



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

PRACTICAS DE RADIACION TERMICA PARA LA
MATERIA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a

HECTOR ERIC ESPINOSA DE LOS MONTEROS FERNANDEZ

Director: Dr. Jaime Cervantes de Gortari

Asesor: Ing. Labin Martínez Hernández

México, D. F.

1984

T O M O I



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

Pág.

NOMENCLATURA

CAPITULO 1

INTRODUCCION

CAPITULO 2

ELEMENTOS DE LA RADIACION

- 2.1 Generalidades de la Radiación Térmica
- 2.2 Naturaleza de la Radiación Térmica
- 2.3 Principios Fundamentales de la Radiación Térmica
- 2.4 Sinópsis Histórica de la Radiación

CAPITULO 3

ANALISIS TEORICO DE LA TRANSMISION
DEL CALOR POR RADIACION

- 3.1 Radiación emitida por un cuerpo negro
- 3.2 Intensidad de la Radiación
- 3.3 Ley de Lambert
- 3.4 Densidad de Radiación
- 3.5 Distribución Espectral de la Intensidad de Radiación
- 3.6 Curvas de Espectrorradiometría
- 3.7 Ley del Desplazamiento de Wien
- 3.8 Ley de Stefan-Boltzmann
- 3.9 Emisión y Absorción de Energía Radiante en Superficies Reales

- 3.10 Ley de Kirchoff
- 3.11 Intercambio de Energía Térmica Radiante entre Superficies Negras

CAPITULO 4

TRABAJO EXPERIMENTAL

- 4.1 Evaluación de la Distribución de la Intensidad de Radiación en Función de la Distancia
- 4.2 Ley del Coseno de Lambert
- 4.3 Ley de Stefan-Boltzmann
- 4.4 Determinación de la Emisividad, Absortividad y Reflexividad
- 4.5 Ley de Kirchoff
- 4.6 Modelo Cuadrático Inverso y Efecto de los factores en Forma
- 4.7 Factor de Forma entre una Fuente Térmica Radiante Finita y una Superficie Rectangular Diferencial
- 4.8 Distribución de los Factores de Forma en Función de Distancia

CAPITULO 5

MANUAL DE PRACTICAS CON EL EQUIPO DE RADIACION TERMICA PARA LA MATERIA DE TRANSFERENCIA DEL CALOR

- 5.1 Distribución de la Intensidad de Radiación en Función de la Distancia
- 5.2 Ley del Coseno de Lambert
- 5.3 Ley de Stefan-Boltzmann
- 5.4 Emisividad, Absortividad y Reflexividad
- 5.5 Ley de Kirchoff
- 5.6 Modelo Inverso Cuadrático y Efecto de los Factores de Forma

- 5.7 Evaluación de los Factores de Forma entre una fuente Térmica Radiante. Cilíndrica Finita y una Superficie Rectangular Diferencial
- 5.8 Distribución de los Factores de Forma en Función de la Distancia.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

APENDICE A Sistemas de medición de Radiación y Temperatura Scott Modelo 9053
Instrucciones de Instalación
y Operación

APENDICE B Medición de Temperatura

APENDICE C Programación por computadora para la obtención de tablas y gráficas de los datos más relevantes

BIBLIOGRAFIA

NOMENCLATURA Y SIMBOLOGIA

SIMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES	SIMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
A	Area Superficial	cm ² - m ²	exp	Base de los logaritmos naturales	ninguna
ϵ	Potencia emisiva	watts $\frac{\text{Kcal}}{\text{nr}}$	K	Conductividad Térmica	$\frac{\text{Watt}}{\text{m } ^\circ\text{C}}$
α	Absortividad para Radiación	ninguno	F	Factor de Forma	ninguna
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$0.56697 \times 10^{-7} \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4}$	Q	Cantidad de flujo de calor (Flux de Calor)	Watts
ϵ	Emisividad de Radiación	ninguna	Q	Cantidad de Calor	Joule
T	Temperatura en escala Absoluta	°K	fem	Fuerza Electro-motriz	Volt
h	Constante de Planck	erg. seg	ω	Angulo Sólido	Sterradián
ν	Frecuencia de Radiación	$\frac{1}{\text{seg}}$	R, r	Radio o distancia de propagación de la energía radiante.	cm M
λ	Longitud de Onda en el vacío	micron (μm)	i	Intensidad de Radiación (densidad de Flux)	Watts/m^2
E	Energía emitida por Unidad de Tiempo	$\frac{\text{Watts}}{\text{m}^2}$	C ₃	Constante de la Ley del desplazamiento de Wien	
x, y, z	Coordenadas Sistema Carteziano				

N O M E N C L A T U R A .

- λ = longitud de onda en el vacío
 C = Velocidad de propagación de la onda
 C = Velocidad de la luz $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ para fenómenos electro magnéticos en otro modelo que sea distinto al vacío.
 ν = Frecuencia
 1 \AA = angstrom = 10^{-10} m
 C_0 = Velocidad de propagación de la luz en el vacío
 η = Número de onda
 n = Índice de refracción
 μ_m = Micrón (unidad de) = 10^{-6} m
 β = Angulo azimutal, o ángulo del cono (medido a partir de la normal a la superficie)
 θ = Dirección de propagación de la energía radiante dentro
 Θ = Angulo circunferencial del hemisferio
 dA_s = Diferencial de área de superficie vértice del cono
 dA_n = Diferencial de área normal al radio vector
 r = radio de la esfera
 d = diferencial de águno sólido
 dQ = Energía por unidad de tiempo
 Q = Flujo emisorio de la superficie real
 b = Intensidad de radiación de cuerpo negro
 G = Irradiación
 α = Absortividad
 ρ = Reflexividad
 τ = Transmisividad
 e = Emisividad
 J = Radiosidad
 F_1 - F_2 = Factores de Forma
 $i_{\lambda}(\lambda)$ = Intensidad de radiación espectral
 i_b = Intensidad de radiación fustil
 R = Radio del hemisferio
 S_r = Steradianes
 \hat{n} = Normal al elemento de superficie dA
 Cos = Coseno

$dA_n \cos$ = Area en la dirección del valor intensidad.

- \int = Este símbolo indica que la integración respecto al ángulo sólido se hace sobre el hemisferio total.
- $E_{\lambda}(\lambda)$ = Potencia emisiva espectral direccional de una superficie de cuerpo negro.
- $i_{\lambda b}(\tau)$ = Intensidad de radiación independiente de la dirección, pero depende de la temperatura.
- N = Número de fotones emitidos por unidad de volumen
- m = masa de la partícula
- \bar{v} = Velocidad total
- P = Presión de la radiación
- c = Aceleración de la gravedad
- p = Cantidad de movimiento de cada fotón
 = Energía de los fotones por unidad de volumen
- o = Valor mínimo de la energía de los osciladores en equilibrio
- b = Valor medio de la energía de los osciladores
- K = Constante de Boltzmann
- $E_{bv}(\nu)$ = Potencia emisiva espectral que emite un cuerpo negro o potencia emisiva por unidad de frecuencias en torno a
- $\rho_{\lambda} d\lambda$ = Densidad de radiación (energía por unidad de volumen)
- $\frac{hc}{\lambda T}$ = Energía del fotón de longitud de onda
- $i_{\lambda b}(\tau)$ = Intensidad de radiación espectral que puede emitir un cuerpo negro a una temperatura dada.
- $Q'_{\lambda} d\lambda$ = Energía radiante hemisférica incidente por unidad de tiempo y área en la banda de longitudes de onda.
- ρ_{λ} = Reflexividad espectral hemisférica
- ρ = Reflexividad total hemisférica
- $Q'_{\lambda}(\lambda)$ = Potencia emisiva monocromática
- ϵ_{λ} = Emisividad monocromática hemisférica
- $Q_{\lambda b}(\tau)$ = Flujo emisivo espectral
- $Q_{\lambda b}(\tau)$ = Flujo emisivo espectral de un cuerpo negro
- $E_{\lambda}(\lambda, \theta, \tau)$ = Emisividad hemisférica espectral
- $E_{\lambda}(\lambda, \theta, \tau)$ = Emisividad espectral direccional
- $E(\theta, \theta, \tau)$ = Potencia emisiva total direccional
- $Q(\tau)$ = Flujo emisivo de la superficie real a Temperatura
 energía radiante

- dA_n = Area diferencial proyectada sobre el hemisferio corta
do por un cono de radiación
 $b(T)$ = $Q_b(T)$ = Poder de emisión total de una superficie -
difusa.
 $e_b(T)$ = Energía radiante emitida por una superficie de cuerpo
negro por unidad de tiempo, por unidad de superficie-
real (no proyectada), dentro de un intervalo de lon-
gitud de onda centrado en torno de centrado -
en torno de la dirección. ()
 = Densidad de energía radiante de radiación.
 n = índice de refracción
 θ = ángulo azimudal, o cónico (medido a partir de la nor-
mal de la superficie.
 n = Número de onda
 θ = Angulo circunferencial
 m = Longitud de onda de un medio diferente al vacío
 c = Velocidad de propagación de la radiación electromagné-
tica en un medio diferente al vacío.

NOTACION

- i = Cantidad direccional
 b = Cuerpo negro
 \max = Correspondiente a energía máxima
 n = Dirección normal
 p = Proyectada
 λ = Espectralmente dependiente
 $f(\nu)$ = Densidad de campo de radiación
 \bar{e} = Promedio temporal de energía por partícula.
 K = Consonante de Boltzmann.
 C_1 = Constante para la distribución espectral de la energía
 C_2 = Constante para la distribución espectral de la energía
de Planck
 i_b = Intensidad de radiación

dA_n = Area diferencial proyectada sobre el hemisferio cortado por un cono de radiación.

$e_{\lambda b}(T)$ = $Q_{\lambda b}(T)$ = Poder de emisión total de una superficie difusa.

$dQ_{\lambda b}(\lambda, \beta, \theta)$ = Energía radiante emitida por una superficie de cuerpo negro por unidad de tiempo, por unidad de superficie real (no proyectada), dentro de un intervalo de longitud de onda-

C A P I T U L O 1

INTRODUCCION

La transmisión del calor por radiación constituye uno de los principales mecanismos de transporte de energía por lo -- que su estudio resulte de enorme importancia para diversas -- actividades de la sociedad contemporánea.

Los procesos de fotosíntesis y producción de clorofila - en el reino vegetal, está gobernados por la irradiación so - lar, Así mismo, el calor que recibimos del sol, se ha venido aprovechando como una fuente no convencional de energía que - puede utilizarse en infinidad de equipos y aparatos que ope - ran bajo su acción como pueden ser los captadores de diverso - tipo, ya sean planos, parabólicos, de cavidad, etc. En la ar - quitectura, los denominados sistemas pasivos, son ya una rea - lidad en el aprovechamiento de la energía solar y constituyen una aportación a los sistemas de vivienda y una solución a co - munidades rurales que abundan en nuestro país.

Por otra parte, los problemas de contaminación ambiental, han originado la dispersión y la reflexión de la irradiación - solar, causando grandes alteraciones en la climatología y eco - logía de la tierra, lo cual repercute inevitablemente en la - humanidad, así como en la ecología del planeta.

En el diseño y fabricación de instalaciones y equipo de - confort, principalmente cuando se evalúan las cargas térmicas -- originadas por la emisión de calor de las personas, equipo y - aparatos, así como las ganancias y pérdidas de calor debidas - tanto a la irradiación solar como a la emisión de calor atra - vés de los muros y techos de las construcciones, el análisis - de la radiación térmica es muy importante.

En la actividad industrial, como en el caso de construcción y proyectos de calderas, hornos, intercambiadores de calor, etc., la radiación térmica es de gran importancia debido a las altas temperaturas que se presentan durante el funcionamiento de este tipo de equipo.

El presente trabajo, consiste en un estudio teórico-experimental con fines didácticos de los principales modelos que simulan la transmisión de calor por radiación. El objetivo del estudio es obtener resultados que servirán como una guía de prácticas experimentales a nivel licenciatura, así como de base para proyectos de investigación donde se utilice equipo experimental.

El trabajo está dividido en los siguientes capítulos, los cuales se describen brevemente a continuación:

En el Capítulo 2, se proporcionan las generalidades y conceptos básicos de la radiación, así como una sinópsis histórica de la misma.

El Capítulo 3 presenta un análisis teórico de los fundamentos y modelos que simulan la transmisión del calor por radiación y que sirven de base para el entendimiento del trabajo experimental desarrollado.

El Capítulo 4, lo constituyen los experimentos realizados para llevar a cabo la derivación y verificación de los modelos, así como la determinación de los parámetros inherentes.

El Capítulo 5, lo conforma un manual de prácticas experimentales con fines didácticos, basado en la metodología desarrollada en el trabajo experimental de esta tesis.

Al final de este trabajo se proporcionan apéndices que des

criben: la utilización de los sensores en el desarrollo de la tesis, el equipo de experimentación, y la programación por computadora que se empleó para obtener las tablas y gráficas de los datos más relevantes.

CAPITULO 2

ELEMENTOS DE LA RADIACION

En el presente capítulo se proporcionan los fundamentos teóricos concernientes a la transmisión del calor por radiación, así como una sinópsis histórica en el desarrollo de su estudio. Se hace énfasis a la importancia del mismo, así como de su aplicación. Señalándose brevemente su naturaleza desde el punto de vista cuántico y electromagnético. También se menciona la diferencia que existe entre ésta y los mecanismos de conducción y convección.

2.1 Generalidades de la Radiación Térmica.

La radiación es una transferencia de energía que emite un cuerpo en virtud de la actividad atómica y molecular de la materia que lo forma. En el equilibrio térmico la energía interna de un sistema termodinámico está en proporción directa a su temperatura absoluta.

A pesar de que la energía radiante constantemente rodea al medio ambiente, el ser humano no es lo suficientemente sensible a ella, ya que su cuerpo puede detectar únicamente algunas porciones de ella.

Las otras porciones sólo pueden detectarse mediante el uso de instrumentos como los radiómetros que son detectores infrarrojos utilizados por satélites artificiales metereoló

En la actualidad se cuenta con una enorme cantidad de información de todo el mundo, en lo referente a los avances en el estudio de la transmisión de calor por radiación, como algunos de estos estudios e investigaciones inherentes a la radiación térmica, podrían citarse:

Las mediciones de propiedades ópticas en sólidos realizados por Brandenberg W. M. en la NASA (1964).

El análisis de la radiación difusa en absorbedores y emisores aproximados a cuerpos grises, llevado a cabo por Gebhart B., en (1957)

Métodos numéricos, como el de tipo estadístico llamado "Monte Carlo", desarrollado principalmente en "Los Alamos", para la solución de problemas de absorción y reflexión de la energía radiante implementado por vez primera por J.R. Howell (1964). Los numerosos trabajos publicados por Hottel E.R.G. (1959) y R.Viskanta (1968) en Nueva York, Sparrow E. M. (1970) en Minesotta y Frank Kreith sobre diseño aeroespacial en Colorado (1962).

El análisis del modelo de Planck para cavidades finitas y problemas de relajación, llevado a cabo por Bates H.P. L. G.Z., Lanel y Gyr Zus en Zurich, Suiza (1975).

Las investigaciones sobre la reflexividad en cristales de cromuro de cadmio en el espectro visible y ultravioleta-llevadas a cabo por Zuara, M. Prosser, U. Scholegel y A. Wachter P. en la Universidad de Praga, Checoeslovaquia (1979)

Los estudios realizados en 1972 acerca de la interacción de la radiación térmica con la capa de contaminantes atmosféricos y polvo de origen volcánico por el meteorólogo-

ruso M.I. Budyko y los doctores S.I. Rasool y S.H. Schelder.

Un conocimiento mejor de la naturaleza de la interacción de la energía radiante con la materia ha conducido al desarrollo de una fuente nueva de radiación infrarroja el "LASER", radicalmente distinta de las fuentes térmicas en el sentido de que genera radiación monocromática y coherente.

La forma en que el LASER fue concebido y realizado - - prácticamente, requirió el uso de la naturaleza dual electromagnética y cuántica de la energía radiante.

El LASER es capaz de calentar una pequeña cantidad de materia a temperaturas del orden de 50×10^6 ($^{\circ}\text{K}$) lo que -- puede iniciar reacciones químicas en un tiempo menor a un nanosegundo (10^{-12} seg.)

A su vez la ciencia moderna usa el espacio como un laboratorio científico donde pueden encontrarse respuestas a muchos problemas básicos que conciernen a fenómenos y procesos del transporte de calor radiante.

gicos que a una altura de 1,440 km. pueden operar en condiciones nocturnas estableciendo la temperatura de la superficie terrestre o en la baja estratósfera con una exactitud del margen de cinco grados centígrados, el grado de humedad relativa, el "albedo" ó porcentaje de radiación visible o infrarroja reflejada por las nubes, etc.

El ojo humano puede detectar directamente la radiación visible, permitiendo así la formación de imágenes siendo relativamente insensibles a la radiación infrarroja.

La piel sólo puede detectar el calor radiante en forma directa pero no es posible afirmar que lo lleva a cabo de manera eficiente, así por ejemplo no puede detectar los contornos que delinear las superficies ya sean calientes ó frías, a menos que el calor radiante sea muy intenso.

La importancia de cada uno de los tres mecanismos de transferencia de calor conducción, convección y radiación de un cuerpo a otro depende mucho de su temperatura.

La transferencia de energía por radiación térmica, depende de las temperaturas absolutas e individuales de cada uno de los cuerpos emisores, elevadas a una potencia de 4 ó 5 en tanto que en la conducción y la convección, la transferencia de energía de los cuerpos participantes es dependiente de la temperatura entre los cuerpos elevados a una temperatura que va de 1 a 2 aproximadamente. Los fenómenos de conducción son afectados primordialmente por la diferencia de temperatura y poco por el nivel térmico.

Una característica adicional e importante de la transfe

ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Es el conjunto de todas las radiaciones que existen ordenadas según sus frecuencias ó sus longitudes de onda respectivas.

Se inicia por un extremo con las ondas más largas, que vibran a solo algunos ciclos, como son las ondas de radio- las cuales pueden tener longitudes de onda de kilómetros - hasta frecuencias mucho más altas como las de los rayos - cósmicos que poseen longitudes de onda del orden de un - angstrom (Å); $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$. (Véase Fig. 2.2)

La longitud de onda y la frecuencia están relacionadas por la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{\gamma} \quad (2.1)$$

Donde: c = Velocidad de propagación de la onda.

Para fenómenos electromagnéticos " c " es la velocidad de la luz.

$$c = 3 \times 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{Seg}} \right)$$

La luz es solo un caso especial de radiación electro- magnética dentro de una pequeña región del espectro. En el vacío la velocidad de propagación es:

$$c_0 = 2.998 \times 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{Seg}} \right) = 186,000 \left[\frac{\text{millas}}{\text{Seg}} \right]$$

La velocidad " c " dentro de un medio es menor que " c_0 "

El análisis de la teoría electromagnética se fundamenta en la suposición de la existencia de una interacción -- entre las ondas incidentes y la superficie; físicamente -- esto conduce a que para superficies pulidas las ondas inci dentes se reflejan en forma especular.

Dicha teoría proporciona un entendimiento del porqué existen diferencias básicas en las propiedades radiantes - en materiales aislantes y conductores eléctricos, así como una base en la presentación de datos experimentales.

A continuación se enlistan los conceptos fundamentales inherentes a la transmisión del calor por radiación.

LONGITUD DE ONDA.

Es la distancia entre dos puntos consecutivos que -- están en igual fase.

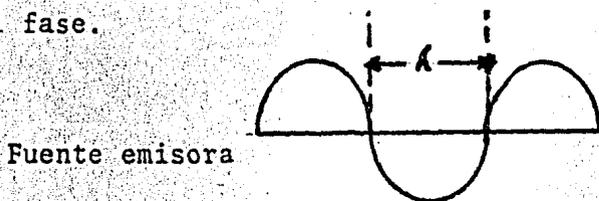


FIGURA 2.1 Longitud de onda de una onda plana.

FRECUENCIA

Es el número de ondas que pasa por unidad de tiempo - por un determinado punto, la unidad de frecuencia es (Seg⁻¹)

la fecha.

La energía radiante en tránsito puede ser examinada desde dos puntos de vista. La teoría ondular electromagnética y la mecánica cuántica. El punto de vista de la mecánica cuántica de la interacción (1) de la radiación con la materia arroja ecuaciones muy similares a las resultantes en la teoría ondular, en la mayoría de los casos.

Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse cualitativamente en términos de la teoría ondular electromagnética de Maxwell para predecir las propiedades radiantes de la materia y otros por la mecánica cuántica de Planck para predecir la cantidad de energía radiante emitida por un cuerpo debido a la temperatura. Por ejemplo, las propiedades radiantes de ciertas clases de superficies pueden predecirse a través de la teoría electromagnética, mientras que la teoría cuántica se emplea en determinar las propiedades de un medio absorbente o emisor de energía radiante.

2.3 Conceptos Básicos.

En el proceso de emitir radiación, un cuerpo convierte parte de su energía interna en ondas electromagnéticas, que son una forma de energía. Estas ondas se mueven a través del espacio hasta que llegan a otro cuerpo, donde dependiendo de las características de dicho cuerpo, la energía interna ó bien puede ser reflejada o transmitirse.

(1) Interacción, refiriéndose a partículas, todo proceso por el cual la energía o la dirección de las partículas resultan modificados como consecuencia de acciones recíprocas de unas partículas sobre otras.

darios de la carga que habían cedido anteriormente en la zona de sombra.

En la agricultura, al utilizar cubiertas de plástico sobre los cultivos. El agua que se colecta en la superficie cambia de fase formándose una capa de escarcha durante la noche, siendo la temperatura superior a la de la congelación, ya que aparte de la convección del aire, la pérdida de calor que sufre el agua en la superficie de la cubierta y el espacio exterior presenta el efecto de sumidero, causando tal grado de enfriamiento.

Una persona percibe una sensación de incomodidad, cuando se encuentra donde existen ventanas que no se cubren con persianas o cortinas, presentándose un efecto de refrigeración, ya que el cuerpo emite su energía directamente hacia ellas sin recibir energía como compensación.

La existencia de la humanidad depende de la energía solar radiante que incide sobre la tierra. Bajo la interacción de este tipo de radiación, tanto en la atmósfera como en la superficie terrestre se obtienen grandes beneficios en aplicaciones prácticas.

Finalmente, se aprecia que la radiación térmica que es la que se estudiará se caracteriza en la región espectral que proporciona a la humanidad calor, luz, fotosíntesis conjunto de todos sus adicionales beneficios.

2.2 Origen y Naturaleza de la Radiación.

La verdadera naturaleza de la radiación y su mecanismo de transporte, no ha sido completamente establecida hasta -

rencia de calor en forma radiante, consiste en que no es necesario ningún medio entre los cuerpos que se encuentran intercambiando energía como es el caso de la conducción y la convección. La energía radiante puede fluir perfectamente en el vacío. Cuando no está presente algún medio, la radiación es la única forma significativa de transportar la energía. Se pueden citar algunos ejemplos característicos de este fenómeno, uno de ellos, lo presenta el hecho de la pérdida de calor a través de las paredes que se encuentran al vacío dentro de un termo ó a la disipación de calor por un filamento de un tubo al vacío.

A partir de la diferencia básica que existe entre los tres mecanismos de transferencia de energía y del valor de las constantes que intervienen, resulta evidente que la transferencia de calor por radiación, se intensifica para niveles altos de temperatura absoluta, siendo a estos niveles cuando la radiación es el mecanismo que controla la transmisión térmica. Consecuentemente, a temperaturas bajas la conducción y la convección son las que contribuyen en mayor proporción del calor total transferido.

Se pueden citar algunos ejemplos característicos de este fenómeno considerados en el diseño de algunos dispositivos en aplicaciones espaciales que operan a niveles altos de temperatura para poder de este modo desarrollar una alta eficiencia de operación. Es por eso, que la radiación es considerada para cuando se calculan efectos térmicos en dispositivos tales como las cámaras de combustión y toberas de un cohete, ó la energía que recibe desde el sol un satélite artificial permitiéndole atender no sólo el consumo de sus equipos, sino restituir a los acumuladores secun

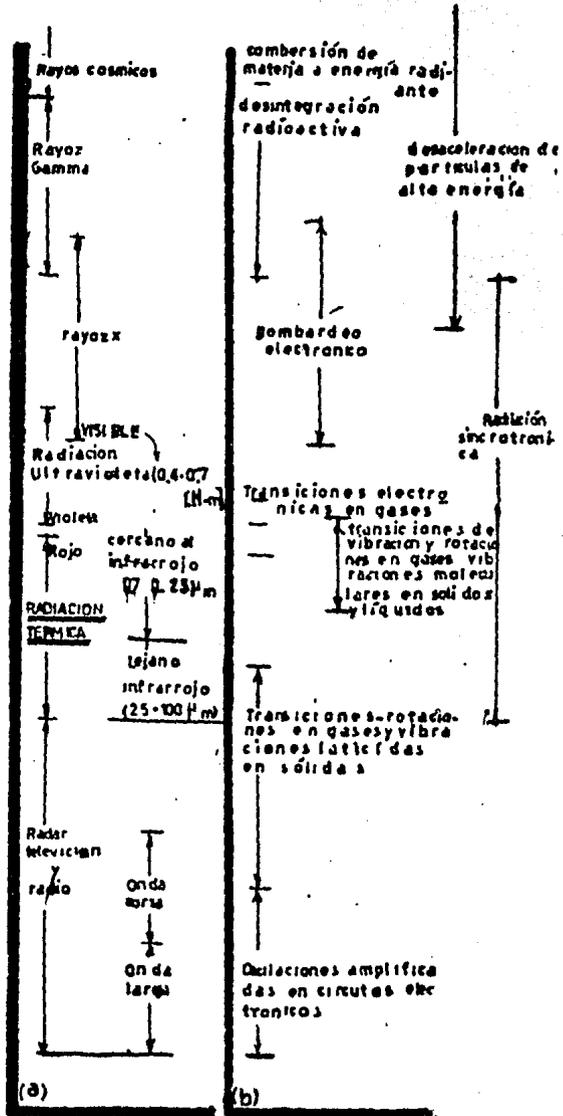
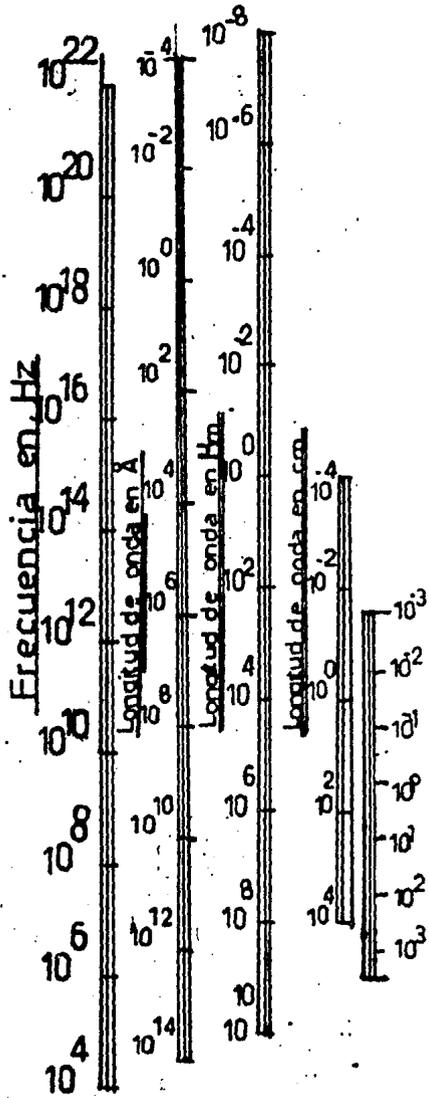


FIG 2.2 Espectro de radiación electromagnética
 (a) tipo de radiación
 (b) mecanismo generador

y se expresa comúnmente en términos del índice de refracción:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.2)$$

Donde:

$n > 1$ para sólidos y líquidos; mientras que para gases $n = 1$

El índice de refracción se refiere al medio que limita al cuerpo negro. Para cuando el índice de refracción de un medio es independiente de la frecuencia varía desde 1.676 hasta 1.516

RADIACION TERMICA.

Es la transferencia de energía térmica que depende de las temperaturas absolutas e individuales de cada uno de los cuerpos emisores.

La radiación térmica produce efectos térmicos tanto en el cuerpo emisor como en el receptor, la cual abarca un intervalo de longitudes de onda en el espectro comprendido entre 0.1 a 100 μm

Cada sustancia tiene un lugar en el espectro que lo caracteriza en cuanto a la frecuencia en que absorbe ó emite energía electromagnética. Referente a esta condición, las sustancias emisoras de luz, a las cuales se asocia un espectro visible, dependen de la naturaleza y temperatura del emisor y de la naturaleza del medio que la ha atravesado antes de llegar al observador.

INTENSIDAD DE RADIACION.

Se define como la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo, por unidad de área diferencial proyectada perpendicularmente a la dirección (θ, ϕ) dentro de un ángulo sólido elemental alrededor de la dirección (θ, ϕ) (Ver Figs. 2.3 y 2.4)

ANGULO SOLIDO.

Se define como la razón que existe entre el área de una esfera que es interceptada por un cono de rayos emitidos desde el centro de la esfera al cuadrado de su radio.

El ángulo sólido numéricamente está medido por el área interceptada por el cono de vértice en dA_s y directriz el contorno de dA_n , en la esfera de radio r dividida por r^2 .

De esto se deduce la siguiente expresión:

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} \quad (2.3)$$

Debido a la definición geométrica de una esfera, esta área es normal al radio vector que define la dirección del cono de rayos.

El ángulo sólido es un número adimensional debido a que, está formado de una razón de términos con dimensiones de longitud de onda elevada al cuadrado y difiere del ángulo plano por ser éste solo una razón de longitudes.

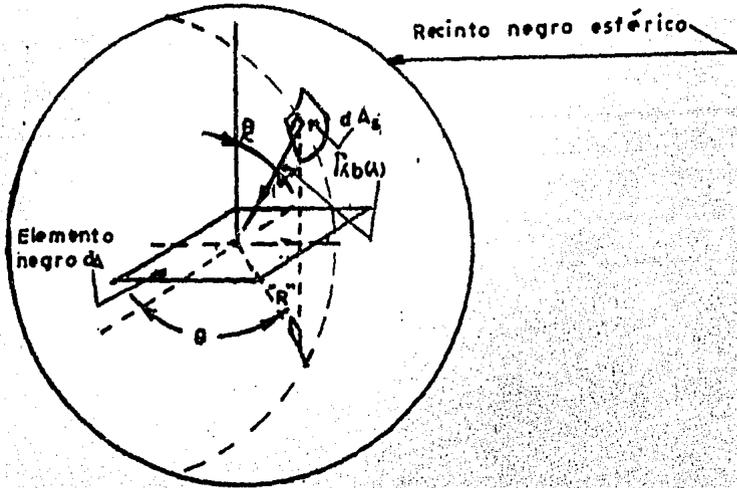


FIGURA 2.3.- Intercambio de energía radiante entre una superficie envolvente y un elemento localizado en el interior del recinto cerrado.
Elemento dA dentro de un recinto esférico.

Si dQ representa la energía por unidad de tiempo que fluye a través de dA y permanece dentro de $d\omega$, entonces la intensidad puede escribirse como:

$$i_b = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta \omega \rightarrow 0}} \left[\frac{\Delta Q}{\Delta A \Delta \omega} \right] \quad (2.4)$$

La cual puesto que tiene magnitud y dirección puede considerarse como una cantidad vectorial.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (25)$$

α = Fracción de radiación incidente absorbida.
= Absortividad

ρ = Fracción de radiación incidente reflejada.
= Reflexividad

τ = Fracción de radiación, incidente transmitida.
= Transmisividad

EMISIVIDAD.

Es la fracción de radiación de un cuerpo negro que es emitida por una superficie real y se define como la razón del flujo de energía radiante emitida por una superficie real a la de un cuerpo negro.

$$\epsilon = \frac{Q(T)}{Q_b(T)} \quad (26)$$

$Q(T)$ = Flujo emisor de la superficie real a la temperatura T , es decir:

$$\left[\frac{\text{energía radiante}}{(\text{tiempo}) \times (\text{área})} \right]$$

RADIOSIDAD (J.)

Es la energía térmica radiante que abandona una superficie por unidad de tiempo y unidad de área de superficie. Representa la suma de los flujos de energía radiante emitidos y reflejados por un cuerpo.

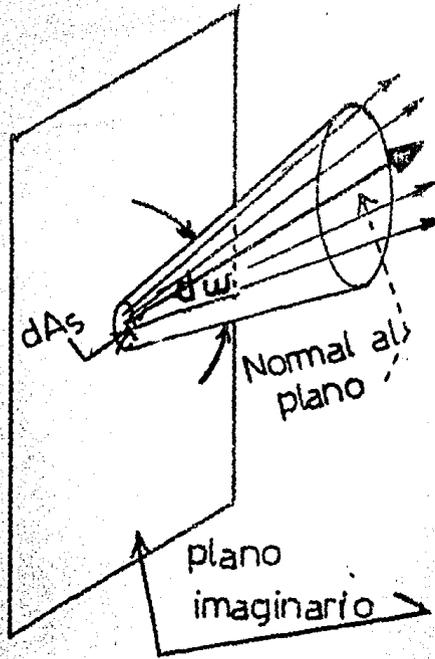


FIGURA 2.4 Flujo de energía emitido por una superficie a través de un ángulo sólido.

IRRADIACION G.

Se define como la radiación térmica total por unidad de tiempo que incide sobre una superficie.

ABSORTIVIDAD, REFLEXIVIDAD Y TRANSMISIVIDAD.

Cuando la radiación choca contra la superficie de un cuerpo es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y si el cuerpo es transparente, parcialmente transmitida. La relación entre la energía absorbida, la reflejada y la transmitida es de acuerdo con la ley de conservación de la energía

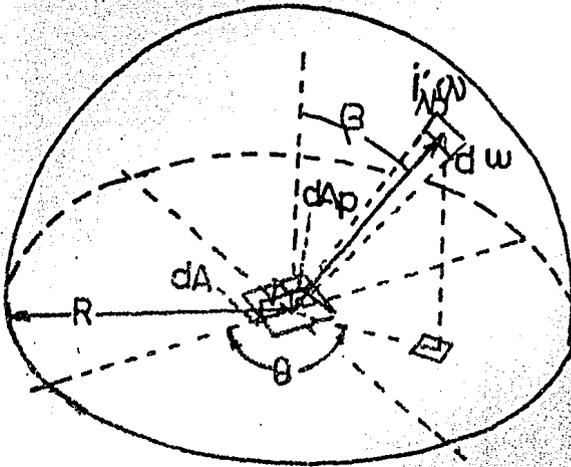


Fig. 2.6 Emisión de la intensidad de radiación espectral desde una superficie de cuerpo negro.

FORMULA DE PLANCK

La cual postula que para cada frecuencia de radiación - existe una pequeña pulsación mínima de energía que debe em tirse. Esto es el cuanto no pudiendo emitirse una cantidad más pequeña, aún cuando si se puede emitir un múltiplo de - esta cantidad.

La radiación total emitida por un cuerpo es un número - entero en cuanto a esa frecuencia dada.

El oscilador lineal electromagnético posee energía dada

por la ecuación:

$$E = h\nu \quad (2.8)$$

Donde: $h = 6.626 \times 10^{-27}$ (erg-seg) $= 6.626 \times 10^{-34}$

(Joule-seg)

ν = Frecuencia del oscilador

DISTRIBUCION DE LA INTENSIDAD DE RADIACION

Existe una cantidad máxima de intensidad de radiación que puede emitir un cuerpo negro a λ_b (T) a una temperatura dada, así como a una longitud de onda dada de radiación espectral I_{λ_b} (T) la cual es evaluada mediante la siguiente ecuación:

$$I_{\lambda_b} = \frac{2h C^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T} - 1)} = \frac{C_1/\pi}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.9)$$

Donde: $C_1 = 2\pi^5 C^2 h$

o en algunos textos se escribe $C_1 = hc_0$

$$C_2 = hc/k$$

$\frac{hc}{k}$ = energía del fotón, de longitud de onda

LEY DE PREVOST

En un espacio al vacío limitado por paredes reflectantes y que contenga un número cualquiera de cuerpos que emitan y absorban energía, al cabo de cierto tiempo todos los cuerpos tendrán la misma temperatura, y la radiación con todas sus propiedades no dependerá de la naturaleza de los cuerpos sino única y exclusivamente de la temperatura.

por la ecuación:

$$E = h\nu \quad (2.8)$$

Donde: $h = 6.626 \times 10^{-27}$ (erg-seg) = 6.626×10^{-34}

(Joule-seg)

ν = Frecuencia del oscilador

DISTRIBUCION DE LA INTENSIDAD DE RADIACION

Existe una cantidad máxima de intensidad de radiación que puede emitir un cuerpo negro a una temperatura dada, así como a una longitud de onda dada de radiación espectral $I_{\lambda b}$ (T) la cual es evaluada mediante la siguiente ecuación:

$$I_{\lambda b} = \frac{2h C^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T} - 1)} = \frac{c_1 / \pi}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.9)$$

Donde: $C_1 = 2\pi^5 C^2 h$

ó en algunos textos se escribe $C_1 = hc_0$

$$C_2 = hc/k$$

$\frac{hc}{k}$ = energía del fotón, de longitud de onda

LEY DE PREVOST

En un espacio al vacío limitado por paredes reflectantes y que contenga un número cualquiera de cuerpos que emitan y absorban energía, al cabo de cierto tiempo todos los cuerpos tendrán la misma temperatura, y la radiación con todas sus propiedades no dependerá de la naturaleza de los cuerpos sino única y exclusivamente de la temperatura.

por la ecuación:

$$E = h\nu \quad (2.8)$$

Donde: $h = 6.626 \times 10^{-27}$ (erg-seg) $= 6.626 \times 10^{-34}$

(Joule-seg)

ν = Frecuencia del oscilador

DISTRIBUCION DE LA INTENSIDAD DE RADIACION

Existe una cantidad máxima de intensidad de radiación que puede emitir un cuerpo negro λ_b (T) a una temperatura dada, así como a una longitud de onda dada de radiación espectral I_{λ_b} (T) la cual es evaluada mediante la siguiente ecuación:

$$I_{\lambda_b} = \frac{2h C^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T} - 1)} = \frac{C_1 / \pi}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2.9)$$

Donde: $C_1 = 2\pi^5 C^2 h$

ó en algunos textos se escribe $C_1 = hc_0$

$C_2 = hc/k$

$\frac{hc}{k}$ = energía del fotón, de longitud de onda

LEY DE PREVOST

En un espacio al vacío limitado por paredes reflectantes y que contenga un número cualquiera de cuerpos que emitan y absorban energía, al cabo de cierto tiempo todos los cuerpos tendrán la misma temperatura, y la radiación con todas sus propiedades no dependerá de la naturaleza de los cuerpos sino única y exclusivamente de la temperatura.

CUERPO GRIS.

Es aquel donde todas las propiedades α , ρ y ϵ son uniformes en todo el espectro de longitudes de onda.

Cuando la radiación incidente y la emitida tienen la misma distribución espectral o cuando las propiedades radiantes son independientes de la longitud de onda.

FACTOR DE FORMA.

Se define como la fracción de energía que abandona una superficie, la cual choca con una segunda superficie directamente, ambas superficies se asumen que están emitiendo energía en forma difusa.

F_{1-2} : Representa la fracción de la energía total radiante desde A_1 que es interceptada por A_2

F_{2-1} : Fracción de energía que incide en A_1 emitida por A_2 (Véase Fig. 2.5)

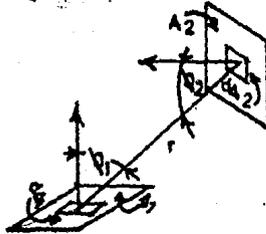


FIGURA 2.5 Notación para el Factor de Forma Geométrica.

LEY DEL DESPLAZAMIENTO DE WIEN

Wien postuló que la longitud de onda a que la intensidad de radiación monocromática tiene un máximo y se desplaza hacia longitudes de onda más cortas. El producto de la longitud de onda del valor máximo de la intensidad y la temperatura absoluta es constante δ

$$\lambda_{max} T = 2884 \mu_m^{\circ} R \quad (2.10)$$

LEY DE STEFAN-BOLTZMANN

La potencia emisiva total (hemisférica) de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta δ

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.11)$$

$$\sigma = \text{Constante de Stefan-Boltzmann} = 5.669 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{watts}}{\text{m}^2} \right)$$

E_b = Potencia emisiva total hemisférica de un cuerpo negro en (watts/m²)

LEY DE KIRCHHOFF

En equilibrio térmico la rapidez con la cual cada cuerpo emite radiación será igual a la rapidez con que absorbe dicha radiación.

Bajo dicha consideración en un recinto negro e isotérmico la emisividad de un cuerpo y su absortividad son iguales, lo que conduce a la relación:

$$\alpha = \epsilon \quad (2.12)$$

Para un cuerpo negro se tiene:

$$\alpha = \epsilon = 1$$

2.4 Sinópsis Histórica de la Radiación.

La propagación de los fenómenos visuales como son: la formación de las sombras y eclipses, así como la reflexión o curvatura de los rayos solares al aparecer el astro en el firmamento, ya había sido observada con interés por los antiguos filósofos árabes y griegos.

Entre los años 400 a 450 A.C. un filósofo griego llamado Demócrito de Abdera sostenía que el universo estaba compuesto de átomos indivisibles de diverso volumen y forma, que se "movían en el espacio" agrupándose en cuerpos.

Esta teoría atómica fue atacada por Aristóteles (384-322 A.C.) quien la desacreditó; hubo de transcurrir más de mil años antes de que la ciencia la tomara nuevamente en consideración.

En esta misma línea el poeta romano Tito Lucrecio Caro (98-55 A.C.), quiso demostrar en su poema "De Rerum Natura" (Sobre la Naturaleza de las Cosas), que el universo estaba gobernado por "leyes mecánicas". Describiendo la materia y su existencia eterna como compuesta por partículas sólidas e individuales distribuídas en el espacio infinito cuyo movimiento es causa y origen de todo lo que afecta al universo.

Siglos más tarde, Pedro Gasendi (1542-1655) matemático y filósofo de origen francés revivió la teoría desarrollada por Demócrito en la cual se consideraba que la radiación visible, estaba formada por "corpúsculos" muy tenues, los cuales "eran lanzados" por cuerpos luminosos dando origen a la "Teoría Corpuscular", que prevaleció hasta principios del -

Siglo XVIII.

Isaac Newton (1642-1727), describió este punto de vista en su tratado de óptica "Filosofía Experimental".

Newton realizó experimentos sobre la dispersión de la radiación solar, obteniendo un espectro continuo en sus colores al pasar la radiación a través de un prisma de vidrio, ampliando sus experiencias a la refracción. Sostuvo que los corpúsculos de la radiación, asociados con los diversos colores, existía al "éter" en vibraciones características.

Por otra parte, el primer intento de la conversión de energía solar en fuerza motriz por medio de un motor de ---impulsión calorífica o de un generador termoeléctrico, se remonta al año de 1615, cuando Salomón Caux trató de cons- truir en Francia un motor de impulsión solar.

Más tarde, en 1680, Cristian Huggens fundamentó la hipótesis de que la radiación visible es un fenómeno ondulatorio y no una corriente de partículas en el espacio; la cual no recibió aceptación por no haber precisado la longitud de onda de la luz.

En 1779, Lambert fué quien primeramente señaló la existencia de los llamados rayos calóricos no luminosos.

En 1800 el astrónomo inglés Sir William Herschel, repitiendo el experimento del prisma de Newton, pero atendiendo más al efecto térmico que al aspecto de la distribución de la intensidad de iluminación en el espectro, estableció de

esta manera, la existencia de dicha forma del transporte de energía, la cual era refractada y reflejada conforme a las leyes de la óptica. Del mismo modo, demostró que la radiación térmica infrarroja emitida por fuentes tales como una candela, una llama, un hurgón caliente o incluso una estufa doméstica, obedecían los mismos modelos de energía solar.

Posteriormente, en 1825, Benard reconoció que es posible desviar los rayos infrarrojos.

En 1830, L. Nobili, utilizó un dispositivo basado en el descubrimiento de Seebeck respecto al fenómeno termoeléctrico (1826) para la medición de pequeñas diferencias de temperatura (termopar). Este dispositivo, condujo al científico italiano M. Melloni al descubrimiento de la denominada termopila construyéndola mediante un circuito de termopares (bismuto-antimonio) en serie como sensor de la radiación térmica, cuyas uniones alternadas se exponían al calor radiante, originándose una diferencia de temperatura entre éstas y las uniones restantes; causando una fem de naturaleza termoeléctrica.

En 1834, J.D. Forbes demostró que la radiación térmica infrarroja podía ser polarizada de igual manera que la radiación visible.

En 1840, Sir John Herschel obtuvo la primera fotografía denominada "Termograma", mediante la evaporación diferencial de una película de alcohol que cubría una hoja de papel previamente revestida de ollín. Dicho efecto, hizo resaltar pequeñas regiones sobreexpuestas a una intensificación mayor de un patrón de calor radiante; de este modo, demostró que -

la zona infrarroja del espectro solar, consiste por lo menos de tres bandas separadas, asociadas en la actualidad a las "ventanas atmosféricas", las cuales pueden observarse nítidamente al preceder la evaporación.

En 1847, H.L. Fizeau y L. Foucault, así como Knoblauch (1897) más tarde, demostraron que la radiación térmica exhibía exactamente los mismos efectos de interferencia que la radiación visible y en teoría podría determinarse su espectro.

En 1859, Gustav Kirchhoff (1824-1887), enunció la ley de su nombre sobre los poderes absorbentes y emisivos definiendo el concepto del "Radiador Perfecto".

En 1864, el físico-matemático inglés James Clerk Maxwell (1831-1897), publicó una teoría que engloba las leyes de la electricidad y magnetismo sistematizando los trabajos anteriores llevados a cabo, incluyendo las investigaciones de Michael Faraday (1791-1827), quien descubrió que la energía radiante está constituida por un campo eléctrico oscilante, acompañado por un campo magnético también en fase con él.

En el año 1879 a partir de datos experimentales obtenidos por Tyndall, José Stefan (1853-1893) de Viena, estableció una relación cuantitativa entre la temperatura absoluta y la potencia emisiva total (hemisférica).

En 1880 S.P. Langley, logró un notable adelanto en la materia con la invención del bolómetro cuyo principio de funcionamiento constaba en una pequeña variación de la resistencia de su filamento sensor que es calentado mediante la

interacción de la energía radiante. Su sensibilidad es mucho mayor que la de las termopilas.

Ludwig Boltzmann (1844-1906) físico teórico austriaco-cuya primera publicación trató acerca de la segunda ley de la termodinámica, seguida de trabajos realizados de Maxwell y de los experimentos de Heinrich Hertz, quien en 1888, detectó las primeras ondas electromagnéticas predichas por -- Maxwell descubriendo también en 1807 el efecto fotoeléctrico; Boltzmann publicó en 1884 junto con el trabajo empírico de Stefan un trabajo teórico en el cual estableció que la energía que emite una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área es proporcional a la temperatura absoluta a la cuarta potencia.

La potencia instantánea transportada por una onda plana fue descrita matemáticamente por Hohn Henry Poynting -- (1852-1914) por vez primera.

En 1884, Michelson (1852-1931), midió la velocidad de la luz en diferentes direcciones respecto a la tierra; lo que condujo al físico holandés Hendrick A. Lorentz, a formular en 1895 las ecuaciones de transformación que describen las variantes de las leyes que gobiernan los fenómenos electromagnéticos.

Hacia fines del siglo XIX la energía llegó a ser el --- principio de unificación de la termodinámica, la química -- cuantitativa y el electromagnetismo. Se llevaron a cabo estudios cuyos objetivos se dirigieron a conformar un modelo -- que gobernará la variación de la energía radiante emitida -- por los cuerpos calientes con respecto a su longitud de onda y su temperatura.

interacción de la energía radiante. Su sensibilidad es mucho mayor que la de las termopilas.

Ludwig Boltzmann (1844-1906) físico teórico austriaco-cuya primera publicación trató acerca de la segunda ley de la termodinámica, seguida de trabajos realizados de Maxwell y de los experimentos de Heinrich Hertz, quien en 1888, detectó las primeras ondas electromagnéticas predichas por -- Maxwell descubriendo también en 1807 el efecto fotoeléctrico; Boltzmann publicó en 1884 junto con el trabajo empírico de Stefan un trabajo teórico en el cual estableció que la energía que emite una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área es proporcional a la temperatura absoluta a la cuarta potencia.

La potencia instantánea transportada por una onda plana fue descrita matemáticamente por John Henry Poynting -- (1852-1914) por vez primera.

En 1884, Michelson (1852-1931), midió la velocidad de la luz en diferentes direcciones respecto a la tierra; lo que condujo al físico holandés Hendrick A. Lorentz, a formular en 1895 las ecuaciones de transformación que describen las variantes de las leyes que gobiernan los fenómenos electromagnéticos.

Hacia fines del siglo XIX la energía llegó a ser el -- principio de unificación de la termodinámica, la química -- cuantitativa y el electromagnetismo. Se llevaron a cabo estudios cuyos objetivos se dirigieron a conformar un modelo -- que gobernará la variación de la energía radiante emitida -- por los cuerpos calientes con respecto a su longitud de onda y su temperatura.

En 1891, W. Wien postuló la ley del desplazamiento mediante el estudio de un pistón que se desplazaba dentro de un cilindro pulido a espejo. En 1896, Wien derivó su distribución espectral de la intensidad de la radiación de un cuerpo negro mediante argumentos termodinámicos, además de consideraciones de absorción y emisión.

En 1892, James Dewar científico inglés quien utilizando gases licuados como agentes enfriadores en investigaciones a baja temperatura (nitrógeno líquido) inventó un recipiente aislado al vacío en el cual se podían almacenar los gases licuados durante varios días. Las botellas "termos" que comunmente se utilizan para la conservación de líquidos fríos o calientes, están basados en dicho invento.

En el lapso de 1896 a 1930, la energía aparece como un nuevo tema dentro de la Teoría Cuántica, y la Teoría de la Relatividad.

La teoría Cuántica nació por la necesidad de explicar diversos experimentos incomprensibles por la física clásica en la cual la energía se define como una propiedad de masas en movimiento.

Hacia 1900, Max Karl Ludwig Planck, alemán dió una explicación mecánica que describiera la realidad del átomo cualitativamente y por lo cual desarrolló la "Teoría Cuántica".

Planck derivó la ley de radiación de una memoria que presentó ante la Sociedad Alemana de Física en la Academia de Ciencias de Berlín, el 14 de diciembre de 1900.

Entre 1901 y 1903, se realizó la primera medición de la presión de radiación por Nichols y Hull en Estados Unidos y por Lebedev en la URSS, 30 años después de la predicción de Maxwell.

Las ideas de Planck recibieron el apoyo del físico alemán Albert Einstein (1879-1955) quien en 1905 aplicó los conceptos de cuantización de energía al efecto fotoeléctrico.

Aún cuando Planck había cuantizado las energías de los osciladores en las paredes del recinto, y todavía se consideraba a la radiación dentro de dicho recinto, como una onda electromagnética; el análisis que hizo Einstein de dicho efecto, señaló lo inadecuado de la representación ondulada de la radiación visible en ciertas condiciones.

El físico norteamericano Robert Andrews Millikan (1861-1953), comprobó en 1916 el trabajo de Einstein por determinación de la energía cinética de los fotoelectrones para diversas frecuencias de radiación visible.

En junio de 1905, Einstein expuso la teoría especial de la Relatividad, resolviendo la contradicción entre la mecánica clásica y el electromagnetismo de Maxwell, abonándose así la teoría del "eter".

Una consecuencia de las más notables es la equivalencia de la masa y energía. La teoría de la relatividad le otorga un significado absoluto a una magnitud que en la teoría clásica tiene importancia relativa, la velocidad de la luz.

La velocidad de la luz, es la teoría de la relatividad lo que el "cuanto elemental de acción", es a la teoría cuántica lo que implica que el cuanto de acción conserva su significado dentro de la teoría de la relatividad.

Planck había desarrollado los modelos matemáticos que describían la radiación, pero Einstein postuló que todas las formas de energía radiante viajaban por el espacio en cuantos separados y discontinuos.

Entre los años 1900 y 1920, se registraron numerosas patentes, comparando dispositivos sensores utilizados para la detección de aviones. Posteriormente en 1931, el físico Danés Niels Bohr (1885-1962), aplicó la teoría cuántica a la emisión de las rayas espectrales, lo que permitió explicar de acuerdo con la interacción de la radiación con la materia cuando debía considerarse a ésta como onda ó como partícula.

Más tarde, en 1934 R.H. Dicke y sus colegas observaron la radiación térmica infrarroja emitida por el sol dentro de un intervalo espectral de 1 a 25 cm. Al año siguiente, Poljack propuso por vez primera el método general de análisis de red que se adecuaba a todos los problemas de transferencia de calor por radiación.

CAPITULO 3

ANALISIS TEORICO DE LA TRANSMISION
DEL CALOR POR RADIACION

En este capítulo se presenta un análisis teórico de la transmisión del calor por radiación enfocado al trabajo -- experimental, cuyo desarrollo se expone en el capítulo que prosigue.

3.1 Radiación emitida por un cuerpo negro.

La interacción de la energía radiante con la superficie de un cuerpo no sólo es el resultado de una propiedad superficial sino que además depende del volumen contenido -- por debajo de dicha superficie.

Cuando la energía radiante incide sobre un cuerpo homogéneo, parte de ella es reflejada, y la restante penetra al interior del cuerpo, por lo que la radiación puede absorberse -- conforme fluye a través del medio.

Para cuerpos transparentes, ó aquellos en que el espesor necesario para absorber substancialmente la energía radiante es muy grande en comparación con sus otras dimensiones la mayor parte de la energía radiante incidente es -- transmitida íntegramente sin experimentar cambio alguno al penetrar en su interior.

Por otro lado, si el cuerpo es de un material que -- absorba fuertemente la radiación en su interior, entonces -- la radiación que no es reflejada será convertida en energía interna dentro de una capa muy delgada adyacente a su superficie.

Existe una considerable diferencia entre la capacidad de la materia en permitir que la radiación fluya a través de su superficie y su capacidad de absorberla internamente una vez que ha pasado a su interior.

Por ejemplo; un metal altamente pulido, generalmente refleja la mayor parte de la energía radiante que incide sobre de él; pero aquella porción de radiación que penetre será absorbida fuertemente y convertida en energía interna en una pequeña parte del espesor del material. A pesar de que el metal posea una fuerte absorción interna, su capacidad de absorber la radiación incidente es limitada debido a que la mayor parte de la radiación incidente es reflejada.

Los materiales no metálicos, poseen una propiedad opuesta. Los no metales, permiten que fluya una considerable porción de la radiación incidente hacia el interior del material, pero es necesario un mayor espesor con relación al de un material metálico para que la radiación sea absorbida internamente y sea a su vez, convertida en energía interna.

Cuando la radiación que pasa al interior de un cuerpo es absorbida en su totalidad, se dice que el cuerpo es "opaco". Algunos metales son conformados como partículas muy finas, las cuales son depositadas sobre una superficie, dando como resultado una baja reflexividad. Dicho efecto combinado con la alta dispersión del metal, causa que este tipo de superficie posea una alta absorción. Este proceso es la base para la formación de los llamados "metales negros", como sucede con el platino o el llamado "oro negro".

Definición de un cuerpo negro.

Un cuerpo negro se define como aquel cuerpo ideal, el cual permite que toda la radiación que incide sobre él fluya hacia su interior, (es decir que no es reflejada), y que es absorbida totalmente en su interior (no es transmitida) en todas las longitudes de onda, así como a cualquier ángulo de incidencia, por lo que se dice que el cuerpo negro es un absorbedor perfecto de la energía radiante incidente. A partir de esta definición, es posible derivar otros aspectos cualitativos del comportamiento del cuerpo negro.

El concepto de cuerpo negro es básico para el estudio de la transferencia de la energía radiante. Como absorbedor perfecto, sirve como patrón, mediante el cual se pueden comparar otros cuerpos que absorben radiación. Como se verá posteriormente, un cuerpo negro a su vez, emite la máxima cantidad de energía, por lo que también sirve como patrón de cuerpos emisores de energía radiante. Las propiedades radiantes del cuerpo negro, han sido establecidas mediante la aplicación de la teoría cuántica así como comprobadas experimentalmente.

Sólo algunas superficies, tales como el carbón negro, carborundum, platino negro y oro negro, poseen la capacidad de absorber la energía radiante. De aquí que el llamado "cuerpo negro" derive su nombre, ya que se ha observado que tales materiales pueden absorber la radiación visible que incide sobre ellos, y los cuales aparecen de color negro al ojo humano. Sin embargo, el ojo humano no es capaz de indicar la capacidad de absorber la radiación térmica dentro de un cierto rango de longitudes de onda. Por ejemplo, una super

ficie cubierta con pintura de aceite de color blanco, puede absorber la radiación infrarroja que es emitida a temperatura ambiente, sin embargo, absorbe muy escasamente aquella radiación característica de longitudes de onda más cortas como es la radiación visible.

Propiedades de un cuerpo negro.

Además de ser un absorbedor perfecto de la radiación, el cuerpo negro posee otras propiedades, las cuales serán discutidas a continuación:

Emisor perfecto.

Considérese un cuerpo negro, a una temperatura uniforme, el cual es colocado en el interior de un recinto cerrado de configuración arbitraria y aislado perfectamente del medio ambiente.

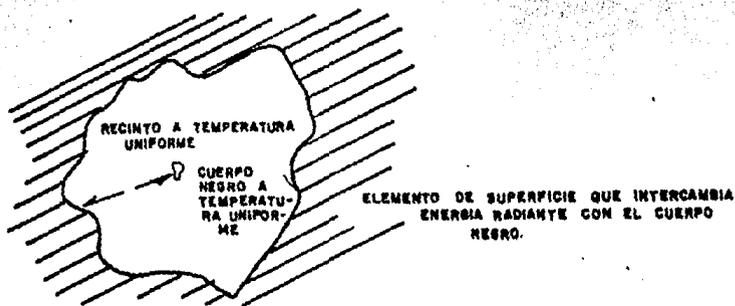


FIGURA 3.1 Configuración del recinto para la deducción de las propiedades del cuerpo negro.

Después de haber transcurrido un cierto período de tiempo, el cuerpo negro conjuntamente con el recinto permanecerá a una temperatura de equilibrio común. En esta condición de equilibrio, el cuerpo negro deberá emitir exactamente la misma cantidad de energía radiante que absorba. Para comprobar lo anterior, considérese lo que sucederá si las cantidades de energía radiante que son emitidas no igualarán a las incidentes, esto traería como consecuencia que el cuerpo negro encerrado incrementara o disminuyera su temperatura, lo que implicaría una transferencia neta de calor de un cuerpo más frío a uno más caliente, violándose de este modo a la segunda ley de la termodinámica.

De lo anterior se deduce, que puesto que un cuerpo negro es por definición el que absorbe la máxima cantidad de energía radiante para cada dirección y longitud de onda en el interior del recinto, deberá así mismo, emitir la máxima cantidad de energía radiante, es decir un cuerpo que absorba menor cantidad de radiación que un cuerpo negro, deberá emitir también menor energía que el cuerpo negro para permanecer en equilibrio.

En 1792, Prevost estableció que dos o más cuerpos continúan emitiendo energía, aún cuando estén en equilibrio térmico. La temperatura de equilibrio entre los dos cuerpos que se encuentran intercambiando energía radiante llega a establecerse debido a los procesos mutuos de absorción y emisión.

Isotropía de la Radiación en el Interior
de un Recinto Negro.

Considérese ahora al recinto isotérmico compuesto de paredes negras y de configuración geométrica arbitraria como se muestra en la Fig. 3.1. Si el cuerpo negro se desplaza a otra posición y gira hacia otra dirección, deberá permanecer a la misma temperatura, debido a que todo el recinto permanece en equilibrio isotérmico. Consecuentemente el cuerpo negro deberá continuar emitiendo la misma cantidad de energía radiante que la anterior.

Para estar en equilibrio, el cuerpo negro deberá seguir recibiendo la misma cantidad de radiación que este emite hacia las paredes. De este modo, la radiación total que es recibida por el cuerpo negro es independiente de la orientación del cuerpo así como de su posición con respecto al recinto. Por lo tanto, la radiación que se propaga a través de cualquier punto dentro del recinto es independiente de la posición o dirección. Esto quiere decir que la radiación del cuerpo que llena el recinto es ISOTROPICA.

El cuerpo negro, emite la máxima cantidad posible de radiación en cada longitud de onda y en cada dirección, lo que se enunciará en los siguientes argumentos.

Emisor Perfecto en Cualquier Dirección.

Considérese una diferencial de área sobre una superficie del recinto negro isotérmico, así como un cuerpo negro elemental en el interior de dicho recinto. Parte de la ra -

radiación que es emitida por la diferencial de área chocada -- contra el cuerpo negro elemental a un ángulo de incidencia determinado.

Por definición, la radiación total incidente es absorbida para que se mantenga el equilibrio térmico y la radiación sea isotrópica en el interior del recinto, la radiación emitida en dirección contraria a la incidente, deberá igualar a la recibida; ya que el cuerpo absorbe la máxima cantidad de radiación en cualquier dirección, de igual modo deberá existir una cantidad igualmente máxima en cualquier dirección.

Además, ya que la radiación emitida por un cuerpo negro y que llena a su vez el recinto, es isotrópica. La radiación recibida o emitida en cualquier dirección por la superficie negra encerrada, por unidad de área proyectada normal a esa dirección, deberá ser la misma.

Emisor Perfecto en cada Longitud de Onda.

Considérese un cuerpo negro en el interior de un recinto cerrado, donde todo el sistema se encuentra en equilibrio térmico. El recinto limitante se supone que emite y absorbe radiación en un pequeño intervalo de longitud de onda $d\lambda$ en torno a λ . Como absorbedor perfecto, el cuerpo negro absorberá la radiación total incidente en dicho intervalo de longitud de onda. Para mantener el equilibrio térmico del recinto, el cuerpo negro deberá reemitir la energía radiante que será absorbida por el recinto en el mismo intervalo de longitud de onda particular.

Puesto que el cuerpo negro absorbe la máxima cantidad de energía radiante en el intervalo $d\lambda_1$, también debe emitir la cantidad máxima en $d\lambda_1$.

Si existe un segundo recinto el cual solo puede emitir y absorber energía radiante en el intervalo $d\lambda_2$ en torno a λ_2 . Un cuerpo negro deberá entonces emitir la máxima cantidad de energía radiante a la longitud de onda λ_2 . De esta manera, es como se demuestra que el cuerpo negro es también un emisor perfecto en cada longitud de onda. La naturaleza especial asumida para el recinto en esta discusión no es importante, ya que las propiedades emisivas de un cuerpo dependen únicamente de la naturaleza del cuerpo y son independientes del recinto.

Radiación Total en función de la Temperatura Únicamente.

Si la temperatura del recinto es alterada, la temperatura del cuerpo negro alojado, deberá ajustarse, igualando a la nueva temperatura del recinto. Esto significa que el sistema aislado por completo tenderá al equilibrio térmico.

El sistema nuevamente será isotérmico y tanto la energía absorbida como la emitida, serán iguales respectivamente, no obstante que difiera su magnitud, en relación a la temperatura previa del recinto.

Ya que por definición un cuerpo negro absorbe (y por tanto emite la máxima cantidad de energía correspondiente a la misma temperatura), las características del medio circundante no afectan el comportamiento emisivo del cuerpo negro.

Por tanto, la energía radiante total emitida por un - - cuerpo negro es una función únicamente de su temperatura.

Además, la segunda ley de la termodinámica prohíbe la - transferencia neta de energía que parte de una superficie -- más fría hacia otra superficie más caliente, sin que se realice trabajo sobre el sistema. En efecto, si la energía radiante emitida por un cuerpo negro se incrementara conforme -decrece la temperatura, entonces es posible realizar un modo lo que viole esta ley fácilmente. Considérese por ejemplo, - las placas paralelas infinitas mostradas en la Fig. 3.2

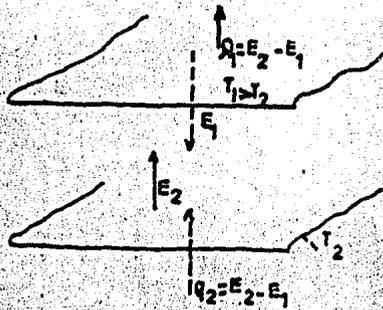


FIGURA 3.2 Modelo que viola la segunda ley de la termodinámica.

La placa superior se mantiene a una temperatura T_1 , la cual es mayor que la temperatura T_2 de la placa inferior.

Si la emisión de la energía decrece conforme se incrementa la temperatura, entonces la energía emitida por unidad de tiempo por la placa 2, E_2 es mayor que la emitida por la placa E_1 .

Debido a que las placas son negras, cada una absorberá toda la energía emitida por la otra. Para mantener la temperatura de las placas, se debe extraer una cierta cantidad de energía $Q = E_2 E_1$ de la placa 1 por unidad de tiempo, así como proporcionar una cantidad igual a la placa 2. De esta manera, es posible transferir una cantidad neta de energía de una placa más fría a una más caliente, sin que se realice trabajo externo.

Según la segunda Ley de la Termodinámica, esto no es posible, por lo que se concluye que la energía radiante emitida por un cuerpo negro debe incrementarse conforme a su temperatura.

A partir de estos argumentos, se deduce que la energía radiante total emitida por un cuerpo negro, es función monótonica de la temperatura.

la ecuación:

$$i_b = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} i_{\lambda b}(\lambda) d\lambda$$

La intensidad de radiación i_b representa la cantidad de energía radiante por unidad de área perpendicular y es independiente de la dirección por la que su símbolo no se modifica para cualquier designación de (θ, ϕ)

Para determinar la cantidad dQ que representa la energía radiante por unidad de tiempo y unidad de área (flux de calor radiante), a través de cualquier plano, considérese una diferencial de área dA circundada por un hemisferio de radio con una área de superficie de $2\pi r^2$ y que subtiende un ángulo de 2 sterradianes (sr) véase fig. 3.4

La energía radiante correspondiente por unidad de área normal está dada por la relación:

$$i_b = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} i_{\lambda b}(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

Considerando la intensidad de radiación contenida dentro de un ángulo sólido $d\omega$ emitida por un elemento de superficie dA y que se propaga en la dirección θ con la normal \hat{n} al elemento de superficie.

La intensidad de radiación que es la energía radiante emitida por unidad de área, por unidad de tiempo, contenida dentro de un ángulo sólido $d\omega$ la cual abandona una superficie unitaria en la dirección θ puede expresarse como:

$$i_b = \frac{dQ / \cos \theta}{d\omega} \quad (3.2)$$

ra de las placas, se debe extraer una cierta cantidad de energía $Q = E_2 - E_1$ de la placa 1 por unidad de tiempo así como proporcionar una cantidad igual a la placa 2. De esta manera, es posible transferir una cantidad neta de energía de una placa más fría a una más caliente, sin que se realice trabajo externo. Según la ley de la termodinámica, esto no es posible, por lo que se arguye que la energía radiante emitida por un cuerpo negro debe incrementarse conforme su temperatura.

A partir de estos argumentos, se deduce que la energía radiante total emitida por un cuerpo es función monótonica de la temperatura.

3.2 Intésidad de Radiación.

Para describir la cantidad de energía radiante que se propaga en una dirección dada θ con una longitud de onda λ se utiliza una cantidad vectorial denominada "intensidad de radiación", la cual representa la cantidad de energía que pasa a través de la unidad de área perpendicular a la dirección por unidad de longitud de onda y dentro de un ángulo sólido elemental $d\omega$ (véase fig. 2.3), esta cantidad también es comunmente conocida como "intensidad de radiación espectral $I_{\lambda}^0(\lambda)$ ".

También es posible definir la intensidad de radiación total, la cual sirve para caracterizar la cantidad de energía radiante emitida en todo el espectro de longitudes de onda desde $\lambda = 0$ hasta $\lambda = \infty$ en un haz y se relaciona con la intensidad de radiación espectral $I_{\lambda}^0(\lambda)$ por medio de

Por otra parte de la definición de ángulo sólido:

$$d\omega = \frac{dA_N}{r^2} \quad (3.3)$$

Sustituyendo dicha expresión en la ecuación (3.3), se tiene:

$$i_b = \frac{dQ/\cos\theta}{dA_N/r^2} \quad (3.4)$$

De la cual:

$$dQ = i_b \cos\theta \frac{dA_N}{R^2} \quad (3.5)$$

Donde: dA_{app} es el área en la dirección del vector intensidad. El área de la superficie emisora se ha multiplicado por $\cos\theta$ ya que es el área que se observaría desde un punto del hemisferio situado a un ángulo θ de acuerdo a la definición de intensidad; en ella se considera que la energía fluye a través de la unidad de área perpendicularmente a la dirección de propagación. (Véase fig. 3.4)

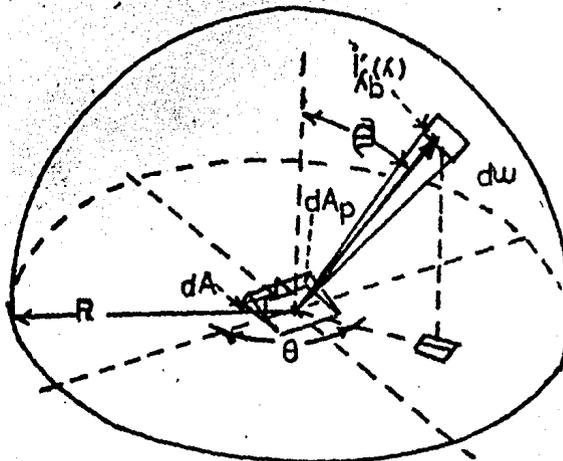


FIGURA 3.4 Hemisferio unitario utilizado para obtener la relación entre la intensidad de cuerpo negro y la potencia emisiva hemisférica.

El flux de energía total que emite una superficie por -- unidad de área, por unidad de tiempo contenido en un ángulo-sólido, se encuentra sumando todo dQ , sobre el hemisferio total (Véase Fig. 3.22) mediante la ecuación.

$$Q = \int_{\Omega} i'_{\lambda b}(\lambda) \cos \theta d\theta d\phi \quad (3.6)$$

En donde el símbolo \int_{Ω} indica que la integración respecto al ángulo sólido se hace sobre el hemisferio total.

Para integrar la ecuación (3.6), se expresa el ángulo-sólido en coordenadas esféricas (Véase Fig. 3.4)

El área diferencial dA_N proyectada sobre el hemisferio-cortado por un cono de radiación es:

$$(R d\theta) (R d\phi \sin \theta) = R^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.7)$$

Sustituyendo en la ec. (3.3) se tiene:

$$d\omega = \frac{dA_N}{R^2} = \frac{R^2 \sin \theta d\theta d\phi}{R^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.8)$$

la cual puede escribirse como:

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} i'_{\lambda b}(\lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (3.9)$$

Sustituyendo la ec. (3.8) en la ec. (3.9) e integrando en todo el hemisferio se obtendrá; que la potencia emisiva de la superficie está relacionada con la intensidad de radiación a través de la expresión:

$$Q = \int_{\Omega} i'_{\lambda b}(\lambda) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

Convencionalmente se define: $\mu = \cos \theta$ para escribir:

$$Q = \int_{\Omega} i'_{\lambda b}(\lambda) \mu d\mu d\theta \quad (3.10)$$

Que integrando una vez proporciona:

$$Q = i'_{\lambda b}(\lambda) \left[\frac{\sin^2 \theta}{2} \right]_0^{\pi/2} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\theta \quad (3.11)$$

$$Q_{\lambda_b} = \pi i_{\lambda_b}(\lambda)$$

(3.12)

Por lo tanto, el poder de emisión total $e_{\lambda_b}(T)$ de una superficie difusa es π veces su intensidad.

El flux de radiación es en general una función de la orientación del plano imaginario seleccionado; puede tener dos valores correspondientes a cada una de las dos posibles direcciones, desde la normal hacia el plano imaginario.

Cuando sea necesario encontrar la transferencia de calor entre superficies en el vacío, ó cuando menos en un medio no participante tal como aire ligero en la atmósfera, los valores más usados del flux radiante e intensidad de radiación ocurren en las superficies.

3.3 Ley de Lambert del Coseno

La energía radiante que es emitida por una superficie de cuerpo negro, por unidad de tiempo, por unidad de superficie real (no proyectada) en el intervalo de longitud de onda centrado en torno a la longitud de onda λ y dentro de un elemento de ángulo sólido $d\omega$ centrado alrededor de la dirección (β, θ) , $e_{\lambda_b}(\lambda, \beta, \theta)$; se relaciona con la energía emitida en el intervalo de longitud de onda $d\lambda$ centrado en la vecindad de λ , por unidad de tiempo en cualquier dirección; $dQ_{\lambda_b}(\lambda, \beta, \theta)$ mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} dQ_{\lambda b}(\lambda, \theta) &= e'_{\lambda b}(\lambda, \theta) dA d\omega d\lambda \\ &= i'_{\lambda b}(\lambda) dA \cos \theta d\omega d\lambda \end{aligned} \quad (3.13)$$

De la cual se obtiene:

$$e'_{\lambda b}(\lambda, \theta) = i'_{\lambda b}(\lambda) \cos \theta = e_{\lambda b}(\lambda, \theta) \quad (3.14)$$

Es evidente que a partir del término $i'_{\lambda b}(\lambda) \cos \theta$ en la ecuación anterior que $e'_{\lambda b}(\lambda, \theta)$ no depende de θ y puede expresarse como $e'_{\lambda b}(\lambda, \theta)$. La cantidad $e'_{\lambda b}(\lambda, \theta)$ es llamada potencia emisiva espectral direccional para una superficie de cuerpo negro.

La energía que emite una diferencial de área de cuerpo negro por unidad de tiempo en el intervalo $d\lambda$ y $d\omega$ es entonces:

$$Q_{\lambda b}(\lambda, \theta, T) = i'_{\lambda b}(\lambda, T) dA \cos \theta d\omega d\lambda = e'_{\lambda b} d\lambda d\omega dA \quad (3.15)$$

Puesto que para un cuerpo negro la intensidad de radiación es independiente de la dirección, pero depende de la temperatura; dicha propiedad es denotada por $i'_{\lambda b}(\lambda, T_b)$ y será constante para una superficie difusa la cual obedece la llamada Ley de Lambert del Coseno.

Puede demostrarse a consecuencia de este comportamiento, el aspecto que presenta una esfera incandescente la cual al verse de lejos, se aprecia como un disco uniformemente iluminado. La luna y el sol se aproximan a tal condición.

Un cuerpo negro debido a que es una superficie difusa sirve como un patrón de comparación con las propiedades direccionales de superficies reales que no siguen en general -

la ley del coseno, ya que en algunas superficies que no son de cuerpo negro dependerá del ángulo θ .

Como la intensidad de la radiación de cuerpo negro es difusa, la radiación interceptada por una área dA_N en un hemisferio colocado sobre dA_S , variará únicamente con el tamaño de dA_S visto por un observador situado sobre el hemisferio. Esto se conoce como Ley de Lambert del Coseno.

3.4 Impulso y Presión de la Energía Radiante.

Considérese una cavidad vacía cuyas paredes tengan una temperatura uniforme. Algunos de los átomos que forman las paredes sólidas, se encontrarán en unos estados electrónicos excitados, de los cuales, pueden pasar a un estado normal o fundamental, cediendo energía radiante.

Estos fotones atraviesan la cavidad, chocan contra la pared opuesta y pueden ser absorbidos por otros átomos, los cuales al recibir energía, pasan a un estado excitado. La emisión y absorción se realiza de manera continua, lo que permite considerar que la cavidad se encuentre llena de energía radiante.

Al chocar los fotones contra la pared, le comunican un impulso, los que en conjunto dan lugar a una "presión de radiación"; de tal forma que para los vuelos interplanetarios, se ha propuesto utilizar "velas solares", destinadas al aprovechamiento de la presión de radiación solar. La relación que existe entre el valor de la presión de la radiación

y la energía radiante por unidad de volumen puede determinarse mediante la teoría electromagnética, pero también puede llegarse al mismo resultado, empleando la teoría cinética.

En el modelo cinético de un gas monoatómico, se considerará que todas las partículas se comportan al chocar contra las paredes, como si fueran esferas indeformables y que la única energía presente, es la debida al movimiento de translación de los átomos. (Véase Fig. 3.5)

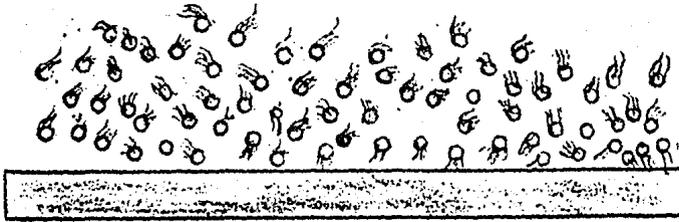


FIGURA 3.5 Colisiones de fotones con una pared.

Si N es el número de fotones emitidos por unidad de volumen, m la masa de la partícula, \bar{v} la velocidad total y P la presión de radiación que viene dada por:

$$P = \frac{1}{3} \frac{Nm}{g_c} (\bar{v})^2 \quad (3.17)$$

Donde: g_c = aceleración de la gravedad

Los fotones se mueven a la velocidad de la luz c ; siendo la cantidad de movimiento de cada uno de ellos p , teniendo una energía cp .

Por lo tanto, la energía por unidad de volumen es:

$$e = Ncp \quad (3.18)$$

La contribución de un fotón reflejado a la presión de radiación se puede suponer que es igual a la debida a un fotón absorbido más la asociada a otro que se emite.

Siguiendo la misma línea argumental utilizada en el establecimiento de las ecuaciones (3.17) y (3.18), se encuentra que la presión de radiación P viene dada por:

$$P = \frac{1}{3} Ncp = \frac{1}{3} \mathbf{e} \quad (3.19)$$

3.5 Densidad de Radiación.

Siguiendo con la "teoría clásica de la termodinámica", la energía radiante podría ser emitida en un espectro continuo de frecuencias, de tal modo que $\rho(\nu)$ representa la densidad del campo de radiación, que se define como:

$$\rho(\nu) = \frac{\partial e}{\partial \nu} \quad (3.20)$$

Donde: e = energía por unidad de volumen, ρ depende de ν que es la frecuencia, y de la temperatura T y puesto que la densidad de energía posee componentes de todas las frecuencias e_ν estará dada por la expresión:

$$e(\nu) = \int_0^\infty \rho(\nu) d\nu \quad (3.21)$$

Por otro lado, el hecho de que $\rho(\nu)$ sea independiente de la naturaleza de las paredes del cuerpo negro, permitiendo modelarlas por un conjunto de osciladores de campo.

Llegándose a una expresión que relaciona la energía media de un oscilador de frecuencia ν con la densidad espectral de equilibrio a la temperatura T ó sea:

$$\rho(\nu, T) = \frac{\nu^2}{\pi^2 c^3} e^{-T(\nu)} \quad (3.22)$$

Para un sistema en equilibrio, donde todos los osciladores retienen la misma energía, independientemente de la frecuencia, se puede sustituir a $e^{-T(\nu)}$ igualando las variables $e = e^{-T(\nu)}$

donde \bar{e} es el promedio temporal de energía por partícula y está dado por la expresión. $\bar{e} = kT$ (3.23)

al sustituir \bar{e} por un valor anterior en $\rho(\nu)$ se obtiene - que:

$$\rho(\nu) = \frac{\nu^2 kT}{\pi^2 c^3} \quad (3.24)$$

k = constante de Boltzman

Para la definición de $\rho(\nu)$ por la ecuación (3.24) conocida como la fórmula de Rayleigh-Jeans, los datos obtenidos experimentalmente, concordaron únicamente para frecuencias pequeñas equivalentes a longitudes de onda de $\lambda > 600 \text{ \AA}$

Sin embargo, surge una contradicción al calcular la energía $e(\nu)$ con la expresión (3.18) (Sec.3.4) - al hacer la sustitución de $e(\nu)$ por $\frac{\nu^2 kT}{\pi^2 c^3}$ resultando:

resultando:
$$e(\nu) = \int_0^{\infty} \frac{\nu^3}{\pi^2 c^3} kT d\nu = \infty \quad (3.25)$$

Este resultado es contradictorio con la ley de Stefan-Boltzmann, como se observará más adelante. (Sección 3)

Wien derivó una ecuación para explicar la emisión de la energía radiante de un cuerpo negro que a continuación se expresa:

$$\frac{i_{\lambda b}(\lambda, T)}{T^5} = \frac{2c}{(\lambda T)^5} e^{-c_2/\lambda T} \quad (3.26)$$

El término $e^{-c_2/\lambda T}$ toma valores mucho mayores que la unidad dicha ecuación se aproxima al 1% cuando $\lambda T < 5400 [\mu \cdot \text{°K}]$

Expandiendo el término $e^{c_2/\lambda T} - 1$ en una serie se obtiene:

$$e^{c_2/\lambda T} - 1 = 1 + \frac{c_2}{\lambda T} + \frac{1}{2!} \left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^3 + \dots - 1$$

Para $\lambda \gg c_2/T$ la serie puede aproximarse por el término simple $\frac{c_2}{\lambda T}$ se llega a obtener:

$$\frac{j'(\lambda, T)}{T^5} = \frac{2C_1}{C_2} \frac{1}{(\lambda T)^5} \quad (3.27)$$

Que es la fórmula de Rayleigh-Jeans cuya precisión es del orden del 1% cuando $\lambda T > 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ K}$

3.6 Distribución Espectral de la Energía Radiante.

Planck planteó la hipótesis de que los osciladores en equilibrio contienen energía únicamente en cantidades que son múltiplos enteros de un valor mínimo e_0 , de tal modo que el valor de la energía es $e_{b\lambda/\nu} = ne_0$ para $n=0, 1, 2, 3, \dots$ y e_0 puede depender de la frecuencia pero no de la temperatura. Así al calcular la energía de los osciladores a partir de dicha hipótesis se obtiene el valor medio.

$$e_b = \frac{e_0}{e^{e_0/kT} - 1} \quad (3.28)$$

Para cada oscilador de modo que al sustituir

$$e_b = kT = \frac{e_0}{e^{e_0/kT} - 1} \quad (3.29)$$

Se obtiene el valor

$$e_{b\lambda} = \frac{\nu^2}{\pi^2 c^2} \frac{e_0}{e^{e_0/kT} - 1} \quad (3.30)$$

Planck escribió el resultado de manera que e_0 dependiera de ν_0 ó sea $e_0 = h\nu_0$.

Al sustituir estos valores se obtiene:

$$e_{b\lambda}^{(8)} = \frac{\nu^2}{\pi^2 c^2} \frac{h\nu_0}{e^{h\nu_0/kT} - 1}$$

La cantidad $e_{b\nu}(\nu)$ representa la potencia emisiva espectral que emite un cuerpo negro en el rango de frecuencias $d\nu$ o bien representa la potencia emisiva por unidad de frecuencias en torno a ν .
La forma explícita de $e_{b\nu}(\nu)$ está dada por ecuación.

$$e_{b\nu} = \frac{2\pi h \nu^3 h^3}{c^2 (e^{h\nu/kT} - 1)} \quad (3.32)$$

donde: T = Temperatura absoluta

e = base de los logaritmos neperianos

El poder de emisión de un cuerpo negro a la longitud de onda λ , $E_{\lambda b}(T)$ representa la cantidad de energía radiante emitida en todas direcciones del espacio hemisférico por un cuerpo negro a la temperatura T, por unidad de superficie, por unidad de tiempo y por unidad de longitud de onda.

En algunas aplicaciones de ingeniería se emplea el "flujo emisivo espectral de cuerpo negro" ó "potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro" en el intervalo de longitudes de onda $d\lambda$ denominada como "radiocidad" $E_{\lambda b}(T)d\lambda = J_\lambda$

La distribución de la "densidad de radiación" $E_{\lambda d\lambda}$ (energía por unidad de volumen), en el intervalo de longitud de onda desde λ hasta $\lambda+d\lambda$ es expresada mediante la ecuación

$$E_{\lambda b}(T) = \frac{8hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda T} - 1} \quad (3.33)$$

Donde $\frac{hc}{\lambda T}$ = energía del fotón de longitud de onda

Mediante la segunda ley de Termodinámica, Planck demostró que existe una cantidad máxima de intensidad de radiación

ción espectral que puede emitir un cuerpo negro $\lambda_b(T)$ a una temperatura dada así como a una longitud de onda, mediante la ecuación:

$$\lambda_b = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda T} - 1)} = \frac{C_1/\pi}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (3.34)$$

donde:

$$C_1 = 2\pi^5 c^2 h = 3.742 \times 10^8 \left[\frac{\text{W} \cdot \mu\text{m}^4}{\text{m}^2} \right] = 187 \times 10^8 \left[\frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2 \cdot \text{hr}} \right]$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = 1.4387 \times 10^4 \left[\mu\text{m} \cdot \text{K} \right] = 1.4387 \left[\text{cm} \cdot \text{K} \right]$$

Puesto que $\lambda_b(T)$ es independiente de la dirección, el flujo emisor espectral de un cuerpo negro será:

$$e_{\lambda_b}(T) = \pi \lambda_b^2(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right] \left[\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot \mu\text{m}} \right]$$

La figura 3.6 ilustra en un diagrama el flujo emisor de un cuerpo negro en función de la longitud de onda dada, la energía radiante emitida por un cuerpo negro aumenta conforme se incrementa su temperatura absoluta.

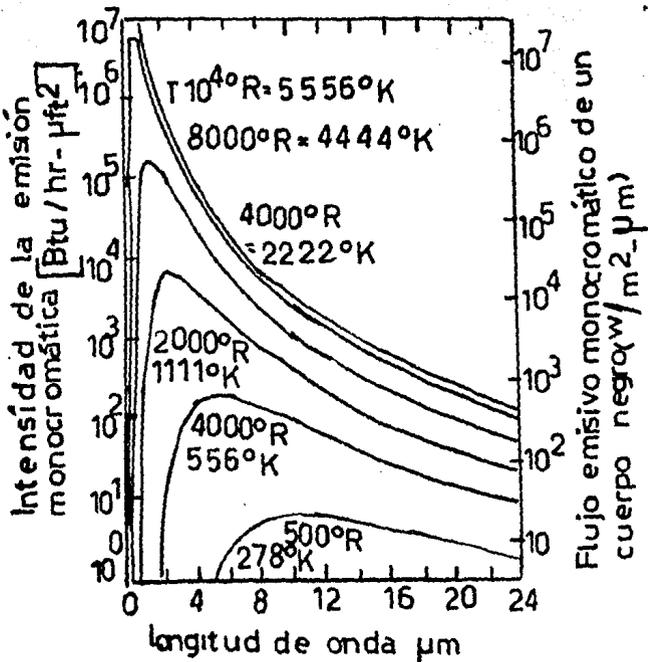


Figura 3.6 Intensidad de radiación monocromática para un cuerpo caliente a diferentes temperaturas.

longitud de onda del extremo más corto del espectro se incrementa más rápidamente con la temperatura que la energía a longitudes de onda más larga.

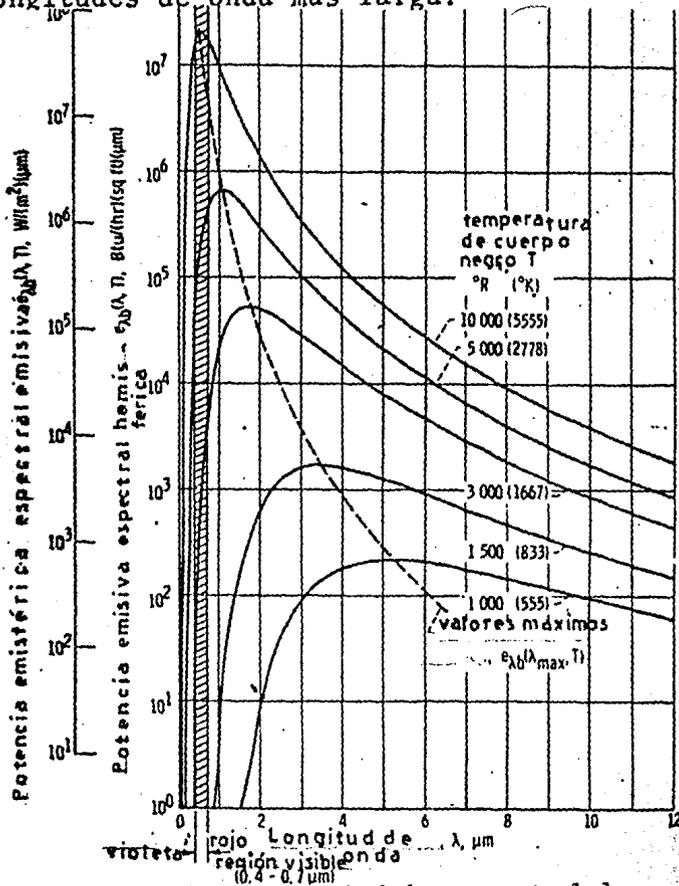


Figura 3.7 Potencia emisiva espectral de cuerpo negro para diversas temperaturas.

La posición del rango de longitudes de onda incluidos en el espectro visible está incluido en la Fig. (3.7). Para un cuerpo a $1000\text{R} = 282.405^\circ\text{C} = 555.555^\circ\text{K}$ solo una pequeña cantidad de energía se encuentra en la región visible y no será suficiente para poder ser detectada por el ojo humano.

La ecuación (3.35) es conocida como distribución espectral de la potencia emisiva. Cuando la radiación encontrada en un medio donde la velocidad de la luz no se aproxima a c_0 , la ecuación (3.35) debe modificarse mediante la introducción del índice de refracción como factor.

Procediendo bajo la suposición de que n es independiente de la longitud de onda se sigue de la ecuación (3.35)

$$e_{b\lambda}(\lambda) = \frac{2\pi h_0^2}{n^2 \lambda^5 (e^{hc_0/n\lambda kT} - 1)} = \frac{C_1}{n^2 \lambda^5 (e^{C_2/n\lambda T} - 1)} \quad (3.36)$$

Donde

$$k = \text{constante de Boltzmann} = 1.38 \times 10^{-23} \left[\frac{\text{Joules}}{\text{°K}} \right] = 1.38 \times 10^6 \left[\frac{\text{erg}}{\text{°K}} \right]$$

En términos del número de onda, se tiene:

$$\eta = \frac{1}{\lambda}$$

diferenciando

$$d\eta = -\frac{1}{\lambda^2} d\lambda \quad (3.37)$$

que sustituyendo en la ecuación (3.36) se obtiene

$$e_{\lambda b}(\lambda) d\lambda = \frac{-2\pi C_1 \eta^3 d\eta}{(e^{C_2 \eta T} - 1)} = e_{\eta}(\eta) d\eta \quad (3.38)$$

la cantidad $e_{\eta}(\eta) d\eta$ representa la potencia emisiva por unidad de número de onda en torno a η .

Para realizar la transformación de la ecuación (3.36), quedando esta en función de la frecuencia se utiliza la ecuación:

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \quad (\text{vacío})$$

diferenciando la se obtiene:

$$d\lambda = -\left(\frac{c_0}{\nu^2}\right) d\nu \quad (3.39)$$

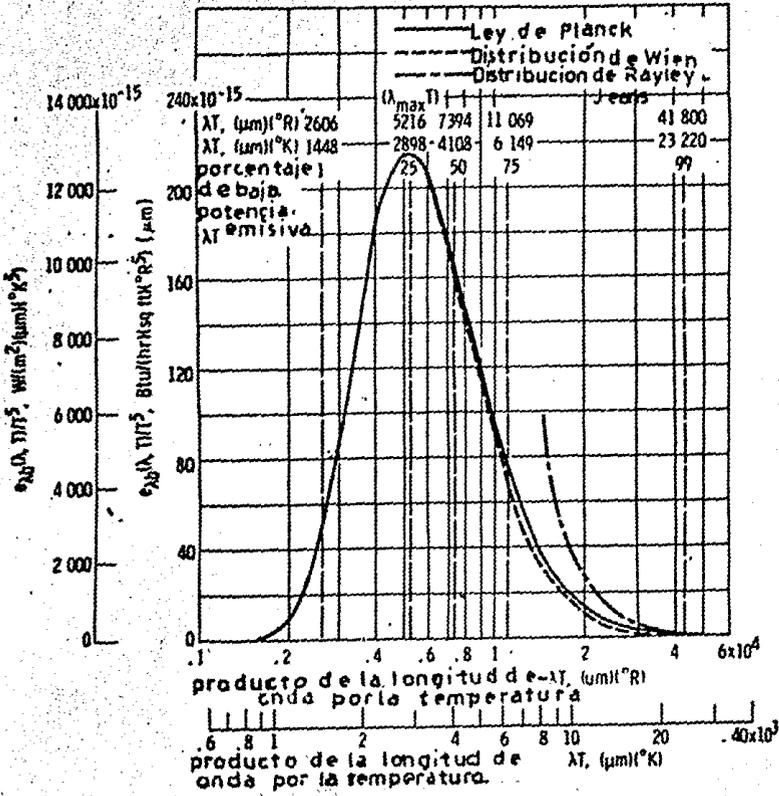


Figura 3.8 Distribución espectral de la potencia emisiva hemisférica de cuerpo negro.

La figura 3.8 ilustra las distribuciones espectrales de la energía radiante de Planck, Wien y Rayleigh-Jeans.

La potencia emisiva espectral o monocromática de un cuerpo negro, en el intervalo de longitud de onda $d\lambda$ llega-

$$e_{\lambda b}(\lambda)d\lambda = \frac{-2\pi^2 C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} = \frac{-2\pi^2 C_1 \nu^3 d\nu}{C_0^4 (e^{2\pi c_2/T} - 1)} = -e(\nu)d\nu \quad (3.40)$$

De la ecuación de Planck, es posible calcular la cantidad de energía emitida, ó potencia radiante de un cuerpo negro para una longitud de onda; esto es J_λ como una función de la longitud de onda para cualquier temperatura específica. Ya que J_λ está relacionada con $e_{b\lambda}$ mediante

$$J_\lambda = \frac{C}{4} e_{b,\lambda}(\lambda) \left[\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \mu\text{m}} \right] \quad (3.41)$$

3.7 Curvas de espectrorradiometría.

La Fig. (3.7), ilustra las implicaciones de la ecuación (3.35), donde la potencia emisiva hemisférica espectral está dada como una función de la longitud de onda para diversos valores de la temperatura absoluta. Una característica evidente consiste en que la energía emitida en todas las longitudes de onda se incrementa conforme la temperatura. Las curvas muestran que esto es válido para la energía a cada longitud de onda.

Otra característica consiste en que la máxima potencia emisiva espectral varía con una tendencia hacia una menor longitud de onda conforme la temperatura se incrementa. La línea punteada de la Fig. (3.7), ilustra la variación de la energía radiante en función de la temperatura absoluta. De lo anterior, se puede observar que la energía emitida a la-

Para temperaturas menores de $1200^{\circ}\text{F} = 648.888^{\circ}\text{C}$, únicamente una cantidad muy pequeña de la energía total queda -- dentro de este dominio de longitudes de onda.

A cantidades más altas de temperatura, la cantidad de energía radiante dentro del dominio visible aumenta, y el ojo humano comienza a registrar la radiación, la sensación que se produce en la retina y se transmite al nervio óptico depende de la temperatura; fenómeno que aún se emplea para estimar las temperaturas de los metales durante el tratamiento térmico.

A temperaturas del orden de $1300^{\circ}\text{F} = 704.444^{\circ}\text{C}$, se emite una cantidad de energía radiante suficiente para ser -- observada, a longitudes de onda entre 0.6 y $0.7\mu\text{m}$ y un objeto a tal temperatura resplandece con un color rojo opaco -- siendo este efecto, el primer signo visible del incremento de temperatura.

El desplazamiento en el punto máximo de la curva de radiación explica el cambio de color de un cuerpo cuando este se calienta.

Puesto que las pendientes de las curvas de temperatura decaen desde la porción rojo del espectro hasta el violeta, la luz roja llega a ser visible primero conforme la temperatura se ha elevado (1)

(1) Esto ocurre en el llamado "punto Daper" de $977^{\circ}\text{F} = 525^{\circ}\text{C}$ en el cual, la luz roja primeramente se torna visible debido al calentamiento de un objeto cuyo medio circundante es oscuro.

A temperaturas más elevadas, que se llevan a cabo en el rango de longitudes de onda incluidos en el espectro visible, la energía radiante emitida se torna amarillo brillante y finalmente blanco a los $2400^{\circ}\text{F} = 704.44^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, siendo esta última una fusión de aquella radiación cuyas longitudes de onda pertenecen al espectro visible.

Para que el filamento de una lámpara incandescente opere eficientemente, la temperatura de éste deberá ser elevada, - de lo contrario, la mayoría de la energía eléctrica se disiparía en forma de radiación infrarroja en lugar de radiación visible.

La mayoría de las lámparas con filamento de tungsteno, operan a una temperatura aproximada de $5400^{\circ}\text{R} = 3000^{\circ}\text{K} = 2726.85^{\circ}\text{C}$ proporcionando de esta forma una mayor cantidad de su energía en el rango infrarrojo, limitándose su cantidad de vaporización del filamento a este valor aproximado. El sol emite un espectro similar al de un cuerpo negro a una temperatura aproximada de $10400^{\circ}\text{R} = 777.777^{\circ}\text{K} = 504.6277^{\circ}\text{C}$, llevándose a cabo la emisión de energía radiante en la región del espectro visible.

Esto puede ser, debido a que la evolución del ser humano a causado que su visión sea más sensible en la región espectral de mayor energía. Si el ojo humano fuese sensible - en otras regiones, (por ejemplo el infrarrojo, de manera que se pudieran observar imágenes térmicas en la oscuridad), -- entonces, la definición establecida de región visible del espectro cambiaría. Si el hombre encuentra vida en otros sistemas planetarios que tuviesen un sol con una temperatura --

efectiva, distinta a la de éste, sería interesante descubrir que rango de longitudes de onda abarcaría el espectro visible de aquellos seres que ahí habitasen.

La ecuación (3.35), puede ser escrita en una forma más conveniente, para eliminar la necesidad de proveer una curva separada para cada valor de T. Esto se puede hacer, dividiéndola entre la temperatura elevada a la quinta potencia para dar:

$$\frac{e_{b\lambda}(\lambda, T)}{T^5} = \frac{\pi^2 i_{\lambda b}(\lambda, T)}{T^5} = \frac{2\pi^5 C_1}{15 (\lambda T)^5 \pi^5 (e^{\lambda T} - 1)} \quad (3.42)$$

Esta ecuación, da la cantidad $e_{\lambda b}(\lambda, T)/T^5$ en términos de una sola variable λT . Una gráfica de esta relación, se encuentra ilustrada en la Fig. (3.8) y reemplaza las curvas múltiples de la Fig. (3.7)

Una captación de estos valores, es presentada en la tabla 3.1

TABLA 3.1 CONSTANTES DE RADIACION

Símbolo	Definición	Valor
C_1	Constante en la distribución de la energía radiante de Planck en: (W) (cm ²); (Btu) (m ⁴)/(h) (pie ²)	0.59544×10^{-12} ; 0.18892×10^8
C_2	Constante en la distribución espectral de la energía (cm) (K); (m) (° R)	1.4388; 25,898
C_3	Constante en la ley del desplazamiento de Wien, (cm) (K); () (°R)	0.28978; 5216.0

3.8 Ley del Desplazamiento de Wien.

Otra cantidad de interés relacionada con el espectro emisor del cuerpo negro, es la longitud de onda $\lambda_{\text{máx}}$, a la cual la potencia emisiva $e_{\lambda b}(\lambda)$ es máxima para una temperatura dada.

Este valor de $\lambda_{\text{máx}} T$, puede encontrarse en el pico o cresta, ó sean el valor máximo de la curva de distribución dada en la Fig. 3.8

Alternativamente, puede encontrarse analíticamente diferenciando la distribución de Planck a partir de la ecuación (3.42), y haciendo que el término izquierdo sea igual a cero.

Así; de la ecuación de Planck, Ec. (3.8)

$$\begin{aligned}
 de_{\lambda} &= d \left\{ \frac{C_1 \lambda^{-5}}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)} \right\} = 0 \\
 (-5C_1 \lambda_{\text{máx}}^{-5}) (e^{c_2/\lambda_{\text{máx}} T} - 1) + C_1 \lambda_{\text{máx}}^{-5} (e^{c_2/\lambda_{\text{máx}} T} C_2 \lambda_{\text{máx}}^{-1} T) &= 0 \\
 (-5 + C_2 / \lambda_{\text{máx}} T) e^{c_2/\lambda_{\text{máx}} T} + 5 &= 0
 \end{aligned} \tag{3.43}$$

Esto proporciona mediante pruebas y errores la ecuación trascendental

$$\lambda_{\text{máx}} T = \frac{C_2}{5} \frac{1}{1 - e^{-\frac{C_2}{\lambda_{\text{máx}} T}}} \tag{3.44}$$

La solución de esta ecuación es de la forma

$$\lambda_{\text{máx}} T = C_3 \tag{3.45}$$

Que es la conocida expresión de la ley del desplazamiento de Wien.

Wien postuló que el producto de la longitud de onda del valor máximo de la intensidad de radiación monocromática y la temperatura absoluta es una constante.

La longitud de onda a que el poder de emisión monocromático tiene un máximo y se desplaza hacia longitudes de onda más cortas.

3.9 Ley de Stefan-Boltzmann.

Esta ley establece que la energía emitida por una superficie, por unidad de tiempo y por unidad de área es proporcional a la temperatura absoluta a la cuarta potencia, de acuerdo con la fórmula:

$$e_b(T) = \sigma T^4 \quad (3.46)$$

La potencia emisiva total (hemisférica), determinada a partir de esta ecuación, representa la energía radiante total, emitida por un cuerpo negro en forma difusa, (en todas direcciones) de un hemisferio; por unidad de tiempo sobre todo el espectro.

La dependencia de la energía interna de una sustancia-comprensible, simple $e=e(T,V)$, con el volumen a temperatura constante en función solamente de las propiedades termodinámicas mensurables T,P,V , viene dada por una de las relaciones de Maxwell que a continuación se escribe:

$$\left(\frac{de}{av}\right)_T = T \frac{aP}{aT} - P \quad (3.47)$$

De las ecuaciones (3.30) y (3.47), escritas en forma extensiva teniendo en cuenta que en el caso de la radiación

$$e_b(T) = eV \quad (3.48)$$

Se obtiene:
$$e_b(T) = \frac{T}{3} \frac{de_b(T)}{dT} - \frac{1}{3} e_b(T) \quad (3.49)$$

Transfiriendo términos:

$$\frac{de_b(T)}{e_b(T)} = 4 \frac{dT}{T} \quad (3.50)$$

Que integrando da:

$$e_b(T) = \ln T^4 + \ln \sigma \quad (3.51)$$

$$e_b(T) = \sigma T^4 \quad (3.52)$$

Siendo σ una constante universal que no depende de las paredes del cuerpo. La constante σ llamada constante de Stefan-Boltzmann, tiene un valor determinado "empíricamente" de $\sigma = 5.67 \times 10^{-15}$ (ergs/m² · °K⁴)

La ecuación (3.52) constituye la conocida ley de Stefan-Boltzmann, la cual dice que la velocidad de emisión de energía térmica radiante es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo negro.

El número de átomos que se encuentran en estado excitados depende principalmente de la temperatura y virtualmente es independiente de la densidad por consiguiente, es posible suponer que la energía emitida por unidad de volumen sea función solamente de la temperatura.

$$e_b = e_b(T) \quad (3.53)$$

Es necesario emplear, la forma extensiva porque la masa de un sistema de fotones no se conserva.

la ecuación (3.40) puede aplicarse para sumar toda la energía por integración del área bajo la curva a temperatura constante desde $\lambda = 0$ hasta $\lambda = \infty$ obteniéndose:

$$e(T) = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} e_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} 2\pi \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (3.54)$$

donde: $e_{\lambda}(\lambda)$ es la potencia emisiva espectral, (ó monocromática), de la radiación del cuerpo negro.

Para llevar a cabo la integración se hace el siguiente cambio variable.

$$\lambda = C_2/\lambda T \longrightarrow \lambda = C_2/\lambda T \quad (3.55)$$

que diferenciado se obtiene:

$$d\lambda = -\left(\frac{C_2}{T\lambda^2}\right) d\lambda \quad (3.56)$$

sustituyendo la ecuación (3.56) en la ecuación (3.54), se llega a:

$$e_b(T) = \frac{C_1 T^4}{C_2^4} \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \lambda^3 (e^{\lambda} - 1)^{-1} d\lambda \quad (3.57)$$

Desarrollando el término $(e^{\lambda} - 1)^{-1} d\lambda$ y sustituyendo en (3.57), se obtiene:

$$e_b(T) = \frac{C_1}{C_2^4} T^4 \times 6.44 \quad (3.58)$$

donde C_1 y C_2 se evalúan conforme el sistema de unidades que se seleccione, llegando a la siguiente expresión:

$$e_b(T) = 5.6697 \times 10^{-8} T^4 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right] = 1.714 \times 10^{-8} T^4 \left[\frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot \text{R}^4} \right]$$

Por otra parte, si se sustituye la Ec. (3.57) en la Ec. (3.52) se tiene: $e(T) = \sigma T^4$ (3.61)

donde nuevamente se asume que el índice de refracción del medio limitante es independiente de la frecuencia.

La integral definida que aparece en esta ecuación tiene-

valor de:

$$\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} x^3 / e^{x-1} dx = \frac{\pi^4}{15} \quad (3.62)$$

sustituyendo la Ec. (3.62) en la Ec. (3.61)

$$e_b(T) = n^2 \left(\frac{2\pi k^4}{15 C_0^2 n^3} \right) T^4 \cdot \left(\frac{\pi^4}{15} \right) \quad (3.63)$$

$$e_b(T) = n^2 T^4 \frac{2\pi^5 k^4}{15 C_0^2 n^3} = n^2 \sigma T^4 \quad (3.64)$$

donde:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 C_0^2 n^3}$$

$$\sigma = 5.6699 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{ergs}}{\text{seg}(\text{cm})^2(^{\circ}\text{K})^4} \right] = 1.36 \times 10^{-2} \left[\frac{\text{cal}}{\text{seg}(\text{cm}^2)^{\circ}\text{K}} \right]$$

Por medio de la Ec. (3.31) puede análogamente ser integrada en todo el espectro para obtener.

$$e_b(T) = \int_0^{\infty} e_{b\gamma}(\gamma) d\gamma = \int_0^{\infty} \frac{\gamma^2}{\pi^2 e^3} \frac{h\gamma}{e^{h\gamma/kT}} d\gamma \quad (3.65)$$

$$e_b(T) = \frac{\pi^2 k^4}{15 C^3 h^3} T^4 \quad (3.66)$$

El resultado es consistente con la Ley de Stefan-Boltzmann donde:

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{15 C^3 h^3} \quad (3.67)$$

3.10 Emisión y Absorción de Energía Térmica Radiante en Superficies Reales.

En el análisis del intercambio de calor por radiación - entre superficies es muy importante la energía radiante que se emite o se absorbe por una superficie, ya que la radiación térmica es un proceso que se lleva a cabo a través de la superficie. La energía radiante que proviene del interior de un cuerpo fluye a través de la superficie y la que incide penetra hacia un medio donde se atenúa gradualmente.

En algunas publicaciones, se utilizan los términos emisividad, absorptividad y reflexividad para caracterizar las propiedades de la energía radiante de una superficie ideal - (es decir, aquellas que son ópticamente lisas y perfectamente incontaminadas), y se emplean los términos de reflectancia, absorptancia y emitancia para caracterizar las propiedades de la energía radiante de las superficies reales.

Cuando sobre un cuerpo semitransparente de espesor finito to incide energía radiante, se cumple la ecuación:

$$\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (3.68)$$

donde:

- α_{λ} = absorptividad espectral
- β_{λ} = reflectividad espectral
- τ_{λ} = transmisividad espectral

Cuando se considera el valor medio de las propiedades radiantes sobre todas las longitudes de onda, se puede escri

bir esta relación como:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.69)$$

donde:

- α = absorptividad
- ρ = reflexividad
- τ = transmisividad

Las magnitudes relativas α , ρ y τ de un material (semi-transparente), dependen de:

- a) Condiciones de la superficie, como son el acabado y la temperatura.
- b) Longitud de onda de la energía radiante.
- c) Composición del material
- d) Espesor del cuerpo; puesto que la energía radiante (incidente penetra a éste).
- e) Propiedades geométricas del cuerpo.

Los gases reflejan en muy poca proporción la energía térmica, esto trae como consecuencia, que pueda despreciarse a ρ en una mayoría de problemas.

$$\alpha + \tau = 1 \quad (3.70)$$

La transmitancia de un líquido depende grandemente de su densidad.

Los sólidos y líquidos son generalmente opacos en la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería, considerándose que $\tau = 0$, por lo que la ecuación anterior queda:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3.70)$$

Luego si se conoce ρ se conoce también α y viceversa.

Absorción de la Energía Radiante.

Cuando una porción grande de la energía radiante incidente se atenúa a una distancia muy pequeña de la superficie, se dice que la energía radiante ha sido absorbida. Por ejemplo la radiación térmica que incide sobre una superficie metálica, recorre apenas unos pocos centenares de angstroms -- antes de absorberse por completo.

Así es como la mayoría de los materiales sólidos que se encuentran en la práctica, absorben prácticamente toda la radiación en una delgada capa superficial menor a $1.27\text{mm}=0.05$ Pulg. de espesor. Considérese que sobre un elemento de superficie real y opaca, incide un haz de energía radiante. Parte de la energía radiante se refleja y el resto lo absorbe la superficie.

El flujo de calor radiante espectral que incide sobre la superficie esta dado por la relación:

$$Q_{\lambda} = \int_{\Omega} i'_{\lambda b}(\omega) \cos \theta \, d\theta \left\{ \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo} \times \text{área} \times \text{long. de onda}} \right\} \quad (3.71)$$

donde:

θ = ángulo polar formado entre la dirección de la energía radiante y la normal a la superficie.

$i'_{\lambda b}(\omega)$ = intensidad de la radiación espectral que incide sobre la superficie.

La fracción de la energía incidente Q_{λ} que es absorbi

da se define como "absortividad espectral direccional" - -
 $\alpha_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$ que además de depender de la longitud de -
 onda y la dirección es una función de la temperatura de la
 superficie absorbente.

La cantidad de energía incidente que es absorbida, se
 designa por $Q_{\lambda,a}$. La relación está formada de la siguiente
 manera:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) = \frac{\text{energía radiante absorbida}}{Q} / \text{tiempo} \times \text{área} \times \frac{\text{longitud}}{\text{de onda}}$$

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) = \frac{Q_{\lambda,a}}{Q_{\lambda,i}} \quad (3.72)$$

donde

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) = \text{absortividad}$$

$Q_{\lambda,i}$ = energía radiante incidente por unidad de tiempo en la
 dirección (β, θ) , en el intervalo de longitud de onda $d\lambda$ y
 está dada por la ecuación:

$$Q_{\lambda,i}(\beta, \theta) = \dot{i}'_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\omega \cos \beta dA d\lambda \quad (3.73)$$

Sustituyendo la ec. (3.73) en la ec. (3.72) se obtiene:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) = \frac{Q_{\lambda,a}(\lambda, \beta, \theta, T_A)}{\dot{i}'_{\lambda,b,i}(\lambda, \beta, \theta) dA \cos \beta d\omega d\lambda} \quad (3.74)$$

Cuando la energía radiante incidente es emitida desde los --
 alrededores a una temperatura uniforme T_B , se tiene la si -
 guiente ecuación:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) = \frac{Q_{\lambda,a}(\lambda, \beta, \theta, T_A)}{\dot{i}'_{\lambda,b,i}(\lambda, T_B) dA \cos \beta d\omega d\lambda} \quad (3.75)$$

En muchas aplicaciones prácticas de la ingeniería, se utilizan los valores promedios de la absorptividad α , integrados sobre todas las longitudes de onda. Así para la energía radiante incidente se tiene:

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} Q'_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} Q'_{\lambda} d\lambda} \quad (3.76)$$

donde:

α = absorptividad total hemisférica incidente por unidad de tiempo y área en la banda de longitudes de onda

$Q'_{\lambda} d\lambda$ = Energía radiante hemisférica incidente por unidad de tiempo y área en la banda de longitudes de onda $d\lambda$
 $\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} Q'_{\lambda} d\lambda$ = energía radiante total que se absorbe.

La Ec. (3.76) proporciona la fracción de la energía radiante incidente que es absorbida. Es definida como la razón de la potencia emisiva de un cuerpo cualesquiera a la de un cuerpo negro a la misma temperatura.

3.10 Reflexión de la Energía Radiante.

La reflexividad espectral hemisférica ρ_{λ} se define mediante la relación:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\text{energía radiante reflejada} \times \text{área} \times \text{longitud de onda}}{Q_{\lambda}}$$

Se emplea la terminología reflexividad total para designar los valores promedios sobre todas las longitudes de onda.

La reflexividad total hemisférica se define como:

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda} Q'_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} Q'_{\lambda} d\lambda} \quad (3.77)$$

La Ec. (3.77) evalúa la fracción de la energía radiante incidente que es reflejada.

En la mayoría de las aplicaciones de ingeniería se utiliza la reflexividad total hemisférica, tal como se ha definido aunque sin embargo, no se proporciona ninguna información sobre la distribución angular de la energía reflejada. Además en la mayoría de las aplicaciones prácticas no es posible exigir una información tan detallada sobre la reflexión. Se debe, por otra parte, distinguir dos tipos extremos idealizados de reflexión. La "reflexión especular ó angular", si tanto el haz incidente como el reflejado son simétricos con respecto a la normal en el punto de incidencia (el ángulo de incidencia será igual al ángulo de reflexión), de manera como se lleva a cabo en una superficie altamente pulida o lisa como en un espejo. La Fig. (3.9) ilustra dicho efecto.

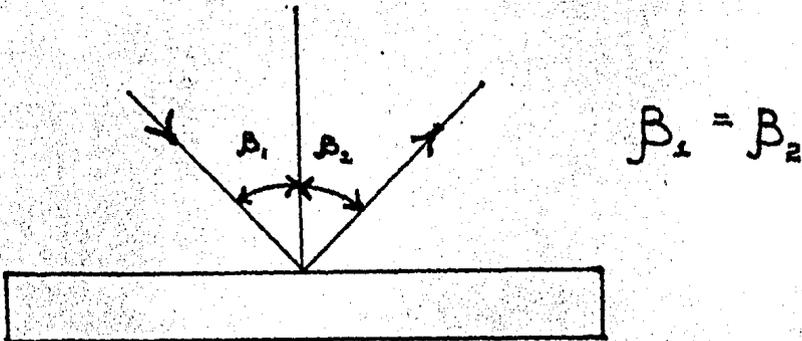


Fig. 3.9 Representación esquemática de la reflexión especular o angular.

Una superficie de reflexión difusa puede definirse como aquella que refleja con la misma distribución espacial de energía que un cuerpo negro. Es decir que la reflexión es "difusa" si la intensidad de radiación reflejada es constan-

te en todos los ángulos de reflexión y es independiente de la dirección de la energía radiante que incide, es decir; - distribuida uniformemente en todas direcciones.

La intensidad de radiación reflejada en forma difusa es constante en todos los ángulos de reflexión además de - independiente de la dirección de la radiación incidente. La Fig.(3.10) ilustra la reflexión difusa de una superficie.

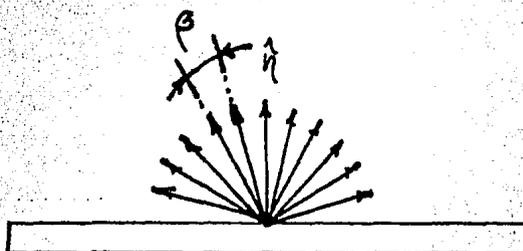


FIGURA 3.10 Representación esquemática de la reflexión difusa.

La magnitud de la energía reflejada en una dirección específica θ es proporcional al coseno de θ , θ es medida - conforme a la normal η .

La reflexión puede considerarse como difusa en muchas si tuaciones prácticas, ya que de esta manera, se simplifican - considerablemente. Así es como muchos materiales utilizados en la industria son "rugosos", debido a que sus superficies - tienen asperezas que son grandes en comparación con una longitud de onda, la reflexión de la energía radiante, a partir de una superficie rugosa, ocurre prácticamente en todas di - recciones.

Las superficies reales que se encuentran en la ingeniería, no son reflectores perfectamente difusos, ni perfecta - mente especulares.

Emisividad de la Energía Radiante.

La potencia emisiva monocromática de una superficie -- real (no negra) será designada por $e'_\lambda (\lambda)$. Esta cantidad puede expresarse en términos de potencia emisiva de un cuerpo negro como:

$$e'_\lambda (\lambda) = \epsilon_\lambda e'_{b\lambda} (a) \quad (3.78)$$

donde: ϵ_λ es la emisividad monocromática hemisférica de la superficie y se define como la razón de la potencia emisiva monocromática de un cuerpo cualquiera a la potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a la misma longitud de onda y temperatura.

Sea $Q_\lambda (T)$ el flujo emisivo espectral, es decir:

$$Q_\lambda (T) = \frac{\text{energía radiante emitida}}{\text{tiempo} \times \text{área} \times \text{longitud de onda}}$$

el cual es emitido por una superficie real a una temperatura absoluta T y $Q_{\lambda b} (T)$ el flujo emisivo espectral de un cuerpo negro a la misma temperatura.

La emisividad hemisférica espectral ϵ_λ de la superficie como:

$$\epsilon_\lambda = \frac{Q_\lambda (T)}{Q_{\lambda b} (T)} \quad (3.79)$$

A partir de la cual, la emisividad es definida como la razón del flujo de energía radiante por una superficie real a la de un cuerpo negro.

La emisividad espectral direccional de un cuerpo a la temperatura T está dado por cociente del flujo emisivo espectral $Q_\lambda (T)$ con el flujo emisivo espectral de cuerpo negro $Q_{\lambda b} (T)$ a la misma temperatura, es decir:

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, \theta, T_A) = \frac{Q_{\lambda}(\lambda, \theta, T_A)}{Q_{\lambda b}(\lambda, \theta, T_A)} = \frac{i'_{\lambda}(\lambda, \theta, T_A)}{i'_{\lambda b}(\lambda, T_A)} \quad (3.80)$$

Para un cuerpo gris se tiene $\epsilon_{\lambda} = \text{constante}$; donde $\epsilon = \epsilon_{\lambda}$ la cual es de fundamentos primordiales debido a la dependencia que guarda hacia la longitud de onda, la dirección y la temperatura.

Para cuerpos opacos, los valores obtenidos experimentalmente de la reflexividad espectral, pueden convertirse a emisividades espectrales por medio de la relación.

$$\epsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad (3.81)$$

Para poder emitir energía, las superficies reales, absorben una porción de la que incida sobre ellas.

Para poder calcular la emisividad total hemisférica en todas las longitudes de onda, es necesario considerar la energía radiante emitida en todas las longitudes de onda, la cual se obtiene, integrando la potencia emisiva direccional-espectral, para esto, se tiene la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \text{POTENCIA EMISIVA DIRECCION TOTAL} &= e(\theta, T_A) \\ &= \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} e_{\lambda}(\lambda, \theta, T_A) d\lambda \end{aligned} \quad (3.82)$$

Por otra parte, la potencia emisiva total direccional de un cuerpo negro, está dada por la siguiente expresión:

$$e_b(\theta, T_A) = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} e_{\lambda b}(\lambda, \theta, T_A) d\lambda = \frac{\sigma T_A^4 \cos^2 \theta}{\pi} \quad (3.83)$$

La emisividad total direccional, (es la razón de: $e(\theta, \theta, T_A)$ para una superficie real a $e_b(\theta, T_A)$), emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura; esto puede expresarse como:

$$\text{emisividad total direccional} = \epsilon(\theta, \theta, T_A) = \frac{e_{\lambda}(\lambda, \theta, T_A)}{e_b(\theta, T_A)} \quad (3.84)$$

Sustituyendo las Ecs. (3.82) y (3.83), en la Ec. (2.84)

$$\epsilon(\beta, \theta, T_A) = \frac{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) d\lambda}{(\sigma T_A^4 / \pi) \cos \theta} \quad (3.85)$$

El término $\epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$, que se encuentra en el numerador, puede reemplazarse por el término $\epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$ utilizando la Ec. (3.85) que conduce a la siguiente relación:

Emisividad total direccional en términos de la emisividad - espectral direccional $\epsilon(\beta, \theta, T_A)$

$$\begin{aligned} \epsilon(\beta, \theta, T_A) &= \frac{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) \epsilon_{\lambda b}(\lambda, \beta, T_A) d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) Q_{\lambda b}(T) d\lambda} \\ \epsilon(\beta, \theta, T_A) &= \frac{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \sigma T_A^4 / \pi \cos \theta \epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) \epsilon_{\lambda b}(\lambda, \beta, T_A) d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} Q_{\lambda b}(T) d\lambda} = \frac{Q(T)}{Q_b(T)} \end{aligned}$$

donde: $Q(T)$ = flujo emisor de la superficie real a temperatura T es decir:

$$\left[\frac{\text{energía radiante}}{\text{tiempo} \times \text{área}} \right]$$

De esta manera, si se conoce una función de la cual $\epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$ es posible obtener $\epsilon(\beta, \theta, T_A)$ mediante una integración de la potencia emisiva promedio de un cuerpo negro. La $\epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$ debe conocerse con suficiente precisión en la región donde $\epsilon_{\lambda b}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$ es grande de manera que si se integra la Ec. (3.86), será lo suficientemente precisa conforme adquiera valores grandes.

3.11 Ley de Kirchhoff.

La absorptividad y emisividad de un cuerpo, se pueden relacionar por esta ley, mediante consideraciones termodinámicas. Ley ley puede tener varias restricciones impuestas sobre ella, si las cantidades son espectrales, totales direccionales o hemisféricas, así como no tomar en cuenta los - -

efectos de polarización, debidos a la variación angular de las propiedades.

Kirchhoff realizó el análisis de la energía térmica radiante, utilizando una cavidad isotérmica de cuerpo negro de grandes dimensiones, en la que se ha hecho un vacío, cuyas paredes sean opacas a la energía térmica radiante en todas las longitudes de onda, tales paredes, se encuentran a una temperatura uniforme T , así como aisladas perfectamente tanto del calor, como del trabajo que parte de los alrededores, como se muestra en la Fig.3.11

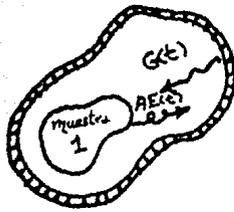


FIGURA 3.11 Intercambio de energía radiante entre una muestra y las paredes internas de un recinto isotérmico.

Si se coloca un pequeño cuerpo infitesimal (1) en su interior, a una temperatura inicial, y se permite que alcance el equilibrio térmico con las paredes de la cavidad, este alcanzará la temperatura de equilibrio posteriormente. Una condición necesaria para el equilibrio, se encuentra implícita en la primera ley de la termodinámica, la cual establece que en ausencia de cualquier otro proceso de transporte de energía, cada elemento de área deberá emitir tanta energía como este absorba, por unidad de tiempo. Durante el proceso mediante el cual se establece como resulta

do una diferencia de temperatura, la energía será transferida desde un cuerpo hasta otro más caliente que si mismo, sin que se produzcan cambios exteriores del sistema bajo consideración. Esto implicaría una violación a la segunda ley de la termodinámica. Por tanto, se concluye que cualesquiera que sea la naturaleza de las paredes, el flujo de energía -- deberá ser el mismo en ambos, lo que implica que la densidad de energía, debe ser la misma. Esto se cumple para cada elemento de volumen dentro de la cavidad, e indica la existencia de una radiación total y homogénea. Kirchhoff, comprobó que tanto la cavidad, como la energía radiante en su interior, constituyen un sistema termodinámico, el cual es independiente del proceso físico, ya sea de emisión o absorción en particular, que se lleva a cabo en las paredes.

En otras palabras, si $i_{b\lambda}$ denota a la intensidad de radiación de un cuerpo negro, entonces $i_{\lambda b}$ es independiente de la dirección.

Sea $Q'_{\lambda i}(T)$ el flujo de calor radiante espectral que emiten las paredes del recinto a temperatura T que incide sobre el cuerpo alojado en el interior de la cavidad a una cierta distancia de las paredes.

El flujo de calor radiante espectral $G_{\lambda}(T)$ es absorbido por el cuerpo a la longitud de onda λ , es:

$$G_{\lambda}(T) = \alpha_{\lambda}(T) Q'_{\lambda i}(T) \quad (3.87)$$

en donde $\alpha_{\lambda}(T)$ es la absorptividad espectral del cuerpo y $Q'_{\lambda i}(T)$ es la irradiación o radiación monocromática, incidente sobre el cuerpo por unidad de área y tiempo. La cantidad $G_{\lambda}(T)$ representa también el flujo radiante espectral emitido por el cuerpo a longitud de onda λ puesto que el cuer-

po está en equilibrio radiante. Nótese que tanto la energía radiante que emiten las paredes perfectamente negras del recinto a temperatura T , como la emisión de las paredes, no afecta, aún cuando el cuerpo que se introduce en el recinto sea negro o no; teniendo en cuenta esto, se tiene que:

$$Q_{\lambda_b}(\tau) = Q_{\lambda}(\tau); E_{\lambda_b}(\tau) = G_{\lambda}(\tau) \quad (3.88)$$

en donde $Q_{\lambda_b}(\tau)$ es el flujo emisivo espectral del cuerpo negro a temperatura T , también llamado potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro a temperatura T .

La Ec. (3.88), estipula que la cantidad de energía emitida por una diferencial de área dA del cuerpo en el intervalo de longitudes de onda λ y $\lambda+d\lambda$ es igual a la cantidad de energía absorbida por dA en el intervalo de longitudes de onda λ y $\lambda+d\lambda$. Esta igualdad, debe mantenerse para cada porción del espectro, porque de no ser así, la parte absorbida no igualaría a la parte emitida, y existiría un aumento o disminución continuo de energía radiante para aquella longitud de onda en particular a expensas de otra longitud de onda, lo que ocasionaría que $E_{\lambda}(\tau)$ aumentará o disminuiría respecto al tiempo.

Dentro de la cavidad, la potencia emisiva monocromática $E_{\lambda}(\tau)$ iguala a la potencia emisiva monocromática de un cuerpo negro. $E_{b\lambda}(\tau)$

De esta manera, se deduce que la energía radiante dentro de una cavidad, es independiente de la naturaleza y forma las paredes, e idéntica a la energía radiante por un cuerpo negro que se encuentra a la misma temperatura del recinto.

Cuando el sistema se encuentra en equilibrio termodinámico, con respecto a sus alrededores, la razón de la potencia emisiva espectral $e_{\lambda}(\tau)$ a la absorptividad espectral es constante e igual a la potencia emisiva monocromática de cuerpo negro a cualquier temperatura, es decir:

$$\frac{e_{\lambda}(\tau)}{\alpha_{\lambda}(\tau)} = e_{b\lambda}(\tau) \quad (3.89)$$

Esta ley es válida, cuando se aplica a consideraciones espectrales direccionales o hemisféricas totales. La mayor importancia de la ley de Kirchhoff, estriba en el hecho de que se establece una propiedad de la energía radiante, la cual es la misma para cualquier clase de la materia.

De las Ecs. (3.87) y (3.88), se puede escribir:

$$\frac{Q_{\lambda}(\tau)}{Q_{\lambda b}(\tau)} = \frac{G_{\lambda}(\tau)}{E_{\lambda b}(\tau)} = \alpha_{\lambda}(\tau) \quad (3.90)$$

Por otra parte, de la definición de emisividad espectral direccional de un cuerpo a la temperatura T , dada por la Ec. (3.80) en la Sección 3.10, al sustituirla con la Ec. (3.90) se tiene:

$$e_{\lambda}(\lambda, \theta, T) = \frac{Q(\lambda, \theta, T)}{Q_{\lambda b}(\lambda, \theta, T)} = \frac{i_{\lambda}(\lambda, \theta, T)}{i_{\lambda b}(\lambda, \theta, T)} \quad (3.80)$$

A pesar de que esta igualdad es una relación fundamentada por las propiedades del material y mantiene la restricción de que una superficie está en equilibrio termodinámico con sus alrededores; es en realidad, una relación general que se aplica a condiciones que no restringen el equilibrio térmico.

Esto trae como consecuencia, el hecho que α_{λ} y e_{λ} sean propiedades superficiales, lo que significa que solo dependen

den de la naturaleza de la superficie y de su temperatura. Por tanto, su magnitud es independiente de si prevalecen o no, las condiciones de equilibrio.

Sin embargo, no se hace ninguna distinción de los efectos direccionales. Se observa a partir de la Ec. (3.91), que es válida únicamente para cada dirección y para cada componente de polarización, además toda la energía radiante debe poseer iguales componentes de polarización.

Ahora supóngase que el cuerpo pequeño 1, es reemplazado por otro cuerpo que tiene el mismo tamaño, forma, posición geométrica y orientación. Denótese este cuerpo por (2); cláramente se observa que la energía que llega a este cuerpo, es la misma que la anterior.

El poder de emisión de energía por unidad de tiempo y de superficie $[Kcal/m^2 h]$ emitido en toda la semiesfera, sobre cada elemento de superficie, se representa por $G(T)$ y la energía radiante que emiten las paredes del recinto e incide sobre la unidad de superficie del cuerpo más pequeño, colocado en el interior del recinto, es representada por $G(T)$. Es decir, la rapidéz con que la energía radiante emitida por las paredes incide en cada cuerpo pequeño.

Si los cuerpos tienen una absorptividad α_1 y α_2 respectivamente, los balances de energía bajo condiciones de estado establece, tendrán la forma:

$$G(T)A_1 \alpha_1(T) = A_1 E_1(T) \quad (3.92)$$

$$G(T)A_2 \alpha_2(T) = A_2 E_2(T) \quad (3.93)$$

de donde:

$$G(\tau) = \frac{E_1(\tau)}{\varphi_1(\tau)} = \frac{E_2(\tau)}{\varphi_2(\tau)} \quad (3.94)$$

y consecuentemente para cualquier cuerpo arbitrario a cualquier temperatura se tiene:

$$\varphi(\tau) = \frac{E(\tau)}{G(\tau)} = \epsilon(\tau) \quad (3.95)$$

Esta ecuación estipula que la emisividad hemisférica total de un cuerpo es igual a la absortividad total hemisférica. Esta generalización conocida como Ley de Kirchhoff, - expresa que en equilibrio térmico, la relación entre el poder de emisión de una superficie y su absortividad, es la misma en todos los cuerpos.

La Ec. (3.95), es solo aplicable cuando la energía radiante incidente y la emitida tienen la misma distribución espectral o cuando el cuerpo es gris, es decir, cuando las propiedades radiantes son independientes de la longitud de onda. Como φ no puede ser superior a la unidad, la Ley de Kirchhoff limita el valor máximo de G dependiente únicamente de la temperatura. A cualquier superficie que tiene un poder de emisión igual a este límite superior, se le llama "radiador perfecto". Como tal superficie debe tener una absortividad igual a la unidad y por tanto, un poder reflectante nulo; el radiador perfecto se conoce más comúnmente con el nombre de "cuerpo negro".

Esta conclusión esta basada mediante la observación de como los cuerpos continúan emitiendo energía radiante, aún cuando se encuentran en equilibrio térmico con sus alrededores. La energía total incidente desde una dirección dada, es obtenida integrando la energía incidente sobre todas las longitudes de onda.

De la Ec. (3.73)

$$Q_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) = i_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\omega \cos \beta dA d\lambda \quad (3.73)$$

integrando, se obtiene:

$$\int_0^{\infty} Q_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\lambda = Q_i(\beta, \theta) = \cos \beta dA d\omega \int_0^{\infty} i_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\lambda \quad (3.96)$$

La energía radiante absorbida, es determinada mediante integración de la Ec. (3.75) sobre todas las longitudes de onda, esto es:

De la Ec. (3.75)

$$q_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) d\lambda = \frac{Q_{\lambda,a}(\lambda, \beta, \theta, T_A)}{i'_{\lambda,e}(\lambda, T_b) dA \cos \beta d\omega d\lambda} \quad (3.75)$$

de la cual integrando se llega:

$$\int_0^{\infty} Q_{\lambda,a}(\lambda, \beta, \theta, T_A) d\lambda = Q_a(\beta, \theta, T_A) \quad (3.97)$$

$$Q_a(\beta, \theta, T_A) = \cos \beta dA d\omega \int_0^{\infty} q_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) i'_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\lambda \quad (3.98)$$

Sustituyendo la Ec. (3.97) conduce a la siguiente expresión: absorptividad total direccional $\equiv \alpha(\beta, \theta, T_A)$

$$\alpha(\beta, \theta, T_A) = \frac{Q_a(\beta, \theta, T_A)}{Q_i(\beta, \theta)} = \frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) i'_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\lambda}{\int_0^{\infty} i'_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\lambda} \quad (3.99)$$

utilizando la Ley de Kirchhoff Ec. (3.91), alternadamente -- con la Ec. (3.99)

$$\alpha(\beta, \theta, T_A) = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) i'_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\lambda}{\int_0^{\infty} i'_{\lambda,i}(\lambda, \beta, \theta) d\lambda} \quad (3.100)$$

Para examinar esta igualdad en cantidades direccionales totales, hay que comparar el caso especial de la Ec. (3.100) con la Ec. (3.86)

$$\epsilon(\beta, \theta, T_A) = \frac{\pi \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) i'_{\lambda b}(\lambda, T_A) d\lambda}{\sigma T_A^4} \quad (3.101)$$

Si en la Ec. (3.100), la energía radiante incidente tiene -- una distribución espectral proporcional a aquella de un cuerpo negro a T_A entonces:

$$\epsilon'_{\lambda, i}(\lambda, \beta, \theta) = c(\beta, \theta) i'_{\lambda b}(\lambda, T_A) \quad (3.102)$$

donde c es independiente de la longitud de onda para lo cual se introduce la ecuación:

$$\alpha(\beta, \theta, T_A) = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A) i'_{\lambda b}(\lambda, T_A) d\lambda}{\int_0^{\infty} i'_{\lambda b}(\lambda, T_A) d\lambda (= \sigma T_A^4 / \pi)} = \epsilon(\beta, \theta, T_A) \quad (3.103)$$

Si $\epsilon_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$ y $\alpha_{\lambda}(\lambda, \beta, \theta, T_A)$ no dependen de λ , entonces las propiedades ϵ_{λ} , α_{λ} , ϵ y α serán todas iguales entre sí para la dirección (β, θ) . A toda superficie que presenta dicho comportamiento se le denomina superficie gris direccional. Pueden hacerse algunas aclaraciones y deducciones que son -- muy importantes para la correcta aplicación en el diseño térmico de las propiedades de la energía radiante de diversos tipos de fuentes. Así pueden citarse:

1. La emisividad hemisférica total de un cuerpo es igual a la absorptividad total hemisférica, esto es:

(a) La superficie del cuerpo es gris, lo que significa "la emisividad y la absorptividad no cambian con la longitud de onda", esto implica que la superficie bajo estudio no sea completamente selectiva respecto a sus características espectrales, o (b) la radiación incidente $G_{\lambda T}$, proviene de un cuerpo negro o gris a la misma temperatura del receptor, esto es $T = T_1$ de manera que $G_{\lambda T_1}$, es proporcional a $E_{\lambda T}$. Esta condición corresponde al equilibrio térmico.

2. La absorptividad hemisférica total de una superficie a la temperatura T , es igual a la emisividad hemisférica total de la misma superficie a la temperatura T_2 , si no es una función de la temperatura y si las características espectrales de la energía radiante incidente para la cual ha sido medida la absorptividad corresponden a las de un cuerpo negro como fuente, a T_2 , esto es, $G_{\lambda T_2} = e_{\lambda T_2}$ (3.104) en este caso se tiene:

$$e_{T_2} = \frac{\int_0^{\infty} e_{\lambda T_2} e_{\lambda T_2} d\lambda}{\int_0^{\infty} e_{\lambda T_2} d\lambda} \quad (3.105)$$

$$\alpha_{T_2} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda T} e_{\lambda T_2} d\lambda}{\int_0^{\infty} e_{\lambda T_2} d\lambda} \quad (3.106)$$

si $\alpha_{\lambda T}$ es de temperatura constante, de manera que:

$\alpha_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T_2} = e_{\lambda T_2}$ mediante la aplicación de la Ley de Kirchhoff, se tiene que:

$$\epsilon_{T_2} = \alpha_T \quad (3.107)$$

3. Radiación que es emitida desde una fuente representada por un cuerpo negro (o gris) a temperatura T_i e incide sobre una superficie metálica de temperatura T_s .

Si T_i es lo suficientemente pequeña como para despreciar la energía radiante en el espectro visible y el cercano al infrarrojo, es posible aplicar la teoría electromagnética para evaluar α .

Esta determinación conduce al siguiente resultado:

$$\alpha = \epsilon(\tilde{\tau}) \quad \tilde{\tau} = \sqrt{\tau_i \tau_s} \quad (3.107)$$

4. La energía radiante monocromática local dentro de un medio absorbente, emisor y dispersante, se denotará por J_{λ} .

esta cantidad se le da el término de coeficiente volumétrico de emisión, el cual representa la emisión monocromática local de energía por unidad de tiempo, por unidad de volumen y por unidad de ángulo sólido. El coeficiente de emisión puede ser expresado en términos del coeficiente de absorción K_λ y la función de Planck $e_{b\lambda}(\tau)$ en la siguiente forma:

$$J_\lambda = \frac{K_\lambda}{\rho} e_{b\lambda}(\tau) \quad (3.108)$$

Esta relación resulta de la Ley de Kirchhoff para un medio absorbente, emisor y dispersante en equilibrio termodinámico.

3.12 Intercambio de Energía Térmica Radiante entre Superficies Negras.

Para evaluar el intercambio neto de energía radiante ó flujo de calor radiante entre dos ó más cuerpos, es necesario determinar la fracción de la emisión total de cada una de las superficies radiantes que alcanza y es absorbida por las otras. Si se involucran únicamente superficies negras, toda la radiación incidente es absorbida y únicamente se necesita considerar la relación geométrica entre las superficies participantes.

La Fig. 3.12, muestra las superficies de dos cuerpos negros separados por un medio que no absorbe la energía radiante en forma apreciable, por ejemplo, aire.

Para determinar la fracción de la energía radiante que emite la superficie A, e interacciona con la superfi -

cie dA_1 y dA_2 , asumiéndose que ambas superficies se encuentran emitiendo dicha energía en forma difusa. Si la distancia de las superficies es r , θ , el ángulo polar entre la normal \hat{n}_1 , al elemento de superficie dA_1 y la línea r que une a dA_1 con dA_2 , θ_2 el ángulo polar entre la normal \hat{n}_2 al elemento de superficie dA_2 y la línea

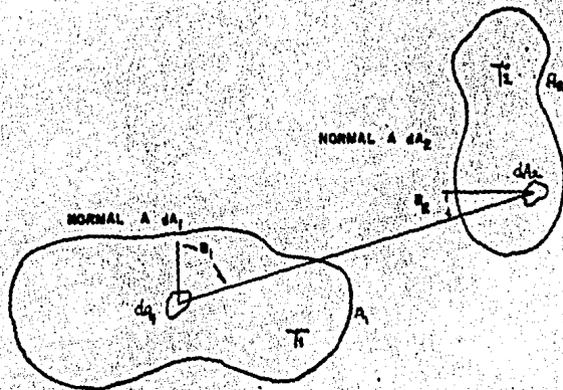


FIGURA 3.12 Coordenadas para la definición del factor de forma.

Sea dQ_{1-2} la rapidéz con la cual dA_2 absorbe la energía radiante emitida por dA_1 , conforme a la Ec. (3.5) se tiene:

$$dQ_{1-2} = \dot{i}'_{b_1}(T) \cos \theta_1 dA_1 d\omega_{1-2} \quad (3.109)$$

Donde:

$\dot{i}'_{b_1}(T)$ = intensidad de radiación emitida por dA_1

$dA_1 \cos \theta_1$ = Proyección del elemento de área dA_1 como vista desde dA_2

$d\omega_{1-2}$ = Angulo sólido subtendido por el área receptora dA_2 con respecto al punto central de dA_1 .

El ángulo sólido $d\omega_{1-2}$, subtendido por dA_1 es igual a la área proyectada de la superficie de recepción en la dirección de la energía radiante dividida entre el cuadrado de la distancia entre dA_1 y dA_2 ; utilizando la nomenclatura de la Fig. 3.12, se tiene:

$$d\omega_{1-2} = \cos \theta_2 \frac{dA_2}{r^2} \quad (3.110)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.12) y (3.110) para $d\omega_{1-2}$ respectivamente, en la Ec. (3.109) se obtiene;

$$dQ_{1-2} = E_{b1} dA_1 \left(\frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_2}{r^2} \right) \quad (3.111)$$

donde el término en paréntesis, representa la fracción de la energía radiante total emitida desde dA_1 , que es interceptada por dA_2 . Por analogía, la fracción de la energía radiante total emitida desde dA_2 que incide en dA_1 es:

$$dQ_{2-1} = E_{b2} dA_2 \left(\frac{\cos \theta_2 \cos \theta_1 dA_1}{r^2} \right) \quad (3.112)$$

De tal manera que la rapidéz neta de transferencia de calor por radiación, entre dA_1 y dA_2 es:

$$dQ_{1-2} = E_{b1} - E_{b2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{r^2} \quad (3.113)$$

Para determinar Q_{1-2} la rapidéz neta de energía radiante entre las superficies dA_1 y dA_2 , se integra la fracción de la ecuación anterior sobre ambas superficies, obteniéndose se de esta forma:

$$Q_{1 \neq 2} = (E_{b1} - E_{b2}) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{r^2} \quad (3.114)$$

La doble integral se escribe convenientemente en notación abreviada, ya sea como $A_1 F_{1-2}$ ó como $A_2 F_{2-1}$ donde F_{1-2} se llama "factor de forma" evaluado sobre la base de A_1 y F_{2-1} es el factor de forma, evaluado sobre la base de A_2 . Físicamente F_{1-2} representa la fracción de la energía total emitida por A_1 que es interceptada por A_2 y F_{2-1} la fracción de la energía emitida por A_2 que es interceptada por A_1 .

Tomando en cuenta lo anterior, el intercambio neto de energía queda:

$$Q_{1-2} = E_{b1} A_1 F_{1-2} - E_{b2} A_2 F_{2-1} \quad (3.115)$$

Donde:

$E_{b1} A_1 F_{1-2}$ = energía que emite la superficie 1 y llega a la superficie 2

$E_{b2} A_2 F_{2-1}$ = energía que emite la superficie 2 y llega a la superficie 1

Teorema de reciprocidad.

Si ambas superficies se encuentran a la misma temperatura ($T_1 = T_2$), el flujo de calor radiante debe ser nulo ($Q_{1-2} = 0$), esto implica que $E_{b1} = E_{b2}$ llegándose a la igualdad:

$$A_1 F_{1-2} = A_2 F_{2-1} \quad (3.116)$$

La igualdad anterior, es conocida como "Teorema de la reciprocidad". Haciendo uso de esta relación, puede ahora calcularse el flujo neto de calor por radiación entre dos cuerpos negros cualesquiera, sustituyendo la Ec. (3.116) en lugar de la doble integral en la Ec. (3.114), pudiéndose escribir como:

$$Q_{1-2} = (E_{b1} - E_{b2}) F_{1-2} A_1 = (E_{b2} - E_{b1}) F_{2-1} A_2 \quad (3.117)$$

Una inspección de la Ec. (3.117), revela que la rapidéz neta del flujo de calor entre dos cuerpos negros puede determinarse evaluando la energía radiante desde cualquiera de las superficies que incide en la otra y sustituyendo su poder de emisión de las dos superficies, como el resultado final es independiente de la superficie emisora escogida, se selecciona la superficie cuyo factor de forma puede determinarse más fácilmente. Por ejemplo, el factor de forma F_{1-2} para cualquier superficie A_1 completamente cubierta por otra superficie envolvente es igual a la unidad.

Sin embargo, en general la determinación de un factor de forma para cualquier configuración geométrica por muy simple que sea, es bastante compleja.

Recintos Cerrados Negros.

La cantidad neta intercambio de energía radiante de una superficie A_i dentro de un espacio cerrado de cuerpo negro formado de varias superficies, puede evaluarse por una simple extensión de la ecuación (3.117). Como el intercambio de radiación A_i y cualquiera de las N superficies que la rodean no se afecta por la presencia de las otras superficies, la rapidéz neta de flujo de calor desde A_i es:

$$Q_{i \text{ neta}} = \sum A_i F_{ik} (E_{bi} - E_{bk}) \quad (3.118)$$

Propiedad de los Sistemas Cerrados.

Si la superficie A_i es convexa de tal manera que ninguna parte de la energía radiante emitida por A_i es interceptada por las N superficies que forman la envoltura. Los factores de forma basados en la superficie A_i deben obedecer, por lo tanto, la relación :

$$\sum_{k=1}^{N-1} F_{i-k} = 1 \quad (3.119)$$

Una inspección simple de la Ec. (3.118) muestra que también existe una analogía entre el flujo de calor por radiación y la corriente eléctrica. Si se considera que el poder de emisión E_b del cuerpo negro actúa como un potencial y el factor de forma $A_i F_{ik}$ como la conductancia entre dos nodos a potenciales E_{bi} y E_{bk} respectivamente, entonces el flujo neto de calor resultante Q_i neto es análogo al flujo de corriente eléctrica de una red análoga. Como ejemplos, las redes para cubiertas cerradas de cuerpo negro, compuestas de tres o cuatro superficies de transferencia de calor se muestran en la Fig. (3.13). La solución numérica para casos que involucran cuatro ó más superficies, se obtiene más fácilmente construyendo una red eléctrica equivalente y midiendo el flujo de corriente.

Una inspección simple de la Ec.(3.118), muestra que -- también existe una analogía entre el flujo de calor por radiación y la corriente eléctrica. Si se considera que el -- poder de emisión E_b del cuerpo negro actúa como un poten -- cial y el factor de forma $A_i F_{ik}$ como la conductancia entre -- dos nodos a potenciales E_{bi} y E_{bk} respectivamente, enton -- ces el flujo neto de calor resultante Q_i neto es análogo al flujo de corriente eléctrica de una red analógica. Como -- Ejemplos; las redes para cubiertas cerradas de cuerpo negro, compuestas de tres o cuatro superficies de transferencia de calor se muestran en la Fig. (3.13). La solución numérica -- para casos que involucran cuatro ó más superficies, se obtie -- ne más fácilmente construyendo una red eléctrica equivalen -- te y midiendo el flujo de corriente.

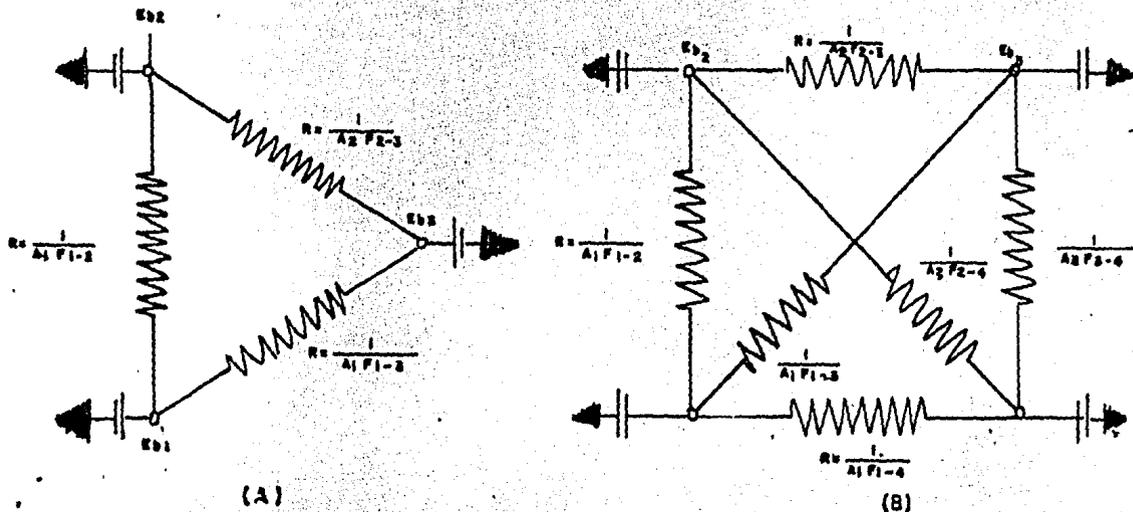


FIGURA 3.13 Red equivalente para la energía radiante en el interior de una cubierta de cuerpo negro, que consta de tres o cuatro superficies.

Recintos cerrados negros.

Para un sistema cerrado que consiste de N superficies, el flujo neto de calor radiante entre cualquiera de las superficies participantes es:

$$Q_{i-j} = Q_{i-j} + Q_{j-i} = A_i E_{bi} F_{i-j} = A_j E_{bj} F_{j-i} \quad (3.120)$$

Aplicando el teorema de reciprocidad se tiene:

$$Q_{i-j} = A_i F_{i-j} (E_{bi} - E_{bj}) = -Q_{j-i} \quad (3.121)$$

El flujo neto de calor radiante entre cualquiera de las superficies participantes es:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n Q'_{i-j} - \sum_{j=1}^n Q'_{j-i} = \sum_{j=1}^n Q_{i-j} \quad (3.122)$$

Sustituyendo Q_{i-j} de la Ec. (3.121) y utilizando la Ec. (3.119), se obtiene:

$$Q_i = A_i \left[E_{bi} - \sum_{j=1}^n F_{i-j} E_{bj} \right] \quad (3.122)$$

Donde la suma incluye el término para $j=i$

El sistema de ecuaciones indicado por (3.122) ($i=1,2,\dots,n$), con Q_{i-j} dado por (3.121), sugiere una analogía eléctrica. Para $N=3$, la analogía se ilustra en la figura (3.14), donde los nodos se mantienen a potenciales iguales a sus potencias emisivas respectivas de cuerpo negro. Las resistencias entre los nodos son resistencias espaciales dadas por:

$$R_{i-j} = \frac{1}{A_i F_{i-j}} \quad (3.124)$$

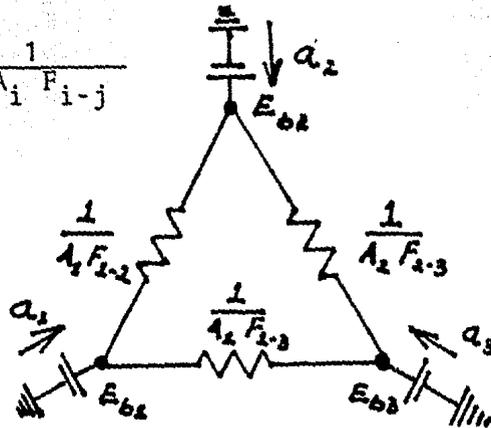


FIGURA 3.14 Red analógica para un recinto compuesto de 3 superficies.

Superficies Rerradiantes

Un concepto común en la evaluación del calor radiante, lo constituyen las denominadas paredes adiabáticas, en las cuales no hay una ganancia neta o pérdida de calor radiante ($Q_i=0$) Una superficie como tal, debe reflejar o reemitir toda la energía radiante sobre si misma y alcanzará su absorptividad y eu emisividad así como de las temperaturas de la superficie que la limitan.

Las cantidades Q_{i-j} , no pueden evaluarse como anteriormente se ha venido realizando, debido al efecto de reflexión generado en las superficies rerradiantes. Para este caso, el tipo de razonamiento a seguir a partir de la ecuación (3.122), arroja la siguiente expresión:

$$Q_a = \sum Q_{a \rightarrow s} - \sum Q_{s \rightarrow a} = \sum_s A_a F_{a-s} (J_a - J_s) \quad (3.125)$$

Donde los índices A y S recorren todas las superficies. Las J_s denotan las radiocidades superficiales. Para una superficie negra $J=E_b$; de manera que si un recinto cerrado consiste de N superficies negras (activa) (1,2,3...N), y superficies rerradiantes ($r_1, r_2, r_3 \dots r_m$) se puede reescribir -- (3.125), como:

$$Q_i = \sum A_i F_{i-j} (E_{bi} - E_{bj}) + \sum A_i F_{i-rk} (E_{bi} - J_{rk}) \quad (3.126)$$

Una superficie rerradiante se define como aquella que refleja en forma difusa y emite energía radiante a una rapidez igual a la que la recibe. Bajo condiciones de estado estable, las paredes refractarias de los hornos industriales, pueden comunmente ser tratadas como superficies rerra - -

diantes. Las superficies de estas paredes reciben el calor por convección y por radiación, perdiendo su calor hacia el exterior por conducción a través de las paredes. Sin embargo, en la práctica el flujo de calor por radiación es mucho mayor que la diferencia entre el flujo de calor por convección y el flujo de calor por conducción desde la superficie, de manera que las paredes actúan esencialmente como rerradiadores.

En la Fig. (3.15) se muestra un esquema simplificado de un horno de combustible pulverizado. Se supone que el piso se encuentra a una temperatura uniforme T_1 y que irradia hacia un juego de tubos oxidados de acero a T_2 que llenan el techo del horno. Se supone que las paredes laterales actúan como rerradiadores a una "temperatura uniforme T_R ". Si se desprecia el calor radiante entre los tubos y el techo y se supone que el piso y los tubos son negros, la red equivalente que representa el intercambio de calor radiante entre el piso y los tubos en presencia de las paredes rerradiantes, es la que se muestra en la Fig. (3.16). Una parte de la energía radiante emitida por A_1 , interacciona con A_2 , mientras que la restante incide sobre A_R y es reflejada desde ahí.

Una parte de la energía radiante reflejada, retorna a A_1 , otra parte a A_2 y la restante a A_R , debido a otra reflexión. Sin embargo, como la pared refractaria debe liberarse de toda la energía radiante, ya sea por reflexión o por rerradiación, su poder de emisión actuará en estado estable, en forma semejante a un potencial variable, cuyo valor real, es decir, su poder de emisión y su temperatura,

dependen únicamente de los valores relativos de las conductancias entre E_R y E_{b1} y E_R y E_{b2}

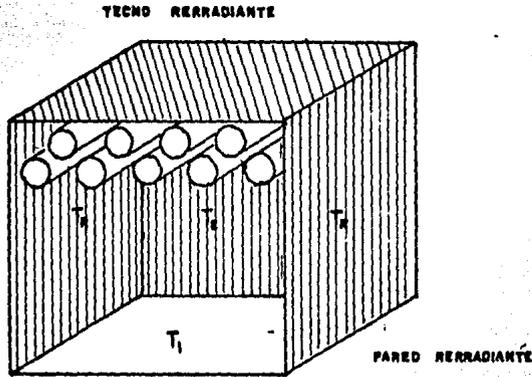


FIGURA (3.15) Diagrama simplificado de un horno.

De esta manera el efecto neto de este complicado patrón de energía radiante puede ser representado en la red equivalente, por dos trayectorias de flujo de calor paralelas entre A_1 y A_2 ; teniendo una de ellas una conductancia efectiva de $A_1 F_{1-2}$ y la otra de $1/A_1 F_{1-R} + 1/A_2 F_{2-R}$. El flujo neto de calor radiante entre una fuente de cuerpo negro y un pozo térmico negro en un simple horno, es entonces igual a:

$$q_{1 \rightarrow 2} = A_1 (E_{b1} - E_{b2}) \left(F_{1-2} + \frac{1}{1/F_{1-R} + A_1/A_2 F_{2-R}} \right) \quad (3.127)$$

Si desde ninguna de las superficies puede observarse parte de si misma, F_{1-R} y F_{2-R} pueden eliminarse utilizando las ecuaciones (3.116) y (3.119). Esto conduce después de alguna simplificación a:

$$Q_{1 \rightarrow 2} = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \frac{A_2 - A_1 F_{1-2}}{A_1 + A_2 - 2A_1 F_{1-2}} = \overline{A_1 F_{1-2}} (E_{b1} - E_{b2}) \quad (3.128)$$

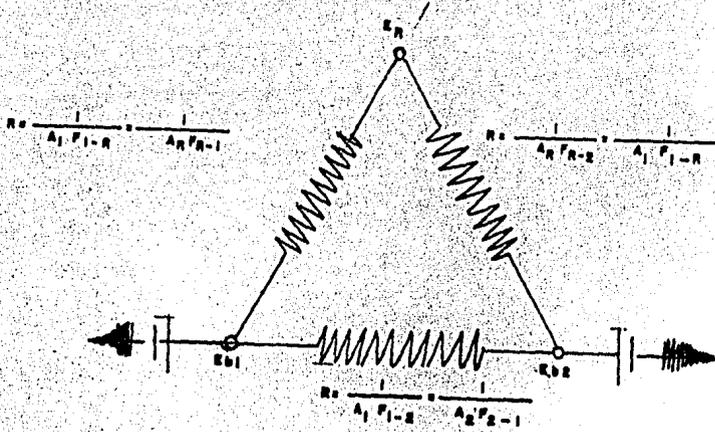


FIGURA 3.16 Red equivalente para la energía radiante entre dos cuerpos negros dentro de una cubierta radiante.

Flujo de Calor por Radiación entre Superficies Grises.

En la práctica, pueden despreciarse generalmente la reflexión sin introducir serios errores, si la absorptancia de las superficies radiantes es mayor de 0.9. Existen numerosos problemas que involucran superficies de baja absorptancia y baja emisividad, especialmente en instalaciones donde la energía radiante es indeseable, como por ejemplo, las paredes interiores de un termo, las cuales se encuentran "plateadas" con el objeto de reducir el "flujo de calor radiante", también los "termopares" que trabajan a temperaturas altas, los cuales están cubiertos por blindajes en contra del calor radiante, con objeto de reducir la diferencia entre la temperatura indicada y la temperatura del medio que se mide.

El análisis en esta sección, está limitado a superficies grises que cumplen con la Ley de Lambert del Coseno y reflejan en forma difusa. La energía radiante de tales superficies, puede tratarse convenientemente en términos del "poder de energía radiante" J , el cual se define como "la rapidéz con la que la energía radiante es emitida por una superficie particular por unidad de área". El poder de energía radiante es "la suma de la energía radiante emitida, reflejada y transmitida"; pero para cuerpos opacos que no transmiten la energía radiante, el poder de la energía radiante -- puede definirse simbólicamente como:

$$J = \rho G + \epsilon E_b \quad (3.129)$$

donde:

$$J = \text{poder de energía radiante en } \left[\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{watts}}{\text{m}^2} \right]$$

G = irradiación ó radiación por unidad de tiempo incidente, en la unidad de área $[\text{watt}/\text{m}^2]$

E_b = poder de emisión del cuerpo negro $\left[\frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right]$

ρ = reflexividad

ϵ = emisividad

La rapidéz neta de calor radiante que abandona una superficie gris por unidad de área y de tiempo, es igual a la diferencia entre el poder de energía radiante y la irradiación, es decir:

$$\frac{dQ_{neta}}{dA} = J - G \quad (3.130)$$

Para una superficie gris ρ es constante y $\rho + \epsilon = 1$, por lo tanto, la irradiación G , puede eliminarse de la Ec. (3.128), teniéndose:

$$\frac{dQ_{neta}}{dA} = \frac{\epsilon}{\rho} E_b - \frac{1-\rho}{\rho} J = \frac{\epsilon}{\rho} (E_b - J) \quad (1.131)$$

Si la irradiación está uniformemente distribuída sobre la superficie la rapidez neta de calor radiante que abandona una superficie A se obtiene integrando la Ec. 3.131 y se tiene:

$$dQ_{neta} = \frac{\epsilon}{\rho} (E_b - J) dA \quad (3.132)$$

En términos de un circuito equivalente Q neta en la Ec. 3.132, puede interpretarse como la rapidez de flujo de calor entre dos nodos E_b y J , unidos por una resistencia igual a $\rho/\epsilon A$

El efecto del sistema geométrico sobre el flujo neto de calor radiante entre dos superficies grises A_i y A_n que emiten energía radiante a la rapidéz J_i y J_k respectivamente, es el mismo que para superficies negras semejantes. Puede, por lo tanto, expresarse en términos del factor de forma geométrico definido por la Ec. (3.114) y el intercambio directo de energía radiante entre dos superficies opacas y difusas A_i y A_k , está dado por la ecuación de rapidéz.

$$Q_{i=k} = (J_i - J_k) A_i F_{ik} = (J_i - J_k) A_k F_{R-i} \quad (3.133)$$

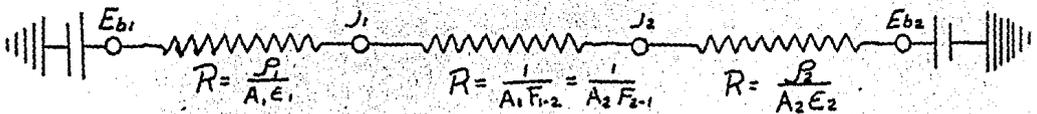
$$Q_{i \rightarrow k} = (J_i - J_k) A_i F_{i-k} = (A_k F_{k-1}) (J_i - J_k) \quad (3.133)$$

Las ecuaciones (3.132) y (3.133), proporcionan la base para determinar la rapidéz neta de transferencia de calor por radiación entre superficies grises, dentro de una envolvente gris por medio de una red equivalente. Sin embargo, debe notarse que de acuerdo con la condición anterior la Ec.(3.132)

Una superficie de transferencia de calor es aquella parte de un área, que no únicamente se encuentra a temperatura constante, sino también uniformemente irradiada. Con esta estipulación, puede tomarse en cuenta el efecto de reflexividad y emisividad, conectando un nodo de potencial de cuerpo negro E_b , a cada uno de los puntos nodales de la red, por medio de una conductancia finita $A\epsilon/\rho$. En el caso de un cuerpo negro ($A\epsilon/\rho$) será infinita, puesto que $\rho_b = 0$

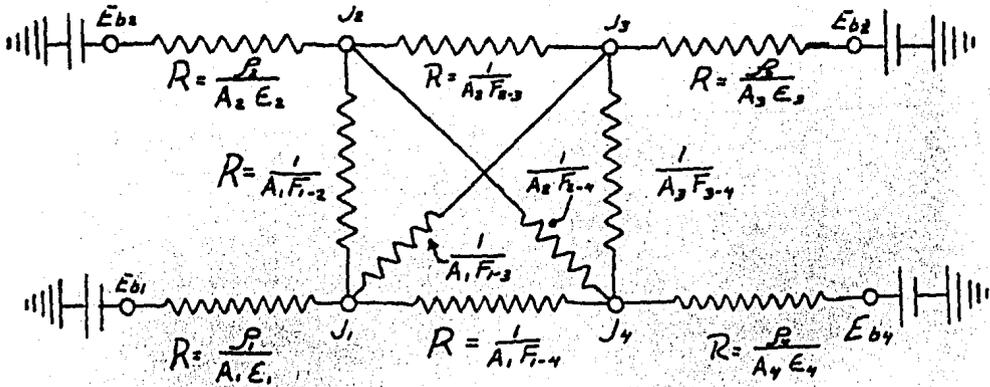
En la Fig. (3.17), se muestran las redes equivalentes para radiación dentro de una envolvente compuesta de 2 y 4 cuerpos grises. Puede verse en estas redes, que los nodos de potencial variable que adquieren un potencial de equilibrio -- igual al poder de energía radiante J .

Algunas envolventes grises de dos componentes, tales como dos placas paralelas e infinitas cilindros concéntricos - de altura infinita y esferas concéntricas, son de considerable interés práctico.



a).

Fig.3.17) Redes equivalentes para la energía radiante dentro de recintos grises.



b).

FIGURA (3.17) Redes equivalentes para la energía radiante dentro de los recintos grises.

- a) Dos superficies de cuerpo gris.
b) Cuatro superficies de cuerpo gris.

Para estos sistemas, cada superficie componente está uniformemente irradiada y la red se reduce a una sola línea de resistencias en serie, como se muestra en la Fig. (3.17 a), la conductancia equivalente para la ec. (3.117), está dada por:

$$A_1 \mathcal{F}_{1-2} = \frac{1}{\rho_1/A_1\epsilon_1 + 1/A_1 + \rho_2/A_2\epsilon_2} \quad (3.133)$$

donde A_1 es la superficie menor y \mathcal{F}_{1-2} es el factor de forma del cuerpo gris que frecuentemente se escribe como $F_A F_E$, el producto del factor de forma geométrico F_A y el factor de forma geométrico F_E que permitan partir de las condiciones de superficie del cuerpo negro.

Para la radiación entre dos placas paralelas, el factor de forma de cuerpo gris se reduce a:

$$\mathcal{F}_{1-1} = \frac{1}{(1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)} \quad (3.134)$$

Si son despreciados los efectos de los extremos. Para un pequeño cuerpo gris encerrado en una envolvente negra, se obtie

ne:

$$A_1 \mathcal{J}_{1-2} = A_1 \epsilon_1 \quad \text{conforme la Ec. (3.134)}$$

El flujo de calor radiante entre una fuente gris y un pozo térmico también dentro de una cubierta cerrada compuesta de superficies rerradiantes, puede encontrar su solución sin-complejidad, mediante un circuito equivalente.

Conforme las ecuaciones (3.132) y (3.133), es necesario-sustituir únicamente E_{b1} y E_{b2} potenciales utilizados en la - Ec. (3.) para superficies negras, por J_1 y J_2 , así como - conectar los nuevos potenciales por las resistencias $\rho_1/\epsilon_1 A_1$ y $\rho_2/\epsilon_2 A_2$ respectivamente, a los potenciales del cuerpo ne - gro E_{b1} y E_{b2} 1. La red resultante, se muestra en la Fig.(3.18) y en ella se ve que la conductancia total entre E_1 y E_2 es -- ahora:

$$A_1 \mathcal{J}_{1-2} = \frac{1}{\frac{\rho_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{\rho_2}{\epsilon_2 A_2} + \frac{1}{A_1(F_{1-2} + 1/A_2 F_{2-R} + F_{1-R})}}$$

donde el denominador del último término es la conductancia pa - ra la red del cuerpo negro dada por la Ec.(3.127). La expre - sión para la conductancia puede escribirse nuevamente en una- forma más convincente quedando la expresión siguiente:

$$A_1 \mathcal{J}_{1-2} = \frac{1}{1/A_1(\epsilon_1 - 1) + 1/A_2(1/\epsilon_2 - 1) + 1/A_1 F_{1-2}} \quad (3.137)$$

donde $A_1 F_{1-2}$ es la conductancia total para la red del cuerpo- negro igual al denominador del último término en la expresión original.

La ecuación para determinar el flujo neto de calor radian - te por unidad de tiempo entre dos superficies grises es presen - cia de superficies rerradiantes a temperatura uniforme, puede- también escribirse como:

$$Q_{1=2} = A_1 \mathcal{J}_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.138)$$

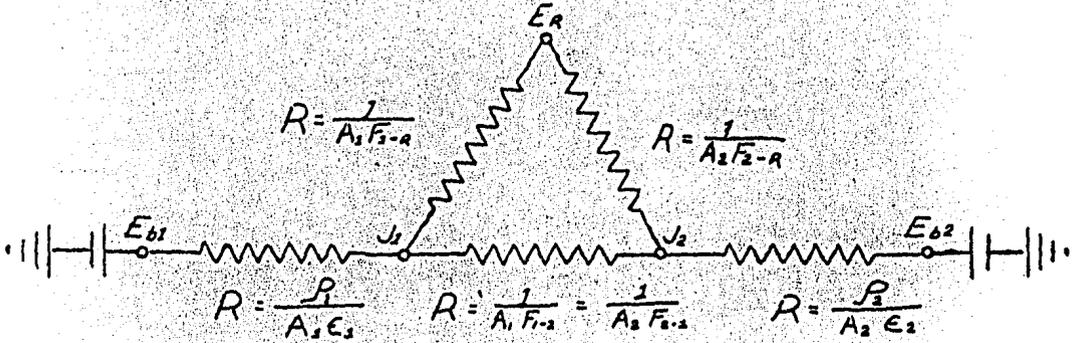


FIGURA 3.18 Red equivalente para la energía radiante entre dos cuerpos grises encerrados en una cubierta rerradiante.

CAPITULO 4

TRABAJO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describen los experimentos realizados para comprobar algunos principios y modelos que simulan la transmisión de calor por radiación, así mismo, se describen brevemente el equipo de experimentación, los instrumentos de medición y los dispositivos sensores, dejando para el apéndice A1 una descripción detallada de los mismos.

Este conjunto de experimentos se realizaron con el equipo de experimentación de radiación térmica marca Scott modelo 9053, el cual constituye un laboratorio móvil para llevar a cabo el estudio de todos los aspectos inherentes a la transmisión del calor por radiación.

El versátil funcionamiento de este equipo, permite la realización de prácticas experimentales con fines didácticos a nivel licenciatura, así como el desarrollo de trabajos avanzados en proyectos de investigación.

El equipo conjunta algunas fuentes de calor radiante así como de radiación visible, un tablero de controles, varios tipos de instrumentación, algunos componentes y accesorios complementarios, que en total tienen como finalidad su utilización en el montaje de un conjunto de experimentos diseñados para proporcionar un conocimiento claro del transporte de la energía radiante y la obtención de mediciones de temperatura. Los componentes principales se encuentran instalados en forma permanente sobre la mesa móvil.

2.

El equipo puede funcionar en cualquier parte donde se cuente con un suministro de corriente alterna así como de 115-volts y una conexión para aire comprimido.

El equipo lo constituyen un horno de tipo mufla, así como tres fuentes adicionales de radiación térmica, las cuales pueden regularse en forma continua desde la temperatura ambiente hasta temperaturas cuya $\lambda_{\text{máx}}$ se asocia a la región del espectro visible.

Las tres fuentes de calor radiante poseen configuraciones geométricas diferentes; una la constituye un calefactor infrarrojo de tipo puntual, una fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja y una fuente cilíndrica de radiación infrarroja. Asimismo, se incluye una lámpara incandescente para la realización de las mediciones en la región del espectro visible.

El tablero de control del equipo, lo constituye un transformador variable, un voltímetro, un amperímetro y los interruptores respectivos a cada fuente.

El equipo cuenta con una estructura de acrílico transparente, cuya finalidad es reducir las pérdidas de calor por convección, disminuyendo de esta manera, las perturbaciones introducidas en las mediciones experimentales. La figura (4.1), muestra la distribución de los componentes principales del equipo.

4.1 Distribución de la Intensidad de Radiación en Función de la Distancia.

El presente trabajo experimental proporciona una distribución real de la intensidad de radiación emitida por una fuente puntual a diversas temperaturas en función inversa de la distancia a la que se encontraba una superficie receptora.

La obtención de la distribución real de la intensidad de radiación como una función de la distancia se llevó a cabo con datos obtenidos de una termopila y un fotómetro, así como un pirómetro óptico.

Se utilizaron dos fuentes de energía radiante con funciones de emisor. Una de las cuales está compuesta de una lámpara incandescente la cual emite en su mayoría dentro de la región del espectro visible y la otra la constituye una fuente de tipo puntual con geometría espiral que efectúa su emisión en el espectro infrarrojo en su mayor parte.

El objetivo del experimento efectuado fue determinar indirectamente la distribución de la intensidad de la radiación con respecto a la distancia entre el dispositivo sensor y la fuente emisora de energía radiante.

Realización del experimento.

Para el presente estudio se utilizaron los siguientes aparatos y equipo de experimentación con sus características respectivas.

a) Un pequeño contenedor térmico, compuesto de dos fuentes de energía radiante. Una de ellas es una fuente de radiación infrarroja de tipo puntual con geometría espiral con una conexión cilíndrica de 3.8 cm. de longitud cuya función es dirigir los haces emitidos.

El segundo emisor es una fuente de radiación visible (lámpara incandescente). La Figura 4.2 muestra las dos fuentes de energía radiante.

b) Una termopila cuya función consistió en la captación de la energía radiante emitida por el calefactor infrarrojo de tipo puntual, así como de dispositivo sensor de la energía radiante.

c) Un termómetro de mercurio con el que se midió la temperatura ambiental.

d) Un flexómetro con el cual se midió la distancia entre la fuente de calor radiante y el sensor.

e) Un cronómetro mediante el cual se midió el tiempo durante el cual se tomó cada lectura.

A continuación se enlistan los instrumentos electrónicos de medición utilizados en el experimento.

a) Equipo de experimentación de radiación térmica, marca Scott modelo 9053, mediante el cual se suministró en forma controlada la potencia eléctrica a las fuentes de calor radiante y radiación visible.

b) Multímetro digital marca Philips modelo 2522 y el c - trómetro digital marca Keithley modelo 616 mediante el cual se llevaron a cabo mediciones del voltaje de la termopila.

c) Pirómetro óptico marca Leeds and Northrup con el cual se midió la temperatura del calefactor puntual infrarrojo. Las figuras 4.3 y 4.4 muestran este instrumento, así como la forma en que fue utilizado para llevar a cabo las mediciones de temperatura del calefactor puntual infrarrojo.

Procedimiento experimental-Mediante el interruptor localizado en el tablero de control, localizado en el tablero de control se puso en marcha el sistema compuesto por las fuentes de energía radiante. (Véase la Fig. 4.1)

Posteriormente se colocó la termopila en el carril más largo en la posición marcada 6 pulg. de distancia de la fuente y se conectó el medidor digital de voltaje a sus terminales respectivas.

El suministro de potencia eléctrica fue controlado mediante la perilla del transformador variable, localizada en el tablero de control, en incrementos de 20 en 20% de la capacidad total del calefactor puntual infrarrojo.

Una vez que la fuente infrarroja había alcanzado el equilibrio térmico, esto es, cuando su temperatura permanecía constante se tomaron lecturas del voltaje de termopila a diversas distancias de separación entre la fuente y el sensor, así como del tiempo en que se efectuaron las mediciones correspondientes a cada posición.

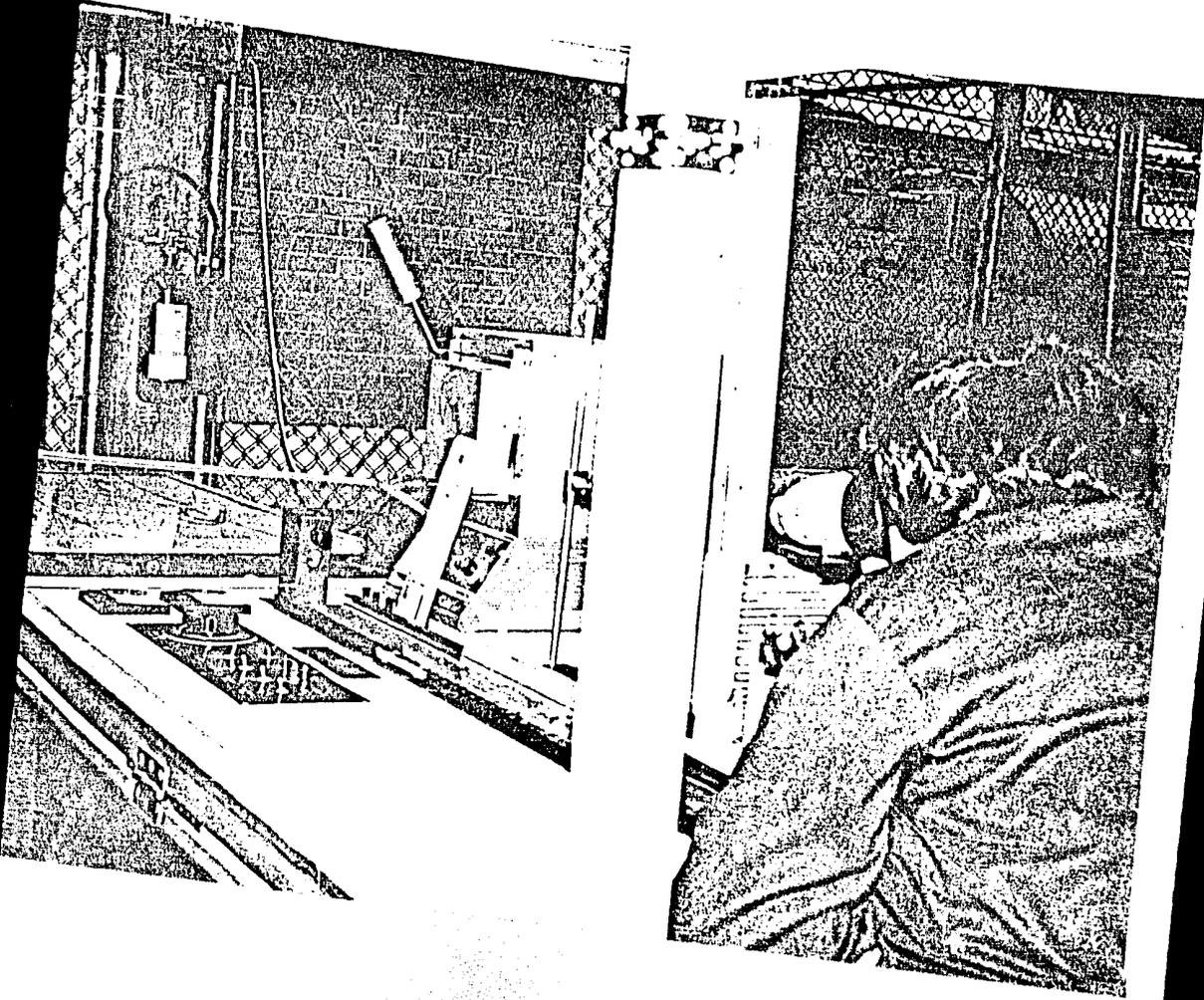


FIGURA 4.2 Contenedor térmico del calefactor mutual infrarrojo y la fuente de radiación visible (lámpara incandescente).

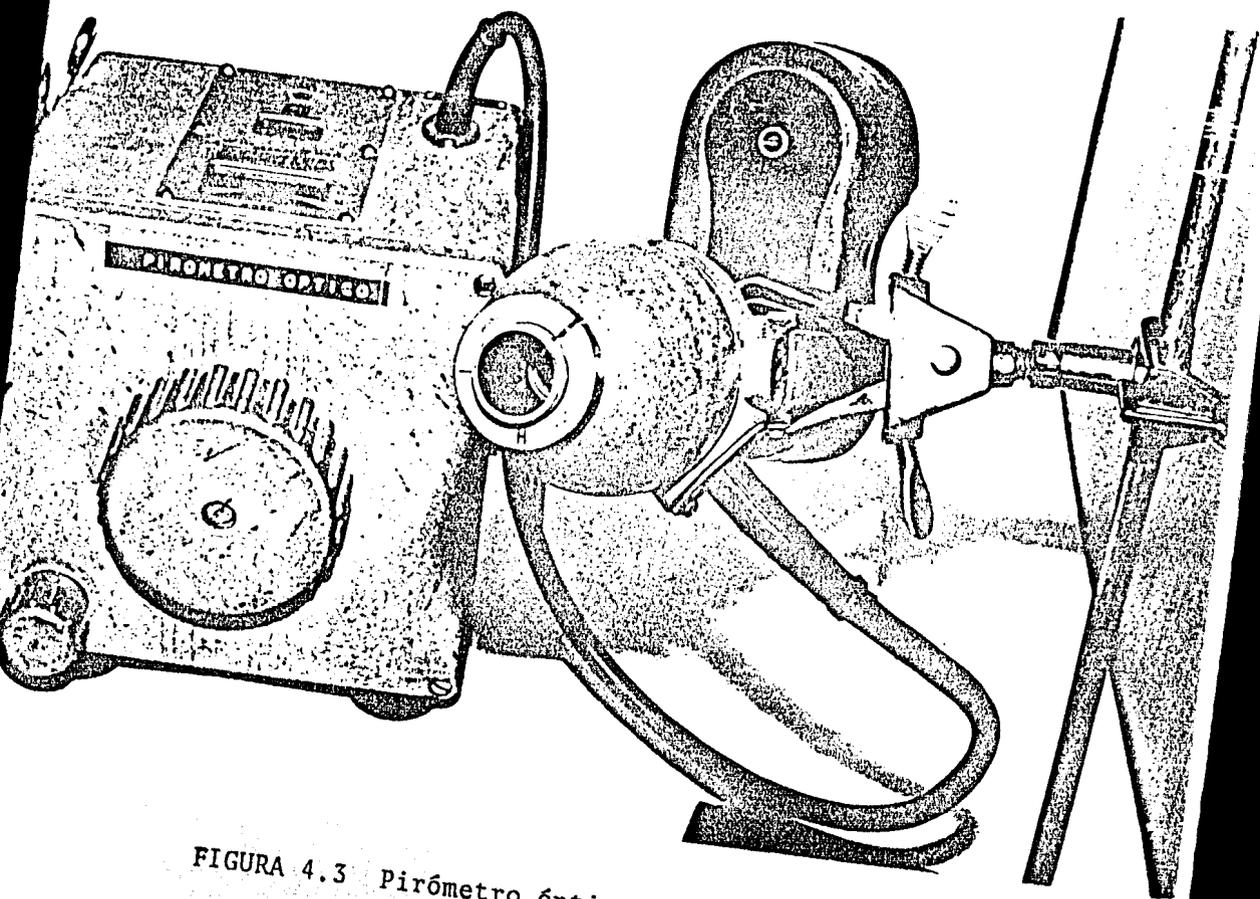


FIGURA 4.3 Pirómetro óptico, mediante el cual se efectuó la medición de temperatura del calefactor puntual infrarrojo.

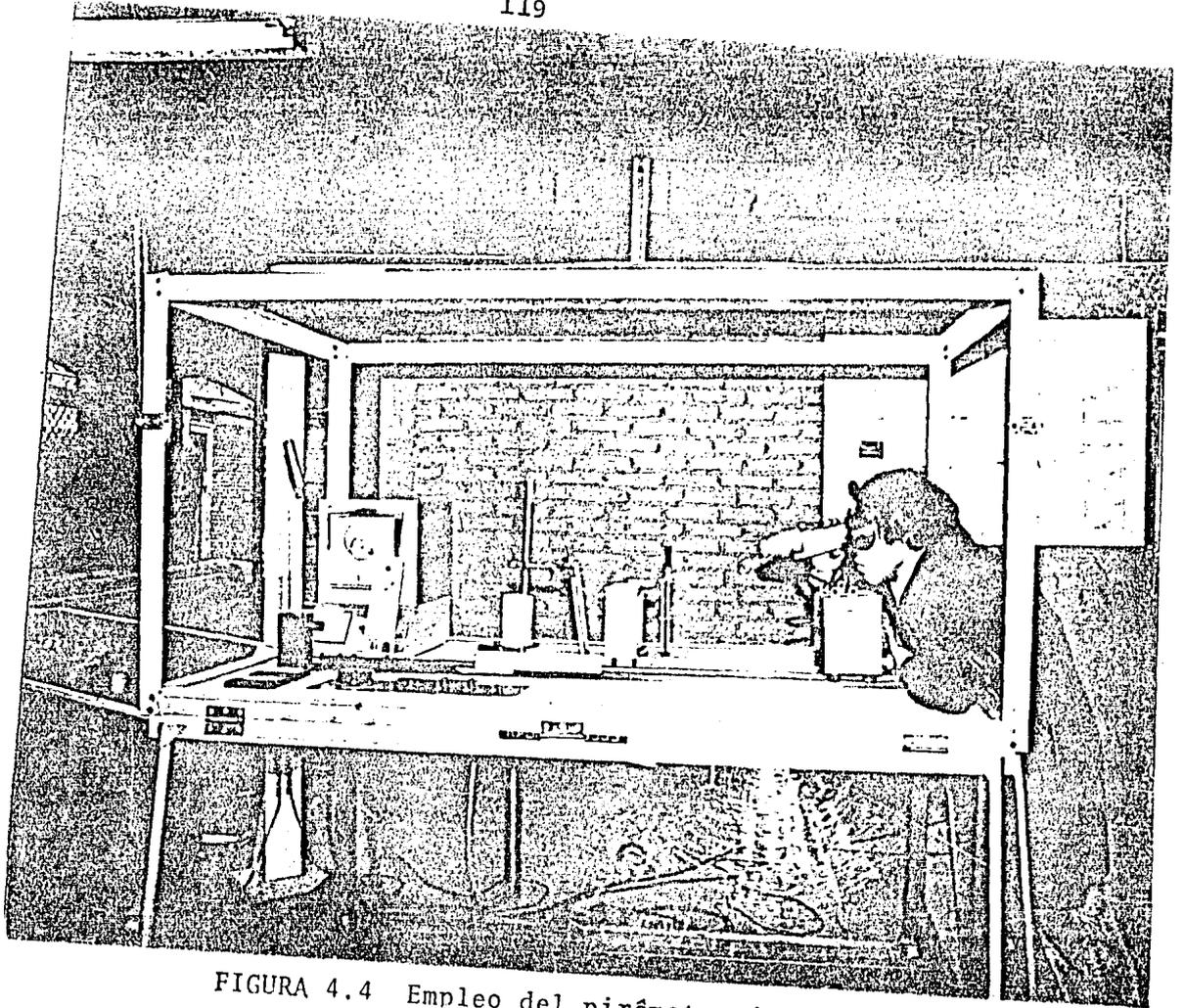


FIGURA 4.4 Empleo del pirómetro óptico durante el experimento.

Una vez anotados los datos respectivos, se desplazaba la termopila en incrementos de una pulgada indicados en la escala del carril más largo en cada posición, nuevamente se tomaron las lecturas correspondientes.

Una vez que se alcanzó una posición para la cual el voltaje de termopila no presentaba variación alguna, se fijó un nuevo valor del suministro de potencia eléctrica girando la perilla hacia otra posición, marcada para un porcentaje mayor, repitiéndose la operación. La figura 4.5 -- ilustra la disposición de la fuente, la termopila y el --- electrómetro digital así como los otros accesorios experimentales utilizados durante el desarrollo del experimento.

En la tabla 4.1 se proporcionan resumidamente los datos obtenidos experimentalmente.

La figura 4.8 muestra una familia de curvas que ilustran la distribución de la intensidad de radiación térmica en función de la distancia para diversas temperaturas de la fuente. Una vez tomados todos estos datos, se permitió que el calefactor puntual infrarrojo se enfriara hasta -- alcanzar la temperatura ambiente. Posteriormente, se procedió a realizar mediciones análogas para la fuente de radiación visible.

Para llevar a cabo las mediciones de la distribución de la intensidad de radiación visible en función de la distancia, se utilizó el fotómetro, colocándole primeramente el cilindro colimador más corto; cuando se comenzaron las mediciones, a la misma distancia a partir de la fuente.

Para ello, una vez que el fotómetro rebasaba la distancia de 10 (pulg) marcada en la escala del carril, mediante el cual se desplazaba este instrumento, fue necesario colocar el otro cilindro más largo para concentrar y colimar la radiación visible emitida al elemento sensor y continuar con la obtención de los datos respectivos.

La tabla número 4.5 proporciona los datos de las mediciones efectuadas en forma resumida.

La figura 4.9 muestra otra familia de curvas, las cuales proporcionan una distribución de la intensidad de radiación visible en función inversa de la distancia.

Conclusiones y Recomendaciones. - Los resultados experimentales presentados en este trabajo proporcionan una evaluación de la distribución de la intensidad de radiación en función inversa de la distancia.

Las desviaciones que se presentan en este tipo de comportamiento son causadas debido a los efectos de absorción y dispersión del medio ambiente, así como errores introducidos por los instrumentos de medición.

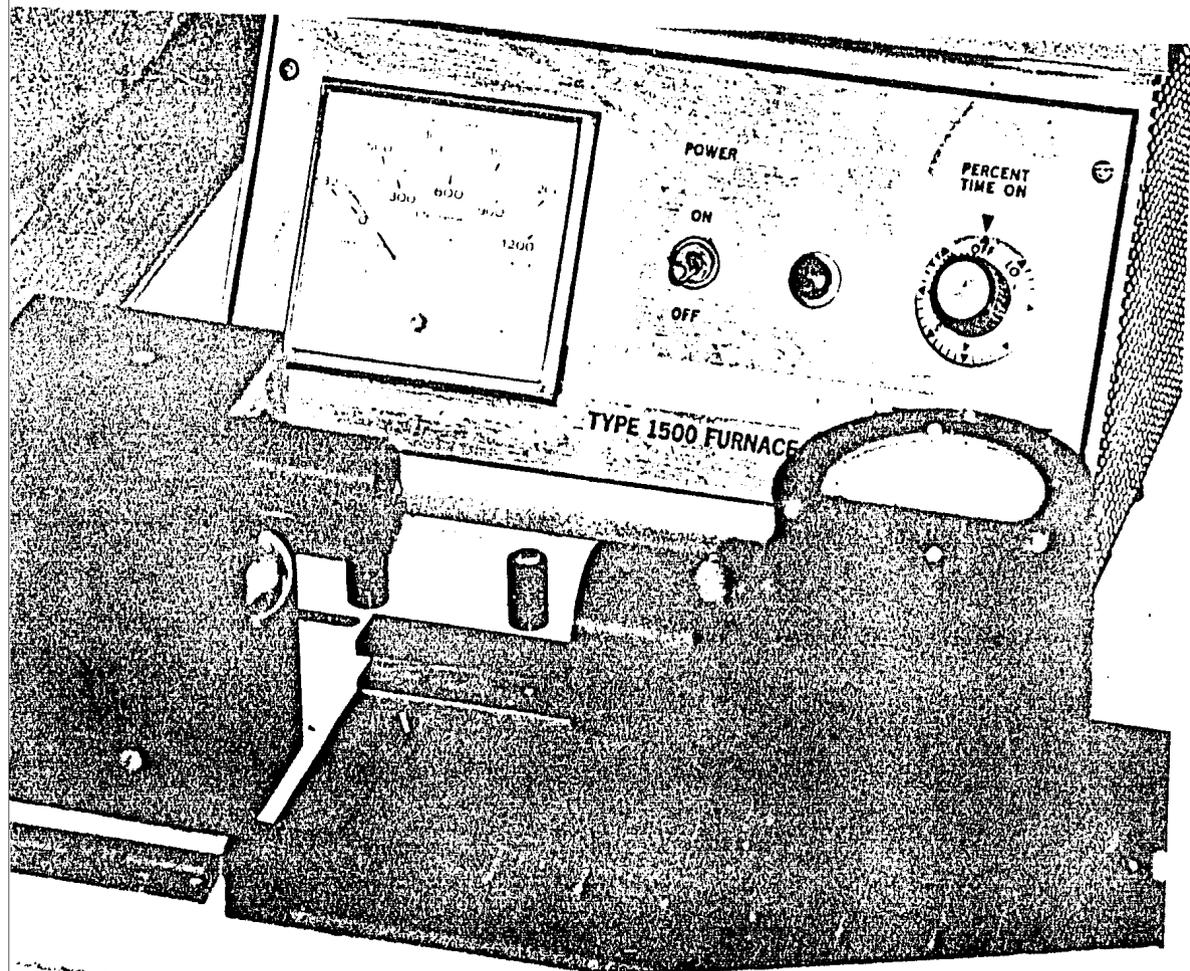


FIGURA 4.6 Disposición de la fuente de radiación visible y el fotómetro colocado visible y el fotómetro colocado el cilindro colimador más corto a su elemento sensor.

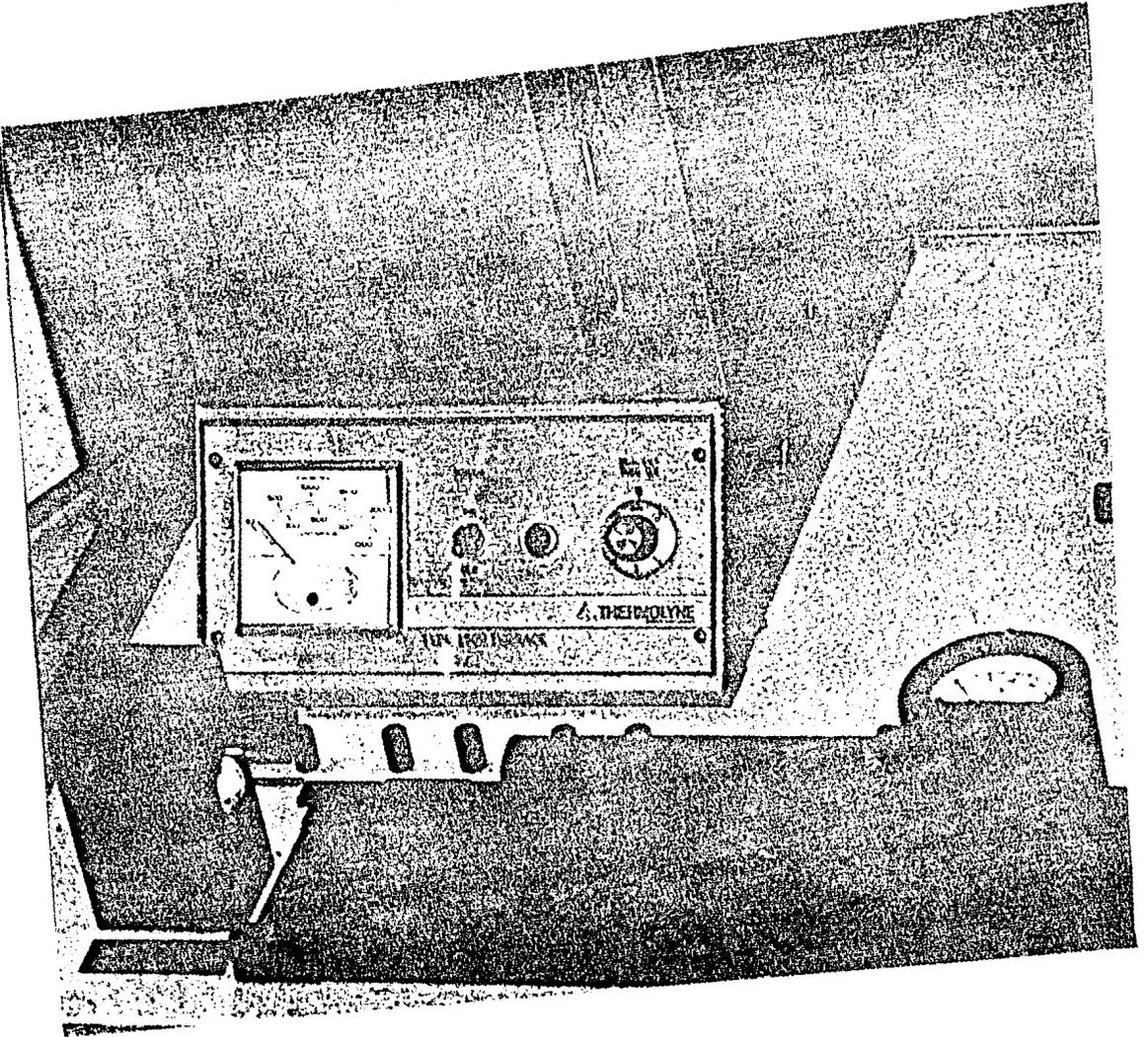


FIGURA 4.7 Montaje del cilindro colimador más largo para cuando se rebazaba la - marca de 10 nule en la escala del - carril.

NOMENCLATURA

- V = Voltaje de la termopila obtenido en función de la potencia emisiva de la fuente en milivolts.
- $E_{TEORICO}$ = Potencia emisiva evaluada teóricamente en (mv)
- E_{REAL} = Potencia emisiva real obtenida con la termopila en (mv).
- N = Número de datos obtenidos en cada lectura.
- ψ = Marca de indicación en la perilla del transformador variable.
- S = Desviación estandar, error (rms)
- T = Tiempo durante el cual se realizó la medición de cada una de las lecturas.
- T_f = Temperatura del calefactor puntual infrarrojo.
- T_a = Temperatura ambiente.

MODELOS EMPIRICOS AJUSTADOS

Los modelos empíricos obtenidos mediante la termopila y el medidor digital del voltaje para la fuente infrarroja de tipo puntual y geometría espiral a diversos porcentajes del suministro de potencia eléctrica se indican a continuación:

$$\text{a) al 20\% } E_{\text{teórica}} = (0.031) X + 0.681 \quad (5.1)$$

$$\text{índice de correlación} = 0.943$$

$$\text{b) al 40\% } E_{\text{teórica}} = (0.237) X + 3.7405571 \quad (5.2)$$

$$\text{índice de correlación} = 0.983$$

$$\text{c) al 60\% } E_{\text{teórica}} = (-0.087) X + 12.551 \quad (5.3)$$

$$\text{índice de correlación} = -0.993$$

$$\text{d) al 80\% } E_{\text{teórica}} = (-1.267) X + 20.614 \quad (5.4)$$

$$\text{índice de correlación} = -0.987$$

$$\text{e) al 100\% } E_{\text{teórica}} = (-2.126) X + 34.981 \quad (5.5)$$

$$\text{índice de correlación} = -0.985$$

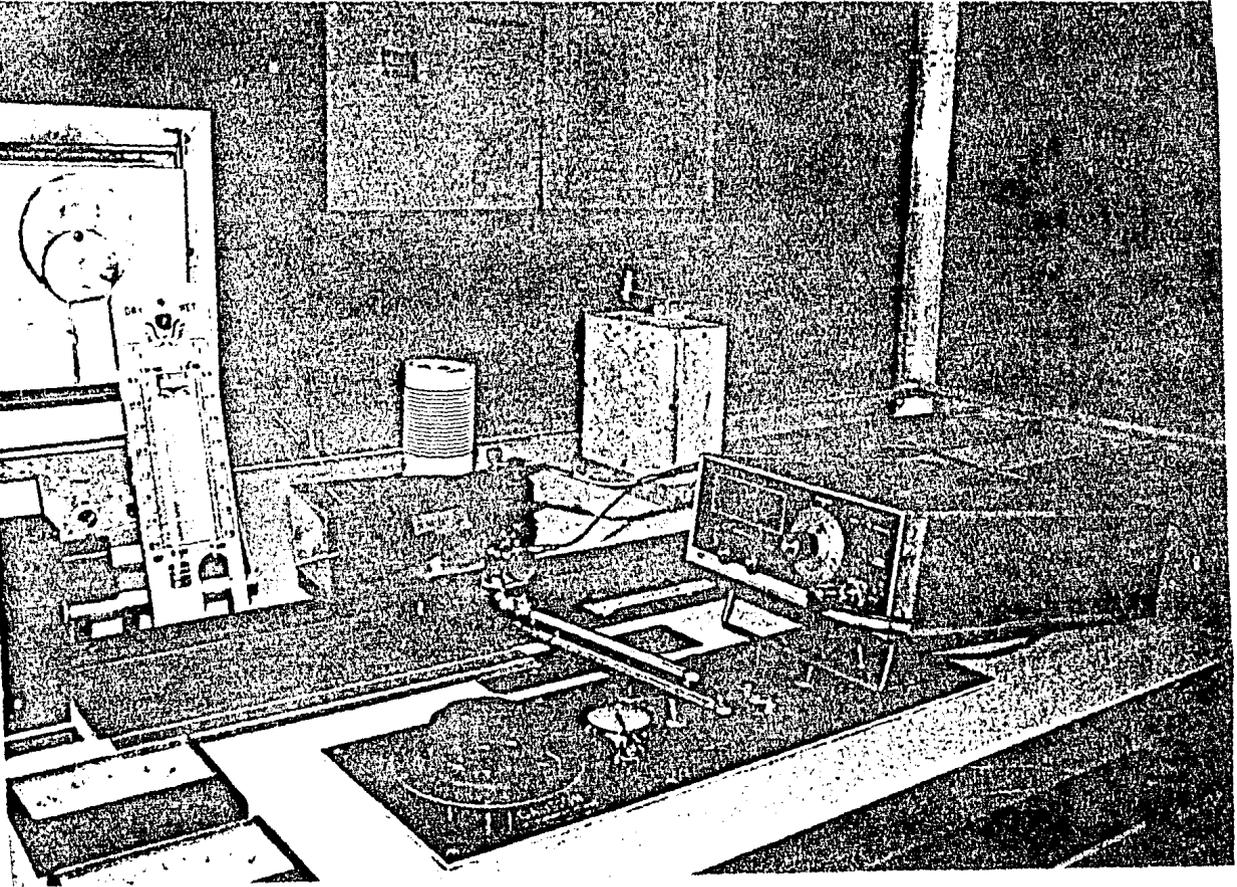


FIGURA 4.5 Montaje de la instrumentación y dispositivos experimentales.

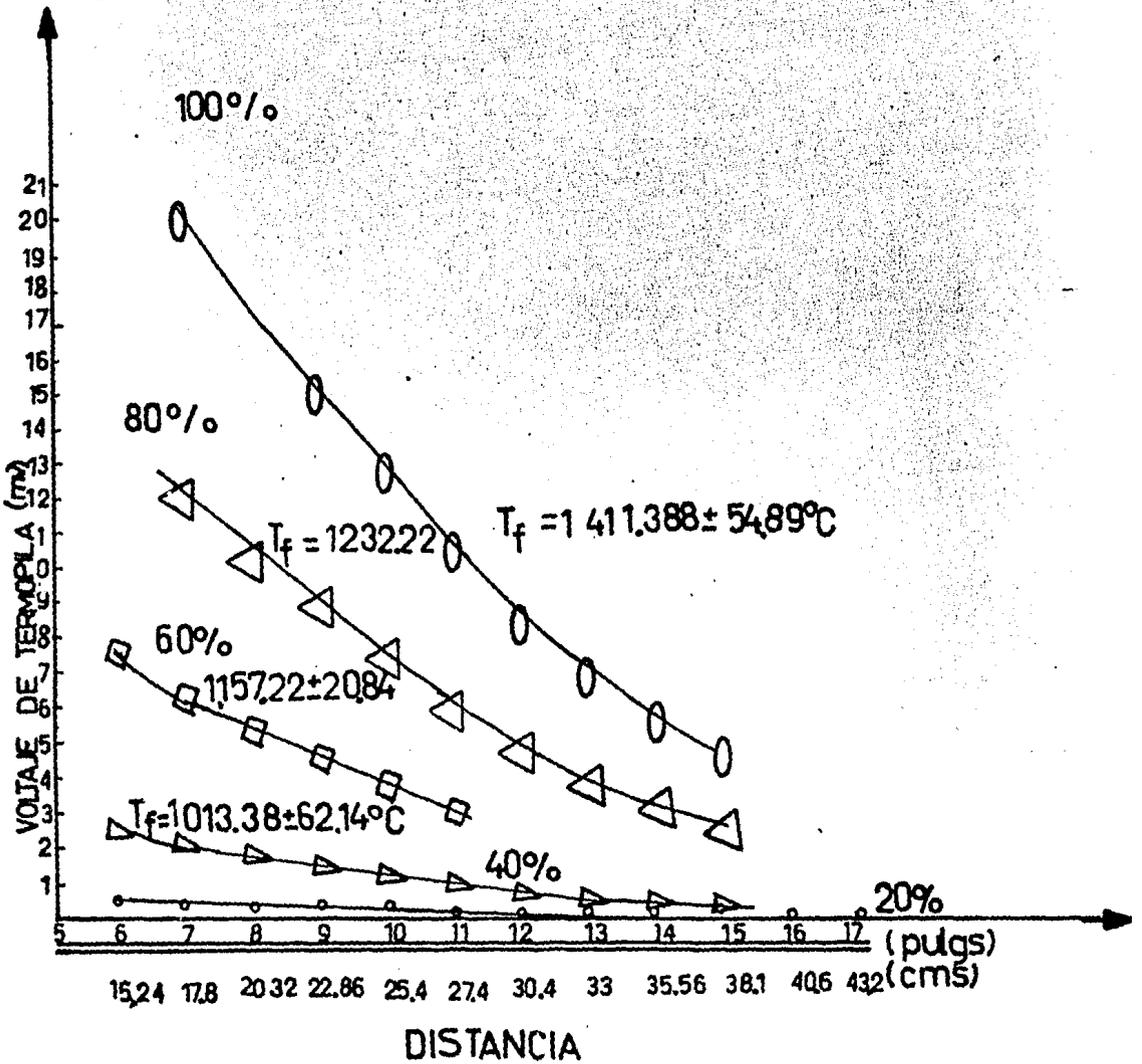


FIG.4.8 Variacion del voltaje de termopila en funcion de la distancia

TABLA 4.2 MEDICIONES REALIZADAS CON EL FOTOMETRO

LEC.	HORA	8 PERILLA	X	AMPS.	TUBO
1	12:45	40	3 1/2	35	corto
2	-	40	4	25	corto
3	-	40	4 1/2	20	corto
4	-	40	5	15	corto
5	-	40	5 1/2	10	corto
6	-	40	6	9.5	corto
7	-	40	6 1/2	8	corto
8	-	40	7	6.5	corto
9	-	40	7 1/2	6.0	corto
10	-	40	8	6	corto
11	-	40	9	5	corto
12	-	40	10	5 y 4	corto y largo
13	-	40	10 1/2	3	largo
14	-	40	11	2 1/2	largo
15	-	40	11 1/2	2 1/2	largo
16	-	40	12	2 1/2	largo

TABLA 4.2 MEDICIONES REALIZADAS CON EL FOTOMETRO

LEC.	HORA	8 PERILLA	X	μ AMPS.	TUBO
1	12:55	60	4	90.5	corto
2	-	60	4 1/2	80	corto
3	-	60	5	65.6	corto
4	-	60	5 1/2	46	corto
5	-	60	6	40	corto
6	-	60	6 1/2	31	corto
7	-	60	7	26	corto
8	-	60	7 1/2	23	corto
9	-	60	8	21	corto
10	-	60	8 1/2	21	corto
11	-	60	9	18	corto
12	-	60	9 1/2	15.5	corto
13	-	60	10	14 y 25	cort.ylarg.
14	-	60	10 1/2	22	largo
15	-	60	11	20	largo
16	-	60	11 1/2	19	largo
17	-	60	12	17	largo
18	-	60	12 1/2	15	largo
19	-	60	13	14	largo
20	-	60	13 1/2	12	largo
21	-	60	14	10	largo
22	-	60	14 1/2	9	largo
23	-	60	15	8	largo
24	-	60	15 1/2	8	largo
25	-	60	16	6	largo
26	-	60	16 1/2	6	largo
27	-	60	17	6	largo
28	-	60	17 1/2	5	largo
29	-	60	18	5	largo
30	-	60	18 1/2	4	largo
31	-	60	19	4	largo
32	-	60	19 1/2	4	largo
33	-	60	20	4	largo

TABLA 4.2 MEDICIONES REALIZADAS CON EL FOTOMETRO

LEC.	HORA	% PERILLA	X	μ AMPS.	TUBO
1	13:12	80	6 1/2	100	corto
2	-	80	7	84	corto
3	-	80	7 1/2	73	corto
4	-	80	8	62	corto
5	-	80	8 1/2	53	corto
6	-	80	9	50	corto
7	-	80	9 1/2	45	corto
8	-	80	10	41	corto
9	-	80	10	78	largo
10	-	80	10 1/2	72	largo
11	-	80	11	64	largo
12	-	80	11 1/2	59	largo
13	-	80	12	52.5	largo
14	-	80	12 1/2	50	largo
15	-	80	13	45	largo
16	-	80	13 1/2	40	largo
17	-	80	14	35	largo
18	-	80	14 1/2	33.5	largo
19	-	80	15	32	largo
20	-	80	15 1/2	29	largo
21	-	80	16	26.5	largo
22	-	80	16 1/2	23	largo
23	-	80	17	20	largo
24	-	80	17 1/2	20	largo
25	-	80	18	18	largo
26	-	80	18 1/2	16	largo
27	-	80	19	15	largo
28	-	80	19 1/2	14	largo
29	-	80	20	14	largo
30	-	80	20 1/2	13	largo
31	-	80	21	12	largo
32	-	80	21 1/2	11	largo
33	-	80	22	10	largo
34	-	80	22 1/2	10	largo
35	-	80	23	9	largo
36	-	80	23 1/2	9	largo
37	-	80	24	9	largo
38	-	80	24 1/2	7	largo
39	-	80	25	7	largo
40	-	80	25 1/2	7	largo
41	-	80	26	6	largo
42	-	80	26 1/2	6	largo
43	-	80	27	6	largo
44	-	80	27 1/2	6	largo

TABLA 4.2 MEDICIONES REALIZADAS CON EL FOTOMETRO

LEC.	HORA	% PERILLA	X	μ AMPS.	TUBO
1	13:25	100	9 1/4	100	corto
2	-	100	9 1/2	91	corto
3	-	100	10	89.5	corto
4	-	100	10	100	largo
5	-	100	13 1/2	97	largo
6	13:39	100	14	88	largo
7	-	100	14 1/2	81	largo
8	-	100	15	72.5	largo
9	-	100	15 1/2	67	largo
10	-	100	16	61	largo
11	-	100	16 1/2	56	largo
12	-	100	17	50	largo
13	-	100	17 1/2	47	largo
14	-	100	18	44	largo
15	-	100	18 1/2	40	largo
16	-	100	19	37	largo
17	-	100	19 1/2	35	largo
18	-	100	20	30	largo
19	-	100	20 1/2	30	largo
20	-	100	21	27	largo
21	-	100	21 1/2	26	largo
22	-	100	22	24	largo
23	-	100	22 1/2	23	largo
24	-	100	23	23	largo
25	-	100	23 1/2	21	largo
26	-	100	24	20	largo
27	-	100	24 1/2	19	largo
28	-	100	25	19	largo
29	-	100	25 1/2	17	largo
30	-	100	26	15	largo
31	-	100	27	15	largo
32	-	100	28	14	largo
33	-	100	29	13	largo
34	-	100	30	12	largo
35	-	100	31	11	largo
36	-	100	32	11	largo
37	-	100	33	10	largo
38	-	100	34	10	largo
39	-	100	35	9	largo
40	-	100	36	9	largo
41	-	100	37	8.5	largo
42	-	100	38	8.5	largo
43	-	100	39	7	largo
44	-	100	40	7	largo
45	-	100	41	7	largo
46	-	100	42	7	largo
47	-	100	43	7	largo

MODELOS EMPIRICOS

a) Curva Logarítmica al 40%

$$E_T = 52.227 - 21.528 \ln X$$

$$r^2 = 0.824$$

b) al 60%

$$E_T = 120.795 - 41.702 \ln X$$

c) al 80%

$$E_T = 190.607 - 57.819 \ln X$$

$$r^2 = 92.01\%$$

d) al 100%

$$E_T = 282.99 - 41.702 \ln X$$

$$r^2 = 91\%$$

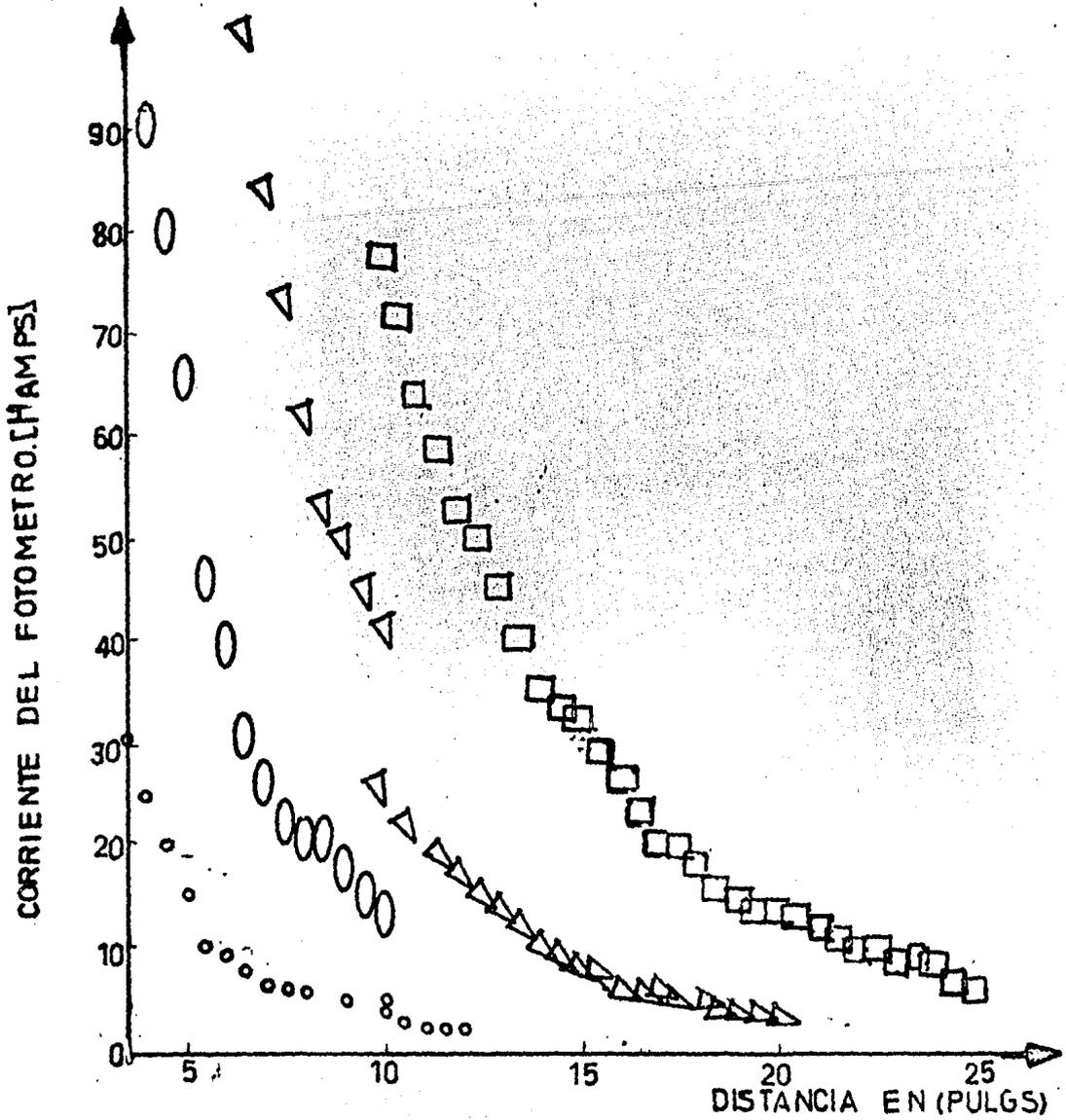


FIG. 4.9 Distribución de la intensidad de radiación visible en función de la distancia.

4.2 Ley de Lambert del Coseno.

De acuerdo a la Ley de Lambert del Coseno, se estipula que la energía radiante emitida por un cuerpo negro es proporcional al coseno del ángulo de propagación con respecto a la normal de la superficie emisora.

A continuación se presenta una comprobación experimental de la ley anterior para la radiación difusa, mediante la obtención de datos experimentales de la potencia emisiva de una fuente cilíndrica de calor radiante, graficando estos puntos en una curva que indica la distribución de la energía térmica radiante en función del radio de la superficie curva envolvente proyectada sobre una escala lineal a partir de una fuente cilíndrica.

Las figuras resultantes, muestran dos curvas; una caracterizada por las lecturas reales y la otra es una teórica - equivalente de comparación conforme a la ley de Lambert del coseno.

Para el desarrollo del trabajo experimental se dispuso del instrumental de medición así como del equipo de experimentación y accesorios complementarios que se describen en la Tabla 4.11

A continuación se enlistan los aparatos y dispositivos que se utilizaron durante el desarrollo del trabajo experimental.

Componentes e instrumentos para la práctica.

1. Termopar tipo K encapsulado en una vaina metálica conectado a un cable de compensación para llevar a cabo mediciones de temperatura del cilindro calefactor.
2. Psicrómetro de bulbo marca Taylor para efectuar medición de temperatura de ambiente y humedad.
3. Electrómetro digital marca Keithley para la medición de temperatura en el centro de la fuente de calor cilíndrica.
4. Termopila ya integrada como Accesorio del sistema de medición de temperatura y radiación.
5. Reflector frontal de la termopila.

Arreglos y conexiones para el desarrollo de la práctica.

1. Se conectó el termopar al centro de la fuente cilíndrica dicho termopar estaba sostenido por un soporte universal, - este termopar se conectó al medidor digital de temperatura, esto se hizo con el fin de tomar distintas temperaturas como referencia del cilindro radiador.
2. Se colocó la termopila sobre las marcas de posición en la escala del carril de apoyo más largo, enfocándola hacia el cilindro radiador con su reflector frontal, colocado delante de ella. Los milivolts que se detectan en dicho instrumento se midieron con un electrómetro digital, conectando las terminales de la termopila directamente a la entrada

del electrómetro.

3. Se tomaron dos lecturas del medio ambiente, respecto a su temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo al iniciar y terminar la práctica.

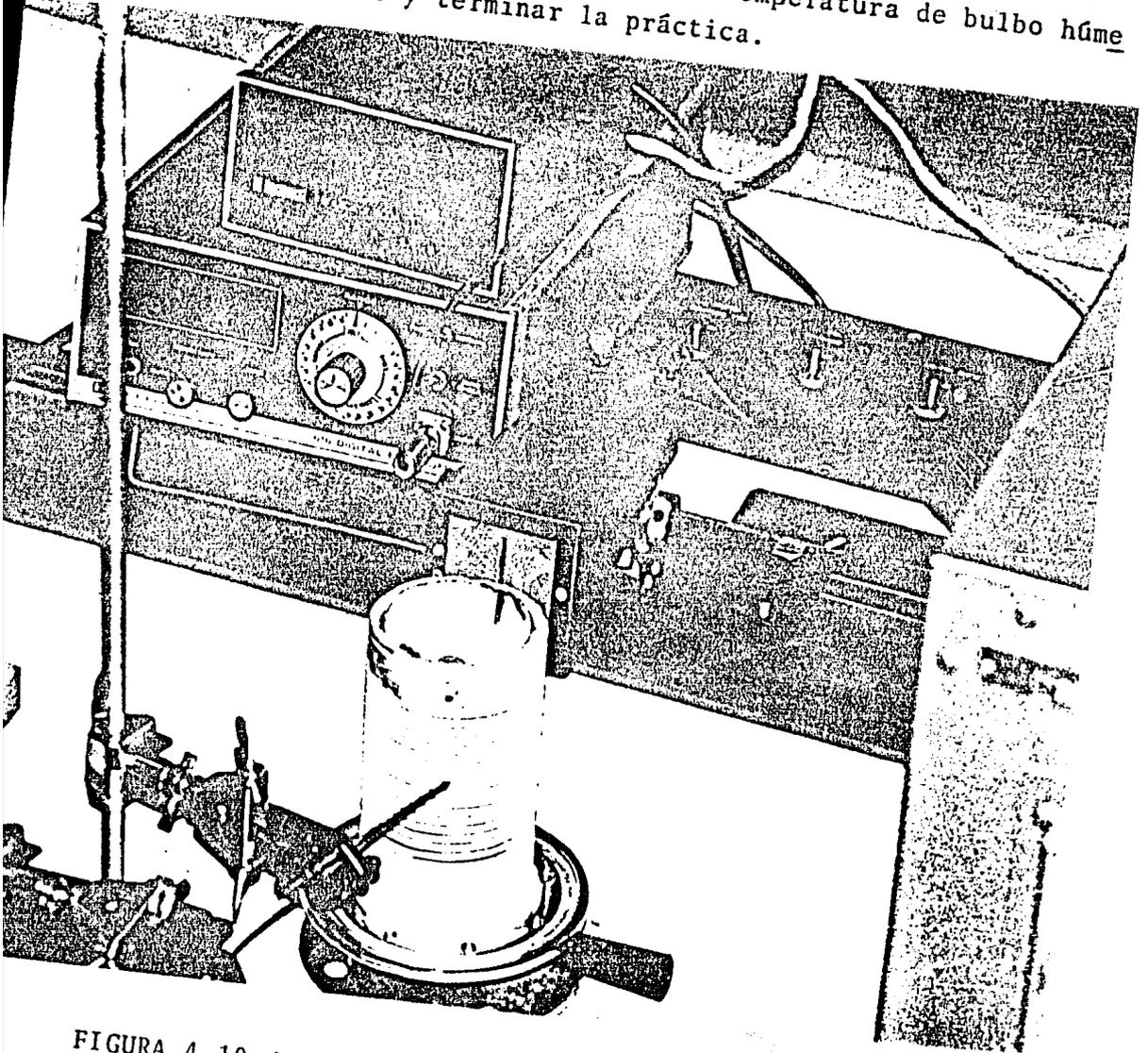


FIGURA 4.10 Montaje del equipo experimental utilizado.

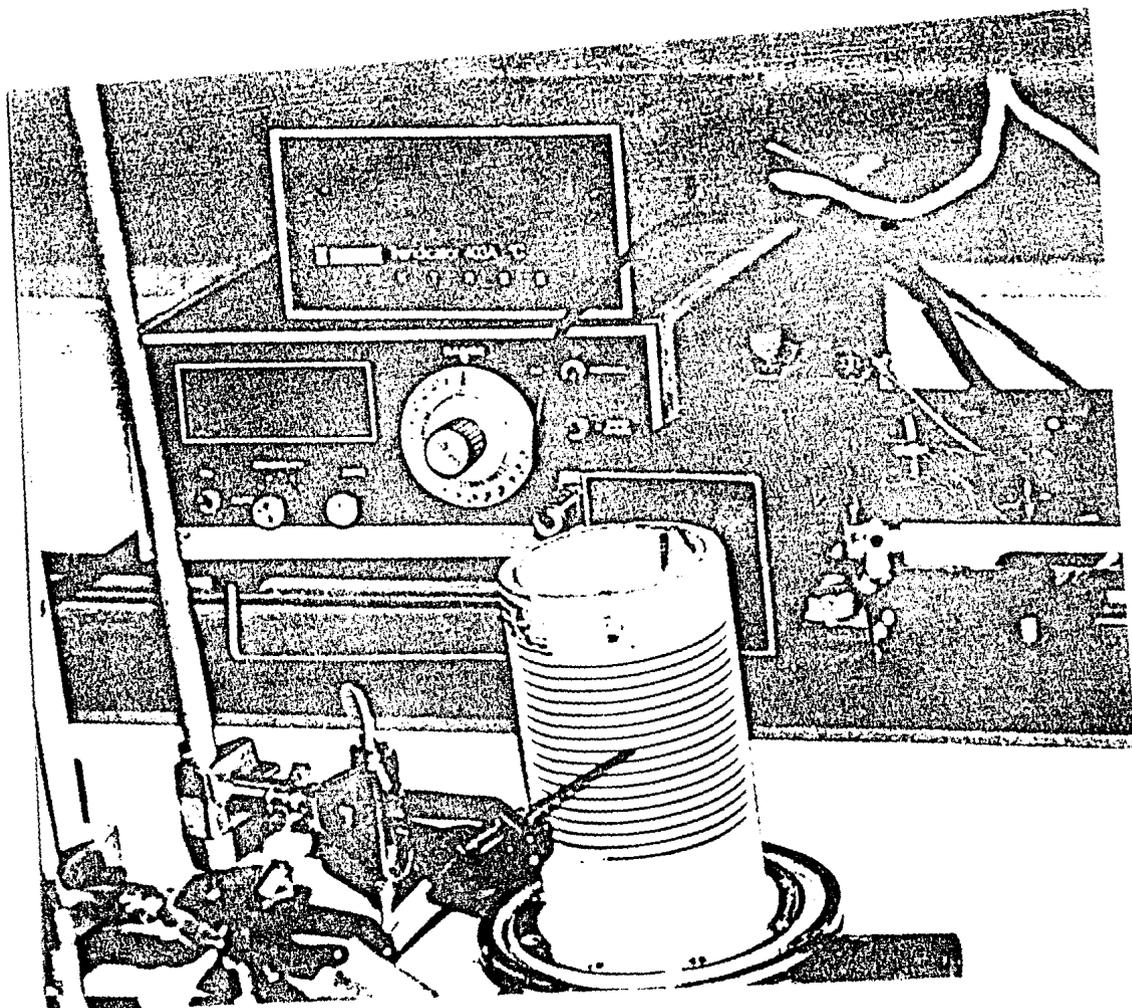


FIGURA 4.11 Colocación de la instrumentación y accesorios complementarios en el experimento.

Preparativos. Se ajustó a la posición mínima de su base, la altura de la fuente cilíndrica de calor radiante, colocándose la termopila como sensor biaxial sobre el carril más largo, enfocándola perpendicularmente a la fuente de radiación térmica.

Se colocó el reflector frontal a la termopila con su rendija paralelamente al eje vertical de la fuente cilíndrica de calor radiante, fijándose el termopar al centro de la cara posterior de dicha fuente, (utilizándose para ello un soporte universal).

Metodología. A continuación se enumeran los pasos efectuados durante el desarrollo del trabajo experimental.

1. Se suministró la potencia eléctrica de la fuente cilíndrica de calor radiante, permitiéndose que alcanzará su equilibrio térmico, (cuando la temperatura del termopar colocado en el centro de la fuente cilíndrica permanecía constante, se tomaron lecturas del termopar, termopila, voltímetro y amperímetro; anotándose en un registro. Desplazando la termopila hacia otra posición diametral proyectada en la escala lineal del carril mas largo, se registraron los valores de voltaje de termopila en diversos puntos a lo largo del carril (Véase Fig. 4.12)

2. Se tomaron lecturas del medio ambiente, respecto a su temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo.

3. Se graficó el voltaje de termopila como una función de la distancia diametral de la fuente cilíndrica de calor radiante, (Véase Fig. 4.13) proyectada sobre una escala li-

Evaluación. De acuerdo a la Ley de Lambert del coseno, se estipula que la energía radiante E es proporcional al coseno del ángulo de propagación con respecto a la normal de la superficie emisora, expresándose mediante la ecuación:

$$E = E_0 \cos \beta \quad (4.10)$$

Donde: E_0 en la energía radiante en la dirección normal a la superficie emisora. El ángulo de propagación de la energía radiante respecto a la normal, puede determinarse mediante la relación:

$$\beta = 90 - \alpha \quad (4.11)$$

Donde:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (4.12)$$

La figura resultante, presenta dos curvas; una representada por las lecturas reales, y la otra curva, es la teórica de comparación equivalente, de acuerdo a la Ley de Lambert del coseno. La prueba se realizó con la termopila colocada a su más cercana distancia, respecto a la fuente cilíndrica de calor radiante.

Se colocó una escala sobre el carril de apoyo para referir la posición de la termopila, conforme al diámetro del cilindro; como se ilustra en la (Fig. 4.13)

Para llevar a cabo el desarrollo del trabajo experimental, fue necesaria la realización de diversas pruebas para la recopilación de los datos, los cuales se compararon para obtener resultados más precisos.

A continuación se presentan los valores experimentales en diversas tablas, las cuales indican las condiciones y datos obtenidos.

La Tabla 4.14 enlista los datos de temperatura de la fuente, en relación a la potencia eléctrica de suministro así como el tiempo transcurrido en cada medición.

La Tabla 4.15 presenta una relación entre las mediciones del voltaje medio de la termopila en milivolts, respecto la posición de dicho sensor en la escala del carril, así como una comparación con los valores teóricos calculados -- del voltaje de termopila y la diferencia entre estos y las lecturas reales. En esta tabla, el error medio E , sirve únicamente para indicar si en promedio, los valores teóricos calculados, (pronósticos) están atrasados o adelantados con respecto a las lecturas reales, es decir, menores o mayores a estos respectivamente. El error medio, es definido como:

$$E = \text{pronóstico} - \text{datos reales}$$

Esto establece que si \bar{E} es negativo, los pronósticos en promedio estuvieron atrasados y si \bar{E} es positivo, indica que los pronósticos en promedio, estuvieron adelantados. La Fig. 4.12, presenta las curvas obtenidas experimentalmente y teóricamente para una misma posición.

TABLA 4.13

RELACION DE LAS POSICIONES INDICADAS POR LA ESCALA
DEL CARRIL Y LA POSICION DIAMETRAL DE LA TERMOPILO.

Marca s/escala del riel p.la posición de la termopila.	DISTANCIA DIAMETRAL EN PULGADAS			
	PULG.	PULG.	PULG.	CM.
18.5/8	0	=0	=0	=0
18 1/2	2/8	=1/8	=0.125	=0.3175
18 1/4	3/8	=3/8	=0.9525	
18	5/8	=5/8	=0.625	=1.587
17 3/4	7/8	=7/8	=0.875	=2.222
17 1/2	9/8	=1 4/8	=1.125	=2.857
17 1/4	11/8	=1 3/8	=1.375	=3.4925
17	13/8	=1 5/8	=1.625	=4.1275
16 3/4	15/8	=1 7/8	=1.875	=4.7625
16 1/2	17/8	=2 1/8	=2.125	=5.3975
16 1/4	19/8	=2 3/8	=2.375	=6.0325
16	21/8	=2 5/8	=2.675	=7.3025
15 3/4	23/8	=2 7/8	=2.875	=7.3025
15 1/8	24/8	=3	=3	=7.62

Los datos que a continuación se enlistan, fueron obtenidos para conocer el voltaje de termopila, referente al estado de equilibrio térmico de la fuente cilíndrica de radiación infrarroja, cuando se había suministrado a esta un voltaje de 142 Volts y una corriente de 5.38 amperes C.A. - correspondientes al 100% de la perilla del transformador variable.

Para obtener estas mediciones, se montó la termopila sobre el carril graduado más largo en la posición central del diámetro de la fuente cilíndrica de radiación infrarroja, proyectado en la escala del carril, enfocándola hacia esta fuente, sin haber colocado el reflector frontal de la termopila.

Las mediciones del voltaje de termopila, se llevaron a cabo utilizando primeramente el electrómetro digital y posteriormente el multímetro digital. Estas operaciones se realizaron con la finalidad de visualizar la variación del voltaje de la termopila con relación al flujo de calor emitido por la fuente cilíndrica, en función del tiempo y determinar el rango de estos valores para los cuales alcanzaba el cilindro emisor el equilibrio térmico.

El hecho de haber empleado ambos medidores digitales de voltaje en la termopila, fue para comparar y utilizar los datos más precisos como referencia.

A continuación, se enlistan las lecturas obtenidas con ambos instrumentos; para las cuales V_1 y V_2 , representan los voltajes de termopila en milivolts medidos con el-

una corriente eléctrica de suministro a la fuente de 5.37 amperes C. A. y un voltaje de 141 volts.

Posteriormente de haber realizado lo anterior, se prosiguió a efectuar una serie de mediciones mediante la termopila con su reflector frontal colocado en el extremo que enfocaba hacia la fuente, colocando dicho sensor a diversas posiciones de la escala del carril donde se proyecta el diámetro de la fuente. La tabla 4.18, proporciona las lecturas obtenidas.

La Tabla 4.19, presenta una relación de las lecturas del voltaje de termopila promedio, respecto a la posición diametral proyectada en la escala del carril donde se desplazaba dicho sensor y los valores calculados mediante el modelo de Lambert del coseno.

La tabla 4.20, conjunta las mediciones experimentales del voltaje de termopila para cada posición diametral de la misma, proyectada sobre la escala del carril, así como del número de veces que se repetía cada valor de este voltaje (frecuencia), el valor que más frecuentemente aparecía en el display del instrumento y el promedio de los datos obtenidos en cada posición.

La tabla 4.21 resume los valores medios de las lecturas del voltaje de termopila para diversas posiciones diametrales proyectadas en la escala del carril, para una temperatura ambiente de 18°C, al finalizar la prueba.

En la tabla 4.22 se presenta una relación entre el prome -

dio de las lecturas del voltaje de termopila y los valores calculados con el modelo de Lambert del coseno para la misma posición diametral proyectada en la escala del carril.

La figura 4.14 ilustra la curva representativa de las lecturas reales así como de los valores teóricos determinados para la misma posición diametral proyectada sobre la escala del carril donde se desplazaba la termopila, en esta gráfica se puede observar el retraso de los valores calculados mediante el modelo de Lambert del coseno y los datos experimentales, lo que corresponde a un error medio absoluto de 0.491 0.647 ó a un error medio porcentual de 13.57%

En la Tabla 4.22 se presentan los valores teóricos calculados mediante el modelo de Lambert del coseno así como las lecturas reales obtenidas para la misma posición de acuerdo a las condiciones siguientes:

Fecha de realización de la prueba

Hora de inicialización de la prueba.

Temperatura ambiente.

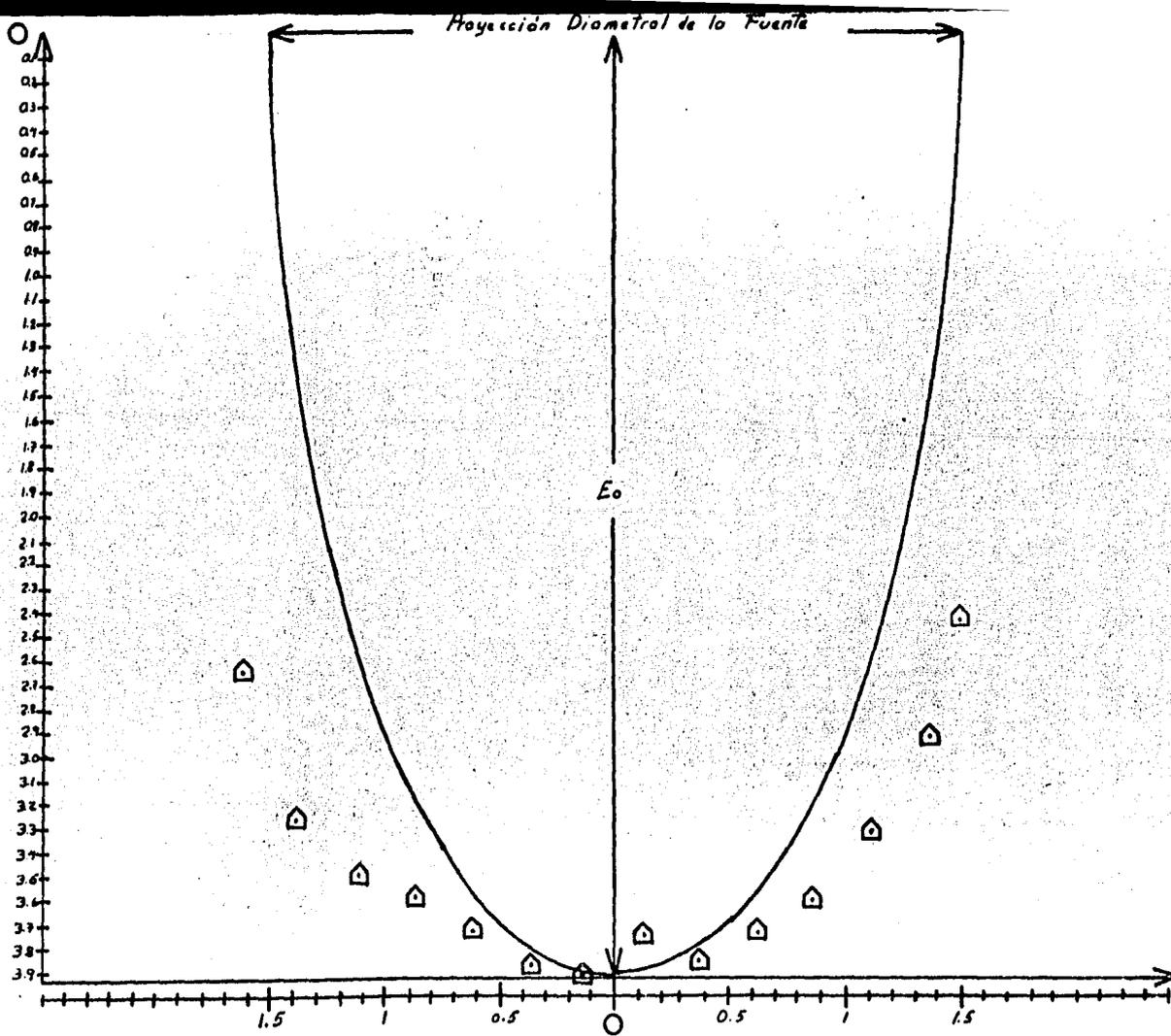


Figura 4.14

Distribución de la energía radiante en función de la distancia diametral proyectada para una fuente cilíndrica de color radiante.

TABLA 4.14 LECTURAS OBTENIDAS DURANTE EL EXPERIMENTO

LECTURA	HORA DE LA MEDICION	TIEMPO DE LA MEDICION (MINUTOS)	TEMPERATURA DE LA FUENTE (°C)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	VOLTAJE SUMINISTRADO VOLTS CA	CORRIENTE SUMINISTRADO AMPERES CA
1	11:45	0	659	16	144	5.4
2	11:47	2	671	16	144	5.4
3	11:48	3	666	16	144	5.4
4	11:49	4	659	16	144	5.4
5	11:50	5	662	16	144	5.4
6	11:51	6	671	16	144	5.4
7	11:52	7	670	16	-	-
8	11:53	8	659	16	-	-
9	11:54	9	669	16	-	-
10	11:55	10	662	16	142	5.4
11	11:56	11	663	16	-	-
12	11:57	12	664	16	143	5.5
13	11:58	13	657	16	143	5.5
14	11:59	14	665	16	143	5.5
15	12:00	15	663	16	143	5.5
16	12:01	16	666	16	143	5.5
17	12:08	23	679	16	143	5.4
18	12:09	24	681	16	143	5.4
19	12:10	25	684	16	143	5.4
20	12:11	26	684	16	143	5.5
21	12:12	27	688	16.5	142	5.5
22	12:13	28	686	16.5	142	5.5
23	12:14	29	676	16.5	143	5.4

TABLA 4.15A VALORES PROMEDIO Y DESVIACION ESTANDAR DEL VOLTAJE DE TERMOPILA

LECTURA	DISTANCIA DIAMETRAL		VOLTAJE DE TERMOPILA $\bar{E} \pm$ (milivolts)
	(pulg)	(cm.)	
1	0	0	2.556 \pm 0.05
2	0.12	0.31	2.923 \pm 0.023
3	0.37	0.95	3.327 \pm 0.102
4	0.62	1.58	3.607 \pm 0.116
5	0.12	0.4	2.715
6	0.875	2.22	3.745 \pm 0.148
7	1.12	2.857	3.852 \pm 0.144
8	1.37	3.49	3.74 \pm 0.452
9	1.62	4.12	3.92 \pm 0.141
10	1.87	4.76	3.86 \pm 0.098
11	2.12	5.39	3.74 \pm 0.014
12	2.37	6.03	3.6 \pm 0.084
13	2.62	6.66	3.505 \pm 0.035
14	2.87	7.3	3.295 \pm 0.07
15	3.12	7.93	2.652 \pm 0.427
16	3.62	9.2	2.375
17	3.82	9.84	2.28
18	4.12	10.47	3.115 \pm 0.141

LECTURA	POSICION PULG.	E CALCULADO milivolts	E REAL milivolts	\bar{e} E CAL - E REAL milivolts	$\bar{e}\%$
1	0	0	2.555	-2.555	1
2	0.125	1.566	2.923	-1.356	0.464
3	0.375	2.592	3.397	-0.734	0.216
4	0.625	3.183	3.607	-0.423	0.117
5	0.875	3.563	3.745	-0.181	0.048
6	1.125	3.795	3.852	-0.057	0.0148
7	1.375	3.906	3.74	-0.166	0.044
8	1.5	3.92	-	-	-
9	1.625	3.906	3.92	-0.706	0.18
10	1.875	3.795	3.86	-0.064	0.016
11	2.125	3.563	3.74	-0.176	0.047
12	2.375	3.184	3.6	-0.416	0.155
13	2.625	2.593	3.505	-0.912	0.26
14	2.875	1.566	3.295	-1.728	0.524
15	3	0	-	-	-
16	3.125	-	2.652	-	-

149

$\bar{e} = -0.79 \pm 0.751 \text{ mv}$
 $\bar{e}\% = 15.757\%$

TABLA 4.18 VOLTAJES DE TERMOPILA EN MILIVOLTS REFERENTES A LA POSICION
INDICADA SOBRE LA ESCALA DEL CARRIL

LECTURA	TEMP. DEL CILINDRO (°C)	MARCA EN LA ESCALA DEL CARRIL	DIST. DIAMETRAL TERMOPILA (pulg) (cm)	Vo H. DE TERMOPILA (mv)	TAMB. (°C)	V	I	HORA
1	679	∅ der		2.52	16	143	5.4	12.08
2	681	∅ der		2.51	16	143	5.4	12.09
3	684	∅ der		2.52	16	143	5.4	12.10
4	684	∅ der	0=0	2.55	16	143	5.5	12.11
5	688	∅ der		2.585	16.5	142	5.5	12.12
6	686	∅ der		2.595	16.5	142	5.5	12.13
7	670	18 ½	0.125=0.3175	2.91	16.5	143	5.4	12.15

TABLA 4.18 VOLTAJE DE TERMOPILA EN FUNCION DE LA POSICION DIAMETRAL INDICADA.

MARCA DE POSICION DE LA TERMOPILA SOBRE LA ESCALA (PULG)	POSICION DIAMETRAL Ac LA TERMOPILA (pulg) (cm)		VOLTAJES DE TERMOPILA (milivolts)	
			MEDIDO CON EL ELECTRO METRO DIGI-- TAL (mv)	MEDIDO CON EL MULTIME TRO DIGI-- TAL (mv)
18 1/2			2.91	3.05
18 1/2	0.125	= 0.3175	2.95	3.1
18 1/2				2.7
18 1/4	0.375	= 0.9525	3.255	3.3
18 1/4			3.40	2.0
18	0.625	= 2.587	3.525	3.4
18			3.69	3.2
18 3/4			2.715	1.5
18 3/4				
17 3/4	0.875	= 2.22	3.64	3.4
17 3/4			3.85	3.5
17 1/2	1.125	= 2.857	3.75	2.5
17 1/2			2.955	3.5
17 1/4	1.275	= 3.492	4.04	3.6
17 1/4			3.4	3.5
17	1.625	= 4.127	3.82	3.6
17			4.02	3.5
16 3/4	1.875	= 4.762	3.79	3.5
16 3/4			3.93	3.5
16 1/2	2.125	= 5.397	3.73	3.4
16 1/2			3.75	3.3
16 1/4	2.375	= 6.032	3.54	3.3
16 1/4			3.66	3.2
16	6.625	= 6.667	3.48	3.2
16			3.53	3.1
15 3/4	2.875	= 7.302	3.345	2.9 2.8
EI 15 3/4			3.245	3.1
15 1/2	3.125	= 7.9375	2.935	-
15 1/2			2.955	-
15 1/4	3.375	= 8.5725	-	-
15 1/4			-	-
15	3.625	= 9.2	2.375	
15				
14 3/4	3.875	= 9.8425	2.280	
14 3/4				
Ø 179	0	4.125	3.015	2.9
Ø 179			3.215	2.5
Ø der	0		2.67	2.8
Ø der			2.5	2.7

Tamb = 18°C al finalizar las pruebas.

TABLA 4.19 RELACION ENTRE LOS VALORES TEORICOS CALCULADOS Y LOS DATOS EXPERIMENTALMENTE OBTENIDOS DEL VOLTAJE DE TERMOPILO CON RESPECTO A LA POSICION DIAMETRAL PROYECTADA.

X (pulg)	Er (mv)	X (pulg)	Er (mv)
0	3.92	0	2.555625
0.125	3.9063652	0.125	2.9233333
0.25	3.8651721	0.375	3.3275
0.375	3.7955237	0.625	3.6075
0.5	3.6958114	0.875	3.745
0.625	3.5635126	1.125	2.8525
0.75	3.3948196	1.275	3.74
0.875	3.1839528	1.625	3.92
1	2.9217955	1.875	3.86
1.125	2.5928363	2.125	3.74
1.25	2.1668615	2.375	3.6
1.375	1.5666383	2.625	2.505
1.5	0	2.875	3.295

TABLA 4.20 DATOS EXPERIMENTALES DEL VOLTAJE DE TERMOPILO RESPECTO A LA POSICION DIAMETRAL

MARCA SOBRE LA ESCALA DEL CARRIL PARA LA POSICION DE LA TERMOPILO (pulg.)	VOLTAJES DE TERMOPILO EN ESA POSICION DEL RIEL (milivolts)	FRECUENCIA DE CADA LECTURA DE VOLTAJE	VALOR DE VOLTAJE PARA LA MAYOR FRECUENCIA OBTENIDA (milivolts)	PROMEDIO DE VOLTAJES DEL TOTAL DE LECTURAS (milivolts)	NUM. TOTAL DE LECTURAS PARA UNA POSICION DE TERMOPILO
18 5/8	1.78	3	1.79	1.795	4
	1.79	5			
	1.80	4			
	1.81	1			
18 1/2	1.78	1	1.80	1.795	4
	1.79	4			
	1.80	6			
	1.81	5			
18 1/4	1.94	3	1.95	1.95	3
	1.95	8			
	1.96	5			
18	2.08	6	2.09	2.09	3
	2.09	8			
	2.10	2			
17 3/4	2.21	4	2.22	2.22	3
	2.22	9			
	2.23	2			
	2.32	1			
17 1/2	2.33	3	2.34	2.345	6
	2.34	6			
	2.35	3			
	2.36	1			
	2.37	1			
17 1/4	2.42	2	2.44	2.435	4
	2.43	5			
	2.44	6			
	2.45	1			
17	2.47	5	2.48	2.48	3
	2.48	7			
	2.49	2			
16 3/4	2.45	1	2.46	2.465	4
	2.46	4			
	2.47	4			
	2.48	4			
16 1/2	2.40	4	2.41	2.41	3
	2.41	8			
	2.42	3			
16 1/4	2.33	2	2.34	2.34	3
	2.34	7			
	2.35	4			
16	1.95	1	1.97	1.975	6
	1.96	2			
	1.97	3			
	1.98	2			
	1.99	2			
	2.00	3			
15 3/4	1.94	7	1.95	1.955	4
	1.95	5			
	1.96	1			
	1.97	1			
15 5/8	1.91	1	1.92	1.92	3
	1.92	8			
	1.93	7			

TABLA 4.21

DISTANCIA DIAMETRAL (PULGADAS) = (CENTIMETROS)		VOLTAJE TERMOPILA (MILIVOLTS)
0	0	1.792
1/8 = 0.125	0.317	1.797
3/8 = 0.375	0.952	1.95
5/8 = 0.625	1.587	2.09
7/8 = 0.875	2.22	2.22
1 1/8 = 1.12	2.85	2.342
1 3/8 = 1.37	3.49	2.437
1 5/8 = 1.62	4.12	2.48
1 7/8 = 1.87	4.76	2.467
2 1/8 = 2.12	5.39	2.41
2 3/8 = 2.37	6.03	2.34
2 5/8 = 2.62	6.66	1.98
2 7/8 = 2.87	7.3	1.952
3	7.62	1.92

TABLA 4.22

X	E_T	E_R	$E_t - E_R$	et
1.5	0	1.792	-1.792	1
1.375	0.9911385	1.797	-0.8658615	0.4818
1.125	1.6403658	1.95	-0.3096342	0.1587
0.875	2.0143375	2.09	-0.0756625	0.0362
0.625	2.2544672	2.22	0.0344672	0.01552
0.375	2.4012497	2.342	0.0592497	0.0252
0.125	2.4713739	2.437	0.0343739	0.014105
0	2.48	-	-	-
0.125	2.4713739	2.48	-0.0086261	0.00347
0.375	2.4012497	2.467	-0.0657503	0.0266
0.625	2.2544672	2.41	-0.1555328	0.064536432
0.875	2.0143375	2.34	-0.3256625	0.139172009
1.125	1.6403658	1.98	-0.3396342	0.1715322474
1.375	0.9911385	1.952	-0.9608615	0.492244621
1.5	0	1.92	-1.92	1

$$\bar{E} = 0.491716 + 0.6469214 = 0.135756692$$

TABLA 4.23 VOLTAJE DE TERMOPILA
MEDICIONES CENTRALES

LECTURA	VOLTAJE DE TERMOPILA	NUMERO DE VECES REPETIDAS
1	1.41	1
2	2.42	9
3	2.43	11
4	1.44	3

Voltaje medio de termopila = 2.425 mv

El valor del voltaje de termopila proporcionado por la tabla 5.15 que presentó mayor repetibilidad fue de 2.43

A continuación se enlistan los voltajes de termopila para una posición central diametral proyectada sobre la escala del carril en la tabla 4.24

Hora de las mediciones 12.52 Hrs.

Tiempo en que se realizó la medición 1'5.1"

TABLA 4.24 VOLTAJES DE TERMOPILA

Num. de Lect.	Voltaje de Termopila	Num. de veces repetidas
1	2.41	1
2	2.42	13
3	2.43	12

A continuación se enlistan los voltajes de termopila para una posición central diametral proyectada sobre la escala del carril en la tabla 4.24

Hora de mediciones 12'52 Hrs.

Tiempo en que se realizó la medición 1'5.1"

TABLA 4.24 VOLTAJES DE TERMOPILA

Núm.de Lect.	Voltaje de termopila	Num. de veces repetidas
1	2.41	1
2	2.42	13
3	2.43	12

Promedio del voltaje de termopila = 2.42
Este valor es el que también se reportó más frecuentemente.

La tabla 4.25 presenta los valores de temperatura para - - los cuales se tuvieron las mismas condiciones que las anteriores.

Tiempo en que se realizaron las mediciones 1'0.5"

TABLA 4.25 TEMPERATURA DE LA FUENTE

LECTURA	TEMPERATURA DE LA FUENTE (°C)	NUMERO DE VECES QUE SE REPITE CADA LECTURA
1	340	4
2	341	5
3	342	6
4	343	3
5	345	1
6	346	1

TABLA 5.17 TEMPERATURA DE LA FUENTE

Num.de Lect.	Temperatura de la fuente	Num.de veces que se repitió cada lectura
1	340	4
2	341	5
3	342	6
4	343	3
5	345	1
6	346	1

La lectura de temperatura que más frecuentemente se repitió durante la medición fue de 342°C

Promedio de las lecturas de temperatura obtenidas: 342.833°C
 Durante estas mediciones se observó que cuando la temperatura de la fuente cilíndrica grande de radiación infrarroja alcanzó los 345 y 346°C el voltaje de termopila correspondiente fue de 2.46 y 2.47 mv. y aún hasta de 2.48 mv., cuando las cuatro puertas de acrílico del equipo permanecían cerradas. La temperatura ambiente al terminar estas mediciones fue de 27°C.

A continuación se resumen en la tabla 4.26 los valores de temperatura y voltaje, obtenidos durante las diversas pruebas efectuadas, enlistando también el tiempo durante el cual se realizaron las mediciones y el tipo de lectura obtenida, para una posición central de la distancia diametral proyectada en la escala del carril de 1.5 pulg.

TABLA 4.26 VOLTAJE DE TERMOPILA Y TEMPERATURA DE LA FUENTE

LECTURA	TEMPERATURA DE LA FUENTE	TIEMPO DE LA MEDICION	VOLTAJE DE TERMOPILA	TIPO DE LECTURA
1	-	1'1.35"	2.425 2.43	Promedio más repetido
2	349 350	59"	- -	- -
3	-	1'5.1 "	2.42 2.434	Promedio más repetido
4	342 342.833	1'0.5 "	- -	Promedio más repetido
5	345 346	-	2.46 2.47 2.48	Observado

En la tabla 4.27 se presentan los promedios de los valores proporcionador por la tabla 4.26, así como el tipo de promedio obtenido.

Una curva característica de las lecturas reales y la otra curva teórica equivalente.

En la Figura 4.13 se proporcionan dos curvas análogas a las anteriores, las cuales fueron obtenidas a partir del manual de prácticas experimentales proporcionado por el fabricante del equipo de experimentación de radiación térmica.

De los datos proporcionados por la table 4.27 se tienen los siguientes valores representativos para la fuente, operándose en las condiciones anteriormente mencionadas durante las mediciones realizadas.

Voltaje de Termopila = 2.42 mv.

Temperatura de la fuente = 346°C

% de la perilla del transformados variable+ 100

Posición de la termopila = 17 1/8 equivalente a 1.5 pulg.

En la tabla 4.28 se proporcionan las lecturas obtenidas durante mediciones realizadas en las siguientes condiciones:

Las pruebas se realiz aron con una de las puertas --- abiertas, la que daba al tablero de control del equipo L la perilla del transformador variable se colocó en la posición del 100% de su escala.

TABLA 4.27 VOLTAJE DE TERMOPILA Y TEMPERATURA DE LA FUENTE PROMEDIO

LECTURA	VOLTAJE DE LA TERMOPILA	TEMPERATURA DE LA FUENTE	TIPO DE PROMEDIO OBTENIDO
1	2.495	345.916	Promedio de lecturas reales
2	2.425	346	más repetida
3	2.427	345.958	Real y más repetida

TABLA 4.28 LECTURAS DE VOLTAJE DE TERMOPILO Y TEMPERATURA DEL CILINDRO.

La puerta frontal, la que da hacia donde operan los controles del sistema permaneci6 abierta durante la prueba.
La perilla permanece en la marca del 100% de la capacidad total del transformador.

POSICION SOBRE RIEL (pulgada)	DISTANCIA DIAMETRAL (pulgada)	VOLTAJE DE TERMOPILO (mv)	FREC.	VOLT. PROM. DE TERMOPILO (mv)	TEMP. DEL CILINDRO (oc)	FREC.	TEMP. PROM DEL CILINDRO (oc)	TAMB. (oc)
17 1/8	1.5=1 1/2	2.50	1	2.51	315	1	324.375	21.7
		2.51	8		316	2		
		2.52	7		317	3		
		318	3					
		319	2					
		322	1					
		323	1					
		324	1					
		325	2					
		330	2					
		331	1					
		332	1					
		333	2					
		321	1					
		326	2					
338	1							
ext. izq. 0	0	1.84	1	1.8555	328	1	336.8823529	21.5
		1.85	12		329	1		
		1.86	13		331	1		
		1.87	2		332	1		
		333	1					
		334	1					
		335	1					
		336	3					
		337	4					
		338	6					
		339	3					
		340	1					
		341	1					
		342	2					
		343	2					
344	4							
345	2							

MARCA DE POSICION SOBRE RIEL (pulgadas)	VOLTS. DE TERMOPILA (milivolts)	FREC.	PROMEDIO DE VOLTS. DE TERMOPILA (milivolts)	TIEMPO ESTIMADO PARA LA MEDICION	TEMPS. DEL CILINDRO (°C)	FRECS. DE TEMP.	PROM. DE TEMPS. (oc)	TIEMPO ESTIMADO PARA LAS MEDICIONES	TEMP. AMB. (oc)	V VOLTS. AC	I AMPS. AC
15 3/4	1.93	3			319	1					
	1.94	9	1.94	34"	320	2	332.52		21	143	5.38
	1.95	6			321	2		1'32.9"		143	5.4
					322	1					
					323	1					
					324	2					
					325	2					
					326	3					
					327	1					
					330	1					
					331	1					
					332	1					
					333	1					
					334	1					
					335	1					
					336	2					
					337	1					
					338	2					
					339	2					
					341	1					
					342	2					
				343	2						
				344	1						
				345	2						
				346	2						
16	2.21	1			324	5					
	2.22	4			325	3				5.4	5.4
	2.23	9	2.225	47.3"	326	3			21		
	2.24	4			327	2	327.5	1'31"		143.8	5.38
					328	1					
					329	3					
					330	1					
					331	1					
16 1/4	2.37	7			336	1					
	2.38	13	2.385	59.4"	337	1					
	2.39	6			338	4					
	2.40	2			339	4	339.5	1'2"	21	5.4	143
					340	2					
					341	5					
					342	5					
					343	4					
16 1/2	2.42	3			309	1					
	2.43	8	2.435	1'7"	310	2					
	2.44	10			311	1					
	2.45	2			312	1					
					313	4	313	1'2"	21	5.3	143
					314	4					
					315	3					
					316	1					
				317	1						

MARCA DE POSICION SOBRE RIEL (pulgadas)	VOLTS. DE TERMOPILA (millivolts)	FREC.	PROMEDIO DE VOLTS DE TERMOPILA (millivolts)	TIEMPO ESTIMADO PARA LA MEDICION	TEMPS. DEL CILINDRO (°c)	FRECS. DE TEMP.	PROM. DE TEMPS. (cc)	TIEMPO ESTIMADO	Tu (cc)	V volts AC	I amps AC
16 3/4	2.50	1	2.515	29.9"	318	2	321	29'8"	26	5.39	143
	2.51	4									
	2.52	5									
	2.53	3									
					322	2					
					323	1					
				324	1						
17	2.56	1	2.57	30.5"	335	2	339.666	31"	24	144	5.39
	2.57	7									
	2.58	6									
					337	3					
					338	3					
					339	2					
					340	1					
					341	1					
		345	1								
				346	1						
17 1/4	2.48	5	2.495	29.2"	334	1	336.5	31"	24	143	5.39
	2.49	6									
	2.50	1									
	2.51	1									
					337	2					
					338	1					
		339	2								
17 1/2	2.43	1	2.445	30.4"	334	1	336.5	30.6"	23.5	143	5.38
	2.44	7									
	2.45	6									
	2.46	1									
					337	2					
		338	3								
		339	1								
17 3/4	2.41	7	2.415	29.9"	329	1	332	30.16"	20	142	5.38
	2.42	7									
					330	1					
					331	1					
					332	1					
					333	2					
					334	2					
		335	1								
18	2.27	2	2.285	30.6"	326	1	332.333	30.4"	20	144	5.4
	2.28	4									
	2.29	4									
	2.30	2									
					329	2					
					330	1					
					331	1					
					333	1					
					334	1					
					335	1					
					336	1					
					339	1					
		340	1								

MARCA DE POSICION SOBRE RIEL (pulgadas)	VOLTS. DE TERMOPILA (milivolts)	FREC. DE VOLT.	PROMEDIO DEL VOLT. (milivolts)	TIEMPO DE MEDICION	TEMP. DEL CILINDRO (°c)	FREC. DE TEMP.	PROM. DE TEMP. (°c)	TIEMPO DE MED.	TAMB. (°c)	V Volts	I Amp. AC		
18 1/4	2.08	5	2.09	29.8"	306	1	310.66	34.5"	34.5	143	5.4		
	2.09	5			307	1						308	1
					310	1						311	1
					312	2						313	1
					314	1						315	1
18 1/2	1.68	5	1.68	43"	314	1	322.25	30.2"	21	143	5.4		
	1.69	7			315	1						316	2
	1.70	1			318	1						319	1
					322	1						324	1
					325	1						327	1
					328	1						329	2
					330	1							
18 5/8	1.59	1	1.605	30.5"	348	2	350	31.2"	20	144	5.2		
	1.60	3			349	6							
	1.61	4			350	3							
	1.62	2			351	1							
					352	1							

TABLA 4.29 PROMEDIO Y DESVIACION DE LAS LECTURAS EXPERIMENTALES

VOLTAJE DE TERMOPILA EN MILIVOLTS	DISTANCIA DIAMETRAL
1.855 + (0.01292)	1.5
1.94 $\bar{+}$ (0.01)	1.375
2.225 \pm (0.0728)	1.125
2.385 \pm (0.0129)	0.875
2.435 \pm (0.0129)	0.625
2.515 \pm (0.0129)	0.38
2.57 \pm (0.0141)	0.13
2.495 \pm (0.01288)	0.12
2.445 \pm (0.012884)	0.37
2.415 \pm (0.007)	0.62
2.285 \pm (0.0129)	0.87
2.09 \pm (0.01)	1.12
1.68 \pm (0.01)	1.37
1.605 \pm (0.02236)	1.5

$$E_0 = 2.58 \text{ mv}$$

$$E = 2.58 \text{ COS } \phi$$

$$\phi = 90 - \alpha$$

$$= \text{COS}^{-1} \left(\frac{X}{1.15} \right)$$

X varía de 0. a 1.5 pulg.
para una variación de X
de 1/8

TABLA 5.22 VALORES CALCULADOS MEDIANTE EL MODELO DE
LAMBERT DEL COSENO

X PULG.		θ	E (mv)
0	90	0	2.58
0.125	85.219	4.781	2.571
0.25	80.405	9.595	2.5439
0.375	75.522	14.478	2.498
0.5	70.528	19.472	2.4324
0.625	65.375	24.625	2.345
0.75	60	30	2.234
0.875	54.314	35.686	2.095
1	48.189	41.811	1.922
1.125	41.409	48.591	1.706
1.25	33.557	56.443	1.426
1.375	23.556	66.444	1.031
1.5	0	90	0

TABLA 4.30 VALORES TEORICOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MODELO DE LAMBERT DEL COSENO

X DISTANCIA DIAMETRAL EN PULGADAS	VOLTAJE DE TERMOPILA TEORICO EN MILIVOLTS
1.5	0
1.375	1.031
1.25	1.476
1.125	1.426
1.125	1.706
1	1.922
0.875	2.095
0.75	2.234
0.625	2.345
0.375	2.432
0.25	2.498
0.125	2.543
0	2.58
0.125	2.571
0.25	2.5439
0.5	2.498
0.625	2.4324
0.875	2.234
1	2.05
1.125	1.922
1.25	1.706
1.375	1.426
1.5	1.031
	0

TABLA 4.31 ERRORES MEDIO ABSOLUTO Y MEDIO PORCENTUAL ENTRE
LECTURAS REALES Y VALORES TEORICOS

DISTANCIA DIAMETRAL PROYECTADA EN (PULGADAS)	E_{Real}	$E_{teórico}$	$E_t - E_R$
1.5	1.855	0	-1.855
1.375	1.94	1.031	-0.909=0.46855
1.125	2.225	1.706	-0.519=0.23325
0.875	2.385	2.095	-0.29 =0.12159
0.625	2.435	2.345	-0.09 =0.03696
0.38	2.515	-	-
0.13	2.57	-	-
0.125	2.495	2.571	0.076=0.03046
0.375	2.445	2.498	0.053=0.02167
0.625	2.415	2.345	-0.07 =0.02898
0.875	2.285	2.095	-0.19 =0.08315
1.125	2.09	1.706	-0.384=0.18373
1.375	1.68	1.031	-0.649=0.38631
1.5	1.605	0	-1.605

$$\bar{E} = 0.5575 \pm 0.6100268$$

$$e\% = 0.1594683 \pm 0.1591464\%$$

TABLA 4.33 DATOS EXPERIMENTALES AL 35%

X (pulg.)	E (mv)	FREC.	E _{prom.} (mv)	TIEMPO	Ta (°C)	V volts	I amps. AC
extremo izquierdo	.35	7					
	.36	7	0.36 ±0.01	31.5"	23.5	50	1.9
	.37	7					
16	0.36	5					
	0.37	12	0.385±0.0129	30"	23.5	50	1.9
	0.38	12					
	0.39	4					
16 1/4	0.38	9					
	0.39	8	0.385±0.01	30.5"	24	50	1.8
	0.37	3					
16 1/2	0.38	8	0.38 ±0.01	31.1"	24	50	1.8
	0.39	6					
	0.37	4					
16 3/4	0.38	7	0.38 ±0.01	32.4"	24	50	1.8
	0.39	3					
	0.38	5					
17	0.39	8	0.39 ±0.01	30.2"	24	50	1.8
	0.40	3					
	0.39	2					
17 1/8	0.40	8	0.40 ±0.01	31.2"	24	53	1.9
	0.41	5					
	0.40	9					
17 1/4	0.41	8	0.405±0.005	30.5"	24	52	1.9
	0.38	2					
17 1/2	0.39	5	0.39 ±0.01	31.4"			
	0.40	5					
	0.38	3					
	0.39	8					
17 3/4	0.40	6	0.395±0.0129	38.2"	24.5	53	2
	0.41	1					
	0.37	4					
	0.38	6					
18	0.39	3	0.385±0.0129	31"	24.5	53	1.9
	0.40	1					
	0.35	1					
18 1/4	0.36	7	0.36 ±0.01	30.8"	24.5	53	2
	0.37	6					
	0.33	6					
18 1/2	0.34	8	0.34 ±0.01	35.9"	25	54	2
	0.35	1					
	0.31	1					
extremo derecho	0.32	10	0.325±0.01	35.9"	25	54	2
	0.33	10					
	0.34	1					

TABLA 4.34 PROMEDIO DEL VOLTAJE DE TERMOPILA Y TEMPERATURA DE LA FUENTE (35%)

DISTANCIA DIAMETRAL EN PULG.	VOLTAJE TERMOPILA EN mv	TEMPERATURA EN EL CENTRO °C
1.5	0.295	148
1.375	0.32	143.5
1.125	0.345	147.5
0.875	0.345	142.5
0.625	0.37	150
0.375	0.38	147
0.125	0.375	145.5
0	0.40	146
2.125	0.385	146.5
0.375	0.355	142
0.625	0.345	139
0.875	0.335	137
1.125	0.32	140
1.375	0.29	141
1.5	0.28	143.5

$$E = 0.40 \cos \theta$$

$$\theta = 90 - \alpha$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{x}{1.5} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{x}{1.5} \right)$$

TABLA 4.35 VALORES CALCULADOS (al 35%)

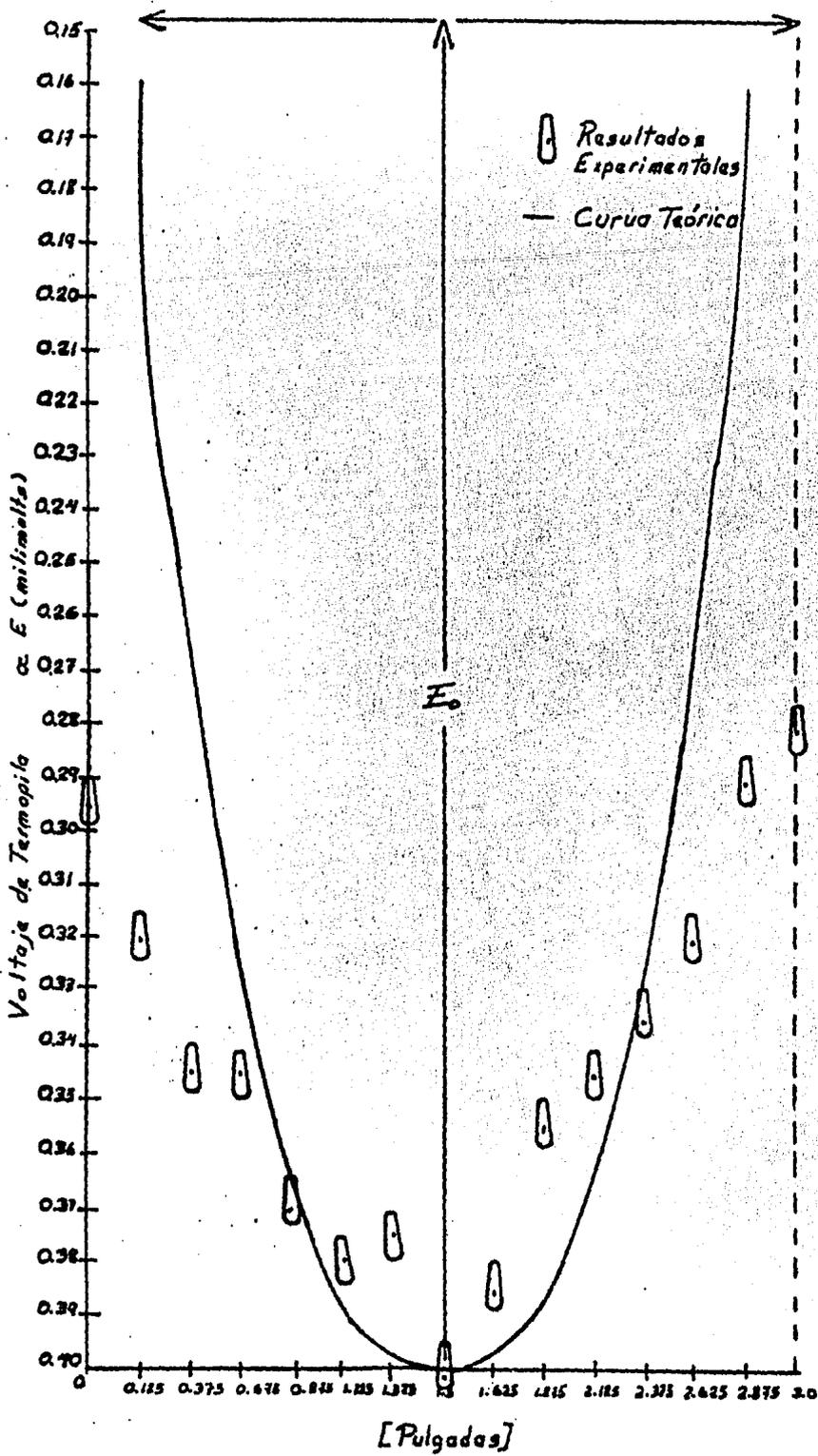
$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{x}{1.5} \right)$	$\theta = 90 - \alpha$	$E = 0.40 \cos \theta$	X
90	0	0.40	0
85.22	4.78	0.3986	0.125
75.522	14.47	0.3872983	0.375
65.375	24.624	0.3636737	0.675
54.314	36.686	0.3248931	0.875
41.409	48.59	0.2645751	1.125
23.556	66.43	0.159861	1.375
0	90	0	1.5

TABLA 4.37 VALORES CALCULADOS Y MEDIDOS PARA EL 35% DEL SUMINISTRO ELECTRICO A LA FUENTE

X	E_t	E_R	$E_t - E_R$	$e\%$
1.5	0	0.295	-0.295	-
1.375	1.375	0.32	-1.055	-
1.125	0.2645751	0.345	-0.099249	0.2876783
0.625	0.3636237	0.37	-0.0063763	0.0172332
0.375	0.3872983	0.38	0.0072983	0.0192061
0	0.40	0.40	0	0
0.125	0.3986	0.385	0.0136	0.0353242
0.375	0.3872983	0.355	0.0322983	0.0909811
0.625	0.3636237	0.345	0.0186237	0.0539817
0.875	0.3248931	0.335	-0.0051069	0.0152445
1.125	0.2645751	0.32	-0.0554249	0.1732028
1.375	0.159861	0.29	-0.130139	0.4487552
1.5	0	0.28	-0.28	-

$E = 0.143 \pm 0.299$ mv error medio absoluto

$e\% = 12.684\%$ error medio porcentual



[Pulgadas]
 Figura 4.17

TABLA 4.38 RELACION DE DATOS EXPERIMENTALES

X = Distancia diametral en (pulgadas)

E = Voltaje de Termopila en (milivolts)

X	E	X	E
0	1.792	1.5	1.792
0.125	1.797	1.375	1.797
0.375	1.95	1.125	1.95
0.625	2.09	0.875	2.09
0.875	2.22	0.625	2.22
1.12	2.342	0.38	2.342
1.87	2.437	0.13	2.437
1.5	2.51	0.12	2.51
2.12	2.41	0.37	2.48
2.37	2.34	0.62	2.41
2.62	1.98	0.87	2.34
2.87	1.952	1.12	1.98
3	1.92	1.5	1.92

De los datos anteriores se tiene

 $r = 1.5$ pulg. $E_0 = 2.51$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{1}{1.5} \right) \quad (1)$$

$$\phi = 90 - \alpha \quad (2)$$

$$E = 2.51 \cos \phi \quad (3)$$

Sustituyendo en estas ecuaciones los valores de X se tienen los siguientes valores:

TABLA 4.39 VALORES CALCULADOS TEORICAMENTE

X	ϕ	E
0.1	90	0
0.75	80.405	9.595
0.5	70.528	19.472
0.75	60	30
1	48.189	41.811
1.25	33.557	56.443
1.5	0	90

TABLA 4.40 COMPARACION ENTRE LOS VALORES CALCULADOS Y LOS DETERMINADOS EXPERIMENTALMENTE

E_T	X	E_{real}	$E_t - E_r$	E%
0	1.5	1.792	-1.792	1
0.2091667	1.375	1.797	-1.5878333	0.8836021
0.4183333	1.25	-	-	-
0.6275000	1.125	1.95	-1.3225	0.6782051
0.8366667	1	-	-	-
1.0458333	0.875	2.09	-1.0441667	0.499013
1.2550000	0.75	-	-	-
1.4641667	0.625	2.22	-0.7558333	0.3404655
1.6733333	0.5	-	-	-
1.8825000	0.375	-	-	-
	0.38	2.342	-	-
2.0916667	0.25	-	-	-
	0.13	2.437	-	-
2.3008333	0.125	2.51	-0.2091667	0.083333
2.51	0	-	-	-
2.3008333	0.125	-	-	-
2.0916667	0.25	-	-	-
1.8825000	0.375	2.48	-0.5975	0.2409274
1.6733333	0.5	-	-	-
1.4641667	0.625	2.41	-0.9458333	0.3424618
1.2550000	0.75	-	-	-
1.0458333	0.875	2.34	-1.2941667	0.5530627
0.8366667	1	-	-	-
0.6275000	1.125	1.98	-1.3525	0.6831818
0.4183333	1.25	-	-	-
0.2091667	1.375	-	-	-
0	0	1.92	-1.92	-

$$E = 1.165 \pm 0.518 \text{ mv}$$

$$e = 48.387 \%$$

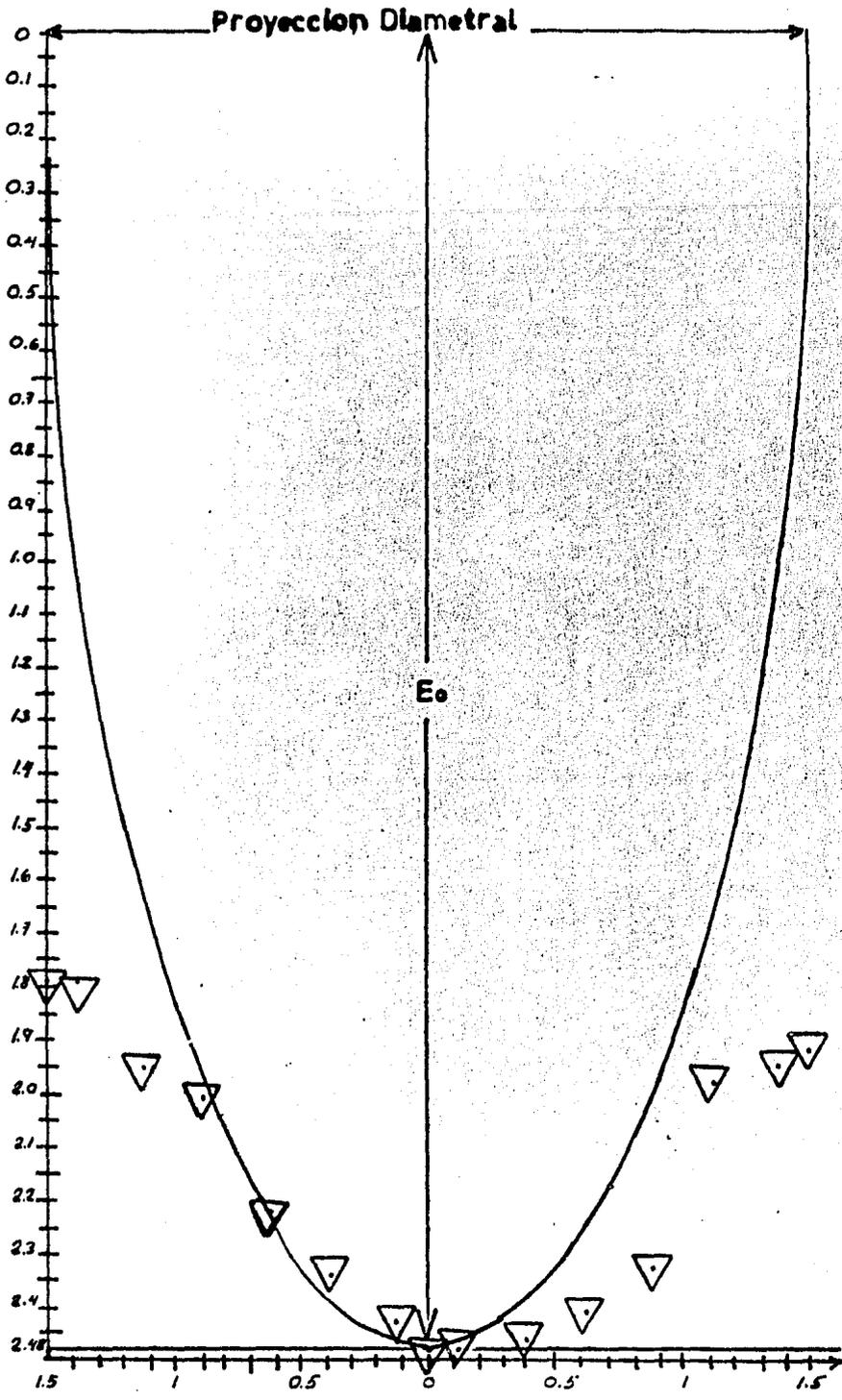


Figure 4.15

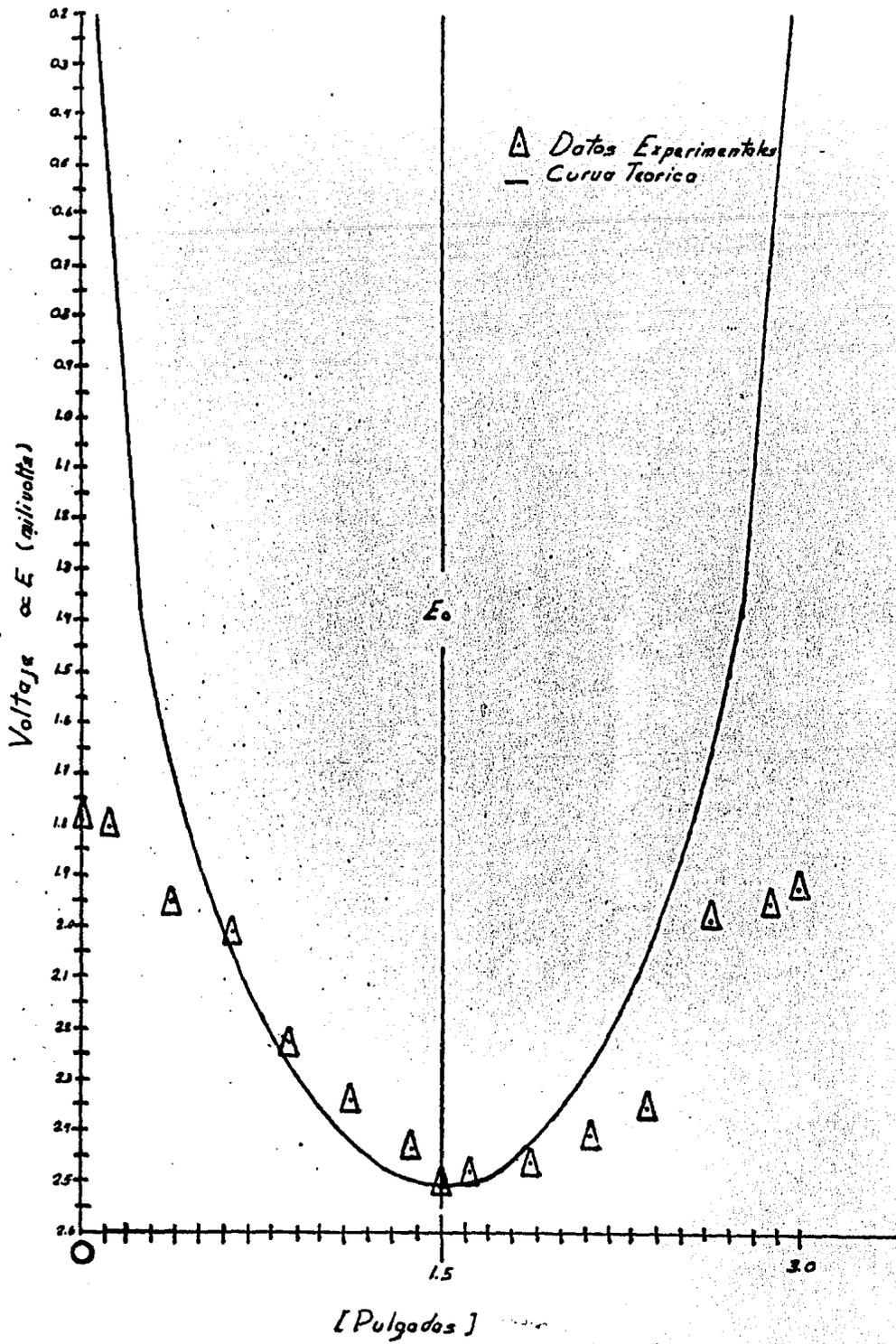


Figura 4.18

TABLA 4.41 ERRORES MEDIOS ABSOLUTOS Y MEDIOS PORCENTUALES DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS

\bar{E}	CAPACIDAD DE LA FUENTE	FECHA	e%
0.729172	100%	26/II/82	
0.491716	100%	4/V/82	13.57
1.165509			48.38
0.5575	100%		15.94
0.1431764			12.68

OBSERVACIONES

El error medio absoluto menor es el que presenta la distribución de la curva al de la fecha para $E=0.40 \cos \phi$, pero su distribución es poco uniforme, la curva presentada del experimento del día 21/V/82 al 100% con un $\bar{E} = 0.557$ presenta un error mayor pero una distribución más uniforme, por lo que se se leccionó ésta como modelo de este experimento.

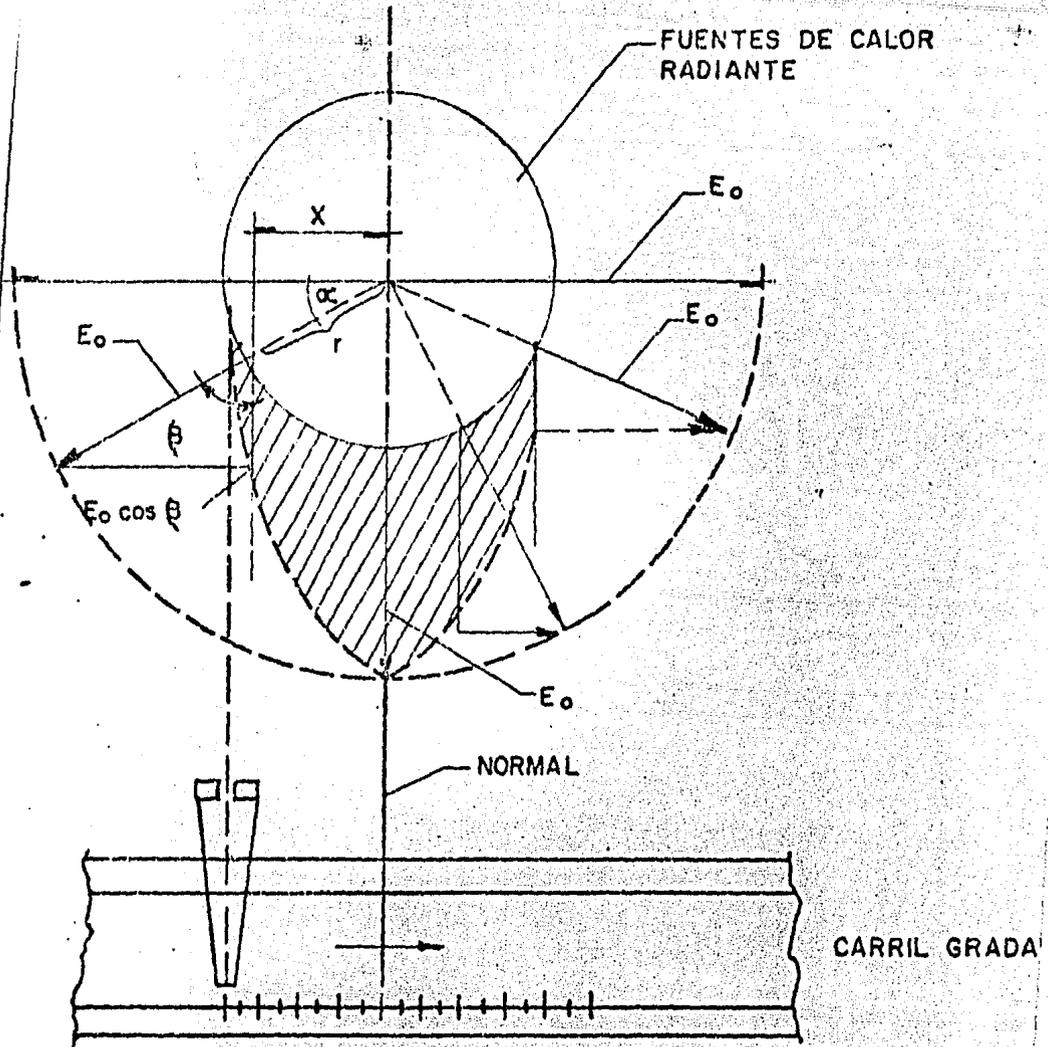


figura (5-2.1) PERFIL DE LA ENERGIA TERMICA RADIANTE QUE EMITE LA FUENTE CILINDRICA .

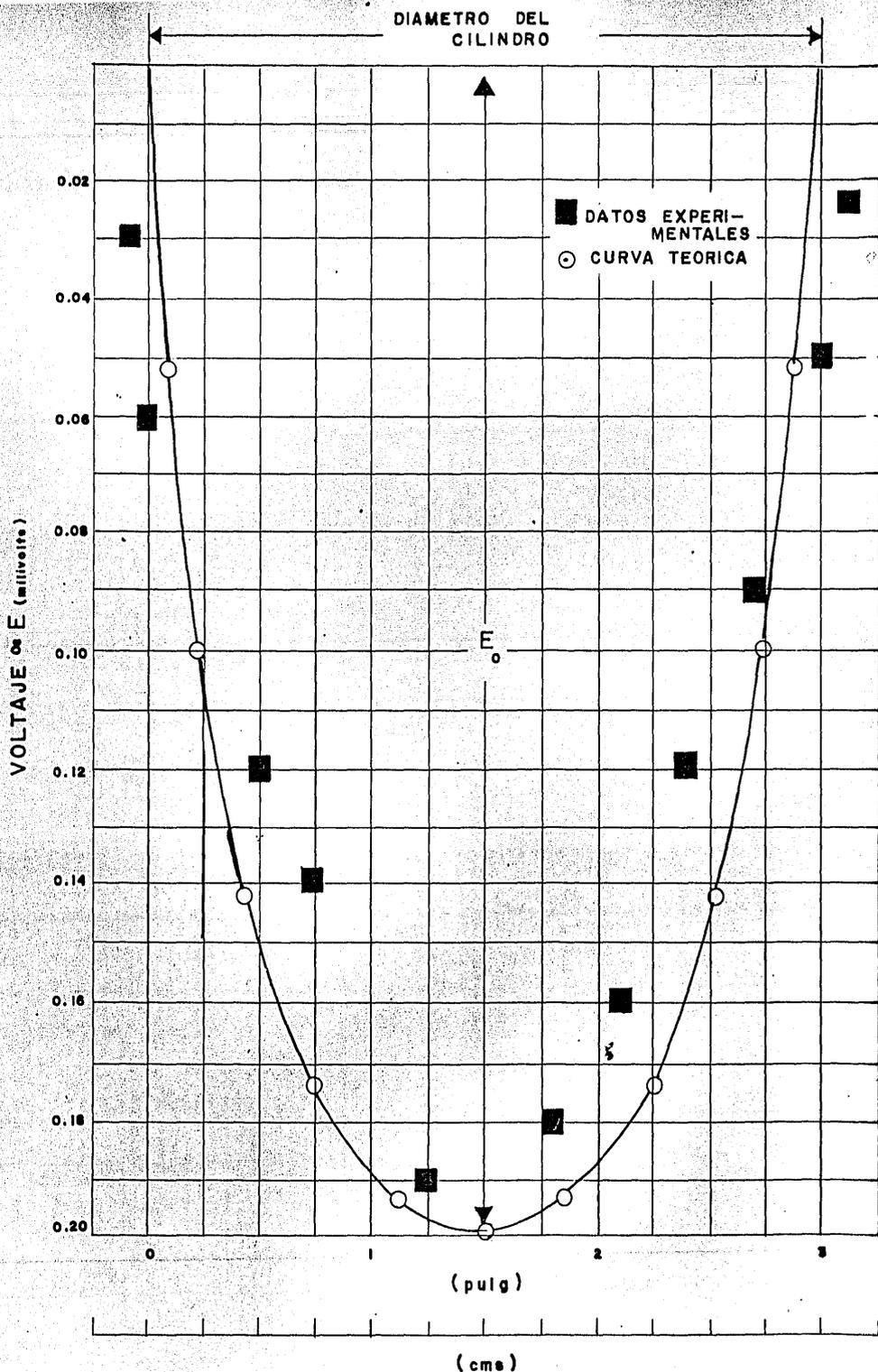


Fig. GRAFICA DEL PERFIL DE RADIACION
TERMICA EMITIDO POR
LA FUENTE CILINDRICA

4.3 LEY DE STEFAN-BOLTZMANN

En el presente estudio se comprobó la Ley de Stefan -- Boltzmann, tomando mediciones de la potencia emisiva " E_b " - de un cuerpo negro radiante y graficando estos puntos en -- una curva de calibración a partir de una temperatura de 0°K . El carácter de la curva se comprobó al graficar los datos - experimentales en papel logarítmico: para una función de la cuarta potencia se obtuvo una línea recta con pendiente - - igual a más cuatro, aproximadamente.

Puesto que la potencia emisiva total varía en razón directa de la cuarta potencia de la temperatura absoluta, es posible utilizarla para calcular la temperatura de un cuerpo caliente. Para esto, es necesario calibrar un instrumento sensor que mida la energía radiante total, tomando como referencia una escala patrón de temperatura. La energía radiante se propaga en dirección a un sensor de temperatura l, como un termopar o un termistor, donde la señal resultante indicará la temperatura superficial del emisor.

La calibración se afecta por la naturaleza de la fuente así como de los materiales a través de los cuales se propaga la energía radiante, (lentes, ventanas, gases, vapores etc.) Los medidores de temperatura por radiación térmica - se calibran comúnmente mediante fuentes de cuerpo negro.

Para llevar a cabo el desarrollo de este experimento, se contó con el siguiente equipo de experimentación:

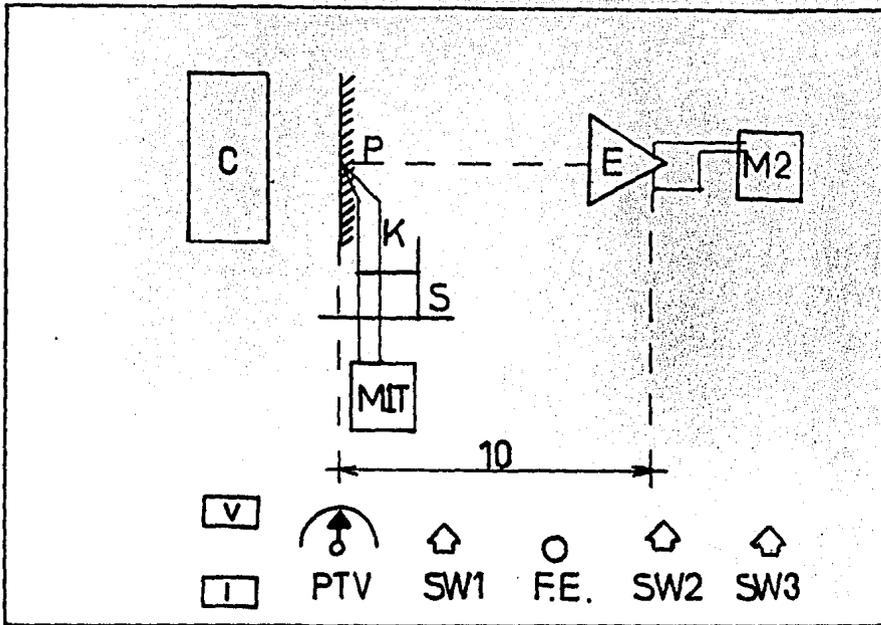


FIGURA (1)

DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INSTALACION

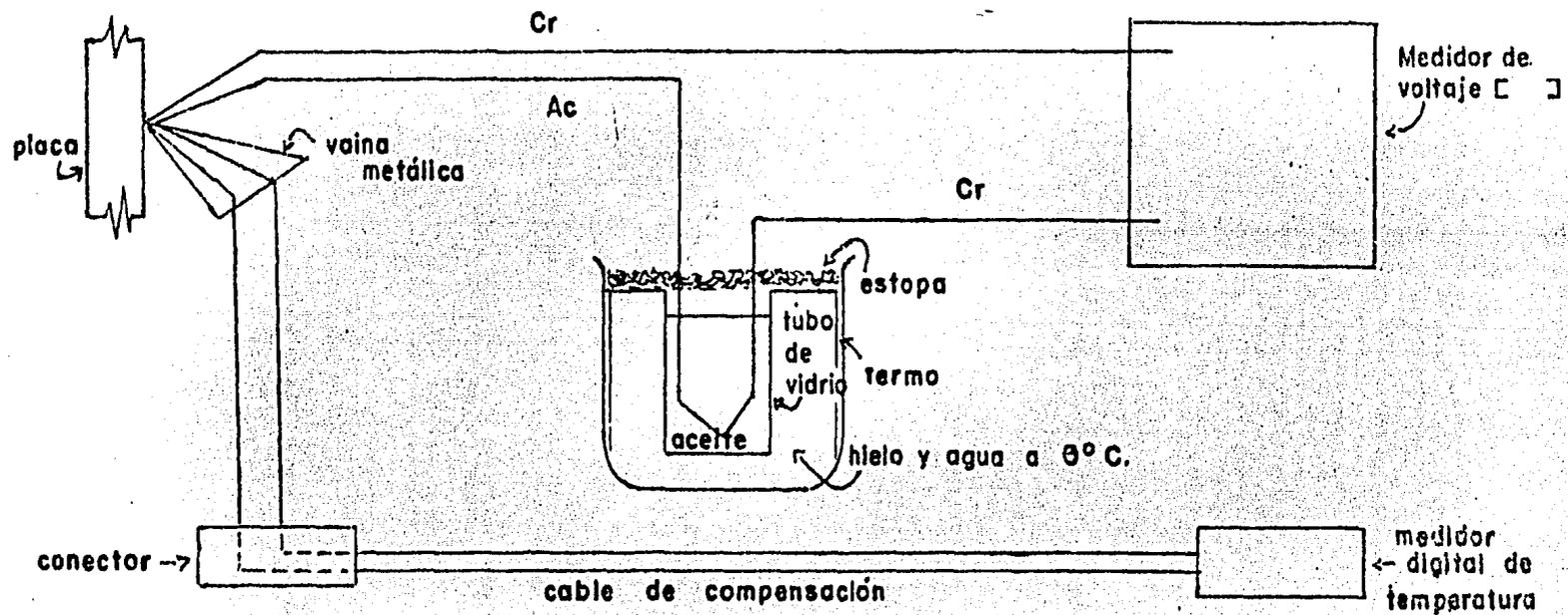
C: Calentador de placa	SW1, 2, 3. Interruptores.
P: Placa bajo prueba	
K: Termopar tipo K (Chromel-Alumel)	PTV: Perilla del transformador variable.
E: Termopila	
M2: Medidor de voltaje de termopila en (mv)	F.E.: Foco de encendido.
S: Soporte universal	V: Voltaje de suministro.
M1T: Sistema de medición de temperatura	
	I: Corriente de sum.

COMPONENTES Y ELEMENTOS AUXILIARES DURANTE LA PRACTICA.

1. Un electrómetro digital, marca Keithley, con alta impedancia de entrada y pasos de 0.00001 Volt, (1 sean - - 0.01 mv) para la medición de voltajes muy pequeños.
2. Un multímetro digital, marca Phi llips, cuyo rango de medición es del orden de 0.1 milivolts (mv)'
3. Un medidor digital de temperatura marca Doric; con una resolución de temperatura de medición de grado en grado.
4. Un termómetro análogo de mercurio en escala centigrada, (rango de -10 a +110 grados centígrados)
5. Un termómetro analógico para medir la temperatura ambiente.

Arreglos y conexiones de medición:

1. Una termopila que se utilizó como dispositivo sensor - de potencia emisiva de la placa bajo prueba (véase Fig 4.10)
2. Dos circuitos de termopar tipo K, los cuales estaban referidos a una mezcla de hielo y agua a 0°C en equilibrio. La figura 4.20 representa esquemáticamente este circuito de termopares.
3. Un termopar encapsulado en una vaina metálica al cual se conectó un alambre de extensión. La figura 4.20 - ilustra este sensor de temperatura.



4. Un termo conteniendo una mezcla de hielo, sal y agua en equilibrio, con objeto de poseer un sistema de referencia de temperatura a $0^{\circ}\text{C}=32^{\circ}\text{F}=273^{\circ}\text{C}$.
5. Una placa de acero inoxidable cuyas caras rayadas estuvieron cubiertas de hollín con el objeto de funcionar como cuerpo negro emisor del calor radiante.
6. Un conjunto de soportes universales para la fijación de los termopares durante la prueba.
7. Un conjunto de tubos de vidrio conteniendo aceite con el fin de compensar las corrientes parásitas y los gradientes de temperatura dentro de la mezcla de hielo y agua contenida en el termo como referencia.
8. Se hizo operar la fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja para el suministro controlado del calor radiante a la placa bajo prueba.

Desarrollo de la práctica.

Dentro de un termo se colocó la mezcla de hielo, agua y sal en proporción tal que se tenía a una temperatura de 0°C ., la cual fue medida con un termómetro de mercurio. En un tubo de vidrio con aceite en su interior, se sumergió un termopar, se introdujo en la mezcla de hielo, agua y sal en el termo.

Posteriormente, se tapó el termo con una estopa para aislar

así la mezcla del medio ambiente. En la fig. Num.4 22 se representa dicho arreglo de referencia, al cual se conectó el electrómetro digital. Posteriormente se conectó otro termopar de vaina, del cual se conectaron sus terminales al medidor digital de temperatura para poder llevar a cabo la calibración del termopar que constituía la punta caliente del arreglo mencionado anteriormente, ya que la placa de acero fue llevada a temperaturas conocidas anteriormente medidas.

Se colocó la termopila a una distancia de 10 pulg.=25.4cm. desde el emisor (como se indica en el manual) y conectándose sus terminales a un multímetro digital, para de este modo tomar lecturas de voltaje en milivolts. En la figura N°4,23 se muestra esquemáticamente la conexión. Una vez realizado lo anterior, se montó la placa negra (con funciones de emisor), directamente frente a la fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja (la figura N°4,24) muestra este calefactor) sobre los tornillos que sirven de soporte a la placa durante la prueba. La figura 4.20 ilustra fotográficamente la disposición del arreglo antes mencionado.

A continuación, se colocó la termopila a una distancia de 10 pulgadas (25.4 cm.) de la placa emisora sobre el carril graduado más corto, enfocándola hacia el centro de la placa emisora donde se conectó el circuito de termopares. La figura 4.20 ilustra fotográficamente lo anterior.

Posteriormente se reguló el suministro de corriente eléctrica hacia la fuente en incrementos de 20 volts. (c.a) mediante la perilla del transformador variable, permitiéndo-

dose que la placa alcanzará el equilibrio térmico, cuando la lectura del termopar oscilaba en un pequeño intervalo de valores, o bien cuando la lectura del termopar tendiese a ser constante, entonces se tomaron lecturas del circuito de termopares del termopar encapsulado, de la termopila, de la temperatura ambiente así como del voltaje y corriente de su ministro a la fuente. Se suministraron otros 20 volts más a la fuente.

La figura 4.24 ilustra el arreglo de los dispositivos empleados durante la práctica.

Estos datos fueron llevados a una curva que representa la variación de la potencia emisiva, (voltaje de termopila) en función de la temperatura absoluta del cuerpo emisor.

La misma curva se graficó en papel logarítmico a escala natural, representando una línea recta. (Véase Fig.4.25)

EVALUACION.- El voltaje de termopila graficado como una función de la temperatura absoluta del cuerpo emisor representa la energía radiante.

La figura 4.25 ilustra una curva tipificada por los datos obtenidos, así como la curva teórica de calibración de acuerdo a la Ley de Stefan-Boltzman. Dicha curva teórica fue obtenida de la siguiente forma:

Se seleccionó un punto de la curva obtenida a partir de las lecturas reales como se ilustra en la fig.4.25. Se leyó directamente sobre ésta el voltaje de la termopila, -

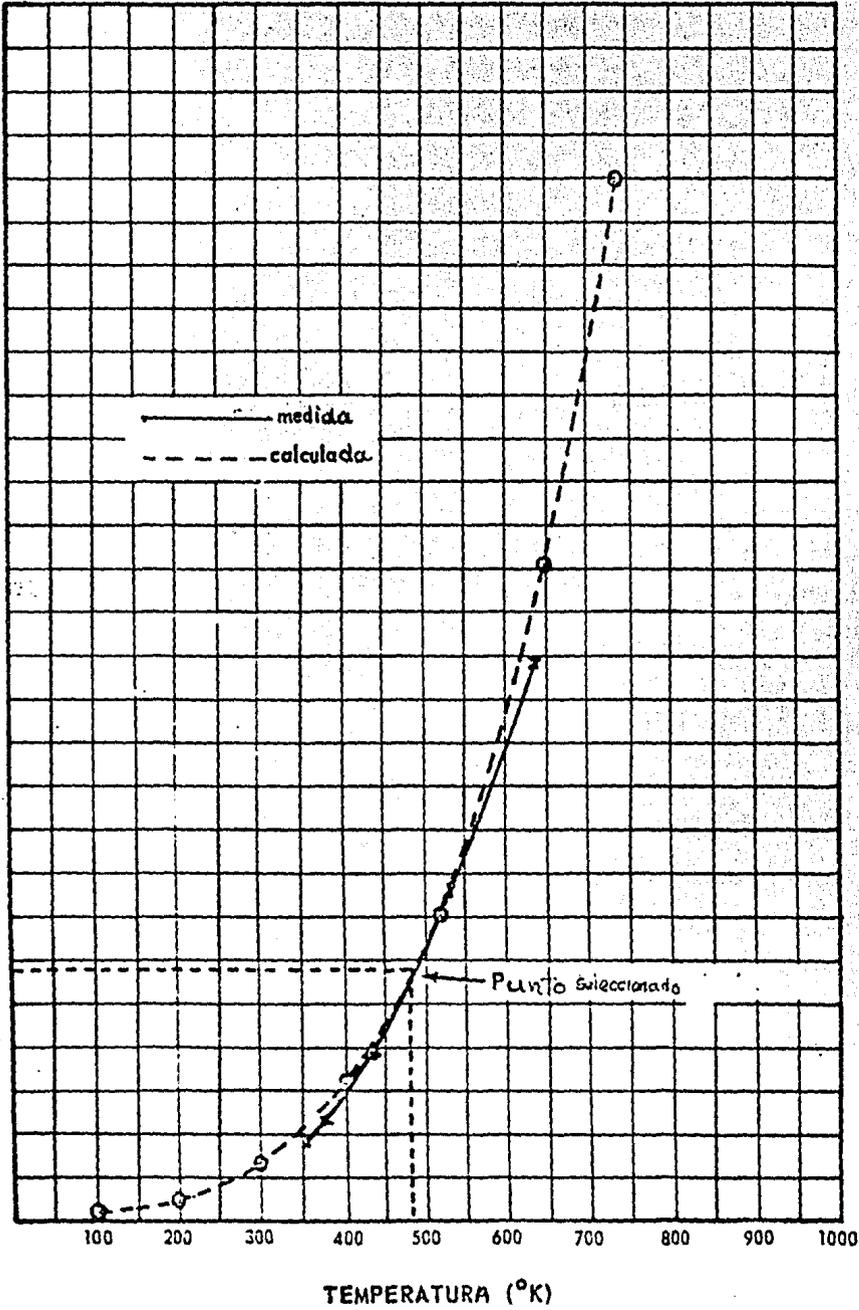


Figura 4.25 Ley de Stefan-Boltzmann

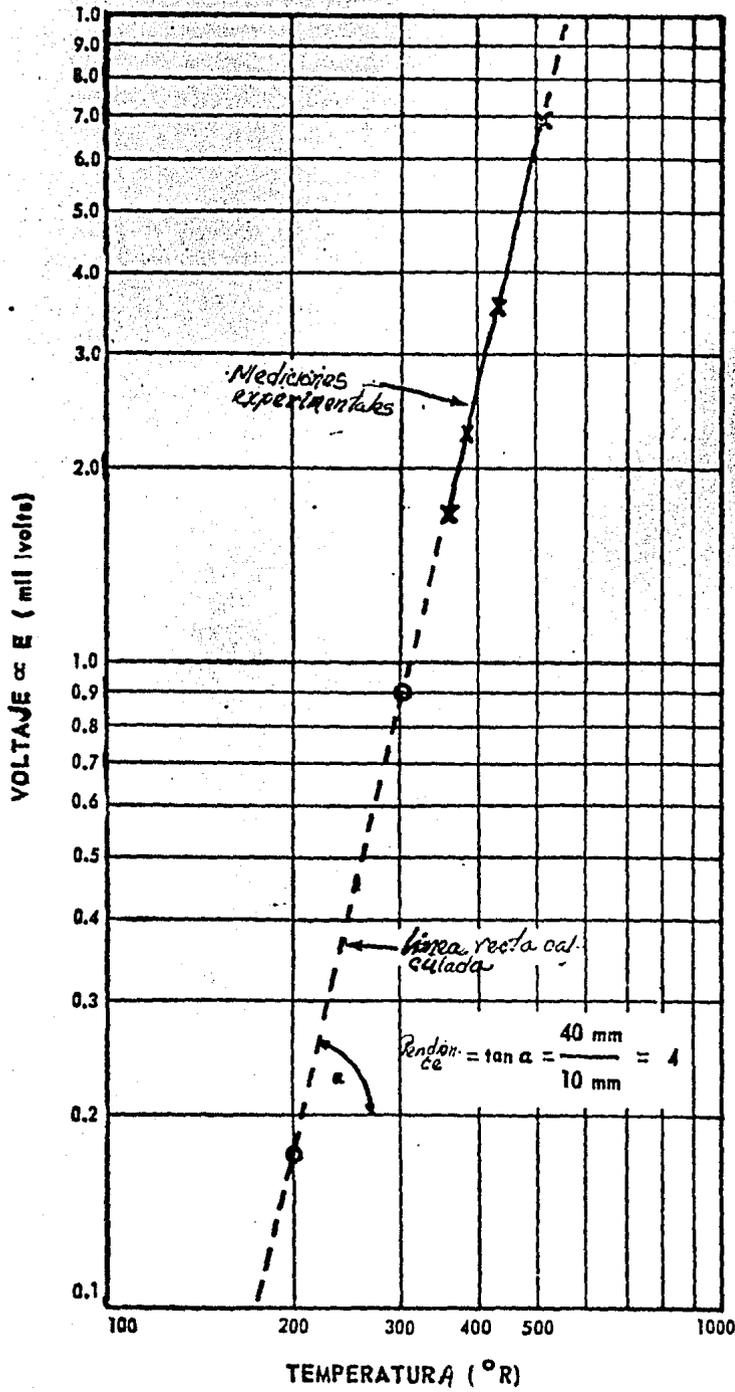


Figura 4.26. Ley de Stefan - Boltzmann.
Grafica logarítmica

(como una medida del flujo de calor radiante) conforme al valor de temperatura absoluta respectiva.

De la Ley de Stefan-Boltzmann, se sigue: $E = \sigma T^4$

Para cualquier lectura considerada

$$E = \sigma T_n^4$$

Para el punto seleccionado se tiene:

$$E = \sigma T^4$$

Con lo que se tiene:

$$\frac{E_1}{E_n} = \frac{T^4}{T_n^4} \Rightarrow E_n = \frac{T_n}{T^4} (E_1)$$

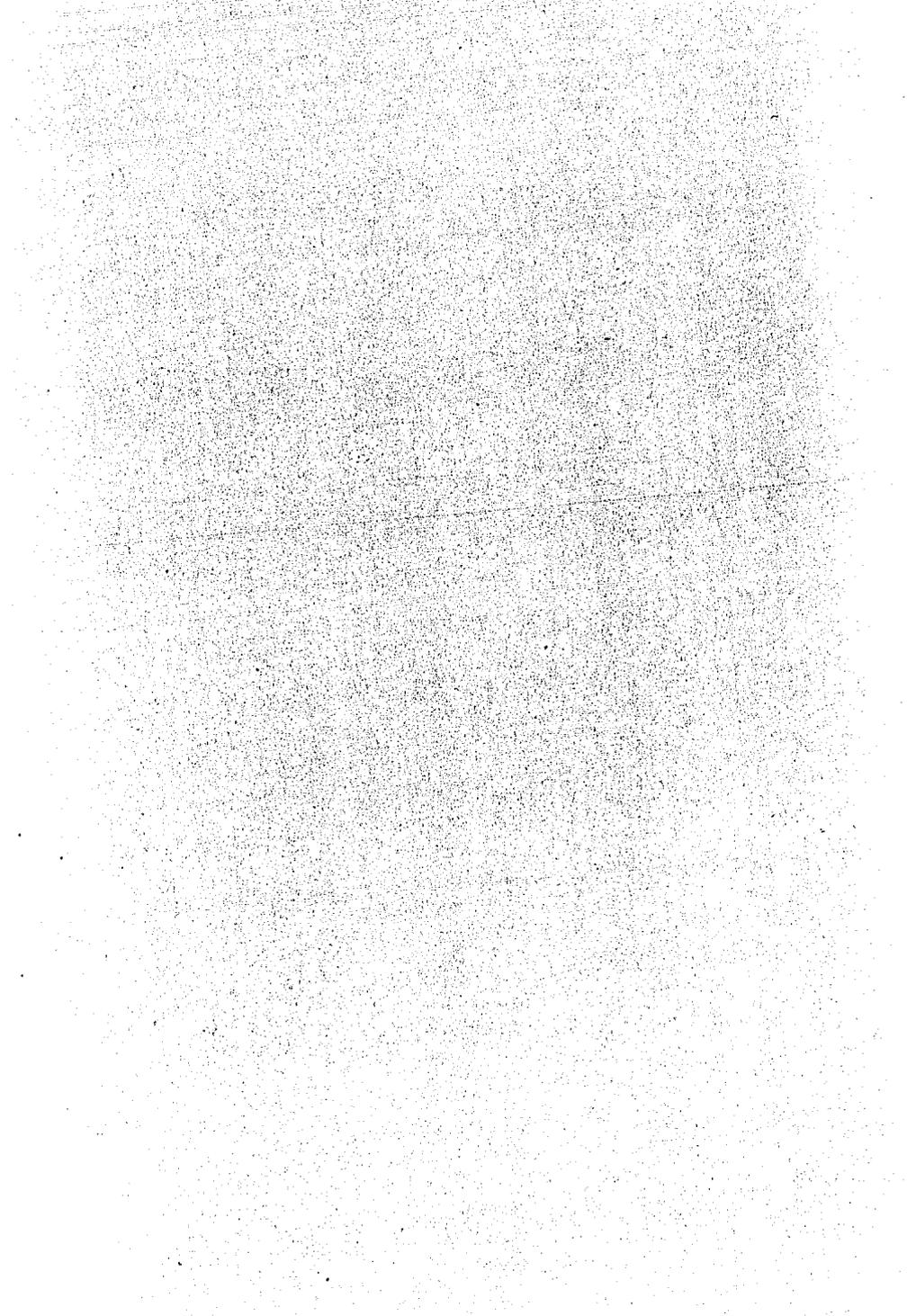
Donde: E_1, T_1 : son los valores del punto seleccionado en la curva de la figura 4.25 en este caso 5.06×10^8 y $433^\circ K$

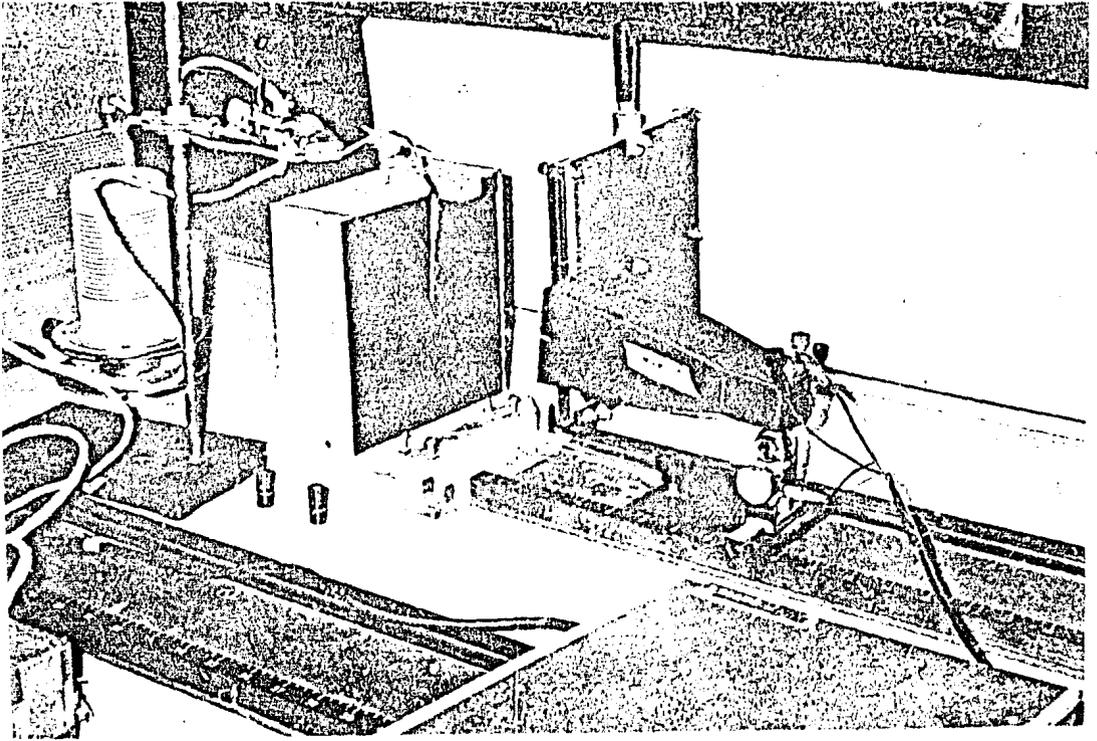
Donde

T_n = cualquier valor de temperatura seleccionado para determinar los puntos sobre la curva.

E_n = energía radiante calculada.

A continuación se expresan los datos y resultados obtenidos tanto en forma tabular, como en sus respectivas gráficas.

FIGURA 4. MONTAJE DEL EQUIPO EXPERIMENTAL



De la ecuación anterior, al sustituir los valores de T_n , se obtiene la siguiente tabla:

TABLA 4.23 VALORES DETERMINADOS TEORICAMENTE

T_n	E_n
100	0.0156
200	0.256
300	1.268
400	4.009
500	9.789
600	20.29
700	37.6
800	64.15
900	102.76
1000	156.6

cuya gráfica se puede apreciar en la siguiente hoja (Véase figura 4.27)

En la gráfica de la Fig.4.27 se aprecian los datos -- experimentales al igual que la curva teórica equivalente. Por otra parte, de la ecuación:

$$E_n = \frac{5.506}{(433)^4} T_n^4$$

$$E_n = 1.439 \times 10^{-10} T_n^4$$

sacando logaritmos a ambos miembros:

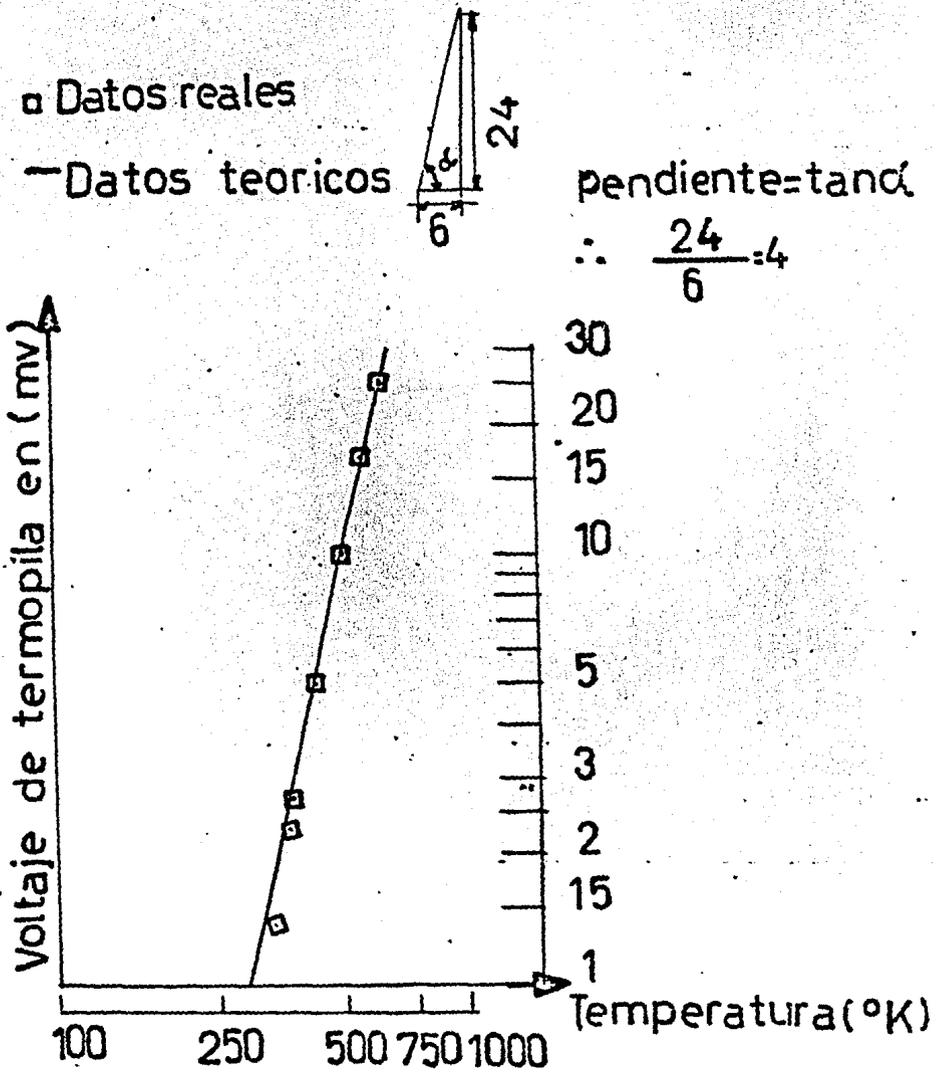
$$\begin{aligned} \log E_n &= \log 1.439 \times 10^{-10} + 4 \log T_n \\ &= 9.841 + 4 \log T_n \end{aligned}$$

$$\log E_n = 4 \log T_n - 9.841$$

FIGURA (4.28)

Voltaje de termopila en función de
la temperatura absoluta

Escala logarítmica.



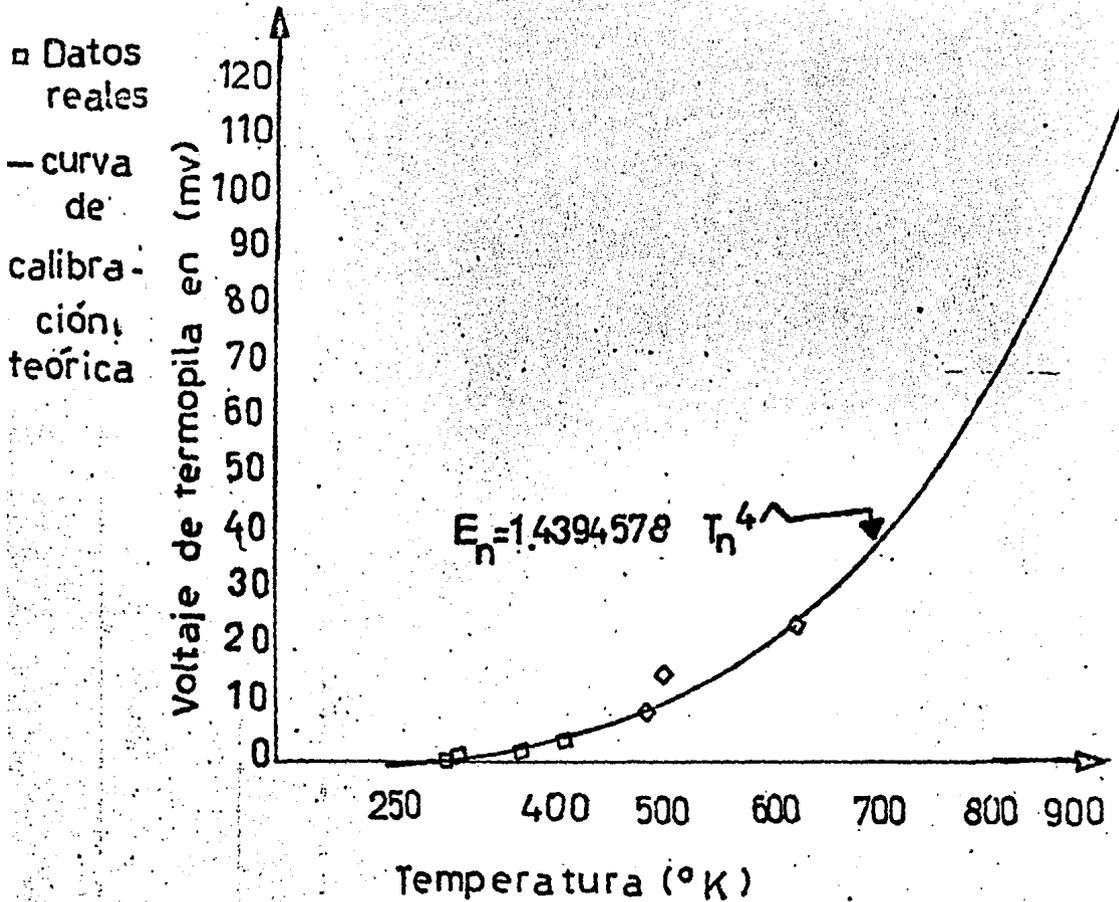


FIG.(4.27) Relacion entre E vs T
 esc : natural

Ajuste entre los datos experimentales y
 teóricos

Sustituyendo los valores del punto seleccionado en la ecuación:

$$E_n = \frac{E_1}{T_1^4} T_n^4$$

se tiene:

$$E_n = \frac{5.506}{(4.33)^4} T_n^4$$

A continuación se presentan los datos experimentales de -- las temperaturas correspondientes al termopar encapsulado en una vaina metálica y al circuito de termopares utilizado.

TABLA 4.47 RELACION DE DATOS OBTENIDOS PARA CALIBRACION DE TERMOPAR TIPO "K"

T=Temperatura registrada en el medidor digital de temperatura en (°C)

T=Milivolts registrados en el medidor de voltaje del arreglo de termopares con referencia a 0°C.

TEMPERATURA (° C)	VOLTAJE DE TERMOPAR (Milivolts)
39	1.27
66.4	2.2
103	3.559
160	6.213
219.77	8.165
294.54	10.759
358	12.485

A estos valores se les ajustó la siguiente ecuación de -- una línea recta.

$$\text{Temperatura en (°C)} = 27.653 (\text{Milivolts}) + 0.851$$

Estos datos guardan un índice de correlación con la ecuación anterior de 0.997 .

De la ecuación anterior, se tienen los siguientes valores

de temperatura en ($^{\circ}\text{C}$) y voltaje de termopar en (milivolts) en la tabla siguiente.

TABLA 4.75 RELACION ENTRE TEMPERATURA Y VOLTAJE DE TERMOPAR

VALOR DE TEMPERATURA EN ($^{\circ}\text{C}$)	VOLTAJE DE TERMOPAR (mv)
0	0
100	3.598
200	7.197
300	10.796
400	14.395
500	17.994
600	21.593
700	25.393
800	28.791
900	32.359
1000	35.988

A continuación se muestra una gráfica Fig. 4.28 representativa de estos datos y los medios experimentalmente

En el apéndice C, se presentan dos programas en BASIC

El primero es una tabulación de los datos anteriores, cuyo nombre del programa es "TERMOPAR"

TABLA 4.76 ERRORES MEDIO ABSOLUTO Y PORCENTUAL

T_n	E_{n_t}	E_R	$E_R - E_{n_t}$	%
312	1.484	0.0975	1.386	14.222
339.59	2.083	1.398	0.685	0.490
382	3.335	2.77	-0.565	0.204
433	5.506	5.06	0	0
492.92	9.246	10.1	0.953	0.0934
567.69	16.267	16.873	0.605	0.0358
631	24.831	25.3	0.468	0.018

Error medio = -0.101 ± 0.91 mv

Error porcentual = % = 23.31%

Curva de Calibración para Termopar Tipo K

Milivolts Termopar Tipo K

○ Mediciones Experimentales
- Valores Ajustados

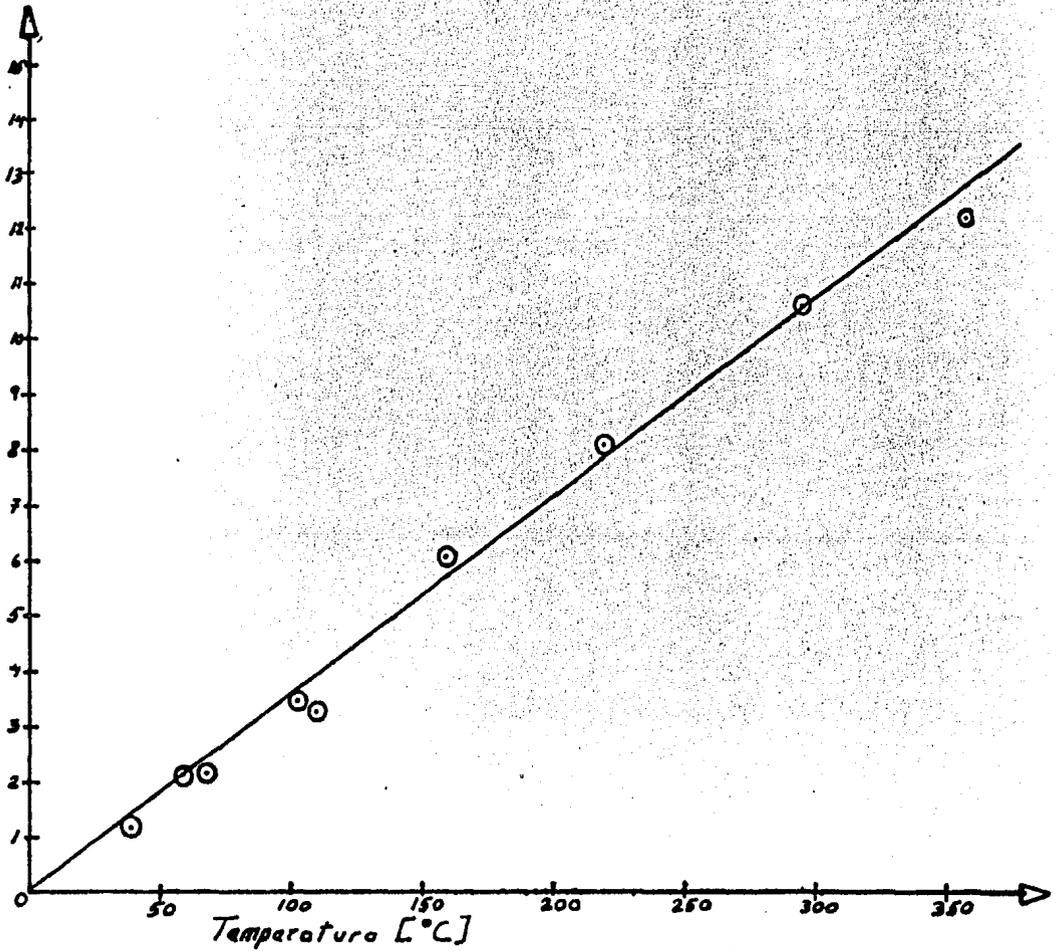
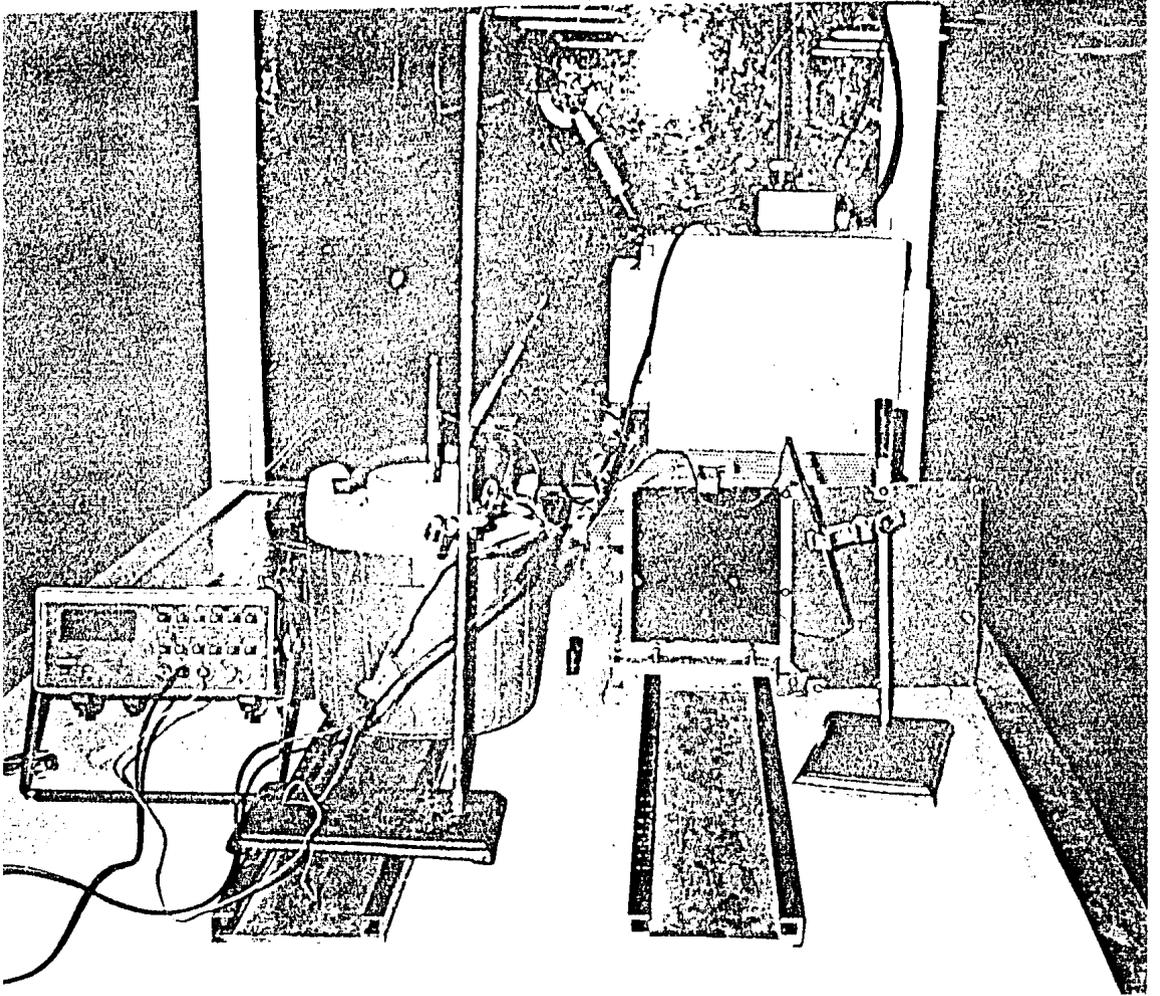


Fig. 4.28



4.4 DETERMINACION DE LA EMISIVIDAD, ABSORTIVIDAD Y REFLEXIVIDAD

En el presente trabajo, se llevó a cabo la determinación experimental de las propiedades ópticas de tres placas de acero inoxidable de iguales dimensiones y distinto acabado superficial, las cuales se aprecian en la Fig. 4.29 referidas a una superficie radiante aproximada de cuerpo negro.

REALIZACION DEL EXPERIMENTO

Para la determinación experimental de las propiedades ópticas mencionadas se utilizó la siguiente instrumentación, -- así como los aparatos y equipo tanto electrónicos y de control como de apoyo experimental, entre ellos:

- a) Cuatro placas planas cuadradas de acero inoxidable del mismo tamaño y espesor, con las siguientes características:

Una placa plana cuyo comportamiento era muy cercano al de un cuerpo negro (si se le cubría debidamente con ho-- llín en ambas caras) por lo que sirvió como patrón de -- comparación con las otras tres placas metálicas.

Las otras tres placas conforman el conjunto de placas ba-- jo prueba, las cuales se enlistan y se ennumeran a conti-- nuación:

Placa 1.- De color gris con ambas caras rayadas (capa -- Beilby)*

* Capa "Beilby".- Una capa amorfa y microcristalina conformada sobre -- las superficies metálicas mediante un conformado y pulimento.

Placa 2.- De color gris opaco, cuyas superficies son lisas pero sin pulir.

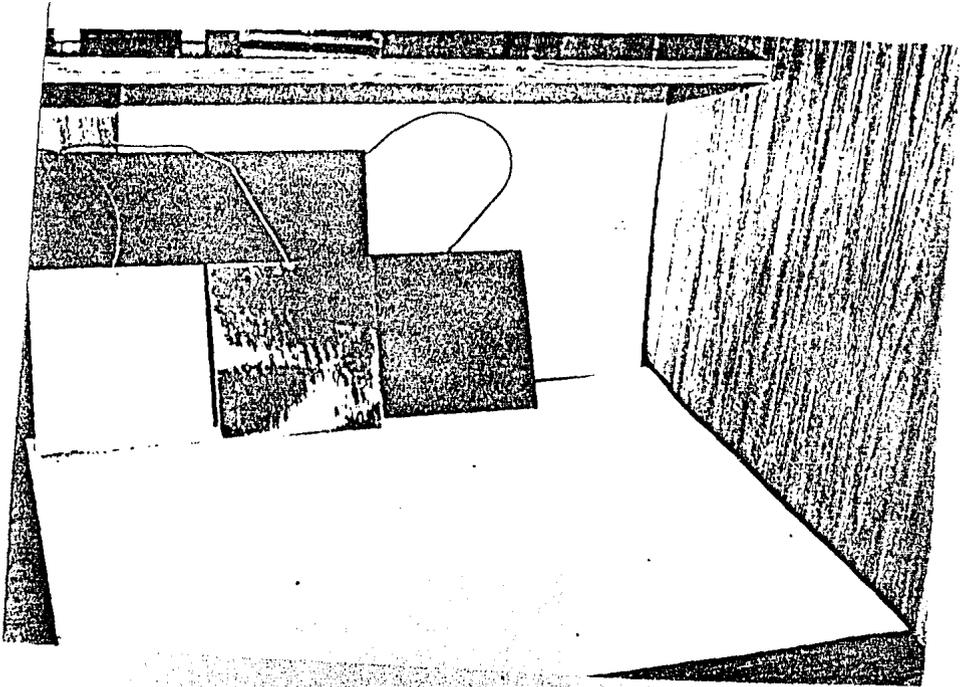
Placa 3.- Pulida a espejo en una de sus caras

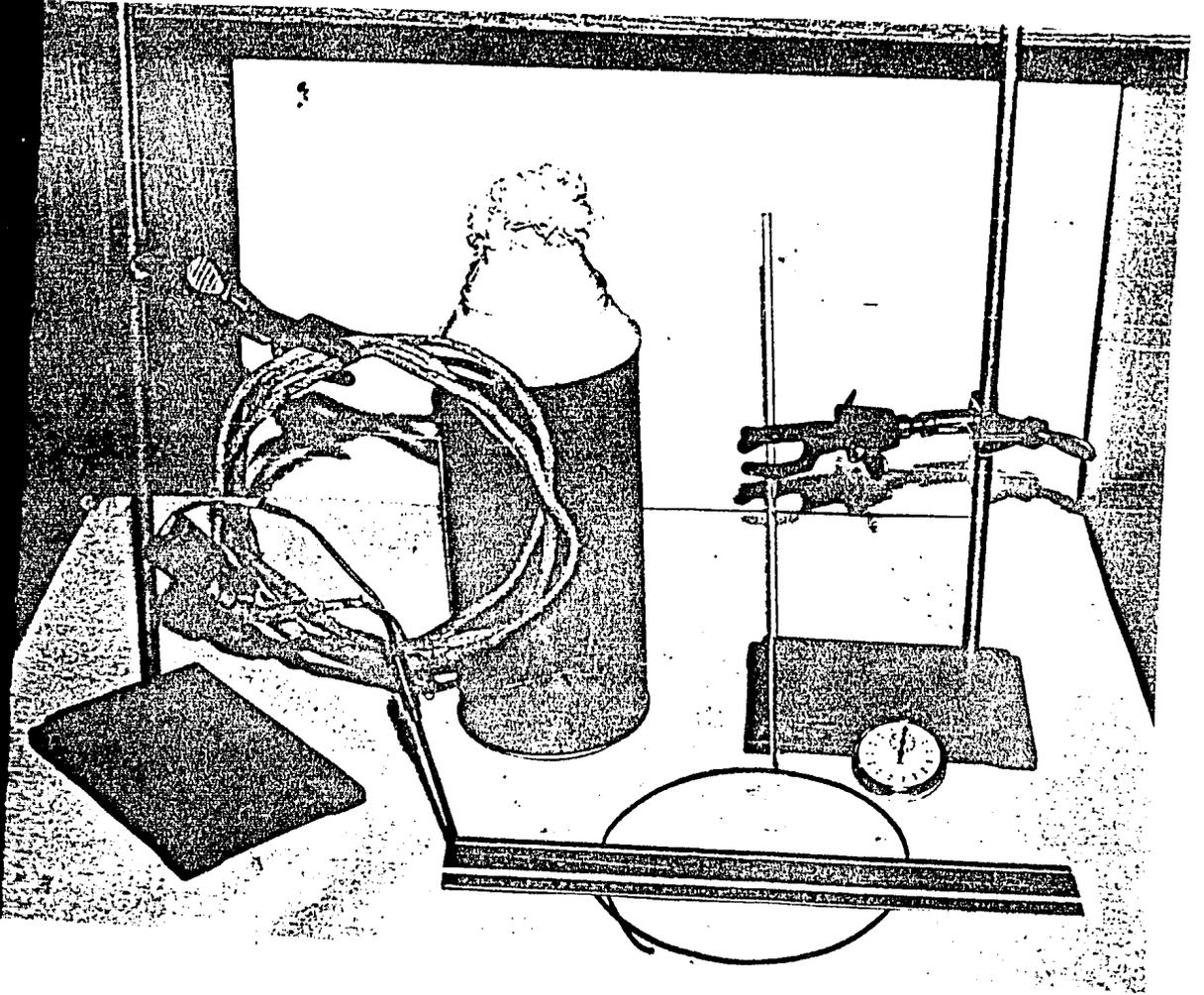
La Fig. 4. 29 ilustra las placas bajo prueba.

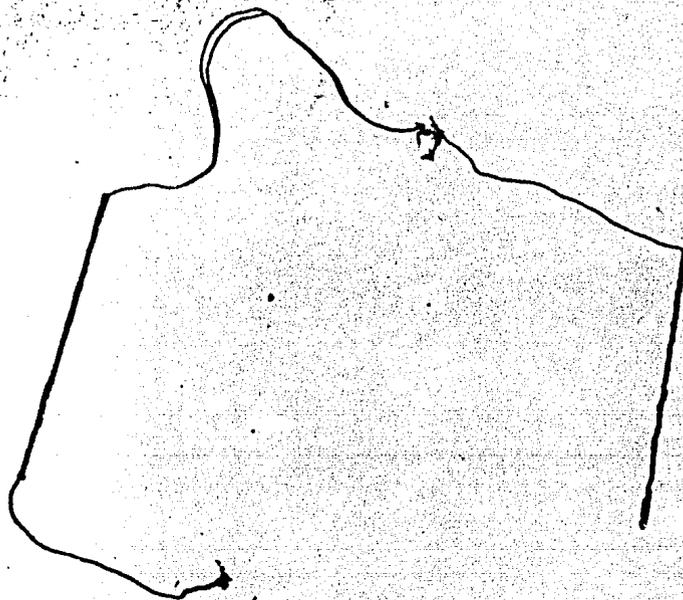
- b) Fuente de radiación infrarroja de forma cuadrangular
- c) Un conjunto de soportes alineados
- d) Una termopila con base adaptable al carril graduado de forma tal, que asegurará su correcta posición relativa a las placas bajo prueba.
- e) El conjunto de tubos de vidrio conteniendo aceite lubricante o de silicón para uniformizar los gradientes de temperatura de la referencia. La Fig. 4.30 ilustra fotográficamente las conexiones y los tubos de vidrio.
- f) Un termopar de cromel alumel encapsulado en una vaina metálica cuyo conector aloja un cable de compensación conectado al medidor. Véase Fig. 4.31

Adicionalmente se disponfa de un conjunto de conexiones de termopares de cromel-alumel, así como del milivoltaje de la termopila. La Fig. 4. 32 ilustra fotográficamente el conjunto.

FIGURA 4.29 PLACAS DE ACERO EMPLEADAS DURANTE EL EXPERIMENTO







Lectura	V Volts CA.	I Amperes C.A.	T _p (°C)	T _p (°K)	T (mv)	E (mv)	Ta (°C)	Ta (°K)	Fecha
1	20	0.3	39	312	27	0.975	26	299	23-IV-82
2	40	0.5	66.44	339.59	2.2	1.398	23	296	26-III-82
3	60	1.6	709	382	3.3	2.770	21	294	26-III-82
4	80	2.23	160	<u>433</u>	6.203	<u>5.06</u>	26	299	PS=14-IV-82
5	100	2.7	219.77	492.92	8.165	10.20	25	298	14-IV-82
6	120	3.2	294.54	567.69	10.259	16.873	25	298	15-IV-82
7	140	3.62	358	631	12.485	25.3	24	297	15-IV-82

PS= PUNTO SELECCIONADO

METODOLOGIA.- La preparación de la placa emisora aproximada a un cuerpo negro, consistió en cubrir debidamente con una capa de hollín fresco ambas caras de la placa de acero inoxidable cuya superficie se encontraba rayada (ahumada mediante la combustión de una estopa remojada con petróleo) y montandola directamente frente al calefactor.

Posteriormente, se colocó la cara de la termopila a una distancia 5 [pulgadas] = 10 [centímetros] de la superficie de la placa radiante.

El procedimiento para llevar a cabo la prueba fue el siguiente: Se alimentó la fuente radiante con un suministro eléctrico constante, que se muestra en la Fig. 4.30 con un voltaje de entrada de 80 volts (c.a) y una corriente de aproximadamente 2.1 (amperes) (c.a), en la posición marcada con el 53.5% del transformador variable, mediante el cual se controlaba la potencia eléctrica de suministro.

Se colocó la termopila afocada hacia el centro de la superficie de la placa alejada a una distancia constante de 5 [pulgadas] = 12.7 [centímetros]. Una vez que la placa alcanzaba el equilibrio térmico, se midió su temperatura central de la superficie mediante los arreglos de termopares conectados en el centro de la cara que daba hacia la termopila, tomando como sistema de referencia el termo que se presenta en la Fig. 4.31, el cual contenía una mezcla de agua con hielo picado - en equilibrio, de donde salía un termómetro analógico de mercurio para verificar que realmente estaba a 0°C.

Se leyó asimismo, el valor del milivoltaje de la termopila. Para determinar los respectivos milivoltajes del termopar --

(contándose para ello, con la calibración efectuada para llevar a cabo la transformación de milivoltaje de temperatura) y la termopila, se empleó el electrómetro digital, mencionado anteriormente, el cual permitió la obtención de lecturas del orden de microvolts. La Fig. 4.3¹ ilustra el montaje de la placa negra y todo el equipo utilizado durante la prueba. - Una vez realizada esta operación, se retiró la placa negra y en su lugar se colocaba la placa bajo prueba, vigilando que la cara de la termopila estuviera a una distancia de 5 (o 4) pulgadas alejada de la superficie de la muestra.

A partir de este instante, se mantuvo irradiando cada placa bajo prueba frente al calefactor infrarrojo plano. Para la determinación de la temperatura central de la superficie de la placa bajo prueba se conectó un arreglo de termopares de cromel-alumel (tipo K), como se indica en la Fig. 4.3².

Se tomó cada lectura de la temperatura máxima, midiendo a la vez el tiempo (mediante un cronómetro), que se tardaban en oscilar las lecturas, para de este modo, ajustar el valor correspondiente del voltaje de termopila a la temperatura promedio medida.

El tiempo que se tardaba en tomar cada lectura era variable pero aproximado a un intervalo de medio a un minuto.

La operación descrita permitió estimar, como se verá posteriormente la emisividad total hemisférica de la placa bajo prueba, (placas 2, 3 y 4) para condiciones ambientales de temperatura y humedad, así como del suministro de potencia eléctrica de la fuente infrarroja.

Se repitió este procedimiento para cada muestra, relacionándose la potencia emisiva con el voltaje de la termopila.

Al iniciar y finalizar cada operación, se midieron las condiciones de temperatura del medio ambiente, para lo cual se utilizó un termómetro analógico de mercurio, así mismo, se midió el voltaje y la corriente del suministro de potencia a la fuente.

A continuación, se proporcionan las mediciones realizadas - en el desarrollo del trabajo experimental, así como las condiciones en las que se llevaron a cabo.

Fecha: 16/IV/82 (día viernes)

Hora a la que se iniciaron las mediciones: 12:00 hrs.

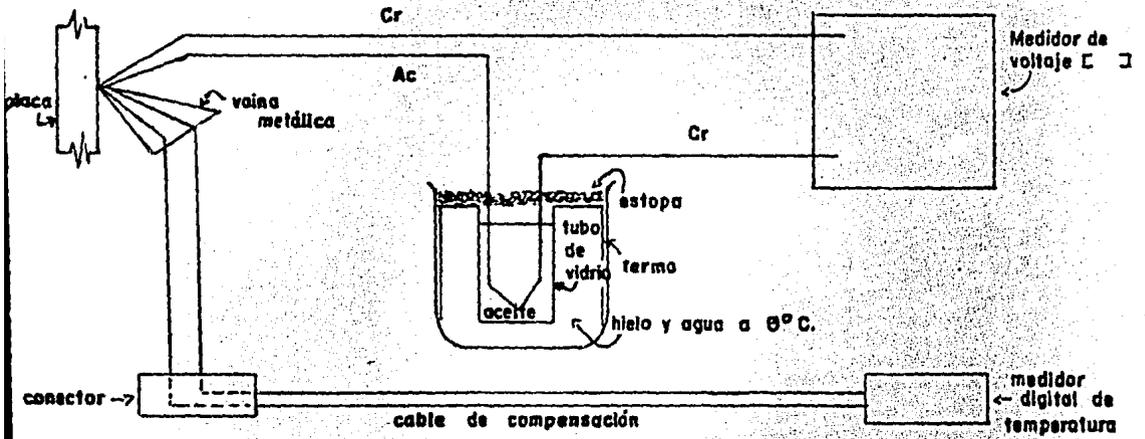
Tipo de placa: Rayada cubierta con hollín

Voltaje de entrada: 80 volts

Desarrollo del Experimento

- 1.- Se utilizó un termopar encapsulado en una vaina metálica, el cual se conectó directamente al medidor digital de termopila, como ya se había realizado en otras prácticas. Dicho termopar, se conectó por otro lado al centro de la placa previamente ahumada. De igual modo se conectó un arreglo de termopares al centro de la placa (junta caliente) y como referencia otro termopar --- (junta fría) introducido en un tubo de vidrio con aceite, el cual se sumergió en un baño de hielo picado y -- agua a 0°C. La Fig. 4.32 muestra esquemáticamente el arreglo mencionado.

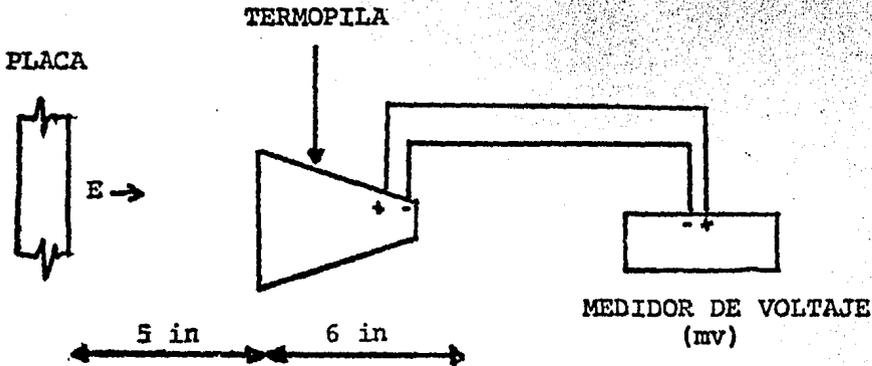
FIGURA 4.32



2.- La termopila se colocó a una distancia aproximada de 11 pulgadas desde la superficie de la placa a donde se encuentran el conjunto de elementos sensores (termopares). El dispositivo colimador tiene una longitud de 5 pulgadas, encontrándose el borde del mismo a 5 pulgadas a -- partir de la superficie de la placa emisora, siendo la longitud total de 11 pulgadas; conforme se menciona en el manual, se montó la termopila en la marca de 11 pulgadas.

La Fig. 4.33 ilustra esquemáticamente la disposición de la termopila, así como de la placa bajo prueba.

FIGURA 4.33



FECHA: 30/IV/82 DIA: VIERNES
EXPERIMENTO No.: 44
EMISIVIDAD, REFLEXIVIDAD Y AB-
SORTIVIDAD

DESARROLLO DE LA PRACTICA

Tipo de Placa: "RAYADA SIN RECUBRIMIENTO DE HOLLIN"

Para medir la temperatura de la placa se utilizaron: un termopar encapsulado dentro de una vaina metálica, así como un arreglo de termopares, teniéndose un termopar como referencia a 0°C, como se había venido realizando en las prácticas anteriores. También de igual manera se había utilizado la termopila conectada directamente al medidor de voltaje.

El indicador del % en la perilla del transformador, indicó un valor de aproximadamente el 52% para tener un voltaje de 80 volts y una corriente de 2.2 amperes AC que se proporcionaron a la fuente de calor plana.

Dicha potencia que se suministró al sistema estaba sujeto a variaciones, debido a la existencia de otra conexión en la línea cuando se hacía funcionar otro aparato, este absorbía la potencia eléctrica que se tenía que compensar con el transformador variable, haciendo girar a un % más elevado la capacidad de éste.

TABLA 4.46 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA PLACA NEGRA

LEC.	TIEMPO (min.)	HORA	T_{P_n} (°C)	T_{P_n} (°K)	T_v (mv)	V_{P_n} (mv)	T_a (°C)	T_a (°K)
1	0	12:38	134	407	5.715	4.15	24	297
2	82	14:00	150	423	6.20	4.45	26	299
3	125	14:43	152	425	6.26	4.5	27	300
4	173	15:31	154	427	6.33	4.45	27	300
5	234	16:32	166	439	6.25	4.35	27	300
6	247	16:45	163	436	6.25	4.35	27	300
7	248	16:46	162	435	6.245	4.35	27	300
8	249	16:47	161	434	6.24	4.35	27	300*
9	252	16:50	161	434	6.22	4.35	27	300
10	263	16:51	161	434	6.21	4.3	27	300
11	262	17:00	162	435	6.185	4.3	27	300*
12			163	436	6.20	4.35	27	300**
13			163	436	6.205	4.35	27	300***
14	264	17:02	163	436	6.20	4.35	27	300****

T_p = Temperatura de la placa en (°C) y (°K)

V_{P_n} = Voltaje de la Termopila (mv) (placa negra)

T_a = Temperatura ambiente (°C) y (°K)

T_v = Voltaje de termopar en (mv)

Voltaje proporcionado a la fuente = 80 v

Corriente proporcionada a la fuente = 2.2 amp. AC

La perilla del autotransformador se encuentra en la marca del 35% de su capacidad

NOTA * Permanece durante 1':21.2"

NOTA** Permanece por 0.5 cm.

NOTA*** Permanece por 30 seg.

NOTA**** Permanece por 30 seg.

TABLA 4.77 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA PLACA NEGRA
 FECHA: 4/V/82 DIA: MARTES
 TIPO DE PLACA: ACERO. SUPERFICIE RAYADA CON RECUBRIMIENTO

LEC.	HORA	TIEMPO (min.)	T _{Pn} (°C)	T _{Pn} (°K)	VOLT. TERMOPAR (mv)	Teq. (°C)	Teq. (°K)	V _{Pn} (mv)	V volts.	I amps. AC	T _{oo} (°C)	T _{oo} (°K)
1	13:26	0	163	436	6.6	161.525	434.675	3.30	80	2.1	23	296
2	13:30	4	165	438	6.65	162.775	435.925	3.37	80	2.1	23	296
3	13:35	9	166	439	6.6	161.525	434.675	3.40	80	2.2	23	296
4	13:46	20	167	440	6.7	164.025	437.175	3.46	80	2.2	23	296
5	13:50	24	168	441	6.75	167.725	440.875	3.48	80	2.2	23.5	296.6
6	13:57	31	169	442	6.75	167.725	440.875	3.505	80	2.2	23.5	296.6
7	14:00	34	169	442	6.75	167.725	440.875	3.53	80	2.2	24	297
8	14:12	46	170	443	6.75	167.725	440.875	3.575	80	2.2	24.5	297.6
9	14:28	62	170	443	6.75	167.725	440.875	3.61	80	2.2	24.5	297.6
10	14:50	84	171	444	6.75	167.725	440.875	3.59	81	2.2	24.5	297.6
11	14:58	92	172	445	6.75	167.725	440.875	3.645	81	2.2	25	298
12	15:05	99	172	445	6.75	167.725	440.875	3.675	81	2.2	25	298
13	15:11	105	171.5	444.6	6.65	162.775	435.925	3.685	81	2.2	25	298
14	15:16	110	172	445	6.65	162.775	435.925	3.68	81	2.2	25	298
15	15:24	118	172	445	6.7	164.025	437.175	3.71	81	2.2	25	298
16	15:39	133	172	445	6.65	162.775	435.925	3.69	80	2.2	25.5	298.6
17	15:42	136	173	446	6.65	162.775	435.925	3.71	81	2.2	25.5	298.6
18	-	-	172	445	6.65	162.775	435.925	3.68	80	2.2	25.5	298.6
19	-	-	172	445	6.65	162.775	435.925	3.67	81	2.2	25.5	298.6

215

Temperaturas:	445; 444.6; 446°K	Valores de E:	3.67	-	1
Frecuencias:	445 - 7		3.675	-	1
	444.6 - 1		3.68	-	2
	446 - 1		3.685	-	1
			3.69	-	1
			3.71	-	2
Temperatura media:	445.2°K	E media ±	3.685	mv	

TABLA 4.48

DATOS EXPERIMENTALES PARA LA PLACA RAYADA SIN HOLLIN

FECHA: 20/IV/82 DIA: MARTES

TIPO DE PLACA: "RAYADA SIN RECUBRIMIENTO DE HOLLIN"

LAS CONDICIONES PARA ESTA PRUEBA SON IGUALES A LA DE LAS ANTERIORES

LEC.	HORA	TIEMPO (min.)	T PLACA (°C)	T PLACA (°K)	V _p (mv)	TAMB. (°C)	TAMB. (°K)	V (volts)	I (amp) AC
1	11:30	0	96	369	1.56	24	297	80	2.2
2	11:45	15	98	371	1.83	24	297	80	2.2
3	12:16	31	108	381	2.35	26	299	80	2.2
4	12:36	51	109	382	2.44	26	299	81	2.3
5	12:37	52	110	383	2.43	26	299	81	2.3
6	12:39	54	110	383	2.46	26	299	81	2.3
7	13:04	79	111	384	2.52	26	299	80	2.2
8	13:24	99	112	385	2.56	26	299	80	2.2
9	13:44	119	112	385	2.60	27	300	80	2.2
10	14:06	141	113	386	2.67	27	300	80	2.2
11	14:46	181	113	386	2.72	27	300	80	2.2
12	15:30	225	114	387	2.77	27	300	80	2.2
13	16:05	260	113	386	2.72	28	301	80	2.2
14	16:11	266	183	386	2.75	28	301	81	2.2
15	16:16	271	113	386	2.71	28	301	81	2.18

216

V_p = Voltaje de termopila para la muestra

TABLA 4.?? "RELACION DE DATOS DE LA PRACTICA"

TIPO DE PLACA: ACERO INOXIDABLE CON SUPERFICIE RAYADA "SIN" RECUBRIMIENTO DE HOLLIN

FECHA: 30/IV/82

LEC.	HORA (Hrs)	TIEMPO (min.)	T PLACA (°C)	T PLACA (°K)	V _p (mv)	T _∞ (°C)	T _∞ (°K)	V (volts)	I (amps)	TIEMPO DE PERMANENCIA
1	15:19	0	108	381	1.56	24.5	297.65	80	2.8	
2	15:51	32	111	384	1.56	24.5	297.65	80	2.2	
3	16:13	54	113	386	1.58	24.5	297.65	80	2.2	
4	16:30	71	111	384	1.59	25	298	80	2.2	
5	16:40	81	111	384	1.58	25	298	80	2.2	
6	16:50	91	114	387	1.62	25	298	80	2.2	
7	17:59	100	110	383	1.515	24	297	79	2.0	
8	18:01	102	109	382	1.515	24	297	80	2.8	
9	18:02	103	109	382	1.515	24	297	80	2.8	1'29.5"
10	18:07	108	110	383	1.52	24	297	80	2.1	34"
11	18:10	111	110	383	1.51	24	297	80	2.1	30"

Tiempo de Permanencia:

Cuando se tienen varias lecturas de voltaje de Termopila en (mv); se tomaron un conjunto de lecturas de estos milivoltajes durante un intervalo de tiempo en minutos (') y segundos (") o décimas de segundo (0.0") y a este intervalo se le llamó tiempo de permanencia.

El valor que aparece en esa lectura es un valor medio, al cual se le ajustó también de acuerdo a su frecuencia.

FECHA: 19/IV/82 DIA: LUNES
 HORA: 14:00 HRS.
 TIPO DE PLACA: "GRIS"
 TEMPERATURA AMBIENTE: =24 °C=497°K
 VOLTAJE: = 80 V
 CORRIENTE: 2.3 amperes AC

La perilla se encuentra al 54% del valor total y se llevó a cabo esta prueba de la manera siguiente:

- 1.- La conexión entre la termopila y el medidor de voltaje fue igual a la práctica anterior.
- 2.- Se conectó al termopar colocado en el centro de la placa gris al medidor digital de temperatura.

FIG. 4.34 MONTAJE DEL INSTRUMENTAL ELECTRONICO DE MEDICION

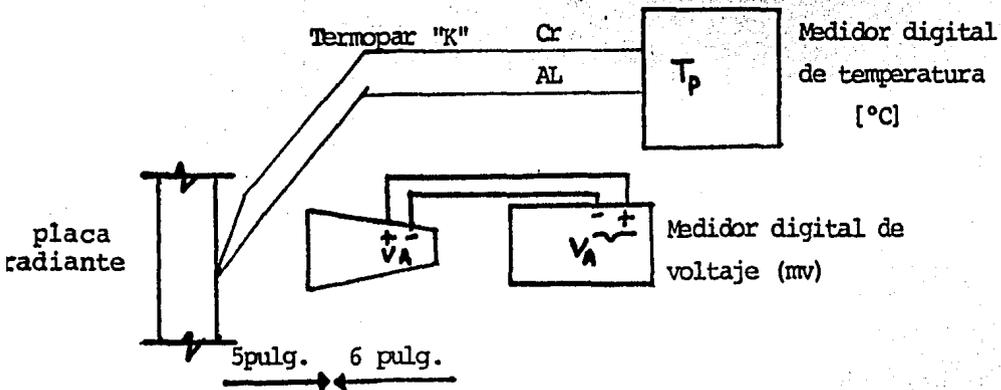


TABLA 4.50 DATOS EXPERIMENTALES DE LA PLACA GRIS

LEC.	HORA	TIEMPO (min.)	T PLACA (°C)	T PLACA (°K)	TERMOPILA (mv)	TAMB. (°C)	TAMB. (°K)	\bar{V} (volts)
1	15:52	0	112	385	1.79	27	300	80
2	16:25	33	112	385	1.85	27	300	80
3	16:26	34	113	386	1.85	27	300	80
4	16:29	37	112	385	1.85	27	300	80
5	16:32	40	113	386	1.86	27	300	80
6	16:40	48	112	385	1.87	27	300	80
7	16:41	49	113	386	1.89	27	300	80
8	16:45	53	113	386	1.88	27	300	80
9	16:50	58	112	385	1.5	26	299	76
10	16:52	60	112	385	1.83	26	299	80
11	16:53	61	111	384	1.84	26	299	80
12	16:55	63	111	384	1.85	26	299	80

MEDICIONES DE LA PLACA PULIDA
 FECHA: 18/V/82 DIA: MARTES
 TIPO DE PLACA: "PULIDA (ACERO INOXIDABLE)

LEC.	HORA	TIEMPO (min.)	VOLTAJE DE TERMOPILA (milivolts)	TERMOPAR		TEMPERATURA		V volts. A.C.	I amps. A.C.
				CENTRO DE LA PLACA (milivolts)	(°C)	CENTRO DE LA PLACA (°C)	TAMB. (°C)		
1	15:05	0	0.835	5.65		135	20	80	2.1
2	-	-	0.880	5.7		137	19	80	2.2
3	15:53		0.90	5.65		136	19	80	2.2
4	16:00		0.905	5.65		136	19	80	2.2
5	16:05		0.89	5.65		137	19	80	2.2
6	-		0.89	5.65		137	19	80	2.2
7	16:15		0.90	5.65		135	19	80	2.2
8	16:17		0.90	5.55		135	19	80	2.2
9	16:24		0.89	5.6		136	19	80	2.2
10	16:30		0.90	5.55		136	19	79.5	2.1
11	16:31		0.89	5.6		136	19.5	80	2.1
12	16:33		0.87	5.6		136	19.5	80	2.2
13	16:35		0.89	5.55		136	19.5	79	2.1
14	16:36		0.88	5.55		135	19.5	79.5	2.1
15	16:45		0.88	5.55		135	19.5	80	2.1

TABLA 4.52 DATOS EXPERIMENTALES DE LA PLACA PULIDA

VOLTAJE DE TERMOPILA (milivolts)	FRECUENCIA	VOLTAJE PARA LA MAYOR FREC.	PROMEDIO DE LOS VOLTAJES
0.87	1		
0.88	3		
0.89	5	0.89	0.889
0.90	4		
0.905	1		

Promedio entre el voltaje de mayor Frec. y el de todos los voltajes
 $0.8895 = 0.89 \text{ mv}$

TABLA 4.53

TEMPERATURA DE LA PLACA (°C)	FREC.
135	5
136	7
137	3

Temperatura de mayor Frec. = 136°C
 Promedio de las Temps = 136°C
 Promedio de estas 2 temps. = 136°C

EVALUACION

El voltaje indicado por la termopila, resulta proporcional a la potencia emisiva total hemisférica de la superficie radiante. El cálculo de la emisividad de cada muestra a partir de los datos experimentales hallados, es conforme a la Ley de Prevost que estipula:

$$V \sim E = \sigma \epsilon A_r (T_p^4 - T_\infty^4)$$

De acuerdo con la ecuación anterior, se tiene que la razón de las potencias emisivas totales hemisféricas de cada una de las muestras con la placa negra; para llevar a cabo la comparación de cada muestra con la placa negra, (como patrón) de iguales áreas se tiene:

$$\frac{V_p}{V_{p.n}} \approx \frac{E_p}{E_{p.n}} = \frac{\epsilon_p (T_p^4 - T_\infty^4)}{\epsilon_{p.n} (T_{pn}^4 - T_\infty^4)}$$

Suponiendo $\epsilon_{p.n} \approx 0.95$ se obtiene, para la emisividad de cada muestra

$$\epsilon_p = 0.95 \frac{V_p}{V_{p.n}} \frac{(T_{p.n}^4 - T_\infty^4)}{(T_p^4 - T_\infty^4)}$$

A continuación, se presentan los valores de las lecturas obtenidas para las placas bajo estudio, así como las condiciones a que se desarrolló el trabajo experimental.

Tipo de placa de acero inoxidable "sin recubrimiento de ho--llín"

$$T_p = 114.4^\circ\text{C} = 384.55^\circ\text{K} \quad V_p = 1.556 \text{ mv} \quad T_\infty = 24.5^\circ\text{C} \\ = 297.65^\circ\text{K}$$

TABLA 4.57 RELACION DE VALORES EXPERIMENTALES PARA LAS DIVERSAS PLACAS

TIPO DE SUPERFICIE PARA LA PLACA DE ACERO	T placa centro (°C)	T placa centro (°K)	VOLT. DE TERMOPILA (mv)	T ₀₀ (°C)	T ₀₀ (°K)
Rayada Ahumada	162.5	435.65	4.369	27	300
	172.05	445.2	3.685	25.5	298.6
Rayada sin Ahumar	113.66	386.316	2.734	28	301
	111.4	384.55	1.556	24.5	297.65
Gris	112.53	385.303	1.818	26	299
Pulida a espejo	136	409	0.89	19.5	292.5

Para la placa negra de referencia:

$$T_{P_n} = 172.05^\circ\text{C} = 445.2^\circ\text{K} \quad V_{P_n} = 3.685 \text{ mv}$$

$$T_\infty = 25.5^\circ\text{C} = 298.6^\circ\text{K}$$

$$\epsilon_p = \frac{1.556}{3.685} (0.95) \frac{(445.2)^4 - (298.6)^4}{(384.55)^4 - (297.65)^4} = 0.8966117$$

Tipo de placa: "Gris"

$$T_p = 112.53^\circ\text{C} = 385.303^\circ\text{K} \quad V_p = 1.818 \text{ mv}$$

$$T_\infty = 26^\circ\text{C} = 299^\circ\text{K}$$

$$\epsilon = \frac{1.818}{4.369} (0.95) \frac{(435.65)^4 - (300)^4}{(385.303)^4 - (299)^4}$$

Tipo de Placa: "Acero Pulido"

$$V_p = 0.89 \text{ mv} \quad T_p = 136^\circ\text{C} = 409^\circ\text{K} \quad T_\infty = 27^\circ\text{C} = 300^\circ\text{K}$$

$$\epsilon_p = \frac{0.89}{4.369} (0.95) \frac{(435.65)^4 - (300)^4}{(409)^4 - (292.65)^4} = 0.26$$

Tipo de placa: Acero Pulido

$$\epsilon_p = \frac{0.89}{4.369} (0.95) \frac{(435.65)^4 - (300)^4}{(409)^4 - (292.65)^4} = 0.26$$

$$V_p = 0.89 \text{ mv} \quad T_\infty = 300^\circ\text{K}$$

$$T_p = 409^\circ\text{K} \quad V_{P_n} = 4.369 \text{ mv}$$

$$T_{P_n} = 435.65^\circ\text{K}$$

TABLA 4.53 VALORES DE EMISIVIDAD PARA DIVERSOS AUTORES

A CONTINUACION SE PRESENTAN LOS VALORES DE LAS EMISIVIDADES REFERENTES A LOS MATERIALES QUE SE MENCIONAN CON SUS RESPECTIVOS RANGOS DE TEMPERATURA, SEGUN LOS SIGUIENTES AUTORES DE LAS FUENTES BIBLIOGRAFICAS CONSULTADAS.

TIPO DE MATERIAL	VALORES DE EMISIVIDAD ϵ	RANGO DE TEMPERATURAS A QUE FUE LLEVADO EL CUERPO BAJO ESTUDIO $T_{\text{ca}} (^{\circ}\text{C})$	AUTORES CUYAS FUENTES BIBLIOGRAFICAS FUERON CONSULTADAS
Acero inoxidable pulido	.07 - .17	23.88 - 37.7	Sparrow Ozisik, Kreith, Siegel & Howell
Acero dulce o templado pulido	0.14 - 0.32	148.88 - 482.22	Sparrow
Acero inoxidable pulido tipo 316	0.24 - 0.31	204.44 - 1037.77	Siegel & Howell
Placa de acero pulida	0.14 - 0.32	148.88	Siegel & Howell
Placa granulada pulida	0.27 - 0.31	148.88 - 482.22	Siegel & Howell
Acero calorizado	0.52	37.77	Ozisik-transf-de calor p330
Placa de acero granulado	0.55	926.66	Sparrow
Placa de acero rolado	0.66	37	Sparrow
Acero inoxidable después de ser repetidamente calentado y enfriado	0.5 - 0.7	232.22 - 898.88	Sparrow
Acero tipo 30/ moteado	0.39	815.55	Siegel & Howell
Hoja con membrana debido al rolado	0.66	21.11	Siegel & Howell
Acero inoxidable placa lisa	0.94	37.77	Ozisik-transf. de calor (p330)

TABLA 4.56 VALORES DE EMISIVIDAD EVALUADOS
VALORES EXPERIMENTALES

TIPO DE PLACA DE ACERO INOXIDABLE CONDICION SUPERFICIAL		E_A	T (°C)	T (°C)	T (°F)	E_T	T (°F)	T (°C)
Rayada sin Ahumar	Experimental	0.8966	114.4	384.55				
Gris	Experimental	0.8775	112.53	385.303				
		0.3562	112.153	385.303				
Pulida	Experimental	0.26	136°C					
	Siegel 8 Howell							
Acero inoxidable puli- do tipo 316					0.24			204.44°C
Placa de acero pulida					.14a .32			148.88
Placa granulada puli- da					.27a .31			148.88
								a 482.22
Acero dulce o templa- do pulido	Sparrow				0.14a 0.32			148.88°C 482.22°C

Ya que un cuerpo emite la misma cantidad de energía radiante que absorbe. La energía radiante que éste emite, más lo que refleje (o transmite si es transparente) por él, deberá ser igual a la radiación térmica del cuerpo negro. Por lo tanto, para un cuerpo opaco con $E_A = 0.84$, la emisividad y absorptividad serán 84% y su reflectividad (o transparencia a la radiación térmica) será 16% de la radiación total equivalente a la de un cuerpo negro.

CONCLUSIONES

Los valores de las emisividades determinados en este experimento son satisfactorios, si se toman en cuenta los siguientes aspectos:

- 1.- Cuando se ponía en marcha algún otro equipo eléctrico - al mismo tiempo que la fuente cuadrangular de radiación infrarroja se encontraba operando se alteraba el equilibrio térmico entre la fuente y la placa captadora bajo estudio.
- 2.- Si por alguna razón se desplazaba la punta del termopar conectado al centro de la placa, se detectaban temperaturas diferentes, debido a los gradientes de temperatura existentes, lo que alteraba el resultado experimental de la emisividad por ser estos menores a 1.
- 3.- Los efectos de dispersión del calor radiante, así como los de convección del medio ambiente introducen perturbaciones en la captación y las mediciones efectuadas durante el experimento.
- 5.- Desviaciones en las lecturas de los circuitos de termopares originadas por los gradientes de temperatura y corrientes parásitas del sistema de referencia a 0°C.
- 6.- La oxidación, la rugosidad y otras condiciones superficiales de las muestras no permiten una distribución uniforme de las características de cada superficie bajo prueba.

7.- Inexactitudes en la alineación de la termopila respecto al centro de la superficie emisora, así como las -- que ocurren entre la fuente térmica radiante y la placa con funciones de emisor afectando así la propaga--- ción de la energía radiante.

Todos estos efectos introducen perturbaciones en la captación de energía térmica radiante, así como en la obtención de datos y en la determinación de las emisividades.

RECOMENDACIONES

- 1.- Cubrir lo más uniformemente posible las dos caras rayadas de la placa con funciones de patrón de emisividades.
- 2.- Limpiar las caras de las placas bajo prueba, teniendo cuidado de no rayar la superficie de la placa que está pulimentada.
- 3.- Asegurarse que la punta del termopar esté bien fijado al centro de la superficie de la placa bajo prueba.
- 4.- Enfocar alineadamente las placas bajo prueba con la fuente plana cuadrangular, así como con respecto a la termopila.
- 5.- Revisar periódicamente que el sistema de referencia se encuentre a 0°C.
- 6.- La cara de las placas pulida y la gris son las que deberán presentarse a la termopila.
- 7.- Calibrar los instrumentos electrónicos de medición anterior a la realización de la prueba.
- 8.- Cerciorarse que el interior del cono de captación de la energía radiante de la termopila se encuentre sin partículas de polvo o alguna otra partícula que alterase la medición.
- 9.- Una vez efectuada la medición del voltaje de la termopi

la, retírese esta de su interacción con la energía radiante emitida por la placa bajo prueba.

- 10.- Evitar que se quemé o maltrate el termopar conectado a la placa rayada durante el recubrimiento de sus caras con hollín.



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

PRACTICAS DE RADIACION TERMICA PARA LA
MATERIA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a

HECTOR ERIC ESPINOSA DE LOS MONTEROS FERNANDEZ

Director: Dr. Jaime Cervantes de Gortari

Asesor: Ing. Lobin Martínez Hernández

México, D. F.

1984

TOMO II

4.5 LEY DE KIRCHHOFF

En el presente experimento se verificó la Ley de Kirchhoff a través de una serie de datos de las temperaturas de dos placas metálicas cuadradas paralelas con superficie de color negro durante un intercambio de energía radiante, y llevándolos a una curva representativa en función del tiempo para ilustrar que en estado de equilibrio térmico la irradiación es igual a la potencia emisiva de una superficie negra o gris.

INTRODUCCION.

Conforme la Ley de Kirchhoff, la razón de la potencia emisiva de una superficie a su absorptividad está limitada a valores que oscilan entre 0 y 1. La potencia emisiva máxima ocurre cuando tiene su valor igual a uno; una condición que se aplica al cuerpo negro. De esta forma, un cuerpo negro se considera como un emisor ideal.

REALIZACION DEL EXPERIMENTO.

Para llevar a cabo el experimento se utilizó el siguiente equipo experimental:

"Conjunto de dispositivos experimentales e instrumental electrónico de medición, así como de captación de radiación y temperatura".

1. Dos placas de acero inoxidable cubiertas en ambas caras con una capa de hollín cada una con funciones de emisor y la otra como captador.
2. Dos soportes universales con el objeto de asegurar la correcta posición de los termopares y sus arreglos respectivos de referencia durante la práctica.
3. Un termo conteniendo una mezcla de hielo picado y agua en equilibrio a 0°C , para referir las lecturas de los termopares conectados a las placas experimentales.
4. Dos tubos de vidrio con el propósito de uniformizar los gradientes de temperatura internos en la referencia.
5. Una termopila para llevar a cabo la transducción de la energía radiante emitida por cada placa ennegrecida con hollín.
6. Dos arreglos de termopares tipo K para efectuar mediciones de temperatura superficial en el centro de las placas.
7. Dos termómetros analógicos de mercurio para medir la

temperatura ambiente y verificar la temperatura de referencia de 0°C., durante la prueba.

8. Fuente cuadrangular plana de radiación infrarroja controlada eléctricamente mediante un transformador variable.
9. Un electrómetro digital marca Keithley modelo 616 y un multímetro digital marca Phillips modelo 2522 para medición del milivoltaje de la termopila y de las conexiones de los termopares.

La figura 4.35 muestra los componentes mencionados anteriormente.

METODOLOGIA.

Conjuntando el equipo anteriormente mencionado, se recubrieron primeramente ambas caras de cada una de las placas de acero inoxidable, cuyas superficies estaban rayadas, con una capa de hollín mediante la ignición de una estopa remojada con petróleo aproximando de esta forma, su emisión a la de un cuerpo negro, como anteriormente se había venido realizando.

Efectuado lo anterior, se colocó la primera placa directamente enfrente del calefactor plano cuadrangular infrarrojo. Posteriormente, se suministró una potencia eléctrica de entrada a la fuente al 100% de la capacidad del transformador variable, permitiendo que la placa alcanzara su equilibrio térmico. En ese instante, se tomaron lecturas de voltaje de termopila, a una distancia de 10 pulgadas -- 25.4 (cm) de la placa emisora.

Subsecuentemente se colocó la segunda placa con las mismas condiciones superficiales sobre el soporte situado a una distancia de una pulgada de la placa emisora, comenzando de inmediato a tomar lecturas de temperatura de ambas placas a intervalos de tiempo de un minuto, así como del voltaje de termopila. La figura 4.35 ilustra el montaje del equipo experimental.

Como se ilustra en las curvas de la figura 4.42 se puede apreciar el rápido incremento de temperatura de la segunda placa una vez expuesta al intercambio de energía radiante.

Se tomaron lecturas para ambas placas hasta alcanzar un nuevo equilibrio térmico. Así mismo se determinaron las condiciones del medio ambiente y el suministro eléctrico durante la prueba.

RESULTADOS

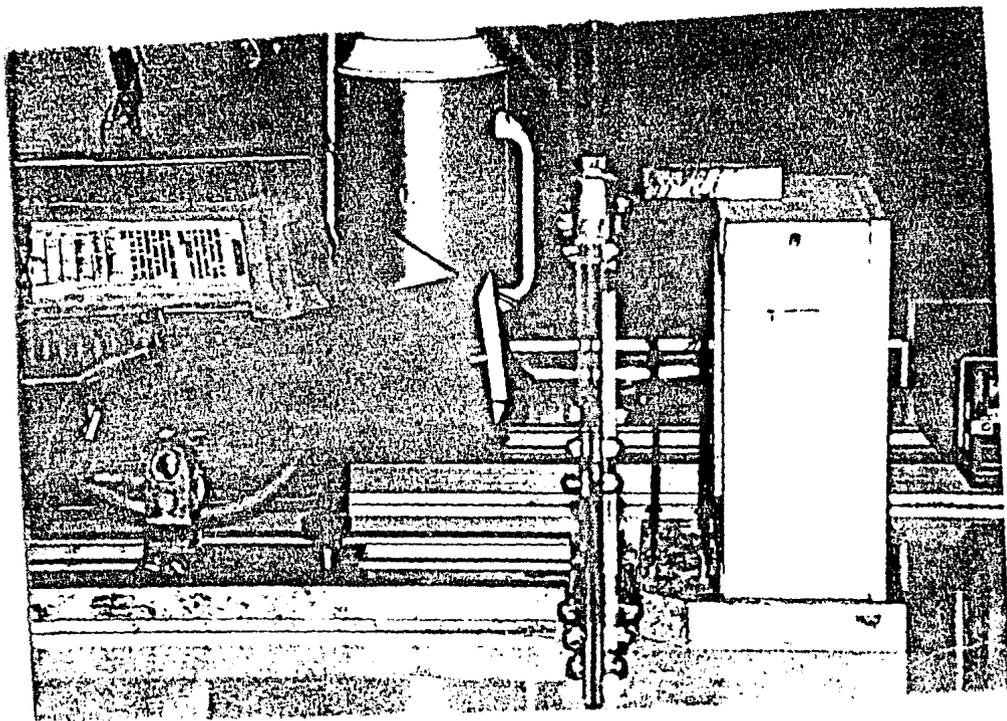
A continuación se enlistan los datos experimentalmente obtenidos, los cuales proporcionan la temperatura de cada una de las placas bajo prueba, el voltaje de termopila de la segunda placa colocada a temperatura ambiente, así como el voltaje y corriente de suministro a la fuente.

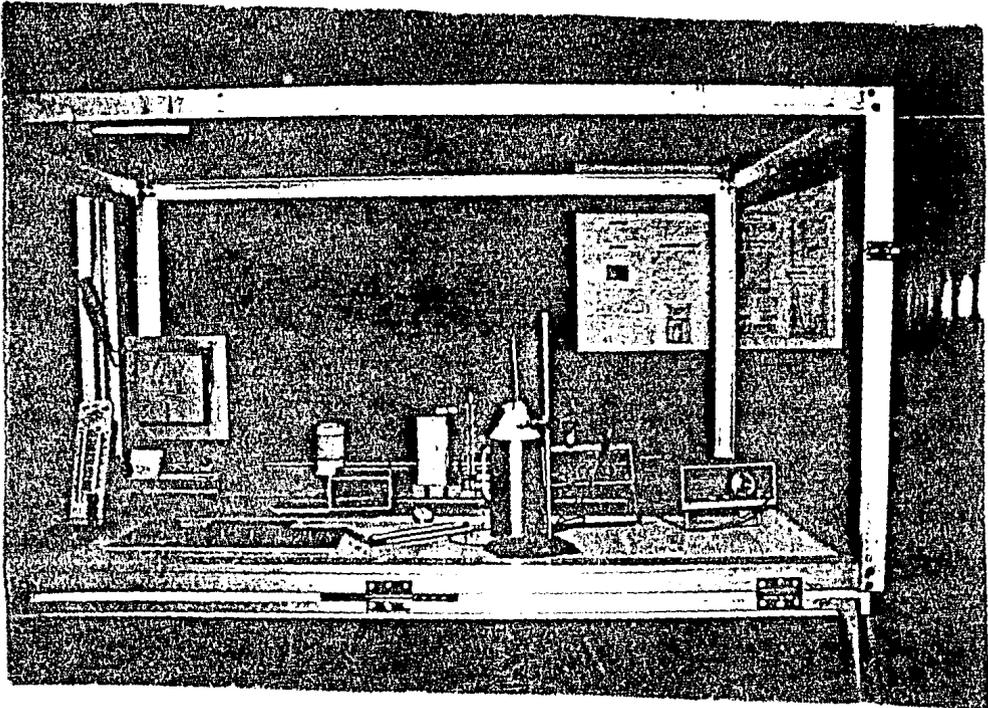
La última tabla resume aquellos datos utilizados para la obtención de los resultados finales de las pruebas, pues son los que presentan una menor dispersión y mayor uniformidad en su distribución por lo que se toman como los principales resultados.

Hay que tener en cuenta las perturbaciones propias de la experimentación así como los efectos ambientales como dispersión, corrientes convectivas, etc.

a continuación se presentan algunos ajustes por mínimos -- cuadrados aplicados a estos datos, los modelos relacionan la temperatura de cada placa en función del tiempo durante el cual se expusieron ambas placas al intercambio de calor radiante. Designándose con las literales.

t = tiempo
T = Temperatura





MODELOS AJUSTADOS

Para T_1 "curva exponencial"

$$a = 744.293; \quad b = 0.0001; \quad r^2 = 53.32\%$$

$$T_1 = 744.293e^{0.0001t}$$

$$r^2 = \text{coeficiente de correlaci3n} = 53.32\%$$

Para T_1 "curva Logarítmica"

$$a = 2,144.08; \quad b = 267.038; \quad r^2 = 54.36\%$$

$$T_1 = 2,144.08 - 263.038 \ln t$$

Para T_1 "curva Potencial"

$$a = 4.089 \times 10^{-72}, \quad b = 32.98, \quad r^2 = 56.62\%$$

$$T_1 = 4.089 \times 10^{-72} t^{32.98}$$

MODELO SELECCIONADO

$$T_1 = 4.089 \times 10^{-72} t^{32.98} \text{ por tener un ajuste mejor}$$

$$r^2 = 56.62\%$$

CARA T_2

Curva "experimental"

$$a = 382.8526; \quad b = 0.0002; \quad r^2 = 0.1028$$

$$T_2 = 382.852 e^{0.0002t}$$

Curva "Logarítmica"

$$a = 301.46; \quad b = 18.919; \quad r^2 = 13.12\%$$

$$T_2 = 301.46 + 18.919 \ln t$$

Curva "Potencial"

$$a = 307.488; \quad b = 0.05; \quad r^2 = 13.18\%$$

$$T_2 = 307.4879 t^{0.05}$$

MODELO SELECCIONADO

$$T_2 = 307.488 t^{0.05}$$

$$r^2 = 13.18\%$$

TABLA 4.57 RELACION DE DATOS EXPERIMENTALES
FECHA 12/VI/81 DIA: JUEVES

LEC.	TIEMPO (min.)	T ₁ °C	T ₂ °C	Ta °C	T ₁ °K	T ₂ °K	Ta °K
1	-	364	19.39	26	637.15	292.54	299.15
2	-	364	19.63	26	637.15	292.78	299.15
3	0	363	20.62	-	636.15	293.77	-
4	5	366	33.39	25.5	639.15	306.54	298.65
5	10	370	101.18	25.5	643.15	374.33	298.65
6	15	371	119.11	-	644.15	392.26	-
7	20	372	123.77	26	645.15	396.92	299.15
8	25	375	124.51	26	648.15	397.66	299.15
9	30	374	125.74	26	647.15	398.89	299.15
10	35	375	127.705	26	648.15	400.85	299.15
11	40	377	127.705	26	650.15	400.85	299.15
12	45	376	128.68	26	649.15	401.83	299.15
13	50	378	129.91	26	651.15	403.06	299.15
14	55	376	128.19	26	649.15	401.34	299.15
15	60	377	127.21	26	650.15	400.36	299.15
16	65	374	127.46	26	647.15	400.61	299.15
17	70	375	127.95	26.5	648.15	401.10	299.65
18	75	375	128.68	26	648.15	401.83	299.15
19	80	376	128.68	26.5	649.15	401.83	299.65
20	85	376	128.93	26.5	649.15	402.08	299.65
21	90	376	128.93	26.5	649.15	402.08	299.65
22	95	376	128.93	27	649.15	402.08	300.15
23	100	375	128.44	26.5	648.15	401.59	299.65
24	105	373	127.705	27	646.15	400.85	300.15
25	110	373	126.96	27	646.15	400.11	300.15
26	115	371	125.98	27	644.15	399.136	300.15
27	120	372	125.25	-	645.15	398.4	-
28	125	373	125.98	-	646.15	399.13	-

TABLA 4.6/ VALORES EXPERIMENTALES
FECHA: 1/II/84 DIA: LUNES

LECT.	TIEMPO (min.)	T ₁ (°C)	T ₁ (°K)	T ₂ (°C)	T ₂ (°K)	E (mv)
1	0	462	735.15	-	-	-
2	50	470	743.15	-	-	-
3	71	474	747.15	-	-	-
4	80	470	743.15	-	-	-
5	90	477	750.15	123.78	396.93	3.8
6	95	481	754.15	122.55	395.70	3.9
7	100	483	756.15	163.02	436.17	4.2
8	105	483	756.15	140.45	413.60	4.4
9	110	484	757.15	140.94	414.09	4.5
10	115	483	756.15	140.94	414.09	4.5
11	120	483	756.15	140.94	414.09	4.5
12	125	484	757.15	142.42	415.57	4.5
13	130	483	756.15	141.68	414.83	4.45
14	135	483	756.15	139.47	412.68	4.4
15	140	483	756.15	143.40	416.55	4.5
16	145	483	756.15	143.40	416.55	4.5
17	150	483	756.15	141.44	414.59	4.45
18	155	482	754.15	142.66	415.81	4.45
19	160	483	756.15	142.17	415.32	4.45
20	165	482	755.15	141.44	414.59	4.45
21	170	482	755.15	143.27	416.42	4.45
22	175	482	755.15	141.8	414.95	4.4
23	180	483	756.15	141.68	414.83	4.4
24	185	484	757.15	142.91	416.06	4.45
25	190	484	757.15	143.89	417.04	4.45
26	195	484	757.15	144.38	417.53	4.45
27	200	487	760.15	145.85	419	4.55
28	205	485	758.15	144.5	417.65	4.45
29	210	485	758.15	141.93	415.08	4.4
30	215	486	759.15	144.5	417.65	4.5
31	220	487	760.15	145.36	418.51	4.4
32	225	488	761.15	132.97	406.13	4.45
33	230	484	757.15	144.01	417.16	4.45
34	235	490	763.15	134.81	407.96	4.55
35	245	492	765.15	147.93	421.08	4.6
36	255	491	764.15	147.32	420.47	4.55
37	260	491	764.15	147.44	420.59	4.6
38	265	491	764.15	145.85	419	4.55
39	270	490	763.15	146.59	419.74	4.55
40	275	489	762.15	146.71	419.86	4.5

TABLA 4.60 MEDICIONES EXPERIMENTALES
 FECHA: 29/I/84 DIA: VIERNES

TIEMPO (min.)	T ₁ °C	T ₁ °K	T ₂ °C	T ₂ °K	E (mv)	Ta °C	Ta °K
0	467	740	-	-	2.45	18	291
88	476	749	-	-	2.49	19	292
114	472	745	-	-	2.41	19	292
123	473	746	-	-	2.45	19	292
133	481	754	76.86	349.86	3.0	19	292
138	488	761	126.95	399.95	4.9	19	292
143	487	760	129.58	402.58	5.1	19	292
148	487	760	130.78	403.78	5.1	19	292
153	487	760	131.02	404.02	5.15	19	292
158	489	762	130.06	403.06	5.1	20	293
163	489	762	131.50	404.5	5.1	20	293
168	486	759	130.30	403.3	5.05	20	293
173	488	761	129.58	402.58	5.0	20	293
178	490	763	129.10	402.10	5.0	20	293
183	480	753	129.34	402.34	5.1	20	293
188	491	764	131.26	404.26	5.1	20	293
193	492	765	130.30	403.30	5.1	20	293
198	491	764	130.54	403.54	5.1	20	293
203	491	764	131.50	404.50	5.1	20	293
208	490	763	130.78	403.78	5.1	20	293
213	488	761	129.82	402.82	5.0	20	293
218	490	763	130.30	403.30	5.0	20	293
223	490	763	129.34	402.34	4.95	20	293
228	489	762	130.06	403.06	4.90	20	293
233	488	761	129.34	402.34	4.90	20	293
238	488	761	129.82	402.82	4.90	20	293
243	487	760	127.18	400.18	4.95	20	293
248	486	759	127.43	400.43	4.85	20	293
253	489	762	128.86	401.86	4.85	20	293
258	486	759	128.02	401.02	4.85	20	293

EVALUACION DE LA PRACTICA: DE LA ECUACION

$$E = \sigma \epsilon A \theta (T_1^4 - T_2^4)$$

E = cantidad de energía radiante transferida neta

$$\frac{V_{10}}{T_{1F}} \left(\frac{E_{10}}{E_{1F}} = \frac{T_{10}^4 - T_{20}^4}{T_{1F}^4 - T_{2F}^4} \right)$$

T = Temperatura absoluta

V = Voltaje de la Termopila

E = Potencia emisora

1 = Placa emisora

2 = Placa recibidora

0 = Condiciones al comienzo

F = Condiciones en equilibrio térmico

Resolviendo la ecuación para T_{1F}

$$T_{1F} = \sqrt[4]{\left[\frac{V_{1F} (T_{10}^4 - T_{20}^4)}{V_{10}} \right] + T_{2F}^4}$$

T_{1F} cuando se calcula, resultará una temperatura que es cercana al valor experimental pero no es el mismo valor.

De las gráficas y de la ecuación

$$T_{10} = 636^\circ\text{K} \rightarrow V_{10} = 47.55 \text{ mv}$$

$$T_{2F} = 402^\circ\text{K}$$

$$T_{20} = 293.77^\circ\text{K}$$

$$T_{1F} = 649^\circ\text{K} \rightarrow V_{1F} = 51.56 \text{ mv}$$

$$T_{IF} = \sqrt[4]{\frac{51.56}{47.5} \left[(636)^4 - (293.7)^4 \right] + (402)^4}$$

$$T_{IFc} = \underline{663.75^\circ\text{K}} \text{ calculada}$$

T calculada T_F medida

$$T_{Fm} = \underline{649^\circ\text{K}} \text{ medida}$$

$$T_{IF} - T_{IFm} = 14.75^\circ\text{K}$$

E es el ejercicio del manual

$$T_{IFc} - T_{IFm} = 576 - 509 = 67^\circ\text{K}$$

Por lo que es más exacto el llevado a cabo

T_{IFc} = Temperatura de la placa emisora en condiciones de equilibrio térmico calculada.

T_{IFm} = Temperatura de la placa emisora en condiciones de equilibrio térmico medida experimentalmente.

$$T_{ifinal} = \sqrt[4]{\frac{V_1 \text{ final} (T_{10}^4 - T_{20}^4)}{V_{10}}} + T_2^4$$

E = Potencia emisiva

1 = Placa emisora

2 = Placa receptora

0 = Condiciones de intercambio

final = condiciones en equilibrio térmico

$$T_{10} = 757^{\circ}\text{K}$$

$$T_{20} = 400^{\circ}\text{K}; \quad T_{2\text{final}} = 402^{\circ}\text{K}$$

De la Fig. 4.27 (ley de Steffan - Boltemann) los voltajes de la termopila son:

$$V_{10} = 38.35 \text{ mv con } 757^{\circ}\text{K}$$

$$V_{1\text{ final}} = 39.58 \text{ mv con } \underline{763^{\circ}\text{K}} \text{ que es } T_{1f}$$

$$T_{1f} = \sqrt[4]{\frac{39.58 [(757)^4 - (400)^4] + (402)^4}{38.35}}$$

$$T_{1f} = \underline{762.82^{\circ}\text{K}}$$

EVALUACION.- De las figuras resultantes, así como de las curvas respectivas de calibración determinadas a partir del experimento 4.3 (Ley de Stefan - Boltzmann).

De la Figura 4. 27 se tiene:

Para las condiciones iniciales del intercambio de energía radiante entre las 2 placas.

$$T_{10} = 755.2^{\circ}\text{K}$$

$$T_{20} = 43.4^{\circ}\text{K}$$

Así como

$$T_{1F} = 763.8^{\circ}\text{K} \quad \text{y} \quad T_{2F} = 418.8^{\circ}\text{K}$$

De la figura 4. 27 los voltajes de termopila que corresponden a estas temperaturas son:

$$\text{Para } T_{10} = 755.2^{\circ}\text{K} \quad V_{10} = 37.73 \text{ mv}$$

$$T_{2f} = 418.8^{\circ}\text{K} \quad V_{2f} = 3.56 \text{ mv}$$

Como estos valores la temperatura evaluada teóricamente para la superficie emisora (placa 1) es:

$$T_{1f} = \sqrt[4]{\left\{ \frac{29.47 (755.2)^4 - (413.4)^4 + (418.8)^4}{37.73} \right\}}$$

$$T_{1f} = 763.87^{\circ}\text{K} \text{ calculada} \quad T_{1f} = 763.8^{\circ}\text{K} \text{ experimental}$$

$$T_{1f} = \frac{1}{2} \sqrt{V_{1f} (T_{10}^4 - T_{20}^4)} + T_{2f}^4$$

$$T_{10} = 755.2^\circ\text{K} \quad V_{1f} \text{ con } T_{1f} = 763.8^\circ\text{K} \Rightarrow V_{1f} = 39.47 \text{ mv}$$

$$T_{20} = 413.4^\circ\text{K} \quad T_{2f} = 418.8^\circ\text{K}$$

$$V_{10} = 37.73 \text{ mv} \quad \text{con } 755.2^\circ\text{K}$$

$$V_{2f} = 3.56 \text{ mv} \quad \text{con } 418.8^\circ\text{K}$$

$$T_{1f} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{39.47 [(755.2)^4 - (413.4)^4]}{37.73} + (418.8)^4}$$

$$T_{1f} = \underline{763.87^\circ\text{K} \text{ calculada}}$$

$$T_{1f} = \underline{763.8^\circ\text{K} \text{ experimental}}$$

Estos resultados serán los más verídicos, así como los que se utilizaron.

$$\frac{F_{120}}{1} = \frac{T_{1f}}{763.87} = \frac{763.8}{763.87} = 0.99$$

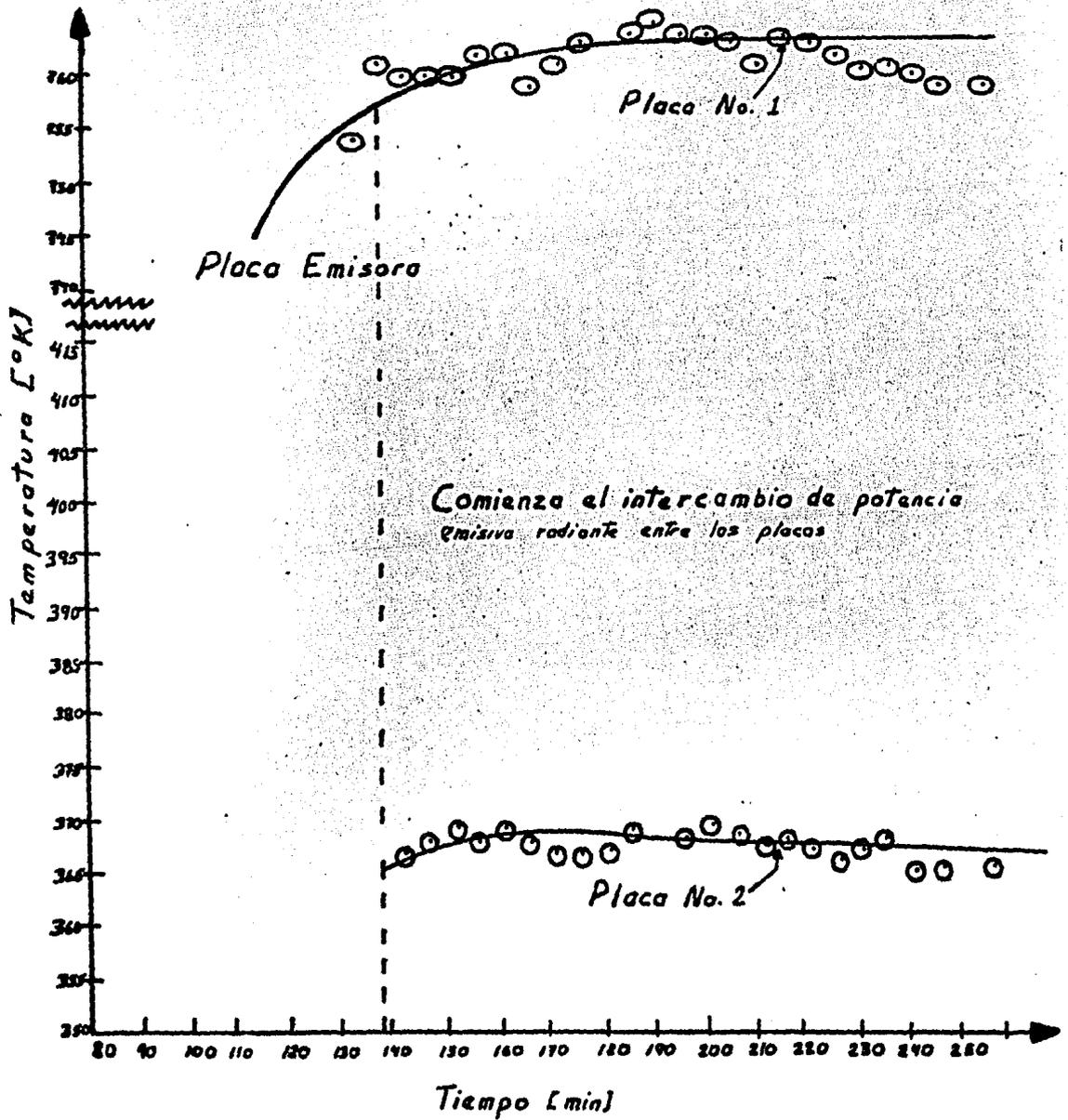


Figura 4.42 Intercomunicación Radiante entre las dos placas negras bajo prueba.

CONCLUSIONES.- Esta temperatura presenta una desviación del $\frac{1}{2}$ respecto a la temperatura del cuerpo emisor elaborada experimentalmente en condiciones de equilibrio térmico. Es to es debido a que la placa emisora no absorbía en su totalidad la energía térmica radiante emitida por la placa receptora, debido a los efectos de dispersión como convección lo que ocasiona que existan pérdidas en el flujo de calor radiante, también debido a los efectos de emisividad.

EXPERIMENTO No. 4.6 MODELO CUADRATICO INVERSO Y EFECTO DE
LOS FACTORES DE FORMA

El objetivo del presente experimento, consiste en verificar el modelo cuadrático inverso, demostrándose el concepto de factor de forma.

Este experimento se realizó en cuatro partes, en las cuales se determinó la distribución de la intensidad de radiación en función de la distancia para los siguientes cuerpos emisores:

- a) Fuente cilíndrica de radiación infrarroja.
- b) Fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja.
- c) Fuente puntual infrarroja
- d) Fuente incandescente de radiación visible.

Para llevar a cabo el desarrollo de este experimento, se hicieron los siguientes arreglos:

- 1.- Se montó la termopila en el carril graduado de apoyo -- más largo, dando la cara a la fuente cilíndrica de calor radiante. Posteriormente se colocó su reflector -- frontal cuya rendija se orientaba paralelamente a la su perficie de la mesa de experimentación.

Conforme se iban tomando mediciones con la termopila, - se enfocaba ésta a la fuente cilíndrica de radiación in

frarroja, haciéndose girar al mismo tiempo que se desplazaba sobre el carril de apoyo, de manera que su reflector frontal presentará siempre su cara paralelamente a la superficie del cilindro calefactor; siendo perpendicular a dichas superficies la distancia entre las mismas. Con objeto de tener como una posible referencia se midió la temperatura en el centro de la superficie de la fuente cilíndrica, mediante un termopar encapsulado en una vaina metálica fijado con un soporte universal en la cara que el cilindro calefactor no presentaba a la termopila, conectando a través de un alambre de extensión a un medidor digital de temperatura marca Doric Trendicator - modelo 400A.

Por otra parte, se conectó un electrómetro digital marca Keithley, modelo 616 a la termopila para llevar a cabo las mediciones de milivoltaje de ésta durante el experimento. Las Figuras 4.43 y 4.44 muestran la disposición del equipo de experimentación y los instrumentos de medición.

La distancia entre la termopila y la fuente cilíndrica se medía directamente con un flexómetro.

- 2.- Una vez realizadas las mediciones con la fuente cilíndrica se llevaron a cabo otras, procediendo de la siguiente forma:

Primeramente, se preparó una placa de acero inoxidable - cuyas caras rayadas se recubrieron con una capa de hollín aproximando de ésta forma su comportamiento al de un ---

cuerpo negro.

Dicha placa se montó sobre los tornillos de soporte que mantenían la placa directamente al frente de la fuente cuadrangular plana de radiación infrarroja, suministrándose el flujo de calor hacia la fuente mediante la perilla de control.

Nuevamente se colocó la termopila directamente al frente de la placa emisora de calor radiante en el carril de -- apoyo graduado, desplazándose ésta a diversas distancias y registrándose el milivoltaje correspondiente a cada posición, y a cada temperatura de la placa emisora y por -- ciento de la perilla del control de suministro de corriente a la fuente, la cual se hizo variar en pasos de 25%.

La temperatura de la placa emisora, se midió utilizándose para ello un termopar encapsulado en una vaina metálica, el cual se conectó a un medidor digital de temperatura mediante un cable de extensión.

En cada paso se permitía que la placa alcanzara su equilibrio térmico cuando la temperatura registrada permanecía aproximadamente constante.

- 3.- Una vez realizado lo anterior, se procedió a poner en -- marcha la fuente puntual de radiación infrarroja, suministrándose la corriente mediante la perilla de control del transformador al 75% de su capacidad.

Posteriormente se colocó la termopila en el carril gra--

duado de apoyo más largo, colimada directamente con la fuente puntual y llevándose a diferentes posiciones a lo largo del carril graduado de apoyo.

El voltaje de la termopila, como se había estado realizando, se midió con el electrómetro digital Keithley.

- 4.- Ya que se habían realizado las mediciones anteriores y una vez que se enfriaba el contenedor térmico de las fuentes puntuales, se encendió la fuente incandescente de radiación visible con la perilla de control del suministro de corriente a la fuente en la posición del 80%.

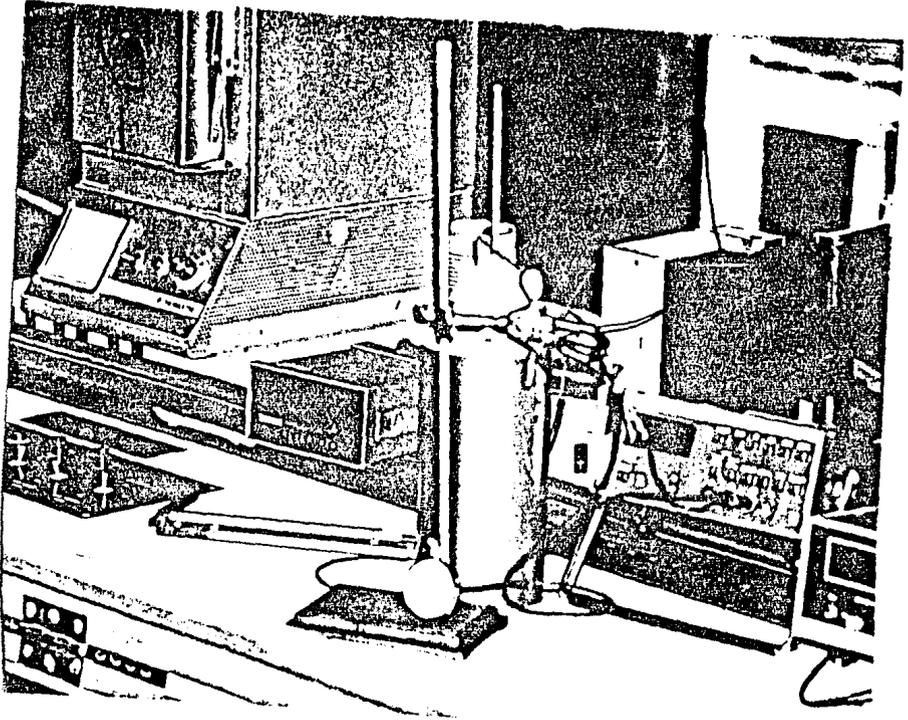
Utilizándose un fotómetro como sensor de la radiación visible, el cual se montó sobre el carril graduado de apoyo en alineación a la fuente de radiación visible.

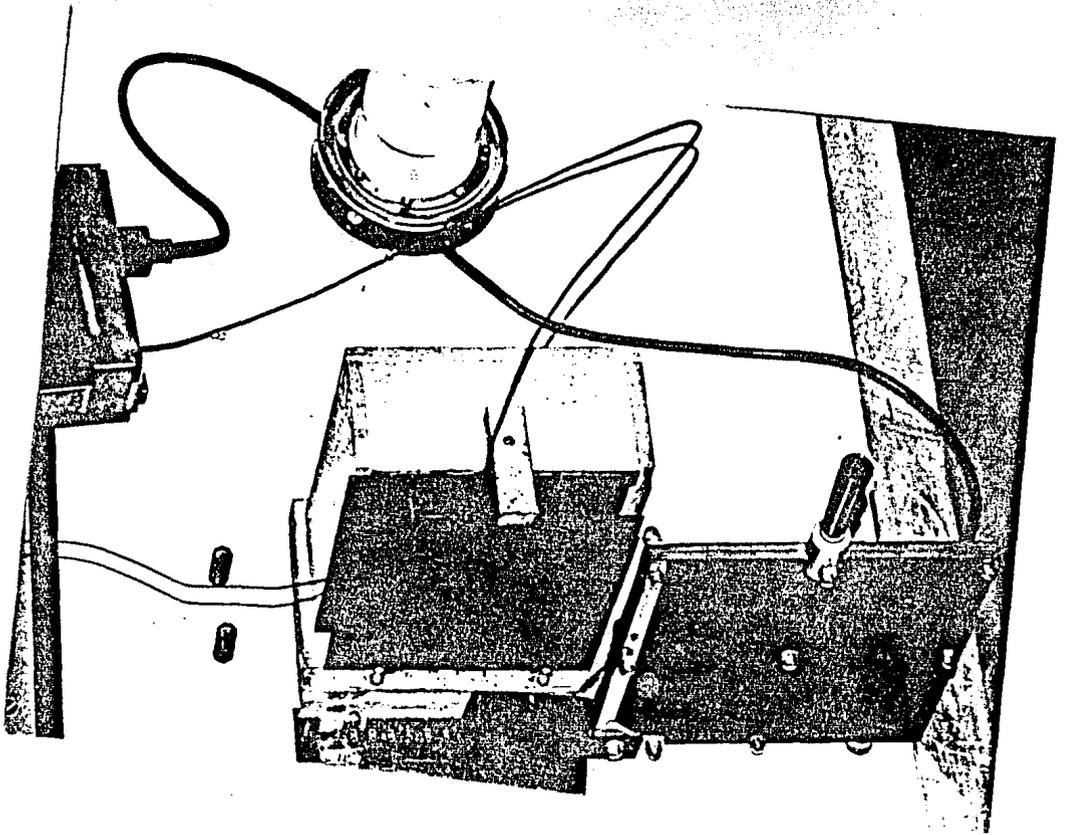
LISTA DE INSTRUMENTOS Y COMPONENTES UTILIZADOS EN EL DESARROLLO DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL.

- a) 1 electrómetro digital marca Keithley, modelo 616, cuya función fue la medición de voltaje de termopila en [mili volts].
- b) 1 multímetro digital marca Phillips modelo PM 2522.
- c) 1 medidor digital de temperatura marca Doric modelo 400A
- d) 1 termómetro analógico de mercurio para la medición de temperatura ambiente.
- e) 1 termopar Tipo "K" (chromel-alumel), cuya punta se en-

cuentra encapsulada en una vaina metálica, el cual tiene un conector donde se adaptó un alambre de extensión del mismo material.

- f) Un cronómetro análogo convencional marca Park, para medir el tiempo durante el cual se efectuó la recopilación de los datos utilizados en la evaluación de la práctica.
- g) 1 Reloj de cualquier tipo, para medir el tiempo y la hora a la que se midió una determinada lectura o conjunto de éstas.
- h) 1 flexómetro o regla para medir la distancia que existe entre la fuente y el sensor de radiación.
- i) Un soporte universal, el cual se ocupó para sujetar el termopar y fijarlo sobre la superficie del cuerpo al cual se midió su temperatura.
- j) 1 termopila que se utilizó como sensor de radiación térmica para diversas fuentes.
- k) 1 fotómetro, analógicamente para detección y medición de radiación proveniente de los cuerpos bajo estudio.
- l) Equipo de experimentación de radiación térmica marca Scott modelo 9053.





NOMECLATURA

- Hora = Hora a la que se efectuó la medición
- x = Posición diametral de la termopila referente a la superficie del cilindro calefactor
- V_t = Voltaje de termopila [mv]
- T = Temperatura de la fuente [°C]
- t = Intervalo de tiempo durante el cual se efectuó la medición con el termopar o la termopila.
- Frec = Número de veces que se repitió un valor durante la medición.
- Ta = Temperatura ambiente
- V = Voltaje de suministro a la fuente (volts) c.a.
- I = Corriente de suministro a la fuente (amps) c.a.
- d = Distancia entre la fuente y el sensor
- t = Lectura del termopar
- E = Voltaje de termopila

DESARROLLO DE LA PRACTICA

PARTE (A)

Se fijó mediante el soporte universal el termopar a la superficie del cilindro emisor, y se conectó al medidor digital de temperatura.

Se colocó la termopila en el soporte viendo directamente al frente del cilindro emisor y se conectaron sus terminales - al electrómetro digital Keithley. Llevándose a cabo las siguientes mediciones:

- X = Posición de la termopila sobre la marca del riel -- más largo en [pulgadas].
- V_t = Voltaje de Termopila en [mv]
- T = Temperatura superficial en el centro del cilindro en [°C]
- T_a = Temperatura ambiente en [°C]
- V = Voltaje proporcionado al sistema en [volts] A.C.
- I = Corriente suministrada al sistema en [amps] A.C.
- $t_{T,E}$ = Tiempo transcurrido para llevar a cabo la medición de T,E
- d = Distancia desde la fuente hasta la termopila en --- [pulgadas] y [centímetros]
- \bar{V}_t = Volt. medio de termopila
- \bar{T} = Temp. media del cilindro
- Frec = Frecuencia o número de veces en que se repitió una cierta lectura

TABLA 4.58 MEDICIONES CON LA FUENTE CILINDRICA DE RADIA-
CION INFRARROJA.

HORA	X	V _t (mV)	t _E	T °C	t _T	V Volts CA	I Amper. CA	Ta °C
13:50	Centro	0.25						
		0.26		123				
		0.27						
		0.30		122				
14:05	Centro	0.31	30"	123	31"	73	2.8	27
		0.32		124				
		0.37		125				
14:30		0.38	30.8"	126	30.4"	73	2.7	28
		0.39		127				
		0.40						

TABLA 4.57 MEDICIONES PARA LA FUENTE DE RADIACION INFRARROJA

HORA	X	d cm-pulg	T	FREC	\bar{T}	V_t	FREC	\bar{V}_t	Ta	V	I	t_T	t_E
14:40	17 1/8	9.1 cm	125	2	125.5	0.39	4	0.40	28	73	2.7	30.2"	30.4"
		3 5/8 in	126	2		0.40	9						
15:00	17 1/8	9.1 cm	128	1	129	0.65	4	0.66	28	75	2.8	29.9"	30.6"
		3 5/8 (pulg)	129	3		0.66	5						
			130	1		0.67	2						
15:06	30	8 5/3 (pulg)	128	1	129	0.35	4	0.36	28	74	2.8	30.1"	31.2"
		22.85 cm	129	3		0.36	7						
			130	1		0.37	6						
15:17	29	8 7/16 (pulg)	132	1	134.5	0.35	3	0.36	28	74	2.8	32.2"	30.3"
			133	1		0.36	10						
		21 cm	134	1		0.37	7						
			135										
			136	1									
15:25	28	7 21/32 (pulg)	131	3	132	0.34	1	0.355	28	73	2.8	32.2"	30.2"
			132	4		0.35	7						
		19.6 (cm)	133	1		0.36	8						
15:30	27	7 3/32 (pulg)	125	2	126	0.38	6	0.385	28	73	2.7	30.3"	31.7"
			126	5		0.39	6						
		17.9 (cm)	127	3									
15:35	26	6 1/4 (pulg)	130	3	131	0.40	4	0.41	28	74	2.8	30.9"	31.6"
			131	5		0.41	6						
		16.4 (cm)	132	2		0.42	2						
15:39	25	6 (pulg)	134		135.5	0.44	2	0.45	28.5	74	2.77	30"	30.4"
		15 (cm)	135	2		0.45	6						
			136			0.46	5						
			137	1									
15:45	24	5 5/8 (pulg)	130	1	131.5	0.49	6	0.50	28.5	74	2.8	30.2"	30.6"
			131	2		0.50	9						
		13.65 (cm)	132	2		0.51	2						
			133	1									
15:52	23	5 1/16 (pulg)	127	2	128	0.51	6	0.525	28.5	73	2.8	29.9"	30.5"
			128	1		0.52	8						
		12.5 (cm)	129	1		0.53	1						
15:55	22	4 1/2 (pulg)	130	1	132	0.56	5	0.57	28.5	73	2.78	30.1"	30.5"
		11.7 (cm)	131	1		0.57	9						
			132	1		0.58	4						
			133	1									
			134	1									
16:02	21	4 7/4 (pulg)	131	1	132.5	0.58	2	0.595	29	74	2.78	33.3"	30.5"
			132	2		0.59	6						
		10.8 (cm)	133	3		0.60	4						
			134	2		0.61	1						
16:10	20	3 7/8 (pulg)	128	1	130	0.61	1	0.625	29	72	2.7	30.5"	30.8"
			129	1		0.62	6						
			130	2		0.63	7						
		9.8 (cm)	131	2		0.64	2						
			132	1									
16:45	19	3 3/4 (pulg)	123	2	124.5	0.64	3	0.65	28	72	2.6	31.7"	30.5"
			124	5		0.65	8						
		9.3 (cm)	125	4		0.66	6						
16:48	18	3 5/8 (pulg)	127	1	127.5	0.65	6	0.66	28	73	2.7	30"	30.4"
		9.2 (cm)	128	2		0.66	8						
16:45	17	3 9/16 (pulg)	128	1	128.5	0.68	6	0.69	28	73	2.7	30.5"	30.4"
		9 (cm)	129	2		0.69	9						
						0.70	2						
16:58	17 1/8	3 14/32 (pulg)	128	1	129	0.67	3	0.68	28	73	2.7	30"	30.9"
		9 (cm)	129	3		0.68	8						
			130	1		0.69	5						
17:02	16	3 13/16 (pulg)	126	2	127.5	0.64	1	0.655	28	74	2.7	31.2"	29.2"
			127	3		0.65	1						
		9.4 (cm)	128	3		0.66	8						
			129	1		0.67	5						

AJUSTE DE UNA LINEA RECTA A LOS LOGARITMOS DE LOS VALORES
PROPORCIONADOS POR LA TABLA 4.

$$m = 0.743$$

$$b = 0.531$$

$$r^2 = 0.980$$

$$\text{Log } y = 0.743 \quad \text{Log } X + 0.531$$

$$\text{Log } E = 0.743 \quad \text{Log } X + 0.531$$

x = distancia diametral proyectada en la
escala del carril de apoyo más largo
de la termopila

PARTE (B)

Esta parte se llevó a cabo con una placa de acero inoxidable cuya superficie rayada se cubrió con negro de humo previamente.

Posteriormente, se colocó directamente enfrente del calentador para placa, conectándose un termopar en el centro de su superficie. Leyéndose la medición realizada mediante el medidor digital de temperatura.

Se colocó la termopila sobre el carril más corto con sus terminales directamente conectadas al electrómetro digital.

Se tomaron lecturas de voltaje de termopila "E" en (mili-volts) y temperatura superficial de la perilla del autotransformador a distintas posiciones del 25, 50 y 75% y se realizaron las mediciones mencionadas, cuando la placa había alcanzado aproximadamente el equilibrio térmico, es decir cuando la T permanecía oscilando entre valores más o menos constantes.

También así mismo, se efectuaron mediciones del tiempo "t" durante el cual se realizaron las lecturas del voltaje V y corriente I suministrados al sistema de la temperatura ambiente y la hora a que fueron medidas.

PARTE C MEDICIONES REALIZADAS CON LA FUENTE PUNTUAL DE RADIACION INFRARROJA

Se giró la perilla del transformador variable hasta la posición que indica el 75% del suministro de potencia que indica el 75% del suministro de potencia eléctrica a la fuente.

Posteriormente se colocó la termopila directamente enfrente de la fuente puntual de radiación infrarroja (o calefactor puntual infrarrojo), montada en el carril graduado más largo enfocándola hacia el calefactor.

A continuación las tablas . y . enlistan las mediciones obtenidas durante esta prueba. Para lo cual se tiene la siguiente nomenclatura.

- X = posición de la termopila en pulgadas
 d = distancia entre la termopila y la fuente en pulgadas
 V_t = voltaje de termopila en milivolts
 hora = hora a la que se realizaron las mediciones
 t = tiempo durante el cual se tomaron las lecturas
 V = Voltaje suministrado a la fuente
 Ta = temperatura ambiental en °C

Cuando se realizaron estas mediciones el clima se encontraba lluvioso y con corrientes de viento frío, lo que ocasionaba una fuerte convección, así como dispersión de la energía radiante y evaporación de las partículas del aire circulante a la fuente por la humedad del mismo.

4.62 VALORES PROMEDIO PARA EL EMISOR PLANO AL 25%

X	T.	E	Ta	POT. watts	TIEMPO min. seg.
6 1/2	62	1.79	25	18.5	0 596
7	61	1.76	25	18.5	1' 0.35"
8	61	1.71	25	18	1' 1.1"
9	60	1.615	26	19	1' 0.3"
10	60	1.52	26	18.5	1' 0.7"
11	61	1.44	26	19	1' 0.9"
12	61	1.32	26	14.8	1' 1.8"
13	62	1.20	26	19	1' 3.1"
14	62	1.105	26		1' 3.2"

TABLA 4.64 VALORES PROMEDIO PARA EL EMISOR PLANO AL 50%

14	143	4.01	25	140.6	1'
13	143	4.50	25	140.6	1' 3.1"
12	143	5.05	25	133.2	1'
11	143	5.62	25	148	1' 1"
10	144	6.18	25	148	1' 0.1"
9	144	6.715	25	140.6	1' 5.2"
8	143	7.13	25	140.6	
7	145	7.465	25	135.05	1' 0.2"
6 1/2	146	7.635	25	131.4	1' 1.3"

TABLA 4.65 MEDICIONES PARA EL EMISOR PLANO AL 25%

HORA	X [pulg]	T [°C]	E [mv]	FREC	E [mv]	t	Ta [°C]	V [volts] AC	I [amps] AC
15:02	6 1/2	62	1.78	9	1.79	59.6"	25	37	0.5
			1.79	14					
			1.80	6					
15:07	7	61	1.74	2	1.76	1'0.35"	25	37	0.5
			1.75	7					
			1.76	10					
			1.77	7					
			1.78	3					
15:10	8	61	1.69	1	1.71	1'1.1"	25	36	0.5
			1.70	5					
			1.71	15					
			1.72	13					
			1.73	4					
12:15	9	60	1.60	2	1.615	1'0.3"	26	38	0.5
			1.61	11					
			1.62	12					
			1.63	3					
15:19	10	60	1.50	2	1.52	1'0.7"	26	37	0.5
			1.51	11					
			1.52	16					
			1.53	10					
			1.54	3					
15:30	11	61	1.43	6	1.445	1'0.9"	26	38	0.5
			1.44	15					
			1.45	9					
			1.46	1					
15:38	12	61	1.30	1	1.32	1'1.8"	26	37	0.4
			1.31	4					
			1.32	12					
			1.33	11					
			1.34	2					
15:40	13	62	1.19	6	1.205	1'3.1"	26	38	0.5
			1.20	15					
			1.21	12					
			1.22	2					
15:42	14	62	1.09	4	1.105	1'3.2"	26		
			1.10	11					
			1.11	10					
			1.12	4					

TABLA 7.66 MEDICIONES PARA EL EMISOR PLANO AL 501

HORA	X (pulg)	E (mv)	FREC	\bar{E} (mv)	T (°C)	Ta (°C)	V (volts) AC	I (amps) AC	t
15:45	14				62	26	73	1.9	
17:31	14	4.0	10						
		4.01	12	4.015	143	25	74	1.9	1'
		4.02	6						
		4.03	3						
		4.48	3						
17:32	13	4.49	8	4.495	143	25	74	1.9	1'3.1"
		4.50	11						
		4.51	6						
		5.05	5						
		5.05	10	5.055	143	25	74	1.8	1'
17:34	12	5.06	8						
		5.07	1						
		5.59	3						
		5.60	6						
		5.61	10	5.615	143	25	74	2	1'1"
17:36	11	5.62	15						
		5.63	9						
		5.64	1						
		6.16	1						
		6.17	5						
17:48	10	6.18	9	6.18	144	25	74	2	1'0.1"
		6.19	8						
		6.20	2						
		6.68	1						
		6.69	3						
		6.70	5						
17:52	9	6.71	8	6.715	144	25	74	1.9	1'5.2"
		6.72	7						
		6.73	3						
		6.74	2						
		6.75	1						
		7.09	1						
		7.10	1						
17:55	8	7.12	7	7.12	143	25	74	1.9	
		7.13	12						
		7.14	5						
		7.43	1						
		7.44	2						
		7.45	3						
17:58	7	7.46	6	7.46	145	25	73	1.85	1'0.2"
		7.47	6						
		7.48	4						
		7.49	1						
		7.62	4						
		7.63	10						
18:00	6 1/2	7.64	10	7.655	146	25	73	1.8	1'1.3"
		7.65	6						
		7.66	2						
		7.67	1						

TABLA 4.67 VALORES PROMEDIO PARA EL EMISOR PLANO AL 75%

d	\bar{E}_e	\bar{E}_M	\bar{T}	te	t _M	ta	$\bar{P}ot$	\bar{E}
6 1/2	19.6	19.1	253	1'1.5"	59.8"	22.5	294.3	19.35
7	18.65	18.15	2215	1'0.6"	1'0.9"	23.5	288.9	18.4
8	17.1511	16.85	247.5	30.6"	42.4"	23.5	299.6	17.0005
9	15.765	15.4	243.5	31"	31"	23.5	295.6	15.582
10	14.2404	14	242.5	24.75"	30.35"	23.5	301	14.12
11	14.55	14.25	244	30.6"	30.6"	23.5	299.6	14.4

TABLA 4.68 MEDICIONES PARA EL EMISOR PLANO AL 751

X	E _o	PREC	E _o	E _M	PREC	E _M	T	t _o	T _M	T _a	V	I	HORA
6 1/2	19.5	10	19.6	19.0	3	19.1	254	1'1.5"	59.8	22.5	109	2.7	19:28
	19.6	14		19.1	9		253						
	19.7	3		19.2	9		253						
7	18.3	2	18.55	17.8	1	18.1	252	1'0.6"	1'0.9"	23.5	107	2.7	19:34
	18.4	3		17.9	2								
	18.5	5		18.0	2								
	18.6	9		18.1	10								
	18.7	10		18.2	10								
	18.8	3		18.3	7								
				18.4	1		251						
8	16.95	1	17.1511	16.7	2	16.85	248	30.6"	42.4"	23.5	107	2.8	19:37
	17.04	1		16.8	4								
	17.05	1		16.9	5								
	17.11	1		17	3								
	17.14	1											
	17.25	1											
	17.26	1											
	17.27	1											
	17.29	1					247						
	15.55	1		15.765	15.1		1						
15.64	1	15.2	1										
15.70	1	15.3	2										
15.71	1	15.4	4										
15.75	1	15.5	3										
15.78	1	15.6	1										
15.79	1												
15.86	1												
15.87	1												
15.88	1												
15.89	1			242									
15.76	1			242	20.4"	23.5	108	2.7	19:45				
10	13.93	1	14.3337	13.8	1	14	243	30.35"	23.5	108	2.8	19:47	
	14.03	1		13.9	3								
	14.06	1		14.0	5								
	14.50	1		14.1	3								
	14.51	1		14.2	1								
	14.53	1											
	14.54	1											
14.57	1			243	29.1"	23.5	107	2.8	19:51				
10	13.76	1	14.147										
	14.02	1											
	14.03	1											
	14.1	1											
	14.22	1											
	14.23	1											
	14.27	1											
	14.28	1											
14.19	1												
14.38	1												
14.14	1												

TABLA 4.69 VALORES MEDIOS PARA LA FUENTE PUNTUAL DE RADIACION INFRARROJA AL 75%

d	V _{termopila}
6 1/2	11.575
7 1/2	9.80
8 1/2	8.445
9 1/2	7.375
10 1/2	6.105
11 1/2	5.02
12 1/2	4.0
13 1/2	3.27
14 1/2	2.705
15 1/2	2.26
16 1/2	1.95
17 1/2	1.69
18 1/2	1.48
19 1/2	1.295
20 1/2	1.15

TABLA 4.70 MEDICIONES PARA LA FUENTE PUNTUAL INFRARROJA AL
(75%)

HORA	$x=d$	V_t	Frec	\bar{V}_t	t	V	Ta
18:20	6 1/2	11.49	1	11.52	33.7"	111	
		11.50	1				
		11.51	2				
		11.52	2				
		11.53	2				
		11.54	1				
18:10	6 1/2	11.55	2	11.575	31.2"	112	23
		11.55	1				
		11.56	3				
		11.57	5				
		11.58	4				
		11.59	1				
18:20	7 1/2	11.60	1	9.80	30"	111	23
		9.78	2				
		9.79	3				
		9.80	2				
		9.81	3				
		9.82	1				
18:22	8 1/2	8.41	1	8.44	30.5"	111	23
		8.42	2				
		8.43	2				
		8.44	3				
		8.45	3				
		8.46	2				
		8.47	1				

TABLA 4.// MEDICIONES REALIZADAS PARA LA PUENTE PUNTUAL INFRARROJA AL 751

X	E	FREC	E	t	Ta	V	HORA
9 1/2	7.30	1	7.355	30.9"	23	112	18:25
	7.32	1					
	7.33	1					
	7.34	1					
	7.35	1					
	7.36	2					
	7.37	2					
	7.38	2					
	7.39	2					
7.40	1						
10 1/2	6.09	1	6.125	31.1"	23	111	18:27
	6.10	2					
	6.11	2					
	6.12	1					
	6.13	1					
	6.14	1					
	6.15	1					
6.16	1						
11 1/2	5.01	6	5.02	31.3"	23	111	18:29
	5.02	8					
	5.03	2					
12 1/2	3.97	2	4.0	30.7"	23	111	18:30
	3.98	2					
	3.99	2					
	4.0	2					
	4.01	1					
	4.02	2					
4.03	1						
13 1/2	3.24	1	3.265	1'54.4"	22.5	111	18:40
	3.25	7					
	3.26	13					
	3.27	16					
	3.28	10					
	3.29	1					
14 1/2	2.69	1	2.705	56.5"	22.5		18:42
	2.70	6					
	2.71	6					
	2.72	1					
15 1/2	2.25	1	2.26	33.2"	22.5		18:45
	2.26	8					
	2.27	6					
16 1/2	1.92	1	1.945	1'18.8"			18:48
	1.93	3					
	1.94	8					
	1.95	12					
	1.96	10					
	1.97	1					
17 1/2	1.67	2	1.685	1'8.11"			18:50
	1.68	9					
	1.69	12					
	1.70	5					
18 1/2	1.47	6	1.485	1'22"			18:52
	1.48	16					
	1.40	10					
	1.50	1					
19 1/2	1.28	1	1.29	23.4"			18:54
	1.29	6					
	1.30	6					
20 1/2	1.13	1	1.15	1'20.5"			18:59
	1.14	23					
	1.15	32					
	1.16	14					
	1.17	1					

DISTANCIA "x" EN (pulgs.)	VOLT. DE TERMOPILA V_t en (MV)	VOLT. MEDIO TERMOPILA \bar{V}_t EN (MV)
9.54	0.68	0.68
9.54	0.69	0.69
9.58	0.66	0.66
9.62	0.66	0.655
9.66	0.65	0.65
9.7	0.655	0.655
9.85	0.625	0.625
10.25	0.595	0.595
10.6	0.57	0.57
10.92	0.525	0.525
11.37	0.5	0.5
11.9	0.45	0.45
12.45	0.41	0.41
13.71	0.355	0.355
14.26	0.36	0.36
14.99	0.36	0.36
17.04	0.385	0.385

TABL. 4. 72 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA FUENTE CILINDRICA DE RADIACION INFRARROJA

HORA	X	T	PREC.	T media	t	E	PREC.	E	t	V	I
12:07	ext.	145	1			0.28	4	0.295			
		146	3			0.29	14	0.295	1 min	63	2.3
	isq.	147	4	147.5	1'	0.30	13			63	2.3
		148	8			0.31	1				
		149	5								
		150	2								
12:11	15 3/4	141	1			0.31	9'			63	2.3
		142	1			0.32	11	0.32	1'		
		143	2	143	1'	0.33	3				
		144	2								
12:14		145	1						63	2.4	
12:15	16	145	1			0.33	4				
		146	1			0.34	11	0.345	1'	63	2.4
		147	6	147	1'	0.35	9				
		148	5			0.36	1				
		149	1								
12:18	16 1/4	140	1			0.33	2				
		141	2			0.34	14	0.34	1'	64	2.4
		142	3			0.35	12				
		143	3	143	1'						
		144	2								
		145	1								
		146	1								
12:26	16 1/2	150	6			0.36	6			64	2.3
		151	4	151		0.37	13				
		152	4			0.38	10	0.375	1'		
						0.39	1				
12:28	16 3/4	146	5			0.37	6			64	2.4
		147	6	147		0.38	19	0.38	1'		
		148	2			0.39	12				
12:30	17	144	2			0.35	2				
		145	6	145	1'	0.36	9			64	2.4
		146	6			0.37	15	0.37			
						0.38	11				
				0.39	2						
13:10	17 1/8	144	6			0.39	1				
		145	1	145		0.40	6				
		146	5			0.41	5	0.405			
		147	1			0.42	2				
		143	2								
		143	1			0.37	5				
12:34	17 1/4	144	2			0.38	17	0.385	1'		
		145	3	145	1'	0.39	16			60	2.3
		146	4			0.40	1				
		147	4								
		140	2			0.34	4				
12:36	17 1/2	141	5	141.5	1'	0.35	22	355	1'	9.4	63
		142	7			0.36	23				
		143	2			0.37	1				
		136	5			0.33	1				
12:37	17 3/4	137	2			0.34	13				
		138	3	138	1'	0.35	18	.35	1'	9.3	60
		139	5			0.36	11				
		140	1			0.37	1				
		134	2			0.32	5				
12:39	18	135	2			0.33	19	.335	1'	2.3	60
		136	3	136.5	1'	0.34	19				
		137	3			0.35	4				
		138	3								
		139	1								
12:41	18 1/4	138	1			0.30	1				
		139	2	139.5	1'	0.31	12				
		140	10			0.32	26	.315	1'	2.3	60
		141	3			0.33	15				
		139	1			0.27	1				
12:43	18 1/2	140	3			0.28	9				
		141	5	141	1'	0.29	19	0.29	1'	2.3	60
		142	5			0.30	9				
		143	2			0.31	1				
		142	1			0.27	14				
12:45	18 5/8	143	8	143.5	1'	0.28	25	.285	1'	2.3	60
		144	7			0.29	11				
		145	1			0.30	1				

FUENTE PUNTUAL INFRARROJA (75%)

x	\bar{v}_T	$\lg v_t$
$\lg 6.5 = 0.8129$	$\lg 11.5475 \pm 0.0388909$ $= 1.062488$	0.7527194
$\lg 7.5$	$\lg 9.8 = 0.9912261$	0.715654
$\lg 8.5$	$\lg 8.44 = 0.9263424$	0.6832364
$\lg 9.5$	$\lg 7.355 = 0.8665827$	0.6544287
$\lg 10.5$	$\lg 6.125 = 0.7871061$	0.6285068
$\lg 11.5$	$\lg 5.02 = 0.7007037$	0.6049449
$\lg 12.5$	$\lg 4 = 0.60206$	0.5833489
$\lg 13.5$	$\lg 3.265 = 0.5138832$	0.5634158
$\lg 14.5$	$\lg 2.705 = 0.4321673$	0.5449078
$\lg 15.5$	$\lg 2.26 = 0.3541084$	0.5276345
$\lg 16.5$	$\lg 1.945 = 0.2889196$	0.5114416
$\lg 17.5$	$\lg 1.685 = 0.2265999$	0.4962018
$\lg 18.5$	$\lg 1.485 = 0.1717265$	0.4818091
$\lg 19.5$	$\lg 1.29 = 0.1105897$	0.4681742
$\lg 20.5$	$\lg 1.15 = 0.0606978$	0.4552214

$$r^2 = -0.5323724$$

$$m = -0.5963751$$

$$b = 1.2375187$$

$$\lg v_t = 0.5963751 \lg x + 1.2375187$$

FUENTE PUNTUAL INFRARROJA (75%)

lg X	lg E	lg E _{Pron}
lg 6.5 = 0.8129134	lg 11.575 = 1.063521	0.6740211
lg 7.5 = 0.8750613	lg 9.8 = 0.9912261	0.6365054
lg 8.5 = 0.9294189	lg 8.445 = 0.9265997	0.6036923
lg 9.5 = 0.9777236	lg 7.375 = 0.867762	0.5745331
lg 10.5 = 1.0211893	lg 6.105 = 0.7856857	0.5482949
lg 11.5 = 1.0606978	lg 5.02 = 0.7007037	0.5244455
lg 12.5 = 1.09691	lg 4 = 0.60206	0.5025859
lg 13.5 = 1.1303338	lg 3.27 = 0.5145578	0.4824096
lg 14.5 = 1.161368	lg 2.705 = 0.4321673	0.4636757
lg 15.5 = 1.1903317	lg 2.26 = 0.4409091	0.4461917
lg 16.5 = 1.2174839	lg 1.95 = 0.2900346	0.4298012
lg 17.5 = 1.243038	lg 1.69 = 0.2278867	0.4143754
lg 18.5 = 1.2671717	lg 1.48 = 0.1702617	0.3998071
lg 19.5 = 1.2900346	lg 1.295 = 0.1122698	0.3860059
lg 20.5 = 1.3117539	lg 1.15 = 0.0606978	0.372895

$$r^2 = 0.5852631$$

$$m = -0.6036524$$

$$b = 1.164738$$

$$E = -0.6036521 \ln x + 1.164738$$

Las curvas obtenidas en este experimento demuestran el modelo cuadrático inverso, así como otras propiedades del factor de forma. En la parte A, la curva que se obtuvo es una línea recta con una pendiente negativa, cuyo valor se aproxima a dos, lo que ilustra la dependencia que guarda hacia el término r^2 en el factor de forma. En la parte B se obtuvo una familia de curvas (curvas desde C_1 hasta C_4 , véase fig. 4.45), a diferentes temperaturas.

Por otra parte, al haber colocado el reflector frontal a la termopila de manera que la rendija del mismo estuviera paralela a la superficie de la mesa, el efecto ocasionado conduce a la obtención de otra línea recta.

En la parte C, se obtuvo nuevamente una línea recta, cuya pendiente es menor a dos.

Esto se debe al cambio de θ_2 con respecto a la distancia entre el emisor plano y la fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja.

Las figuras 4.45 y 4.46 presentan la representación gráfica del conjunto de datos experimentales obtenidos durante las pruebas realizadas con las distintas fuentes de energía radiante.

- C₁-C₃ Fuente plana de radiación infrarroja
 A Fuente cilíndrica de radiación infrarroja
 B Fuente puntual de radiación infrarroja

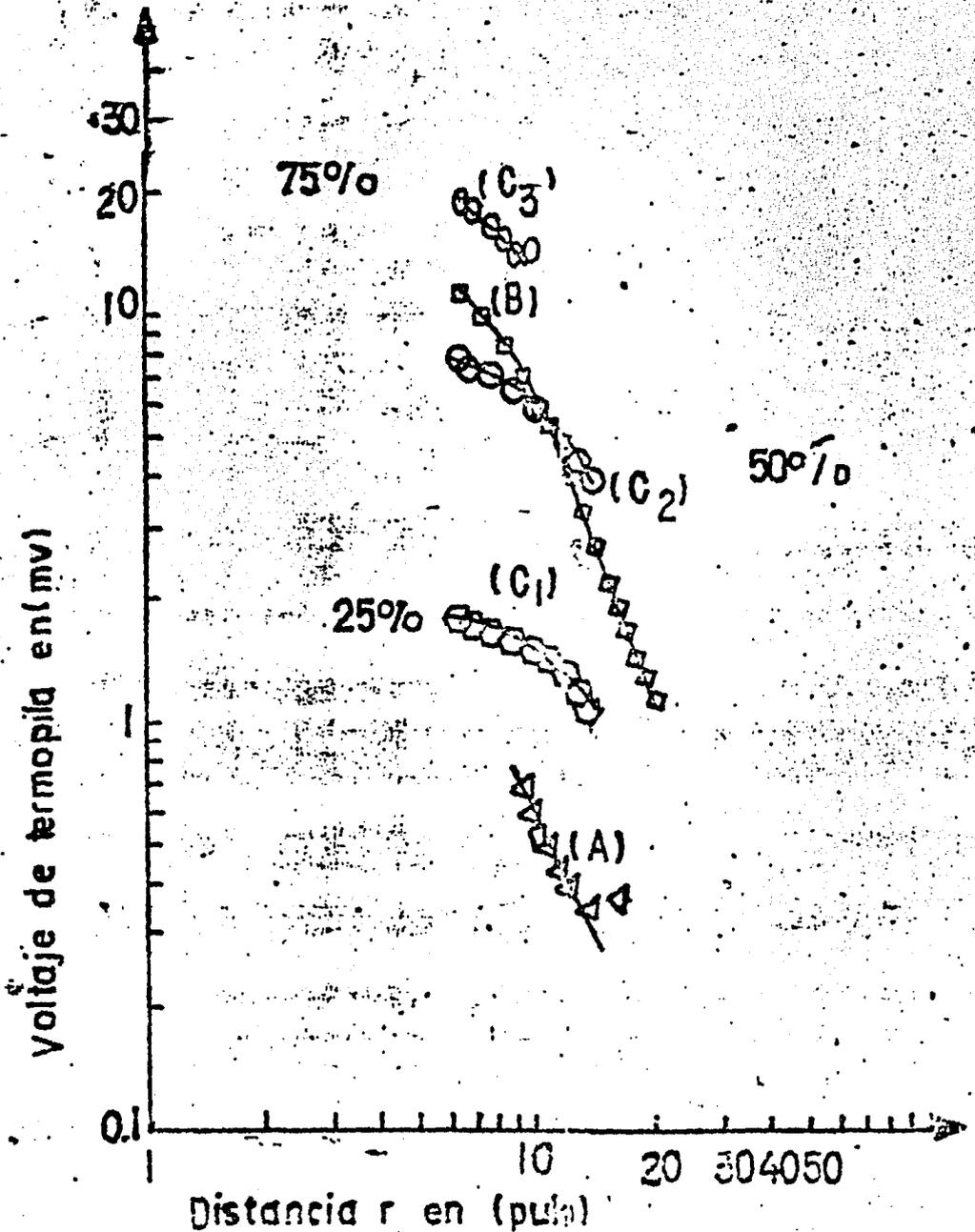


Fig 4.45 Distribución del voltaje de termopila en función de la distancia de diversas fuentes de radiación

314

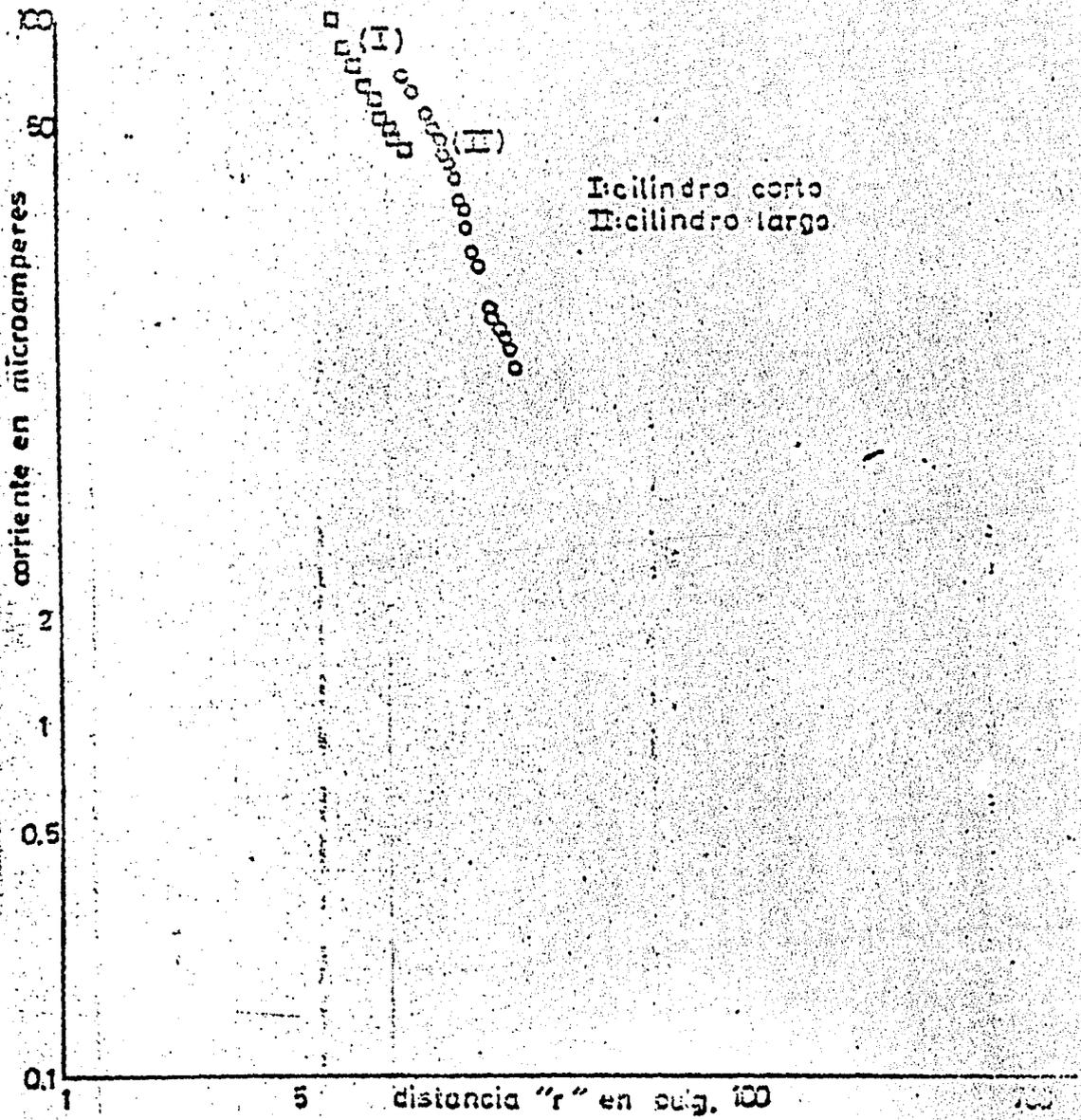


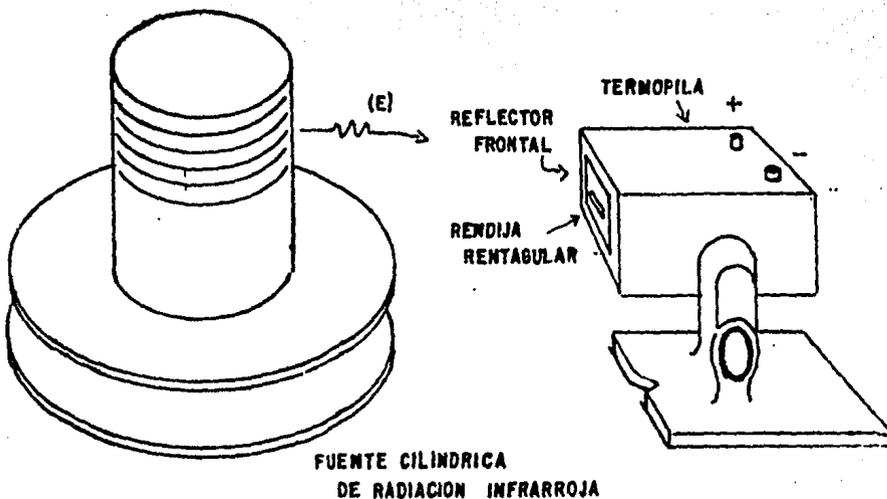
Fig 4.46 Distribución de la radiación visible en función de la distancia (escala: log-log)

EXPERIMENTO 4.7 DETERMINACION DEL FACTOR DE FORMA ENTRE UNA FUENTE DE CALOR CILINDRICA DE LONGITUD FINITA Y UNA SUPERFICIE RECTANGULAR DIFERENCIAL.

A continuación se describe el cálculo realizado para el factor de forma entre la fuente cilíndrica de radiación infrarroja y la rendija rectangular del reflector frontal de la termopila, la cual es pequeña en relación al cilindro emisor.

La figura 4.47 ilustra esquemáticamente la disposición de los cuerpos participantes.

FIGURA 4.47 FUENTE CILINDRICA DE RADIACION INFRARROJA Y RENDIJA DEL REFLECTOR FRONTAL DE LA TERMOPILA

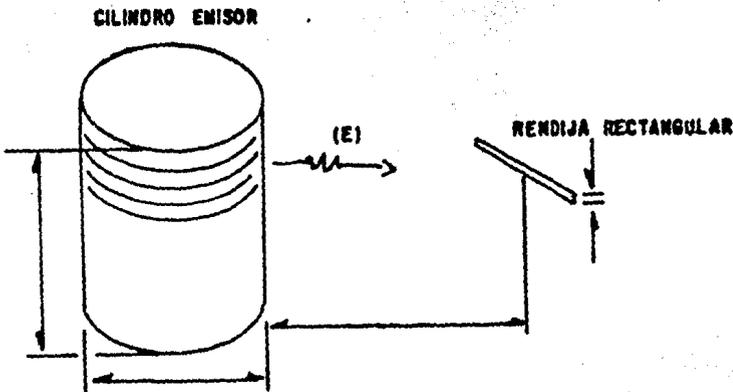


INTRODUCCION.- La porción de la energía que es emitida por una superficie y que incide en otra, se define como factor de forma entre las dos superficies participantes. Esto implica la existencia de una dependencia de la geometría y la orientación entre las superficies participantes.

Aunque las superficies participantes son consideradas como cuerpos negros, los resultados obtenidos se generalizan para cuando se trata a la energía emitida como difusa.

Para llevar a cabo la determinación del factor de forma entre la fuente cilíndrica de radiación infrarroja (cilindro emisor) y la rendija rectangular del reflector frontal de la termopila (superficie rectangular diferencial), perpendicular a la propagación de la radiación térmica emitida por el cilindro se recurrió a las lecturas obtenidas en el experimento .6 parte A, en las que se utilizó la termopila como sensor del calor radiante. La Figura 4.48 muestra esquemáticamente las superficies participantes.

FIGURA .4.48 SUPERFICIES PARTICIPANTES



EVALUACION.- Para llevar a cabo la determinación del factor de forma entre el cilindro emisor y la superficie rectangular se hizo referencia al modelo inverso cuadrático para el cual se tiene:

$$q_{\text{neta}} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{\pi r^2} dA_2 dA_1$$

$$= \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int F_{(d_1)_2} dA_1$$

Considerandose el caso de una área finita A_2 a una diferencial de área dA_1 , cuando el área finita A_2 es la superficie emisora, se integra con respecto al área A_2 o sea:

$$q_{\text{neta}} = dA_1 \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int_{A_2} \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{\pi r^2} dA_2$$

$$q_{\text{neta}} = dA_1 \int_{A_2} \sigma T_2^4 \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{\pi r^2} dA_2$$

$$q_{\text{neta}} = \int_{A_2} \sigma T_2^4 dA_2$$

El factor de forma dF_{2-d_1} es la razón de q_{2-d_1} a q_2 o sea:

$$dF_{2-d_1} = \frac{dA_1 \int_{A_2} \sigma T_2^4 (\cos \phi_1 \cos \phi_2 / \pi r^2) dA_2}{\int_{A_2} \sigma T_2^4 dA_2}$$

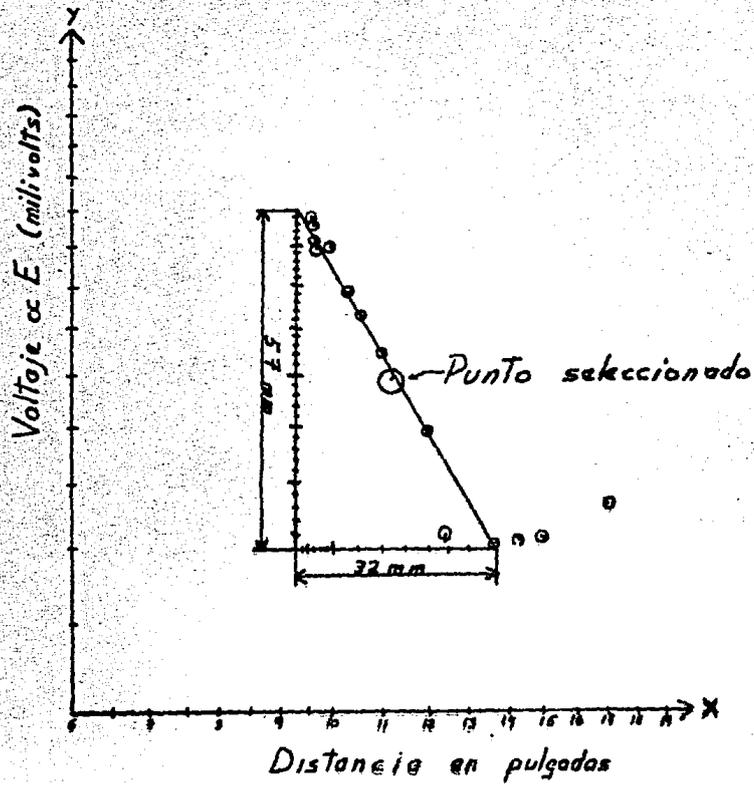


Figura 4.49

r = distancia entre el cilindro emisor y la superficie rectangular diferencial (rendija)

De la Figura 4.49, se tienen los siguientes datos y relaciones:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta \ln (\text{fem})}{\Delta \ln r} = \frac{57 \text{ mm}}{52 \text{ mm}} = 1.78$$

La pendiente de esta línea representa el exponente de la distancia r , de manera que:

$$F_{12} = \frac{1}{r^{\text{pendiente}}}$$

Puesto que la fem de la termopila es proporcional a la potencia emisiva del calefactor cilíndrico se tiene:

$$\text{fem} \propto q_{\text{neto}} = C F_{12} = C \frac{1}{r^{1.78}}$$

donde:

$$C = \sigma (\epsilon_1 T_1^4 - \epsilon_2 T_2^4) A_1$$

C puede calcularse a partir de cualquier punto seleccionado de la curva A en la Fig. . Por ejemplo:

$$r = 11.37 \text{ pulg.} \quad \text{fem} = 0.5 \text{ mv.}$$

sustituyendo se tiene:

$$C = (\text{fem}) (r^{1.78}) = (0.5) \times (11.37)^{1.78}$$

$$C = 37.86$$

Para determinar cualquier factor de forma F_{12} se tiene:

$$F_{12} = \frac{f_{em}}{c} = \frac{1}{r \text{ pendiente}} = \frac{1}{(11.37) 1.78} = \frac{0.5}{37.8}$$

$$F_{12} = 1.32\%$$

Lo que significa que el 1.32% del calor radiante emitido por el cilindro calefactor incide en la rendija del reflector -- frontal de la termopila, cuando la distancia entre ellos es de 11.37 pulgadas.

En este experimento se aume que el reflector frontal de la termopila no absorbe la energia radiante.

EXPERIMENTO 4.8 DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DE LOS FACTORES DE FORMA EN FUNCION DE LA DISTANCIA

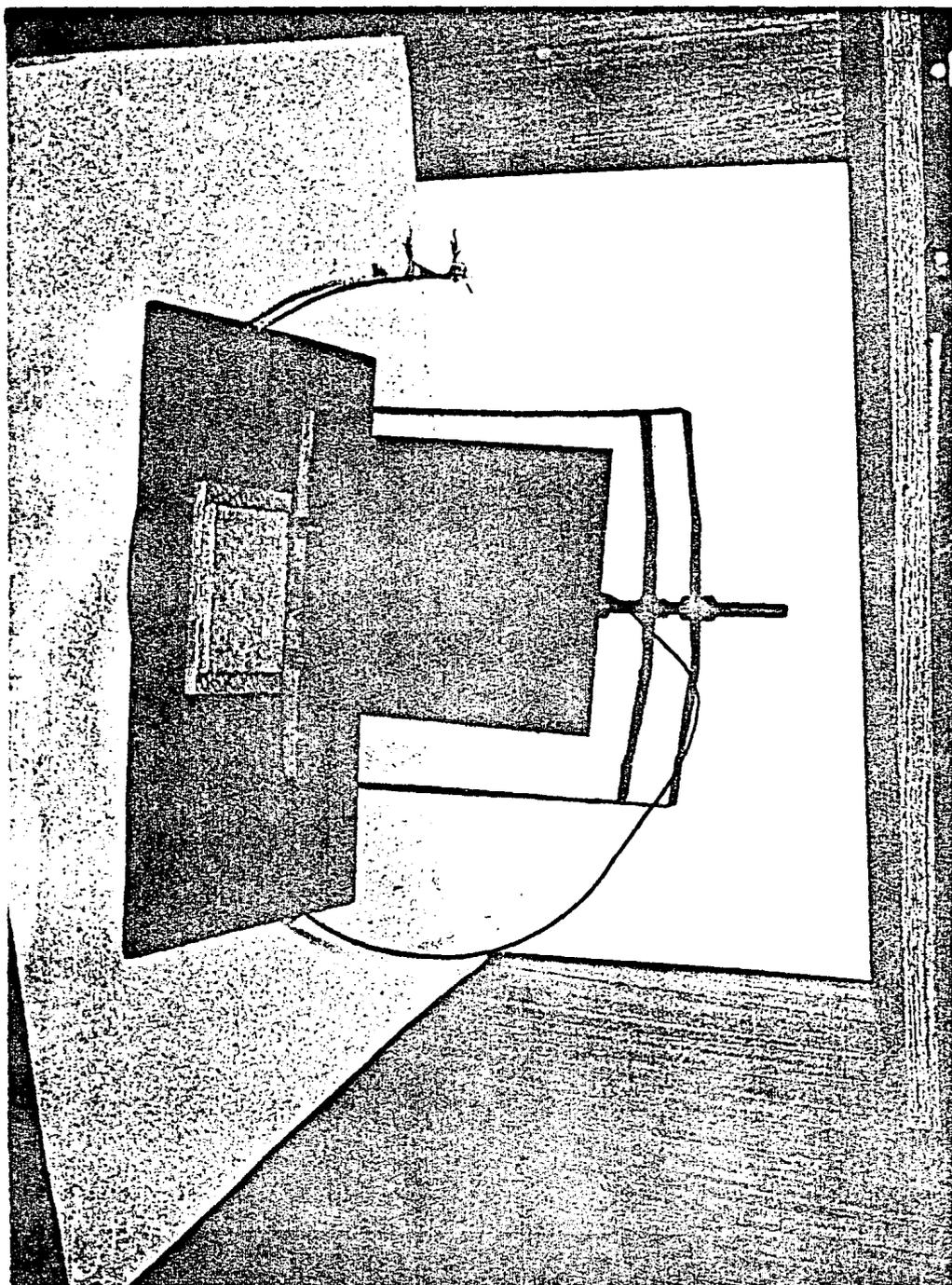
A continuación se presenta la determinación de los factores de forma a partir de datos experimentales, los cuales son llevados a una curva que ilustra su distribución en función de la distancia existente entre dos placas planas cuadradas paralelas del mismo tamaño y condición superficial expuesta a un intercambio de radiación térmica.

INTRODUCCION.- Para evaluar el intercambio de flujo neto de calor radiante entre varias superficies expuestas a intercambio de radiación térmica, es necesario determinar la porción de la energía térmica radiante total de cada superficie participante que interacciona y se absorbe por las otras.

REALIZACION DEL EXPERIMENTO

La preparación efectuada en este experimento es análoga a la que se desarrolló en el experimento No. 4.5 (Ley de Kirchhoff).

Sin embargo, las mediciones experimentales de temperatura para las dos placas expuestas al intercambio de calor radiante, así como del milivoltaje de la termopila se efectuaron a diversas distancias entre estas dos. Para el desarrollo experimental de esta práctica se empleó el siguiente equipo electrónico de medición y control, así como del conjunto de dispositivos sensores y accesorios experimentales.



- a) Fuente cuadrangular plana de radiación infrarroja: emisor de flujo controlado de calor radiante.
- b) Dos placas planas cuadradas de acero inoxidable cuyas superficies rayadas se encontraban ennegrecidas con una capa de hollín del mismo tamaño y espesor, cuyas funciones fueron las de emisor y captador de energía radiante respectivamente.
- c) Un soporte de alineación, deslizable para la placa receptora, el cual permite colocar la placa receptora a diferentes distancias del emisor permitiendo también una alineación adecuada de la placa respecto de la placa radiadora, desplazándose ésta por el carril de apoyo graduado -- (véase Fig. 4.50)
- d) Una regla o flexómetro para asegurar que la distancia entre la placa receptora y la termopila permaneciera a 10 - pulgadas, así como medir la distancia entre dos placas experimentales.
- e) Un termo conteniendo una mezcla de hielo picado y agua en equilibrio utilizada como sistema de referencia de temperatura a $0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{K}$. (véase la Fig. 4.50)
- f) Un conjunto de arreglos de termopares tipo K como sensores de temperatura de la placa emisora.
- g) Un conjunto de tubos de vidrio conteniendo aceite para de este modo uniformar los gradientes de temperatura y corrientes parásitas de la mezcla de referencia en equilibrio. (véase Fig. 4.50)

- h) Un cronómetro para medir el tiempo durante el cual se -- efectuó cada medición, así como de los intervalos a los cuales se obtienen las temperaturas durante el intercambio de calor radiante entre las dos placas. (véase Fig. 4.50)
- i) Dos termómetros analógicos de mercurio para efectuar la medición de la mezcla de hielo y agua en equilibrio como referencia asegurándose que se encontraba a 0°C , así como la medición de la temperatura ambiente.
- j) Un conjunto de soportes universales para la fijación de las conexiones de termopares de las placas. Para de ésta forma evitar las perturbaciones debidas al movimiento cuando se trabajan voltajes del orden de milivolts, que pueden producir inexactitudes también para la detención del termómetro sumergido dentro de la mezcla de referencia. (véase Fig. 4.50)
- k) un multímetro digital marca Phillips modelo 2522 para medir el milivoltaje de la termopila.
- l) Un electrómetro digital marca Keithley, modelo 616 para medir el milivoltaje correspondiente a la temperatura de la placa receptora.
- m) Un medidor digital de temperatura marca Doric-Indicator modelo para medir la temperatura de la placa emisora.
- n) Un termopar tipo K encapsulado en una vaina metálica cu-

yo conector aloja a un cable de compensación del mismo material. (véase Fig. 4.5/)

Para efectuar las mediciones de temperatura de equilibrio - para las dos placas cuyas superficies ennegrecidas se encontrarán expuestas al intercambio de calor radiante, así como de los milivoltajes respectivos de la termopila a diversas distancias entre ellas.

Estos datos fueron utilizados para evaluar los factores de forma y llevarlos a una curva que representa la distribución de los factores de forma en función de la distancia, - durante el intercambio de radiación térmica.

A continuación se presenta el procedimiento experimental para la obtención de los datos requeridos.

- 1.- Se recubrieron ambas caras rayadas de cada placa con -- una capa de hollín.
- 2.- Se colocó cualesquiera de las dos placas ahumadas directamente frente al calefactor plano cuadrangular encima de los tornillos de soporte a una distancia de una pulgada (2.54 cm) de éste.
- 3.- Se permitió que dicha placa con funciones de emisor alcanzara su equilibrio térmico cuando el valor de temperatura permanecía constante. Midiéndose así mismo, el milivoltaje de termopila colocada ésta a una distancia de 25.4 cm (=10 pulgadas), desde el emisor.
- 5.- Se colocó la segunda placa cuya superficie estuvo tam--

bién rayada y recubierta con una capa de hollín (a partir de haber alcanzado el equilibrio térmico del emisor) sobre el soporte deslizante alineado respecto al emisor, manteniendo una distancia entre la placa receptora y la termopila de 10 pulgadas (≈ 25.4 cm). (véase las Figuras 4.53 y 4.54)

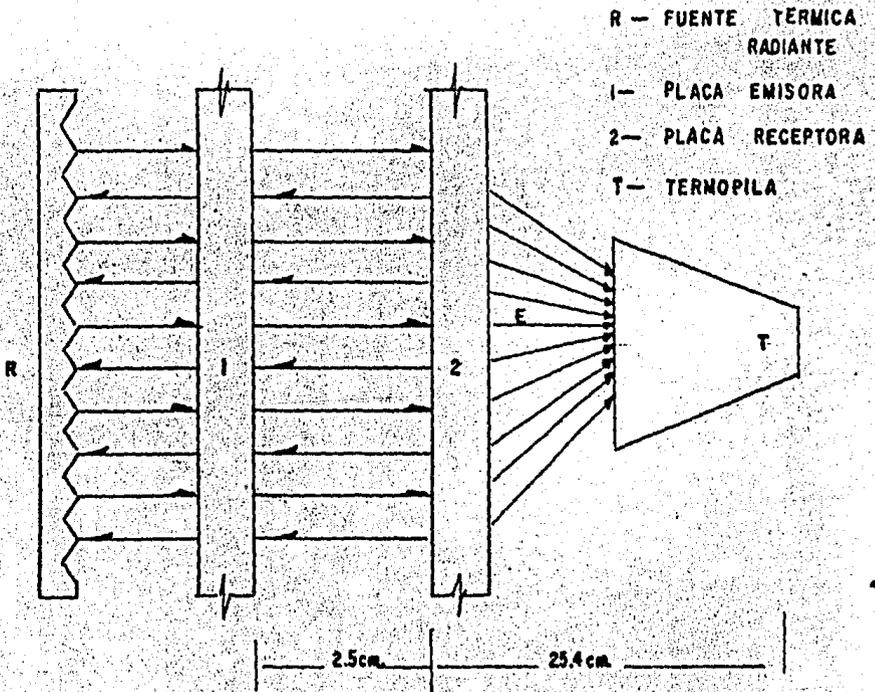
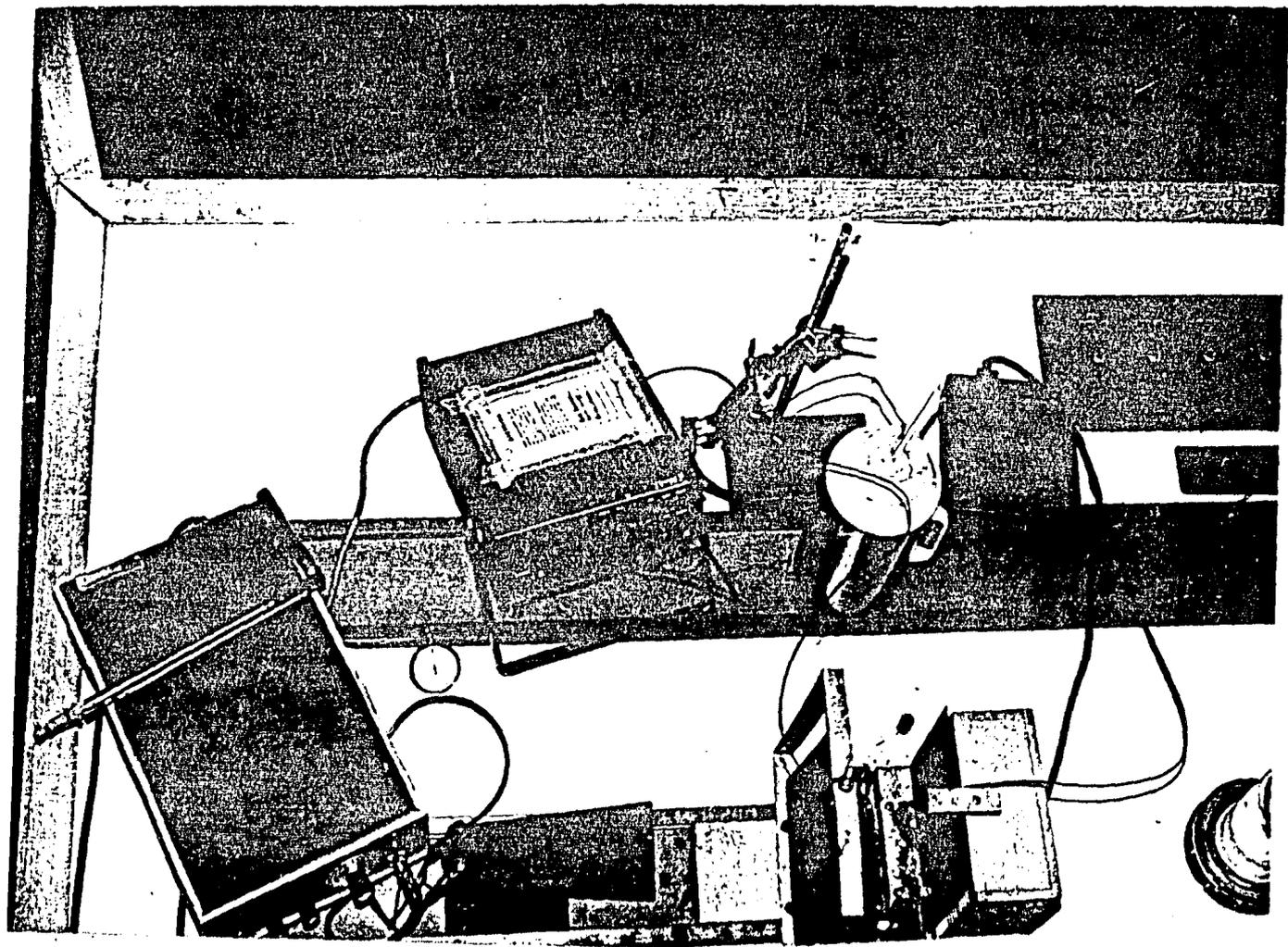
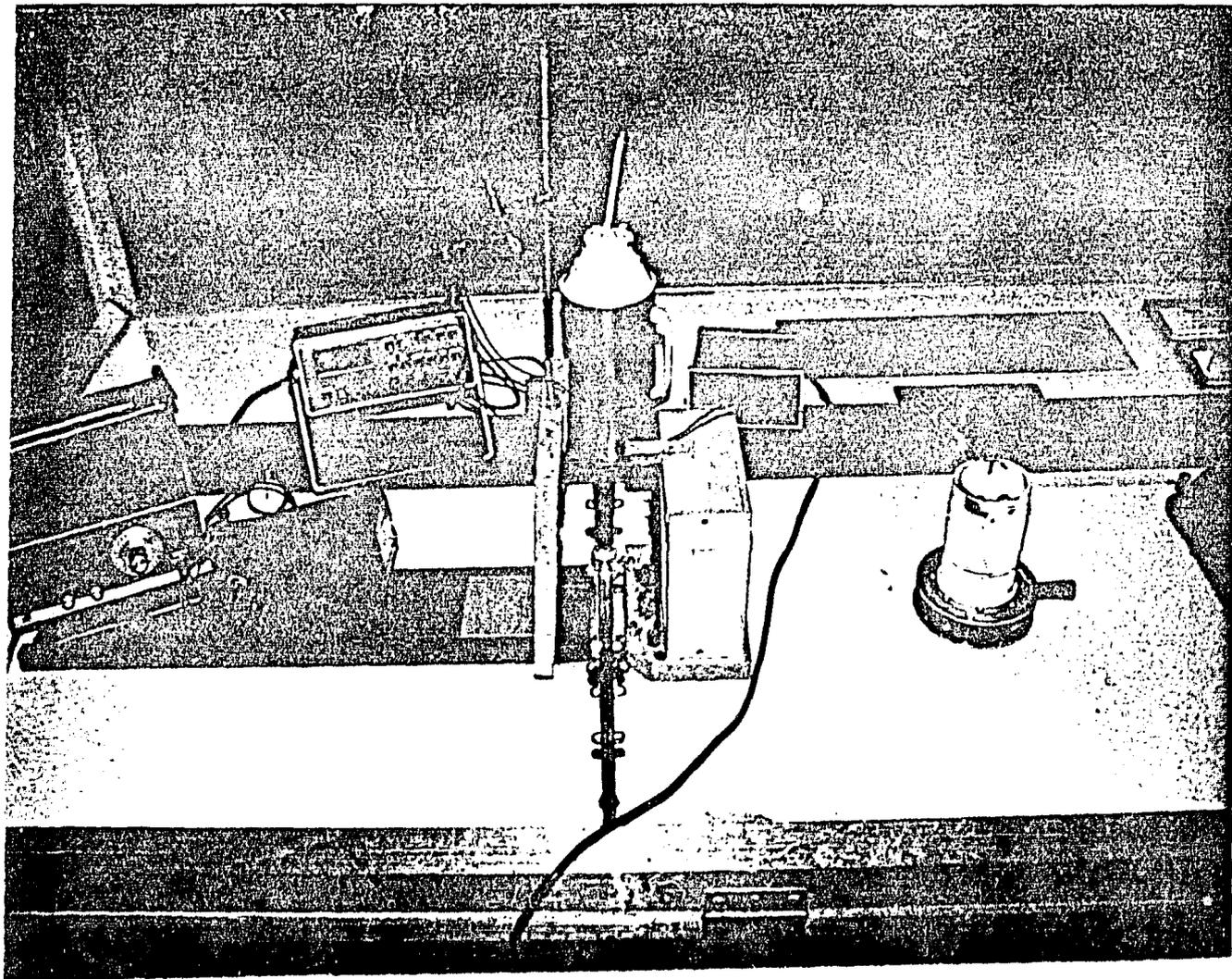
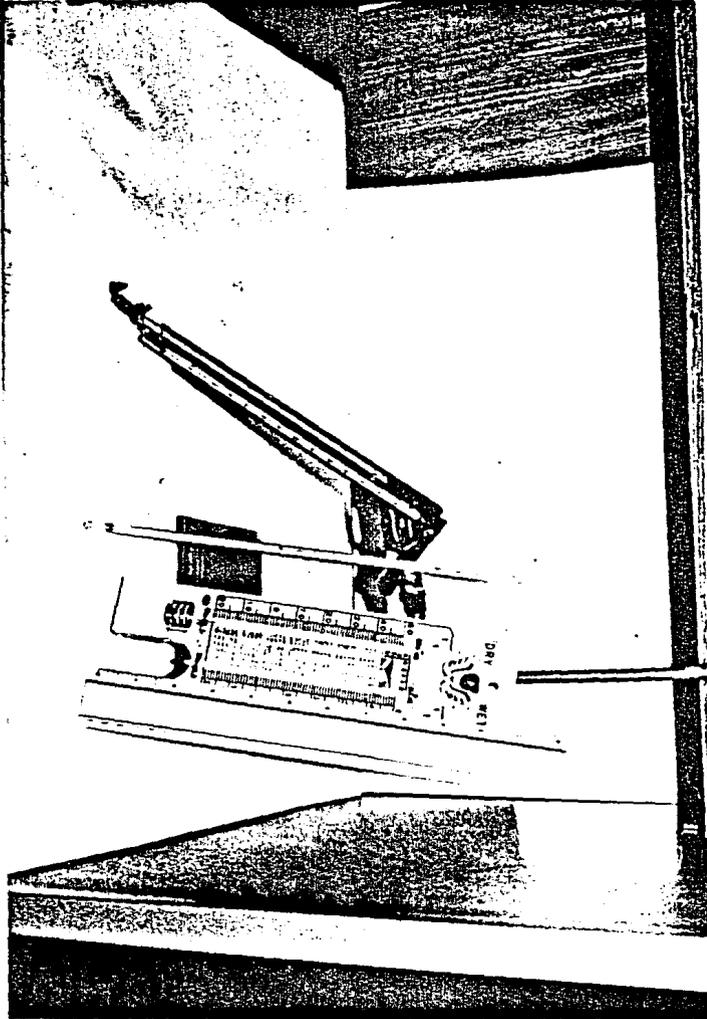


FIGURA 4.55 DIAGRAMA ESQUEMATICO QUE MUESTRA LA DISPOSICION DE LAS DOS PLACAS EXPUESTAS A INTERCAMBIO DE -- ENERGIA TERMICA RADIANTE CONJUNTO AL CALEFACTOR.







- 6.- Se midió la temperatura de la placa receptora en estado de equilibrio térmico respecto al emisor mediante un -- circuito de termopares, conectado a una referencia de -- 0°C (hielo y agua en equilibrio), así como al electróme -- tro digital marca Keithley modelo 616. Así mismo, se -- midió el voltaje de la termopila correspondiente a la -- emisión de dicha placa. La Fig. 4.55 ilustra es -- quemáticamente el conjunto experimental.
- 7.- Se mantuvo una distancia constante de 10 pulgadas entre la placa receptora y la termopila durante toda la prue -- ba.
- 8.- En cada medición de temperatura de equilibrio entre las placas, así como del milivoltaje de la termopila se re -- registró el tiempo durante el cual se tomó la lectura, -- pues el milivoltaje de la termopila y el correspondien -- te del circuito de termopares referido a 0°C conectado a segunda placa (receptora), así como la temperatura de la primer placa (emisora) presentaba rápidas fluctuacio -- nes, debido a las perturbaciones ocasionadas por el me -- dio ambiente o los errores propios de los instrumentos electrónicos de medición y suministro constante de co -- rriente eléctrica hacia la fuente, utilizándose para -- ello un cronómetro aralógico.

A continuación se presentan los datos obtenidos durante la prueba experimental

NOMECLATURAS

- T_1 = temperatura de la placa 1 (emisor)
 T_2 = temperatura de la placa 2 (captador)

E = voltaje de termopila (mv)

Ta = temperatura ambiente (°C)

Dist. = Distancia de separación entre las placas bajo prueba = X

TABLA 4.73 MEDICIONES REALIZADAS DURANTE LA PRUEBA

FECHA: 25/II/82 DIA: MIERCOLES

HORA: 12:45 HORA QUE SE PUSO EN MARCHA EL EQUIPO

13:58 HORA QUE SE COMENZO A TOMAR LAS SIGUIENTES LECTURAS

PERILLA AL 100% DE LA CAPACIDAD

LEC.	TIEMPO [min]	T ₁ [°C]	T ₁ [°K]	T ₂ [°K]	T ₂ [°C]	E [mv]	DIST. [mm]	T _a [°C]	T _a [°K]
0		333.48	606.63	-	-	2.56	-	20	293
128		336.02	609.17	-	-	2.58	-	20	293
132		336.02	609.17	-	-	2.60	-	20	293
144		333.35	606.50	-	-	2.50	-	20	293
144		333.47	606.62	295.15	22	2.51	-	20	293
152		333.47	606.62	332.15	59	1.56	61.1	20	293
157		333.47	606.62	355.15	82	1.91	61.1	20	293
162		332.20	605.35	370.15	97	3.47	61.1	20	293
167		332.20	605.35	374.15	101	3.76	61.1	20.5	293.6
172		330.93	604.08	375	102	3.83	61.1	20.5	293.6
182		330.93	604.08	376	103	3.96	61.1	20.5	293.6
188		333.47	606.62	377	104	3.93	61.1	21	294
203		336.02	609.17	380	107	4.16	61.1	21	294
-		341.12	614.27	384	111	4.33	61.1	22	295
231		338.57	611.72	385	112	4.38	61.1	22	295
247		336.02	609.17	392	109	4.22	61.1	22	295
250		336.02	609.17	393	100	3.96	86.5	21	294
254		333.47	606.63	367	94	3.71	86.5	21	294
266		336.02	609.17	366	93	3.65	86.5	21	294
280		334.75	609.90	365	92	3.65	86.5	21	294
301		330.93	604.08	364	91	3.58	86.5	21	294
318		332.20	605.35	364	91	3.63	86.5	21	294
326		330.93	604.08	365	92	3.59	86.5	21	294
337		328.38	601.53	363	90	3.55	86.5	21	294
347		325.83	598.98	365	92	3.62	86.5	21	294
349		325.83	598.98	360	87	3.38	111.9	21	294
357		322.01	595.16	350	77	3.00	111.9	21	294
362		318.18	591.33	348	75	2.93	111.9	21	294
367		318.18	591.33	347	74	2.92	111.9	21	294
387		329.65	602.80	351	78	3.095	111.9	21	294
395		330.93	604.08	350	77	3.055	111.9	21	294
402		327.10	600.25	350	77	3.02	111.9	21	294
404		325.83	598.98	346	73	2.835	137.3	21	294
420		325.83	598.98	340	67	2.60	137.3	21	294
431		329.65	602.80	339	66	2.595	137.3	21	294
442		336.02	609.17	341	68	2.645	137.3	21	294
453		338.57	611.72	69	342	2.69	137.3	20	293
463		341.12	614.27	69	342	2.70	137.3	20	293
472		341.12	614.27	70	343	2.75	137.3	20	293
474		341.12	614.27	71	344	2.745	137.3	20	293
486		329.65	602.80	68	341	2.63	137.3	20	293
498									

T₁ = Temp placa No. 1T₂ = Temp placa No. 2

E = mv leídas de la termopila

TABLA 4.74 MEDICIONES EFECTUADAS PARA LAS PLACAS BAJO PRUEBA

FECHA: 25/II/82 DIA: MIERCOLES

EXPERIMENTO NO.: 5

LEC.	TIEMPO (min.)	T ₁ [°C]	T ₁ [°K]	T ₂ [°K]	T ₂ [°C]	Z [mv]	X [in] = [cm]	Ta [°C]	Ta [°K]	
1	0	366	639	59	332	1.56	2.4	6.11	20	293
2	5	367	640	82	355	1.91	2.4	6.11	20	293
3	10	360	633	97	370	3.47	2.4	6.11	20	293
4	15	360	633	101	374	3.76	2.4	6.11	20.5	293.65
5	20	360	633	102	375	3.83	2.4	6.11	20.5	293.65
6	30	360	633	103	376	3.96	2.4	6.11	20.5	293.65
7	36	362	635	104	377	3.93	2.4	6.11	21	294
8	51	366	639	107	380	4.16	2.4	6.11	21	294
9	-	370	643	111	384	4.33	2.4	6.11	22	295
10	79	370	643	112	385	4.38	2.4	6.11	22	295
11	95	364	637	109	382	4.27	2.4	6.11	22	295
12	0	366	639	100	373	3.96	3.4	8.65	21	294
13	4	362	635	94	367	3.71	3.4	8.65	21	294
14	16	366	639	93	366	3.65	3.4	8.65	21	294
15	30	362.5	635.65	92	365	3.65	3.4	8.65	21	294
16	51	360	633	91	364	3.58	3.4	8.65	21	294
17	68	361	634	91	364	3.63	3.4	8.65	21	294
18	76	360	633	92	365	3.59	3.4	8.65	21	294
19	87	358	631	90	363	3.55	3.4	8.65	21	294
20	97	356	629	92	365	3.62	3.4	8.65	21	294
21	0	356	629	87	360	3.38	4.4	11.19	21	294
22	8	350	623	77	350	3.00	4.4	11.19	21	294
23	13	346	619	75	348	2.93	4.4	11.19	21	294
24	18	346	619	74	347	2.92	4.4	11.19	21	294
25	38	360	633	78	351	3.095	4.4	11.19	21	294
26	46	360	633	77	350	3.055	4.4	11.19	21	294
27	53	358.5	631.65	77	350	3.02	4.4	11.19	21	294

T₁ = Temperatura de la Placa número 1T₂ = Temperatura de la Placa No. 2

E = Voltaje de termopila [mv]

X = Distancia entre placas

Ta = Temperatura ambiente

PARA ESTE EXPERIMENTO SE REALIZARON LAS PRUEBAS AL 100% DE CAPACIDAD
TOTAL DEL TRANSFORMADOR VARIABLE

EVALUACION.- La cantidad del flujo de calor radiante q que emite la superficie A_1 y llega a A_2 es:

$$q_1 = A_1 F_{12} \sigma T_1^4 \quad \text{y viceversa} \quad q_2 = A_2 F_{12} \sigma T_2^4$$

El intercambio neto del flujo de calor radiante está dado - por su diferencia.

Para superficies negras se tiene:

$$q_{\text{neto}} = (A_1 F_{12} \sigma T_1^4 - A_2 F_{12} \sigma T_2^4) + (A_1 F_{13} \sigma T_1^4 - A_3 F_{31} \sigma T_3^4) + \dots$$

$$q_{\text{neto}} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) + A_1 F_{13} \sigma (T_1^4 - T_3^4) + \dots$$

Para evaluar el cambio de factores de forma se utiliza la ecuación:

$$q_{\text{neto}} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)$$

$$F_{12} = \frac{q_{\text{neto}}}{\epsilon_1 \epsilon_2 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}$$

La razón del voltaje de termopila a cualquier distancia (n) al voltaje de esta para 1 pulgada (o), es proporcional a la razón del flujo neto de calor radiante para estas mismas distancias

$$\frac{(fem)_n}{(fem)_o} \propto \frac{q_n}{q_o}$$

entonces:

$$F_{12n} = \frac{q_n}{(T_1^4 - T_2^4)_n}$$

$$F_{12o} = \frac{q_o}{(T_1^4 - T_2^4)_o}$$

$$= \left[\frac{(fem)_n}{(fem)_o} \right] \left[\frac{(T_1^4 - T_2^4)_o}{(T_1^4 - T_2^4)_n} \right]$$

F_{12o} es obtenido a partir del experimento utilizando la diferencia entre la temperatura final de la placa captadora -- evaluada teóricamente y la temperatura del emisor

$$\frac{F_{12o}}{1} = \frac{T_{1final}}{763.87} = \frac{763.8}{763.87} = 0.99$$

Sustituyendo el factor de forma para cualquier posición se tiene:

$$F_{12n} = 0.99 \left[\frac{(fem)_n}{(fem)_o} \right] \left[\frac{(T_1^4 - T_2^4)_o}{(T_1^4 - T_2^4)_n} \right]$$

Los factores de forma evaluados de esta forma fueron graficados en función de la distancia entre las placas.

RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

$$(fem)_n = \text{Voltaje de Termopila en [mv]} = 4.55 \text{ mv}$$

$$(fem)_o = \text{Voltaje de Termopila a 1 pulgada (2.54 cm) en [mv]}$$

$$(T_1^4 - T_2^4)_o = (755.2)^4 - (413.4)^4 = 2.96066 \times 10^{11}$$

Cálculos

F_{12} = Factor de área a cualquier distancia

$$F_{12} = 0.99 \left[\frac{(fem)_n}{(fem)_o} \right] \left[\frac{(T_1^4 - T_2^4)_o}{(T_1^4 - T_2^4)_n} \right]$$

Para 2.4 pulgadas = 6.11 cm

$$F_{12_1} = 0.99 \left[\frac{(2.016)}{4.55} \right] \left[\frac{(2.96066 \times 10^{11})}{(749)^4 - (649)^4} \right] = \frac{0.48775}{1}$$

Para 3.4 pulgadas = 8.65 cm

$$F_{12_2} = 0.99 \left[\frac{(1.7)}{4.55} \right] \left[\frac{(2.96066 \times 10^{11})}{(749)^4 - (355)^4} \right] = \frac{0.3664571}{1}$$

Para 4.4 pulgadas = 11.9 cm

$$F_{12_3} = 0.99 \left[\frac{1.6}{4.55} \right] \left[\frac{2.96066 \times 10^{11}}{(747)^4 - (341)^4} \right] = \frac{0.3460438}{1}$$

Para 5.4 pulgadas = 13.73 cm

$$F_{12_4} = 0.99 \left[\frac{(1.5)}{4.55} \right] \left[\frac{2.96066 \times 10^{11}}{(755)^4 - (335)^4} \right] = \frac{0.3093746}{1}$$

TABLA 4. RELACION DE FACTORES DE FORMA Y DISTANCIA

D I S T A N C I A		FACTOR DE FORMA
[cm]	[in]	
X		
6.11	2.4	0.48775
8.65	3.4	0.3664571 0.3911
11.9	4.4	0.3460438
13.73	5.4	0.3093746

$$y = ax^b$$

$$a = 0.7571$$

$$b = 0.5398$$

$$\text{ajuste} = 94.83\%$$

AJUSTES MINIMOS CUADRADOS: CURVA POTENCIAL

Para una curva de la forma: $y = ax^b$, se tiene:

$$a = \text{antilog} \frac{\sum (\log x)^2 \cdot \sum \log y - \sum \log x \cdot \sum (\log x \cdot \log y)}{n \sum (\log x)^2 - (\sum \log x)^2}$$

$$b = \frac{n \sum (\log x \cdot \log y) - \sum \log x \cdot \sum \log y}{n \sum (\log x)^2 - (\sum \log x)^2}$$

Del resultado de este ajuste se obtuvieron los siguientes coeficientes:

$$a = 0.7571 \quad b = -0.5398$$

coeficiente de correlación = 98.83%

Por tanto, se tiene como modelo ajustado

$$F. F. = 0.7571 x^{-0.5398}$$

Factor de Forma

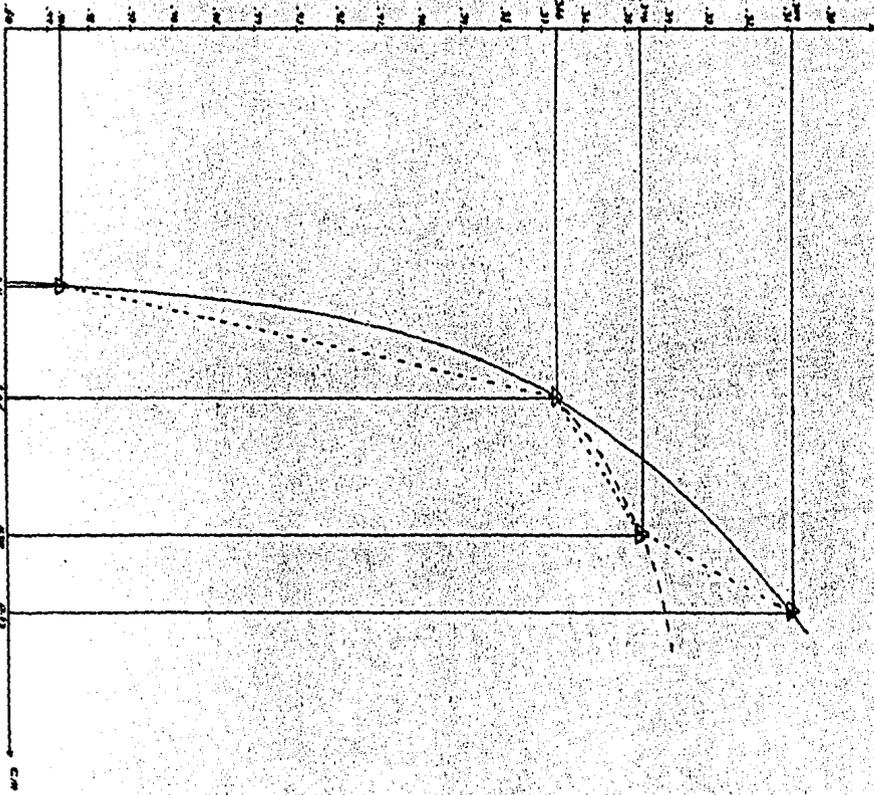


Fig. 4.56 Distribución de los factores de forma en función de la distancia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las irregularidades presentadas en la curva, son debidas a los efectos convectivos, así como la absorción y dispersión del medio ambiente, perturbaciones originadas por el suministro de corriente eléctrica a la fuente y los errores disminutivos introducidos por los instrumentos electrónicos de medición, así como los originados por los circuitos de termopares, los gradientes de temperatura en las placas y los internos en la mezcla de hielo y agua a 0°C, ya que las temperaturas registradas por los termopares son de tipo puntual.

A continuación se proporcionan algunas ideas recomendables inherentes a este experimento.

- 1.- Calibrar los instrumentos electrónicos de medición anterior a efectuar la práctica.
- 2.- Realizar cuidadosamente las conexiones de los circuitos de termopares sin enrollar los alambres con más de dos vueltas.
- 3.- La longitud de las juntas no deberá ser mayor a 10 mm para evitar los efectos de la radiación ambiental.
- 4.- Revisar las conexiones de los circuitos y los arreglos utilizados durante la práctica.
- 5.- Una vez efectuadas las mediciones correspondientes al voltaje de termopila retirese esta del cuerpo emisor --

evitándose de esta manera errores en la obtención de -- los datos experimentales.

- 6.- Evitar que se caiga el recubrimiento de hollín de las - caras rayadas de las placas de acero inoxidable expues- tas a la interacción e intercambio de calor radiante.
- 7.- Manténgase durante toda la prueba una distancia entre - la segunda placa (receptora) y la termopila de 10 pulga das (25.4cm), así como la alineación correcta entre las placas, la fuente y la termopila.
- 8.- Verificar que la mezcla de hielo picado y agua de refe- rencia, se encuentre en equilibrio a una temperatura de $0^{\circ}\text{C} = 273^{\circ}\text{K} = 32^{\circ}\text{F}$
- 9.- Sujetando mediante soportes universales las conexiones de los circuitos y arreglos de termopares evitando su - movimiento durante la práctica, así como perturbaciones en la obtención de los datos experimentales.
- 10.- Evitar el desplazamiento de alguno de los termopares co nectados en los centros de las caras posteriores de ca- da placa.

CAPITULO 5

MANUAL DE PRACTICAS CON EL EQUIPO DE
RADIACION TERMICA PARA LA MATERIA DE
TRANSFERENCIA DE CALOR.

I N T R O D U C C I O N .

El presente capítulo conjunta una serie de prácticas - experimentales referentes a los modelos y conceptos básicos en la transmisión del calor por radiación, cuyo desarrollo y análisis se explica en la clase de teoría correspondiente a la materia de transferencia de calor.

Este conjunto de prácticas experimentales proporcionarán al estudiante, los modelos físicos mediante los cuales se comprobarán y deducirán los fundamentos teóricos que simulan la transmisión del calor por radiación, así como visualizar las perturbaciones y efectos adicionales que originan los procesos y mecanismos de transferencia de calor y masa, como pueden ser: la convección, la absorción y dispersión de la energía radiante, la evaporación del aire ambiental, etc.

Este conjunto de prácticas, tiene como finalidad conformar un manual que proporcione la metodología necesaria para el desarrollo del trabajo experimental y una evaluación adecuada de los parámetros necesarios en las deducciones, permitiendo la óptima utilización del equipo de experimentación, de manera que sea utilizado como dispositivo didáctico.

Las prácticas experimentales pueden ser ampliadas, modificadas o resumidas para satisfacer los requerimientos de la clase de teoría correspondiente.

Para la estructuración en el montaje de estas prácticas fue necesario consultar la metodología descrita en la presentación de reportes experimentales, tanto en la bibliografía referente a la experimentación en ingeniería, referencias (), como en artículos de investigación; asimismo, se realizó un análisis de la estructuración de diferentes manuales de prácticas experimentales con fines didácticos de algunas materias impartidas en la Facultad de Ingeniería referencias (). De este análisis, resultó la siguiente organización de cada práctica.

1. Objetivo
2. Antecedentes requeridos
3. Descripción
4. Consideraciones teóricas
5. Preparación
6. Procedimientos
7. Evaluación

A continuación se da una breve explicación de cada uno de los pasos anteriormente señalados.

1 Objetivo. - Mediante el cual se especifica la finalidad referente a los conocimientos adquiridos en cada práctica.

2 Antecedentes requeridos. - Que están constituidos por-

los conocimientos referentes a los fundamentos teóricos - - inherentes a la teoría de la transmisión del calor por radiación, como pueden ser los modelos y conceptos básicos -- que simulan el comportamiento de dicho proceso.

3. Descripción. Donde se proporciona una breve explicación introductora de la relación existente entre el desarrollo experimental con el modelo o principio que se pretende demostrar.

4. Consideraciones teóricas. Las cuales indican los fundamentos teóricos necesarios que se aplican en la determinación de los parámetros de las ecuaciones que modelan la radiación térmica.

5. Preparación. Donde se indican las disposiciones, arreglos y especificaciones precedentes al desarrollo del trabajo experimental.

6. Procedimientos. Los cuales proporcionan la metodología necesaria, durante el proceso de experimentación y obtención de los datos que serán analizados.

7. Evaluación. Que presenta una memoria de cálculo, donde se procesan y analizan los datos para determinar los parámetros respectivos de los modelos que se desean verificar. Asimismo, se integran las tabulaciones y ajustes realizados con sus respectivas representaciones gráficas.

8. Cuestionario. El cual constituye un conjunto de preguntas dirigidas hacia el experimento efectuado y su relación-

con el principio o modelo comprobado.

9. Conclusiones y Recomendaciones. Donde se expondran las-
observaciones y deducciones referentes al experimento y las
desviaciones existentes originadas por las perturbaciones -
introducidas por las variables del proceso no controlables.

CAPITULO 5

PRACTICA No.5.1

DISTRIBUCION DE LA INTENSIDAD DE RADIACION
EN FUNCION DE LA DISTANCIA

OBJETIVO. Evaluación de la intensidad de radiación con respecto a la distancia entre el dispositivo receptor y la fuente puntual de energía radiante.

ANTECEDENTES. Conocer los conceptos y definiciones de intensidad de radiación, intensidad de radiación espectral, intensidad de radiación total, flux de energía total, así como su relación con la potencia emisiva total de una superficie.

DESCRIPCION. Para describir la cantidad de energía radiante que se propaga en una dirección particular y, que es poste-riormente interceptada por otro cuerpo, se introduce el término denominado intensidad de radiación.

El trabajo experimental se lleva a cabo, utilizando dos fuentes de energía radiante de tipo puntual, una de ellas, - la constituye un calefactor puntual de geometría espiral y la otra una fuente incandescente, así como dos dispositivos de- medición, (el pirómetro óptico y la termopila), los cuales - van a desplazarse a diversas posiciones alienadas con res -- pecto a la fuente. Para de esta forma, obtener una rela -- ción entre la energía radiante defectada y la distancia -- entre el emisor y el dispositivo receptor.

CONSIDERACIONES TEORICAS. Para describir las propiedades - direccionales de la energía radiante, emitida por una super- ficie particular, se considera dicha emisión dentro de un -

ángulo sólido, el cual es determinado mediante la razón del área proyectada sobre un hemisferio envolvente, interceptada por los rayos emitidos desde el centro del hemisferio al cuadrado de su radio, véase Fig. (5.1)

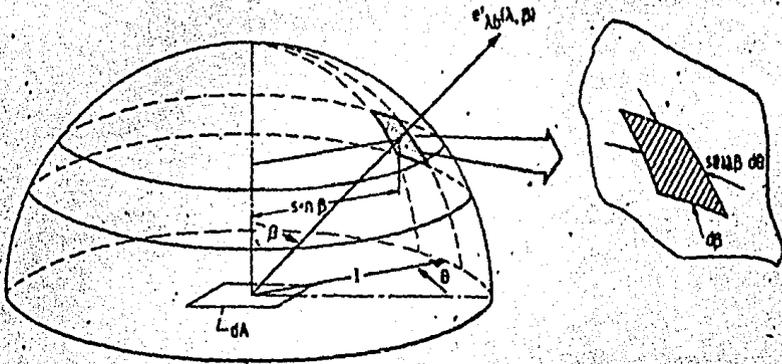


FIGURA 5.1 - Hemisferio que intercepta al energía radiante.

Debido a la propiedad geométrica del hemisferio, dicha área, será siempre perpendicular al radio vector que define el ángulo sólido subtendido dentro del cual fluye la energía radiante.

De lo anterior, el ángulo sólido $d\omega$ subtendido por la superficie que intercepta la energía radiante.

Por tanto, para determinar el flux de radiación a través de cualquier plano, puede utilizarse la intensidad de radiación.

Si la intensidad de radiación I es independiente de la dirección, el flux de radiación Q se expresa como:

$$Q = \mathcal{R} I \quad (5.2)$$

PREPARACION. Una vez alistados los aparatos y dispositivos de experimentación enlistados en las Tablas T.5.1 y T.5.2, -hágase funcionar el calefactor puntual infrarrojo.

PROCEDIMIENTO:

1. Controlar el suministro de potencia eléctrica, mediante el transformador variable, accionando su perilla - en los incrementos para la fuente puntual.
2. Una vez realizado lo anterior, mídase la temperatura del calefactor mediante el pirómetro óptico.
3. Después de retirar el pirómetro de la fuente, móntese la termopila en el carril más largo, desplazándose a diversas distancias de la fuente, midiendo su voltaje en cada posición fijada a lo largo del carril. Anóten se las lecturas respectivas en el registro de datos - experimentales.
4. De la misma forma que en el paso anterior, mídase la temperatura de la fuente, así como para diversas distancias de la fuente, efectúense las mediciones del - voltaje de termopila para cada posición seleccionada.
5. Nuevamente, efectúense las mediciones realizadas anteriormente, haciéndose variar la temperatura de la - fuente mediante el transformador variable, midiendo - el voltaje de termopila correspondiente a cada posición seleccionada.

6. Apáguese el calefactor puntual infrarrojo y permítase que se enfríe.
7. Posteriormente, acciónese la fuente incandescente nuevamente, realicéense una serie de mediciones de potencia emisiva a diversas distancias de la fuente, utilizándose para ello el fotometro como sensor de la energía radiante.
8. Anótense los datos obtenidos en el registro.
9. Graficar estos datos obtenidos, como una función de la distancia entre la fuente de radiación térmica y el dispositivo de medición en escala natural, (papel milimétrico)

EVALUACION. El calefactor puntual de geometría espiral emite energía térmica radiante, en su mayoría en la porción -- infrarroja del espectro, mientras que la fuente incandescente los efectúa en la región del espectro visible en su mayor parte.

Al graficar la familia de curvas obtenidas, se ilustrará la ley inversa del cuadrado de la distancia, así como la utilidad y limitaciones, tanto de la termopila, como del pirómetro óptico a diversas frecuencias.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Número de lectura	Temperatura de la fuente	Distancia de la termopila	Voltaje de la termopila	Tiempo de la medición T seg.	Voltaje de suministro volts. C.A.	Marca del % de la perilla	TIPO DE FUENTE	Fecha
							CALEFACTOR PUNTIAL INFRARROJO FUENTE INCANDESCENTE	

CUESTIONARIO :

1. ¿Cuál es la diferencia entre los dos tipos de fuentes de energía térmica radiante respecto a su longitud de onda?
2. ¿Cómo influyen las condiciones ambientales en las mediciones efectuadas, así como la alineación de los sensores térmicos con respecto a la fuente?
3. ¿Proporcionar una interpretación física de la familia de curvas obtenida por cada tipo de fuente de energía radiante?
4. Expresar la influencia geométrica de los elementos que intervienen en el intercambio de energía radiante al evaluar la intensidad de radiación en función inversa del cuadrado de la distancia.

PRACTICA 5.2

LEY DEL COSENO DE LAMBERT

OBJETIVO.- Comprobar experimentalmente la ley anterior para la radiación difusa.

ANTECEDENTES REQUERIDOS.- Conocer los fundamentos y definiciones de: radiación difusa, radiación isotrópica, radiación homogénea, potencia emisiva hemisférica total, potencia emisiva direccional espectral, ángulo sólido, cuerpo negro, intensidad de radiación

DESCRIPCION.- Esta ley establece para la radiación difusa e isotrópica; que la intensidad de radiación es máxima en la dirección de la normal al plano de la superficie emisora y disminuye conforme el coseno del ángulo entre la normal y la dirección propagación de la energía radiante.

En la presente práctica, se demostrará la ley anterior tomando mediciones experimentales de la potencia emisiva E_b de un cuerpo negro emisor, simulado mediante la fuente cilíndrica de radiación infrarroja y graficando estos puntos en una curva que indique la distribución de la energía térmica radiante en función de la dirección de propagación de la radiación térmica con respecto a la normal de la superficie emisora, proyectada sobre una escala lineal. Véase la figura (5.2)

CONSIDERACIONES TEORICAS.- Para una superficie difusa, la intensidad de radiación es constante y no varía con la dirección de propagación de su emisión. Una superficie de este tipo es modelada mediante la ley de Lambert del coseno,

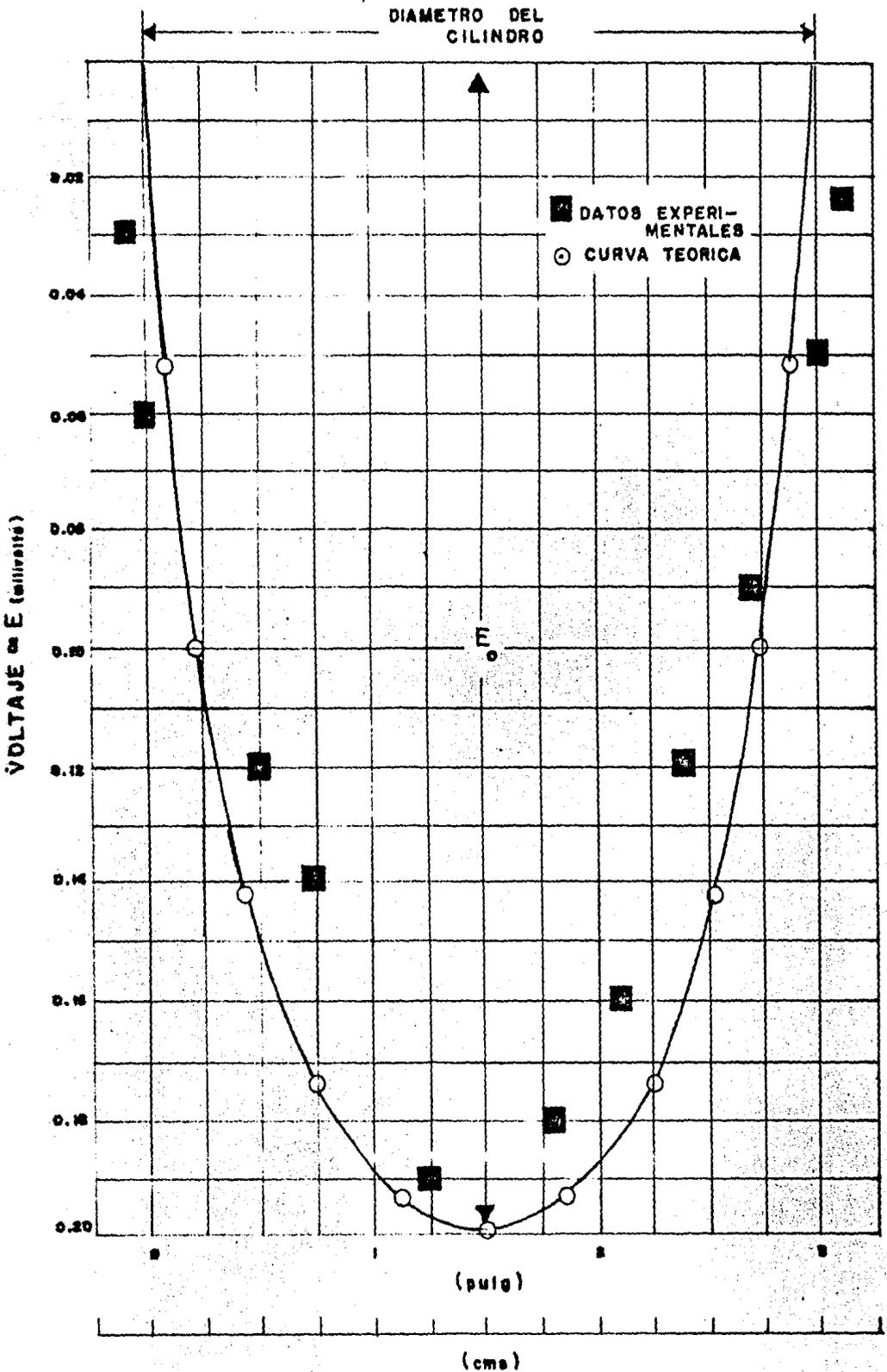


Fig. GRAFICA DEL PERFIL DE RADIACION TERMICA EMITIDO POR LA FUENTE CILINDRICA

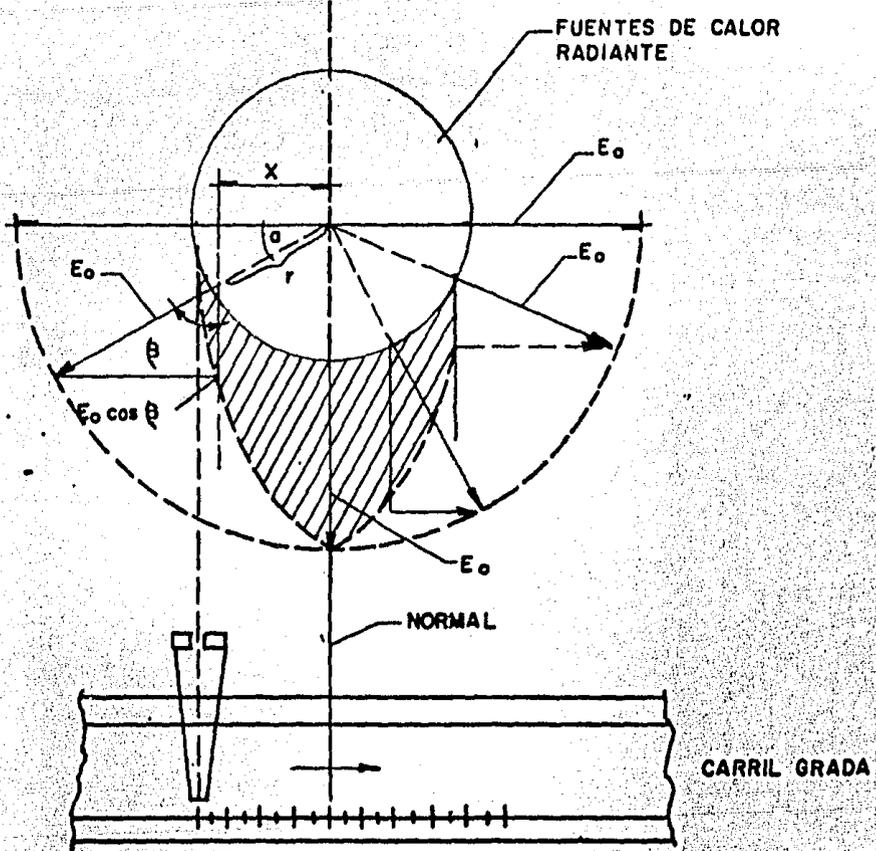


figura (5-2.1) PERFIL DE LA ENERGIA TERMICA RADIANTE QUE EMITE LA FUENTE CILINDRICA .

relacionándose la intensidad de radiación con la potencia -
emisiva para una superficie de un cuerpo negro mediante la -
ecuación:

$$E_b = I_b \cos \beta \quad (5.3)$$

donde:

E_b = potencia emisiva total de cuerpo negro.

I_b = intensidad de radiación total de cuerpo negro.

β = dirección de propagación de la energía radiante.

Debido a esta condición, un cuerpo negro se utiliza como un patrón de comparación con las propiedades direccionales de superficies reales que en general, no obedecen la Ley de -- Lambert

CONSIDERACIONES TEORICAS.- Para una superficie difusa, la intensidad de radiación es constante y no varía con la dirección de propagación de su emisión. Una superficie de este tipo, es modelada mediante la Ley de Lambert del Coseno, relacionándose la intensidad de radiación con la potencia emisiva para una superficie de un cuerpo negro mediante la ecuación:

$$E_b = I_b \cos \theta \quad (5.3)$$

Donde:

E_b = intensidad de radiación total de cuerpo negro.

θ = dirección de propagación de la energía radiante.

Debido a esta condición, un cuerpo negro se utiliza como un patrón de comparación con las propiedades direccionales de superficies reales que en general no obedecen la Ley de Lambert del Coseno.

PREPARACION.- Para llevar a cabo el desarrollo de la práctica, es necesario que se disponga de los dispositivos y aparatos que se enlistan en las tablas 5.3 y 5.4

A continuación, ajústese la posición de la base tubular del radiador infrarrojo cilíndrico a su altura mínima mediante el pasador localizado en el extremo inferior derecho de la base del calefactor. Posteriormente, móntese la termopila como sensor térmico biaxial en el carril de apoyo graduado más largo, enfocándola en dirección perpendicular al centro de la superficie emisora de radiación infrarroja. Colocar el reflector frontal a la termopila con su ranura dispuesta paralelamente al eje vertical de la fuente cilíndrica de calor radiante. Fíjese el termopar mediante el soporte universal al centro de la cara posterior de dicha fuente.

PRACTICA No. 5

LEY DE STEFAN-BOLTZMANN

OBJETIVO: Deducir la ley anterior, demostrando que la potencia emisiva de un cuerpo negro o gris es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

ANTECEDENTES: Conocer los conceptos y definiciones de: Radiación, Radiación Térmica, Naturaleza de la radiación, espectro, Cuerpo negro, Cuerpo gris, interacción entre la energía radiante incidente con la materia.

DESCRIPCION: Una relación cualitativa entre la Temperatura y la potencia emisiva total hemisférica de un cuerpo negro, fué obtenida por el físico austriaco Stefan en 1879. El la dedujo empíricamente a partir de datos experimentales.

La Ley de la cuarta potencia fué también obtenida posteriormente a partir de consideraciones termodinámicas por Boltzmann en 1884.

En el presente experimento, se derivará la ley anterior, tomando mediciones experimentales de la potencia emisiva " E_b " de un cuerpo negro radiante y graficando estos puntos en una curva de calibración.

CONSIDERACIONES TEORICAS: Según la Ley de Stefan-Boltzmann. La potencia emisiva total (hemisférica) de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, ó

La potencia emisiva determinada a partir de la ecuación de Stefan-Boltzmann, representa la energía radiada desde una superficie de un cuerpo negro en todas direcciones de una mitad de espacio, por unidad de área y por unidad de tiempo sobre todo el espectro de longitudes de onda, pero no revela la distribución de energía.

Para obtener la ecuación de Stefan-Boltzmann a partir de la Ley de Planck que es una forma explícita de E_b (Potencia emisiva monocromática) es necesario integrar entre los límites. Esto significa sumar toda la energía bajo la curva para una temperatura especificada y es numéricamente igual a

$$E_b = \quad (5.5)$$

Donde:

E_b = Potencia emisiva total hemisférica de un cuerpo negro en

E_b = Potencia emisiva espectral ó monocromática de la radiación de cuerpo negro

En:

T = Temperatura del cuerpo negro en =
= constante de Stefan-Boltzmann =

TABLA # 5

" EQUIPO DE EXPERIMENTACION Y ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS"

ACCESORIOS O EQUIPO EXPERIMENTAL	FUNCION DESEMPEÑADA DURANTE LA PRUEBA	NUMERO UTILIZADO
Placa de acero inoxidable cubierta de olin.	Radiador	1
Termo con una mezcla de hielo, agua y sal en equilibrio	Temperatura de referencia a $0^{\circ}\text{C}=273^{\circ}\text{K}=32^{\circ}\text{F}$	1
Soporte Universal	Fijar el termopar impidiendo movimiento durante temperatura.	1
Tubo de vidrio contenido aceite.	Compensar corrientes parásitas y gradientes de temperatura.	1
Termopila	Captación de la potencia emisiva que abandona la superficie de la placa emisora	1
Termopar Tipo "K"	Medición de temperatura superficial en el centro de la placa.	1
Termómetros de Mercurio analógicos	Medir la temperatura ambiente y verificar que la referencia se encuentre a 0° durante la prueba.	2

otros 20 Volts.

REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES

Voltaje Volts (AC)	Corriente Amps. (AC)	Lectura Termopar	Lectura Termopila	Tempera- tura. - Hambte.	Fecha Hora
20					
40					
60					
80					
100					
120					
140					
160					

2.- Grafíquese el voltaje de termopila como una función de la --- temperatura absoluta del emisor en papel milimétrico (escal natu--- ral) (Fig 5.3).

3.- Grafíquese el votaje de la termopila en papel milimétrico --- (fig. 5.4)

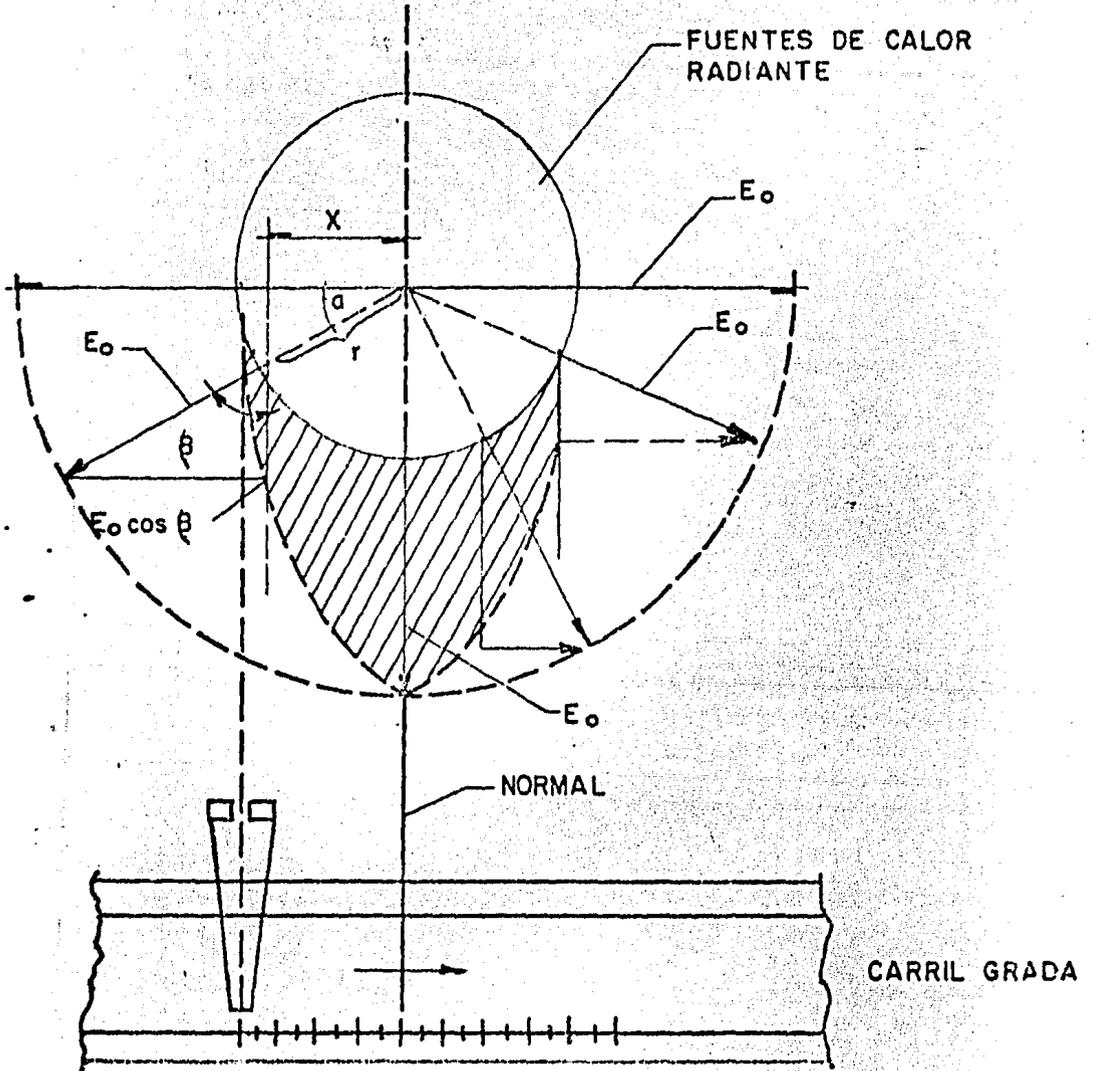


figura (5-2.1) PERFIL DE LA ENERGIA TERMICA RADIANTE QUE EMITE LA FUENTE CILINDRICA .

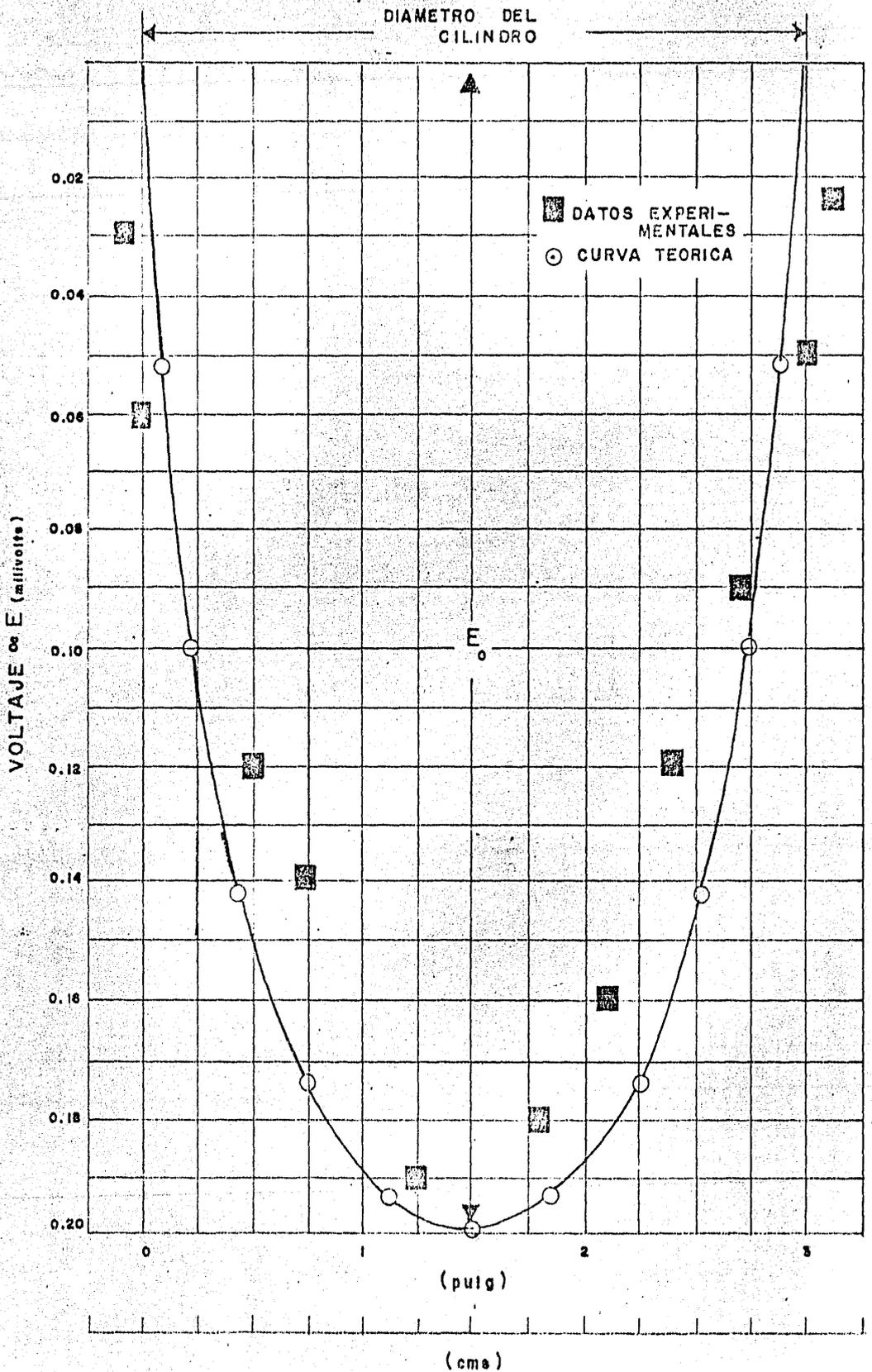


Fig. GRAFICA DEL PERFIL DE RADIACION
TECNICA EMITIDO POR
LA FUENTE CILINDRICA

La potencia emisiva determinada a partir de la ecuación de Stefan-Boltzmann, representa la energía radiada desde una superficie de un cuerpo negro en todas direcciones de una mitad de espacio, por unidad de área y por unidad de tiempo sobre todo el espectro de longitudes de onda, pero no revela la distribución de energía.

EVALUACION: El voltaje de la termopila, se grafica como -- una función de la temperatura absoluta del emisor y esto -- representa la energía radiada. La figura resultante debe mostrar dos curvas, una tipificada por las lecturas reales y la otra curva será la teórica de la calibración equivalente de acuerdo a la Ley de Stefan-Boltzman, la cual se calcula por medio de la ecuación (5.4) de la siguiente manera: Se toma un punto de la curva real, se lee el voltaje E' de la termopila como una medida de la emisión neta y la temperatura T correspondiente, entonces tenemos:

$$(5.6)$$

Donde:

E_1' T_1 = Valores del punto seleccionado para cálculo, en este ejemplo $E = 5.6v$ y $T_1 = 475^\circ K$ (Fig. 5.3)

T_n = Cualquier temperatura seleccionada para calcular los puntos de las curvas.

E_n = Energía calculada

Una vez realizado lo anterior, se podrá ver que ambas curvas son casi idénticas.

Es conveniente calcular y graficar la curva teórica de calibración a partir de una temperatura de $0^\circ K$.

Otro camino para detectar el carácter de la curva, es graficar las curvas en papel logarítmico.

Para una función de la cuarta potencia, tiene que ser una línea recta con pendiente igual a mas cuatro.

CUESTIONARIO

1. ¿Qué representa la potencia emisiva total obtenida a partir de la Ley de Stefan-Boltzmann?
2. ¿Cuál es la condición para que la placa bajo prueba alcance su equilibrio térmico?
3. ¿Qué representa el voltaje de termopila cuando éste se grafica como una función de la temperatura radiada?
4. ¿A partir de tomar el logaritmo de la ecuación

5. Esta práctica además de su significación física, que -- otros objetivos se alcanzan durante su ejecución?
6. ¿Porqué se necesita tener una temperatura de referencia cuando se utilizan termopares?
7. En general ¿Por qué la transmisión de calor afecta la exactitud de una medición de temperatura?
8. ¿Por qué la resistencia del termopar no afecta a la lectura al utilizarse un electrómetro o multímetro?

PRACTICA No. 5.4

EMISIVIDAD ABSORTIVIDAD Y REFLEXIVIDAD

ANTECEDENTES. Conocer los conceptos y definiciones de:

Emisividad, absorptividad y reflexividad tanto para propiedades espectrales direccionales como para totales hemisféricas.

Reflexión especular ó angular, reflexión difusa, superficie rugosa, cuerpo gris y superficies selectivas.

OBJETIVO. Determinar la emisividad, absorptividad y reflexividad, (totales hemisféricas), de varios cuerpos emisores con respecto a un emisor aproximado de cuerpo negro.

INTRODUCCION. La interpretación de numerosos fenómenos térmicos de radiación y la predicción fidedigna del rendimiento de los dispositivos de transferencia de calor por radiación requiere de un detallado conocimiento experimental de las propiedades de la energía radiante en toda la región espectral de la radiación térmica. Esto es particularmente cierto cuando se trata de materiales absorbentes y emisores selectivos del tipo utilizado en la radiación solar.

CONSIDERACIONES TEORICAS. En el análisis del intercambio de calor por radiación entre superficies reales es muy importante la energía radiante que se emite ó se absorbe por una superficie, ya que la radiación térmica es un proceso que se lleva a cabo a través de la superficie.

La energía radiante proveniente del interior de un cuerpo fluye a través de la superficie y la que incide penetra hacia un medio donde se atenúa gradualmente.

Cuando una porción de la energía radiante incidente se atenúa a una distancia muy pequeña de la superficie, se dice que la energía radiante ha sido absorbida. Por ejemplo la radiación térmica que incide sobre una superficie metálica recorre apenas unos pocos centenares de angstroms antes de absorberse por completo.

La mayoría de los materiales sólidos que se encuentran en la práctica, absorben prácticamente toda la energía radiante en una

delgada capa superficial interior a 1.27 mm.

La fracción de la energía radiante incidente que es absorbida se define como "absortividad". Es la razón de la potencia emisiva de un cuerpo cualquiera a la de un cuerpo negro a la misma temperatura.

La fracción de la energía radiante incidente reflejada es denominada reflexividad.

Se distinguen dos tipos de reflexión. La reflexión especular -- cuando los haces incidente y reflejado son simétricos respecto a la norma en el punto de incidencia como se lleva a cabo en los revestimientos de aluminio pulimentado en algunas superficies -- aproximadamente el 98% de la energía radiante incidente. La reflexión es difusa cuando la radiación reflejada es constante en todos los ángulos de reflexión y es independiente de la dirección de la energía radiante incidente es decir distribuida uniformemente en todas direcciones.

Muchos materiales utilizados en la práctica industrial son rugosos, debido a que sus superficies tienen asperezas que son grandes en comparación con una longitud de onda, la reflexión de la radiación a partir de una superficie rugosa ocurre prácticamente en todas direcciones.

Se define a la emisividad total hemisférica de un cuerpo cualquiera para la energía radiante emitida a la temperatura T como la razón del flujo emisivo de un cuerpo negro a la misma temperatura para todo el espectro de longitudes de onda de la energía radiante.

Se tiene de esta forma para un cuerpo cualquiera la relación:

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (5.)$$

Donde:

E = Potencia emisiva hemisférica total de un cuerpo cualquiera

ϵ = Emisividad hemisférica total

E_b = Potencia emisiva hemisférica total de un cuerpo negro. Para lo cual

A continuación se enlista en las tablas 5. y 5. el equipo experimental y la instrumentación utilizada en el desarrollo de esta -- práctica.

TABLA 5. EQUIPO DE EXPERIMENTACION Y ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS

Accesorios o Equipo Experimental.	Función desempeñada durante la prueba.
Placa de acero inoxidable color gris cuya superficie esta rayada.	Determinación de la emiscuidad de un cuerpo gris.
Placa de acero inoxidable con superficie lisa.	Determinación de la emisividad de su superficie.
Placa de acero inoxidable con una cara pulida a espejo.	Determinación de la emisividad de una superficie pulimentada.
Termopila.	Medión de temperatura superficial, así como de captación de la potencia emisiva que avandona la superficie de la placa - analizada.
Placa de acero inoxidable cubierta de olin.	Patrón de comparación de cuerpo negro aproximado para las - otras placas metálicas.

TABLA 5. EQUIPO DE EXPERIMENTACION Y ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS

Accesorios o Equipo Experimental	Función desempeñada durante la prueba	cantidad utilizada
Termopar tipo "K"	Medición de la temperatura superficial de la placa.	8
Termomentros de mercurio análogos.	Medición de la temperatura ambiente y verificación de la referencia de 0°C durante la prueba.	2
Termo con una mezcla de hielo y agua en equilibrio tapado con estopa.	Temperatura de referencias a 0°C = 273 °K=32 °F	1
Tubo de vidrio conteniendo aceite.	Compensación de corrientes parásitas y gradientes de temperatura.	4
Soporte Universal	Fijar el termopar impidiendo movimiento durante la prueba.	1
Psicrómetro	Medición de la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo ambientales.	

TABLA 5. INSTRUMENTOS ELECTRONICOS DE MEDICION Y CONTROL

Instrumento	Funcion durante la	especificacion
Sistema de medición de radiación y temperatura.	Fuente plana de calor radiante así como control de potencia eléctrica de suministro y temperatura.	Marca Scott Modelo 9053
Electrómetro digital.	Medición del voltaje del termopar	Marca Kecthley Modelo 616.
Medidor digital de temperatura.	Medición de la temperatura en el centro de la superficie de la placa por su cara que presenta a la termopila.	Marca Doric terndicator modelo 400!
Multímetro Digital	Medición del voltaje de termopila	Marca Phillips Modelo 2522

PREPARACION. Recubrir ambas superficies de la placa de acero inoxidable con una capa fresca de óxido. Colocar la placa con funciones de patrón de referencia de cuerpo negro aproximado directamente al frente del calentador de placa.

Colóquese la termopila en el carril corto a una distancia de 5 pulg. = 11.2 cm. del calentador, dando la cara hacia el calentador. El costado de la placa que tiene el termopar conectado debe dar la cara hacia la termopila. Calibrese los instrumentos de me

2.- Retirése la placa rayada y sustituyase por una segunda placa sin revestimiento de ollín, cuya superficie es lisa aunque no pulimentada en una de sus caras, la misma que presentará a la termopila.

3.- Mantengase el mismo valor del Voltaje suministrado al calentador de la placa, (ó sea 80 Volts), así como a una distancia --- constante de 5 pulgadas ó sean 12.7 (cm) entre el centro de la -- placa y la termopila durante toda la prueba.

EVALUACION: La primera placa cuya superficie rayada es revestida de ollín como superficie radiante.

A partir de la ley de Prevost.

$$\frac{E}{\Theta} = \sigma \epsilon A (T_p^4 - T_{\infty}^4) \propto V_t$$

donde:

V_t = Voltaje de termopila en [mu]

ϵ = Emisividad de la placa cuya superficie es rayada

T_p = Temperatura de la placa.

T_{∞} = Temperatura ambiente.

Para comparar las placas de áreas iguales, (utilizando las tres placas descritas anteriormente), con la placa cuya superficie rayada esta revestida con ollín tomada como patrón, se puede escribir.

$$\frac{V_A}{V_I} \propto \frac{E_A}{E_I} = \frac{\epsilon_A (T_A^4 - T_{\infty}^4)}{\epsilon_I (T_I^4 - T_{\infty}^4)}$$

donde:

V_I = Voltaje de termopila de la placa de superficie rayada-cubierta con ollín tomada como patrón (placa negra)

V_A = Voltaje de termopila de la placa que se esta probando

ϵ_I = 0.95 para la placa revestida de ollín.

ϵ_R = Emisividad de la placa bajo prueba.

Entonces la emisividad ϵ_R para una de las tres placas probadas es:

$$\epsilon_R = \frac{V_R}{V_I} \epsilon_I \frac{(T_{\text{placa negra}}^4 - T_{\infty}^4)}{(T_{\text{placa probada}}^4 - T_{\infty}^4)}$$

Puesto que en equilibrio térmico un cuerpo cualquiera emite la misma cantidad de energía que absorbe. La energía radiante emitida más la reflejada, (ó transmitida, si este fuera transparente) debe igualar a la energía radiante de un cuerpo negro. Por lo tanto para un cuerpo opaco con $\epsilon_R = 0.84$, la emisividad y la absorvidad son 84% y su reflectividad, (o transmisividad si fuera transparente a la radiación) es 16% de la energía, radiante equivalente a la emitida por un cuerpo negro.

2.- Mencione los factores que incluyen en la determinación de las propiedades ópticas de las muestras así como sus características.

3.- ¿Cuál es el objeto de cubrir con oílín ambas caras rayadas de una de las placas?

4.- Enlistar otras formas de aproximar el comportamiento superficial de la radiación al de un cuerpo.

PRACTICA No. 5.5

LEY DE KIRCHHOFF

OBJETIVO.- Deducir la ley anterior, demostrando que en condiciones de equilibrio térmico, la rapidez con la cual un cuerpo emite energía radiante será igual a la rapidez con que la absorbe.

ANTECEDENTES.- Conocer los conceptos y definiciones de recinto isotérmico, cuerpo negro, equilibrio térmico, polarización, irradiación, cuerpo gris, ley de Prevost y segunda Ley de la Termodinámica.

DESCRIPCIÓN.- La absorptividad y la emisividad de un cuerpo se pueden relacionar por la Ley de Kirchhoff mediante consideraciones termodinámicas.

La Ley puede tener varias condiciones impuestas sobre ella; si las cantidades son espectrales, totales hemisféricas, -- así como no tomar en cuenta los efectos de polarización causados por la variación angular de las propiedades.

Esta práctica se lleva a cabo con dos placas de acero inoxidable, cuyas superficies rayadas están previamente revestidas de una capa de hollín con funciones de emisor y captador de calor radiante respectivamente, así como con la fuente plana cuadrangular de radiación térmica.

Las mediciones de temperatura se realizan, utilizándose dos termopares colocados en el centro de la superficie de cada una de las placas bajo prueba.

Mediante las lecturas del voltaje de una termopila podrá relacionarse la potencia emisiva para el modelo físico.

CONSIDERACIONES TEORICAS.- La Ley de Kirchhoff, puede enunciarse de la siguiente manera: "En equilibrio térmico, la emisividad y absortividad de un cuerpo son iguales". Esto puede expresarse mediante la siguiente igualdad:

$$\epsilon = \alpha \quad (5.)$$

donde:

ϵ = emisividad total hemisférica

α = absortividad total hemisférica

La razón de la potencia emisiva total a la absortividad superficial total, es una constante, cuando la superficie está a sus alrededores. Expresándose lo anterior por medio de la relación siguiente:

$$\frac{E}{\alpha} = \text{constante}$$

donde:

E = potencia emisiva total hemisférica

α = absortividad total hemisférica

Esta conclusión está basada en la realización de que los cuerpos continúan emitiendo energía radiante, aún cuando se encuentran en equilibrio térmico con sus alrededores.

La irradiación que llega a una superficie negra de un recinto isotérmico es igual a la potencia emisiva total de la superficie negra dentro del recinto, ya que la temperatura de cuerpo negro, es igual a la temperatura del recinto.

$$G = E_b \quad (5.)$$

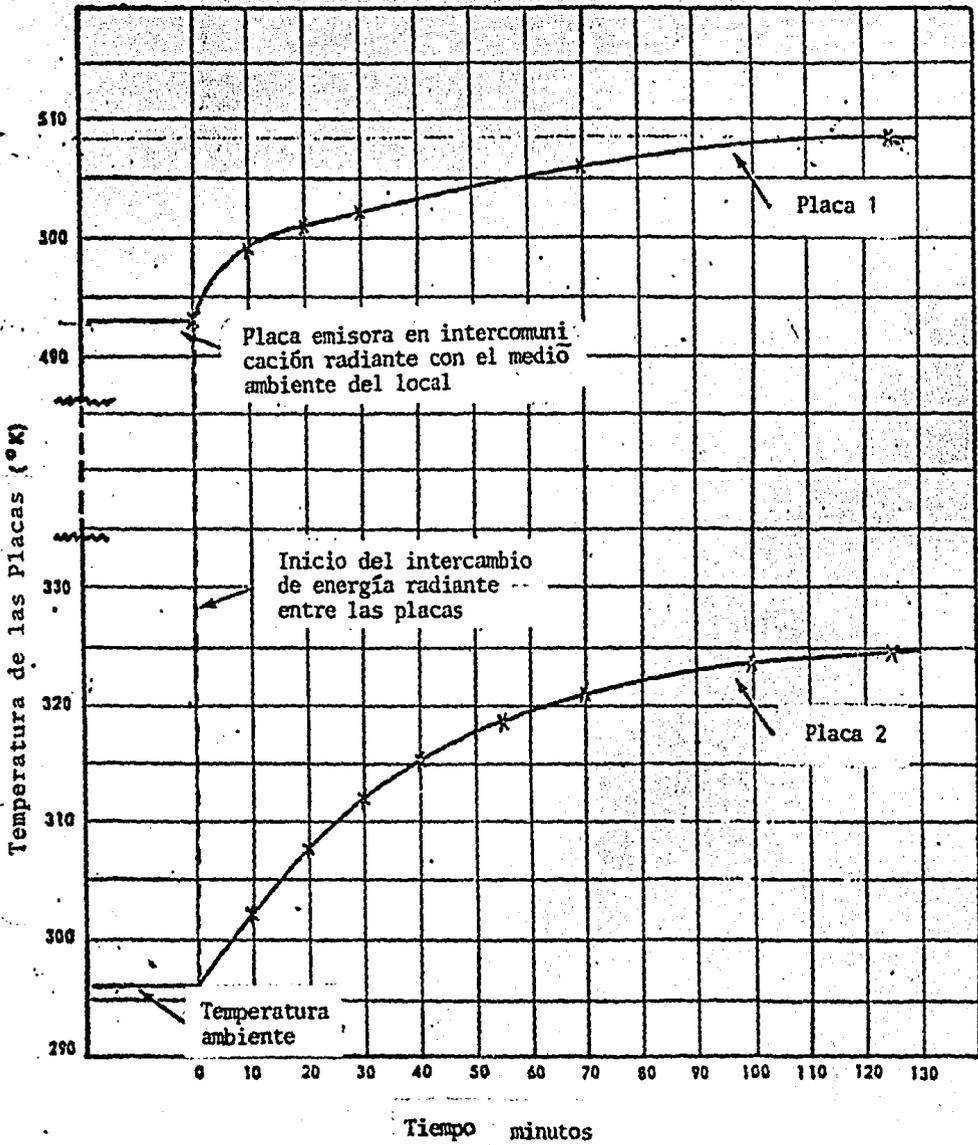


FIGURA 5. Intercomunicación Radiante entre las dos placas iguales

3LA 5. EQUIPO DE EXPERIMENTACION Y ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS

ACCESORIOS O EQUIPO EXPERIMENTAL	FUNCION DESEMPEÑADA DURANTE LA PRUEBA	NUMERO UTILIZADO
aca de acero inoxidable bierta con hollín	Radiador	1
aca de acero inoxidable bierta con hollín	Receptor	1
porte universal	Fijar el termopar impidiendo movimiento durante la prueba.	2
bo de vidrio conteniendo aceite	Compensar corrientes parásitas y gradientes de temperatura	2
rmopila	Captación de la potencia emisiva que abandona la superficie de la placa emisora.	1
rmopares tipo K	Medición de la temperatura superficial en el centro de la placa.	2
mómetros de mercurio lógicos	Medir la temperatura ambiente y verificar que la referencia se encuentra a 0°C durante la prueba.	2

TABLA 5. INSTRUMENTOS ELECTRONICOS DE MEDICION Y CONTROL

INSTRUMENTO	FUNCION DURANTE LA PRUEBA	ESPECIFICACION
Sistema de medición de radiación y temperatura	Fuente de calor y control	Marca Scott modelo 9053
Electrómetro digital	Medición de voltaje del termopar	Marca Keilhley modelo 616
Medidor digital de temperatura	Medición de temperatura de la placa	Marca Doril trendicator modelo 400A
Multímetro digital	Medición de voltaje de termopila	Marca Phillips modelo 2522

PREPARACION.- Recúbranse ambas superficies de las dos placas de acero inoxidable con una capa fresca de hollín, --- aproximándose de esta forma su emisión a la de un cuerpo negro ($\epsilon=0.95$). Colocar una de las placas con funciones de emisor enfrente de la fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja, la cual se operará al 100% de la perilla del transformador variable. Colocar la termopila en la marca de 10 pulgadas del soporte alñ eado en dirección a la fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja.

El costado de la placa que tiene el termopar conectado, debe dar la cara hacia la termopila. Calibre los instrumentos de medición y conéctense tanto al termopar como a la termopila.

PROCEDIMIENTO

- 1.- Sumínistrese el peso de la corriente mediante el transformador variable accionando la perilla al valor máximo del porcentaje de alimentación de la fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja.
- 2.- Colóquese la primer placa cubierta con hollín en el soporte directamente enfrente del radiador con funciones de emisor, permítase que alcance el equilibrio térmico cuando el valor de temperatura permanezca constante, tomar lecturas del termopar y termopila, así como de la temperatura ambiente y el suministro de potencia eléctrica a la fuente.
- 3.- Una vez alcanzado el equilibrio térmico de la primera placa, colóquese la segunda placa con funciones de re-

ceptor en el segundo soporte, encontrándose directamente a una distancia de una pulgada (2.54 cm), alineada con respecto a la placa emisora.

- 4.- Tómese lecturas de las dos temperaturas para ambas placas durante el intercambio de energía radiante, así como de la termopila colocada a una distancia de 10 pulgadas (25.4 cm) desde la segunda placa, a intervalos de tiempo de aproximadamente un minuto (anótese en el registro que a continuación se presenta).
- 5.- Grafíquese las temperaturas absolutas de las dos placas como una función del tiempo en papel milimétrico

TABLA 5. REGISTRO DE DATOS EXPERIMENTALES

NUMERO DE LECTURA	LECTURA DEL TERMOPAR PLACA 1	LECTURA DE TERMOPILA PLACA 1	LECTURA DEL TERMOPAR PLACA 2	LECTURA DE TERMOPILA PLACA 2	TEMPERATURA AMBIENTE	TIEMPO DE OBTENCION DE LECTURA	HORA
-------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	-------------------------	---	------

EVALUACION.- Las temperaturas absolutas de las dos placas serán graficadas como una función del tiempo.

El voltaje de la termopila representa la cantidad de energía térmica emitida por la placa receptora.

La Fig. 5. presenta dos curvas que ejemplifican las lecturas reales, donde las curvas teóricas aproximadas representan la calibración equivalente a la Ley de Kirchhoff.

A partir de la ecuación:

$$E = \sigma \epsilon A \theta (T_1^4 - T_2^4) \quad (5.)$$

Donde:

A = Area de superficie radiante

θ = Tiempo que dura el intercambio de energía radiante

T_1 = Temperatura absoluta de la superficie radiante

T_2 = Temperatura absoluta de la superficie captadora

E = Potencia emisiva = flujo neto de energía radiante.

A partir de la cual se puede establecer la siguiente proporción respecto a los voltajes de termopila.

$$\frac{V_{10}}{V_{l\text{final}}} \text{ o c } \frac{E_{10}}{E_{l\text{final}}} = \frac{T_{10}^4 - T_{20}^4}{T_{1\text{final}}^4 - T_{2\text{final}}^4}$$

Donde:

V = Voltaje de termopila

1 = Superficie de la placa radiante

2 = Superficie de la placa captadora

0 = Condiciones iniciales del intercambio de energía radiante entre las superficies.

Final = Condiciones en equilibrio térmico

Resolviendo esta ecuación para $T_{1\text{final}}$

$$T_{1\text{final}} = \sqrt[4]{V_{1\text{final}} \frac{(T_{10}^4 - T_{20}^4)}{V_{10}} + T_{2\text{final}}^4}$$

Ejemplo (con datos experimentales)

La figura proporciona:

$T_{10} = 220^\circ\text{C} = 493^\circ\text{K}$ Condiciones iniciales del intercambio de energía radiante.

$T_{\infty} = T_{20} = 23^\circ\text{C} = 296^\circ\text{K}$

$T_{2\text{final}} = 49^\circ\text{C} = 324^\circ\text{K}$

De la figura 5. los voltajes de termopila correspondientes a estas temperaturas son:

Para $T_{10} = 493^\circ\text{K}$: $V_{10} = 6.2 \text{ mv}$

Para $T_{1\text{final}} = 509^\circ\text{K}$: $V_{1\text{final}} = 7 \text{ mv}$

Con estos valores la temperatura calculada para el emisor, placa número 1 es:

$$T_{1\text{final}} = \sqrt[4]{\frac{7 - (493^4 - 296^4)}{6.2} + (324)^4} = 576^\circ\text{K}$$

Esta temperatura determinada en forma teórica presenta un incremento de aproximadamente 12% respecto a la temperatura -- del cuerpo emisor obtenida experimentalmente en condiciones de equilibrio térmico. Esto se debe a que la placa radiante no absorbe en su totalidad la radiación térmica emitida por la placa captadora o receptora.

Durante el intercambio de energía térmica radiante entre las dos placas se presentan pérdidas en el flujo de calor radiante, causado por los efectos conectivos, absorbentes y dispersantes del medio ambiente. Esta desviación de la unidad se expresará en el concepto de factor de forma.

PARTICA No. 5.6

MODELO INVERSO CUADRATICO Y SU EFECTO EN LOS FACTORES
DE FORMA

OBJETIVO.-

Antecedentes.- Conocer los conceptos de ángulo sólido, factor de forma y sus respectivas propiedades, así como sus principales modelos.

Descripción.- Para evaluar el intercambio de energía radiante neto entre varios cuerpos, es necesario evaluar la porción de la potencia emisiva total de cada superficie emisora que llega y se absorbe con las demás. Cuando estas superficies están constituidas por cuerpos negros, toda la energía térmica radiante que interacciona, es absorbida, considerándose solamente la relación geométrica entre las superficies.

Una ejemplificación puede apreciarse en el intercambio de energía radiante en el interior de un horno por los bancos de tubos radiantes o bien, en arreglos de espejos cónicos para la generación de vapor mediante colectores concentradores de la radiación solar que presentan una menor área existente de pérdidas de calor en relación al área de captación.

Esta práctica consiste de cuatro partes, en las cuales se determina experimentalmente la distribución de la intensidad de radiación en función de la distancia para los siguientes tipos de emisores:

- a) Fuente cilíndrica de radiación infrarroja
- b) Fuente para cuadrangular de radiación infrarroja
- c) Calefactor infrarrojo de tipo puntual en espiral
- d) Fuente de radiación visible.

Preparación.- Para cada una de las partes anteriores alistar lo siguiente:

- a) Ajustar la posición de la fuente cilíndrica de radiación infrarroja a su menor altura. Móntese la termopila sobre el carril graduado de apoyo más largo enfocándose hacia el cilindro calefactor.

Colóquese el reflector frontal a la termopila con su rendija orientada paralelamente a la superficie de la mesa. Mientras se efectúan mediciones en varias posiciones a lo largo de este carril, hágase girar la termopila de tal manera que enfoque exactamente el centro del cilindro emisor. La distancia entre el calefactor y la termopila puede determinarse a partir de la graduación sobre la escala del soporte o bien, medida directamente con la regla o flexómetro.

- b) Móntese la termopila sin su reflector frontal sobre el soporte correspondiente al calefactor plano cuadrangular. Colocar la placa cuyas superficies se encuentran rayadas y previamente cubiertas con una capa de hollín frente de la fuente.
- c) Nuevamente colóquese la termopila sin su reflector frontal en el carril de apoyo frente de la fuente infrarroja de tipo puntual.

d) Colóquese (después de haber realizado las mediciones anteriores), el fotómetro sobre el carril de apoyo y suminístrese corriente a la fuente de radiación visible --- (lámpara incandescente).

Procedimiento para la prueba. - En cada una de las cuatro partes mencionadas, colóquese la termopila o fotómetro cada uno en su correspondiente fuente a diversas distancias a partir del emisor infrarrojo y regístrense los datos obtenidos. En la parte (B) realícense varios conjuntos de mediciones con el emisor cuadrangular plano (placa negra) a distintas temperaturas. Grafíquense estos voltajes como una función de la distancia en papel logarítmico como se presenta en la Fig. ().

Evaluación. - El modelo cuadrático inverso determina la intensidad de radiación, en función inversa del cuadrado de la distancia. A pesar de que se cumple en todo el espectro electromagnético no puede reconocerse siempre a partir de datos experimentales.

La configuración geométrica y las posiciones relativas de las superficies de los cuerpos expuestos a un intercambio de energía radiante influyen considerablemente sobre la intensidad de radiación en función de la distancia.

La Figura presenta dos superficies de orientación arbitraria y alejados a una distancia r .

Las diferenciales de área dA_1 y dA_2 son los elementos de superficie y θ_1 , así como θ_2 son los ángulos subtendidos entre las normales y el eje (r).

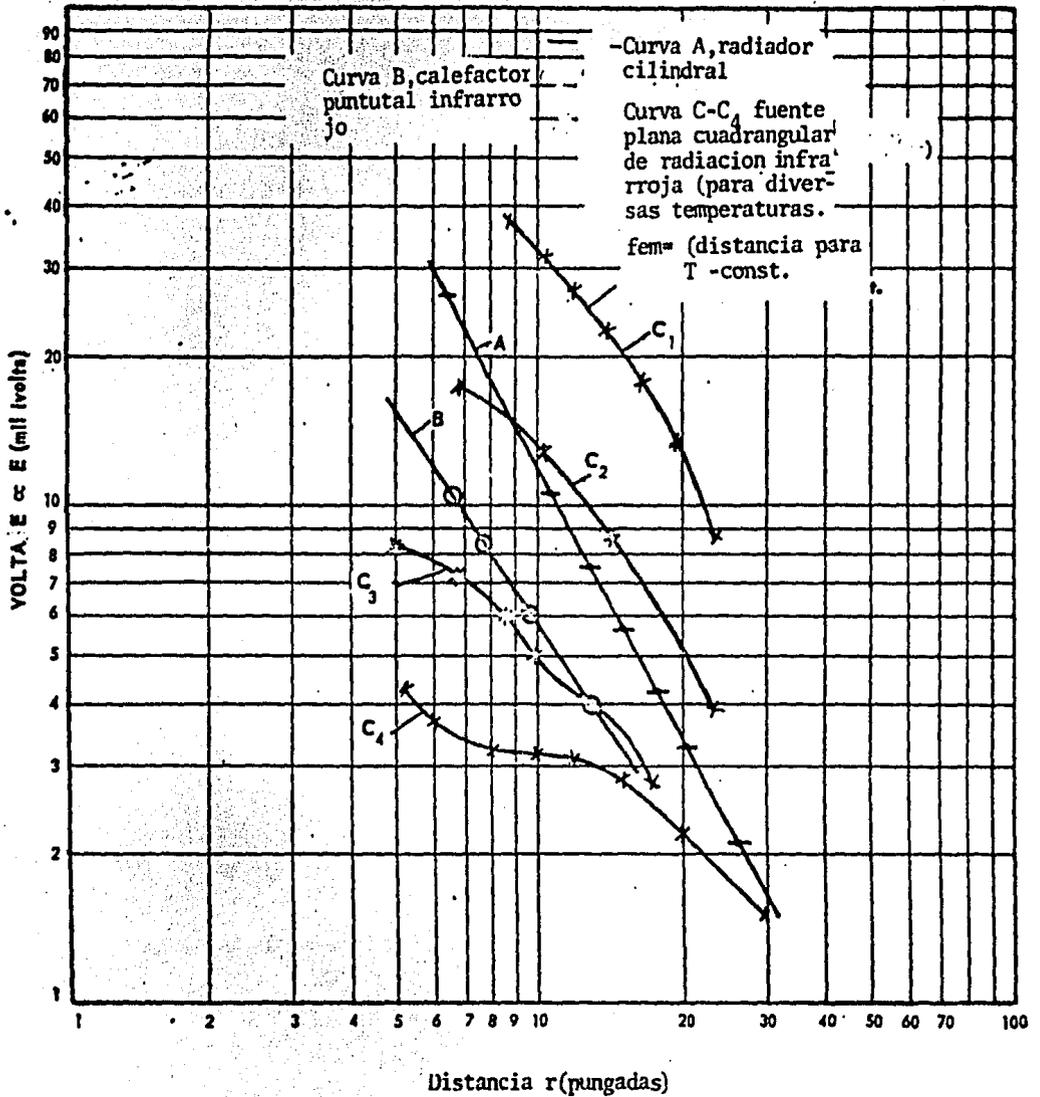


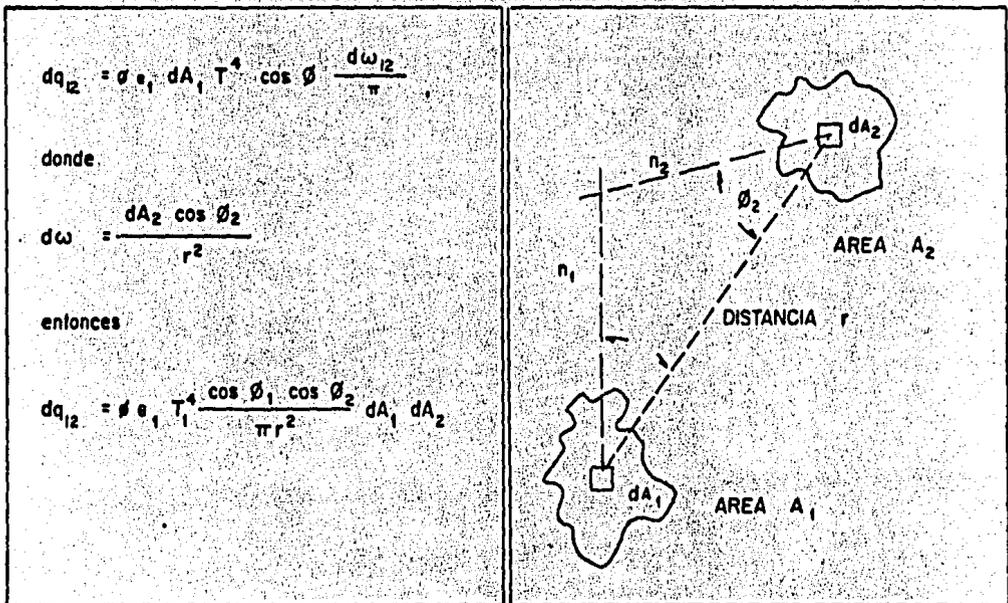
FIGURA 5. INTENSIDAD DE RADIACION EN FUNCION DE LA DISTANCIA

La diferencial de área de la superficie más caliente dA_1 - subtiende un ángulo sólido $d\omega_{1-2}$ con la diferencial de --- área de superficie dA_2 .

De acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, el flujo de calor emitido por área dA_1 es:

$$dq_1 = E_1 dA_1 T_1^4$$

La fracción del calor recibido por el área dA_2 está en función del coseno de θ_1 , así como también del ángulo sólido $d\omega_{1-2}$.



Análogamente, la radiación a partir de dA_2 que llega sobre dA_1 es:

$$dq_{21} = \sigma \epsilon_2 T_2^4 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

Figura Radiación Difusa entre dos superficies

La radiación neta que parte de dA_1 (siendo la superficie - más caliente) hacia dA_2 es: $dq_{\text{neto}} = dq_{12} - dq_{21}$

$$dq_{\text{neto}} = \epsilon_1 T_1^4 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 - \epsilon_2 T_2^4 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

$$dq_{\text{neto}} = (\epsilon_1 T_1^4 - \epsilon_2 T_2^4) \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

La integración de esta ecuación no siempre es posible. De modo que por convención, se utilizará la notación F_{12} para substituir la doble integral:

$$F_{12} = \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2$$

Denominando a F_{12} factor de forma. Las diferenciales dA_1 y dA_2 representan las áreas aparentes conforme se ven una a otra en el campo de visión formado conforme varían la posición relativa y la distancia entre las dos áreas.

Las curvas que se obtuvieron en el experimento 5-1 demuestran el modelo inverso cuadrático, así como otras propiedades del factor de forma.

En la parte A, la curva obtenida es una línea recta, cuya pendiente negativa es aproximadamente igual a dos, ilustrándose de esta forma la dependencia existente del término r^2 implícito en la determinación del factor de forma.

En la parte B, se obtuvo una familia de curvas (de C_1 a C_4 Fig.), repitiéndose las mediciones para diferentes temperaturas de la placa.

Si se coloca el reflector frontal nuevamente se obtendrá una línea recta.

En la parte C, se obtendrá una línea recta, pero su pendiente será menor que dos. Esto se debe al cambio de θ_2 - respecto a la distancia existente entre la placa y los cambios de la fuente de calor.

PRACTICA 5.7

EVALUACION DE LOS FACTORES DE FORMA ENTRE UNA FUENTE TERMICA RADIANTE. CILINDRICA FINITA Y UNA SUPERFICIE RECTANGULAR DIFERENCIAL

OBJETIVO.- Determinar el factor de forma entre una fuente - cilíndrica de calor radiante de longitud finita y una superficie rectangular diferencial.

ANTECEDENTES.- Conocer los conceptos de factor de forma, ángulo sólido, variación de la intensidad de radiación en función inversa del cuadrado de la distancia, teorema de reciprocidad, y evaluación del flujo neto de calor entre dos superficies expuestas al intercambio de radiación térmica.

DESCRIPCION.- Para evaluar el intercambio de flujo neto de calor radiante entre varias superficies expuestas a un intercambio de radiación térmica, es necesario determinar la porción de la energía térmica radiante total de cada superficie participante que interacciona y se absorbe por las otras.

CONSIDERACIONES TEORICAS.- El flujo neto de calor entre dos superficies opacas expuestas al intercambio de radiación térmica se determina mediante la diferencia entre las cantidades de calor radiante absorbido por ambas superficies.

De la ecuación () en la práctica No. se tiene:

$$q_{\text{neto}} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2}{\pi r^2} dA_2 dA_1$$

$$= \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int_A F_{(d1)_2} dA_1$$

La integral del extremo derecho, se obtiene asumiendo -- que A_2 es isotérmica.

Por otra parte, de la definición del factor de forma entre dos diferenciales de superficie expuestos a un intercambio de calor radiante se tiene

llegándose a la siguiente expresión

DESARROLLO. Para llevar a cabo la determinación del factor de forma entre la fuente cilíndrica de radiación infrarroja de superficie finita y la rendija del reflector frontal de la termopila considerada como superficie rectangular diferencial, por la menor dimensión que la del cilindro emisor se determinó primero la pendiente de la línea recta graficada en escala logarítmica (véase la Fig. para valores cuánticos), para lo cual se utilizó la siguiente nomenclatura

=inclinación de la línea recta graficada en papel logarítmico.

fem=diferencia de voltaje de la termopila (fuerza electromotriz).

$$dF_{2-d_1} = \frac{dA_1}{A_2} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_2$$

Su integral del extremo derecho, se obtiene asumiendo que A_2 es isotérmica.

Por otra parte, de la definición del factor de forma entre dos diferenciales de superficie expuestas a un intercambio de calor radiante se tiene:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_2$$

llegándose a la siguiente expresión:

$$dF_{2-d_1} = \frac{dA_1}{A_2} \int_{A_1} dF_{d1-d2}$$

DESARROLLO.- Para llevar a cabo la determinación del factor de forma entre la fuente cilíndrica de radiación infrarroja de superficie finita y la rendija del reflector frontal de la termopila considerada como superficie rectangular diferencial, por la menor dimensión que la del cilindro emisor se determinó primero la pendiente de la línea recta graficada en escala logarítmica (véase la Fig. para valores característicos), para lo cual se utilizó la siguiente nomenclatura:

α = inclinación de la línea recta graficada en papel logarítmico

fem = diferencia de voltaje de la termopila (fuerza electromotriz).

Si $F_{(d1)_2}$ es constante sobre A_1

$$q_{\text{neto}} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma F_{12} A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (5. \quad)$$

PREPARACION.- Véase la práctica (5.6) parte A

PROCEDIMIENTO.- Igual al de la práctica (5.6)

EVALUACION.- Para calcular el factor de forma F_{12} , primero - determinese la pendiente de la curva graficada en papel logarítmico (escala natural) véase la Fig. 5. para valores característicos

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{\Delta \ln \text{ fem}}{\Delta \ln r} = \frac{113 \text{ mm}}{62 \text{ mm}} \\ &= 1.82 \end{aligned}$$

La pendiente de esta curva en cualquier punto, representa el experimento de la distancia r , de modo tal que:

$$F_{12} = \frac{1}{r \text{ pendiente}}$$

Puesto que la fem medida con la termopila es proporcional a la potencia emisiva del cuerpo emisor se tiene:

$$\text{fem} \propto q_{\text{neto}} = C F_{12} = C \frac{1}{r \cdot 1.82}$$

donde:

$$C = \sigma (\epsilon_1 T_1^4 - \epsilon_2 T_2^4) A_1$$

C puede calcularse a partir de cualquier punto seleccionado de la curva A, en la figura.

Por ejemplo: $r = 6$ pulgadas, $fem = 30$ mv, entonces:

$$C = (fem) (r^{1.82})$$

$$C = (30) (6^{1.82}) = 790$$

Para determinar cualquier factor de forma F_{12} para una circunstancia dada:

$$F_{12} = \frac{fem}{c} = \frac{1}{r \text{ pendiente}}$$

PRACTICA 5.8

DISTRIBUCION DE LOS FACTORES DE FORMA
EN FUNCION DE LA DISTANCIA

OBJETIVO: Determinación de los factores de forma de dos placas cuadradas en intercomunicación radiante.

ANTECEDENTES: Conocer los fundamentos, interpretaciones y modelos así como las definiciones de; factores de forma, propiedades de los factores de forma, como son: teorema de reciprocidad, factor de forma dentro de un recinto negro, superficies radiantes, flujo de calor por radiación entre superficies grises, energía térmica radiante combinada con convección y conducción, radiocidad.

DESCRIPCION: El intercambio de energía radiante es fuertemente dependiente de la geometría de los cuerpos. Para evaluar el intercambio neto de energía radiante o flujo de calor radiante entre dos o mas cuerpos, es necesario determinar la fracción de la emisión total de cada una de las superficies radiantes que alcanza y es absorbida por otras. Si se involucran únicamente superficies negras, toda la energía radiante incidente es absorbida y únicamente se necesita considerar la relación geométrica entre las superficies.

Como el resultado final es independiente de la superficie emisora escogida, se selecciona la superficie cuyo factor de forma F_{1-2} para cualquier superficie A_1 completamente cubierta por otra superficie envolvente es igual a la unidad. Sin embargo por lo general, la determinación del factor de forma para cualquier configuración geométrica por muy simple que sea es bastante compleja.

Como el intercambio de energía térmica radiante entre A_1 y

cualquiera de las "n" superficies que la circundan no se afecta por la presencia de las otras superficies, la rapidez neta de flujo de calor emitido por A_j es:

Si la superficie A_j es convexa de tal manera que ninguna parte de energía radiante emitida por A_j es interceptada por las "n" superficies que forman la envoltura. Los factores de forma basados en la superficie A_j deben obedecer -- por lo tanto, la relación:

La suma de los factores de forma para cualquier superficie tiene el valor de 1. Para un emisor A_j completamente cerrado por "n" superficies A_j , (las cuales incluyen posiblemente A_j por si misma).

El desarrollo experimental de esta práctica se lleva a cabo de igual forma que la práctica No. 5.5 (Ley de Kirchhoff), sin embargo es necesario tomar datos de la temperatura para cada placa a diversas distancias entre ambas placas.

PREPARACION: Misma que la práctica 5.5 (Ley de Kirchhoff).

PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA: Tómese el mismo que el del experimento 5.5 (Ley de Kirchhoff), Repítanse las mediciones de temperatura de equilibrio de ambas placas a diversas distancias entre las dos placas. Gráfiquense los valores de los factores de forma como una función de la distancia entre las placas.

EVALUACION: Una situación más compleja en el intercambio de energía radiante que se lleva a cabo en un sistema que consta de varias superficies de distintas emisividades y temperaturas, lo constituye el concepto de factor de forma F. El

factor de forma F_{12} se define como la fracción de la energía radiante que es emitida por la superficie A_1 en todas direcciones la cual intercepta al área A_2 .

En la evaluación de factor de forma se enuncian a continuación los siguientes conceptos útiles e importantes:

- 1) $A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$.
- 2) $F_{11} + F_{12} + F_{13} + \dots + F_{1n} = \text{unidad} = 1$

Donde se asume que no existe un flujo neto de calor entre A_1 y A_2 cuando ambas superficies están a la misma temperatura.

La cantidad neta de flujo de calor radiante emitida por la superficie negra A_1 y que es interceptada por A_2 es:

$$q_1 = A_1 F_{12} \sigma T_1^4 \quad \text{y viceversa} \quad q_2 = A_2 F_{21} \sigma T_2^4$$

El intercambio neto de energía radiante lo constituye su diferencia. En un recinto de superficies negras, el flujo neto emitido por A_1 es:

$$\begin{aligned} q_{\text{neto}} &= (A_1 F_{12} \sigma T_1^4 - A_2 F_{21} \sigma T_2^4) \\ &\quad + (A_1 F_{13} \sigma T_1^4 - A_3 F_{31} \sigma T_3^4) + \dots \\ &\approx A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) + A_1 F_{13} \sigma (T_1^4 - T_3^4) + \dots \end{aligned}$$

Para calcular el factor de forma, se utiliza la expresión (3.) sección 5.5

$$q_{\text{neto}} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad [Btu/hr]$$

y

$$F_{12} = \frac{q_{\text{neto}}}{\epsilon_1 \epsilon_2 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}$$

Se obtiene:

Por otra parte: la razón del voltaje de la termopila a cualquier distancia (n) al voltaje de esta a una distancia de 1 pulgada (0) es proporcional a la razón de los flujos de calor para estas mismas distancias.

Entonces:

$$\frac{(fem)_n}{(fem)_0} \propto \frac{q_n}{q_0}$$

$$\frac{F_{12n}}{F_{120}} = \frac{q_n / (T_1^4 - T_2^4)}{q_0 / (T_1^4 - T_2^4)} = \left[\frac{(fem)_n}{(fem)_0} \right] \left[\frac{(T_1^4 - T_2^4)_0}{(T_1^4 - T_2^4)_n} \right]$$

Donde: F_{120} se obtuvo a partir del experimento 5.5 (Ley de Kirchhoff), utilizando la diferencia entre la temperatura calculada teóricamente y la medición de temperatura real, en condiciones de equilibrio. Para el emisor.

$$\frac{F_{120}}{1} = \frac{T_{\text{real}}}{576} = \frac{T_{\text{teórica}}}{576} = 0.88$$

Entonces el factor de forma para cualquier distancia será:

$$F_{12n} = 0.88 \left[\frac{(fem)_n}{(fem)_0} \right] \left[\frac{(T_1^4 - T_2^4)_0}{(T_1^4 - T_2^4)_n} \right]$$

Los factores de forma determinada de esta manera se graficarán como una función de la distancia entre las placas.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente trabajo se incorporó al conjunto de experimentos realizados un análisis teórico de los fundamentos inherentes al trabajo experimental, de esta complementación así como de la experiencia adquirida junto con las otras fuentes indicadas en el Capítulo 5, se realizó el manual de prácticas experimentales de radiación térmica.

No obstante que al final de cada experimento llevado a cabo, se realizaron sus conclusiones respectivas, aquí se resumirán en forma general, las correspondientes al trabajo presentado.

Debe advertirse, que ninguna de las curvas ajustadas ó gráficas a partir de los modelos teóricos, no son un dibujo del fenómeno físico bajo consideración. Las gráficas siendo representaciones geométricas de las ecuaciones, que dan una descripción más o menos correcta de algunas fases del cuadro físico, son esencialmente solo artificios matemáticos para estudiar el fenómeno.

Así en el experimento 4.1 referente a la distribución de la intensidad de radiación en función de la distancia, se obtuvieron una familia de curvas de carácter experimental que ilustran el modelo inverso cuadrático así como las limitaciones de la termopila y del pirómetro óptico a diversas frecuencias.

En la familia de curvas obtenidas, se observó que conforme la distancia aumentaba, la intensidad de radiación decrecía, describiéndose las ramas de hipérbolas equiláteras, con centro en el origen y los ejes coordenados como asíntotas, las cuales se localizan en el primer cuadrante, lo que debido al carácter de estos lugares geométricos puede inferirse su com-

portamiento cuadrático inverso.

En el experimento 4.2 correspondiente a la Ley de Lambert del coseno, las gráficas obtenidas, ejemplifican las mediciones experimentales en comparación con las curvas teóricas equivalentes.

La gráfica correspondiente a la práctica en que se presentó el error medio porcentual entre las lecturas reales y los puntos pronosticados mediante el modelo teórico, arroja un valor del 12.6%, correspondiente a un retraso promedio de 0.143 mv.

Durante el experimento 4.3 que trató sobre la Ley de Stefann- Boltzmann, la curva obtenida a partir de las mediciones experimentales, así como la determinada, utilizando la ecuación de Stefann-Boltzmann, resultaron idénticas, otra manera como se determinó el carácter de la curva, fue graficando las lecturas en papel logaritmico. Para una función de la cuarta potencia, se obtuvo una línea recta -- con una pendiente igual a +4

El grado de dispersión que se presentó entre el modelo teórico equivalente y las lecturas reales fue:

En este experimento se presentó un error medio porcentual del 23.3% y un retraso promedio de 1.1 mv, entre los valores determinados a partir de las mediciones experimentales y los calculados mediante la ecuación de Stefann-Boltzmann.

En esta práctica, también se llevó a cabo la colaboración de un circuito de termopares, ajustándose una línea -- recta a los valores del voltaje de termopar en función de la temperatura de la placa negra emisora con un índice de correlación del 99.7%

Por otra parte, en el experimento 4.4 que trató sobre la determinación de la emisividad absrtividad y reflectividad, los valores evaluados a partir de las mediciones expe-

rimentales resultaron satisfactorios al ser comparados con los publicados, de acuerdo a las condiciones superficiales y a las temperaturas de las muestras experimentales.

Por otra parte, la temperatura calculada teóricamente para la segunda placa expuesta a un intercambio de calor radiante, cuyo valor fue de durante el experimento 4.5, que trató sobre la Ley de Kirchoff de la radiación resultó prácticamente igual al medido experimentalmente, lo cual resultó muy satisfactorio para el propósito de haber verificado dicha ley en forma experimental.

En el experimento 4.6, referente al modelo cuadrático inverso y efecto de los factores de forma, la familia de líneas rectas con pendiente negativa, cuyo valor se aproxima a dos lustran la dependencia que guardan hacia el término r^2 en el factor de forma.

Como consecuencia del experimento anterior, se realizó la práctica correspondiente a la determinación del factor de forma entre una fuente de calor cilíndrica de longitud finita y una superficie rectangular diferencial, cuyo valor fue del 1.32%, debido a lo pequeño que es la rendija del dispositivo sensor donde incide la energía radiante emitida por el cilindro calefactor infrarrojo.

En el experimento 4.8, referente a la distribución de los factores de forma en función de la distancia, los valores de los factores de forma determinados a partir de las mediciones experimentales, al ser graficadas, presentan una distribución típica de comportamiento que simula el modelo teórico.

Entre los valores evaluados a partir de lecturas reales y del ajuste efectuado mediante una curva potencial de los mismos, presenta un índice de correlación del 98.83% lo que

conduce a una aproximación satisfactoria.

Los errores que se presentaron, fueron debidos a las perturbaciones que el medio ambiente intrduce a las mediciones como pueden ser:

1. La energía radiante secundaria emitida por las lámparas del laboratorio.
2. El efecto de pantalla, presentado por la cubierta de la mesa del equipo experimental, así como de las paredes del acrílico de las puertas que disminuyen las corriente convectivas del medio ambiente.
3. Los errores de los instrumentos de medición.
4. La dispersión de la energía radiante originada por las partículas, contenidas en las capas de aire como pueden ser del polvo, humedad, etc., entre los cuerpos interactuantes, así como el de las fuentes, respecto a los dispositivos sensores.
5. La verticidad originada por el calentamiento de las capas de aire adyacentes a los cuerpos expuestos al intercambio de calor radiante.
6. La radiación visible que fluye a través de los tragaluces e interaccionaba con los dispositivos y accesorios utilizados en los experimentos.
7. Los factores de Forma existentes entre los cuerpos participantes.

Estos efectos, sumados a los restantes mencionados en las conclusiones particulares para cada uno de los experimentos, son fuentes de dispersión en los datos obtenidos.

APENDICE A
SISTEMA DE MEDICION DE RADIACION Y TEMPERATURA SCOTT
MODELO 9053
INSTRUCCIONES DE INSTALACION Y OPERACION

El equipo para experimentación de Radiación térmica marca Scott, modelo 9053, incorpora los componentes enlistados en estas páginas. Los componentes principales se encuentran instalados en forma permanente en una mesa de laboratorio móvil la cual es soportada por una estructura de -- acero tubular. Mediante ruedas de plástico que pueden girar sobre su propio eje y con seguros tipo industrial para las ruedas giratorias, las cuales proveen de una fácil movilidad y estabilidad estacionaria. Se provee de una gran área de trabajo para papeles y cuadernos mientras se toman mediciones.

HORNO TIPO MUFLA

Se localiza un horno eléctrico de tipo mufla en el extremo izquierdo posterior de la orilla de la mesa, la carga eléctrica de consumo del horno es 115 v a-c., 18.6 amps.-50-60 ciclos. La unidad esta aislada con un grueso aislante y una cubierta de acero soldada con una puerta que tiene un contrapeso con una ventana de observación de una pulgada de diámetro hacia el interior.

El horno está equipado con elementos que pueden soportar un alto rango de temperatura, con una temperatura máxima de operación de $2150^{\circ}\text{F} = 1177^{\circ}\text{C}$. Existen cuatro placas

en el interior del horno. Los elementos de la tapa y el fondo son intercambiables, al igual que los demás lados.

Para regular la temperatura en el interior del horno se utiliza un control porcentual de tiempo de entrada, ajustado en forma manual. Mediante marcas distribuidas en forma de reloj se puede indicar el porcentaje (5 a 100%), de entrada total que es suministrado al elemento calefactor en aquella posición. Para poder hacer cambios de la entrada, el operador deberá girar la perilla de control a la posición deseada. Una vez que el horno se ha estabilizado a una posición dada del control se mantiene a un nivel de temperatura de la cámara, automáticamente compensará las amplias variaciones del voltaje de línea ó temperatura ambiente.

Mediante un pirómetro del tipo de aguja y un termopar se indica aproximadamente la temperatura del interior de la cámara. Esto se provee para que el operador pueda juzgar la posición del control más conveniente, esto no controla el horno de ninguna manera. Existe una marca a 70° F sobre la escala del pirómetro. Cuando el horno está a temperatura ambiente (comunmente a 70° F = 21.11°C), la aguja debe detenerse en esta marca, si no lo hace, la aguja puede ajustarse girando el tornillo encontrado en la cubierta del pirómetro (sin embargo este ajuste no debe ser necesario), cuando se está tomando tecturas golpéese la cubierta del pirómetro ligeramente con la uña para sacudir la fricción estática del pivote. Este pirómetro es para usarse en operación del horno. No es lo suficiente-

mente preciso ni tampoco tiene una escala apropiada para ser utilizada en trabajo experimental. Para estos propósitos se deberá utilizar otros instrumentos (descritos en el siguiente material).

Dos crizoles para metales que puedan ser fundidos que son provistos con su soporte. Los crizoles deben llenarse -- con metales puros, aluminio y estaño, que son provistos -- en forma de Pellet. Se provee en el interior del horno -- de un termopar para cada crizol. Los crizoles deben colo-- carse a un lado del horno en el soporte provisto, la ba-- rra de acero, que contiene un termopar colocado en el in-- terior del centro de la barra aproximadamente a la mitad de su eje más largo, puede colocarse en la cámara del hor-- no y utilizarse como objetivo de medición de temperatura. Las terminales del termopar colocado en la barra deben -- llevarse hacia el exterior a través de la puerta del hor-- no. Las terminales de los termopares para los crizoles y para la pared dentada del horno deben llevarse a través -- de tubos cerámicos en la pared posterior del horno a las terminales sobre la cubierta de la mesa y se identifican como:

CRIZOL # 1 CRIZOL # 2
PARED DENTADA DEL HORNO

La precisión de la medición de temperatura en el interior del horno depende de la precisión de los termopares de -- chromel-alumel utilizados en la cámara y la carga apropia-- da del horno se debe tener precaución de asegurarse que --

la terminal cubra a los termopares principales del calor.

OPERACION DEL HORNO TIPO MUFLA

Para operar el horno primero gire hacia "ON" el interruptor del control de tiempo (timer), entonces gire el interruptor de encendido hacia "ON", y colóquese la perilla de control al porcentaje de entrada total deseado.

El piloto debe encender una luz y conforme exista potencia en la unidad de control, continuará encendida. Obsérvese el pirómetro analógico y conforme la cámara se aproxima a la temperatura deseada de operación, ajústese el porcentaje de entrada para estabilizar la temperatura en el punto deseado.

El control de tiempo accionado de forma eléctrica, se utiliza para la operación ON-OFF del horno y únicamente puede utilizarse para precalentar el horno automáticamente.

Si se hace necesario un rápido calentamiento del horno, selecciónese un alto porcentaje de entrada, o "Max", esto proporciona una gran entrada al horno y la temperatura ascenderá rápidamente. Cuando la temperatura de la cámara está próxima a la temperatura de operación deseada, redúzcase el porcentaje de entrada hacia el cual se estabilizará el horno en aquel punto.

La potencia de reserva necesaria para calentar rápidamente y recobrarlo rápidamente cuando las cargas de calor va

rían o se abre la puerta, es mucho mayor que aquel que se necesite para mantener la temperatura en un horno caliente. Por eso, el horno no debe abandonarse y atenderse -- cuando opere en él una cantidad de entrada mayor del 40% del control. De otra manera, el horno se puede sobrecalentar o incendiar los elementos en el y/o los termopares.

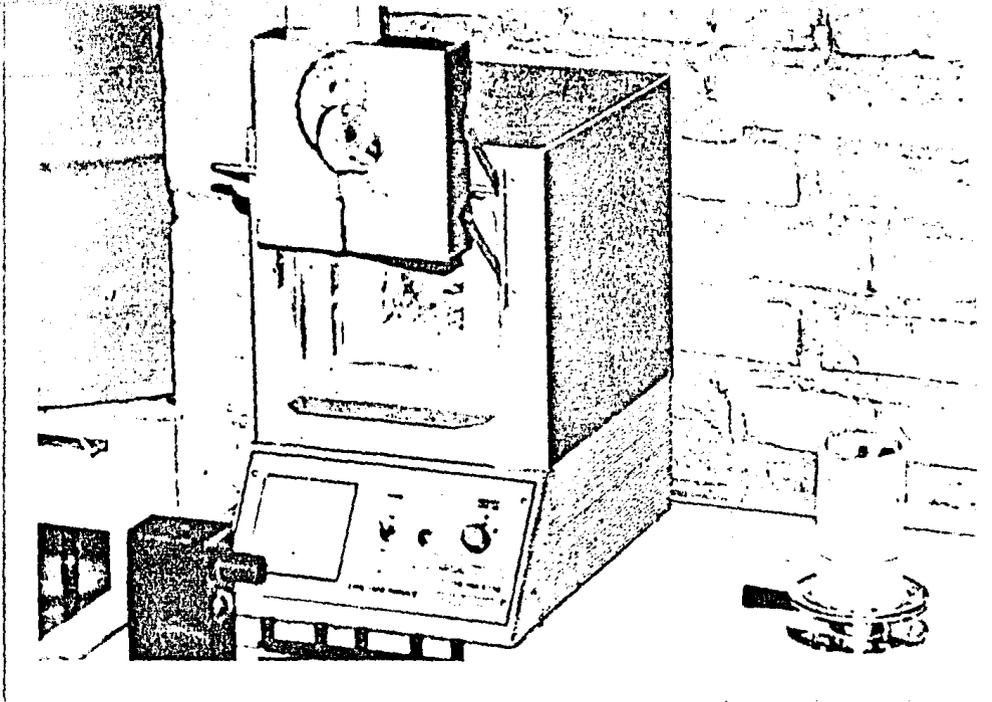
Se debe notar también que si ha habido un retraso de tiempo entre la aplicación de la energía a los elementos del horno y una lectura en el pirómetro, se debe realizar un ajuste a la entrada tomando en cuenta este retraso como un factor.

Si la temperatura se está incrementando, se debe de cambiar la condición de operación del horno girando la perilla del control un poco antes de haber alcanzado el punto deseado para la lectura. La Figura A.1 muestra el horno de tipo mufla.

Se recomienda para uso principal de mediciones en general de temperatura un potenciómetro milivotmetro Leeds and Nortrup dentro de un rango de 11.0 a + 101.1 milivots sin convertir las conexiones de entrada. También puede utilizarse para checar pirómetros de termopares en el laboratorio y como una fuente de voltaje calibrada (fem de salida).

ESPECIFICACIONES

Rango	- 11.0	+	101.0 mv
Límites de error		+	(0.05% de lectura + 20 M v)
		-	(0.05% de lectura + 40 M v)



Para calibración del potenciómetro Leeds and Northrup, síganse las instrucciones como se ha indicado en el manual de operación y descripción proporcionado con esta prueba del equipo. Si se utiliza otro instrumento calíbrese de acuerdo a las lecturas, de acuerdo con la tabla de conversión proporcionada (apéndice B). Se debe notar que solo los termopares de Cromel Alumel deben ser utilizados para la calibración.

CALENTADOR PARA PLACAS

Un componente cuadrado de 6 pulgadas está construido de una estructura de bloques de material "transita" un elemento calefactor de 350 watts que proporciona calor radiante a varios receptores de configuración diferente. Un conjunto de cuerpos receptores incluyen cuatro placas que tienen diferentes niveles de energía superficial libre. Las placas son de forma cuadrada y pueden ser montadas individualmente enfrente de la estructura calefactora de manera que la placa se asiente perfectamente sobre tornillos en su parte interior y en su parte superior se asegura mediante una pequeña placa con resorte para sujetarla. Para determinar la temperatura superficial de la placa a aprobar, se conectó un termopar en el centro de esta. Se debe aplicar una capa fresca de hollín, ya sea a uno o a ambos lados de la placa de acuerdo al procedimiento experimental. La figura A.2 presenta esta fuente plana cuadrangular de radiación infrarroja.

Otro cuerpo receptor consiste de una estructura compuesta

de tres placas de aluminio que han sido anodizados de color negro para mejorar su emisividad superficial.

Las placas de aluminio están contenidas en una estructura aislada, colocada sobre una esquina para poder balancearse hacia adentro o hacia afuera según la posición deseada para propósitos experimentales.

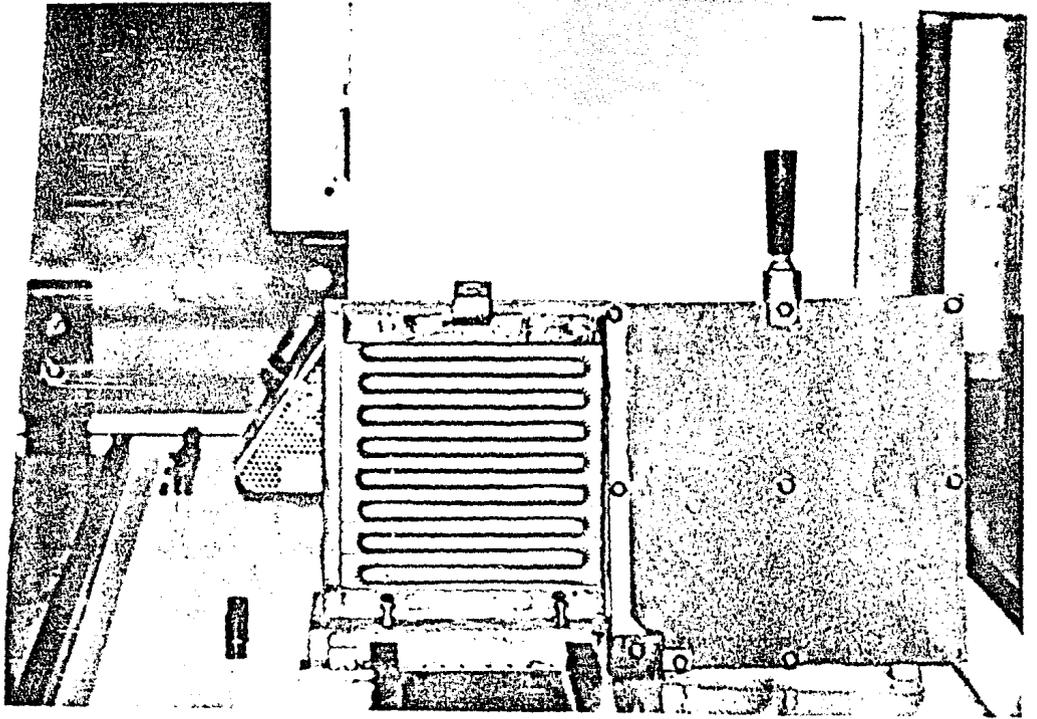
Existen espacios entre las placas de manera que pueda fluir aire de enfriamiento directamente sobre la superficie de las placas por medio de ranuras en el múltiple del aire localizado debajo de la estructura de colocación de placas. El aire se controla por medio de una válvula localizada en la toma de aire en el extremo derecho inferior del eje de la cubierta de la mesa.

La potencia se suministra mediante un transformador variable de manera que la temperatura se pueda regular fácilmente.

TERMOPARES

Los termopares Scott están contruídos de alambre Cromel Alumel con fibra de vidrio como material aislante.

Este tipo de materiales son capaces de soportar temperaturas de 600°F a 2 000°F (315.35°C a 1,093.33°C), de operación continua. Los termopares son preparados girando los dos alambres (chromel-Alumel) conjuntamente (dos vueltas) y soldando.



<u>NUMERO DE TERMOPARES</u>	<u>L O C A L I Z A C I O N</u>
3	PARED DENTADA DEL HORNO
1	BARRA DE ACERO PARA MEDICION DE TEMPERATURA
4	PLACAS RECEPTORAS
1	FUENTE DE RADIACION PEQUENA
1	DISPONIBLE
10	T O T A L

FUENTE CILINDRICA DE RADIACION INFRARROJA

Un cilindro cerámico donde está incrustada una resistencia de alambre de cinta está referida en el texto del manual que acompaña a esta unidad como fuente cilíndrica de radiación térmica. Este radiador está montado en un mástil telescópico y es ajustable verticalmente sobre 16.5 - pulgadas = 41.91 cm. ya sea para elevarse o para bajarse, este elemento sobresale de la masa y se ajusta a la altura mediante un tubo de acero. Se asegura mediante una perilla de color negra que está aislada y se localiza en la base que soporta todo el cilindro. La máxima temperatura que desarrolla este elemento es de $600^{\circ}\text{C} = 1200^{\circ}\text{F}$. La Figura A.3 presenta este cilindro calefactor.

La potencia proporcionada mediante un transformador variable además de poder mantener cualquier temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura máxima $1200^{\circ}\text{F} = 600^{\circ}\text{C}$.

CALEFACTOR PUNTUAL INFRARROJO

Un pequeño contenedor térmico que consta de dos fuentes - adicionales de radiación, una es una fuente infrarroja de tipo puntual con un cilindro colimador de rayos infrarrojos de 3.81 cm. de longitud. La segunda es una fuente de radiación visible (lámpara incandescente). Ambos elementos están valuados para 12 volts y para que operen a través del transformador variable y para 6.3 volts de un --- transformador fijo. El interruptor de control está arreglado para encender ambos el calefactor o la lámpara in--candescente. La Figura A.4 presenta el contenedor térmico de las dos fuentes de energía radiante.

La temperatura superficial de la fuente puntual de radiación puede medirse conectando un termopar de cromel-Alu--mel a la superficie del calefactor con un gancho a un potenciómetro, tal arreglo es llamado un "termosonda".

TERMOPILA

Se proporciona con el modelo 9053 un pirómetro termo-eléctrico (termopila). Básicamente este sensor es capaz de - determinar pequeñas diferencias de emisividad, esta unidad básica, ha sido sin embargo modificada extensamente para adicionar las capacidades. La Figura A.4 muestra este -- dispositivo sensor de calor radiante.

Existe por ejemplo, un montaje especial de manera que la unidad pueda montarse intercambiabilmente en carriles de apoyo graduados con una escala o pueda ser manejada ma-

nualmente. Este montaje está configurado de manera tal - que el sensor pueda ajustarse direccionalmente en torno a dos ejes.

Además se proporciona un reflector especial para poder -- convertir al instrumento de forma sensible a la dirección de propagación de la energía radiante. La termopila consiste de 20 uniones "calientes" y "frías" que desarrollan aproximadamente 50 microvolts por grado de diferencia de temperatura para cada par; de manera que la fem total desarrollada por grado F, es aproximadamente un milivolt. - la termopila por si misma tiene una pequeña captación de calor y una baja conductividad de calor. Las juntas calientes están ennegrecidas de manera que el calor pueda - ser absorbido realmente. Se provee de un medio colector y de concentración mediante la forma parabólica cilíndrica del reflector. La fila ennegrecida de juntas está localizada a lo largo de la línea focal de este reflector. La abertura de colección es de 6.5 cm^2 , los rayos infrarrojos penetran hacia el colector por toda el área y son concentrados de manera que de la intensificación necesaria para disminuir hasta aproximadamente 20 veces las pérdidas por absorción. La Figura A.5 muestra el circuito - de termopares que constituyen la termopila y su disposición interna.

Cuando se desee utilizar un difusor de rendija pequeña, - se absorbe únicamente radiación directa. Esto se origina por detección de todo el calor radiante incidente en las paredes cónicas del difusor. La termopila es sensible al

cambio de dirección gracias a su difusor. El difusor debe colocarse a la termopila de manera que la rendija sea paralela a la fila de uniones ennegrecidas de la termopila. El difusor también proporciona una protección para las uniones cuando la unidad de termopila está guardada.

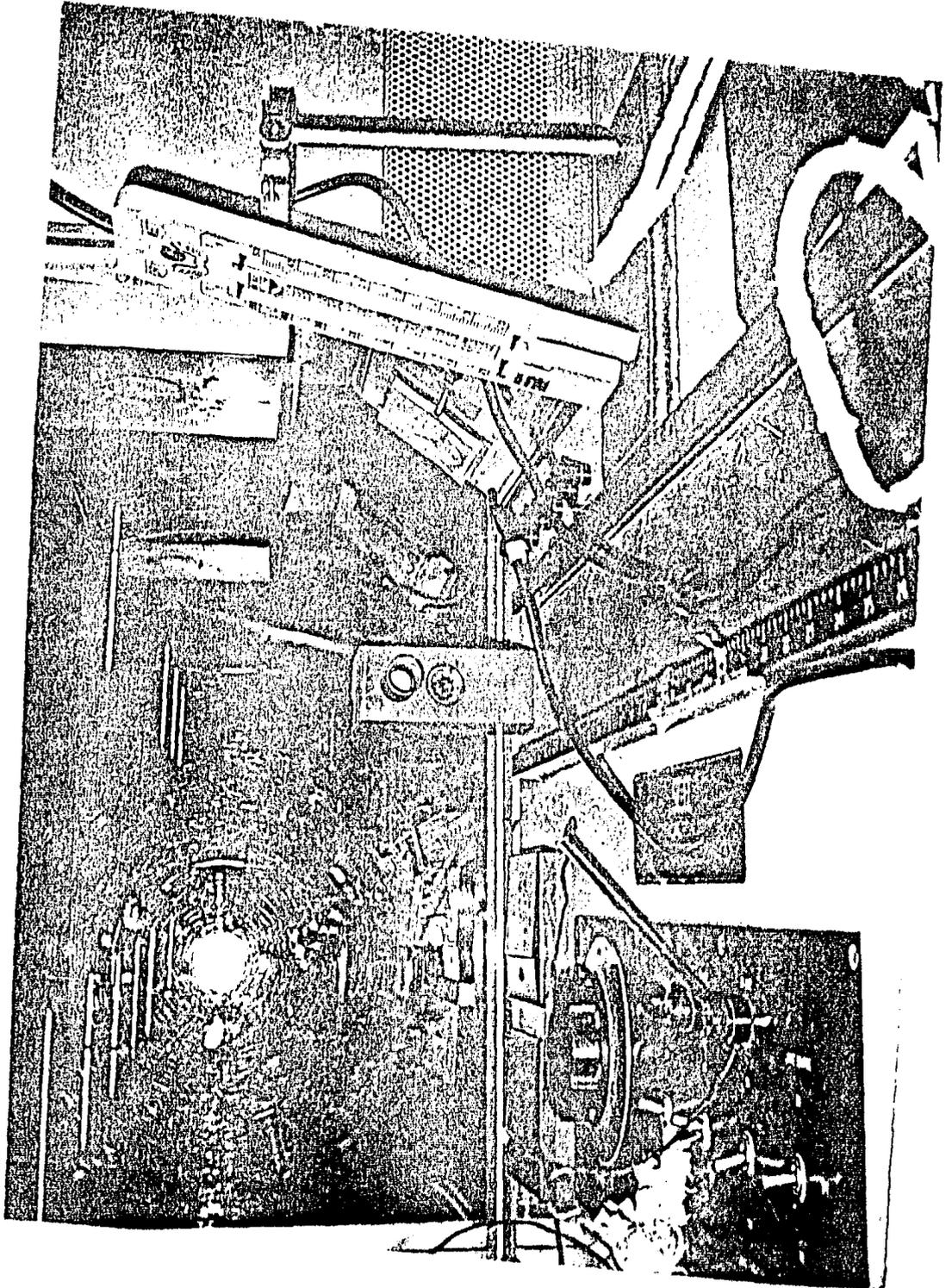
Para correctas mediciones es necesario que el sumidero calorífico, (la porción real de la termopila), esté mantenida a la temperatura ambiente. De modo que, durante un experimento la termopila no debe exponerse a una fuente de calor. Para tomar mediciones conéctese la termopila a un potenciómetro y enfóquese la termopila en dirección al objeto bajo prueba. El potenciómetro indicará hasta que punto el objeto está radiando o absorbiendo calor.

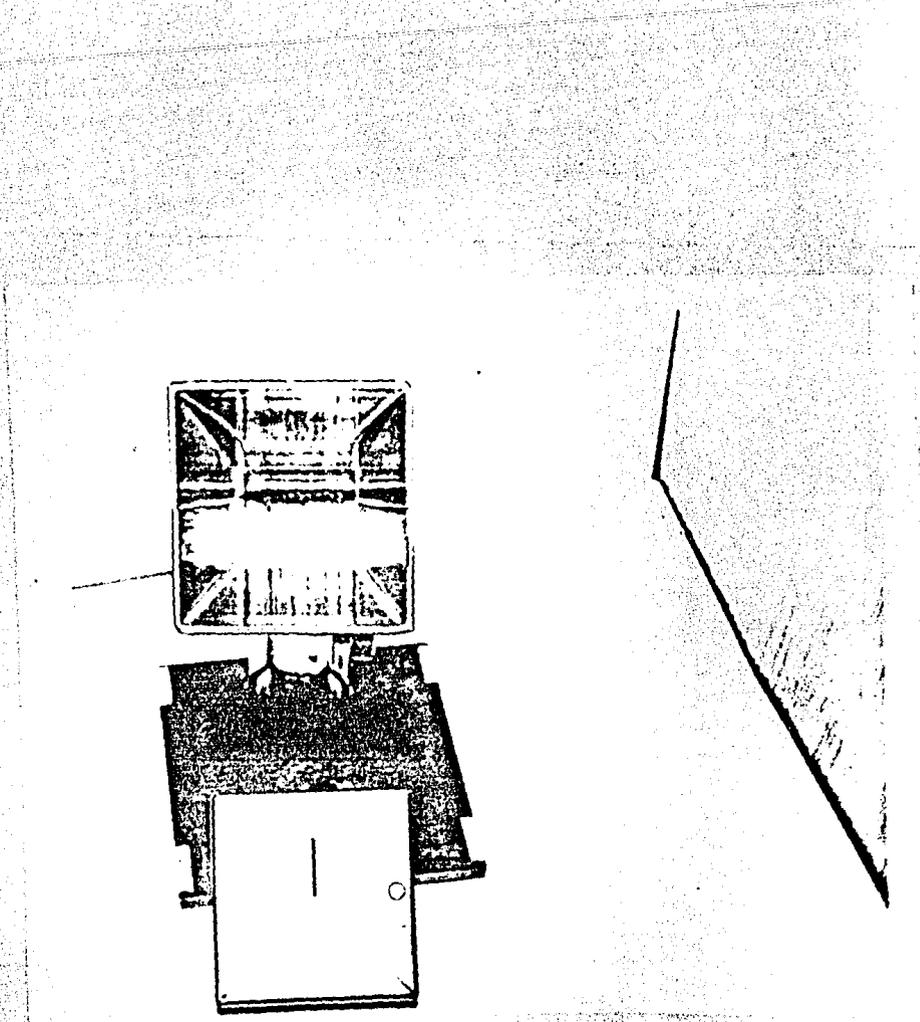
Para instrucciones posteriores sobre su uso, véase el esquema de la figura B

Se debe de notar que las delicadas juntas calientes de la termopila están localizadas en el foco del reflector y no debe tocarse bajo ninguna circunstancia para no doblar hacia afuera de la línea o dañar las superficies ennegrecidas. El colector debe protegerse de la abrasión mecánica o de la corrosión química para evitar la reducción de la potencia reflectora de sus superficies internas.

FOTOMETRO

El fotómetro es un dispositivo semiconductor que convierte la radiación visible directamente en energía eléctrica.





La celda fotoeléctrica genera una diferencia de voltaje a través de sus terminales cuando la energía luminosa choca contra su superficie. Las terminales están conectadas a través de un microamperímetro. Las Figuras A.6 y A.7 --- muestran este instrumento conjunto sus dos cilindros colimadores de la radiación visible.

Una corriente la cual varía como un resultado de la iluminación incidente sobre la superficie de la celda fluye a través del medidor como resultado de una diferencia de -- voltaje aplicado a partir de la fuente luminosa (véase -- apéndice), para sus características de eficiencia.

Al igual que la termopila, el fotómetro está especialmente configurado para colocarse en los carriles de apoyo -- graduados construidos para selectividad de los haces de -- energía radiante.

El fotómetro está equipado con una cubierta rectangular -- sobre la celda de protección fotoeléctrica. Ya que la -- celda reacciona para cualquier clase de luz, se colocó -- una pieza de cinta sobre la celda para mejorar la protección.

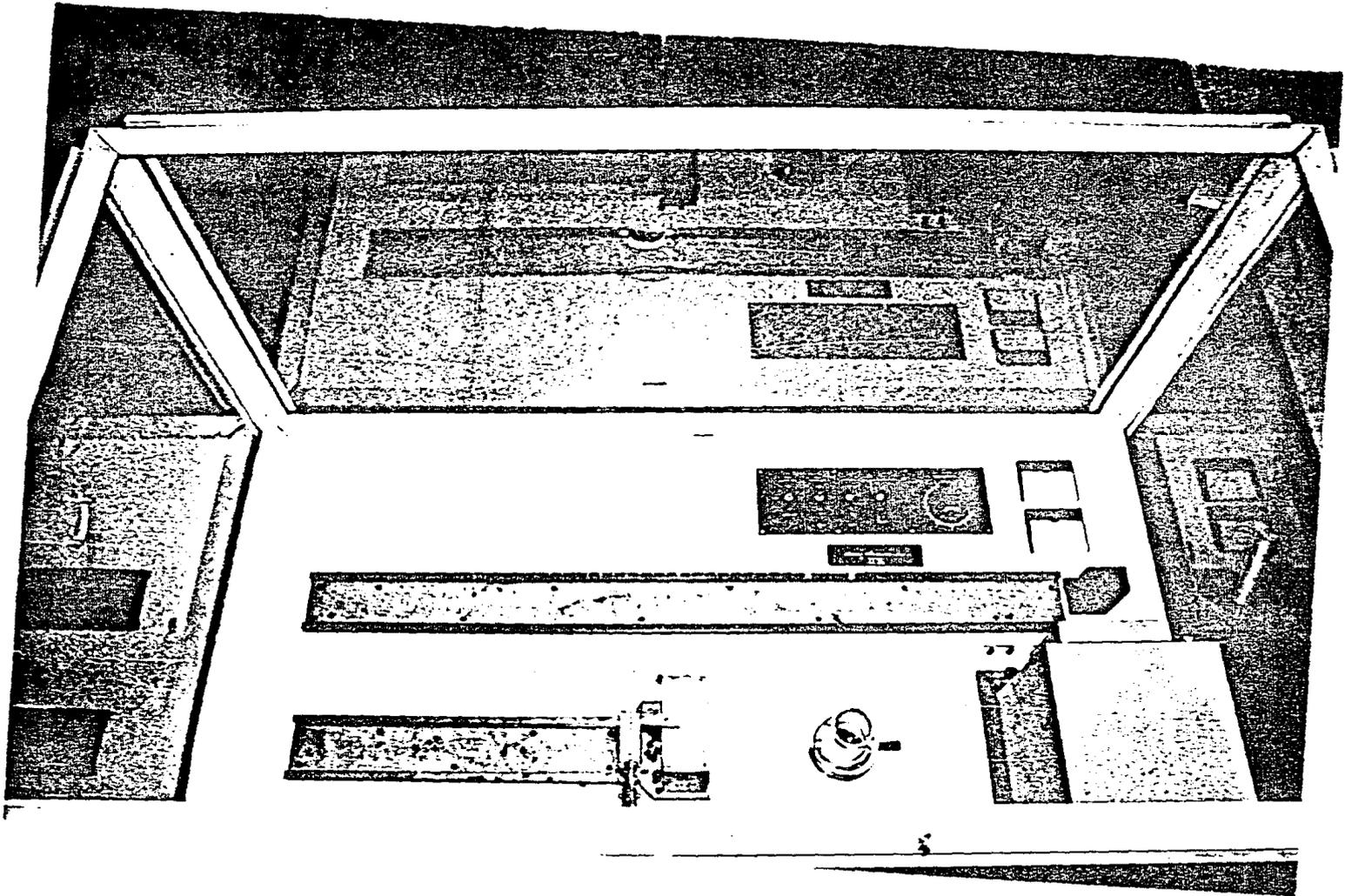
Tanto la tapa como la base deben ser retiradas antes de -- comenzar el experimento en el cual se requiera el fotómetro.

NOTA: Reemplazar la cubierta metálica color negro después de usarse para proteger y prolongar la vida de la fotocelda.

Se proporcionan dos cilindros aproximadamente de 7 pulgadas x 2 pulgadas o sean 17.78 cm x 5.08 cm para cubrir el fotómetro de la luz del medio ambiente mientras se están tomando mediciones. Los dos cilindros están dimensionados para ensamblarse en la porción del adaptador y el cual está montado alrededor de la fotocelda. Los cilindros deben mantenerse en posición por medio de un tornillo manipulado por los dedos y con una cabeza adaptable a este uso. El uso de el cilindro mayor está calculado para eliminarse 95% de la luz difusa; este cilindro debe usarse cuando el fotómetro está a más de 10 pulgadas 25.4 cms. desde la fuente de luz. El cilindro menor tiene las mismas características y puede usarse cuando el fotómetro está a menos de 10 pulg. = 75.4 cm. de la fuente de luz. Para la medición de diferencias en emisividad de los rayos infrarrojos emitidos por la fuente de radiación puntual, utilícese la termopila como sensor.

CARRILES DE APOYO GRADUADOS

La configuración del modelo 9053 proporciona dos carriles de apoyo (uno de longitud = 28 pulg. = 71.12 cm. adyacente a la fuente de calor plana cuadrada; la otra de un largo de 68 pulg. = 172.72 cm. = 1.72 m. adyacente al arreglo de fuentes de radiación puntual). Los carriles están dimensionados para permitir un montaje intercambiable en cualquier lugar de la termopila por todo lo largo del carril así como el fotómetro y otros arreglos montables y ajustables mencionados en la próxima sección relativa a "otros dispositivos". La Figura A. 8 muestra estos carriles.



TABLERO DE CONTROL

El tablero de control incluye un transformador principal, un voltímetro, un amperímetro e interruptores apropiados, indicador de luz y fusibles. Dicho tablero está fijo en la esquina frontal izquierda de la mesa. Es capaz de entregar continuamente un voltaje ajustado desde la línea de corriente alterna al calentador plano la fuente cilíndrica de radiación y la fuente puntual de radiación. Los medidores rectangulares miden la corriente y el voltaje proporcionados a la fuente de radiación que está siendo operada experimentalmente. Este tablero controla todos los elementos excepto el horno, el cual opera a través del control de tiempo (timer). Véase la Figura A.9.

El transformador variable principal se pone a funcionar por medio del interruptor ON-OFF. El foco piloto aparece rojo conforme se va proporcionando energía al transformador. El calefactor plano y la fuente cilíndrica de radiación están también controlados para separar los interruptores ON-OFF, la fuente puntual de radiación y la fuente de luz están controladas por un interruptor de posición de 3 pasos "ON-OFF-ON".

El interruptor de control debe estar en la posición de "ON" para esta operación.

NOTA: Asegúrese que la aguja indicadora de potencia suministrada se encuentra en cero antes de encender los interruptores. La Figura A. 8 muestra el tablero de control y sus componentes mencionados.

PROGRAMADOR ELECTRICO

Para ahorrar más tiempo en la experimentación, el horno puede precalentarse utilizando un programador de tiempo de 24 horas, el cual está equipado con disparadores "ON", "OFF", PRECAUCION, "NO FIJAR EL CONTROL DEL HORNO A MAS DE 40% DE ENTRADA. El interruptor de programación está calculado a 40 amperes, 4 375 watts, 125 volts (a-c). El motor del reloj está evaluado a 125 volts y 60 ciclos.

Para precalentar el horno conéctese el disparador para el ciclo "ON-OFF". la luz clara es para el disparador en "ON" y el calor obscuro identifica al disparador en "OFF". Los disparadores pueden operar a más de 12 veces al día y 1 hora es el mínimo de tiempo entre los pasos. Para fijar el tiempo, jállese cuidadosamente el reloj (con los disparadores colocados) y gírese en ambas direcciones para programar el dial. No se gire la aguja de tiempo; solo levántese y hágase girar y asegúrese que el interruptor manual está en la posición de "OFF". Asegúrese también que el interruptor esté en corto circuito en la posición de "ON". La Figura A.9 muestra el control de tiempo del horno.

OTROS DISPOSITIVOS

Se proporcionan otros 3 arreglos para utilizarse en varios experimentos.

(1) Una estructura para varias placas de absorción de luz.

- (2) Un cilindro para absorción gaseosa o de vapor.
- (3) Un contenedor para líquidos cryogénicos o hielo seco.

Los tres están montados en arreglos para ser colocados en los carriles graduados descritos anteriormente.

El arreglo para absorción compuesto de placas está diseñado de tal manera que puedan arreglarse combinaciones de - ventanas transparentes para medición de absorción. El ci lindro para absorción de gases consiste en un cilindro -- delgado de metal cerrado en ambos extremos mediante venta nas de "cristal plexi", el cual contiene dos aberturas de entrada y salida, para llenado de óxido de carbono o vapo res. El contenedor para líquidos cryogénicos o hielo se- co está construido de aluminio delgado y está diseñado pa ra medición de intercambio de energía radiante entre cuer pos a temperaturas cryogénicas.

INSTALACION

Las dimensiones del equipo de experimentación de Radia--- ción térmica Modelo 9053, son:

ALTURA	=	51 pulgadas	=	129.54 cm.
LONGITUD	=	72 pulgadas	=	182.88 cm.
ANCHO	=	42 pulgadas	=	106.68 cm.

Puede rodarse fácilmente a través de cualquier puerta es- tandard de laboratorio.

Las conexiones pueden ser para potencia eléctrica y para aire comprimido como se indican:

ELECTRICA.- Conéctese para cualquier fuente potencia recomendable 115 v (a-c) 60 amps. por medio de una extensión de 3 hilos. La fuente de potencia se protegió mediante un interruptor de circuito de 200 amps. La Figura A.9 muestra este interruptor.

AIRE COMPRIMIDO:- La unidad está compuesta con una entrada adecuada de 1/4 NPT en la parte inferior y posterior de la cubierta en la cual ya sea mediante un compresor de laboratorio o cualquier otro medio que proporcione aire limpio y seco a aproximadamente 20 psi, puede ser acoplado. Se conectó una válvula de control a la entrada.

SEGURIDAD

El equipo de experimentación de Radiación térmica marca Scott está resguardado ya sea eléctrica o mecánicamente. Las siguientes características de seguridad se incorporan conjuntamente.

1. El horno de mufla y las fuentes de calor están térmicamente aisladas (véase la Figura A.1).
2. Un interruptor previene de un daño por corto circuito (véase la Figura A.9).
3. Una clavija de 3 hilos provee una tierra externa a la unidad entera.

CARACTERISTICAS DE RENDIMIENTO DEL FOTOMETRO

1. TEMPERATURA

Para propósitos generales de aplicaciones, la temperatura máxima recomendada para una buena estabilidad y vida larga es $185^{\circ}\text{F} = 85^{\circ}\text{C}$. Si se llevasen a cabo breves aumentos de temperatura hasta $212^{\circ}\text{F} = 100^{\circ}\text{C}$ estos siendo cortos no afectan apreciablemente la vida de la celda. Para aplicaciones a donde se requiera una extremada estabilidad y una calibración exacta, la temperatura máxima de la celda no debe exceder a $+150^{\circ}\text{F} = 65.55^{\circ}\text{C}$.

2. ILUMINACION

La fotocelda puede utilizarse en un rango de iluminación a partir de menos de 0.01 BUJIA - PIE* (fc) hasta a más de 10,000 Bujías-Pie.

No existe limitación para la máxima iluminación para lo cual estas celdas pueden estar sometidas, se debe tener cuidado de no exceder las cantidades de temperatura límite mencionadas, así como también mantener la corriente a un valor normal.

3. FATIGA

La propiedad de una fotocelda de Selenio la cual ocasiona

* Foot-Candle (English) Bujía-Pie: Unidad de iluminación utilizada en los países anglosajones, equivalente a la iluminación que existe sobre una superficie colocada a la distancia de 1 pie de una fuente luminosa de 1 bujía (NT).

un cambio gradual en una corriente de salida después de haberse expuesto a una fuente de luz se conoce como fatiga. Esta fatiga es temporal y puede despreciarse en aplicaciones a donde la corriente marcada por la celda es menor de 0 microamps por pulgada cuadrada o 0.7874016 microamps por milímetro cuadrado de área activa, prescindiendo de iluminación. Donde se requiera una precisión extrema, se deben tomar las lecturas algunos minutos después de haberse expuesto la celda cuando la corriente ha alcanzado un valor estable.

La sensibilidad de el fotómetro es de una impedancia de 100 ohm, y 300 microamps por 100 bujfa-pie, los cambios en sensibilidad pueden obtenerse incrementando la impedancia del circuito. La tabla de abajo arroja los siguientes datos:

CORRIENTE TIPICA DE SALIDA		VOLTAJE TIPICO DE SALIDA	
100 fc	1 fc	100 fc	1 fc
1 000 ohms	19000 ohms	megaohm	1000 000 ohms
microamps	microamps	volts	milivolts
FOTOMETRO	216	2.0	0.30
			65

APENDICE
MEDICION DE TEMPERATURA
INTRODUCCION

En los enunciados de la segunda Ley de la Termodinámica, la temperatura se relaciona con el calor, ya que se sabe que éste fluye de niveles de alta temperatura a los de baja temperatura, en ausencia de otros efectos. Por otra parte, la teoría cinética de los gases y la termodinámica estadística, demuestran que la temperatura está relacionada con la energía cinética promedio de las moléculas de un gas ideal; además los estudios más avanzados de la termodinámica estadísticamente demuestran que también existe una relación entre la temperatura y los niveles de energía de los líquidos y sólidos.

La presión, el volumen, la resistencia eléctrica, los coeficientes de expansión, etc., son variables relacionados con la temperatura a través de la estructura molecular fundamental, podemos inferir que los cambios en estas variables pueden utilizarse para medir temperatura. La escala internacional de temperatura sirve para definir a la temperatura en términos de características observables de los materiales.

EFFECTOS TERMoeLECTRICOS

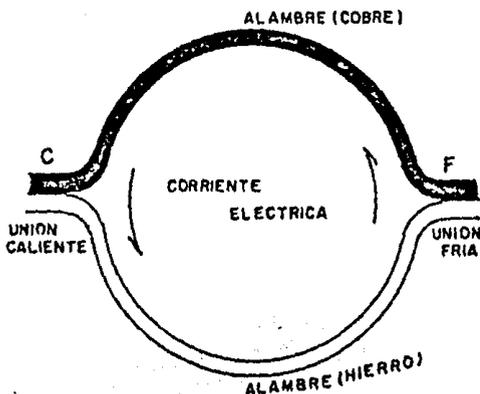
Cuando se juntan dos metales diferentes, como se muestra en la Fig. B.1, se produce una fuerza electromotriz entre los puntos A y B la cual es, principalmente función de la temperatura de la junta. Este fenómeno se conoce como Efecto -- Seebeck. Si los dos materiales se conectan a un circuito

externo, de manera que circule corriente, la fem puede alterarse ligeramente, debido a un fenómeno conocido como efecto Peltier. Además si existe un gradiente de temperatura en uno o ambos materiales, la fem puede tener otra ligera alteración debida al fenómeno conocido como efecto Thompson.

Por lo tanto, en su circuito termoeléctrico se presentan 3 fem: la fem de Seebeck, causada por la unión de dos metales diferentes, la fem de Peltier, ocasionada por un flujo de corriente en el circuito y la fem de Thompson que se debe a la existencia de gradientes de temperatura en el material. La fem de Seebeck es de primordial importancia, ya que depende de la temperatura de la junta. Si se mide cuidadosamente la fem generada en la junta de los metales diferentes como función de la temperatura, posteriormente dicha junta nos puede servir para la medición de la temperatura. El principal problema para lograr lo anterior es la medición del potencial, ya que cuando se conectan los metales al circuito medidor se generará otra fem en las uniones de estos alambres que sirven de conexión al circuito medidor, esta fem dependerá de la temperatura de la última junta, y por lo tanto, se debe tener en cuenta este potencial adicional.

Termopar - (Par termoeléctrico)

Fue descubierto en 1821 por Seebeck conocido como el efecto termoeléctrico.



Dos alambres uno de cobre y otro de hierro, están unidos por los extremos para formar un aro completo. Cuando se calienta una de las uniones y la otra se mantiene fría fluye una corriente eléctrica alrededor del aro en la dirección indicada por las flechas.

peraturas diferentes. El circuito de la Fig. 8-13a genera una fem de E_1 entre las temperaturas T_1 y T_2 ; el circuito de la Fig. 8-1 proporciona una fem E_2 entre las temperaturas T_2 y T_3 . La Ley de las temperaturas intermedias establece que el mismo circuito generará una fem de $E_3 = E_1 + E_2$, cuando opere entre las temperaturas T_1 y T_3 , como se muestra en la Fig. B-4.

FIGURA B.2 junta de dos metales diferentes indicando el efecto termoeléctrico.

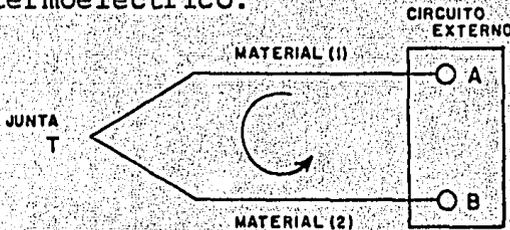


FIGURA. B.3 influencia de un tercer metal en un circuito termoeléctrico; Ley de los metales intermedios.

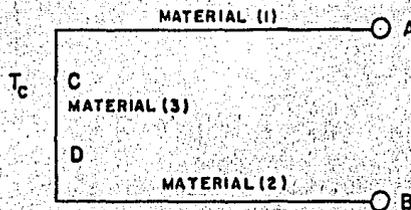
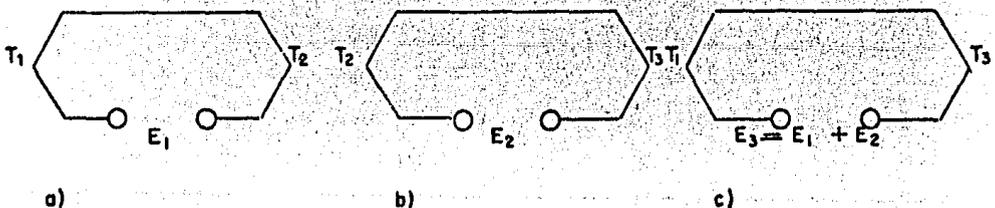


FIGURA B.4 circuitos que ilustran la Ley de las temperaturas intermedias.



Cuanto más grande sea la diferencia de temperatura entre las dos uniones, mayor será la corriente eléctrica.

Si la unión del termopar del diagrama anterior se coloca primero en hielo derretido y luego en agua hirviendo, las dos lecturas en la escala del amperímetro pueden señalarse como 0° y 100°C en los puntos apropiados. Estos determinan la escala del instrumento, haciendo de él un termómetro de lectura directa.

Cualesquiera de 2 metales diferentes pueden, al ponerse en contacto dar lugar al efecto termoeléctrico.

Para las medidas de altas temperaturas se usan platino y aleaciones de platino e iridio, debido a sus muy altos puntos de fusión.

Para el análisis de circuitos termoeléctricos, se tienen dos leyes generales:

1. Si se coloca un tercer metal en un aparato termoeléctrico como el mostrado en la Fig. 8-12, la fem neta del circuito no se verá alterada, siempre y cuando las nuevas conexiones se mantengan a la misma temperatura. Este postulado se puede demostrar con ayuda de la segunda Ley de la termodinámica y se conoce como la Ley de los Metales Intermedios.
2. Considérense los arreglos mostrados en la Fig. (8-13).- Los circuitos de termopares están contruidos con los mismos materiales pero operan entre dos límites de tem-

Se puede observar que todos los circuitos de termopares in-
volucran cuando menos dos juntas, si se conoce la tempera-
tura de una de ellas, entonces la temperatura de la otra -
se puede calcular fácilmente conociendo las propiedades -
termoeléctricas de los materiales. A la temperatura cono-
cida se le denomina TEMPERATURA DE REFERENCIA. En la Fig.
B.5 se muestra un arreglo comúnmente usado para establecer
la temperatura de referencia, el cual consiste en un baño
de hielo. Concretamente una mezcla en equilibrio de hielo
y agua, produce una temperatura conocida de $32^{\circ}\text{F}=0^{\circ}\text{C}=273^{\circ}\text{K}$.
Cuando la mezcla se coloca en un termo la temperatura de -
referencia se puede mantener por largo tiempo. Nótese que
el arreglo de la Fig. B.5a mantiene los dos alambres del -
termopar a la temperatura de referencia de 0°C , mientras -
que la de la Fig. B.5b mantiene sólo uno a dicha temperatu-
ra.

El sistema de la Fig. B.5a podría resultar necesario si los
bornes del instrumento medidor de voltaje estuvieran a tem-
peraturas diferentes, mientras que la conexión mostrada en
al Fig. B.5b resultará satisfactoria si los botones estu-
vieran a la misma temperatura. Para que el sistema de la
Fig. B.5a pueda funcionar en forma satisfactoria, los boto-
nes deben ser de Cu; es decir, tanto los botones como los
alambres conectores deben ser del mismo material.

FIG. B.5(a)

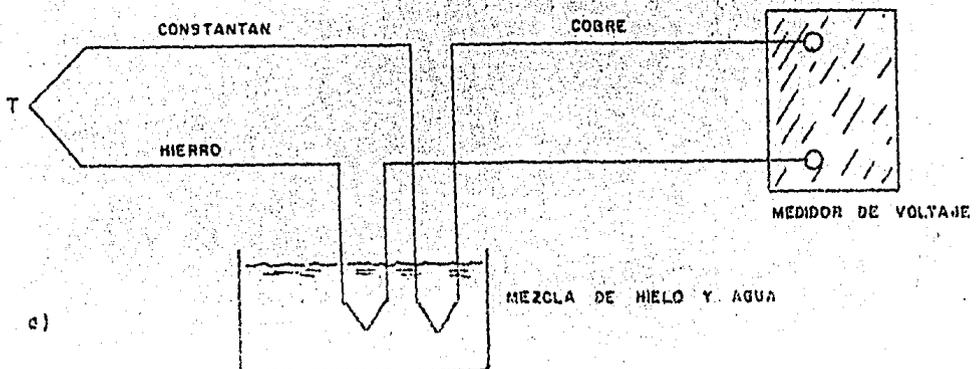


FIG. B.5 (b)

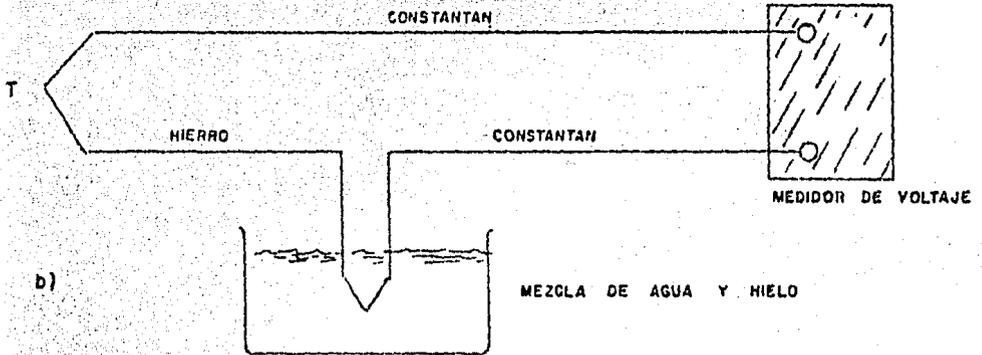


FIGURA B.5 METODOS CONVENCIONALES PARA ESTABLECER LA TEMPERATURA DE REFERENCIA EN UN CIRCUITO TERMOPAR. En este caso se utiliza un termopar de hierro-constantan.

El voltaje E , generado por un solo Termopar generalmente se expresa como:

$$E = AT = \frac{1}{2} BT^2 + \frac{1}{3} CT^3 \quad (B.1)$$

$T = \text{Temp } (^\circ\text{C})$

E está basada en una temperatura de referencia de 0°C .

Las constantes A , B y C dependen de los materiales de la junta.

La sensibilidad o "Potencia termoeléctrica" de un termopar está dada por:

$$S = \frac{dE}{dT} = A + BT + CT^2 \quad (B.2)$$

Ya que el voltaje de salida de los Termopares es del orden de milivolts puede medirse con un milivoltmetro de corriente directa que utilice un galvanómetro D'Arsonval. Como este voltímetro es básicamente un aparato detector de corriente, la lectura dependerá de la fem generada y de la resistencia eléctrica del circuito, incluyendo la de los alambres conectores.

Debido a lo anterior, si se quieren efectuar mediciones con exactitud, se debe calibrar el sistema como un todo.

En toda medición de precisión, el voltaje de salida del termopar se mide con un potenciómetro. Comercialmente es posible conseguir potenciómetros del tipo de balance manual o instrumentos autobalanceados para propósitos de registro. Para trabajos de laboratorio se utilizan normalmente potenciómetros de milivoltmetros. Estos instrumentos pueden discriminar potenciales del orden de 0.01 MV. Debe notarse -- que cuando se utiliza un potenciómetro en equilibrio para medir el potencial generado por un termopar, la resistencia de los alambres conectores no tiene efecto en la medición, ya que como se vió anteriormente, en equilibrio el flujo de corriente en el circuito es cero.

Cuando se quiere tener un circuito más sensible, generalmente se conectan varios termopares en serie como se muestra en la Fig. B.6. A los arreglos de este tipo se les conoce como TERMOPILAS y para el caso de tener 3 juntas por ejemplo, el voltaje de salida que se tiene es el triple del correspondiente a un solo termopar solamente cuando las temperaturas de las juntas frías y calientes se mantengan unifor

mes la utilidad de la termopila reside en que se puede obtener una fem relativamente grande en la medición de pequeñas diferencias de temperatura entre las juntas. De esta manera dicha fem se puede detectar con un instrumento relativamente barato, mientras que en otro caso, quizá se tendría que utilizar un potenciómetro que discrimina potenciales del orden microvolts.

Cuando se instala una termopila es importante cerciorarse que todas las juntas estén aisladas eléctricamente entre sí. En la Fig. B se observan 4 juntas conectadas en serie y mantenidas a diferentes temperaturas.

Debido a que se tiene un número par de juntas no es necesario instalar una junta de referencia, ya que los botones del potenciómetro están conectados a los alambres del mismo material. Si tomamos en cuenta que la corriente fluye del borne positivo al borne negativo y además suponemos -- que la junta (A) produce una caída de potencial en esta dirección, entonces las juntas B y D producirán una caída de potencial en sentido opuesto, mientras que la junta C generará una caída en la misma dirección que la junta A.

Por lo tanto, la fem total medida en las terminales del potenciómetro serán;

$$E = e_a - e_b + e_c - e_d \quad (B.3)$$

De esta manera, si la temperatura en todas las juntas es la misma, la lectura será cero, mientras que en otras condiciones medirá otro valor. Nótese sin embargo, que la fem generada por este circuito serie NO es una indicación

de alguna temperatura en particular, NI representa el promedio de las temperaturas de las juntas.

Un grupo de termopares, cuando están conectados como a continuación aparece, forman lo que comúnmente se llama **TERMOPIILA**

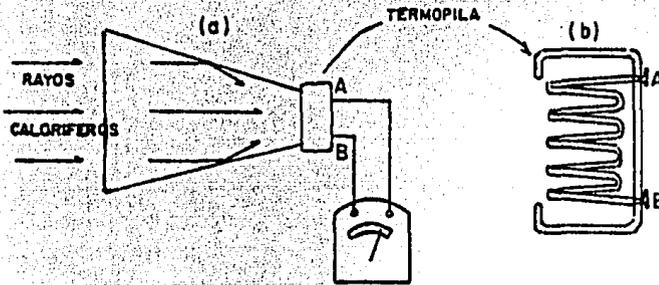


FIGURA B.6 Corte de una TERMOPIILA PARA MEDIR la radiación térmica de los cuerpos calientes.

Un conjunto de pequeñas varillas de metales diferentes están colocados alternativamente como se muestra en el diagrama (b). Un grupo de uniones está generalmente protegido al colocarse junto al fondo de una pequeña caja, y el otro grupo está expuesto a los rayos de calor que pasan a través del lado opuesto de la caja que está abierta.

Una forma más adecuada para obtener promedios de temperatura se logra con el circuito de termopila. En este caso cada una de las juntas "calientes" se puede mantener a diferente temperatura, mientras que todas las juntas frías se deben mantener a una misma temperatura de referencia.

La fem promedio está dado por:

$$E_{\text{prom}} = \frac{\sum E_i}{n} \quad (\text{B.4})$$

n = número de juntas

E = lectura total dada por la termopila

De la fem promedio puede obtenerse la temperatura dada de la E_c (B.4).

El termopar mide la temperatura del último punto de contacto eléctrico de los dos materiales diferentes.

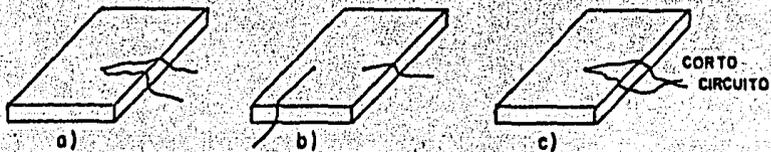


FIG. B.7 Instalación de termopares sobre una placa de metal.

- Solamente la junta detectora hace contacto con la placa.
- El contacto se realiza en dos puntos.
- Contacto en la junta detectora y los alambres. La temperatura indicada por el termopar será la de la junta - en corto circuito.

MEDICION DE TEMPERATURA POR RADIACION

Es posible determinar la temperatura de un cuerpo a partir de la radiación térmica que emite. Comúnmente se emplean dos métodos para efectuar este tipo de mediciones (1) pirómetría óptica, y (2), determinación de la emisividad.

Se define como cuerpo gris aquel cuya emisividad es constante para todas las frecuencias, esto es:

$$\frac{E_x}{E_{bx}} = \epsilon \quad (\text{B.8})$$

**MEDICION DE TEMPERATURA UTILIZANDO
PIROMETRIA OPTICA**

Este método se refiere a la identificación de la temperatura de una superficie por medio del color de la radiación emitida y se basa en el hecho de que cuando se calienta una superficie, su color cambia paulatinamente del rojo obscuro al blanco, pasando por el naranja. Lo anterior, se debe a que con el aumento de temperatura, los puntos máximos de las curvas de radiación de un cuerpo negro se desplazan hacia las regiones de menor longitud de onda, de acuerdo con la Ley de Wien dada por:

$$R_{\max} T = 5215.6 \text{ M}^\circ\text{R} \quad (\text{B-20})$$

R_{\max} = Long. de onda a la que ocurren los puntos máximos.

El desplazamiento en estos puntos explica el cambio de color que sufre un cuerpo cuando se calienta, ya que a altas temperaturas se tiene mayor concentración de la radiación en la región de menor longitud de onda del espectro. El problema de la medición de la temperatura estriba en determinar la variación de ésta con el color del objeto.

Para este propósito se ha construido un instrumento, el cual se muestra esquemáticamente en la Fig. (B-24) y su funcionamiento es el siguiente:

La radiación emitida por la Fuente se ve a través del arreglo formado por la lente y el filtro. Un filtro de absor

ción instalado en la parte frontal del aparato, reduce la intensidad de la radiación incidente, de manera que la lámpara standard se pueda operar a bajos niveles de potencia. La lámpara standard se coloca en la trayectoria óptica de la radiación incidente, ajustando la corriente que alimenta la lámpara, se puede hacer que el color del filamento se iguale al de la radiación incidente.

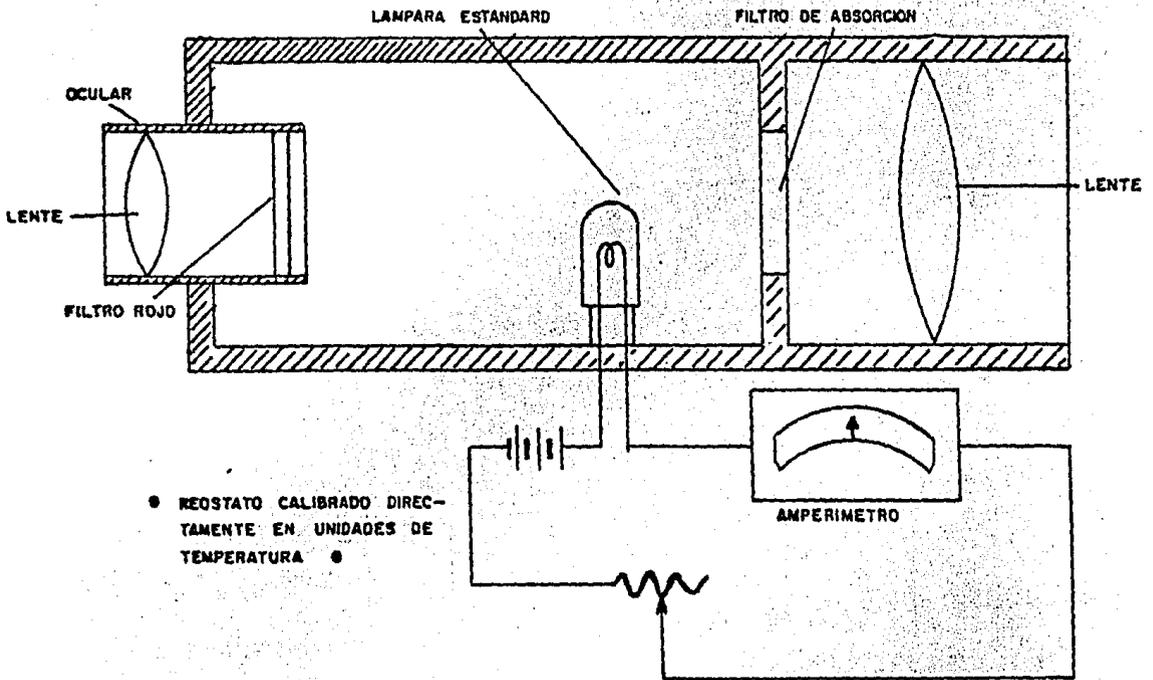


FIGURA 'B'

DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN PIROMETRO OPTICO

**EFFECTO DE LA TRANSMISION DE CALOR EN LA MEDICION
DE TEMPERATURA**

En toda medición de temperatura, está asociado un proceso de transmisión de calor.

Existe un tipo de errores cuando la temperatura del medidor de temperatura difiere apreciablemente de la temperatura que se va a medir y se clasifican como errores fijos.

Debe tenerse en cuenta los mecanismos de transferencia de calor al analizar un problema de medición de temperatura.

a) CONDUCCION

Ley de Fourier $q = -KA \frac{\delta T}{\delta X}$ (B-25)

K = Conductividad térmica

A = Area a través de la cual se transmite el calor

q = Flujo de calor en la dirección en que decrece el gradiente de temperatura.

Si existe un gradiente de temperatura en un termómetro, - el calor puede transmitirse hacia adentro o hacia afuera del elemento sensor, según la relación anterior.

La transmisión de calor por convección, se puede describir según la Ley de enfriamiento de Newton.

$$q = hA (T_s - T_{oo}) \quad (B-26)$$

h = Coef de transmisión de calor por convección

A = Area de la superficie que intercambia calor con el fluido

T_s = Temperatura de la superficie

T_{oo} = Temperatura del fluido

La transmisión de calor por radiación entre dos superficies es proporcional a la diferencia entre las temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia, de acuerdo con la Ley de Stefan Boltzman para la radiación térmica.

$$q_{1-2} = F_g F_e (T_1^4 - T_2^4) \quad (B-27)$$

F_g = Factor geométrico

F_e = Factor relacionado con las propiedades de radiación de la superficie

Considérese el problema de medición de temperatura ilustrado en la Fig. (B-27). Se instala un termopar en una placa cuya temperatura se desea medir. La placa se expone a un ambiente sujeto a convección en ambos lados, y los alambres del termopar están cubiertos con material aislante como se muestra, en la siguiente figura.

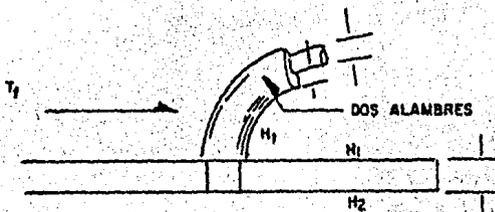
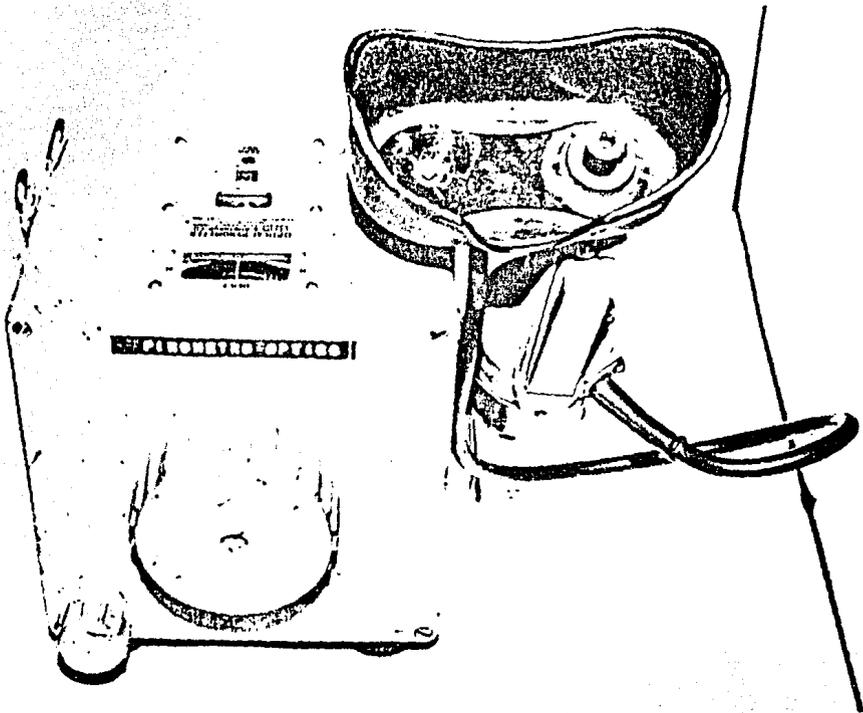


FIGURA B Diagrama esquemático de una instalación general de termopares en una placa plana.

Si la temperatura de la placa es mayor que la del ambiente, el calor se transmitirá al exterior por medio del --- alambre del termopar y la temperatura de la junta será menor que la temperatura verdadera de la placa.



A P E N D I C E C

En esta sección se proporciona la metodología utilizada en el desarrollo de los ajustes inherentes a los datos experimentales, así como del procesamiento de los mismos por computadora.

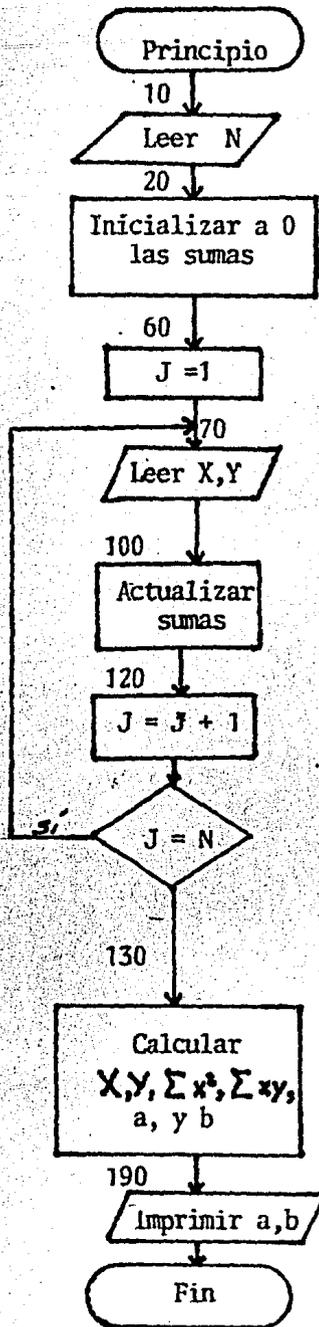
METODO DE MINIMOS CUADRADOS (Recta)

Siempre que los datos sugieren una recta para su representación, el método de los mínimos cuadrados podrá ser utilizado para la elaboración de un pronóstico. Este método consta de la determinación de la línea recta que mejor se ajusta a los puntos, es decir la línea para la cual la suma de los cuadrados de las distancias a los puntos de la gráfica, es mínima. Como sabemos, la ecuación de cualquier línea recta es como la que sigue:

$$Y = a + bX$$

Para llevar a cabo este procedimiento, es necesario calcular los elementos siguientes:

1. El promedio de las observaciones de la variable X
2. El promedio de las observaciones de la variable dependiente Y
3. La suma de cuadrados corregida
4. La suma de productos cruzados corregida
5. El estimador de mínimos cuadrados para b:
6. La estimación de a:



(b) Diagrama de Flujo

Las ecuaciones que proporcionan los valores de a y b para la recta de mínimos cuadrados son las siguientes:

$$a = \frac{\sum x^2 \cdot \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \cdot \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

donde X y Y son las dos variables del problema, y N el número de puntos.

Hay otras relaciones para mejorar la "bondad de ajuste"; sin embargo, las expresiones anteriores son suficientes para nuestros propósitos.

Consideremos la elaboración de un programa para obtener el valor de las coeficientes a y b, e imprimir los resultados en la Fig. se muestra tal programa y su diagrama de flujo. Inicialmente leer renglón 10, el número total de observaciones, N., a continuación del renglón 20 al 50 se asigna el valor cero a las variables que van a representar a las sumas (para representar X se utiliza la variable X1, la X^2 , se representa por X2, Y por Y1 y XY por Y2). Entre los renglones 60 y 120 se establece un circuito o ciclo iterativo. En cada iteración se lee un valor de X y el correspondiente valor de Y, y se actualizan las sumas mencionadas. Las instrucciones que aparecen en los renglones 130 y 140 calculan los valores respectivos de X y Y; los renglones 150 y 160 calculan x^2 y xy ; las instrucciones que aparecen en los renglones 170 y 180 estiman los parámetros a y b, que se imprimen en el renglón 190. Con el propósito de ser más claros, utilizamos una instrucción DATA separada para leer el valor N, y otra para cada una de las siguientes parejas de observaciones. Por supuesto, con una sola proposición DATA habría sido suficiente.

El método de mínimos cuadrados sirve únicamente para determinar la ecuación de la línea recta. El experimentador tendrá que decidir, por lo tanto, si solamente utilizará dicha ecuación para pronosticar el futuro o si también valdrá la pena tomar en consideración las variaciones cíclicas y aleatorias.

COEFICIENTE DE CORRELACION

Si es posible representar la variación de una variable y en función de una variable X a través de una línea recta, decimos que existe entre las dos variables una correlación lineal. Esta correlación puede ser mas o menos precisa, dependiendo del error que se comete al representar dicha variación a través de la línea recta. La precisión de la correlación lineal puede ser evaluada determinándose el coeficiente de correlación

$$C.C = \frac{N \sum XY - (\sum X) \cdot (\sum Y)}{\sqrt{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2}}$$

El coeficiente de correlación estará siempre entre -1 y 1. Si la representación de la variación a través de la línea recta es exacta (Figs. 2 y 3) el coeficiente será igual a -1 ó +1, dependiendo de la inclinación de la recta, es decir, si la función es creciente o decreciente. Si el coeficiente resulta muy bajo (0.2 ó 0.3, por ejemplo), esto quiere decir que la variación estudiada no deberá ser representada a través de una línea recta Fig 4. Si el coeficiente resulta muy elevado (pero todavía menor que 1 en valor absoluto), esto significa que no existe una correlación lineal perfecta, sin embargo la variación puede ser precisamente representada a través de la línea recta. (Fig. 5)

Supongamos que hemos deducido que existe una correlación lineal entre 2 variables (C.C. igual a 0.8, por ejemplo). ¿Cómo podemos estar seguros de que esta correlación no existe por pura casualidad? Para resolver este problema utilizamos tablas como la que se muestra a continuación:

METODO DE MINIMOS CUADRADOS (CURVA EXPONENCIAL)

Este método consta del ajuste de una curva exponencial a los puntos es equivalente al ajustar una línea recta a estos mismos datos, pero marcándose en el eje vertical el "log Y" - en vez de "Y". Esto se debe a que si tomamos el logaritmo de "Y" en la ecuación de la curva exponencial, resulta lo siguiente:

$$\text{Log } Y = \text{Log } (ab^X) = \text{Log } a + \text{Log } b \cdot X$$

Si ponemos $\text{log } a = A$ y $\text{log } b = B$, tenemos:

$$\text{Log } Y = A + BX$$

que es obviamente la ecuación de una recta.

Y ahora, por lo tanto, podemos marcar X en el eje horizontal y log Y en el eje vertical y ajustar una recta a los puntos utilizando el método de mínimos cuadrados. Si observamos la ecuación $Y = A + BX$, podemos deducir que las ecuaciones para calcular A y B son las siguientes:

$$A = \frac{\sum x^2 \sum \log Y - \sum x \sum x \log Y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$B = \frac{N \sum x \log Y - \sum x \sum \log Y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Para calcular A y B necesitamos calcular
MINIMOS CUADRADOS CURVA POTENCIAL

La curva potencial tiene la siguiente ecuación:

$$Y = a \cdot X^b$$

y tiene las formas que se presentan en las figuras 8 y 8 según el valor de la constante b.

Si tomamos el logaritmo de Y en esta ecuación, tenemos:

$$\log Y = \log a + b \cdot \log X$$

que también es la ecuación de una línea recta. Por lo tanto podemos utilizar el método de mínimos cuadrados para ajustar una línea recta a las variables log Y y log X

$$a = \text{antilog} \left[\frac{\sum (\log x)^2 \cdot \sum \log Y - \sum \log x \cdot \sum (\log x \cdot \log Y)}{n \sum (\log x)^2 - (\sum \log x)^2} \right]$$

$$b = \frac{n \sum (\log x \cdot \log Y) - \sum \log x \cdot \sum \log Y}{n \sum (\log x)^2 - (\sum \log x)^2}$$

10 PRINT "PROGRAMA QUE EFECTUA EL AJUSTE DE UNA LINEA RECTA DE LA FORMA :"

20 PRINT

30 PRINT

40 PRINT

50 PRINT

60 PRINT "DONDE a= PENDIENTE DE LA RECTA

70 PRINT

80 INPUT "NUMERO DE PUNTOS QUE SE VAN A AJUSTAR=N" N

90 GOTO

100 PRINT

110 X1=0

120 Y1=0

130 X2=0

140 Y2=0

150 FOR J=1 TO N

160 INPUT "VARIABLE INDEPENDIENTE X, VARIABLE DEPENDIENTE Y" X,Y

170 PRINT

180 X1=X1+X

190 Y1=Y1+Y

200 X2=X2+X^2

210 Y2=Y2+X*Y

220 NEXT J

230 X1=X1/N

240 X2=X2-X1^2/N

250 Y2=Y2-X1*Y1/N

260 B=Y2/X2

270 A=Y1-B*X1

280 PRINT "a="A, "b="B

290 PRINT "Y=" A + " * B * X"

300 END


```
10 READ N
20 X1=0
30 Y1=0
40 X2=0
50 Y2=0
60 FOR J=1 TO N
70 READ X,Y
80 X1=X1+X
90 Y1=Y1+Y
100 X2=X2+X+2
110 Y2=Y2+X+Y
120 NEXT J
130 X1=X1/N
140 Y1=Y1/N
150 X2=X2-X1+2/N
160 Y2=Y2-X1*Y1/N
170 B=Y2/X2
180 A=Y1-B*X1
190 PRINT "A=";A;"B=";B
```

```
200 DATA 6
210 DATA 100;.6
220 DATA 200;.95
230 DATA 300;1.42
240 DATA 175;.87
250 DATA 250;1.2
260 DATA 150;.75
270 END
```



```
470 IC=((S-V)*2)/((Q-R)*E)
500 PRINT "A= " ; I0
510 PRINT "B= " ; I0
520 PRINT "B= " ; I0
530 PRINT
540 PRINT "INDICE DE CORRELACION IC= " ; IC
550 END
```



```
470 REM ++++++
500 REM CALCULO DE a
510 REM ++++++
520 R=Q/N
```

```
530 REM CALCULO DEL INDICE O FACTOR DE CORRELACION
540 REM CALCULO DEL TERMINO E N*SUM(Y+2)- ( SUM (Y) )+2
550 REM N*SUM ( Y+2 )
560 S=Y+2
570 T=T+S
580 W=N*T
590 REM CALCULO DE r2 QUE REPRESENTA EL FACTOR DESEADO
600 U=W*(D+2)
610 V=((E-F)+2)/((G-H)*(U))
620 NEXT I
630 PRINT
640 PRINT "b=" IZ
650 PRINT
660 PRINT "a=" IR
670 PRINT
680 PRINT "r2=" IV
690 PRINT
700 END
```

PROGRAMA EN BASE QUE TABULA EL VALOR DEL VOLTAJE DE TERMOPILA
EN (MILIVOLTS) Y LA TEMPERATURA EN (° K)

```

10 DEFINT I-N
20 LPRINT "VALORES DE LAS TEMPERATURAS Y VOLTAJE DE TERMOPILA"
30 FOR I=250 TO 1000 STEP 50
40 EN=(5.506/(433+4)*I+4
50 LPRINT "VALOR DE TEMPERATURA",I,"VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA",EN
60 NEXT I

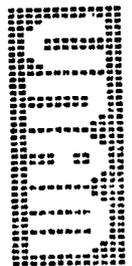
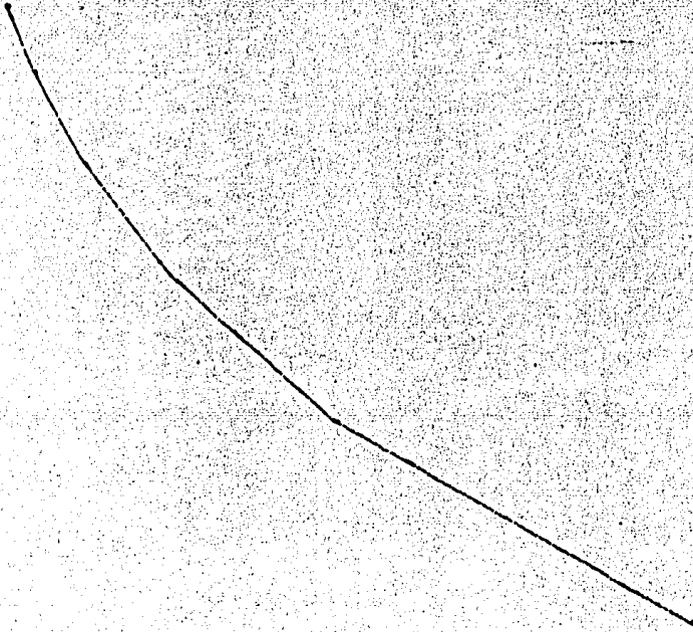
```

VALORES DE LAS TEMPERATURAS Y VOLTAJE DE TERMOPILA

VALOR DE TEMPERATURA	250	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	.611849
VALOR DE TEMPERATURA	300	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	1.26873
VALOR DE TEMPERATURA	350	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	2.35048
VALOR DE TEMPERATURA	400	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	4.00981
VALOR DE TEMPERATURA	450	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	6.42294
VALOR DE TEMPERATURA	500	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	9.78958
VALOR DE TEMPERATURA	550	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	14.3329
VALOR DE TEMPERATURA	600	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	20.2997
VALOR DE TEMPERATURA	650	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	27.96
VALOR DE TEMPERATURA	700	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	37.6077
VALOR DE TEMPERATURA	750	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	49.5598
VALOR DE TEMPERATURA	800	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	64.157
VALOR DE TEMPERATURA	850	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	81.7637
VALOR DE TEMPERATURA	900	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	102.767
VALOR DE TEMPERATURA	950	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	127.579
VALOR DE TEMPERATURA	1000	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPILA	156.633

430

ESTOS DATOS ESTAN GUARDADOS EN DISKET PARA CUANDO SE REQUIERA DE SU INFORMACION
EL NOMBRE BAJO EL CUAL ESTAN REGISTRADOS ESTOS DATOS ES "STEFAN";
IMPRIMIR LOAD "STEFAN" PARA LLAMAR AL PROGRAMA Y L PRINT PARA IMPRIMIRLO





NO FOR THE 10 1000 STEP
 E= (3.586*(T+4)) / (433+T)
 NO PRINT TABE...
 NO LPRINT TABE...
 END
 END

TEMPERATURA (K)

VOLTAGE DE THERMOPILA (mV)

```

10 DEFEND T=V
20 LPRINT "VALORES DE LA TEMPERATURA Y VOLTAJE DE TERMOPAR K"
30 FOR V=0 TO 100 STEP 1
40 T=(27.6533*V)+0.8517
50 LPRINT "VALOR DE LA TEMPERATURA",T,"VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K",V
60 NEXT V

```

```

VALORES DE LA TEMPERATURA Y VOLTAJE DE TERMOPAR K
VALOR DE LA TEMPERATURA      .8517      VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  0
VALOR DE LA TEMPERATURA      28.505     VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  1
VALOR DE LA TEMPERATURA      56.1583    VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  2
VALOR DE LA TEMPERATURA      83.8116    VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  3
VALOR DE LA TEMPERATURA      111.465   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  4
VALOR DE LA TEMPERATURA      139.118   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  5
VALOR DE LA TEMPERATURA      166.772   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  6
VALOR DE LA TEMPERATURA      194.425   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  7
VALOR DE LA TEMPERATURA      222.078   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  8
VALOR DE LA TEMPERATURA      249.731   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K  9
VALOR DE LA TEMPERATURA      277.385   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 10

```

```

VALOR DE LA TEMPERATURA      305.038   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 11
VALOR DE LA TEMPERATURA      332.691   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 12
VALOR DE LA TEMPERATURA      360.345   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 13
VALOR DE LA TEMPERATURA      387.998   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 14
VALOR DE LA TEMPERATURA      415.651   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 15
VALOR DE LA TEMPERATURA      443.305   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 16
VALOR DE LA TEMPERATURA      470.958   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 17
VALOR DE LA TEMPERATURA      498.611   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 18
VALOR DE LA TEMPERATURA      526.264   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 19
VALOR DE LA TEMPERATURA      553.918   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 20
VALOR DE LA TEMPERATURA      581.571   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 21
VALOR DE LA TEMPERATURA      609.224   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 22
VALOR DE LA TEMPERATURA      636.878   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 23
VALOR DE LA TEMPERATURA      664.531   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 24
VALOR DE LA TEMPERATURA      692.184   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 25
VALOR DE LA TEMPERATURA      719.838   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 26
VALOR DE LA TEMPERATURA      747.491   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 27
VALOR DE LA TEMPERATURA      775.144   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 28
VALOR DE LA TEMPERATURA      802.797   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 29
VALOR DE LA TEMPERATURA      830.451   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 30
VALOR DE LA TEMPERATURA      858.104   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 31
VALOR DE LA TEMPERATURA      885.757   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 32
VALOR DE LA TEMPERATURA      913.411   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 33
VALOR DE LA TEMPERATURA      941.064   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 34
VALOR DE LA TEMPERATURA      968.717   VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K 35

```

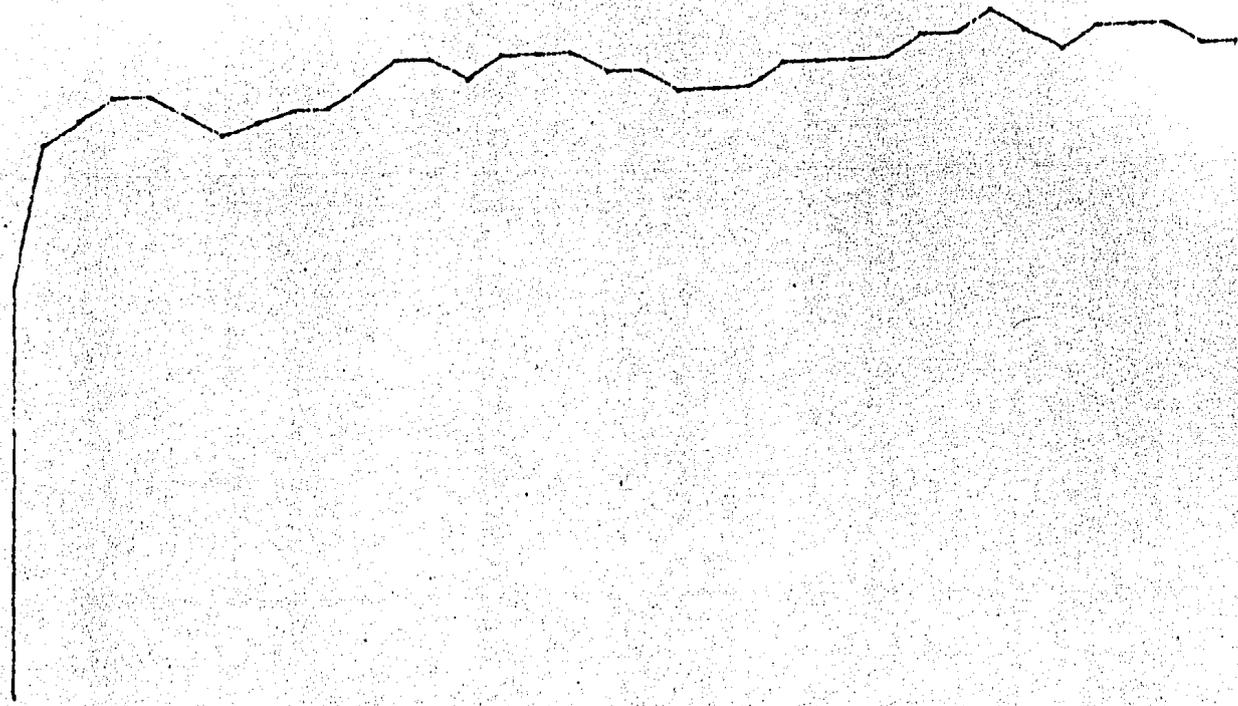
VALOR DE LA TEMPERATURA	996.371	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	36
VALOR DE LA TEMPERATURA	1024.02	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	37
VALOR DE LA TEMPERATURA	1051.68	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	38
VALOR DE LA TEMPERATURA	1079.33	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	39
VALOR DE LA TEMPERATURA	1106.98	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	40
VALOR DE LA TEMPERATURA	1134.64	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	41
VALOR DE LA TEMPERATURA	1162.29	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	42
VALOR DE LA TEMPERATURA	1189.94	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	43
VALOR DE LA TEMPERATURA	1217.6	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	44
VALOR DE LA TEMPERATURA	1245.25	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	45
VALOR DE LA TEMPERATURA	1272.9	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	46
VALOR DE LA TEMPERATURA	1300.56	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	47
VALOR DE LA TEMPERATURA	1328.21	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	48
VALOR DE LA TEMPERATURA	1355.86	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	49
VALOR DE LA TEMPERATURA	1383.52	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	50
VALOR DE LA TEMPERATURA	1411.17	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	51
VALOR DE LA TEMPERATURA	1438.82	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	52
VALOR DE LA TEMPERATURA	1466.48	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	53
VALOR DE LA TEMPERATURA	1494.13	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	54
VALOR DE LA TEMPERATURA	1521.78	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	55
VALOR DE LA TEMPERATURA	1549.44	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	56
VALOR DE LA TEMPERATURA	1577.09	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	57
VALOR DE LA TEMPERATURA	1604.74	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	58
VALOR DE LA TEMPERATURA	1632.4	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	59
VALOR DE LA TEMPERATURA	1660.05	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	60
VALOR DE LA TEMPERATURA	1687.7	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	61
VALOR DE LA TEMPERATURA	1715.36	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	62
VALOR DE LA TEMPERATURA	1743.01	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	63
VALOR DE LA TEMPERATURA	1770.66	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	64
VALOR DE LA TEMPERATURA	1798.32	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	65
VALOR DE LA TEMPERATURA	1825.97	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	66
VALOR DE LA TEMPERATURA	1853.62	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	67
VALOR DE LA TEMPERATURA	1881.28	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	68
VALOR DE LA TEMPERATURA	1908.93	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	69
VALOR DE LA TEMPERATURA	1936.58	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	70

VALOR DE LA TEMPERATURA	1964.24	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	71
VALOR DE LA TEMPERATURA	1991.89	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	72
VALOR DE LA TEMPERATURA	2019.54	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	73
VALOR DE LA TEMPERATURA	2047.2	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	74
VALOR DE LA TEMPERATURA	2074.85	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	75
VALOR DE LA TEMPERATURA	2102.5	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	76
VALOR DE LA TEMPERATURA	2130.16	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	77
VALOR DE LA TEMPERATURA	2157.81	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	78
VALOR DE LA TEMPERATURA	2185.46	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	79
VALOR DE LA TEMPERATURA	2213.12	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	80

VALOR DE LA TEMPERATURA	2240.77	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	81
VALOR DE LA TEMPERATURA	2260.42	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	82
VALOR DE LA TEMPERATURA	2296.08	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	83
VALOR DE LA TEMPERATURA	2323.73	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	84
VALOR DE LA TEMPERATURA	2351.38	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	85
VALOR DE LA TEMPERATURA	2379.04	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	86
VALOR DE LA TEMPERATURA	2406.69	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	87
VALOR DE LA TEMPERATURA	2434.34	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	88
VALOR DE LA TEMPERATURA	2462	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	89
VALOR DE LA TEMPERATURA	2489.65	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	90
VALOR DE LA TEMPERATURA	2517.3	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	91
VALOR DE LA TEMPERATURA	2544.96	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	92
VALOR DE LA TEMPERATURA	2572.61	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	93
VALOR DE LA TEMPERATURA	2600.26	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	94
VALOR DE LA TEMPERATURA	2627.92	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	95
VALOR DE LA TEMPERATURA	2655.57	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	96
VALOR DE LA TEMPERATURA	2683.22	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	97
VALOR DE LA TEMPERATURA	2710.88	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	98
VALOR DE LA TEMPERATURA	2738.53	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	99
VALOR DE LA TEMPERATURA	2766.18	VALOR DE VOLTAJE DE TERMOPAR K	100

FIG. 4.5.10

00000



```

9 REM " FACTORES DE FORMA PARA DOS PLACAS CUADRADAS PARALELAS"
10 REM " DETERMINACION DE FACTORES DE FORMA A PARTIR DE LA DISTANCIA"
11 REM "F=FACTOR DE FORMA"
12 REM "X=DISTANCIA ENTRE PLACAS EN PULGADAS"
20 LPRINT "VALORES DE LA DISTANCIA Y DEL FACTOR DE FORMA"
30 FOR X=1 TO 25.4 STEP 1.4
40 F=0.7571*(X+(-0.5398))
50 LPRINT "VALOR DE LA DISTANCIA",X,"VALOR DEL FACTOR DE FORMA",F
60 NEXT

```

```

VALORES DE LA DISTANCIA Y DEL FACTOR DE FORMA
VALOR DE LA DISTANCIA      1          VALOR DEL FACTOR DE FORMA      .7571
VALOR DE LA DISTANCIA     2.4          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .471971
VALOR DE LA DISTANCIA     3.8          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .368287
VALOR DE LA DISTANCIA     5.2          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .310924
VALOR DE LA DISTANCIA     6.6          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .273378
VALOR DE LA DISTANCIA     8           VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .246414
VALOR DE LA DISTANCIA     9.4          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .22587
VALOR DE LA DISTANCIA    10.8          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .209561
VALOR DE LA DISTANCIA    12.2          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .196217
VALOR DE LA DISTANCIA    13.6          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .185041
VALOR DE LA DISTANCIA    15           VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .175509
VALOR DE LA DISTANCIA    16.4          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .167256
VALOR DE LA DISTANCIA    17.8          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .160021

```

```

VALOR DE LA DISTANCIA     19.2          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .153613
VALOR DE LA DISTANCIA     20.6          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .147886
VALOR DE LA DISTANCIA     22           VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .142729
VALOR DE LA DISTANCIA     23.4          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .138099
VALOR DE LA DISTANCIA     24.8          VALOR DEL FACTOR DE FORMA     .133791

```

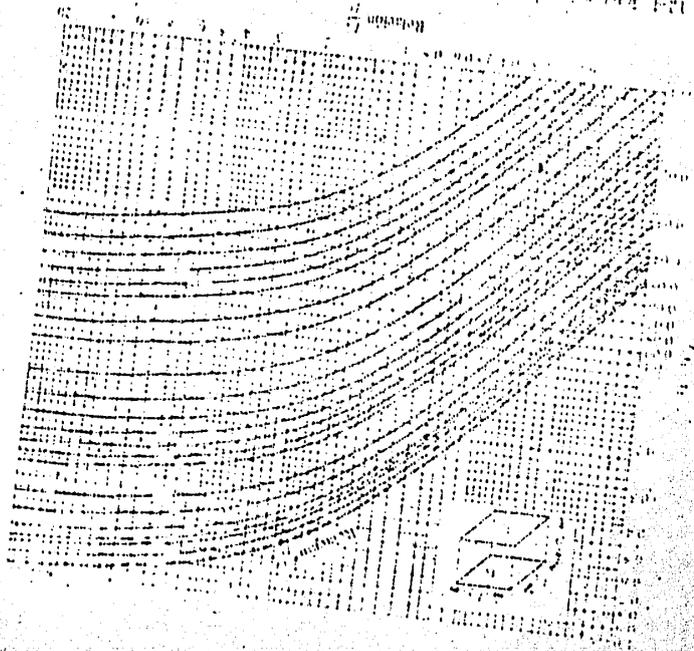


Fig. 1.2. Factor de...
...las curvas son paralelas y...
...destrucción de...
...superficie...

P F = 0.7571 X -05398



B I B L I O G R A F I A

EXPERIMENTACION E INSTRUMENTACION

1.- METODOS EXPERIMENTALES PARA INGENIERIA

J. Holman

4a. edición editorial Mc Graw Hill

2.- ENGINEERING EXPERIMENTATION

G. L. Tuve, J.C. Domholdt

Editorial. Mc. Graw Hill

3.- TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

Thermal Radiation Heat Transfer

Robert Siegel, Vohn R. Howell

Edit. Mc. Graw Hill

4.- TRANSMISION DE CALOR POR RADIACION PARA
DISEÑOS DE NAVES ESPACIALES Y PLANTAS
DE FUERZA SOLAR.

Frank Kreith

Edit. Compañía Editorial Continental

1a. Edición en Español- Septiembre 1965

Trad. Gabriel Aguirre C.

5.- RADIATION HEAT TRANSFER

E. M. Sparrow y R. D. Cess

Edit. Mc. Graw Hill

TRANSFERENCIA DE CALOR

6.- PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Frank Kreith

Edit. Herrero Hnos, México- Noviembre 1970

1a. Edición en Español

- 7.- TRANSFERENCIA DE CALOR
M. Necati Ozisiki
Trad. Guillermo Sarmiento
Edit. Mc Graw Hill
- 8.- TRANSFERENCIA DE CALOR
José A. Manrique, P.h.D.
Edit. Harla
- 9.- HEAT TRANSFER
J. P. Holman
4a. Edición Edit. Mc Graw Hill
- 10.- HEAT TRANSFER
Donald R. Pitts
Leighton E. Sissom
Shaum's Outline Series
Mc. Graw Hill Editoriales

FISICA

- 1.- FISICA MODERNA UNIVERSITARIA
Robert A. White
- 2.- RADIATION AND TEMPERATURE MEASUREMENT
SYSTEM TECHNOVATE.
- 3.- SOLAR ENERGY THERMAL PROCESSES
J.A. Duffie W.A. Beckman
Wileym New York (1974)
- 4.-COMPUTED AIDED HEAT TRANSFER
Adams.

ENCICLOPEDIAS

1.- ENCICLOPEDIA UNIVERSAL ILUSTRADA

ESPASA - CALPE EDITORIAL

Madrid, España.

2.- ENCICLOPEDIA BRITANICA