

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



TESIS DOCTORAL

**Escala espectrorradiométrica absoluta : contribución a la
realización práctica de la unidad de fotometría**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Carmen Carreras Béjar

DIRECTOR:

Antonio Corrons Rodríguez

Madrid, 2015

TP
1980
019

M^a Carmen Carreras Bejar



* 5 3 0 9 8 5 2 6 6 6 *

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

X-53-031016-2


ESCALA ESPECTORRADIOMETRICA ABSOLUTA
CONTRIBUCION A LA REALIZACION PRACTICA
DE LA UNIDAD BASICA DE FOTOMETRIA

Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid
1980



BIBLIOTECA

© M^a Carmen Carreras Béjar
Editorial de la Universidad Complutense de Madrid
Servicio de Reprografía. Noviciado, 3-Madrid-8
Madrid, 1980
Xerox 9200 XB 480
Depósito Legal: M-5521-1980



**INSTITUTO DE OPTICA
"DAZA DE VALDES"
C.S.I.C.
MADRID**

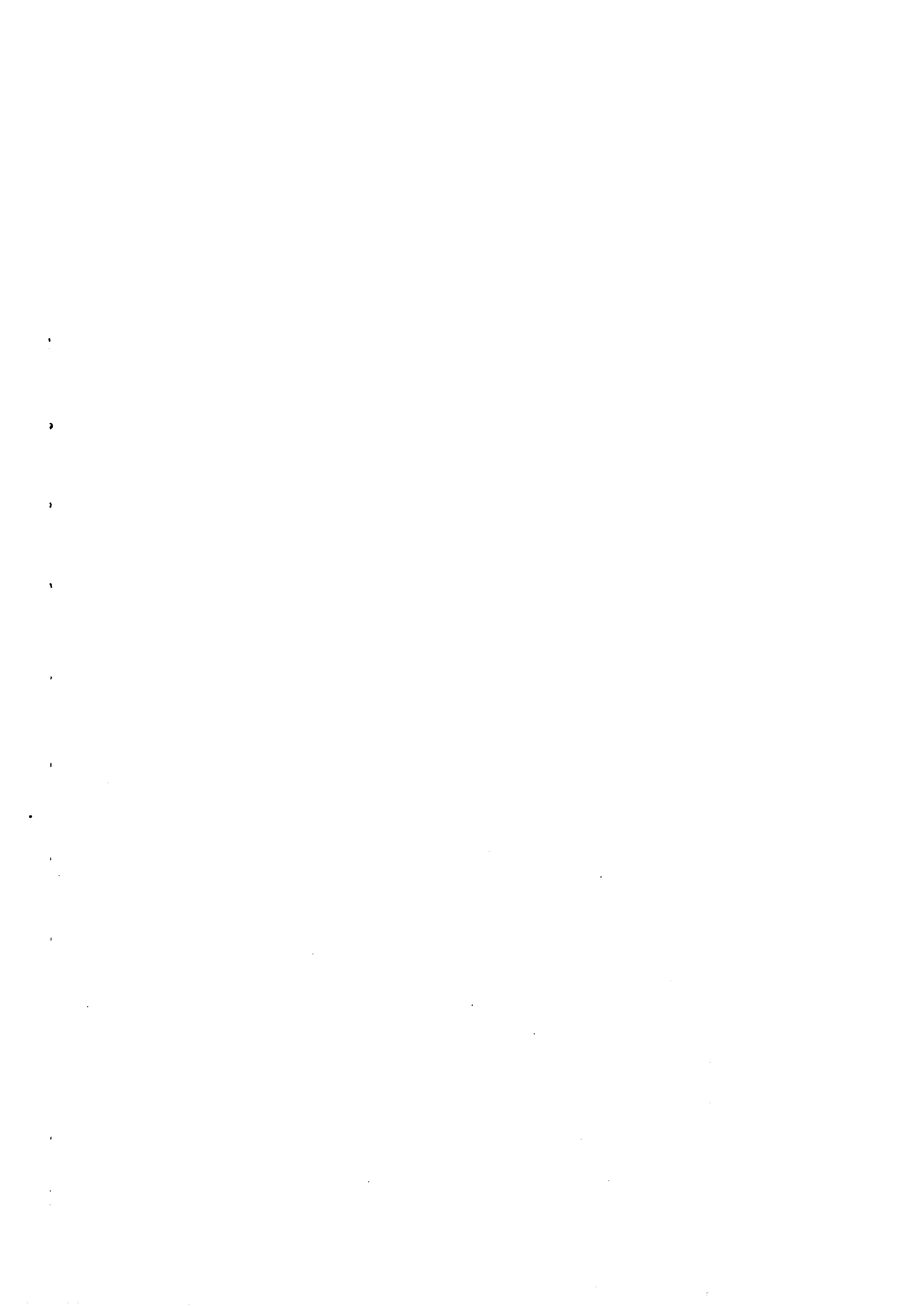
**ESCALA ESPECTRORRADIOMETRICA ABSOLUTA.
CONTRIBUCION A LA REALIZACION PRACTICA DE LA UNIDAD
BASICA DE FOTOMETRIA.**

**Trabajo presentado ante la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid,
por**

CARMEN CARRERAS BEJAR

para aspirar al grado de Doctor en Ciencias Físicas

Madrid, Marzo 1979



Este trabajo ha sido realizado en el Laboratorio de Radiometría del Instituto de Optica de Madrid, bajo la dirección del Dr. Antonio Corrons.

Agradezco sinceramente al Dr. Corrons la sugerencia de este trabajo así como su constante ayuda y - orientación durante todo el curso del mismo, sin las cuales hubiese sido imposible llevar a cabo este trabajo.

Igualmente expreso mi agradecimiento al Dr. A. de la Cruz, Jefe del Departamento de Emisores y Receptores de Energía Radiante por su constante interés y - acertadas e interesantes sugerencias.

Al Dr. A. Hidalgo, director del Instituto de Optica, por las facilidades puestas a mi disposición para poder llevar a cabo la realización de esta investigación, permitiéndome trabajar en los Laboratorios - del Instituto.

Al Prof. D. Armando Duran por aceptar ser ponente de este trabajo ante la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid.

A todos aquellos que de un modo u otro participa- ron en la realización y confección de la presente te-sis.

Finalmente, agradezco al C.S.I.C. la concesión -
de una Beca de Formación de Personal Investigador que
ha constituido una valiosa ayuda económica para poder
llevar este trabajo a buen fin.

Madrid, Marzo 1979.

I N D I C E

=====

	<u>Págs.</u>
I.- INTRODUCCION.	1
II.- REDEFINICION DEL LUMEN Y LA CANDELA.	5
III.- ESTADO ACTUAL DE LA RADIOMETRIA. RADIOMETROS ABSOLUTOS.	18
Consideraciones de diseño en los radiómetros ab- solutos.	20
Componentes de un elemento detector.	25
Areas de aplicación de los radiómetros absolutos. ...	31
Posibles desarrollos futuros.	34
IV.- METODO DE MEDIDA. DESARROLLO MATEMATICO.	36
V.- MONTAJE EXPERIMENTAL.	43
Elemento emisor.	43
Camino óptico.	45
Sistema de detección.	54
VI.- ESTIMACION DE LA EXACTITUD DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.	61
Exactitud del sistema de medida.	62
Exactitud en la reproducibilidad de las condiciones del emisor.	64
VII.- MEDIDAS REALIZADAS. RESULTADOS OBTENIDOS. ACUERDO DE NUESTRAS MEDIDAS CON LAS DEL N.B.S. DE LOS E.E.U.U.	68
VIII.- CALIBRADO DE FUENTES LUMINOSAS COMO PATRONES DE INTEN- SIDAD LUMINOSA.	88

	<u>Págs.</u>
IX.- SISTEMA COMPARADOR. ESPECTRORRADIOMETRO ABSOLUTO. ..	106
Procedimiento de medida.	107
Montaje experimental.	108
Posibles fuentes de error.	114
Exactitud de la medida.	125
X.- CONCLUSIONES.	127
BIBLIOGRAFIA.	130

FIGURAS

- Fig. 1.- Intensidad luminosa de una fuente no puntual.
- Fig. 2.- Esquema de un proceso ideal de medida para un radiómetro absoluto.
- Fig. 3.- Esquema de un proceso no ideal de medida para un radiómetro absoluto.
- Fig. 4.- Ajuste de la curva de radiancia del cuerpo negro $L_{\lambda}(T)$ a la de una lampara de incandescencia $L(\lambda)$ con filamento de wolframio por medio de una función de corrección $K(\lambda)$, estudiada por De Vos.
- Fig. 5.- Esquema del montaje experimental.
- Fig. 6.- Lampara de incandescencia "F1" patrón de irradiancia espectral (cuarzo-iodo, 1000 vatios).
- Fig. 7.- Curva de irradiancia espectral absoluta de la lampara "F1".
- Fig. 8.- Transmitancia espectral de los filtros interferenciales 403, 503.9 nm.
- Fig. 9.- Transmitancia espectral de los filtros interferenciales 552, 605, 654.7 nm.
- Fig. 10.- Transmitancia espectral de los filtros interferenciales 699.9, 799.8 nm.
- Fig. 11.- Transmitancia espectral del filtro de agua destilada de 1 cm. de espesor + las dos ventanas de vidrio que forman la cubeta.

Fig. 12.- Detalle de la configuración del receptor del R.P.C.E.

Fig. 13.- Esquema del circuito eléctrico simplificado del R.P.
C.E.

Fig. 14.- Representación gráfica de la función de corrección ob
tenida por regresión polinómica a partir de las medi
das realizadas con el detector Si-UV-2 para la lámpa
ra Fl.

Fig. 15.- Curva de la irradiancia espectral de la lámpara GE-2.

Fig. 16.- Esquema del montaje experimental. Sistema comparador.

Fig. 17.- Circuito de control de la Intensidad de corriente.

Fig. 18.- Respuesta del sistema de medida entre 300 y 800 nm.
Imprecisión en la lectura de la longitud de onda.

Fig. 19.- Estabilidad temporal del sistema de detección.

Fig. 20.- Influencia de la variación de la Intensidad de corrien
te en el flujo emitido por la lámpara.

RELACION DE TABLAS

- Tabla I Clasificación de los radiómetros absolutos atendiendo al rango de irradiancias.
- Tabla II Valores de la Irradiancia obtenidos con el radiómetro para cada uno de los filtros.
- Tabla III Sistema de siete ecuaciones obtenidas sustituyendo en la ecuación (7,1) los valores correspondientes a cada filtro.
- Tabla IV Comparación de los valores de la Irradiancia Espectral ($W/m^2.nm$) obtenidos a partir del radiómetro con los suministrados por el N.B.S.
- Tabla V Valores de la respuesta del detector Si-UV-2 con cada uno de los filtros para la lámpara F1.
- Tabla VI Conjunto de valores obtenidos para la constante K_1 .
- Tabla VII Valores de la Irradiancia Espectral de la lámpara F1 obtenidos a partir del Si-UV-2 y de los corregidos con el radiómetro.
- Tabla VIII Comparación de los valores definitivos de la Irradiancia Espectral de la lámpara F1, obtenidos en nuestro laboratorio con los asignados por el N.B.S.
- Tabla IX Irradiancia espectral de la lámpara GE-2.
- Tabla X Irradiancia Espectral e Intensidad Luminosa obtenidas para las lámparas P1 y P2.

Tabla XI Irradiancia Espectral e Intensidad Luminosa obtenidos para las lámparas P3 y P4.

I. INTRODUCCION.

La medida de las magnitudes luminosas se inició con métodos visuales utilizando el ojo como elemento comparador. Debido a que el ojo es útil para medidas diferenciales, pero no para medidas absolutas, se acordó utilizar un emisor de luz como patrón, llegándose por este camino a la definición de la Candela como unidad fundamental S.I. de Fotometría.

Para la realización práctica de la Candela se necesita un radiador completo que emite a la temperatura de fusión del Platino. Su radiancia espectral se calcula a partir de la ley de Planck.

La puesta en funcionamiento de un radiador completo exige un gasto económico elevado. Por esta razón el Instituto de Optica, y en general nuestro país, hubo de resignarse a utilizar como patrones fotométricos lámparas calibradas en otros laboratorios (Oficina Internacional de Pesas y Medidas), renunciando a desarrollar patrones primarios propios.

En los últimos pocos años la situación general de la Fotometría ha variado considerablemente. El desarrollo de la moderna Radiometría Electro-óptica ha hecho posible la existencia de una Física Radiométrica perfectamente ligada al resto de las disciplinas físicas y que convierte a la Fotometría en una parte concreta de la Radiometría. La aparición de los radiómetros piroeléctricos eléctricamente calibrados y de los detectores cuánticos, con sus excelentes características de linealidad, estabilidad, bajo ruido y constancia en el tiempo, los hacen

compatibles como patrones para la medida de la energía radiante con las lámparas de incandescencia. Convierten, además, directamente la energía radiante recibida en energía eléctrica, medible fácilmente y con precisión. Permiten, además, eliminar el paso intermedio a través de la Escala Termodinámica de Temperatura, paso que introduce las incertidumbres más graves en la realización práctica de la Candela a partir del Radiador Planciano.

Todas estas nuevas posibilidades han tenido como consecuencia que el Comité Consultivo para la Fotometría y la Radiometría de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas haya propuesto una nueva definición de la Candela en términos radiométricos, que la convierten en unidad derivada del vatio. No ofrece duda el hecho de que la nueva definición entrará en vigor en Octubre de 1979 cuando sea definitivamente aprobada por la Conferencia General de Pesas y Medidas (C.G.P.M.).

A la vista de la nueva definición bastará disponer de la Escala Espectrorradiométrica Absoluta para poder, a partir de ella y de forma inmediata, obtener la Candela.

Así la unidad fotométrica puede ser derivada por integración de la distribución espectral de la energía radiante, pesada por una función de respuesta visual apropiada, $V(\lambda)$, y multiplicada por un factor K_m . Este factor, conocido como eficacia espectral luminosa máxima, define el número de lúmenes equivalentes a un vatio de energía radiante monocromática de 555 nm. Una vez que el valor de este factor sea acordado internacionalmente (Octubre 1979), toda la Fotometría quedará definida radio

métricamente. Cuando surjan desacuerdos de los instrumentos fotométricos, el espectrorradiómetro será el juez último.

Por todas estas razones, la Comisión Internacional de Iluminación (C.I.E.), en su reunión en Septiembre de 1975, recomendó a los Laboratorios Nacionales el desarrollo de nuevas Escalas Espectrorradiométricas Absolutas.

Recogiendo tal recomendación, en el Instituto de Óptica se ha llevado a cabo el presente trabajo. El objetivo ha consistido en realizar una Escala Espectrorradiométrica basada en un Radiómetro Piroeléctrico Electricamente Calibrado (R.P.C.E.) como patrón o instrumento de medida absoluto. La precisión obtenida es comparable a la de la Escala Espectrorradiométrica Absoluta del National Bureau of Standards de los Estados Unidos, la cual se basa en el radiador Planckiano. A partir de nuestras medidas espectrorradiométricas se puede derivar por computación exacta de la Intensidad Luminosa en Candelas de cualquier fuente radiante.

Con el sistema de medida desarrollado se ha calibrado un grupo de lámparas de incandescencia para utilizarlas como patrones de Irradiancia espectral y de Intensidad Luminosa.

Se han comparado directamente los patrones de Intensidad así calibrados con los procedentes de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas y se ha obtenido un acuerdo mejor del 0.5% en todos los casos.

Áreas de investigación y desarrollo como el estudio de la radiación solar, la medida de los láseres de gran poten-

.cia, el calibrado de instrumentos nacidos para la investigación espacial y el control de niveles de radiaciones potencialmente peligrosas para el entorno humano, están constantemente exigiendo no sólo diversidad de medidas, sino medidas radiométricas cada vez más precisas.

II.- REDEFINICION DEL LUMEN Y LA CANDELA.

La Intensidad Luminosa es la magnitud fundamental de Fotometría y la Candela es la unidad S.I. base, de la cual deben derivarse las otras unidades fotométricas.

Las vigentes definiciones para la intensidad luminosa y su unidad correspondiente son (1):

INTENSIDAD LUMINOSA (de una fuente en una dirección): "Es el cociente del flujo luminoso que emite la fuente y se propaga en un elemento de ángulo sólido que contiene la dirección dada, por ese elemento de ángulo sólido".

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega} \quad (2,1)$$

CANDELA: "Es la intensidad luminosa en la dirección perpendicular, de una superficie de $1/600.000 \text{ m}^2$ de un cuerpo negro a la temperatura de solidificación del Platino bajo la presión de 101325 Nw/m^2 ".

La elección de la Intensidad Luminosa como magnitud fundamental se considera hoy desafortunada y ha creado serios problemas a los fotometristas, por lo que ya está en marcha una redefinición con un cambio radical de criterios (4). Los motivos que nos inducen a afirmar que esta elección es desafortunada son:

- 1) La relación entre la intensidad luminosa y otras magnitudes fotométricas es matemáticamente imprecisa.

- 2) Existen problemas en la medida real de la intensidad que no pueden resolverse.
- 3) Se encuentran problemas pedagógicos y conceptuales en un sistema de medidas basadas en la intensidad.

Si las medidas fotométricas pudieran limitarse a fuentes y detectores puntuales, ó si pudiéramos trasladarnos a medir al infinito, entonces la definición de la C.I.E. sería intachable.

La intensidad luminosa de una fuente real está definida como "el cociente del flujo luminoso radiante recibido sobre una superficie elemental por el ángulo sólido que dicha superficie subtende desde cualquier punto de la fuente cuando este cociente se toma en el límite al aumentar la distancia entre fuente y detector", esto es:

$$I_v = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

y en la práctica,

$$I_v = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\phi(x)}{\Omega(x)} \quad (2,2)$$

El problema está en que nunca podemos llegar al límite, trasladarnos al infinito en un experimento. Normalmente trabajamos con unos pocos cocientes de cantidades finitas que son miembros de una secuencia finita que converge hacia el límite.

Estos cocientes deberían ser valores medios de I sobre un ángulo sólido finito especificado en una dirección dada,

sin embargo son valores medios de I en diferentes ángulos sólidos y diferentes direcciones, cada ángulo sólido con vértice en un punto diferente de una fuente real, figura 1.

Este problema no existe en el caso de la Luminancia ó la Iluminancia, las cuales se pueden definir de forma que los miembros de una secuencia infinita que converge hacia el límite sean el promedio de la cantidad definida por el límite.

La iluminancia está definida como "el flujo luminoso recibido por un elemento de superficie por el área de este elemento", esto es:

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA} = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{d\phi_v}{dA}$$

y en la práctica,

$$E_v = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\phi_v(A)}{A} \quad (2,3)$$

En los casos reales A es el área de una superficie concreta no nula y $\phi(A)$ es el flujo luminoso interceptado por la superficie. Por otra parte la iluminancia media \bar{E}_v sobre A será:

$$\bar{E}_v = \int_A E_v \cdot dA = \frac{\phi(A)}{A} \quad (2,4)$$

Esta ecuación es muy importante porque relaciona cantidades medibles, como son $\phi(A)$, A y \bar{E}_v , con una idealización matemática E_v .

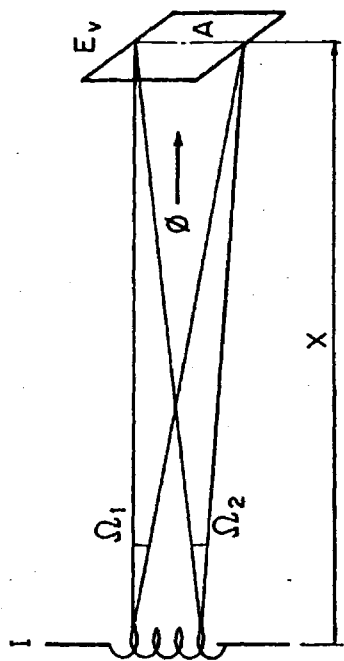


Fig. 1.- Intensidad luminosa de una fuente no puntual.

Las ecuaciones (2,2) y (2,3) representan el punto de vista puramente matemático, mientras que la (2,4) representa la realidad de las medidas fotométricas.

Para la intensidad luminosa nos es imposible tener una ecuación similar a la (2,4). Esto es debido a que mientras la luminancia ó la iluminancia son funciones de punto, la intensidad luminosa está asociada con una fuente en vez de con un punto. Esto trae consigo esos problemas conceptuales y pedagógicos de que hablábamos antes.

Los autores de los tratados de Fotometría e incluso de Radiometría, comenzaban con la definición de la intensidad luminosa como el flujo por ángulo sólido y a partir de ella derivaban la luminancia ó la iluminancia y la ley del cuadrado de la distancia. Si la intensidad se define a partir del flujo lo lógico es que sea el flujo la magnitud fundamental, ó la iluminancia media, como se ve en:

$$I_v = \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 \cdot E_v(x)$$

¿Cómo se podrían resolver todos estos problemas inherentes al hecho de que sea magnitud fundamental de Fotometría precisamente la intensidad luminosa?

La solución mas racional es reemplazar el presente sistema de medidas fotométricas por otro basado en la medida de la energía radiante incidente en un lugar del espacio en vez de la emitida por una fuente concreta. El flujo luminoso pasaría a ser la magnitud fundamental y su unidad, el Lúmen, la unidad base de la Fotometría.

Existe por otra parte el problema de la conexión entre la Radiometría, parte de la Física que se ocupa de la medida de la energía radiante, con la Fotometría, ciencia que se puede derivar totalmente de la Radiometría sin más que introducir una función espectral de peso $V(\lambda)$, llamada eficiencia espectral luminosa del observador patrón (que representa al observador normal medio). Sin embargo la actual definición de la Candela impide la obtención exacta de valores fotométricos a partir de los radiométricos correspondientes, porque el valor experimental de la constante K_m que las relaciona no ha podido ser aún determinado con suficiente exactitud.

La elección de la Intensidad Luminosa y la Candela como bases de la Fotometría se hizo para adaptar determinadas fuentes artificiales de luz (las lámparas de incandescencia en vacío) como patrones. Las virtudes fundamentales de estas lámparas son su reproductibilidad y su conveniencia en Fotometría visual, pues tienen una distribución espectral parecida a la candela primitiva. Sus características radiométricas han de ser calculadas a partir de la ley de Planck, lo que supone el inconveniente de que la distribución energética espectral de este patrón de radiación no se pueda conocer con precisión satisfactoria, debido a la imposibilidad de medir hoy con exactitud la temperatura de fusión del Platino.

Como resultado del impreciso conocimiento de la temperatura de fusión del Platino, hay una incertidumbre aproximada del 2% al derivar las magnitudes fotométricas de las radiométricas correspondientes.

El desarrollo de la moderna Radiometría hace estas incertidumbres insostenibles. La sustitución de técnicas visuales por técnicas físicas habida en los procedimientos de medida, ha sido motivada en forma fundamental por los avances de la tecnología de detectores, así como por la adopción internacional de valores definitivos de la función de eficiencia espectral luminosa $V(\lambda)$, definida y tabulada por la C.I.E.

La luminancia L_v se relaciona con la radiancia espectral $L_{e,\lambda}$ de la siguiente manera:

$$L_v = K_m \cdot \int L_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2,5)$$

de donde podemos deducir el valor de K_m , que es la eficacia luminosa (en lúmenes por vatio) de la energía radiante monocromática de 555 nm, donde por definición, la eficiencia luminosa $V(\lambda)$ es máxima e igual a la unidad. En el caso del radiador completo a la temperatura de fusión del Platino será:

$$K_m = \frac{L_v(Pt)}{\int L_{e,\lambda}(Pt) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2,6)$$

Para calcular K_m , como por definición $L_v(Pt) = 1.666 \times 10^6 \text{ Cd/m}^2$, tendremos:

$$K_m = \frac{1.666 \times 10^6 \text{ Cd/m}^2}{\frac{c_1}{\pi \cdot n^2} \int \frac{\lambda^{-5} V(\lambda) \cdot d\lambda}{e^{c_2/n \cdot \lambda \cdot T(Pt)} - 1}} \quad (2,7)$$

donde n es el índice de refracción del aire y $T(Pt)$ la temperatura de fusión del Platino.

De la incertidumbre en el conocimiento de esta temperatura nace el problema fundamental para relacionar con exactitud la Fotometría con la Radiometría. Si no se conoce con precisión $T(\text{Pt})$ tampoco podemos hallar K_m , como se puede ver en la ecuación (2,7).

Durante varios años y en distintos laboratorios se ha estado midiendo $T(\text{Pt})$ y determinado K_m . Las medidas más precisas han dado para K_m valores que giraban en torno a 680 lúmenes por vatio. Parece evidente que la unidad básica de Fotometría no debe estar supeditada al desarrollo de la escala termodinámica de temperatura. La mejor solución es abandonar por completo la emisión del Platino fundente y redefinir el patrón en términos radiométricos y con luz monocromática, sin tenerle sujeto por más tiempo a una fuente de emisión cualesquiera que esta sea. El valor de K_m se puede adoptar arbitrariamente por acuerdo y se le puede dar el valor cercano a 680, sin más objeto que el de mantener la tradición en cuanto al valor absoluto de lo que realmente son una candela ó un lúmen. Parece ser que 683 lúmenes por vatio es el valor más exacto de todos los obtenidos a partir de la ecuación (2,7) y el que haría variar menos las unidades mantenidas por los principales laboratorios del mundo.

La necesidad de solucionar definitivamente estos problemas expuestos ha llevado a Blevin y Steiner a proponer en Septiembre de 1975, al Comité Consultivo de Fotometría y Radiometría de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas la adopción del Lúmen como unidad base de Fotometría en el sistema S.I., definido en términos radiométricos.

REDEFINICION

LUMEN: "Es el flujo luminoso de la radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de 540×10^{12} Hertz y por un flujo radiante de $1/683$ vatios". (540×10^{12} Hertz equivale a 555×10^{-9} metros en el aire, $n = 1.00028$).

La candela, ahora una unidad derivada del lumen, queda definida como sigue:

CANDELA: "Es la intensidad luminosa de una fuente uniforme emitiendo en un ángulo sólido total de 4π str, radiación monocromática que se caracteriza por una frecuencia de 540×10^{12} Hertz y por un flujo radiante de $4\pi/683$ vatios".

Esta propuesta se estudió durante un periodo de dos años (18) y finalmente, en Octubre de 1977, el citado Comité aprobó la redefinición de la Candela en términos radiométricos.

SITUACION ACTUAL DEL CAMBIO DE DEFINICION (ENERO-1979).

La nueva definición de la Candela recomendada por el Comité Consultivo para la Fotometría y la Radiometría (C.C.P.R.) del B.I.P.M. en 1977, fué aprobada con una alteración menor por el Comité Consultivo de Unidades (C.C.U.) en Mayo de 1978. Esta alteración concierne a la frecuencia a la cual se define la equivalencia energética. En vez de 540.0154 THz recomendado por el C.C.P.R., el C.C.U. sugirió 540 THz. Es una simple asignación numérica también suficientemente cercana al primer valor (correspondiente a 555 nm exactos en el aire patrón) y su diferencia es despreciable en la práctica. Habiendo pasado por el

C.C.U., la sugerencia de nueva definición fué enviada de nuevo al Comité Internacional de Pesas y Medidas (C.I.P.M.). En su reunión nº 67 en Septiembre de 1978 el C.I.P.M. se definió en favor de la modificación y la envió a la Conferencia General de Pesas y Medidas (C.G.P.M.) que tendrá lugar en Paris en Octubre de 1979, donde será aprobada definitivamente.

El documento enviado para su aprobación es el siguiente (79):

"Définition de la candela

La Seizième Conférence Générale des Poids et Mesures,
considérant

- que la réalisation du corps noir étalon primaire de la candela est une entreprise ingrate donnant une précision limitée sans espoir d'amélioration sensible,

- que les techniques radiométriques se développent rapidement, autorisant des précisions qui sont déjà analogues à celles de la photométrie et que ces techniques sont déjà en usage dans des laboratoires nationaux pour réaliser la candela sans savoir à construire un corps noir,

- que la relation entre les grandeurs photométriques et les grandeurs radiométriques adoptés par le CIPM en 1977, à savoir la valeur 683 lumens par watt pour la radiation monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz, est reconnue comme suffisamment exacte par tous les laboratoires intéressés,

que le moment est donc venu de donner à la candela une définition susceptible d'améliorer la facilité d'établissement des étalons photométriques et leur précision,

décide

1. La candela est l'intensité lumineuse dans une direction donnée d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz est donc l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian,

2. La candela ainsi définie est l'unité de base applicable aux grandeurs photopiques, aux grandeurs scotopiques, et aux grandeurs à définir dans le domaine mésopique,

3. La définition de la candela, à l'époque bougie nouvelle, décidée par le C.I.P.M. en 1946 en vertu des pouvoirs conférés par la 8^e C.G.P.M. en 1933, ratifiée par la 9^e C.G.P.M. en 1948, puis amendée par la 13^e C.G.P.M. en 1967, est abrogée.

No existe ninguna duda de que la C.G.P.M. tomará esta resolución a partir del próximo octubre, y a partir de esa fecha la nueva definición de la candela entrará en vigor.

Queda plantearse las consecuencias de la redefinición; entre las más importantes cabe destacar:

- 1) La redefinición junto con la función de eficiencia luminosa $V(\lambda)$ da lugar a un valor de $K(\lambda)$ exacto, lo que facilita la obtención de valores fotométricos a partir de los radiométricos por computación exacta.

- 2) No se necesita en adelante un patrón de luz, ya que el vatio está definido en términos de m, Kg, y s. Cada laboratorio podrá elegir el método que considere más adecuado para realizar la unidad fotométrica.
- 3) No habrá más énfasis desproporcionado en las lámparas de vacío, pudiendo utilizarse fuentes más prácticas, como las modernas lámparas de halógeno e incluso el láser. El recalibrado del patrón puede hacerse con frecuencia y no necesita estabilidad a largo plazo, uno de los graves inconvenientes del cuerpo negro.
- 4) Existirá una mayor precisión y acuerdo entre las escalas fotométricas nacionales.
- 5) La redefinición simplifica la enseñanza de la Fotometría al convertir la Física Fotométrica en un campo objetivo de la Metrología, pues no es más que Radiometría ponderada espectralmente a través de la función $V(\lambda)$.

III.- ESTADO ACTUAL DE LA RADIOMETRIA. RADIOMETROS ABSOLUTOS.

Como hemos visto en el capítulo anterior, según la nueva definición de la Candela en términos radiométricos, ya no es necesario disponer del cuerpo negro o radiador completo para materializar el patrón fundamental de Fotometría. Quiere ello decir que no se necesita un emisor concreto, sino cualquier técnica, instrumento o artificio capaz de medir con suficiente precisión energía radiante en el rango visible del espectro.

Es decir se necesita una Escala Espectrorradiométrica Absoluta, la cual se puede desarrollar en el laboratorio por diversos procedimientos, uno de los cuales puede ser la emisión del cuerpo negro.

En los últimos 10 años hemos asistido a un considerable desarrollo de la Radiometría, debido en gran parte a los progresos conseguidos en el diseño y realización de Radiómetros Absolutos. Estos instrumentos son capaces de medir la energía radiante que reciben sin necesidad de haber sido calibrados previamente respecto a una fuente patrón.

Su precisión, estabilidad, relativa sencillez de manejo y accesibilidad nos han decidido a emprender la realización de la Escala Espectrorradiométrica Absoluta utilizando un Radiómetro Absoluto como patrón de referencia. Por esta razón vamos a hacer una descripción detallada a continuación de este tipo de instrumentos así como de su utilización.

Los radiómetros absolutos son instrumentos que sirven para medir la radiación, es decir, no sólo "detectan" sino que

"miden" la radiación que les llega. Se utilizan para conocer el flujo radiante incidente en unidades absolutas de energía, esto es, en vatios; y si se conoce con exactitud el área sensible del detector se puede deducir la energía incidente por unidad de área, esto es, la irradiancia sobre el detector.

Podríamos resumir brevemente el funcionamiento de un radiómetro absoluto como sigue: la energía radiante que llega al detector es absorbido por él, y produce un incremento de temperatura en su superficie sensible. Este incremento de alguna forma se convierte en una señal eléctrica que se puede registrar. Otra señal se puede generar por calentamiento de dicha superficie por medio de una energía de referencia. Cuando ambos incrementos de temperatura sean iguales, el detector térmico nos indica que no existen diferencias de temperatura entre uno y otro ciclo, y por lo tanto, en este instante la energía radiante incidente y la energía de referencia son iguales.

En este proceso de medida podemos distinguir tres etapas:

- 1) Conversión de la energía radiante en energía térmica (calor).
- 2) Conversión de la energía de referencia en energía térmica (calor).
- 3) Medida de la energía térmica (calor).

En los radiómetros absolutos ideales estos tres subprocesos deben tener lugar en la misma superficie sensible a fin de minimizar las posibles imperfecciones. El proceso ideal

de medida puede verse en la figura 2.

Si en lugar de haber un único convertidor de calor, existen dos, uno para cada vía de entrada de la energía, las correcciones instrumentales son un factor muy importante en el cálculo del flujo radiante incidente. Un diagrama esquemático para este caso puede observarse en la figura 3.

En este caso, los errores en la medida vienen producidos fundamentalmente por dos causas:

- 1) Diferentes eficiencias de conversión de los transformadores en calor I y II.
- 2) Diferentes caminos de calentamiento del sensor.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE LOS RADIOMETROS ABSOLUTOS.

El diseño de los elementos detectores depende muy estrechamente del nivel de irradiancia al cual se vaya a trabajar (22). Teniendo esto en cuenta podríamos hacer una primera clasificación de los radiómetros absolutos atendiendo al rango de irradiancias: Tabla I.

TABLA I

<u>Rango de Irradiancia</u>	<u>Tipos de Radiómetros</u>
$E < 10 \text{ W/m}^2$	Irradiancia baja
$10 \text{ W/m}^2 < E < 10 \text{ KW/m}^2$	Irradiancia media
$E > 10 \text{ KW/m}^2$	Irradiancia alta

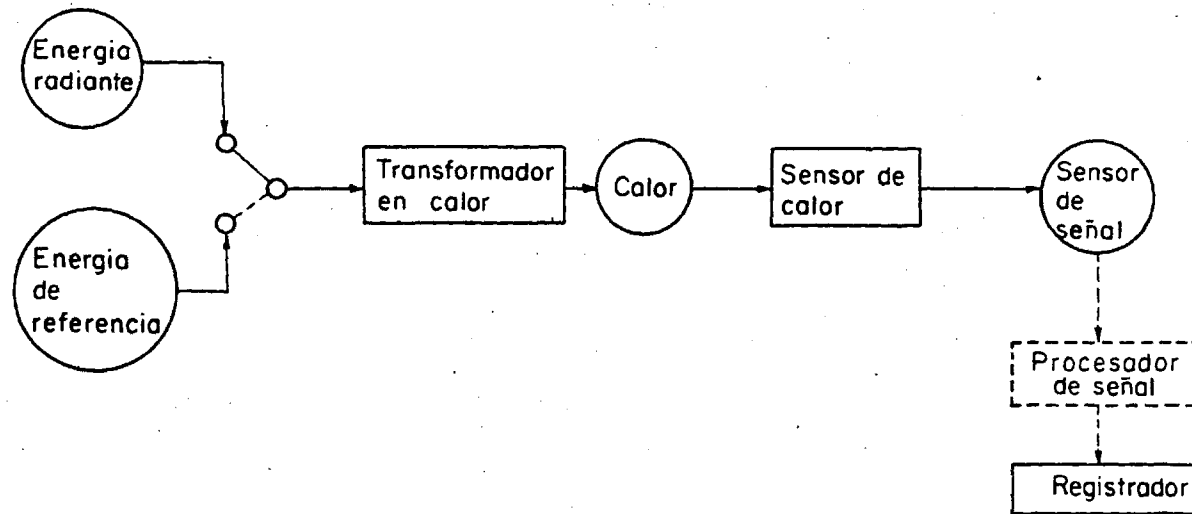
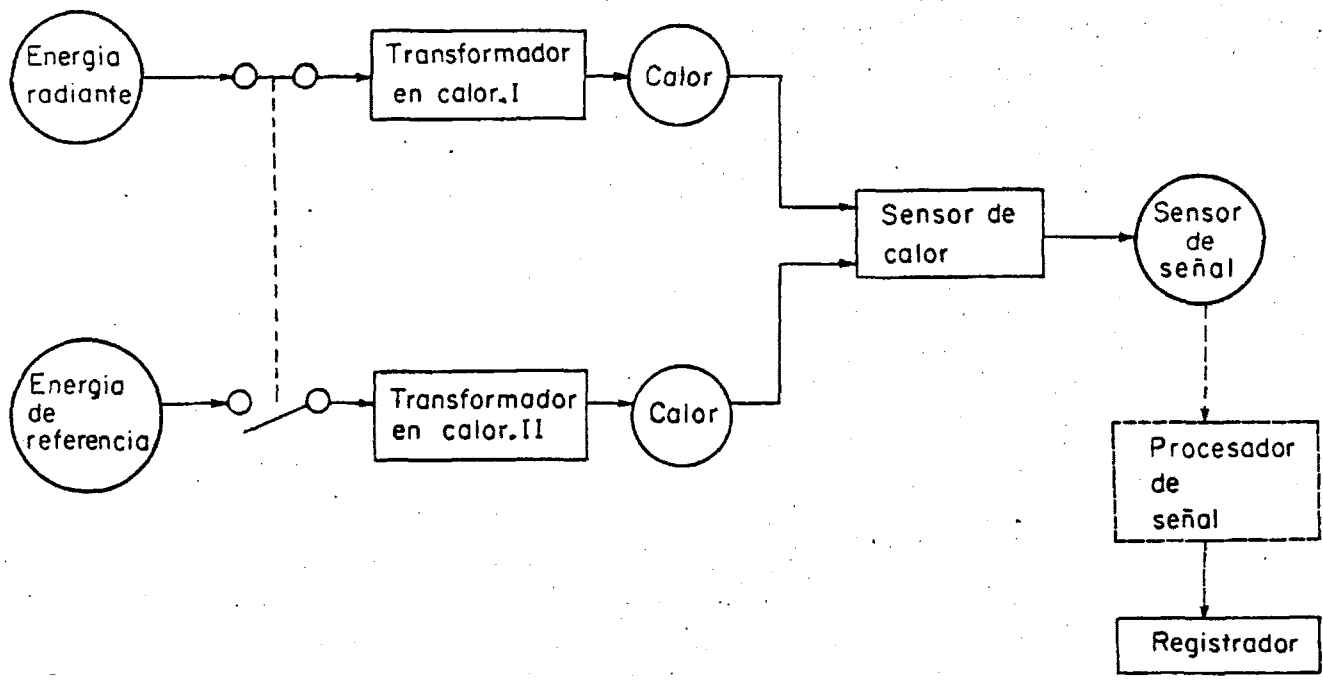


Fig. 2.- Esquema de un proceso ideal de medida para un radiómetro absoluto.



22

Fig. 3.- Esquema de un proceso no ideal de medida para un radiómetro absoluto.

Los elementos detectores de baja irradiancia tienen que tener unos parámetros térmicos y eléctricos óptimos así como una mayor detectividad. Debe prestarse cuidadosa atención a su capacidad térmica, a la diferencia de temperaturas entre el radiómetro y el ambiente, a las dimensiones del elemento detector, al ruido, etc. Como instrumentos de esta clase se pueden citar los radiómetros absolutos usados para medidas fotométricas.

Los elementos detectores para el rango de irradiancias medias son menos críticos en cuanto a lo que se refiere a detectividad y ofrecen más resistencia a los cambios ambientales, por ello se utilizan fundamentalmente en el campo de la Meteorología. En la actualidad se están comenzando a utilizar como instrumentos de referencia en las medidas de irradiancia solar.

Por último, los elementos detectores de irradiancia alta. Estos no necesitan ser muy sensibles, sin embargo presentan algunos problemas debidos a la disipación de la energía térmica así como en la transferencia de las energías radiantes absorbidas. Se utilizan, casi en exclusividad, para la medida de la energía radiante procedente de un láser.

En general, la detectividad de los radiómetros absolutos más sensibles y exactos es considerablemente menor que la de los simples detectores térmicos que trabajan con el mismo principio de detección. Esto es así porque los elementos detectores en los radiómetros absolutos son más complejos debido a su capacidad de autocalibración. Como consecuencia, en la mayo-

ría de estos instrumentos la detectividad se sacrifica en favor de la exactitud de la medida.

Para la mayoría de las aplicaciones de los radiómetros absolutos en Fotometría, Meteorología y Radiometría en general, son aceptables periodos de medida del orden de varios minutos. Muchas de las cantidades medidas son cantidades estables que no cambian apreciablemente en intervalos de tiempo no muy grandes. Esto implica que incluso para las medidas más exactas, donde se debe esperar un determinado tiempo para que la señal se establezca, las constantes de tiempo del orden de 1 a 10 segundos son suficientemente tolerables.

La constante de tiempo total del sistema se determina a partir de la constante de tiempo térmica del elemento detector y de la constante de tiempo electrónica del sistema de medida. En los radiómetros absolutos que tienen elementos sensitivos convencionales como termopilas, bolómetros, etc., la constante de tiempo térmica del elemento detector es un factor limitado, con valores del orden anteriormente mencionado (de 1 a 10 segundos). Los radiómetros absolutos piroeléctricos tienen constantes de tiempo térmicas más cortas, lo que requiere constantes electrónicas de tiempo del mismo orden para poder lograr una buena relación "señal/ruido".

Como resumen de lo anterior podemos afirmar que hay tres condicionamientos que juegan un papel importante en la elección de un radiómetro absoluto. Son:

- 1) el nivel de irradiancia al cual se trabaja,
- 2) la exactitud deseada, y
- 3) la constante de tiempo del sistema.

COMPONENTES DE UN ELEMENTO DETECTOR.

Como ya dijimos en el primer apartado de este capítulo, las componentes fundamentales de un elemento detector son:

- 1) Convertidor de energía radiante en energía térmica.
- 2) Convertidor de la energía de referencia en energía térmica.
- 3) Sensores de temperatura.

Vamos a ver detalladamente ahora cada uno de ellos, para poder seleccionar después un radiómetro absoluto que reúna las mejores condiciones para nuestros propósitos.

Convertidores de energía radiante en energía térmica.

La energía radiante se puede convertir en calor directamente por un proceso de absorción. No existen materiales que posean propiedades perfectas de absorción, por lo que la elección del material absorbente así como del método para cada aplicación concreta tiene una influencia decisiva en el diseño de un radiómetro absoluto.

A parte de la importancia obvia de un alto factor de absorción como de la no selectividad espectral, deben ser también considerados otra serie de aspectos, como la estabilidad

para el nivel de irradiancia, estabilidad a largo plazo, buena adhesión al sustrato, y alta conductividad térmica. Dependiendo de la aplicación concreta a que estén destinados, unas veces es esencial que el material absorbente sea eléctricamente no conductor mientras que en otros casos, se pueden usar los absorbentes eléctricamente conductivos para, a través de ellos, suministrar la energía eléctrica de referencia. Igualmente ocurre con la radiación reflejada. En algunos diseños interesa que la reflexión residual tenga una distribución espacial difusa mientras que en otros se prefiere un modelo especular.

Los materiales absorbentes usados en los modernos radiómetros absolutos se clasifican en dos tipos:

- 1) recubrimiento de pintura.
- 2) láminas metálicas aplicadas con técnicas especiales.

Los segundos tienen la ventaja de poseer una conductividad térmica más alta que los primeros y se pueden hacer muy finos para que la masa térmica sea muy baja. Sin embargo se prefiere los primeros para la mayoría de los casos si se controlan bien sus propiedades (27,28,29). El metal que más se utiliza para recubrir de pintura es el oro. Sus propiedades absorbentes se han estudiado ampliamente y son perfectamente conocidas (30, 31).

Dependiendo de la aplicación concreta se puede conseguir que las láminas de este metal (oro) absorban en el visible y en el infrarrojo, o que absorban en el visible y reflejen en

el infrarrojo. Este segundo caso es muy ventajoso para ciertas aplicaciones donde la disipación del calor acumulado puede ser un problema.

En la actualidad se están desarrollando técnicas para conseguir que el factor de absorción efectiva sea mayor que el factor de absorción inherente del material absorbente. Estas técnicas se basan fundamentalmente en los principios de reflexión múltiple o en los de absorción múltiple (32,33,34,35,36).

Convertidores de la energía de referencia en energía térmica.

La energía de referencia ha de poder ser medible fácilmente y con exactitud suficiente. El convertidor que se utilice depende obviamente de la clase de energía de referencia usada en el proceso de sustitución.

Existen numerosas razones por las que se prefiere la energía eléctrica, entre ellas se pueden citar como más importantes dos: que puede ser suministrada con un alto grado de estabilidad y que se puede medir fácilmente con exactitud.

La técnica más conveniente para convertir la energía eléctrica en calor, es hacer pasar una corriente continua a través de un resistor. La energía disipada se puede calcular a partir de las medidas directas de la corriente a través del resistor y del voltaje aplicado. En el caso de un radiómetro absoluto, se construye un elemento calefactor dentro del elemento detector (32,36,37,38,39).

Los elementos calefactores, igual que los materiales absorbentes, se escogen de forma que cubran los niveles de energía a los cuales trabajan.

Recientemente se está estudiando otra forma de suministrar la energía eléctrica de referencia (40). Se envía un haz de electrones para calentar el elemento detector en el ciclo de referencia. En este caso el convertidor tiene que ser un material absorbente de electrones.

Esta técnica está todavía en estado experimental y no se pueden hacer predicciones sobre su competitividad.

Sensores de Energía térmica.

La energía térmica suministrada en cada uno de los ciclos de calentamiento incrementa la temperatura del elemento detector. Este incremento se puede percibir por multitud de métodos, todos ellos basados en la variación de un parámetro físico con la temperatura.

Entre los sensores más utilizados podemos distinguir tres tipos:

- I) Termopilas.
- II) Bolómetros.
- III) Detectores piroeléctricos.

I) Termopilas.

Las termopilas tienen dos conjuntos de contactos. Uno de ellos se une al elemento detector mientras que el otro se man

tiene a temperatura constante. La diferencia de temperaturas entre ambos genera una diferencia de potencial entre los contactos "frios" y los "calientes" de la termopila.

Los contactos "calientes" se pueden unir al elemento detector de forma discreta en la periferia o bien distribuyéndose sobre toda la superficie negra sensible del elemento detector.

Es preciso prestar atención a estos contactos porque pueden introducir variaciones espaciales en la responsividad del elemento detector. Para evitar los puntos sensitivos discretos, lo que se suele hacer es desplazar la termopila de forma que no esté unida al resto de la estructura del receptor. Para ello se monta un acoplamiento térmico a una pequeña distancia delante de él. Así se tiene una ligera pérdida en la responsividad pero se gana en precisión.

Los radiómetros absolutos con sensores de termopila tienen una buena resolución. Con ellos se pueden determinar irradiancias de 500 a 1000 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ en el aire y a temperatura ambiente (32,35,41).

Tienen el inconveniente de que trabajando a niveles bajos de energía, al ser las señales continuas, son sensibles a cualquier cambio del voltaje térmico en el circuito de medida. Este problema se ha resuelto a veces modulando a baja frecuencia el rayo incidente (32,38).

A pesar de este inconveniente, los sensores termopila continúan siendo los más usados en los radiómetros absolutos.

II) Bolómetros.

Estos sensores utilizan el cambio con la temperatura en la resistencia eléctrica de algunos materiales para producir una señal eléctrica. Se pueden utilizar muchos materiales que cumplen esta propiedad, pero los que más se usan en los radiómetros absolutos son metales, y muy fundamentalmente el oro, el platino y el níquel.

Los sensores bolométricos tienen algunas propiedades que los hacen extremadamente adecuados para su uso en Radiometría Absoluta. Los elementos sensores cubren uniformemente toda la superficie del detector y así las variaciones espaciales en la responsividad son mínimas.

Pueden trabajar con señales continuas y alternas. Los problemas encontrados al trabajar con señales continuas son similares a los encontrados al trabajar con las termopilas, y se pueden resolver análogamente modulando el haz incidente.

En la última década se ha desarrollado un modo de trabajo para estos sensores que los hacen muy prácticos y atractivos; este método implica usar un impulso eléctrico alterno en el puente de medida. Se tienen así todas las ventajas del método convencional de medida con corrientes continuas y se evitan los problemas causados por las variaciones térmicas del circuito de medida (36). De esta manera se pueden determinar irradiancias de alrededor de $300 \mu(W/m^2)$. Para lograr esto es necesario utilizar elementos detectores recubiertos con una lámina absorbente

por ambos lados, mientras que trabajando con termopilas los elementos detectores sólo tienen una lámina absorbente por el lado de la radiación incidente (39).

III) Detectores piroeléctricos.

Los sensores piroeléctricos usan la dependencia de la temperatura de la polarización eléctrica en algunos materiales, para producir señales(5,42,43). En este caso la señal de salida resultante es proporcional al cambio de temperatura, por lo que las constantes de tiempo son mucho más cortas que las de los sensores estudiados anteriormente. Sólo responden a la radiación modulada e ignoran por completo las radiaciones de fondo constantes. Por ello se utilizan para una gran variedad de aplicaciones, como por ejemplo: medida de la energía del láser pulsante, alarmas, procesos industriales de detección y control y Radiometría de Precisión.

Para muchas de estas aplicaciones, los sensores piroeléctricos son los más adecuados.

AREAS DE APLICACION DE LOS RADIOMETROS ABSOLUTOS.

Las principales áreas de aplicación de los radiómetros absolutos en la actualidad son:

- I) Realización de escalas radiométricas.
- II) Realización de escalas fotométricas.
- III) Investigación básica.

I) Realización de escalas radiométricas.

Durante muchos años los radiómetros absolutos han sido usados para mantener las escalas de medida nacionales de irradiancia espectral de los laboratorios nacionales (32,38,41). El rápido desarrollo de la industria óptica, así como el cambio de filosofía en las medidas radiométricas, han dado lugar a una variedad de calibrados, todos ellos basados en detectores patrónes (43).

La incorporación del láser y la medida de su energía ha supuesto un estímulo en el interés en este campo específico (52,53,54).

En la actualidad se están llevando a cabo investigaciones para basar las escalas de radiación meteorológicas en los radiómetros absolutos (55). Todo esto hace que esté asegurado el resurgimiento de la Radiometría Absoluta.

II) Realización de escalas fotométricas.

En algunos de los laboratorios patrones nacionales los proyectos de investigación no están sólo encaminados a realizar escalas radiométricas sino también escalas fotométricas. Esto supone en algunos casos usar un radiómetro absoluto combinado con un filtro $V(\lambda)$ como patrón fotométrico (57).

Desarrollos importantes de estas nuevas técnicas han tenido como consecuencia las proposiciones para el cambio en la definición de la unidad de luz (la candela) a los comités exper

tos de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (B.I.P.M.) como ya hemos comentado en el capítulo II (58,59). Este conjunto de propuestas ha sido ratificado unánimemente por el Comité Consultivo para la Fotometría y la Radiometría (C.C.P.R.) del B.I.P.M. en 1977 (62) y se espera la redefinición de la candela con bases radiométricas para 1980. Esta redefinición supondría un gran avance para la Radiometría Absoluta sin embargo su papel en Fotometría ya está asegurado por otra decisión tomada recientemente por el C.C.P.R. del B.I.P.M. (63) que dió el valor de 683 lúmenes por vatio a la constante K_m (62), con lo que las escalas fotométricas basadas en la radiometría absoluta o Espectrorradiometría se pueden unir sin ninguna ambigüedad a las escalas fotométricas basadas en la actual definición de la candela, a través de dicha constante K_m .

III) Investigación básica.

La principal aplicación de los radiómetros absolutos en la investigación básica ha sido la determinación de la constante de Stefan-Boltzmann (35,64,65).

Otra de sus aplicaciones ha contribuido al conocimiento actual de las leyes físicas de la radiación.

En la actualidad se están desarrollando técnicas para el conocimiento exacto de la temperatura termodinámica a partir de las medidas realizadas con los radiómetros absolutos (65). Esto ha supuesto un cambio radical en la concepción de las escalas radiométricas, que como ya hemos dicho, hasta hace sólo una

década se basaban en la predicción del espectro de radiación del radiador completo a una temperatura supuesta conocida.

También las ciencias meteorológicas están empleando los radiómetros absolutos en las investigaciones para determinar la constante solar (56,66). Los valores más consistentes se podrán obtener probablemente cuando las escalas de radiación meteorológicas estén basadas en patrones de referencia absolutos.

POSIBLES DESARROLLOS FUTUROS.

En los próximos años podemos esperar un incremento en el número de radiómetros absolutos comercializados. Según los diferentes niveles de irradiancia se podrá encontrar el radiómetro más óptimo para cada aplicación concreta.

Para obtener las altas detectividades requeridas, tanto en Fotometría como en otras aplicaciones, se están desarrollando rápidamente los radiómetros refrigerados a muy bajas temperaturas. Así mismo, las mejoras tecnológicas traeran consigo un perfeccionamiento en las modernas teorías de correcciones y por lo tanto, es de esperar que en la siguiente década se logren o superen exactitudes del orden del 0.1% (51).

Se tendrán que afrontar también incógnitas de naturaleza muy fundamental. Conceptos tales como radiancia, irradiancia e intensidad radiante, que tienen una denominación intuitiva y que sirvieron bien a la radiometría del pasado, hoy presentan problemas desconcertantes para los científicos que trabajan en este campo de la Física. Por ejemplo, ¿cuál es la relación en-

tre los conceptos usados en Radiometría y las teorías de radiación más sofisticadas como la teoría del electromagnetismo y la teoría cuántica?. Esta pregunta ha sido resuelta con brillantez en los últimos años a través de problemas asociados con la medi da de las radiaciones coherentes. En la actualidad se ha podido desarrollar la relación básica teórica para la propagación de la energía por radiaciones coherentes (67,68,69,70,71). Los re cientes resultados nos muestran que existe una conexión íntima entre los conceptos de la radiometría convencional y la teoría de la coherencia parcial. A la luz de estos resultados se podría esperar un replanteamiento completamente radical de los concep tos radiométricos convencionales.

Por ejemplo, la radiancia no parece representar a una magnitud física medible aunque sin embargo se utiliza para cal cular los valores de ciertas magnitudes que si son realmente me dibles (71). Por otra parte la intensidad radiante parece tener un significado ambiguo como magnitud medible. Se puede expresar en términos de la función de densidad espectral de la radiación en el plano de la fuente, independientemente del estado de cohe rencia de la misma (71).

Todas estas teorías no están todavía desarrolladas aunque sus conclusiones preliminares apuntan algunos futuros de sarrollos que podrían cambiar los fundamentos teóricos de la Ra- diometría.

IV.- METODO DE MEDIDA.

Como ya hemos visto en el capítulo II, para la materialización del patrón primario de Fotometría ya no estamos hoy obligados a utilizar el cuerpo negro ó radiador completo, cuya realización, puesta a punto y mantenimiento es muy delicada y costosa, razón por la que son muy pocos los Laboratorios Nacionales que disponen de él.

El hecho de que la función de eficiencia espectral luminosa del ojo, $V(\lambda)$, esté definida y tabulada por la Comisión Internacional de Iluminación (1,2,3), y de que se haya asignado un valor definitivo a la constante $K_m = 683$ lúmenes por vatio (79), con lo que la relación entre las magnitudes fotométricas y las radiométricas quedó por fin aclarada, ya que,

$$E_v = K_m \cdot \int E(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

nos permite realizar el patrón fotométrico directamente a partir de la irradiancia espectral absoluta, $E(\lambda)$, producida por una fuente luminosa sobre una superficie a una distancia conocida.

En consecuencia podremos realizar el patrón fotométrico con tanta precisión como podamos medir $E(\lambda)$, esto es, de la calidad de la Escala Espectrorradiométrica Absoluta.

Para medir la irradiancia sobre una superficie se necesita un Radiómetro patrón. Hasta hace poco tiempo los radiómetro más precisos consistían en un detector térmico calibrado

respecto a la emisión de un cuerpo negro patrón. Existen ahora radiómetros absolutos autocalibrados que miden la irradiancia recibida sin que sea necesario un calibrado respecto a ninguna fuente exterior. Son instrumentos de medida primarios en sí mismos. Uno de estos Radiómetros será el que nosotros utilicemos como unidad de medida de referencia.

Hecho un estudio bibliográfico (63,64) de los detectores absolutos existentes en la actualidad, y de sus características de exactitud, sensibilidad y conveniencia, hemos elegido un Radiómetro Piroeléctrico Calibrado Electricamente (R.P.C.E.), un moderno radiómetro absoluto desarrollado por W.R. Blevin y J. Geist (11,12) en 1973 y comercializado por Laser Precision Corporation a partir de 1975. Este detector piroeléctrico mide la energía radiante que llega a su superficie sensible desde el ultravioleta hasta el lejano infrarrojo, en W/m^2 , con una exactitud estimada del 1%. Su funcionamiento y la descripción de sus elementos será hecha en el siguiente capítulo.

DESARROLLO MATEMATICO.

Una vez disponible el detector patrón, podemos medir la energía que llega a él procedente de una fuente luminosa, en W/m^2 ; si de alguna manera pudiéramos seleccionar zonas espectrales, podríamos conocer la energía encerrada en cada una de esas zonas. Si utilizáramos como fuente una lámpara de incandescencia que emite sin grandes variaciones a lo largo del espectro visible, siguiendo con bastante aproximación la ecua

ción de Planck, podríamos utilizar zonas espectrales relativamente anchas, como por ejemplo las que limitan los filtros interferenciales, para resolver el espectro.

Supongamos que para seleccionar zonas del espectro de radiación emitido por una fuente luminosa utilizamos filtros interferenciales cuya transmitancia llamaremos $\tau_i(\lambda)$, (7,15,16, 17,76). El problema que tenemos planteado es como reconstruir la curva de irradiancia espectral $E(\lambda)$ en $W/m^2 \cdot nm$, de la fuente luminosa, a partir de los datos que nos proporciona el sistema de medida, esto es, de los valores de la irradiancia E_i producida por la lámpara sobre el radiómetro a través de cada uno de los filtros.

Dada una lámpara de incandescencia con filamento de wolframio, $E(\lambda)$ es la irradiancia espectral que produce sobre una superficie a una distancia d , y $L(\lambda)$ su radiancia espectral.

$L(\lambda)$ se asemeja a la radiancia teórica de un cuerpo negro, $L_\lambda(T_c)$, a la temperatura T_c , temperatura de color de la lámpara, pero no es exactamente igual. Estudios realizados por de Vos (8,9) para la emisividad $\epsilon(\lambda)$ del wolframio llegan a la conclusión de que:

$$L(\lambda) = L_\lambda(T_c) \cdot K(\lambda) \quad (4,1)$$

donde $K(\lambda)$ puede ser un polinomio de tercer orden que tiene por objeto ajustar las curvas de radiancia del cuerpo negro (ecuación de Planck) y de una lámpara de incandescencia con

filamento de wolframio, como puede verse en la figura 4.

En el caso de la irradiancia espectral, $E(\lambda)$, tendremos una ecuación similar:

$$E(\lambda) = E_{\lambda}(T_c) \cdot K(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot (e^{c_2/\lambda \cdot T_c} - 1)^{-1} \cdot (a_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3) \quad (4,2)$$

Como en el camino óptico lámpara-elemento detector se pueden colocar distintos filtros interferenciales de transmitancia espectral $\tau_i(\lambda)$, la irradiancia total E_i sobre la superficie del detector para cada filtro vendrá dada por :

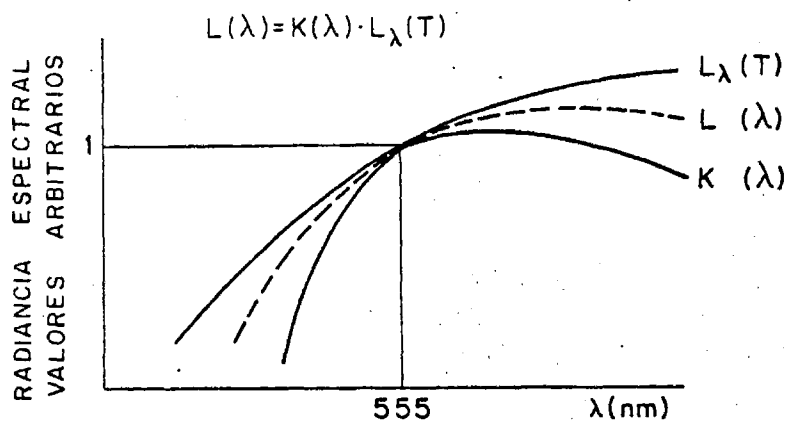
$$E_i = \int E(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \cdot d\lambda = \int E_{\lambda}(T_c) \cdot K(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \cdot d\lambda = \sum_{\lambda} (a_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3) \cdot N_i(\lambda) \quad (4,3)$$

donde:

$$N_i(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot (e^{c_2/\lambda \cdot T_c} - 1)^{-1} \cdot \tau_i(\lambda)$$

Estos factores $N_i(\lambda)$ tienen un valor exacto para cada λ , por lo tanto la ecuación (4,3) se puede reescribir, sumando nanometro a nanometro,

$$E_i = a_0 \cdot \sum_{\lambda} N_i(\lambda) + a_1 \cdot \sum_{\lambda} \lambda \cdot N_i(\lambda) + a_2 \cdot \sum_{\lambda} \lambda^2 \cdot N_i(\lambda) + a_3 \cdot \sum_{\lambda} \lambda^3 \cdot N_i(\lambda) \quad (4,4)$$



40

Fig. 4.- Ajuste de la curva de radiancia del cuerpo negro $L_{\lambda}(T)$ a la de una lámpara de incandescencia $L(\lambda)$ con filamento de wolframio por medio de una función de corrección $K(\lambda)$, estudiada por de Vos.

Cada uno de estos sumatorios se puede calcular independientemente en el intervalo espectral determinado por el filtro interpuesto en el camino óptico lámpara-detector.

Los valores E_i son valores experimentales proporcionados por el sistema de medida en W/m^2 con cada uno de los filtros. Las incógnitas son por tanto, a_0 , a_1 , a_2 y a_3 , que quedarán perfectamente determinadas siempre que dispongamos de cuatro ecuaciones, lo que equivale a medir con cuatro filtros interferenciales.

El sistema de ecuaciones que nos quedaría sería el siguiente:

$$E_i = a_0 \cdot \sum_{\lambda} N_i(\lambda) + a_1 \cdot \sum_{\lambda} \lambda \cdot N_i(\lambda) + \quad (4,5) \\ + a_2 \cdot \sum_{\lambda} \lambda^2 \cdot N_i(\lambda) + a_3 \cdot \sum_{\lambda} \lambda^3 \cdot N_i(\lambda) \quad i = 1, \dots, 4$$

siendo λ_i y λ'_i los límites de la transmitancia del filtro.

Una vez que $K(\lambda)$ sea una función conocida, bastaría con volver a la ecuación (4,2) y reconstruir la irradiancia espectral absoluta nanometro a nanometro. Así tendríamos:

$$E(\lambda) = E_{\lambda}(T_c) \cdot K(\lambda) = (1/\lambda^5) \cdot (e^{c_2/\lambda \cdot T_c} - 1)^{-1} \cdot (a_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3) \quad (4,6)$$

En esta ecuación se ha considerado $c_1 = 1$, que es lo mismo que incorporarla a las constantes a_0 , a_1 , a_2 y a_3 . De esta manera la solución matemática será válida cualquiera que sea

el conjunto de unidades que se utilice para las distintas magnitudes.

Bastan cuatro filtros para obtener la solución exacta del sistema expresado en la ecuación (4,5). No obstante se pueden obtener mejores soluciones con un conjunto mayor de filtros a lo largo del espectro, lo que da lugar a un mayor número de ecuaciones, y resolviendo reiteradamente el problema, sustituyendo la $E_\lambda(T)$ por la $E_1(\lambda)$ obtenida tras la primera resolución del sistema, y ésta por la $E_2(\lambda)$ que se obtiene en la segunda resolución, Así sucesivamente hasta que $E_j(\lambda) = E_{j+1}(\lambda)$, esto es, la irradiancia espectral de entrada debe coincidir básicamente con la de salida del cálculo. Un computador electrónico realiza el cálculo así programado.

Una vez que tenemos claro el camino a seguir, estamos en condiciones de emprender el montaje y puesta a punto del sistema de medida que describiremos en el siguiente capítulo.

V.- MONTAJE EXPERIMENTAL.

Hemos instalado una serie de elementos en un banco óptico, todo ello en un recinto aislado del exterior por paredes pintadas de negro a fin de evitar en lo posible radiaciones ajenas a las del elemento emisor.

El montaje experimental queda esquematizado en la figura 5 y se pueden diferenciar en él claramente tres partes:

- 1) Elemento emisor
- 2) Sistema óptico
- 3) Sistema de detección

ELEMENTO EMISOR.

Como fuente luminosa hemos utilizado una lámpara de incandescencia de cuarzo-iodo, F1, de 1000 vatios, patrón de irradiancia espectral, calibrada en 1975 en el NBS de USA directamente respecto al cuerpo negro. Se adjunta copia del certificado de calibración.

El motivo de utilizar esta fuente no es otro que el de poder comparar nuestros resultados con los proporcionados por el N.B.S., pero hubiera sido posible utilizar cualquier otra fuente con la única restricción de que emita con una distribución espectral parecida a la curva de la ecuación teórica de Planck.

El calibrado de esta lámpara patrón está hecho en unas determinadas condiciones: a 50 cm tomados a partir del

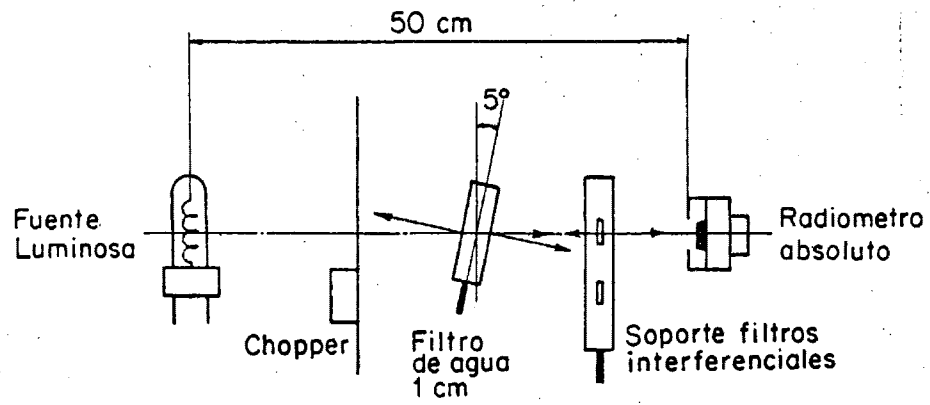


Fig. 5.- Esquema del montaje experimental.

47



UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE
National Bureau of Standards
Washington, D.C. 20234

DATE: August 22, 1975

TO: Antonio Corrons
Instituto de Optica
Serrano 121
MADRID-6
S P A I N

FROM: Donald A. McSparron *D m*
232.04

SUBJECT: Lamp Standard of Spectral Irradiance

The lamp was calibrated using the equipment and procedures described in the enclosed write-up, "Type DXW Lamp Standards of Spectral Irradiance". The preparation and operation of the type FEL lamp supplied for this calibration are described in the enclosure, "Type FEL Lamp Standards of Spectral Irradiance". Note particularly paragraph IV of this enclosure which describes the orientation of the test lamp. The posts of lamp F-1 are about 3/16" shorter than normal. Extra care should be taken to insure that the lamp's positive terminal is properly seated in the kinematic mount. A copy of the goniometric scan performed on this lamp is also enclosed.

The results of this test are given in the attached Table 1. See also the enclosure, "Revised Uncertainty Estimates for Spectral Irradiance Calibrations".



TABLE 1

Spectral irradiance (W/cm^3) at 50 cm from lamp F-1 when operated on dc with the polarity as indicated on the attached identification plate.

λ (nm)	Lamp No. F-1 7.900 amp
250	0.1549
260	0.2703
270	0.4609
280	0.7350
290	1.114
300	1.615
310	2.269
320	3.185
330	4.301
340	5.617
350	7.199
400	19.85
450	40.53
500	67.73
555	101.2
600	128.4
654.6	158.3
700	179.2
800	209.4
900	220.0
1050	210.3
1150	195.3
1200	185.7
1300	166.9
1540	124.3
1600	114.6

plano vertical que pasa por el centro de su elemento emisor y cuando por su filamento pasa una intensidad de corriente $I = 7.900$ amperios. Para el mantenimiento de la intensidad de corriente se ha utilizado una fuente de alimentación estabilizada "Vinculum", especial para medidas fotométricas y radiométricas, cuya estabilidad es mejor del 0.01%.

El control se lleva a cabo midiendo continuamente la diferencia de potencial en bornas de una resistencia patrón adecuada ($R_p = 0.1000\Omega$) colocada en serie en el circuito de alimentación. La lámpara patrón puede verse en la figura 6. Su curva de irradiancia espectral absoluta en $W/m^2.nm$ proporcionada por el N.B.S., en la figura 7.

En el banco óptico hemos colocado una torre de alineamiento que soporta el portalámparas. Esta torre dispone de cinco grados de libertad de movimiento: tres desplazamientos según tres ejes en el espacio y dos giros alrededor de dos ejes perpendiculares, uno vertical y otro horizontal perpendicular a la dirección de incidencia.

La distancia fuente-sistema de detección se midió con una regleta patrón y el ajuste se hizo con tornillo micrométrico.

SISTEMA OPTICO.

El sistema óptico está constituido por los elementos situados entre la fuente luminosa y el sistema de detección. Estos son: un chopper, una colección de filtros interferencia-

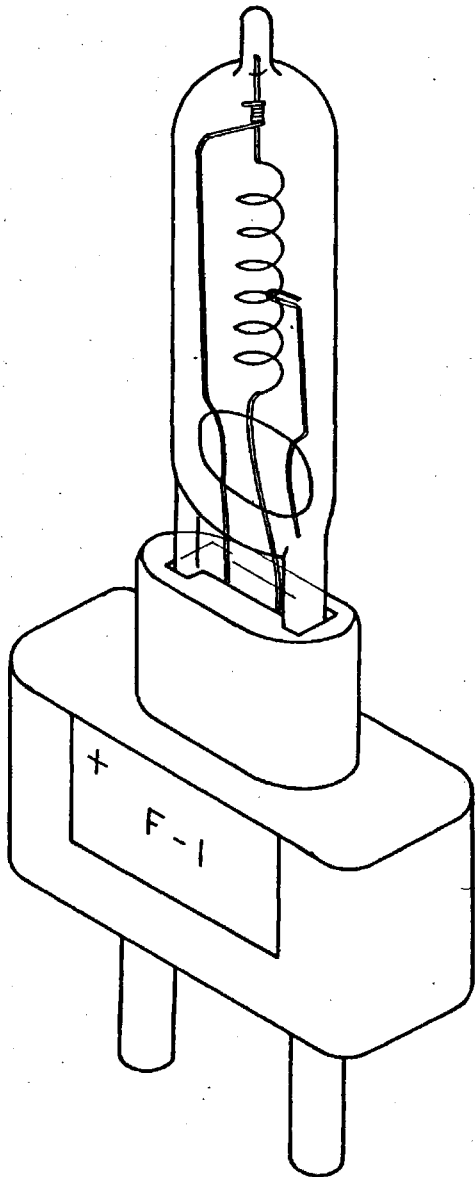


Fig. 6.- Lámpara de incandescencia "F1", patrón de irradiación espectral (cuarzo-iodo, 1000 vatios).

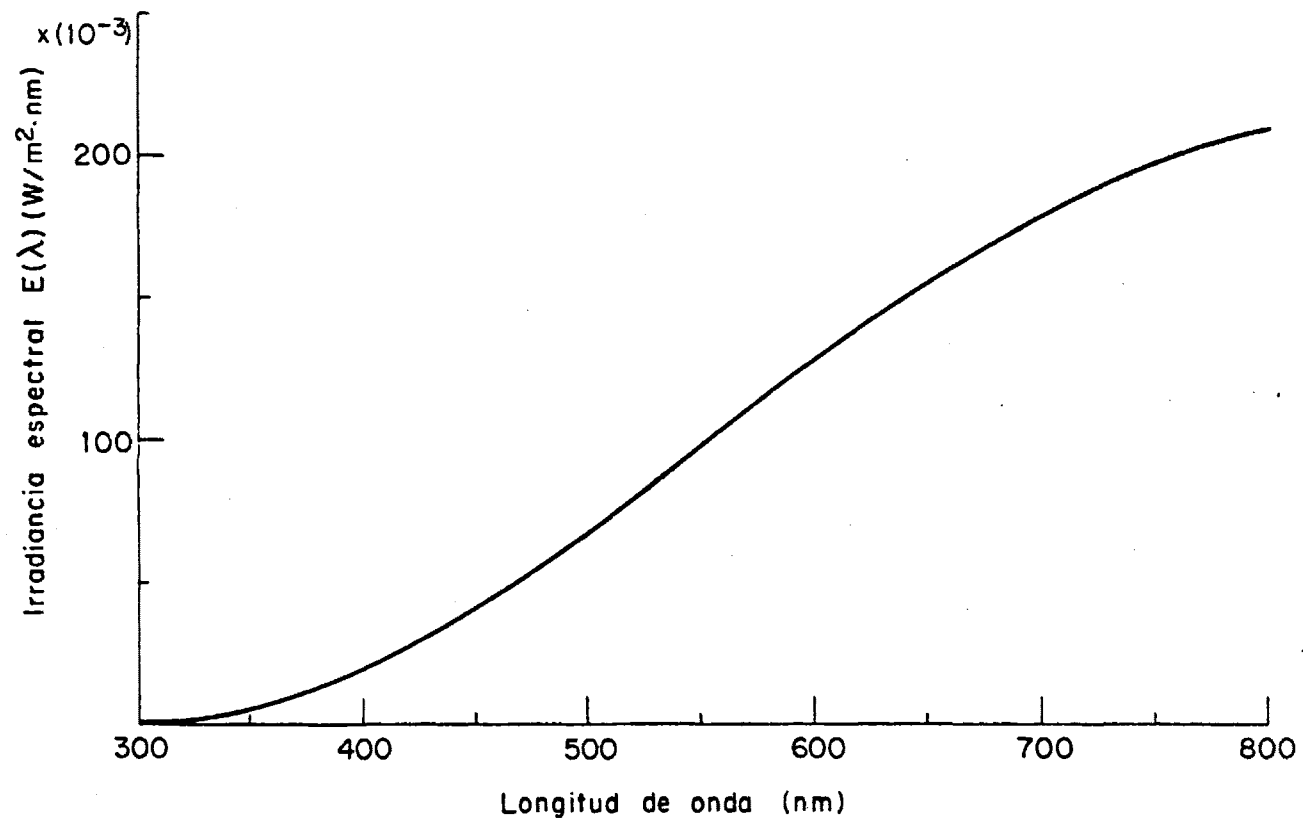


Fig. 7.- Curva de irradiancia espectral de la lámpara Fl.

les y un filtro de agua destilada de 1 cm de espesor, en una cubeta de vidrio de caras planoparalelas. Cada uno de estos elementos los describiremos a continuación:

Chopper.

El sistema de detección elegido requiere la utilización de un chopper para modular la energía radiante. El detector medirá exclusivamente la radiación modulada por el chopper. Cualquier fuente de radiación continua ó intermitente no en fase con el chopper es ignorada por el detector.

El chopper tiene un rendimiento del 25% y una frecuencia de 15 Hertz. En nuestro montaje forma parte esencial del sistema de medida, esto es, es uno de los elementos que constituyen el radiómetro absoluto (6).

Es el modelo CTX-410 A de Laser Precision Corporation.

Filtros interferenciales.

Como la zona elegida para nuestro trabajo ha sido el espectro visible, esto es, las longitudes de onda comprendidas entre 380 y 780 nanometros, hemos elegido filtros interferenciales cuyas transmitancias espectrales estuvieran en este rango. Los filtros elegidos son una colección de la casa Schott, y sus picos de transmitancia corresponden a las siguientes longitudes de onda: 403, 503.9, 552, 605, 654.7, 699.9, y 799.8 nanometros.

Los filtros se han elegido de forma que no presenten

mas bandas de transmisión que la nominal dentro del espectro visible. Sus transmitancias espectrales fueron medidas en distintos espectrofotómetros (Cary-17, Beckman DU, Spectronic 504). Aquí surgió el primer problema: los máximos de transmitancias discrepaban en un 1% y aquellos puntos donde la transmitancia era muy pequeña había variaciones de hasta un 3% en las medidas realizadas en los distintos espectrofotómetros. Diferencias evidentemente inaceptables.

Este fué el motivo por el que decidimos medir la $r(\lambda)$ de los filtros tal y como luego iban a ser utilizados en el montaje, es decir, interceptando el camino óptico fuente luminosa-sistema de detección, estando éstos separados 50 cm. Así lo hicimos y a los 50 cm exactos de la lámpara, en el mismo lugar donde debería estar la apertura de entrada del radiómetro, pusimos la rendija de entrada del monocromador; la rendija utilizada tenía la misma longitud que el diámetro de la superficie sensible del detector del radiómetro que se utilizará en la fase de medidas absolutas, esto es, 8 mm. A la salida del monocromador pusimos un fotomultiplicador cuya sensibilidad espectral es del tipo S20, idónea para medidas en el visible, y un detector piroeléctrico para medidas en el infrarrojo.

Así obtuvimos la transmitancia espectral de los siete filtros interferenciales desde 350 a 1400 nm, los resultados pueden verse en las figuras 8, 9, y 10. La anchura de banda era de $\Delta\lambda = 0.5$ nm y la precisión de la medida del 0.1%.

Las medidas se hicieron nanometro a nanometro registrando las respuestas del detector cuando en el camino óptico

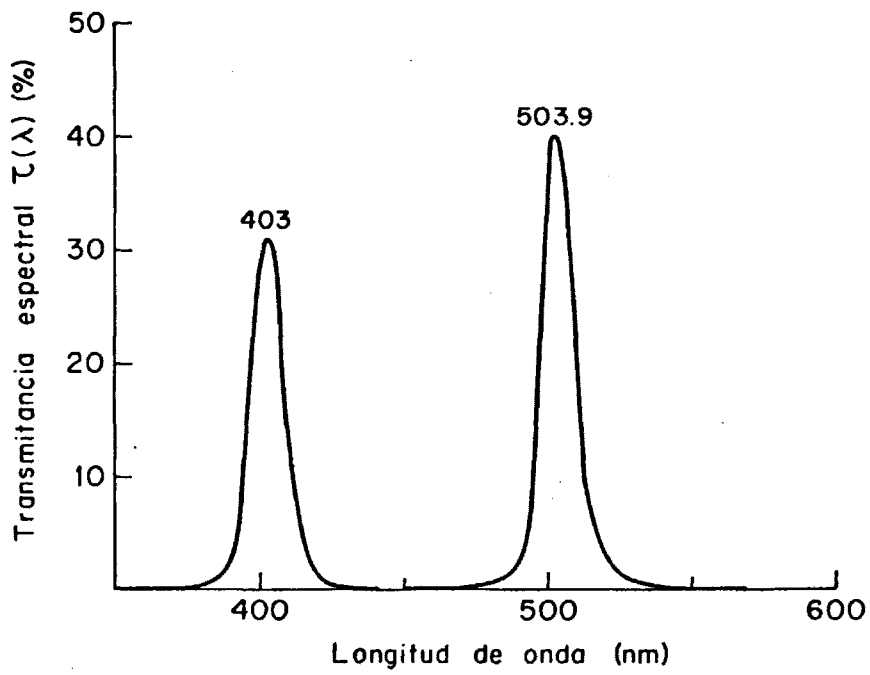


Fig. 8.- Transmitancia espectral de los filtros interferenciales 403 y 503.9 nm.

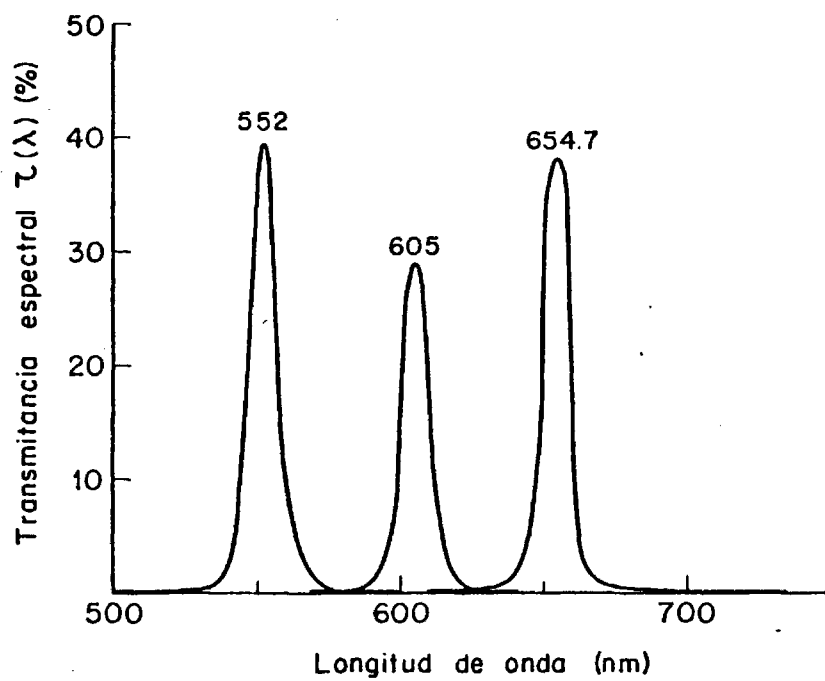


Fig. 9.- Transmitancia espectral de los filtros interferenciales 552, 605 y 654.7 nm.

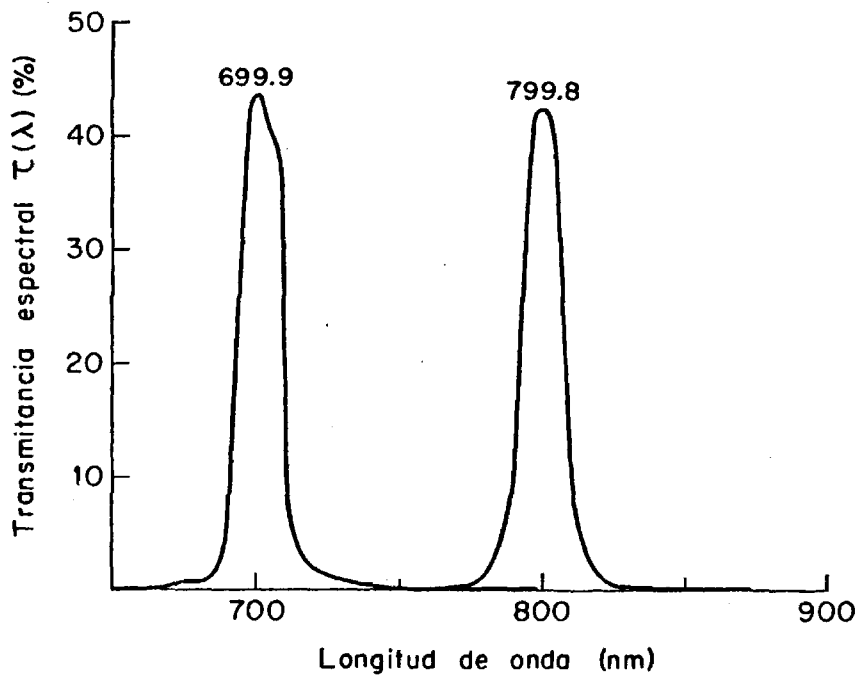


Fig. 10.- Transmittancia espectral de los filtros interferenciales 699.9 y 799.8 nm.

estaba colocado el filtro interferencial y cuando no lo estaba. El cociente de estas respuestas es la transmitancia del filtro en cuestión en la correspondiente longitud de onda. Se repitieron las medidas para cada filtro tres veces y se calculó su valor medio. La repetibilidad de los resultados nos animó a adoptar este sistema de medida como el mas preciso. Por otra parte tenemos la ventaja de que se han medido las transmitancias espectrales ocupando cada filtro la misma posición que posteriormente ocuparan en la realización de la Escala Espectrorradiométrica Absoluta, con lo que se evitan posibles errores debidos a la variación de la $r(\lambda)$ con la distribución espacial de la luz incidente sobre el filtro.

Filtro de agua destilada.

El sistema de detección elegido registra la energía radiante recibida en el rango espectral comprendido entre 200 nm y 50 μ m. Algunos de los filtros tienen bandas de transmisión en el infrarrojo, por lo que decidimos utilizar un filtro de agua destilada de 1 cm de espesor, cuya única finalidad es impedir el paso de energía radiante de longitudes de onda superiores a los 1400 nm. Por esto hemos medido los filtros interferenciales hasta esa longitud de onda límite. El agua destilada se intriduce en una cubeta con dos ventanas planoparalelas de vidrio de 5 mm de espesor cada una.

La transmitancia espectral del filtro de agua fué medida de la misma manera que la de los filtros interferenciales

y los resultados están representados en la figura 11, donde se puede observar claramente las bandas de absorción del agua en 950 y 1150 nm.

Este filtro se midió con una pequeña inclinación (5° respecto a la normal) de manera que las interreflexiones entre los filtros no entraran en la superficie sensible del detector.

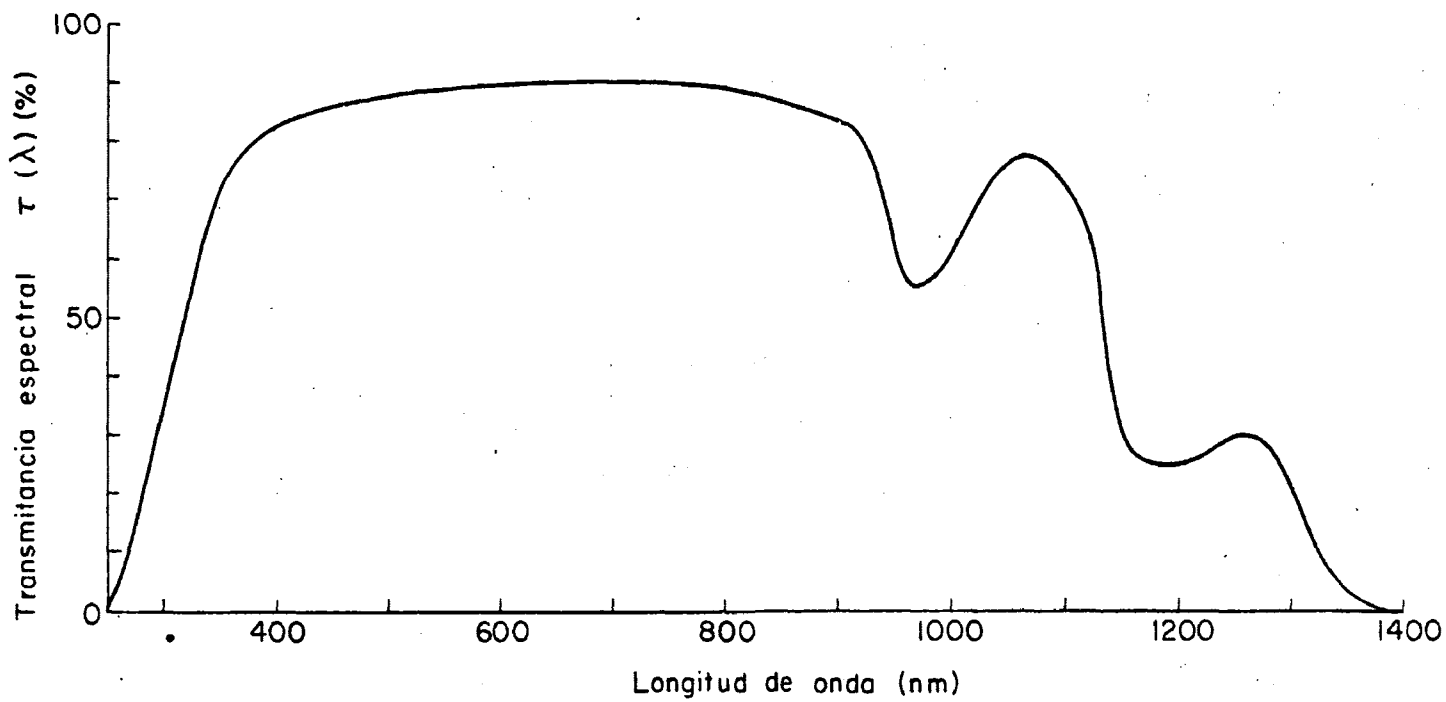
Durante las medidas de las transmitancias espectrales de los filtros y su utilización en las medidas de la irradiancia espectral $E(\lambda)$, se ha mantenido estable la temperatura del laboratorio en $\pm 0.5\%$.

Los portafiltros se mantuvieron a temperatura constante con un sistema de estabilización que nos garantiza una precisión en la estabilidad de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

Este sistema de estabilización está formado por un circuito cerrado, por donde circula el fluido calefactor ó refrigerante y del que forma parte los portafiltros, un circuito abierto de agua corriente y un termostato que mantiene constante la temperatura deseada, en nuestro caso a la temperatura ambiente (22°C). Un termómetro de precisión aprecia las décimas de grado centígrado.

SISTEMA DE DETECCION.

El sistema de detección elegido es un radiómetro absoluto calibrado electricamente (R.P.C.E.). Tiene la ventaja de que no requiere ningún calibrado radiométrico previo respecto a un emisor patrón de energía radiante, sino que se autoca-



55

Fig. 11.- Transmitancia espectral del filtro de agua destilada de 1 cm de espesor + las dos ventanas de vidrio que forman la cubeta.

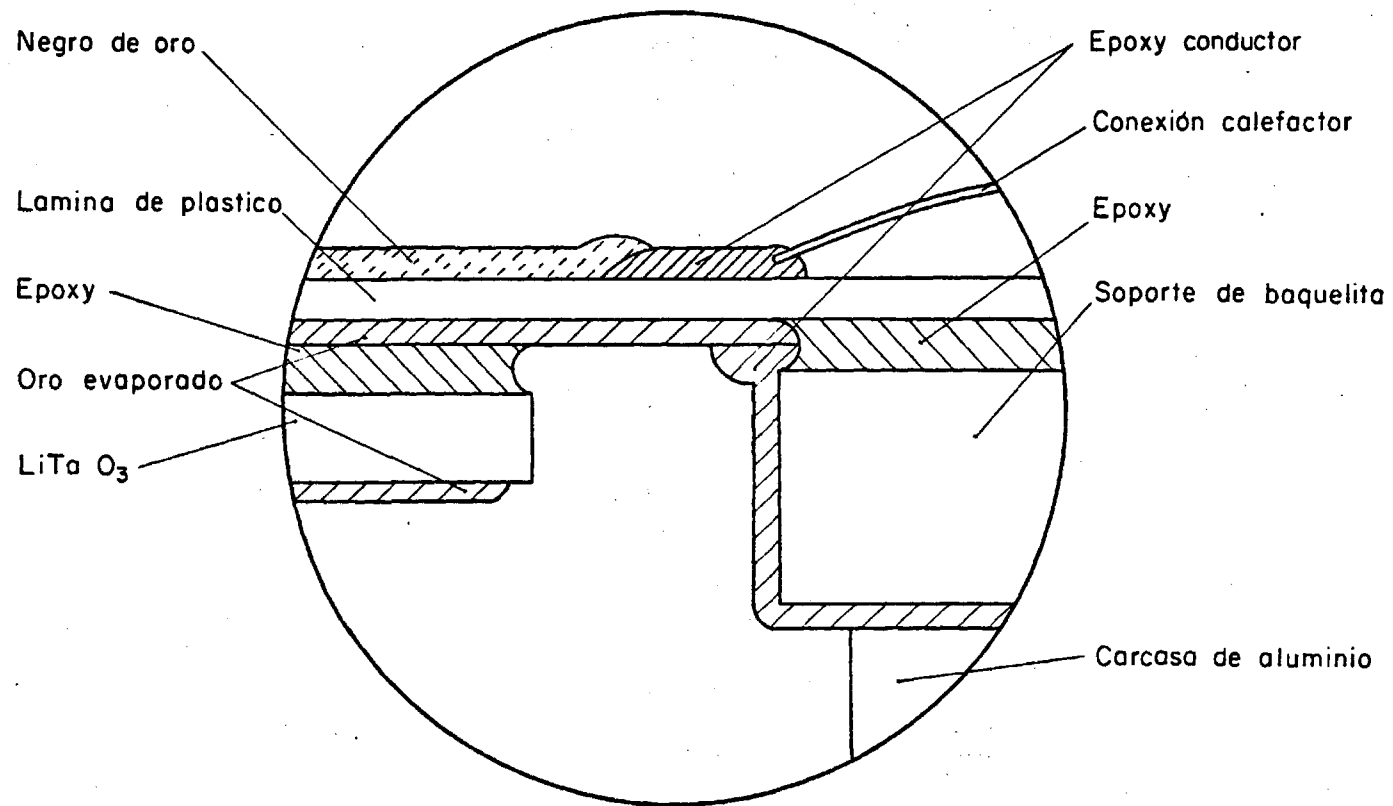
bra electricamente. Es el Rs-3940 Electrically Calibrated Pyroelectric Radiometer de Laser Precision Corporation.

Funcionamiento del R.P.C.E.

El elemento detector es un conjunto formado por un detector piroeléctrico (Tantalato de Litio montado sobre un sustrato de baja conductividad), un preamplificador y una estructura mecánica y eléctrica apropiada a fin de poder medir la respuesta.

Ante el detector piroeléctrico hay una fina película resistente al calor recubierta por una capa negra absorbente (negro de oro) a la que llega la radiación emitida por la fuente luminosa, figura 12. Esta superficie altamente absorbente al llegarle la radiación óptica se calienta, pero como ésta está modulada por un chopper, este calentamiento óptico sería intermitente, y el detector piroeléctrico nos marcaría constantemente las variaciones de temperatura. Se puede hacer pasar una corriente eléctrica por la misma superficie que produzca en ella el mismo calentamiento que la radiación, pero precisamente cuando no le llega energía radiante (6,11).

Cuando se consigue un equilibrio entre el calentamiento producido por la radiación óptica y el producido por la corriente eléctrica, el detector piroeléctrico nos marca cero, puesto que no hay diferencias de temperatura entre las dos fases del ciclo. En ese instante si nosotros podemos medir la energía eléctrica que suministramos sabremos con exactitud la



51

Fig. 12.- Detalle de la configuración del receptor del R.P.C.F.

energía radiante que llega al detector, puesto que son iguales. Es decir que utilizando el detector piroeléctrico como instrumento de cero podemos saber la energía radiante que llega al R.P.C.E. en W/m^2 .

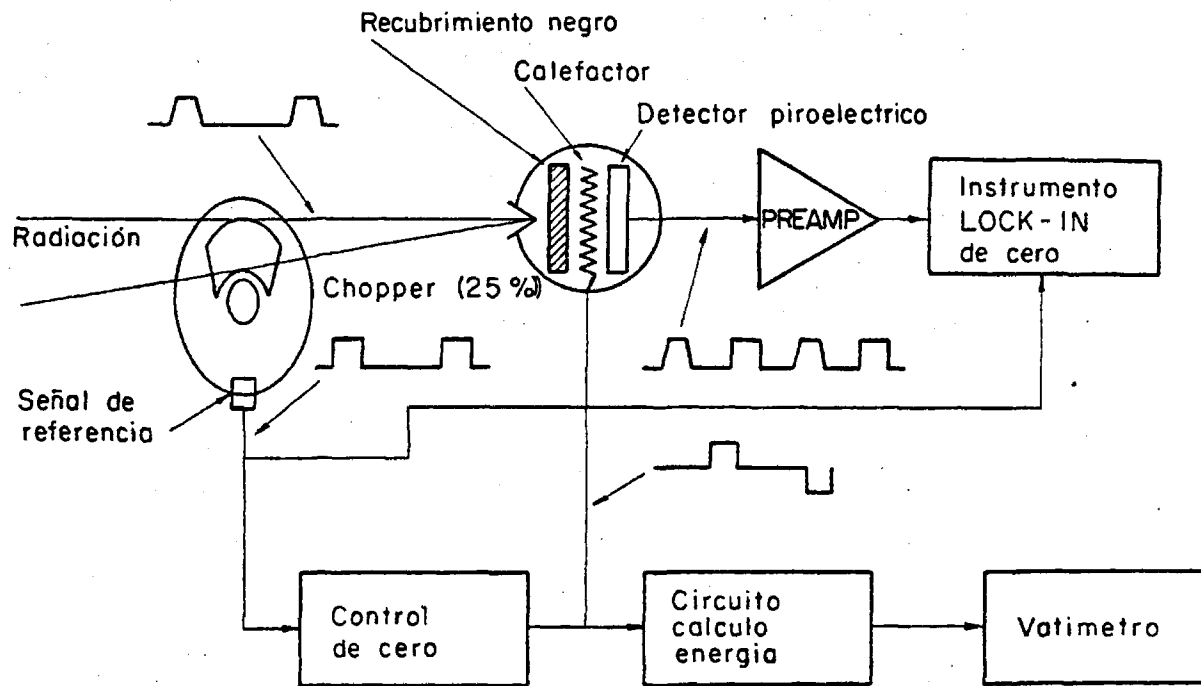
En nuestro radiómetro se puede medir con una exactitud de $\pm 1\%$. Esta es la incertidumbre que existe en la equivalencia entre la excitación óptica y la eléctrica.

Utilización del sistema R.P.C.E.

El sistema R.P.C.E. está formado por un voltímetro Lock-in Amplifier (Princeton Applied Research Model 186 Waveform Independent Lock-in) que se utiliza como instrumento de cero, un chopper CTX-410 A, un indicador de energías (vatímetro Rs-355) y el detector RsP-393 (detector piroeléctrico).

El chopper lleva un conjunto emisor-receptor optoelectrónico diametralmente opuesto a su apertura, que genera una onda desfasada 180° con la radiación modulada, manteniendo la misma forma. La señal eléctrica así generada se lleva al elemento calefactor (la propia superficie negra absorbente) por medio de un circuito equilibrado, figura 13. Cuando el voltímetro lock-in marca cero se da la equivalencia descrita en el apartado anterior. Esto es, la energía óptica recibida es exactamente igual a la energía eléctrica suministrada al elemento calefactor. La medida radiométrica en estas condiciones se reduce a medir la intensidad de corriente eléctrica que pasa por él y la diferencia de potencial aplicada entre los pun

Rs - 3940 WAVEFORM INDEPENDENT RADIOMETER



69

Fig. 13.- Esquema del circuito eléctrico simplificado del R.P.C.E.

tos de contacto. Un multiplicador de precisión nos proporciona una señal equivalente al producto, que enviada a un panel digital nos da directamente la energía en vatios.

Para alinear todos los elementos ópticos se utilizó un haz láser y se tuvieron en cuenta las posibles fuentes secundarias de radiación, eliminándose con un sistema adecuado de diafragmas.

Puesto a punto el montaje experimental nos encontramos en condiciones de iniciar el proceso de medidas para tratar de obtener la $E(\lambda)$ de la lámpara elegida.

VI.- ESTIMACION DE LA EXACTITUD DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.

Vamos a hacer una estimación de la exactitud del sistema de medida.

Los factores que pueden introducir posibles errores en la medida de la irradiancia espectral sobre el receptor son:

- 1) Exactitud del Radiómetro Absoluto.
- 2) Exactitud de los valores de las transmitancias espectrales de los filtros utilizados.

El estudio de estas dos posibles fuentes de error nos permite estimar la exactitud de nuestro sistema de medida. Pero como se trata de calibrar lámparas patrones de irradiancia espectral no valdría de mucho tener un sistema de medida muy exacto si no fijamos además unas determinadas condiciones en la fuente luminosa para su posterior reproducibilidad.

¿De qué nos vale conocer con mucha precisión y exactitud la irradiancia espectral absoluta producida por una fuente luminosa si no fijamos de antemano su posición, orientación y condiciones eléctricas?. Si queremos tener un patrón de irradiancia espectral es para su utilización posterior.

Por esta razón estudiaremos también los factores que intervienen a la hora de reproducir las condiciones en que fué calibrada la fuente, que son:

- 3) Posición y orientación del elemento emisor.
- 4) Distancia fuente luminosa-sistema de detección.
- 5) Estabilidad en la Intensidad de corriente de alimentación de la lámpara.

Estudiaremos todos los factores independientemente para ver su aportación en la precisión de la medida y a partir de ellos calcularemos el error cuadrático medio que puede esperarse en los resultados finales.

EXACTITUD DEL SISTEMA DE MEDIDA.

Exactitud del R.P.C.E.

Como ya hemos explicado anteriormente, la exactitud con que podemos medir con un sistema de este tipo viene determinada por la incertidumbre en la equivalencia entre la excitación óptica y la eléctrica en la superficie sensible del R.P.C.E. También son factores a considerar la absorptancia de dicha superficie negra (0.995), la precisión en el área de la apertura del detector ($0.5 \text{ cm}^2 \pm 0.2\%$), la linealidad de las escalas de medida, el ruido, la temperatura, etc.

Todos estos factores han sido estudiados por Laser Precision Corporation y como consecuencia de ello garantizan como exactitud del Radiómetro Absoluto un 1%. Esta exactitud ha sido comprobada por nosotros en los Laboratorios del NBS de los USA comparando directamente nuestro radiómetro con el Radiómetro de Termopila Eléctricamente Calibrado, allí desarrollado y cuya exactitud ha sido estimada en 0.3%. La falta de acuerdo entre las medidas por uno y otro es menor del 1%.

Exactitud de la medida de la transmitancia espectral.

Para estimar la exactitud de la medida de la transmitancia espectral hemos calculado el error cuadrático medio de los posibles factores que intervienen en su medida. Estos son:

- 1) Luz esparcida en el monocromador. El monocromador utilizado es un Jarell-Ash modelo 78-460, de 0.75 m de focal, en configuración Czerny-Turner. La luz esparcida en este instrumento es, como máximo, del 0.1% cuando se ilumina con fuentes policromáticas, como es nuestro caso.
- 2) Exactitud del contador de longitudes de onda. Calibramos el monocromador utilizando fuentes de descarga de mercurio a baja presión. Hemos utilizado rendijas de entrada y salida adecuadas para que la anchura de banda del monocromador fuera de 0.5 \AA , en estas condiciones la imprecisión en el ajuste del pico de transmitancia era de 1 \AA , lo que resulta despreciable en nuestro caso.
- 3) Estabilidad del sistema de detección. Estudiamos las variaciones de la respuesta del sistema iluminando con una fuente cuya tensión e intensidad teníamos controladas y encontramos que durante un periodo de 24 minutos, registrando las respuestas minuto a minuto, la variación máxima fué de 0.2%.

- 4) Linealidad del amplificador. Utilizamos como amplificador un Keithley modelo 414-S Picoammeter cuya linealidad es $\pm 0.01\%$ por escala. Ajustamos las escalas de forma que pudiéramos medir la transmitancia espectral de un filtro dentro de la misma década y utilizamos un voltímetro digital de $4\frac{1}{2}$ cifras, con lo que la linealidad es un factor que influye muy poco en la medida final.

Teniendo en cuenta todos estos sumandos y calculando el error cuadrático medio a partir de ellos tendremos la incertidumbre en la medida de la transmitancia espectral de los filtros. El resultado es de $\pm 0.2\%$.

PRECISION EN LA REPRODUCIBILIDAD DE LAS CONDICIONES DEL EMISOR.

Orientación y posición del elemento emisor.

Como ya dijimos al describir el montaje experimental, para colocar y orientar la fuente luminosa disponemos de una torre de alineamiento con cinco grados de libertad, lo que nos ha permitido estudiar por separado cada uno de ellos. Los resultados a que hemos llegado son los siguientes:

- 1) Un error de orientación 5° en el giro alrededor del eje vertical da lugar a una variación de 0.1% en la irradiancia sobre el detector.

- 2) Un error de orientación de 1° en el giro alrededor del eje horizontal perpendicular a la dirección de incidencia da lugar a una variación de $\pm 2\%$.

Para minimizar estos errores hemos utilizado un haz láser de forma que el rayo incidente sobre el plano del bipos- te de la base de la fuente y el reflejado se superpongan. De esta manera el error máximo que se puede cometer es de 5 minutos de arco, con lo que, observando los valores más arriba indicados, las variaciones producidas por una mala orientación se hacen despreciables.

Los otros tres grados de libertad son los tres desplazamientos en las tres direcciones del espacio; uno de ellos es la distancia emisor-receptor, que consideraremos en el siguiente apartado, y los otros dos están en un mismo plano, perpendicular a la dirección de incidencia. Se hicieron medidas para ver su influencia en el resultado final y hacen falta cometer errores de colocación observables a simple vista para notarse una variación apreciable en las respuestas del detector, por lo que podemos asegurar que estos dos grados de libertad no influyen en el resultado final.

Distancia fuente luminosa-sistema de detección.

Fué medida con una regleta patrón de 50 cm ± 0.005 y el ajuste se hizo con tornillo micrométrico. Registramos las respuestas del detector variando esta distancia, y encontramos

que para una variación de 1 mm la respuesta del sistema de medida variaba en un 0.4%.

Repetimos varias veces estas medidas y la variación entre la medida mayor y la menor es de 0.4 mm. Esta variación es debida en gran parte a la apreciación visual.

Teniendo en cuenta las mediciones anteriores, a nuestro error máximo posible en la medida de la distancia, le corresponde una incertidumbre de $\pm 0.16\%$ en la respuesta del sistema de medida.

Influencia de la variación de la Intensidad de corriente en el Flujo emitido por la fuente luminosa.

Se trata de medir la magnitud de la variación en el flujo emitido por la fuente como consecuencia de una posible imprecisión en la medida de la corriente que circula por ella.

La intensidad de calibrado es de 7.900 amperios. Hemos utilizado el sistema de control de la intensidad de corriente ya descrito que nos permite apreciar variaciones de 1 mA por encima y por debajo de la intensidad nominal de calibrado, esto es, 2 mA frente a 7.900 amperios, lo que representa un control de $\pm 0.025\%$.

Registramos las respuestas del sistema de medida variando miliamperio a miliamperio la intensidad de corriente entorno a la intensidad de calibrado, y considerando la precisión en el ajuste de intensidad, podemos calcular la incertidumbre

correspondiente en el flujo emitido por la fuente. El resultado ha sido de $\pm 0.12\%$.

Estas tres últimas fuentes de error no son importantes en la medida de la irradiancia espectral $E(\lambda)$ que llega al detector. Sin embargo las consideramos en el cálculo total porque son muy importantes en el calibrado de cada fuente concreta, cuya reproducibilidad es esencial en su utilización posterior.

En el capítulo IX se hace una exposición más detallada de la evaluación de errores instrumentales descrita en los dos apartados anteriores.

Recopilando los errores significativos que hemos calculado anteriormente tenemos:

Error posible debido a:

- R.P.C.E.	$\pm 1\%$
- Medida de la transmitancia espectral $\tau(\lambda)$	$\pm 0.2\%$
- Distancia fuente-detector.	$\pm 0.2\%$
- Variación del flujo de la fuente debido a la intensidad de alimentación.	$\pm 0.1\%$
ERROR CUADRATICO MEDIO	$\pm 1.04\%$

Resumiendo, la exactitud estimada con que podemos realizar las medidas experimentales en nuestro montaje es de $\pm 1.1\%$.

VII.- MEDIDAS REALIZADAS. RESULTADOS OBTENIDOS.

Puesto a punto el sistema de medida descrito anteriormente, y conocida la exactitud que se puede esperar en las medidas con él realizadas, se procedió a medir la irradiancia total producida por la lámpara F1 sobre la ventana de entrada del radiómetro patrón, a través de cada uno de los filtros interferenciales seleccionados, estando colocados en el camino óptico los elementos fijos (chopper, filtro de agua y diafragmas). Los valores obtenidos pueden verse en la Tabla II. De su observación se desprende en primer lugar, que debido a que nuestro radiómetro no es capaz de discernir energías inferiores a $0.2 \mu\text{W}$, tenemos tres cifras significativas para todos los filtros excepto para el de 403 nm , cuya lectura de 4.1 ± 0.2 supone una imposibilidad de conocer la irradiancia espectral en la zona violeta con una precisión superior al 4%. Ello es debido fundamentalmente a que las lámparas de incandescencia emiten muy poco en las longitudes de onda cortas del espectro visible.

No obstante, y tenida en cuenta esta primera limitación, seguimos el proceso de cálculo según el programa previsto.

En primer lugar, dado que la ecuación a resolver para cada filtro "i" es:

$$E_i = a_0 \cdot \sum_{\lambda} N_i(\lambda) + a_1 \cdot \sum_{\lambda} \lambda \cdot N_i(\lambda) + a_2 \cdot \sum_{\lambda} \lambda^2 \cdot N_i(\lambda) + a_3 \cdot \sum_{\lambda} \lambda^3 \cdot N_i(\lambda) \quad (7,1)$$

TABLA II

Valores de la Irradiancia obtenidos con el radiómetro con
cada uno de los filtros.

Filtros Interferenciales λ (nm)	Respuesta en μW del radiómetro absoluto
403.0	4.1
503.9	17.5
552.0	22.8
605.0	22.8
654.7	35.4
699.9	66.2
799.8	63.3

donde:

$$N_i(\lambda) = \frac{1}{\lambda^5} \cdot (e^{c_2/\lambda \cdot T_c} - 1)^{-1} \cdot r_i(\lambda) \quad (7,2)$$

como se definió en el Capítulo IV, hemos hecho un sencillo programa de cálculo para obtener los cuatro sumatorios que aparecen en la ecuación (7,1) para cada filtro, de esta manera hemos obtenido el sistema de ecuaciones dado en la Tabla III. La temperatura de color T_c de la lámpara se ha medido en un banco fotométrico por métodos clásicos y su valor es de $T_c = 3100$ K.

Para conocer exactamente a_0 , a_1 , a_2 y a_3 , basta con resolver el sistema con cuatro ecuaciones. Hemos elegido las correspondientes a los filtros 403, 503.9, 605 y 699.9. La elección se ha hecho en base a su posición en el espectro, cada 100 nanómetros aproximadamente.

Resolviendo este sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas se obtiene como resultado:

$$\begin{aligned} a_0 &= + 8.32084 \times 10^{-2} \\ a_1 &= - 3.44390 \times 10^{-4} \\ a_2 &= + 6.31934 \times 10^{-7} \\ a_3 &= - 3.71867 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

Así queda perfectamente definida la función de corrección $K(\lambda) = a_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3$, y basta sustituir sus valores en la ecuación de $E(\lambda)$ para obtener la irradiancia espectral nanometro a nanometro.

TABLA III

Sistema de siete ecuaciones obtenidas sustituyendo en la ecuación (7,1) los valores correspondientes a cada filtro. En esta tabla, los términos de la izquierda re presentan las respuestas del radiómetro con cada uno de los siete filtros, expresados en $W/m^2.nm$ y los términos de la derecha son la suma de los productos de cada sumatorio por su coeficiente correspondiente.

$$\begin{aligned} 0.0082E-13 &= a_0 \times 0.3610E-13 + a_1 \times 0.1457E-10 + a_2 \times 0.5881E-08 + a_3 \times 0.2375E-05 \\ 0.0350E-13 &= a_0 \times 0.1551E-12 + a_1 \times 0.7836E-10 + a_2 \times 0.3959E-07 + a_3 \times 0.2001E-04 \\ 0.0456E-13 &= a_0 \times 0.1866E-12 + a_1 \times 0.1032E-09 + a_2 \times 0.5706E-07 + a_3 \times 0.3156E-04 \\ 0.0456E-13 &= a_0 \times 0.1915E-12 + a_1 \times 0.1159E-09 + a_2 \times 0.7016E-07 + a_3 \times 0.4247E-04 \\ 0.0708E-13 &= a_0 \times 0.3089E-12 + a_1 \times 0.2041E-09 + a_2 \times 0.1364E-06 + a_3 \times 0.8028E-04 \\ 0.1324E-13 &= a_0 \times 0.5457E-12 + a_1 \times 0.3832E-09 + a_2 \times 0.2691E-06 + a_3 \times 0.1889E-03 \\ 0.1266E-13 &= a_0 \times 0.5690E-12 + a_1 \times 0.4553E-09 + a_2 \times 0.3644E-06 + a_3 \times 0.2917E-03 \end{aligned}$$

71

$$E(\lambda) = \frac{1}{\lambda^5} \cdot (e^{c_2/\lambda} \cdot T_c - 1)^{-1} \cdot (a_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 + a_3 \cdot \lambda^3) \quad (7,3)$$

Los resultados que se obtuvieron se muestran en la columna 2ª de la Tabla IV.

Dado que la fuente luminosa que hemos medido, F1, es una lámpara de incandescencia patrón de irradiancia espectral, calibrada en el N.B.S., podemos comparar los valores correspondientes. El resultado de esta comparación puede verse en la Tabla IV.

Los resultados que se obtienen no son satisfactorios para nuestras aspiraciones. En la zona violeta del espectro podría esperarse una variación de este tipo, dada la imprecisión en la medida del radiómetro antes apuntada, pero en el resto del espectro se esperaban valores en mejor acuerdo.

Pensamos que esto es debido a que cuatro filtros interferenciales es un número demasiado pequeño para resolver el espectro visible. Una solución sería recurrir a un programa de cálculo que nos fuera resolviendo el sistema de siete ecuaciones con cuatro incógnitas reiteradamente hasta llegar a una solución que sin ser exacta, fuera la que más se aproximase a las siete ecuaciones.

Recurrimos para ello a los programas de este tipo ya existentes para los ordenadores por nosotros utilizados. Introducimos nuestros datos. Los programas no pudieron resolvern

TABLA IV

Comparación de los valores de la irradiancia espectral ($W/m^2 \cdot nm$) de la lámpara F1 obtenidos a partir del radiómetro, con los asignados por el N.B.S.

λ (nm)	E(λ) medida por nosotros	E(λ) (N.B.S.)	Diferencia (%)
380	14.62×10^{-3}	13.79×10^{-3}	+ 5.9
400	20.44×10^{-3}	19.85×10^{-3}	+ 2.9
450	40.33×10^{-3}	40.53×10^{-3}	- 0.5
500	67.37×10^{-3}	67.73×10^{-3}	- 0.5
550	99.71×10^{-3}	98.10×10^{-3}	+ 1.6
600	133.7×10^{-3}	128.4×10^{-3}	+ 4.1
650	163.8×10^{-3}	156.0×10^{-3}	+ 5.0
700	187.5×10^{-3}	179.0×10^{-3}	+ 4.7
750	201.7×10^{-3}	196.9×10^{-3}	+ 2.4
780	204.9×10^{-3}	205.0×10^{-3}	- 0.05

el sistema.

¿Qué sucede? ¿No hay una solución que se aproxime suficientemente a las siete ecuaciones?

Para comprobarlo hemos ido resolviendo el sistema eligiendo sucesivamente grupos de cuatro ecuaciones diferentes, y las soluciones al sistema fueron completamente diferentes. Los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 y a_3 tomaban valores distintos para cada grupo de cuatro ecuaciones, incluso cambiando el signo. Sin embargo la curva que se obtiene a partir de los conjuntos de cuatro coeficientes varía relativamente poco. Se obtienen en todos los casos acuerdos similares a los de la Tabla IV entre los resultados obtenidos $E(\lambda)$ y los valores del N.B.S.

Esta dificultad, unida a la falta de precisión con que nos vemos obligados a medir con el radiómetro en la zona violeta del espectro, nos animaron a buscar un procedimiento de medida diferente.

En primer lugar, si, con el fin de contrastar nuestros valores con los suministrados por el N.B.S., nos vemos obligados a mantener la lámpara y las condiciones ópticas y eléctricas de iluminación del receptor, una solución posible para tener una señal de respuesta en el violeta capaz de ser medida con mayor precisión, es sustituir el detector por otro más sensible.

Como este cambio hay que realizarle sin que el radiómetro absoluto deje de ser el patrón primario de referencia, el nuevo detector debe estar calibrado espectralmente respecto al radiómetro.

Se eligió un fotodiodo de silicio, Si-UV-2, cuya sensibilidad o responsividad, estabilidad y linealidad a lo largo del espectro visible son excelentes y perfectamente conocidas, y se midió su responsividad o sensibilidad espectral absoluta $S(\lambda)$ en microamperios por microvatio.

El calibrado se hizo respecto al propio radiómetro absoluto en un montaje experimental construido por nosotros (10) para este tipo de medidas. Las dimensiones de la apertura de entrada a la superficie sensible del fotodiodo son idénticas a las del radiómetro.

El conocimiento de la $S(\lambda)$ del fotodiodo de silicio nos permite, medida su respuesta en μA , calcular la irradiancia recibida en μW , con una precisión comprobada mejor del 2% en cualquier zona del espectro visible.

Los fotodiodos de silicio tienen además la ventaja de que no es preciso utilizar el filtro de agua pues son insen-sibles a las radiaciones de longitudes de onda superiores a 1200 nm. Sin embargo hay que tener especial cuidado con las interreflexiones entre los filtros interferenciales y el propio detector pues su superficie sensible no es negra absorbente como en el radiómetro absoluto, sino que refleja parte de la energía que le llega, y pudiera ocurrir que por las interreflexiones recibiera más energía radiante que la procedente directamente de la fuente luminosa. Se calibró y utilizó posteriormente el detector ligeramente inclinado para evitar estas interreflexiones.

Una vez calibrado se colocó el Si-UV-2 en el lugar en que antes se encontraba el radiómetro, eliminando el filtro de agua y el chopper de nuestro montaje experimental.

Realizando otra vez las medidas para cada filtro tendremos un valor de respuesta en μA . Así, iluminando con la lámpara F., y manteniendo constantes sus condiciones de calibrado obtuvimos el cuadro de valores de la Tabla V.

Nuestro objetivo sigue siendo encontrar la ecuación de la función de corrección $K(\lambda)$ de De Vos que debe multiplicar a la ecuación teórica de Planck.

Sea $S(\lambda)$ la responsividad espectral absoluta, en amperios por vatio, del detector Si-UV-2 y $\tau_i(\lambda)$ la transmitancia espectral del filtro interferencial "i". Si llamamos $Q(\lambda)$ a la ecuación teórica de Planck, tendremos:

$$E(\lambda) = c \cdot Q(\lambda) = \frac{c}{\lambda^5} \cdot (e^{c_2/\lambda \cdot T} - 1)^{-1} \quad (7,4)$$

donde c es una constante de proporcionalidad, y en ella va incorporada la c_1 habitual de la ecuación de Planck.

La energía que llega al detector procedente de la fuente cuando en el camino óptico está situado el filtro "i" es:

$$E_i = \sum_{\lambda} E(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \quad (7,5)$$

sustituyendo la expresión (7,4) en esta ecuación tenemos:

$$E_i = c \cdot \sum_{\lambda} Q(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \quad (7,6)$$

TABLA V

Valores de la respuesta del detector Si-UV-2 con cada uno de los filtros.

Filtros Interferenciales	Respuesta en μA del
λ (nm)	Si-UV-2 (Escala 10 μA)
403.0	0.833×10^{-3}
503.9	6.33×10^{-3}
552.0	8.96×10^{-3}
605.0	10.70×10^{-3}
654.7	19.16×10^{-3}
699.9	36.48×10^{-3}
799.8	43.63×10^{-3}

Esta E_i calculada ha de ser igual a la E_i^M medida experimentalmente con el detector de silicio en el caso de que la lámpara fuera un radiador negro perfecto.

Siendo I_i la señal en microamperios correspondiente a cada uno de los filtros,

$$I_i = \sum_{\lambda} E(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \quad (7,7)$$

Si hacemos la aproximación válida de que la $E(\lambda)$ es constante dentro del intervalo correspondiente a la anchura de banda de los filtros (10 nm por término medio), y que toma el valor E_i^M ,

$$I_i = E_i^M \cdot \sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \quad (7,8)$$

y por lo tanto,

$$E_i^M = \frac{I_i}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda)} \quad (7,9)$$

Esta E_i^M experimental es la que tenemos que igualar a la E_i teórica.

$$E_i = c \sum_{\lambda} Q(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) = E_i^M \quad (7,10)$$

$$c = \frac{E_i^M}{\sum_{\lambda} Q(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda)} \quad (7,11)$$

El valor de c debería ser el mismo para cada uno de los filtros si la lámpara fuera un radiador completo o cuerpo negro perfecto, esto es, si emitiera según la ley de Planck, $Q(\lambda)$. Pero como no es así obtendremos una c_i diferente para cada filtro "i".

Si con el fin de simplificar el cálculo normalizamos a la unidad una de ellas, la c_j , obtendremos $K_j = c_j/c_j = 1$, y un conjunto de $K_i = c_i/c_j$ cuyos valores serán próximos a la unidad, y que al ser el cociente de las medidas experimentales y los valores de la irradiancia espectral calculada a partir de la ecuación de Planck, serán precisamente puntos pertenecientes a la función $K(\lambda)$ que intentamos encontrar.

Calculadas las c_i correspondientes y hecha la normalización para el filtro 503.9, se obtiene el conjunto de valores de K_i que puede verse en la Tabla VI.

Hemos considerado E_i la energía transmitida por el filtro "i" concentrada en un intervalo unidad de longitud de onda centrado en λ_i , que corresponde precisamente al pico de transmitancia del filtro en cuestión. Hemos hecho después la representación gráfica de estos puntos siendo las abscisas los picos de longitudes de onda y las ordenadas las constantes de terminadas por el cálculo anterior.

Mediante un programa de cálculo en idioma BASIC llamado "Polynomial regression" para el ordenador HEWLET PACKARD modelo 9830 A, hemos obtenido los coeficientes de una ecuación cuya forma se asemejaba mucho a la ecuación de la función de corrección estudiada por De Vos y además pasaba lo más cerca posible de cada uno de nuestros puntos.

Con este procedimiento, a diferencia de los resultados obtenidos por De Vos, que propone un polinomio de tercer grado, se obtiene el mejor ajuste con una función de corrección de segundo grado, esto es:

TABLA VIConjuntos de valores obtenidos para la constante K_i

Filtros interferenciales λ (nm)	$K_i = \frac{E_{\text{medida}}}{E_{\text{calculada}}}$ (normalizando en el filtro 503.9)
403.0	0.9737
503.9	1.0000
552.0	0.9920
605.0	1.0006
654.7	1.0053
699.9	0.9850
799.8	0.9973

$$K(\lambda) = a_0 + a_1 \cdot \lambda + a_2 \cdot \lambda^2 \quad (7,12)$$

y como valores de los coeficientes de esta función,

$$\begin{aligned} a_0 &= + 8.3664 \times 10^{-1} \\ a_1 &= + 5.0475 \times 10^{-4} \\ a_2 &= - 3.8801 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

En la figura 14 se representa gráficamente esta función a partir de los resultados experimentales. Para la obtención de estos valores se han utilizado conjuntamente las medidas correspondientes a los siete filtros.

Estando ya definida la función $K(\lambda)$, bastará multiplicarla por la ecuación de Planck siendo la constante c_1 igual a la constante $c_j = 0.2351 \times 10^{20}$ calculada para el filtro 503.9, y tendremos perfectamente determinada para cada longitud de onda la irradiancia espectral absoluta de la fuente luminosa.

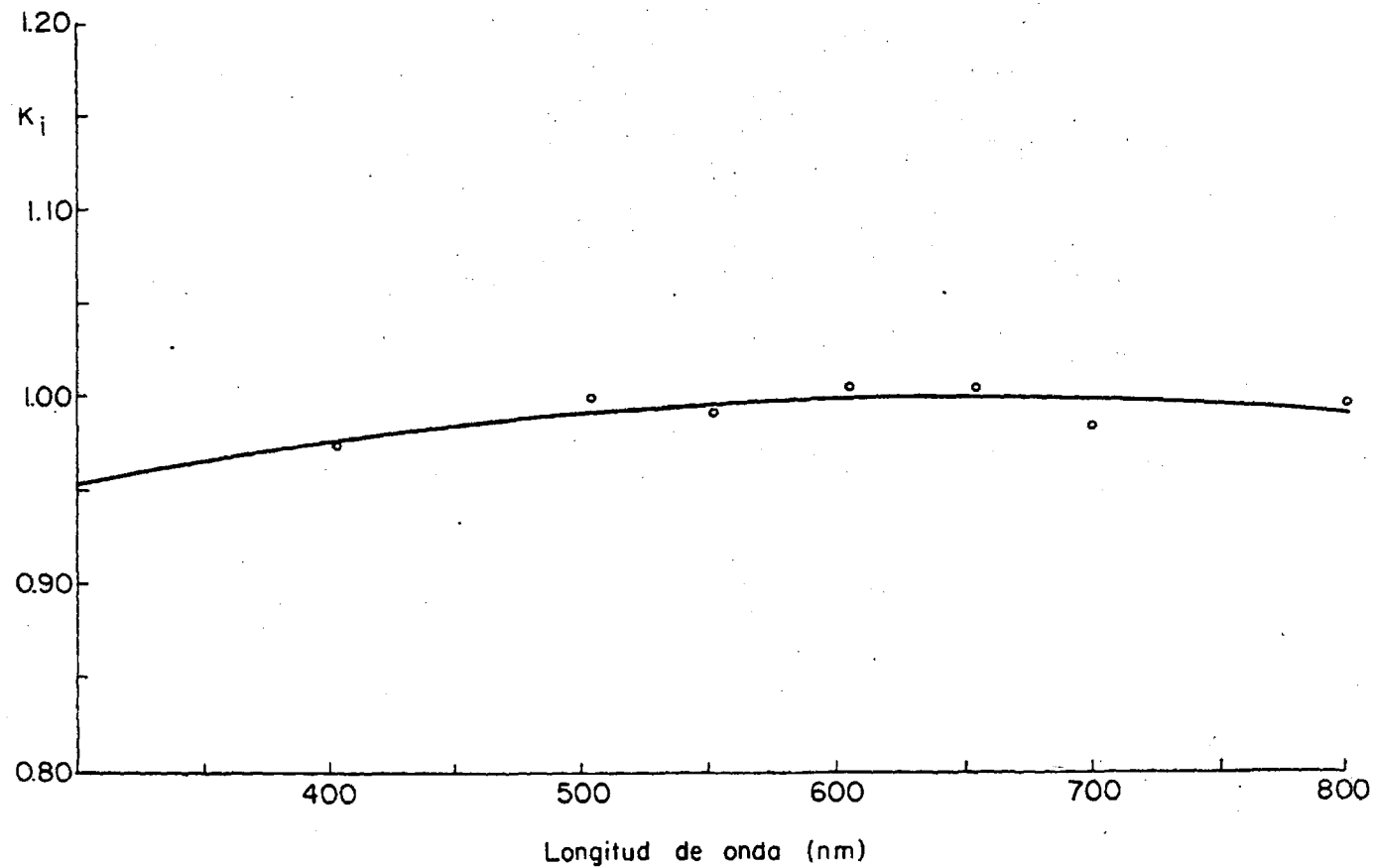
$$E(\lambda) = \frac{c_j(503.9)}{\lambda^5} \cdot (e^{1.438 \times 10^7 / \lambda \cdot T_{-1}} - 1)^{-1} \cdot K(\lambda) \quad (7,13)$$

y sustituyendo los valores correspondientes, tenemos:

$$\begin{aligned} E(\lambda) &= \frac{0.2351 \times 10^{20}}{\lambda^5} \cdot (e^{1.438 \times 10^7 / \lambda \cdot 3140} - 1)^{-1} \\ &\cdot (0.83664 + 5.0475E-04 \times \lambda - 3.8801E-07 \times \lambda^2) \end{aligned}$$

A partir de esta ecuación se obtiene el conjunto de valores de $E(\lambda)$ que puede verse en la columna 2a de la Tabla VI.

$E(\lambda)$ es la curva de irradiancia espectral absoluta que ha sido determinada utilizando como sistema de detección



78

Fig. 14.- Representación gráfica de la función de corrección obtenida por regresión polinómica a partir de las medidas realizadas con el detector Si-UV-2 para la lámpara F1.

una célula de silicio, la cuál, a su vez, ha sido calibrada respecto al Radiómetro Absoluto. Como ya advertimos se puede cometer imprecisiones de hasta un 2% al pasar de un detector a otro. Por este motivo pensamos que lo mejor sería considerar la curva $E(\lambda)$ como relativa, y convertirla en absoluta utilizando medidas realizadas directamente con el radiómetro y con los filtros en que la respuesta es idónea. La irradiancia espectral real será $ER(\lambda) = a \cdot E(\lambda)$.

Para ello sería preciso elegir al menos un filtro, medir la energía que llega al radiómetro absoluto a través de él y, por otra parte, calcularla teóricamente, utilizando como curva de irradiancia espectral la que hemos calculado nosotros trabajando con el detector Si-UV-2. De la igualdad de ambos valores se obtendrá el valor de a .

Hemos elegido dos filtros que transmiten suficiente energía para medir con el radiómetro con precisión satisfactoria. Son los filtros 503.9 y 654.7 que están situados en el espectro dividiéndolo en tres partes de anchura semejante.

Llamando a la energía radiante que llega al R.P.C.E. a través de estos filtros $E_{503.9}$ y $E_{654.7}$ podemos escribir:

$$E_{503.9} = a \cdot \sum_{\lambda} E(\lambda) \cdot \tau_{503.9}(\lambda) \cdot \tau_{\text{agua}}(\lambda)$$
$$E_{654.7} = a \cdot \sum_{\lambda} E(\lambda) \cdot \tau_{654.7}(\lambda) \cdot \tau_{\text{agua}}(\lambda)$$

Introduciendo los valores numéricos medidos y calculados, tendremos:

$$17.5 \mu W = a \times 18.1 \mu W \quad a = 0.9669$$

$$35.4 \mu W = a \times 36.3 \mu W \quad a = 0.9752$$

El valor medio de a será $a = 0.9711$. La desviación entre los dos valores calculados de a es de sólo el 1%.

Multipliquemos los valores de $E(\lambda)$ dados en la columna 2ª de la Tabla VII por ese factor y obtendremos la curva de Irradiancia Espectral Absoluta $ER(\lambda)$ calculada por nosotros para la lámpara de incandescencia F1, columna 3ª de la misma tabla.

ACUERDO DE NUESTRAS MEDIDAS CON LAS DEL N.B.S. DE LOS E.E.U.U.

En la Tabla VIII se comparan los valores de la irradiancia espectral. En la segunda columna están los resultados de $ER(\lambda)$ obtenidos en nuestro laboratorio, en la cuarta los del N.B.S. y en la sexta columna pueden verse las diferencias en tanto por ciento (%).

A la vista de los resultados podemos asegurar que nuestro sistema de medida es capaz de obtener la Irradiancia Espectral Absoluta de una lámpara de incandescencia con filamento de wolframio, en el intervalo visible del espectro con un acuerdo con respecto a las medidas del N.B.S. mejor del 1.5%.

El N.B.S. calibró la lámpara respecto al cuerpo negro y certifica una imprecisión en sus medidas respecto al sistema S.I. de la misma magnitud que el desacuerdo encontrado entre nuestras medidas y las suyas, como puede verse en la columna 5ª de la Tabla VIII.

TABLA VII

Valores de la irradiancia espectral de la lámpara F₁ obtenidos a partir del Si-UV-2 y del R.P.C.E.

λ (nm)	E(λ) calculada a partir del detector Si-UV-2	ER(λ) corregida a partir del R.P.C.E.
380	14.41 x 10 ⁻³	13.99 x 10 ⁻³
400	20.61 x 10 ⁻³	20.01 x 10 ⁻³
450	41.87 x 10 ⁻³	40.65 x 10 ⁻³
500	69.79 x 10 ⁻³	67.77 x 10 ⁻³
550	101.2 x 10 ⁻³	98.27 x 10 ⁻³
600	132.7 x 10 ⁻³	128.8 x 10 ⁻³
650	161.4 x 10 ⁻³	156.7 x 10 ⁻³
700	185.4 x 10 ⁻³	180.0 x 10 ⁻³
750	203.9 x 10 ⁻³	198.0 x 10 ⁻³
780	212.1 x 10 ⁻³	205.9 x 10 ⁻³

TABLA VIII

Comparación de los valores definitivos de la Irradiancia espectral de la lámpara F1 obtenidos en el Laboratorio de Radiometría del Instituto de Optica con los asignados por el N.B.S.

λ (nm)	Instituto de Optica		N.B.S.		d (%)
	E(λ) (W/m ² .nm)	P.E. (%)	E(λ) (W/m ² .nm)	P.E. (%)	
380	13.99 x 10 ⁻³	1.1	13.79 x 10 ⁻³	1.6	+ 1.4
400	20.01 x 10 ⁻³	1.1	19.85 x 10 ⁻³	1.5	+ 0.8
450	40.65 x 10 ⁻³	1.1	40.53 x 10 ⁻³	1.4	+ 0.3
500	67.77 x 10 ⁻³	1.1	67.73 x 10 ⁻³	1.2	+ 0.1
550	98.27 x 10 ⁻³	1.1	98.10 x 10 ⁻³	1.2	+ 0.2
600	128.8 x 10 ⁻³	1.1	128.4 x 10 ⁻³	1.2	+ 0.3
650	156.7 x 10 ⁻³	1.1	156.0 x 10 ⁻³	1.2	+ 0.4
700	180.0 x 10 ⁻³	1.1	179.0 x 10 ⁻³	1.2	+ 0.6
750	198.0 x 10 ⁻³	1.1	196.9 x 10 ⁻³	1.2	+ 0.6
780	205.9 x 10 ⁻³	1.1	205.0 x 10 ⁻³	1.2	+ 0.4

P.E. = Precisión Estimada.

d = Diferencia entre los valores obtenidos en el Instituto de Optica y los asignados por el N.B.S.

El excelente acuerdo entre los valores de la $E(\lambda)$ obtenida por nuestro método de medida a partir del radiómetro absoluto con los correspondientes al calibrado realizado en el N.B.S. utilizando un radiador completo como patrón de referencia, nos ha animado a calibrar un grupo de lámparas de incandescencia como patrones de irradiancia espectral, las cuales a su vez podrán ser utilizadas como patrones de Intensidad Luminosa como veremos en el capítulo siguiente.

VIII.- CALIBRADO DE FUENTES LUMINOSAS COMO PATRONES DE INTENSIDAD LUMINOSA.

Una de las aplicaciones inmediatas de las medidas es-
pectrorradiométricas absolutas, como ya hemos indicado varias
veces con anterioridad, es el calibrado de patrones de Intensi-
dad Luminosa.

Disponiendo de una Escala Espectrorradiométrica Abso-
luta basta, para obtener patrones de Intensidad Luminosa, con me-
dir la irradiancia espectral $E(\lambda)$ producida por las lámparas a
una distancia determinada en el intervalo visible del espectro,
esto es, entre 380 y 780 nm, e introducir $E(\lambda)$ en la ecuación:

$$E_v = K_m \cdot \int E(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (8,1)$$

siendo E_v la iluminancia en lúmenes/m², K_m la constante básica
de Fotometría, fijada por el Comité Técnico para la Fotometría
y la Radiometría del B.I.P.M. en 683 lúmenes por vatio, y $V(\lambda)$
la función de eficiencia luminosa espectral del ojo normal me-
dio, normalizada y tabulada por la Comisión Internacional de
Iluminación (C.I.E.).

A partir de E_v la Intensidad Luminosa en Candelas
viene dada por:

$$I = E_v \times d \quad (8,2)$$

suponiendo incidencia normal y siendo d la distancia en metros.

Habitualmente la integración de la ecuación (8,1) se
hace sumando cada cinco nanómetros, por lo que conviene cono-

cer los valores de $E(\lambda)$ con ese intervalo.

Hemos calculado la irradiancia espectral de una lámpara de incandescencia denominada GE-2, suficientemente estable, y hemos obtenido los valores de la Tabla IX y su representación gráfica se muestra en la figura 15.

A partir de los valores de $E(\lambda)$ obtenidos para la lámpara GE-2 hemos calculado su intensidad luminosa en Candelas, según las ecuaciones (8,1) y (8,2). Esta ha resultado ser 1801 Candelas. Su temperatura de color es 3060 K, (21).

Como última comprobación se ha medido la Intensidad Luminosa de esta lámpara en el Laboratorio de Fotometría del Instituto, comparándola directamente en el banco fotométrico contra los patrones de baja intensidad procedentes de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas de Paris. El valor resultante de estas medidas para la lámpara GE-2 es de 1796 Candelas. Hay pues una diferencia en el calibrado por uno y otro método de sólo el 0.3%.

Este resultado es el que nos ha animado a calibrar cuatro lámparas más a partir de nuestra Escala Espectroradiométrica Absoluta para su utilización como patrones de alta intensidad.

Para llevar a cabo este propósito envejecimos con corriente continua durante 10 horas a su tensión nominal un conjunto de lámparas. El flujo de cada una de ellas se registró después durante un periodo de 8 horas para determinar su posible variación. Sólo las lámparas que exhibieron una variación

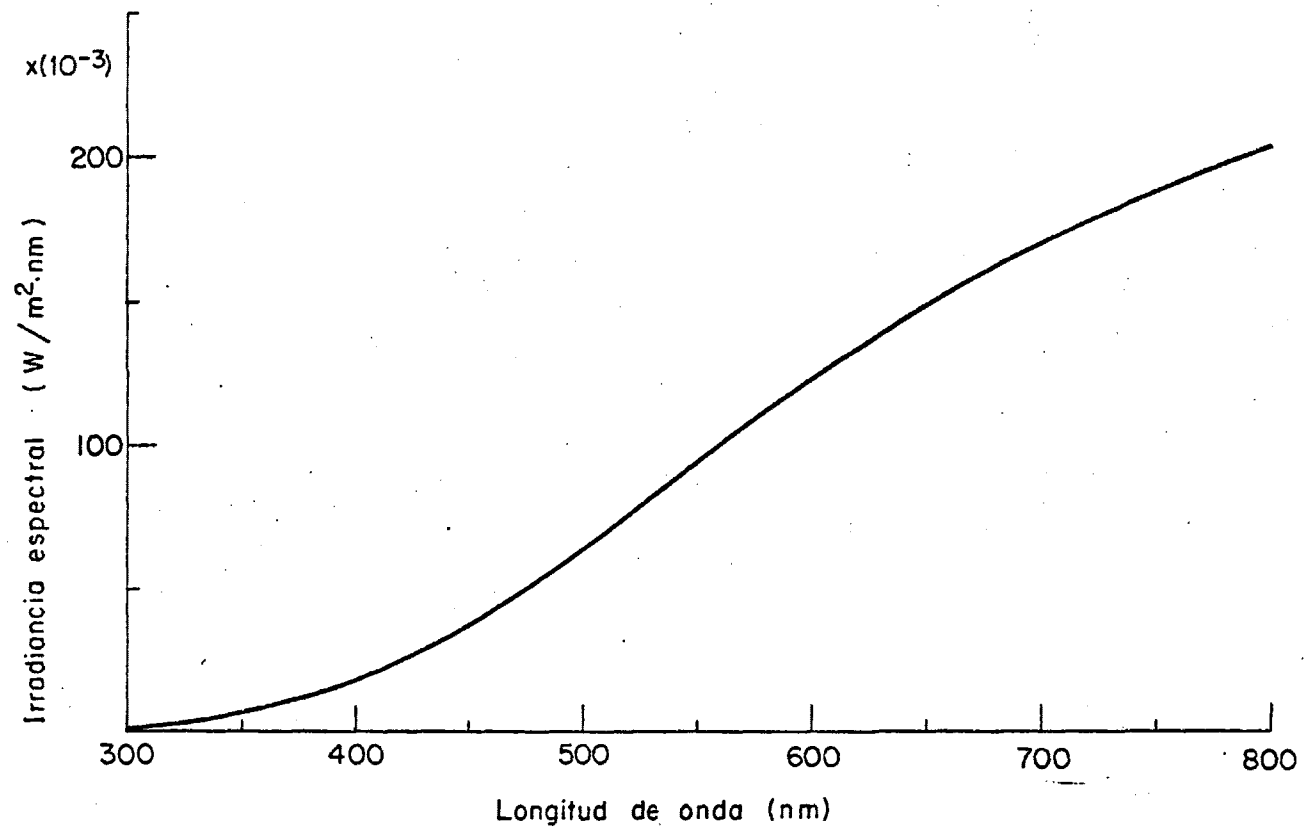


Fig. 15.- Curva de irradiancia espectral de la lámpara GE-2.

ob

TABLA IX

Irradiancia espectral de la lámpara GE-2

λ (nm)	$E(\lambda)$ (W/m ² .nm)
380	12.54 x 10 ⁻³
385	13.81 x 10 ⁻³
390	15.17 x 10 ⁻³
395	16.60 x 10 ⁻³
400	18.12 x 10 ⁻³
405	19.71 x 10 ⁻³
410	21.38 x 10 ⁻³
415	23.13 x 10 ⁻³
420	24.96 x 10 ⁻³
425	26.87 x 10 ⁻³
430	28.86 x 10 ⁻³
435	30.92 x 10 ⁻³
440	33.06 x 10 ⁻³
445	35.27 x 10 ⁻³
450	37.55 x 10 ⁻³
455	39.88 x 10 ⁻³
460	42.27 x 10 ⁻³
465	44.72 x 10 ⁻³
470	47.24 x 10 ⁻³
475	49.80 x 10 ⁻³
480	52.43 x 10 ⁻³

TABLA IX (Continuación)

λ (nm)	$E(\lambda)$ (W/m ² .nm)
485	55.10 x 10 ⁻³
490	57.82 x 10 ⁻³
495	60.59 x 10 ⁻³
500	63.40 x 10 ⁻³
505	66.22 x 10 ⁻³
510	69.08 x 10 ⁻³
515	71.96 x 10 ⁻³
520	74.87 x 10 ⁻³
525	77.81 x 10 ⁻³
530	80.77 x 10 ⁻³
535	83.74 x 10 ⁻³
540	86.73 x 10 ⁻³
545	89.73 x 10 ⁻³
550	92.74 x 10 ⁻³
555	95.75 x 10 ⁻³
560	98.73 x 10 ⁻³
565	101.7 x 10 ⁻³
570	104.7 x 10 ⁻³
575	107.6 x 10 ⁻³
580	110.6 x 10 ⁻³
585	113.5 x 10 ⁻³
590	116.4 x 10 ⁻³
595	119.3 x 10 ⁻³

TABLA IX (Continuación)

λ (nm)	$E(\lambda)$ (W/m ² .nm)
600	122.2 x 10 ⁻³
605	125.1 x 10 ⁻³
610	127.9 x 10 ⁻³
615	130.7 x 10 ⁻³
620	133.5 x 10 ⁻³
625	136.2 x 10 ⁻³
630	139.0 x 10 ⁻³
635	141.6 x 10 ⁻³
640	144.3 x 10 ⁻³
645	146.9 x 10 ⁻³
650	149.5 x 10 ⁻³
655	152.0 x 10 ⁻³
660	154.3 x 10 ⁻³
665	156.7 x 10 ⁻³
670	159.1 x 10 ⁻³
675	161.4 x 10 ⁻³
680	163.7 x 10 ⁻³
685	166.0 x 10 ⁻³
690	168.2 x 10 ⁻³
695	170.3 x 10 ⁻³
700	172.4 x 10 ⁻³
705	174.6 x 10 ⁻³
710	176.6 x 10 ⁻³

TABLA IX (Continuación)

λ (nm)	$E(\lambda)$ (W/m ² .nm)
715	178.6×10^{-3}
720	180.5×10^{-3}
725	182.3×10^{-3}
730	184.1×10^{-3}
735	185.9×10^{-3}
740	187.6×10^{-3}
745	189.2×10^{-3}
750	190.8×10^{-3}
755	192.3×10^{-3}
760	193.7×10^{-3}
765	195.1×10^{-3}
770	196.4×10^{-3}
775	197.6×10^{-3}
780	198.8×10^{-3}
785	200.0×10^{-3}
790	201.1×10^{-3}
795	202.2×10^{-3}
800	203.2×10^{-3}

menor del 0.5% durante ese tiempo fueron seleccionadas para ser calibradas. Así dispusimos de cuatro lámparas de incandescencia que llamamos P1, P2, P3, y P4. Medimos su irradiancia espectral. Los resultados se dan en las tablas siguientes (X y XI), y a partir de ellos calculamos su intensidad luminosa. Sus intensidades están comprendidas entre 2200 y 2800 Candelas.

Se compararon también con estas lámparas los valores de la Intensidad calculados con los obtenidos midiendo directamente en el banco fotométrico respecto a las lámparas patrón procedentes del B.I.P.M. y el acuerdo fué mejor del 0.5% en todos los casos.

TABLA X

Irradiancia Espectral e Intensidad Luminosa obtenidas para las lámparas P1 y P2.

Lámpara P1:

Intensidad de corriente = I = 4.402 A.

Tensión = V = 210.0 V.

Lámpara P2:

Intensidad de corriente = I = 4.300 A.

Tensión = V = 197.2 V.

λ (nm)	P1 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P2 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
380	12.66×10^{-3}	9.158×10^{-3}
385	13.49×10^{-3}	11.03×10^{-3}
390	16.15×10^{-3}	13.13×10^{-3}
395	19.14×10^{-3}	15.49×10^{-3}
400	22.46×10^{-3}	18.11×10^{-3}
405	25.02×10^{-3}	20.32×10^{-3}
410	27.77×10^{-3}	22.71×10^{-3}
415	30.72×10^{-3}	25.30×10^{-3}
420	33.88×10^{-3}	28.07×10^{-3}
425	37.25×10^{-3}	31.04×10^{-3}
430	40.83×10^{-3}	34.22×10^{-3}
435	44.64×10^{-3}	38.59×10^{-3}
440	48.67×10^{-3}	43.31×10^{-3}
445	52.92×10^{-3}	48.38×10^{-3}

TABLA X (Continuación)

λ (nm)	P1 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P2 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
450	57.41×10^{-3}	53.81×10^{-3}
455	61.06×10^{-3}	55.97×10^{-3}
460	64.81×10^{-3}	58.09×10^{-3}
465	68.68×10^{-3}	60.16×10^{-3}
470	72.65×10^{-3}	62.18×10^{-3}
475	76.72×10^{-3}	64.13×10^{-3}
480	80.89×10^{-3}	66.01×10^{-3}
485	85.15×10^{-3}	69.44×10^{-3}
490	89.50×10^{-3}	72.94×10^{-3}
495	93.93×10^{-3}	76.51×10^{-3}
500	98.45×10^{-3}	80.14×10^{-3}
505	102.7×10^{-3}	83.80×10^{-3}
510	106.9×10^{-3}	87.51×10^{-3}
515	111.2×10^{-3}	91.27×10^{-3}
520	115.6×10^{-3}	95.07×10^{-3}
525	119.9×10^{-3}	98.92×10^{-3}
530	124.3×10^{-3}	102.8×10^{-3}
535	128.7×10^{-3}	106.5×10^{-3}
540	133.1×10^{-3}	110.2×10^{-3}
545	137.5×10^{-3}	114.0×10^{-3}
550	142.0×10^{-3}	117.7×10^{-3}
555	146.4×10^{-3}	121.5×10^{-3}
560	150.6×10^{-3}	125.3×10^{-3}

TABLA X (Continuación)

λ (nm)	P1 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P2 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
565	154.8×10^{-3}	129.1×10^{-3}
570	158.9×10^{-3}	132.9×10^{-3}
575	163.1×10^{-3}	136.6×10^{-3}
580	167.2×10^{-3}	140.4×10^{-3}
585	171.3×10^{-3}	143.9×10^{-3}
590	175.3×10^{-3}	147.4×10^{-3}
595	179.3×10^{-3}	150.8×10^{-3}
600	183.2×10^{-3}	154.2×10^{-3}
605	187.0×10^{-3}	157.7×10^{-3}
610	190.8×10^{-3}	161.2×10^{-3}
615	194.6×10^{-3}	164.7×10^{-3}
620	198.2×10^{-3}	168.1×10^{-3}
625	201.9×10^{-3}	171.5×10^{-3}
630	205.4×10^{-3}	174.9×10^{-3}
635	208.9×10^{-3}	178.0×10^{-3}
640	212.3×10^{-3}	181.0×10^{-3}
645	215.7×10^{-3}	184.0×10^{-3}
650	218.9×10^{-3}	186.8×10^{-3}
655	222.2×10^{-3}	189.7×10^{-3}
660	225.1×10^{-3}	192.6×10^{-3}
665	228.2×10^{-3}	195.6×10^{-3}
670	231.2×10^{-3}	198.6×10^{-3}
675	234.1×10^{-3}	201.5×10^{-3}

TABLA X (continuación)

λ (nm)	P1 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P2 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot \mu m$)
680	237.0×10^{-3}	204.4×10^{-3}
685	239.8×10^{-3}	207.0×10^{-3}
690	242.5×10^{-3}	209.4×10^{-3}
695	245.1×10^{-3}	211.7×10^{-3}
700	247.7×10^{-3}	213.9×10^{-3}
705	249.7×10^{-3}	215.8×10^{-3}
710	251.5×10^{-3}	217.7×10^{-3}
715	253.2×10^{-3}	219.4×10^{-3}
720	254.7×10^{-3}	221.1×10^{-3}
725	256.2×10^{-3}	222.7×10^{-3}
730	257.6×10^{-3}	224.3×10^{-3}
735	258.9×10^{-3}	225.8×10^{-3}
740	260.1×10^{-3}	227.2×10^{-3}
745	261.2×10^{-3}	228.6×10^{-3}
750	262.3×10^{-3}	229.9×10^{-3}
755	263.2×10^{-3}	230.8×10^{-3}
760	264.1×10^{-3}	231.6×10^{-3}
765	266.4×10^{-3}	232.3×10^{-3}
770	268.7×10^{-3}	232.9×10^{-3}
775	270.9×10^{-3}	233.5×10^{-3}
780	273.0×10^{-3}	234.0×10^{-3}
785	275.1×10^{-3}	237.4×10^{-3}

TABLA X (Continuación)

λ (nm)	P1 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P2 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
790	277.1×10^{-3}	240.7×10^{-3}
795	279.1×10^{-3}	244.0×10^{-3}
800	281.0×10^{-3}	247.3×10^{-3}

Lámpara P1:Temperatura de color = $T_c = 3115.3$ K

Intensidad luminosa = 2729 Candelas

Lámpara P2:Temperatura de color = $T_c = 3110.1$ K

Intensidad luminosa = 2281 Candelas

TABLA XI

Irradiancia Espectral e Intensidad Luminosa obtenidas para las lámparas P3 y P4.

Lámpara P3:

Intensidad de corriente = I = 4.300 A.

Tensión = V = 198.3 V.

Lámpara P4:

Intensidad de corriente = I = 4.300 A.

Tensión = V = 201.2 V.

λ (nm)	P3 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P4 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
380	8.180×10^{-3}	12.66×10^{-3}
385	10.07×10^{-3}	12.66×10^{-3}
390	12.23×10^{-3}	14.89×10^{-3}
395	14.66×10^{-3}	17.37×10^{-3}
400	17.38×10^{-3}	20.12×10^{-3}
405	19.66×10^{-3}	22.29×10^{-3}
410	22.14×10^{-3}	24.63×10^{-3}
415	24.84×10^{-3}	27.12×10^{-3}
420	27.75×10^{-3}	29.78×10^{-3}
425	30.89×10^{-3}	32.60×10^{-3}
430	34.27×10^{-3}	35.60×10^{-3}
435	37.11×10^{-3}	38.77×10^{-3}
440	40.08×10^{-3}	42.12×10^{-3}
445	43.20×10^{-3}	45.65×10^{-3}

TABLA XI (Continuación)

λ (nm)	P3 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P4 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
450	46.46×10^{-3}	49.36×10^{-3}
455	49.24×10^{-3}	52.53×10^{-3}
460	52.08×10^{-3}	55.79×10^{-3}
465	54.99×10^{-3}	59.15×10^{-3}
470	57.96×10^{-3}	62.60×10^{-3}
475	60.98×10^{-3}	66.14×10^{-3}
480	64.06×10^{-3}	69.76×10^{-3}
485	68.23×10^{-3}	73.47×10^{-3}
490	72.55×10^{-3}	77.26×10^{-3}
495	77.01×10^{-3}	81.12×10^{-3}
500	81.62×10^{-3}	85.06×10^{-3}
505	85.36×10^{-3}	88.79×10^{-3}
510	89.16×10^{-3}	92.56×10^{-3}
515	93.01×10^{-3}	96.38×10^{-3}
520	96.90×10^{-3}	100.2×10^{-3}
525	100.8×10^{-3}	104.1×10^{-3}
530	104.8×10^{-3}	108.0×10^{-3}
535	108.6×10^{-3}	111.9×10^{-3}
540	112.4×10^{-3}	115.8×10^{-3}
545	116.2×10^{-3}	119.8×10^{-3}
550	120.1×10^{-3}	123.7×10^{-3}
555	123.9×10^{-3}	127.7×10^{-3}
560	127.8×10^{-3}	131.5×10^{-3}

TABLA XI (Continuación)

λ (nm)	P3 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P4 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
565	131.6×10^{-3}	135.3×10^{-3}
570	135.4×10^{-3}	139.1×10^{-3}
575	139.3×10^{-3}	142.9×10^{-3}
580	143.1×10^{-3}	146.7×10^{-3}
585	146.6×10^{-3}	150.4×10^{-3}
590	150.2×10^{-3}	154.1×10^{-3}
595	153.7×10^{-3}	157.8×10^{-3}
600	157.1×10^{-3}	161.4×10^{-3}
605	160.7×10^{-3}	165.0×10^{-3}
610	164.2×10^{-3}	168.5×10^{-3}
615	167.7×10^{-3}	172.1×10^{-3}
620	171.2×10^{-3}	175.5×10^{-3}
625	174.6×10^{-3}	178.9×10^{-3}
630	178.0×10^{-3}	182.3×10^{-3}
635	181.1×10^{-3}	185.6×10^{-3}
640	184.2×10^{-3}	188.9×10^{-3}
645	187.2×10^{-3}	192.1×10^{-3}
650	190.1×10^{-3}	195.2×10^{-3}
655	193.0×10^{-3}	198.3×10^{-3}
660	195.9×10^{-3}	201.1×10^{-3}
665	198.9×10^{-3}	204.1×10^{-3}
670	201.9×10^{-3}	206.9×10^{-3}
675	204.8×10^{-3}	209.7×10^{-3}

TABLA XI (Continuación)

λ (nm)	P3 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P4 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
680	207.7×10^{-3}	212.5×10^{-3}
685	210.3×10^{-3}	215.2×10^{-3}
690	212.7×10^{-3}	217.8×10^{-3}
695	215.0×10^{-3}	220.3×10^{-3}
700	217.2×10^{-3}	222.8×10^{-3}
705	219.1×10^{-3}	224.9×10^{-3}
710	220.8×10^{-3}	226.6×10^{-3}
715	222.6×10^{-3}	228.3×10^{-3}
720	224.2×10^{-3}	230.0×10^{-3}
725	225.7×10^{-3}	231.5×10^{-3}
730	227.2×10^{-3}	232.9×10^{-3}
735	228.5×10^{-3}	234.3×10^{-3}
740	229.7×10^{-3}	235.6×10^{-3}
745	230.8×10^{-3}	236.9×10^{-3}
750	231.9×10^{-3}	238.0×10^{-3}
755	232.8×10^{-3}	239.1×10^{-3}
760	233.6×10^{-3}	240.1×10^{-3}
765	234.3×10^{-3}	242.3×10^{-3}
770	234.9×10^{-3}	244.5×10^{-3}
775	235.6×10^{-3}	246.6×10^{-3}
780	236.1×10^{-3}	248.7×10^{-3}
785	239.0×10^{-3}	250.7×10^{-3}
790	241.8×10^{-3}	252.7×10^{-3}

TABLA XI (Combinación)

λ (nm)	P3 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)	P4 $E(\lambda)$ ($W/m^2 \cdot nm$)
795	244.6×10^{-3}	254.6×10^{-3}
800	247.4×10^{-3}	256.4×10^{-3}

Lámpara P3:Temperatura de color = $T_c = 3062.4$ K

Intensidad Luminosa = 2321 Candelas

Lámpara P4:Temperatura de color = $T_c = 3084.2$ K

Intensidad luminosa = 2390 Candelas

IX.- SISTEMA COMPARADOR. ESPECTRORRADIOMETRO ABSOLUTO.

Todo lo explicado hasta aquí constituye la descripción de nuestra Escala Espectrorradiométrica Absoluta, la cual es independiente del radiador completo ó cuerpo negro. A partir de ella hemos calibrado lámparas de incandescencia como patrones absolutos de Irradiancia Espectral y de Intensidad Luminosa.

Se ha elegido lámparas de incandescencia con halógeno como patrones debido a sus buenas cualidades de estabilidad, sencillez de manejo y fundamentalmente, a que emiten con una distribución espectral que no presenta discontinuidades acusadas y que se aproxima a la predicha por la ley de Plank. Son estas características las que hacen que dichas lámparas sean buenos patrones de irradiancia espectral.

Sin embargo, puede ser necesario conocer la irradiancia espectral de otro tipo de fuentes, como por ejemplo, de aquellas que muestran líneas espectrales de emisión como es el caso de las lámparas de descarga. En estos casos no podemos calcular la irradiancia espectral absoluta a partir del sistema de medida y del cálculo matemático utilizado para el calibrado de lámparas de incandescencia. Por esto el presente trabajo de investigación ha tenido un segundo objetivo, que podríamos enunciarlo como sigue: "Proyectar, montar y poner a punto una técnica experimental para la medida precisa en valores energéticos absolutos de la distribución espectral de la energía radiante procedente de cualquier tipo de fuente".

Para ello se ha utilizado como elemento patrón de referencia una de las lámparas de incandescencia calibrada por nosotros según nuestra Escala Espectrorradiométrica Absoluta.

PROCEDIMIENTO DE MEDIDA.

Después de realizar un detallado estudio bibliográfico hemos elegido un método de comparación directa por sustitución de emisores para cada longitud de onda, como el más adecuado. Este método exige un mayor consumo de tiempo en la realización de las medidas, pero en compensación, es el que reúne mayores garantías de exactitud.

Si colocamos las dos fuentes luminosas, la patrón y la fuente objeto de medida, sucesivamente en el mismo lugar del espacio, y manteniendo invariables todos los parámetros que condicionan la respuesta del sistema de medida, para cada longitud de onda se verificará:

$$\frac{E(\lambda)}{E_p(\lambda)} = \frac{R(\lambda)}{R_p(\lambda)} \quad (\beta, 1)$$

donde $E(\lambda)$ es la irradiancia espectral sobre la apertura de entrada del sistema de medida y $R(\lambda)$ la respuesta del sistema de medida. El subíndice "p" indica que la magnitud corresponde a la fuente patrón.

Como $E_p(\lambda)$ es un dato conocido previamente, la exactitud de los resultados que se obtengan para $E(\lambda)$ dependerá de la exactitud con que el sistema experimental sea capaz de medir

la relación $R(\lambda)/R_p(\lambda)$. Este es el motivo por el que a continuación describiremos con cierto detalle nuestro montaje experimental y pasaremos después a ver la incidencia de cada uno de los errores posibles en la precisión final de la medida.

MONTAJE EXPERIMENTAL.

El conjunto experimental desarrollado consta de cuatro sistemas fundamentales:

- 1) Sistema analizador.
- 2) Sistema de detección.
- 3) Sistema comparador.
- 4) Sistema de alimentación y estabilización eléctrica de las fuentes luminosas.

Sistema analizador.

Consta esencialmente de un monocromador con una esfera integradora colocada ante la rendija de entrada, y un fotomultiplicador tras la rendija de salida. El esquema puede verse en la figura 16.

El monocromador es un Jarell-Ash en montaje Czerny-Turner de 0.75 m de focal, de apertura $f/6,5$ y 0.15 \AA de poder de resolución máximo. Está provisto de un sistema de rendijas bilateral y ajustable que permite medir con anchuras de banda de hasta 3 nm como máximo, y de un mecanismo automático de barrido continuo de longitudes de onda. El sistema dispersor es

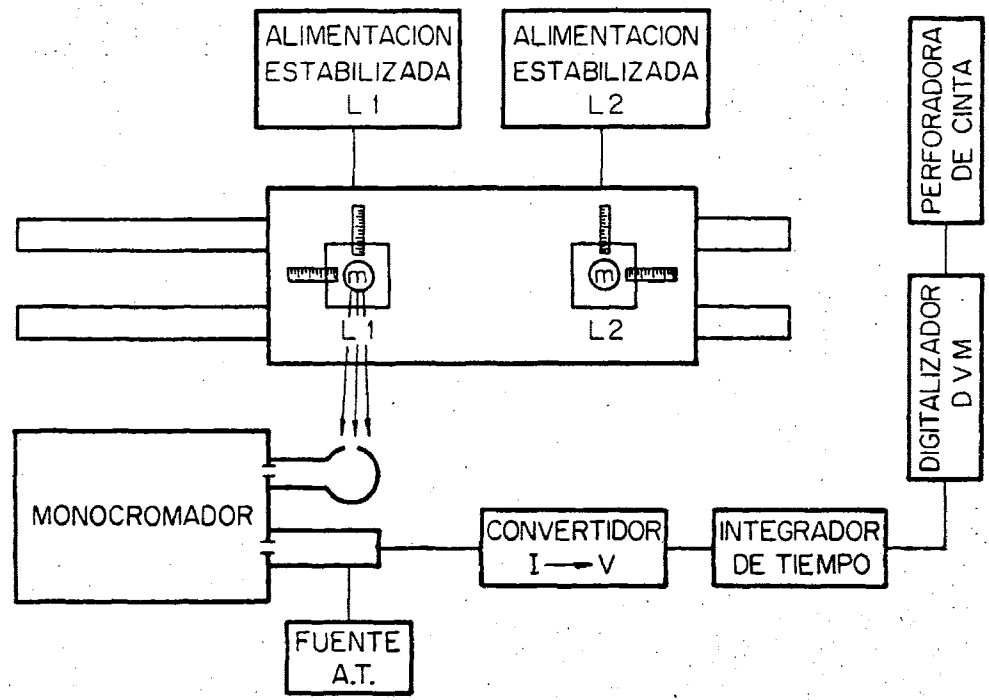


Fig.16.-Esquema del montaje experimental

607

una red de difracción de 1180 líneas/mm. Todas estas características permiten el estudio detallado tanto de fuentes de emisión continuas como de aquellas que muestran líneas espectrales de emisión.

La escala de longitudes de onda del monocromador se calibra periódicamente utilizando las líneas de emisión espectral de un arco de mercurio a baja presión.

La esfera integradora tiene 94 mm de diámetro interior, una abertura de entrada circular de 20 mm de diámetro (apertura limitadora de entrada del sistema) y otra de salida rectangular de 5 x 30 mm². Ambas aberturas están situadas a 90° una de la otra. La superficie interna está recubierta de 5 capas superpuestas de sulfato de bario (SO_4Ba) que actúa como difusor.

La misión de la esfera integradora es hacer uniforme la irradiancia sobre la rendija de entrada, con lo cual evitamos los problemas inherentes a las distintas formas y dimensiones de los filamentos de las fuentes ó tubos de descarga. La responsividad espectral del cátodo del fotomultiplicador colocado a la salida del monocromador no es la misma en todos sus puntos por lo que sería imposible comparar lámparas cuyos filamentos ó tubos de descarga no fueran geoméricamente iguales. Se necesita que la energía incidente sobre el sistema de detección sea uniforme.

Otra función de la esfera integradora es despolarizar la radiación emitida por las lámparas. Así el efecto de la polarización interna del monocromador es igual para cualquiera de ellas.

Sistema de detección y medida de la energía radiante.

Tras la rendija de salida del monocromador se ha colocado un fotomultiplicador Emi-9558 con respuesta espectral del tipo S20, sensible entre 300 y 800 nm, cuyas características de linealidad, estabilidad y sensibilidad espectral han sido perfectamente determinadas.

La señal del fotomultiplicador se lleva a un amplificador y después es recogida en un integrador de tiempos que la estabiliza aún más. Una vez amplificadas e integradas las respuestas del fotomultiplicador, un voltímetro digital de cinco cifras y 1 μ V de resolución, con toma automática de datos, recoge la señal y la almacena en cinta perforada.

Sistema comparador.

El sistema debe permitir la colocación de las dos fuentes, la patrón y la objeto de medida, con una orientación perfectamente definida y sin necesidad de desconectar ninguna de ellas. Para ello se ha proyectado y construido un sistema mecánico adecuado, (20). Una plataforma móvil se desliza sobre dos railes rígidos, pudiendo ser bloqueada en dos posiciones prefijadas. Sobre ellas se han instalado dos torres que soportan los portalámparas. Cada una de las torres dispone de cinco grados de libertad de movimientos: tres desplazamientos en el espacio y dos giros sobre dos ejes perpendiculares. Estas torres son exactamente iguales a la descrita en el capítulo V.



El eje óptico del sistema se visualiza con un haz láser perpendicular a la apertura de entrada del sistema analizador. Cada una de las fuentes se coloca de forma que el haz luminoso pase por el centro de su elemento emisor y sea perpendicular al plano tangente a las dos patitas de sujeción de la fuente, mas cercana al receptor. Desde este plano se tomó también la distancia lámpara-apertura de entrada. Los dos portalámparas van conectados independientemente a los sistemas de alimentación de cada fuente luminosa.

Sistema de alimentación y estabilización eléctrica.

El flujo emitido por una lámpara de incandescencia es más sensible a una variación en la intensidad de corriente I que pasa por su filamento que a una variación del mismo orden en la tensión aplicada a sus bornas. Por esta razón utilizamos en nuestras medidas un sistema de control de la intensidad de corriente. Su esquema puede verse en la figura 17, (20).

La alimentación se efectúa con fuentes estabilizadas. La estabilidad de la intensidad es mejor del 0.01%. El control se lleva a cabo midiendo continuamente la diferencia de potencial V en bornas de una resistencia patrón R_p adecuada, de 0.1000Ω . El grupo de reostatos R nos permite seleccionar el valor deseado de la intensidad de corriente I .

Estos circuitos nos permiten un control de la intensidad de corriente con una precisión de $\pm 0.025\%$.

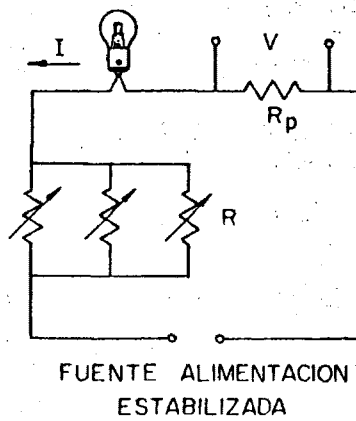


Fig. 17.- Circuito de control de la Intensidad de corriente.

I. Intensidad de corriente.

V. Tensión en bornas de la resistencia patrón.

R_p. Resistencia patrón.

R. Conjunto de resistores.

POSIBLES FUENTES DE ERROR.

La característica fundamental en todo sistema de medida, la que mejor sirve para calificarle, es la exactitud y la precisión con que es capaz de medir.

Pues bien, una vez puesto a punto nuestro montaje experimental hemos hecho una evaluación teórica y práctica de las posibles fuentes de error, y hemos calculado a partir de estos datos el error cuadrático medio máximo que puede esperarse en el resultado final de la medida.

Las posibles fuentes de error que hemos estimado son:

- a) Imprecisión en la lectura de la longitud de onda.
- b) Inestabilidad del sistema de detección.
- c) Imprecisión en la distancia lámpara-apertura de entrada del sistema analizador.
- d) Imprecisión en la orientación de las fuentes luminosas.
- e) Asimetría del montaje mecánico.
- f) Variación de la Intensidad de corriente que circula por el filamento de las lámparas.

Imprecisión en la lectura de la longitud de onda.

Para estudiar esta posible causa de error registramos las respuestas del fotomultiplicador desde 300 a 800 nanómetros, y elegimos la zona mas desfavorable, es decir, la de máxima pendiente. Obsérvese la figura 18.

$$\text{Error absoluto} = \frac{\Delta R}{\Delta \lambda} = 6.23 \times 10^{-2} \text{ V/nm}$$

$$\text{Error relativo} = 0.12 \%$$

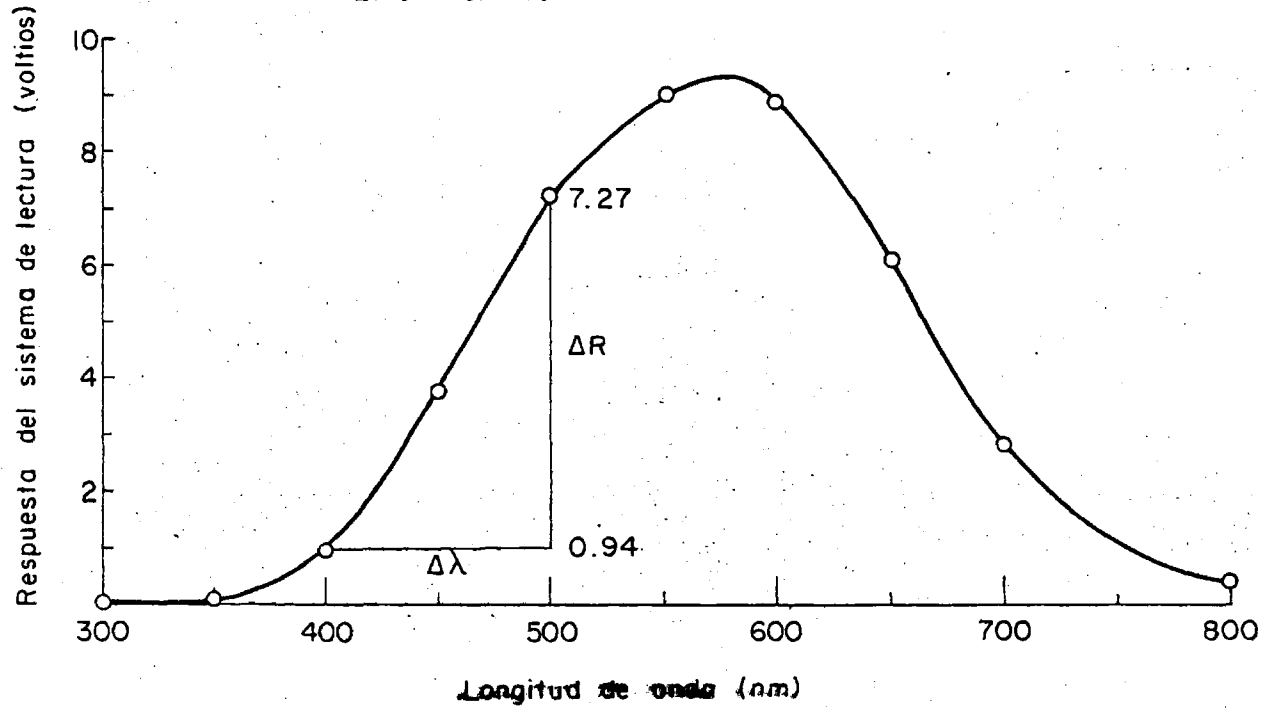


Fig. 18.- Respuesta del sistema de medida entre 300 y 800 nm. Imprecisión en la lectura de la longitud de onda.

115

En la zona elegida el error absoluto es:

$$E_a = \frac{\Delta R}{\Delta \lambda} = \frac{6.23 \text{ V}}{100 \text{ nm}} = 6.23 \times 10^{-2} \text{ V/nm}$$

Para lecturas a mitad de escala (aproximadamente 5 voltios) un desplazamiento de 1 Å en el contador de longitudes de onda da lugar a un error relativo de:

$$E_r = \frac{6.23 \times 10^{-2} \text{ V/nm}}{5 \text{ V}} = 1.2\%$$

Nuestro contador de longitudes de onda es preciso en 0.5 Å por lo que el error relativo que se puede cometer se convierte en:

$$E_r = 0.05 \text{ nm} \times 2.2\% = 0.06\%$$

Este error espectral es despreciable y desaparece totalmente cuando para cada longitud de onda medimos sucesivamente las dos fuentes luminosas, como ocurre en nuestro caso.

Estabilidad del sistema de detección.

Para comprobar la estabilidad a lo largo del tiempo del sistema de detección hemos registrado las respuestas del fotomultiplicador iluminando con una lámpara cuya tensión e intensidad tenemos controladas. El contador de longitudes de onda del monocromador se fijó en 654.7 nm.

Las medidas se tomaron minuto a minuto durante 24 minutos, que es el doble del tiempo necesario para el calibrado de una fuente.

La representación gráfica de estas medidas puede verse en la figura 19. En ella puede verse que durante los 24 minutos la respuesta tuvo una variación máxima de 0.24%.

Influencia de la imprecisión en la distancia "fuente luminosa apertura de entrada del sistema analizador".

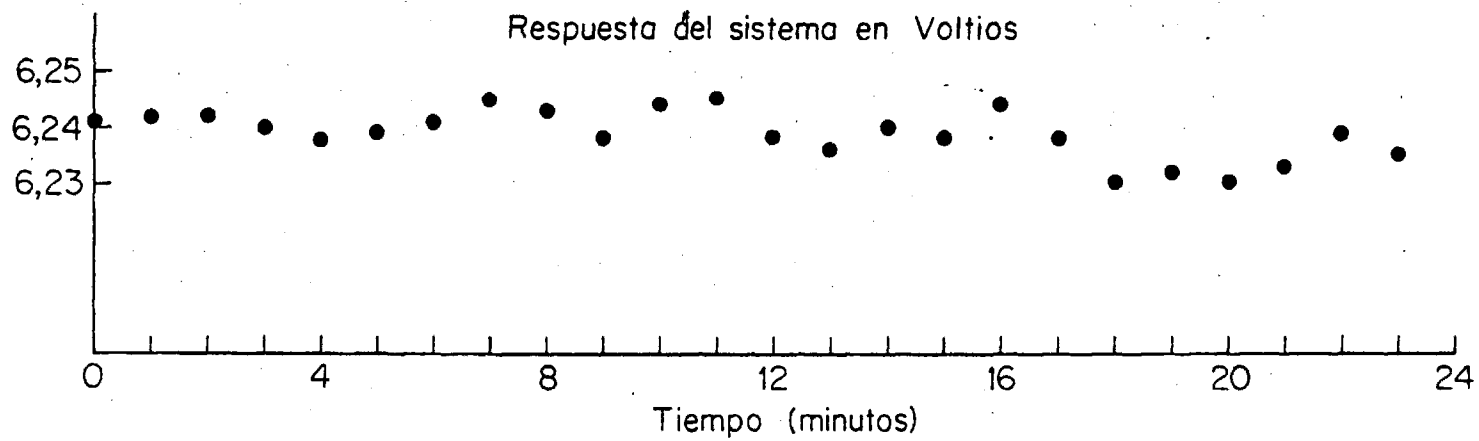
La distancia que hemos fijado para el calibrado de las fuentes luminosas es de 500 mm en todos los casos, porque ya disponemos de dos fuentes patrones de irradiancia espectral, cuyos datos son conocidos a dicha distancia.

Para medir la distancia lámpara-sistema analizador, en el sistema mecánico de sustitución, disponemos de una regla patrón y de un ajuste por tornillo micrométrico.

Hemos ido variando esta distancia y hemos obtenido que para un desplazamiento de 1 mm la respuesta varía un 0.4%. Este resultado coincide con el cálculo teórico.

$$E_r = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E_2 - E_1}{E_2} = \frac{d_2^2 - d_1^2}{d_1^2} = \frac{501^2 - 500^2}{500^2} = 0.4\%$$

Este error del 0.4% es el error que se cometería si la variación en la distancia fuera de 1 mm. Nosotros hemos tomado muchas veces esta medida y hemos encontrado que la variación máxima entre la distancia más corta y la más larga es de 0.4 mm, con lo que el máximo error que en nuestro sistema podemos cometer es de 0.4 mm x 0.4% = 0.16% en la irradiancia sobre la apertura de entrada de la esfera integradora. Esta variación menor



118

Fig.19.- Estabilidad temporal del sistema de detección

del 0.2% es debida en gran parte a la apreciación visual.

Variaciones debidas a la falta de precisión en la orientación de las fuentes luminosas.

En el sistema mecánico de comparación disponemos, como ya hemos visto con anterioridad, de cinco grados de libertad con los que podemos garantizar la exactitud en la posición y orientación de los emisores. Los tres grados de libertad relativos a la posición, uno es la distancia que ya ha sido considerada en el apartado anterior, y los otros dos están en un mismo plano, perpendicular a la dirección de incidencia. Era preciso un error apreciable a simple vista para que se pudiera estimar una variación en la respuesta del sistema.

Los otros dos grados de libertad son los relativos a la orientación. Hemos ido variando la orientación de un emisor, utilizando independientemente cada uno de ellos a fin de estudiar su influencia en la medida total. Los resultados obtenidos fueron:

- 1) Un error de orientación de 5° en el giro alrededor del eje vertical da lugar a una variación de 0.1% en la irradiancia sobre la abertura de la esfera.
- 2) Un error de orientación de 1° en el giro sobre el eje horizontal perpendicular a la dirección de incidencia, da lugar a una variación del 2%.

Para reducir al máximo los errores cometidos por orientación, hemos colocado y orientado el emisor utilizando un haz

láser, de forma que el rayo incidente sobre el plano del bipos te de la base de la fuente luminosa y el reflejado se superpon gan. Este procedimiento garantiza la exacta colocación y orien tación de los emisores, así como su reproducción posterior. El error máximo que se puede cometer con este procedimiento es de 5' de arco, por lo que la imprecisión debida a esta causa se - hace despreciable.

Influencia de la asimetría del montaje mecánico.

Aunque el camino óptico fuente-apertura de entrada está convenientemente diafragmado, y tras las fuentes hay una superficie de fieltro negro para minimizar las posibles refle xiones, debido a la asimetría del montaje mecánico y estas po sibles reflexiones residuales en superficies coloreadas que - reenvían luz a la esfera integradora los resultados podrían - ser diferentes según que la fuente patrón ocupe la posición - L1 ó la L2 (ver figura 16).

Debemos pues calcular el factor de corrección $\alpha(\lambda)$ de asimetría de nuestro sistema.

Supongamos que utilizamos como fuente patrón la lám para de incandescencia GE-2 que calibramos en el sistema de - medida descrito en el capítulo V, y cuyos resultados dimos en la Tabla IX del capítulo VIII, y vamos a calcular la irradian cia espectral absoluta de otra fuente cualquiera "F" con res- pecto a la patrón. Colocamos la fuente "F" en la posición L1 y la GE-2 en la posición L2. Para mayor comodidad representaremos

la posición L1 con el índice "I" de izquierda y la posición L2 con el índice "D" de derecha. Así tenemos:

$$\begin{aligned} R_F^I(\lambda) &= T(\lambda) \cdot E_F(\lambda) \cdot \alpha_I(\lambda) \\ R_{GE-2}^D(\lambda) &= T(\lambda) \cdot E_{GE-2}(\lambda) \cdot \alpha_D(\lambda) \end{aligned} \quad (8,2)$$

donde:

$R(\lambda)$ es la respuesta del sistema de medida,

$T(\lambda)$ es la responsividad del sistema,

$E(\lambda)$ es la irradiancia espectral y,

$\alpha(\lambda)$ es una constante de proporcionalidad,

Dividimos las ecuaciones dadas en (8,2) entre sí y tenemos:

$$\frac{R_F^I(\lambda)}{R_{GE-2}^D(\lambda)} = \frac{E_F(\lambda)}{E_{GE-2}(\lambda)} \cdot \alpha(\lambda) \quad (8,3)$$

donde $\alpha(\lambda) = \alpha_I(\lambda) / \alpha_D(\lambda)$ debe valer la unidad si el sistema es simétrico.

Ahora calculamos nuevamente la irradiancia espectral de la fuente "F" con respecto a la GE-2 cambiando de posición ambas fuentes, es decir, la fuente "F" ocupa la posición L2 y la GE-2, la posición L1. Así tenemos:

$$\begin{aligned} R_F^D(\lambda) &= T(\lambda) \cdot E_F(\lambda) \cdot \alpha_D(\lambda) \\ R_{GE-2}^I(\lambda) &= T(\lambda) \cdot E_{GE-2}(\lambda) \cdot \alpha_I(\lambda) \end{aligned} \quad (8,4)$$

y de la misma manera:

$$\frac{R_F^D(\lambda)}{R_{GE-2}^I(\lambda)} = \frac{E_F(\lambda)}{E_{GE-2}(\lambda)} \cdot \frac{1}{\alpha(\lambda)} \quad (8,5)$$

De las ecuaciones (8,3) y (8,5) podemos deducir el valor del factor de corrección como sigue:

$$\alpha^2(\lambda) = \frac{R_F^I(\lambda) / R_{GE-2}^D(\lambda)}{R_F^D(\lambda) / R_{GE-2}^I(\lambda)} \quad (8,6)$$

De esta manera queda perfectamente determinado el factor de corrección $\alpha(\lambda)$. Para calcular la irradiancia espectral absoluta $E(\lambda)$ de una fuente luminosa tendremos que considerar su posición en el sistema comparador:

1) Si la fuente patrón GE-2 ocupa la posición L1:

$$E(\lambda) = E_{GE-2}(\lambda) \cdot \frac{R(\lambda)}{R_{GE-2}(\lambda)} \cdot \alpha(\lambda) \quad (8,7)$$

2) Si la fuente patrón GE-2 ocupa la posición L2:

$$E(\lambda) = E_{GE-2}(\lambda) \cdot \frac{R(\lambda)}{R_{GE-2}(\lambda)} \cdot \frac{1}{\alpha(\lambda)} \quad (8,8)$$

Introduciendo los valores de $\alpha(\lambda)$ que se obtengan en (8,6) en las ecuaciones (8,7) y (8,8) se corrigen los errores debidos a la asimetría del sistema.

Influencia de la variación de la Intensidad de corriente en el flujo emitido por las fuentes luminosas.

Se trata de medir la magnitud de la variación en el flujo emitido por la fuente luminosa como consecuencia de la posible imprecisión en la medida de la corriente que circula por ella. Hemos variado la corriente en la propia lámpara patrón alrededor de su intensidad nominal de calibrado, $I = 7.900$ amperios, y hemos registrado la señal de salida del espectrorradiómetro en cada caso, figura 20. La variación de esta señal es proporcional a la variación del flujo de la lámpara.

A la vista de los resultados, como el error máximo que nosotros podemos cometer en el ajuste de intensidad es del 0.025%, esto es: $0.025\% \times 7.900 \text{ A} = 2 \times 10^{-3} \text{ A}$, lo corresponde rá una variación en la salida del espectrorradiómetro de $2 \times 10^{-3} \times 3.81 = 7.62 \times 10^{-3} \text{ V}$. Esto quiere decir que tendremos una incertidumbre en el flujo radiante de la lámpara debido a esta causa de:

$$\frac{7.62 \times 10^{-3} \text{ V}}{6.2 \text{ V}} = 0.12 \%$$

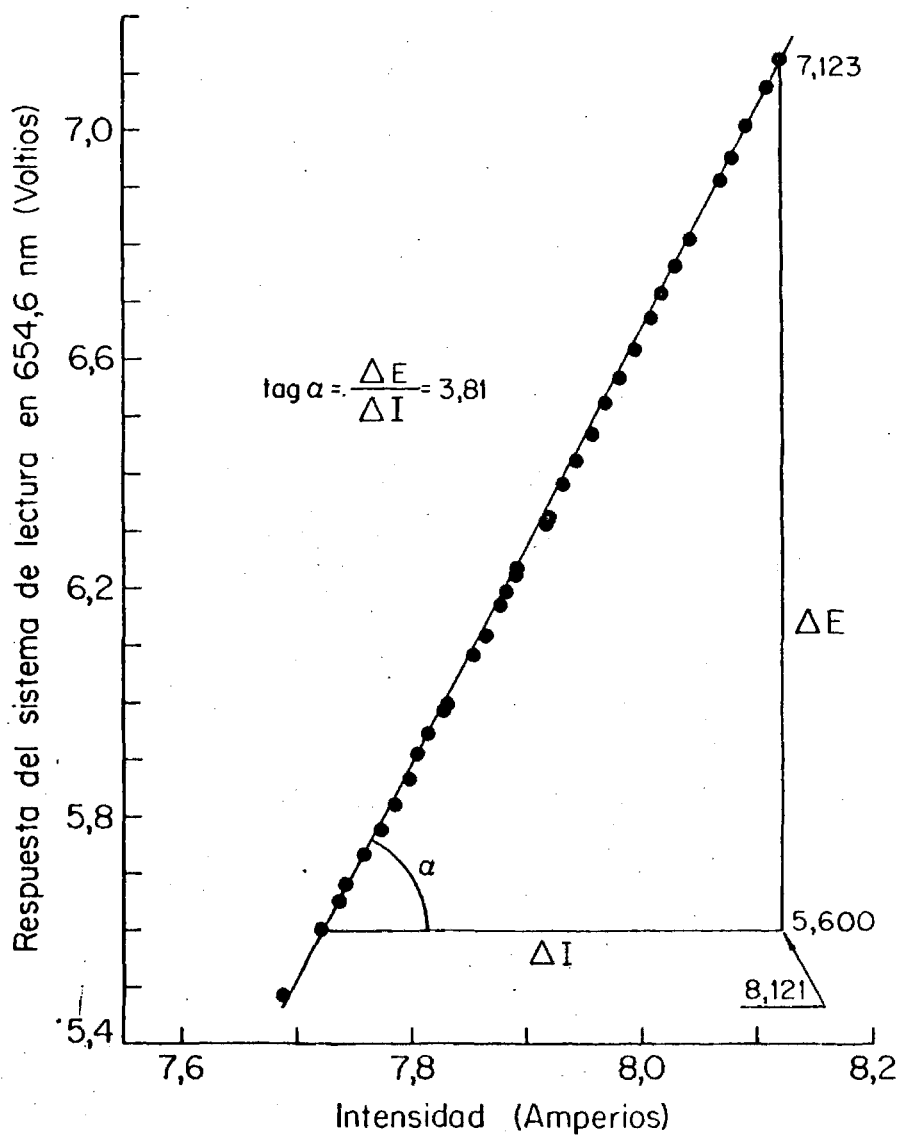


Fig.20.-Influencia de la variación de la intensidad de corriente en el flujo emitido por la lámpara

EXACTITUD DE LA MEDIDA.

Recopilando los errores significativos calculados anteriormente tenemos:

Estabilidad del sistema de detección.	0.3 %
Errores en la medida de la distancia lámpara-sistema analizador.	0.2 %
Estabilidad del flujo de la lámpara debido a la variación de la intensidad de corriente.	0.2 %
ERROR CUADRATICO MEDIO	0.4 %

Para la medida efectuada con cada lámpara tenemos un error cuadrático medio de 0.4 %, luego para el sistema total compuesto por dos lámparas será del doble, 0.8 %.

Este valor, característico de nuestro montaje experimental, es el error que se puede cometer en la transferencia de valores de una lámpara a otra. Hay que añadirle el error estimado por nosotros a los valores asignados a la propia lámpara patrón GE-2, y que calculamos anteriormente en el capítulo VI.

Tenemos así, que la exactitud con que nosotros medimos la irradiancia espectral de cualquier lámpara en valores absolutos utilizando como patrón la lámpara GE-2, es:

$$0.8 \% + 1.1 \% = 1.9 \%$$

Es decir, que disponemos en nuestro laboratorio de una técnica capaz de medir la Irradiancia Espectral Absoluta de cualquier lámpara en el intervalo visible del espectro con una exactitud estimada de $\pm 2\%$.

X.- CONCLUSIONES.

- 1.- Se ha realizado un estudio teórico de las causas que han motivado la redefinición de la unidad básica de Fotometría en el sistema S.I.
- 2.- Se ha discutido en un breve compendio el estado actual de la Radiometría Absoluta, así como de los instrumentos que se utilizan y de sus posibles aplicaciones. Como consecuencia de estos estudios se ha elegido un radiómetro absoluto como patrón de referencia para la realización práctica de la Escala Espectrorradiométrica Absoluta.
- 3.- Se ha proyectado, montado y puesto a punto un sistema de medida de la Irradiancia Espectral Absoluta de lámparas de incandescencia.
- 4.- La evaluación teórica y práctica de la exactitud con que se puede medir en dicho sistema dió como resultado $\pm 1.1\%$ en el intervalo visible del espectro.
- 5.- Se ha medido la irradiancia espectral de una fuente patrón calibrada en el National Bureau of Standards de los Estados Unidos para comparar los resultados. El desacuerdo máximo de nuestras medidas con las del N.B.S. ha sido de $\pm 1.4\%$.
- 6.- Se ha calibrado, con nuestro sistema de medida, un grupo de lámparas de incandescencia como patrones absolutos de irradiancia espectral, utilizándose los resultados para calcular su intensidad luminosa en Candelas. Comparados los valores

obtenidos con los medidos directamente en el banco fotométrico, respecto a los patrones de Intensidad Luminosa procedentes del B.I.P.M., se obtuvo un desacuerdo menor del 0.5%.

7.- Dado el interés actual por conocer la curva de irradiancia espectral de fuentes que no emiten con una distribución espectral similar a la de las lámparas de incandescencia, se ha proyectado, montado y puesto a punto otro sistema de medida -designado como "sistema comparador"- basado en la sustitución de emisores para cada longitud de onda, y utilizando como patrones las lámparas de incandescencia previamente calibradas. El sistema, incluida la lámpara patrón, constituye un espectrorradiómetro absoluto.

8.- Finalmente, se ha realizado también una estimación teórica y práctica de las posibles imprecisiones que pudieran afectar al resultado final de las medidas efectuadas con el espectrorradiómetro. En conclusión se puede afirmar que el sistema comparador mide la Irradiancia Espectral Absoluta de cualquier fuente luminosa en la zona visible del espectro con una precisión comprobada de $\pm 2\%$.

NOTA FINAL.

Del presente estudio pueden extraerse dos conclusiones esenciales: una educativa, por cuanto su planteamiento y realización experimental, mejorando la precisión en la medida de la energía radiante, resultó muy formativa para la autora; y otra de orden eminentemente útil, ya que, como fruto del trabajo, se dispone ya, en el Laboratorio de Radiometría del Instituto de Óptica de Madrid, de una Escala Espectrorradiométrica Absoluta, cuya precisión estimada es de $\pm 2\%$ en la zona visible del espectro.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- "International Lighting Vocabulary". Publication CIE, nº 17 (E-1-1) (1970).
- 2.- Bauer, G. "Measurement of Optical Radiations". Focal Press. London (1965).
- 3.- Walsh, J.W.T., "Photometry". Constable and Company, LTD. London (1953).
- 4.- Corrons, A., Opt. Pur. Apl. Vol. 9, pag. 75 (1975).
- 5.- Doyle, W.M., McIntosh, B.C. and Geist, J., SPIE Annual Technical Symposium. Vol. 62. pp. 166 (1975).
- 6.- Blevin, W.R. and Geist, J., Appl. Opt. Vol. 13, nº 10 pp. 2212-7 (1974).
- 7.- Moore, J.R., Appl. Opt. Vol. 10, nº 12, 2651 (1971).
- 8.- De Vos, J.C., Physica XX, pp. 690-714 (1954).
- 9.- De Vos, J.C., Physica XX, pp. 669 (1954).
- 10.- Corrons A. and Carreras, C. Opt. Pur. Apl. Vol. 10, pag.93 (1977).
- 11.- Geist, J. and Blevin, W.R. Appl. Opt. Vol. 12, 2532 (1973).
- 12.- Geist, J., NBS Technical Note 594-1 (June 1972).
- 13.- Calzada Fernandez, L., "Corrección de la sensibilidad espectral de fotodetectores por medio de filtros". Trabajo de Iniciación a la investigación para aspirar al grado de licenciatura en Ciencias Físicas. Universidad Complutense, Madrid, Junio (1968).

- 14.- Mohan, K., Schaefer, A.R., and Zalewski, E.F., NBS Technical Note 594-5 (1973).
- 15.- Wilkinson, F.J., Metrologia 11, 105-110 (1975).
- 16.- Schneider, W.E., Stair, R. and Jackson, J.K. Appl. Opt. Vol. 6, no 9, 1479-1486 (1967).
- 17.- Brown, W.J., Metrologia 11, 111-115 (1975).
- 18.- Terrien, J., Metrologia 12, 85-86 (1976).
- 19.- Preston, J.S., Journal of Scientific Instruments. (1950).
- 20.- Zalewski, E.F. and al., NBS Technical Note 594-2 (1972).
- 21.- Burns, V.I. and McSparron, D.A. NBS Technical Note 594-3 (1972).
- 22.- Steiner, B., NBS Technical Note 594-6 (1974).
- 23.- Blevin, W.R., D. Sc. Thesis, University of New England, Armidale. Australia (1972).
- 24.- Budde, W. and Dodd, C.X., Appl. Opt. Vol. 10, no 12 December (1971).
- 25.- Goebel, D.G., GSFC. May (1872).
- 26.- "Self-Study Manual on Optical Radiation Measurements". Part I-Concepts Chapter 6. NBS Technical Note 910-3 June 1977.
- 27.- 3M Company, St. Paul, Minnesota 55101, USA.
- 28.- Compton, J.P., Martin, J.E., and Quinn, T.J., J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 7, 2501-10 (1974).

- 29.- Pfund, A.H., J. Opt. Soc. Am., Vol. 23, 375-8 (1933).
- 30.- Harris, L. and Cuff, K.F., J. Opt. Soc. Am., Vol. 46, 160-3 (1956).
- 31.- Blevin, W.R. and Brown, W.J., Metrologia, Vol. 2, 139-43, (1956).
- 32.- Gillham, E.J., Proc. Roy. Soc. Ser. A., Vol. 278, 137-45 (1964).
- 33.- Willson, R.C., Appl. Opt., Vol. 12, 810-7 (1973).
- 34.- Kendall, J.M. and Berdahl, C.M., Appl. Opt., Vol. 9, 1082-91, (1970).
- 35.- Blevin, W.R. and Brown, W.J., Metrologia, Vol. 7, 15-29 (1971).
- 36.- Hengsterger, F., CSIR Research Report 331 (CSIR, Pretoria, 1977).
- 37.- Hengsterger, F. CSIR Research Report 333 (CSIR, Pretoria, 1977).
- 38.- Guild, J., Proc. Roy. Soc. Ser. A, Vol. 161, 1-38 (1937).
- 39.- Eppley, M. and Karoli, A.R., J. Opt. Soc. Am., Vol. 47, 748-55 (1957).
- 40.- Bastie, J., Proc. CCPR, 9e Session, BIMP Publ. (BIMP, Paris, 1977).
- 41.- Bischoff, K., Optik, Vol. 21, 521-5 (1964).
- 42.- Phelan, R.J. and Cook, A.R., Appl. Opt., Vol. 12, 2494-500, (1973).

- 43.- Doyle, W.M., Mc Instosh, B.C. and Geist, J., Opt. Eng., Vol. 15, 541-8 (1976).
- 44.- Blevin, W.R. and Brown, W.J., Metrologia, Vol. 5, 28-30, (1969).
- 45.- Blevin, W.R., Metrologia, Vol. 6, 39-44 (1970).
- 46.- Boivin, L.P., Appl. Opt., Vol. 14, 197-200 (1975).
- 47.- Boivin, L.P., Appl. Opt., Vol. 14, 2002-9 (1975).
- 48.- Boivin, L.P., Appl. Opt., Vol. 15, 1204-9 (1976).
- 49.- Boivin, L.P., Appl. Opt., Vol. 16, 377-83 (1977).
- 50.- Hengstberger, F., Metrologia, Vol. 13, 69-78, (1977).
- 51.- Hengstberger, F., Proc. IMEKO Symp. Photon-Detect. (IMEKO, Prague, 1978).
- 52.- Franzen, D.L. and Schmidt, L.B., Appl. Opt., Vol. 15, 3115-22 (1976).
- 53.- Geist, J., Dewey, H.J. and Lind. M.A., Appl. Phys. Lett., Vol. 28, 171-3 (1976).
- 54.- Fisk, G.A. and Gusinow, M.A., Rev. Sci. Instr., Vol. 48, 118-21 (1977).
- 55.- Fröhlich, C., Proc. CCPR, 9e Session, BIMP Publ. (BIMP, Paris, 1977).
- 56.- Forgan, B.W., Appl. Opt., Vol. 16, 1628-32 (1977).
- 57.- Preston, J.S., Proc. Roy. Soc. Ser. A, Vol. 272, 133-45 (1963).

- 58.- Blevin, W.R., and Steiner, B., Metrologia, Vol. 11, 97-104 (1975).
- 59.- Blevin, W.R. and Steiner, B., Proc. CCPR, 8e Session, 38-58 BIMP Publ. (BIMP, Paris, 1975).
- 60.- Bauer, G., Lichttechnik, Vol. 29, 458-61 (1977).
- 61.- Hengstberger, F., CSIR Research Report 332 (CSIR, Pretoria, 1977).
- 62.- Proc. CCPR, 9e Session, BIMP Publ. (BIMP, Paris, 1977).
- 63.- Terrien, J., Metrologia, Vol. 14, 89-91 (1978).
- 64.- Mendenhall, C.E., Phys. Rev., Vol. 34, 502-12 (1929).
- 65.- Quinn, T.J., Communication during 9th session of the CCPR, Paris, 1977.
- 66.- Fröhlich, C., in "The Solar Output and its Variation" (Colorado Assoc. University Press, Boulder, 1977).
- 67.- Walther, A., J. Opt. Soc. Am., Vol. 58, 1256-9 (1968).
- 68.- Walther, A., J. Opt. Soc. Am., Vol. 63, 1622-3 (1973).
- 69.- Marchand, E.W. and Wolf, E., J. Opt. Soc. Am., Vol. 64, 1219-26 (1974).
- 70.- Marchand, E.W. and Wolf, E., J. Opt. Soc. Am. Vol. 64, 1273-4, (1974).
- 71.- Wolf, E., J. Opt. Soc. Am., Vol. 68, 6-17 (1978).
- 72.- Nicodemus, F.E., NBS Technical Note 910-1 (U.S. Govt. Printing Office, Washington, 1978).

- 73.- Nicodemus, F.E., NBS Technical Note 910-2 (U.S. Govt. Printing Office, Washington, 1978).
- 74.- Steel, W.H., De, M. and Bell, J.A., J. Opt. Soc. Am., Vol. 62, 1099-103 (1972).
- 75.- Leader, J.C., J. Opt. Soc. Am., Vol. 68, 175-85 (1978).
- 76.- Gillham, E.J., Appl. Opt. Vol. 19, nº 2, 300-301 (1977).
- 77.- Goebel, D.G. and al. Journal of Op. Soc. of Am., Vol. 56, nº 6, June (1966).
- 78.- Corróns, A., Opt. Pur. Apl. Vol. 11, 37-39 (1978).
- 79.- Letter by the president of the BIPM to CCPR members, dated 17 October 1978.

