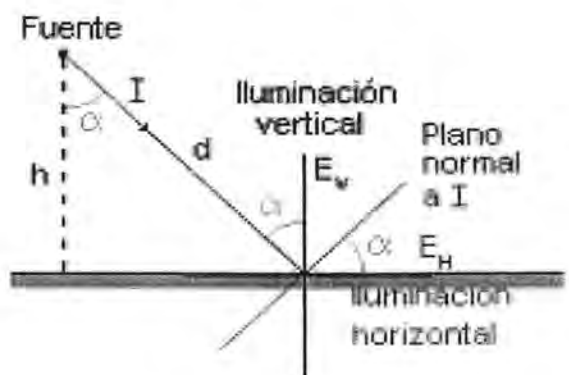
$$1 \text{ fc} \approx 10 \text{ lx}$$

$$1 \text{ lx} \approx 0.1 \text{ fc}$$

En el ejemplo de la linterna ya pudimos ver que la iluminancia depende de la distancia del foco al objeto iluminado. Es algo similar a lo que ocurre cuando oímos alejarse a un coche; al principio se oye alto y claro, pero después va disminuyendo hasta perderse. Lo que ocurre con la iluminancia se conoce por la **ley inversa de los cuadrados** que relaciona la intensidad luminosa (I) y la distancia a la fuente. Esta ley solo es válida si la dirección del rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie.

<p>Ley inversa de los cuadrados</p> $E = \frac{I}{r^2}$		<p>Iluminancia = $\frac{\text{Intensidad luminosa}}{\text{Cuadrado distancia}}$</p> 
---	---	--

¿Qué ocurre si el rayo no es perpendicular? En este caso hay que descomponer la iluminancia recibida en una componente horizontal y en otra vertical a la superficie.



$$E_H = \frac{I \cdot \cos \alpha}{d^2}$$

$$E_V = \frac{I \cdot \sin \alpha}{d^2} = E_H \cdot \tan \alpha$$

A la componente horizontal de la iluminancia (E_H) se le conoce como la **ley del coseno**. Es fácil ver que si $\alpha = 0$ nos queda la ley inversa de los cuadrados.

Si expresamos E_H y E_V en función de la distancia del foco a la superficie (h) nos queda:

$$E_H = \frac{I \cdot \cos^3 \alpha}{h^2}$$

$$E_V = \frac{I \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{h^2}$$

En general, si un punto está iluminado por más de una lámpara su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas:

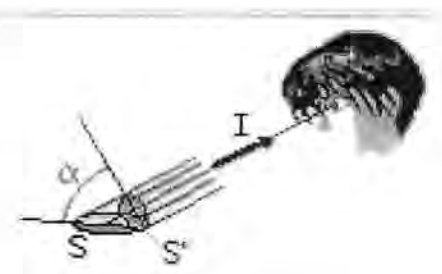
$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^3 \alpha_i}{h_i^2}$$

$$E_V = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \sin \alpha_i}{h_i^2}$$

Luminancia.

Hasta ahora se ha hablado de magnitudes que informan sobre propiedades de las fuentes de luz (flujo luminoso o intensidad luminosa) o sobre la luz que llega a una superficie (iluminancia). Pero no se ha dicho nada de la luz que llega al ojo que a fin de cuentas es la que vemos. De esto trata la luminancia. Tanto en el caso que veamos un foco luminoso como en el que veamos luz reflejada procedente de un cuerpo la definición es la misma.

Se llama **luminancia** a la relación entre la intensidad luminosa y la superficie aparente vista por el ojo en una dirección determinada. Su símbolo es L y su unidad es la cd/m^2 . También es posible encontrar otras unidades como el stilb ($1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/m}^2$) o el nit ($1 \text{ nt} = 1 \text{ cd/cm}^2$).

<p style="text-align: center;">Luminancia</p> $L = \frac{I}{S_{\text{aparente}}} = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha}$	<p>Símbolo: L</p> <p>Unidad: cd/m^2</p>	
---	--	--

Es importante destacar que sólo vemos luminancias, no iluminancias.

Rendimiento luminoso o eficiencia luminosa

AL hablar del flujo luminoso se sabe que no toda la energía eléctrica consumida por una lámpara (bombilla, fluorescente, etc.) se transformaba en luz visible. Parte se pierde por calor, parte en forma de radiación no visible (infrarrojo o ultravioleta), etc.



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

Rendimiento luminoso	Símbolo: η	Rendimiento = $\frac{\text{Flujo luminoso}}{\text{Potencia consumida}}$
$\eta = \frac{\Phi}{W}$	Unidad: lm / W	

Cantidad de luz

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

Cantidad de luz	Símbolo: Q
$Q = \Phi \cdot t$	Unidad: lm·s