

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
INSTITUTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICA
ESCUELA DE FISICA**



**CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE UN
TRANSDUCTOR TERMoeLECTRICO**

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

VICTOR LAUREANO CORTEZ LARA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

LICENCIADO EN FISICA

ENERO DE 1992

SAN SALVADOR

EL SALVADOR

CENTROAMERICA

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
INSTITUTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA**



**CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE UN
TRANSDUCTOR TERMOELECTRICO**

TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:

VICTOR LAUREANO CORTEZ LARA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

LICENCIADO EN FISICA

ENERO DE 1992

SAN SALVADOR

EL SALVADOR

CENTROAMERICA



C648c
1992
E13

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
INSTITUTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICA
ESCUELA DE FISICA

TRABAJO DE GRADUACION PREVIO A LA OPCIONAL GRADO DE:

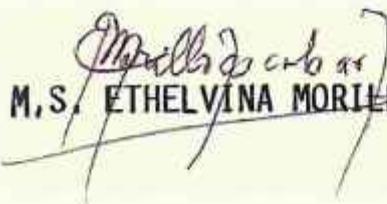
LICENCIADO EN FISICA

TITULO: "CONSTRUCCION Y CARACTERIZACION DE UN
TRANSDUCTOR TERMoeLECTRICO"

PRESENTADO POR:

VICTOR LAUREANO CORTEZ LARA

COORDINADOR Y ASESOR:


M.S. ETHELVINA MORILLO DE ESCOBAR



CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR, ENERO DE 1992.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:	DR: FABIO CASTILLO FIGUEROA
SECRETARIO GENERAL:	LIC. MIGUEL ANGEL AZUCENA
DECANO:	LIC. VICTOR ANTONIO GONZALEZ
SECRETARIO:	LIC. MARINA DE JESUS LOPEZ

DIRECTOR DE LA ESCUELA DE FISICA

LIC. GUILLERMO NAPOLEON MORAN ORELLANA

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 1992

AGRADECIMIENTOS

A mi Asesor M.S. Ethelvina Morillo de Escobar, por sus oportunas observaciones y constante seguimiento de este trabajo.

A Don Carlos Humberto Calderón, por su ayuda en el diseño del equipo para realizar dos evaporaciones seguidas, así como por la construcción de este equipo en el tiempo más breve posible.

A mis compañeros de estudio, a Tomás Emilio Caprín y a las personas que colaboraron en la ejecución de este trabajo.



I N D I C E

UES BIBLIOTECA FAC.
C.C. N.N. Y MM
INVENTARIO: 19200663

	<u>Pag.</u>
INTRODUCCION	i
<u>CAPITULO:</u>	
1.- TRANSDUCTORES TERMOELECTRICOS	1
1.1 Transductores	1
1.2 Termopar	3
1.2.1 Definición de Termopar	3
1.2.2 Tipos de Termopar	4
1.2.3 Relaciones de Aditividad para los Termopares.	7
1.2.3.1 Primera relación de aditividad.	7
1.2.3.2 Segunda relación de aditividad.	8
1.3 Termopila.	10
2.- PROPIEDADES DE TRANSPORTE	13
2.1 Ecuación de Boltzmann	13
2.1.1 Cambios de $f(k)$ por difusión	14
2.1.2 Cambios de $f(k)$ debido a campos externos	15
2.1.3 Cambios de $f(k)$ debido a colisiones.	16



	<u>Pag.</u>
2.2 Ecuaciones Generales de Transporte	19
2.3 Efectos Termoeléctricos	22
2.3.1 Efecto Seebeck	23
2.3.2 Efecto Peltier	24
2.3.3 Efecto Thomson	26
 3.- SISTEMAS DE VACIO	 28
3.1 Condiciones Normales del Aire	28
3.2 Presión absoluta y presión manométrica.	30
3.3 Sistemas de Vacío	31
3.3.1 Sistemas de Vacío Estático	33
3.3.2 Sistemas de Vacío dinámico	34
3.4 Bombas de Vacío Mecánicas	35
3.5 Bombas de Difusión	37
3.6 Medidores de Vacío (Vacuómetros)	39
3.6.1 Vacuómetro Pirani	39
3.6.2 Vacuómetro Penning	40
 4.- PELICULAS DELGADAS POR EVAPORACION	 41
4.1 Películas Delgadas	41
4.2 Preparación de Películas Delgadas en Vacío.	42
4.3 Termopilas Evaporadas.	46

	Pag.
5.- DESCRIPCION DE EQUIPO Y DISEÑO DE TERMOPILA	49
5.1 Equipo a utilizar	49
5.1.1 Sistema de Vacío	49
5.1.2 Procedimiento para obtener vacío	51
5.1.3 Equipo diseñado para realizar dos evaporaciones seguidas.	52
5.1.4 Procedimiento para realizar dos evaporaciones seguidas.	54
5.2 Diseño de Termopila	55
5.2.1 Materiales	55
5.2.2 Dimensiones de la Termopila	56
5.2.3 Sustrato	57
5.2.4 Delimitación de zona caliente y zona fría en la termopila	57
6.- CONSTRUCCION Y CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR TERMOELECTRICO.	59
6.1 Construcción del Transductor	59
6.1.1 Realización de las evaporaciones	59
6.1.2 Conexiones de salida de la termopila.	61
6.1.3 Protección de la termopila	62
6.2 Pintura de Zona Fría y Zona Caliente	62
6.3 Determinación de algunos parámetros del transductor.	64
6.3.1 Constante de calibración y linealidad del transductor.	65

	Pag.
6.3.1.1 Usando el Sol como fuente de energía	65
6.3.1.2 En condiciones de laboratorio.	71
6.3.2 Tiempo de Respuesta.	75
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
7.1 Conclusiones	80
7.2 Recomendaciones	82
LISTA DE TABLAS	84
LISTA DE FIGURAS	85
BIBLIOGRAFIA	87

I N T R O D U C C I O N

La Energía Solar, es una de las muchas alternativas de solución al problema de la crisis energética, pero presenta muchas dificultades para ser utilizada en forma amplia y rentable, debido a la falta de una tecnología apropiada para su estudio y uso; principalmente - para su estudio la tecnología es inaccesible y resulta bastante cara para los países subdesarrollados.

Esto ha motivado a la Sección de Estado Sólido del Departamento de Física a desarrollar proyectos sobre el estudio de la radiación solar específicamente sobre equipode medición de la radiación solar, con el objetivo de tener equipo de bajo costo y construido en el país.

El objetivo del presente trabajo es: diseñar, construir y caracterizar un transductor termoeléctrico evaporado, como elemento sensor de un piranómetro.

Al construir este transductor se busca:

- 1) Obtener un mayor conocimiento de la Física del Estado Sólido.

- 2) Un mayor desarrollo en las técnicas de alto vacío.
- 3) Mayor conocimiento en la preparación de películas delgadas, por evaporación.
- 4) Mayor conocimiento en el uso de las termopilas como medidores de radiación solar.
- 5) Completar un piranómetro cuya estructura mecánica se encontraba finalizada, siendo el transductor termoelectrónico su elemento sensor.

El transductor, objeto de este trabajo, tiene como materiales termoeléctricos: Bismuto y una aleación de Bismuto más 5% de estaño. Para garantizar que el piranómetro terminado produzca señales confiables de la radiación solar, es necesario caracterizarlo, esto es medir los parámetros: Constante de Calibración (k_1), coeficiente de correlación (r) y tiempo de respuesta (τ).

Los resultados obtenidos fueron:

$$k_1 = 6.73 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt.}^2. \quad r = 0.994$$

$$\tau = 3.24 \text{ seg.}$$

El desarrollo del trabajo se efectúa de la siguiente manera:

Capítulo 1. Se definen los transductores, entre los cuales se tienen los de termopares.

Capítulo 2. Se presenta un desarrollo matemático de las ecuaciones de la corriente eléctrica y de calor, basándose en ellas se desarrollan expresiones para los efectos termoeléctricos.

Capítulo 3. Se describen los sistemas de vacío, así como los accesorios que los constituyen.

Capítulo 4. Se describe el procedimiento para preparar películas delgadas por evaporación, así como la preparación de termopilas evaporadas.

Capítulo 5. Se describe el equipo de vacío utilizado y el diseño del transductor termoeléctrico (termopila).

Capítulo 6. En este capítulo se presenta la construcción de la termopila y su caracterización.

Capítulo 7. Se presentan las conclusiones y recomendaciones.

C A P I T U L O I

TRANSDUCTORES TERMOELECTRICOS.

En este capítulo se definen los transductores y se presentan algunos de los tipos más usados, entre los que se encuentran los termopares, se presenta la definición de termopar así como: los efectos en que se basan y las relaciones de aditividad que rigen a los circuitos termoelectrónicos.

I.1 Transductores.

Se llama transductor a un dispositivo que transforma los valores de las magnitudes físicas en señales eléctricas equivalentes. Entre este tipo de dispositivos se tienen: transductores de resistencia variable, transformador diferencial, transductores capacitivos, transductores de ionización, termopilas, etc.

Es de notar que en un transductor, la magnitud física a medir guarda una relación con las señales eléctricas de salida, esta relación preferiblemente debe ser lineal.

La Tabla I, muestra los tipos de transductores más comunes usados, así como sus principales características.

TABLA No. I.- TIPOS DE TRANSDUCTORES MAS COMUNES

TIPOS DE TRANSDUCTOR	TIPO DE ENTRADA	TIPO DE SALIDA	APLICACION
Resistencia Variable: también llamados potenciómetros.	Desplazamiento lineal o angular.	Voltaje o la Corriente.	Usado para medición de desplazamiento.
Transformador Diferencial	Desplazamiento lineal	El voltaje es proporcional al desplazamiento de entrada.	Usado para medir desplazamiento.
Transductor Capacitivo	Desplazamiento o cambio en la constante dieléctrica; también cambio en el área de las placas	Capacitancia	Medición de desplazamiento, área, nivel de líquido, presión, medición del nivel de sonido, etc.
Efecto Fotoeléctrico	Luz	Corriente	Muy útil para conteos
Termopar	Diferencia de Temperatura	Fuerza Electro-motriz (F.E.M.)	Medición de temperatura, intensidad luminosa, etc.

Tomado de J.P. Hollman. Métodos Experimentales para Ingenieros
Mc Graw Hill 1986.

I.2 Termopar.

I.2.1 DEFINICION DE TERMOPAR

El termopar o termocupla consiste en un circuito formado por dos metales o semimetales diferentes, estando las uniones (unión de medida y unión de referencia) a diferentes temperaturas.

El termopar o termocupla se basa en el efecto descubierto de la circulación de una corriente y establecimiento de una diferencia de potencial en un circuito formado por dos metales o semimetales diferentes, este efecto se llama efecto Seebeck. El establecimiento de esta diferencia de potencial se debe a dos efectos termoeléctricos - combinados. El efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos y el efecto Thomson que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperatura.

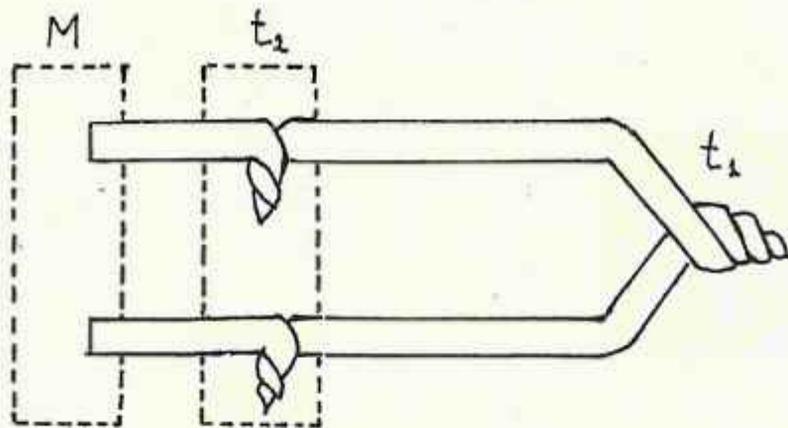


Fig. I. Esquema de un Termopar

- t1: Unión de medida
- t2: Unión de Referencia
- M: Medidor

La selección de los alambres para termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, oxidación, reducción y cristalización, que desarrollen una Fem relativamente alta, que sean estables, de bajo costo y que la relación entre la Fem y temperatura sea lineal en el rango de temperaturas en el que se desea usar el termopar.

I.2.2 Tipos de Termopares.

Los tipos de termopares más usados son identificados por letras, originalmente asignadas por la sociedad de ins-

trumentos de América (ISA).

La Tabla II, muestra los tipos de termopares más comunmente usados para medir temperaturas.

El uso principal que se da a los termopares es de termómetros, pero pueden utilizarse para cualquier fenómeno - que provoque una diferencia de temperatura, tal es el caso de la radiación electromagnética.

El tipo de termopar que se utilice en un trabajo de--terminado dependerá del rango de temperaturas que se quiere medir, así como de las condiciones en que se realizarán las medidas; ya que los materiales del termopar escogido - deben resistir estas condiciones (de humedad, ácidos, sales etc.).

TABLA No. 2.- TIPOS DE TERMOPARES MAS USADOS

T I P O	INTERVALO DE MEDIDA (°C)	EXACTITUD APROXIMADA (°C)
Cobre-Constant Tipo "T"	- 180° a 350°	- 0.25
Hierro_ constant Tipo "J"	- 180°a 650°	- 0.25
Cromel - Alumel; Tipo "K"	- 180°a 1200°	- 0.25
Platino - Platino con 10% rodio; Tipo "R"	- 15°a 1650°	- 0.25

Tomado de J.P. Hollman. Métodos Experimentales para Ingenieros. Mc.Graw-Hill, 1986.

I.2.3 Relaciones de Aditividad para los Termopares.

La Fem de un termopar compuesto de dos metales A y B con uniones a temperaturas t_1 y t_2 siendo t_2 la temperatura más alta, se puede escribir: $E_{AB}(t_2, t_1)$. El orden de los subíndices, indica que la Fem es tal que la dirección positiva del flujo de corriente de A a B es la unión caliente (t_2). La Fem en un termopar satisface dos importantes relaciones de aditividad.

I.2.3.1 Primera Relación de Aditividad.

$$E_{AB}(t_2, t_1) = E_{AB}(t_2, t_3) + E_{AB}(t_3, t_1) \quad (1.1)$$

Siendo t_3 una temperatura cualquiera, intermedia entre t_2 y t_1 .

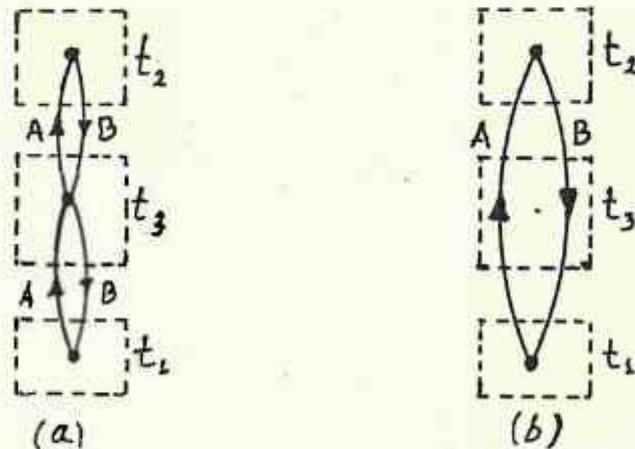


Fig. 2. Esquema representativo de la Primera Ley de Aditividad en un Termopar.

Evidentemente la energía recibida por unidad de electricidad, cuando se tiene el circuito de la figura 2 (a) es la misma que la recibida cuando la corriente atraviesa el circuito de la Figura 2 (b).

Una consecuencia de esta Ley Aditiva es que la Fem de un Termopar cuando la temperatura baja es T y la temperatura alta es $T + 1$, es igual a la Fem cuando la temperatura baja es $T - 1$ y la alta es T . A esta Fem de un termopar por unidad de temperatura, se llama poder termoeléctrico y se escribe como $e_{AB}(t)$.

I.2.3.2 Segunda Relación de Aditividad.

$$E_{AB}(t_2, t_1) + E_{BC}(t_2, t_1) = E_{AC}(t_2, t_1) \quad (I.2)$$

Es de notar que el metal B, aparece en los dos termopares correspondientes. E_{AB} y E_{BC} son idénticos excepto por los materiales que forman los termopares. Así la contribución que hace a la Fem total el metal B, es distribuida en una forma que depende solamente de las temperaturas en las uniones; la acción del metal B, se cancela cuando los dos pares se unen. Esto es una analogía de la Ley de Volta para tensiones.

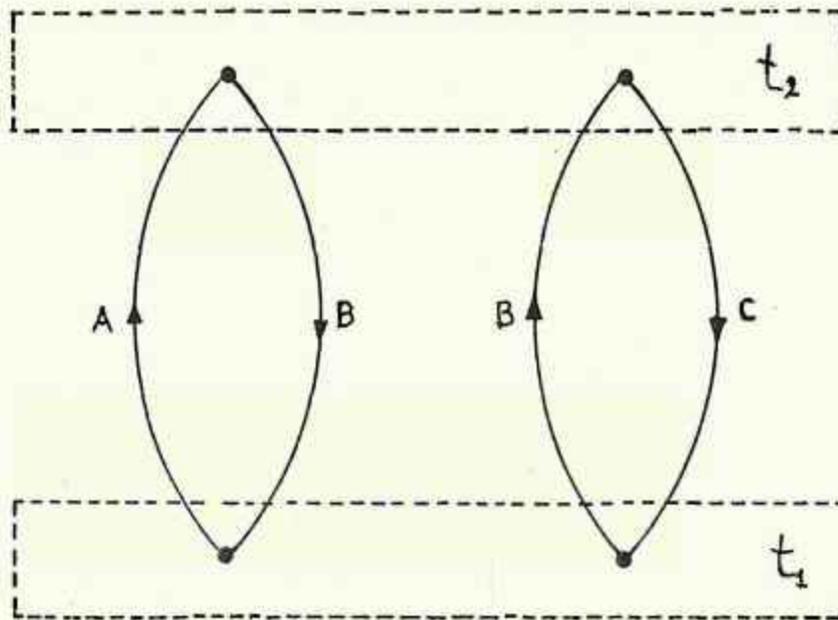


Fig. 3. Esquema de la Segunda Ley de Aditividad para termopares.

Consecuencias obvias de esta Ley son:

- a) No existe Fem en un par de un mismo metal, no importando la distribución de temperatura.
- b) La Fem de un termopar no se altera si se inserta en él, cualquier tercer metal, siempre que las dos uniones del tercer metal estén a la misma temperatura. Tomando en cuenta esta precaución se puede insertar en el circuito termoeléctrico, medidores de voltaje o corriente.

I.3 Termopila.

Se define como termopila: "La asociación en serie de un número (N) de termopares", como se muestra en la -- Fig. 4.

En el arreglo de termopila la Fem total obtenida - es:

$$E_{\text{total}} = N E_{AB} \quad (I.3)$$

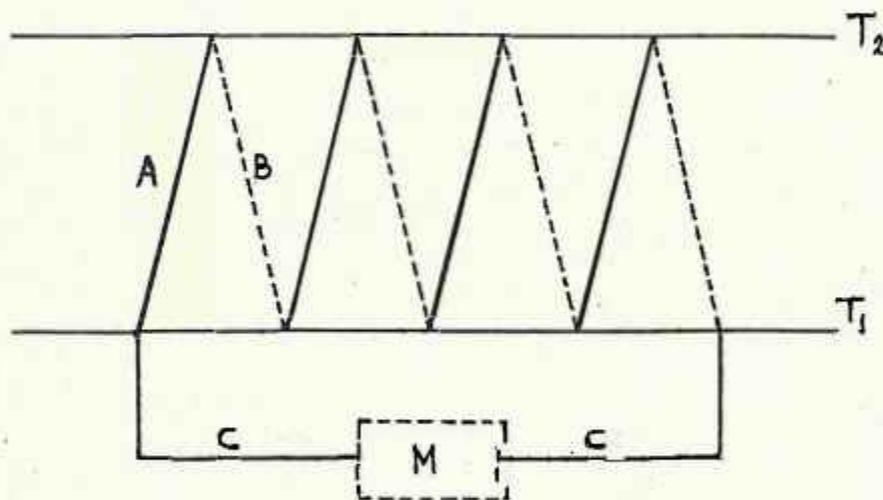


Fig. 4. Esquema de una termopila

M: Medidor, C: Alambre de Cobre

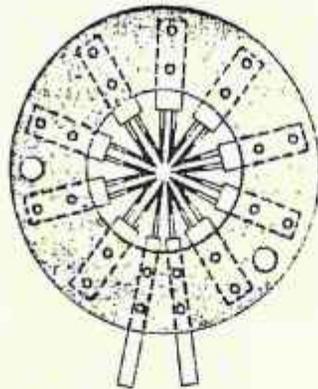
T1: Temperatura de referencia

T2: Temperatura a medir

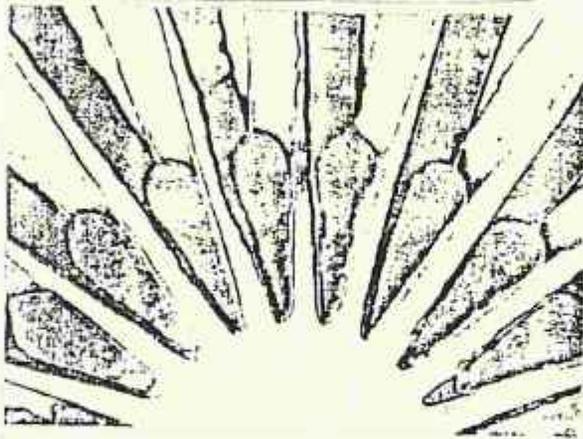
A y B materiales que forman los termopares.

El objeto del arreglo de termopila es el de contar con un circuito más sensible y para el caso de la figura 4 que tiene cuatro juntas ($N=4$) o termopares, la Fem total sería cuatro veces la Fem $E_{AB}(t_2, t_1)$.

Las termopilas se utilizan para detectar la radiación electromagnética en general y en un amplio rango de longitudes de onda como la radiación solar, etc. La figura 5a presenta el detalle de un sensor de termopila para un radiómetro utilizando en el estudio de la radiación térmica y la figura 5b presenta un sensor de termopila para un piranómetro (instrumento utilizado para estudiar la radiación solar).



(a)



(b)

Fig. 5.- Sensores de Termopila para Radiómetros

- a) Termopila para un Radiómetro
Tomado de J.P. Hollman. Métodos Experimentales
para Ingenieros. Mc Graw Hill. 1986.
- b) Sección de Termopila Evaporada para un Piranómetro
Tomado de INSOLAR & METRIX, S.A. México.

CAPITULO 2

PROPIEDADES DE TRANSPORTE.

En este capítulo se hace un desarrollo matemático de las ecuaciones generales de corriente eléctrica y corriente de calor, con base en ésta se desarrollan expresiones para los efectos termoeléctricos: Seebeck, Peltier y - - - Thomson.

2.1. Ecuación de Boltzmann

Los portadores de carga en un metal o semi-conductor pueden ser afectados por: vibraciones en la red, choques con impurezas, campos externos o por gradientes de temperaturas.

Es necesario hacer un balance de todos estos efectos al considerar las propiedades de transporte (conductividad). Cuando se aplican campos constantes.

Para tratar este problema, el método consiste en establecer la ecuación de Boltzmann o ecuación de transporte. Se estudia la concentración de portadores de carga en el estado K , en las vecindades del punto \vec{r} , $f_{\vec{r}}(\vec{r})$. Estrictamente hablando, esta cantidad se puede definir en términos de pro

medios sobre matrices de densidad, "Distribuciones de grado fino", etc.

Considerando como $f_k^{\vec{r}}(\vec{r})$ puede cambiar con el tiempo existen tres tipos de efectos.

2.1.1 Cambios de $f_k(\vec{r})$ por difusión.

Los portadores entran y salen de la región \vec{r} . Si \vec{v}_k es la velocidad del portador en el estado \vec{k} , entonces en un tiempo t los portadores se desplazan una distancia $t\vec{v}_k$. Así usando el teorema de Liouville, sobre la invariancia del volumen ocupado en el espacio fásico el número de portadores en \vec{r} en el instante t es igual al número de portadores que había en las vecindades de $\vec{r} - t\vec{v}_k$ en el instante 0, así:

$$f_k^{\vec{r}}(\vec{r}) = f_k^{\vec{r}-t\vec{v}_k}(0) \quad (2.1)$$

Esto significa que la derivada temporal de la distribución debido a la difusión es:

$$\left. \frac{\partial f_k}{\partial t} \right]_{\text{difusión}} = -\vec{v}_k \cdot \frac{\partial f_k}{\partial \vec{r}} = -\vec{v}_k \cdot \nabla f_k \quad (2.2)$$

2.1.2. Cambios de $f_{(k)}$ debido a campos externos.

Los campos externos cambiarán el vector k de cada portador de carga en razón de:

$$\hbar \dot{\vec{k}} = \vec{F} \quad (2.3)$$

$$\hbar \dot{\vec{k}} = e \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v}_k \times \vec{H} \right) \quad (2.4)$$

Se puede considerar esta derivada como una velocidad del transportador de carga en el espacio k , así:

$$f_{\vec{k}}(\vec{r}, t) = f_{\vec{k} - \dot{\vec{k}} t}(\vec{r}, 0) \quad (2.5)$$

Por tanto, la distribución debido a los campos, su fre un cambio dado por:

$$\left. \frac{\partial f_{\vec{k}}}{\partial t} \right]_{\text{campos}} = - \dot{\vec{k}} \cdot \frac{\partial f_{\vec{k}}}{\partial \vec{k}} \quad (2.6)$$

$$= - \frac{e}{\hbar} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v}_k \times \vec{H} \right) \cdot \frac{\partial f_{\vec{k}}}{\partial \vec{k}} \quad (2.7)$$

$\partial/\partial \vec{k}$ indica el gradiente en el espacio \vec{k} , el operador ∇_k .

2.1.3. Cambios en $f_{\vec{k}}$ debido a colisiones.

El efecto de las colisiones es complicado, limitándo lo a colisiones elásticas, ésto da lugar a un cambio en:

$$\left. \frac{\partial f_{\vec{k}}}{\partial t} \right]_{\text{colisiones}} = \int \{f_{\vec{k}'}(1-f_{\vec{k}}) - f_{\vec{k}}(1-f_{\vec{k}'})\} Q_{(\vec{k},\vec{k}')} d\vec{k}' \quad (2.8)$$

Las colisiones que dan lugar a transiciones del estado \vec{k} a \vec{k}' disminuyen $f_{\vec{k}}$. La probabilidad de este proceso depende de $f_{\vec{k}}$, el número de portadores en el estado \vec{k} y de $(1-f_{\vec{k}'})$ el número de vacancias disponibles en el estado final \vec{k}' . Existe también el proceso inverso, pasar del estado \vec{k}' al estado \vec{k} , que aumentan $f_{\vec{k}}$, con un factor de peso igual a $f_{\vec{k}'}(1-f_{\vec{k}})$.

Se debe sumar sobre todos los estados \vec{k}' posibles; - sin embargo para \vec{k} y \vec{k}' dados, existe una probabilidad básica de transición $Q(\vec{k},\vec{k}')$, que determinaría la probabilidad del proceso si \vec{k} estuviese efectivamente desocupado. Según - el principio de reversibilidad microscópica, la misma función de la probabilidad del proceso inverso (de \vec{k}' a \vec{k}) de modo -- que sale como factor común del integrando.

La ecuación de Boltzmann, establece que en cualquier punto y para cualquier valor de k , la derivada de $f_{k(\vec{r})}$ es cero:

$$\left. \frac{\partial f_k}{\partial t} \right]_{\text{colis.}} + \left. \frac{\partial f_k}{\partial t} \right]_{\text{campos}} + \left. \frac{\partial f_k}{\partial t} \right]_{\text{difusión}} = 0 \quad (2.9)$$

Es de notar que se trata de un estado estacionario y no del estado de equilibrio, el cual se indica por f_k^0 y corresponde al caso en que no hay campos externos ni gradientes de temperatura.

Suponiendo que la distribución de equilibrio no difiere mucho de la estacionaria, se tiene:

$$g_k = f_k - f_k^0 \quad (2.10)$$

donde:

$$f_k^0 = \frac{1}{\exp\{(\epsilon_k - \delta) / kT\} + 1} = f_{(\epsilon_k)}^0 \quad (2.11)$$

Si se tiene que en todo punto está definida una temperatura $T(\vec{r})$, entonces f_k^0 dependerá de ella, por tanto:

$$g_k(\vec{r}) = f_k(\vec{r}) - f_k^0\{T(\vec{r})\} \quad (2.12)$$

Usando las ecuaciones (2.2), (2.7), (2.9) y (2.10),
la ecuación de Boltzmann resulta:

$$-\vec{v}_k \cdot \frac{\partial f_k}{\partial \vec{r}} - \frac{e}{\hbar} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{H} \right) \cdot \frac{\partial f_k}{\partial \vec{k}} = - \frac{\partial f_k}{\partial t} \Big]_{\text{colisiones}} \quad (2.13)$$

Por tanto:

$$-\vec{v}_k \cdot \frac{\partial f_k^0}{\partial T} \nabla T - \frac{e}{\hbar} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v}_k \times \vec{H} \right) \cdot \frac{\partial f_k}{\partial \vec{k}} = - \frac{\partial f_k}{\partial t} \Big]_{\text{colisiones}} + \vec{v}_k \cdot \frac{\partial g_k}{\partial \vec{r}} + \frac{e}{\hbar} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v}_k \times \vec{H} \right) \cdot \frac{\partial g_k}{\partial \vec{k}} \quad (2.14)$$

Usando la ecuación (2.11) y el principio cinemático se escribe la ecuación en la forma:

$$\left(- \frac{\partial f}{\partial \epsilon} \right) \vec{v}_0 \left\{ - \frac{\epsilon(k)^{-\delta}}{T} \nabla T + e \left(\vec{E} - \frac{1}{c} \nabla \delta \right) \right\} = - \frac{\partial f_k}{\partial t} \Big]_{\text{colisiones}} + \vec{v}_k \cdot \frac{\partial g_k}{\partial \vec{r}} + \frac{e}{\hbar c} \left(\vec{v}_k \times \vec{H} \right) \cdot \frac{\partial g_k}{\partial \vec{k}} \quad (2.15)$$

Esta es la ecuación de Boltzmann linealizada. Se desprecia $\vec{E} \cdot \frac{\partial g_k}{\partial \vec{k}}$, que sería del orden de \vec{E}^2 y correspondería a des-

viaciones, de la Ley de Ohm, también se elimina el término $(\vec{V}_k \cdot \vec{V}_k \times \vec{H})$ que es nulo, el campo magnético no aparece en el primer miembro.

2.2. Ecuaciones Generales de Transporte.

Suponiendo ahora que además de un campo eléctrico se tiene un gradiente de temperatura, en la muestra, y se ignoran los efectos de tamaño y forma de la muestra, la ecuación de Boltzmann (2.15), se obtiene:

$$\left(- \frac{\partial f_k^0}{\partial \vec{k}} \right) \vec{V}_k \left[\frac{\epsilon_k - \delta}{T} (-\nabla T) + e \left(\vec{E} - \frac{1}{e} \nabla \delta \right) \right] = - \frac{\partial f_k}{\partial t} \Big|_{\text{colisiones}} \quad (2.16)$$

Se si cumplen las condiciones para la existencia del tiempo de relajación (que es inversamente proporcional a una integral de la probabilidad de colisiones sobre todos los procesos), la forma de la solución es:

$$f_k - f_k^0 = \left(- \frac{\partial f_k^0}{\partial \epsilon} \right) \tau v_k \left[e \left(\vec{E} - \frac{1}{e} \nabla \right) + \frac{\epsilon(k) - \delta}{T} (-\nabla T) \right] \quad (2.17)$$

Esta solución se puede utilizar en una integral de corriente de la forma:

$$\vec{J} = \int e \vec{V}_k f_k d \vec{k} \quad (2.18)$$

Obteniéndose:

$$\vec{J} = \int e \vec{v}_k g_k d\vec{k} \quad (2.19)$$

Ya que:

$$\int e v_k f_k^0 d\vec{k} \equiv 0 \quad (2.20)$$

Entonces:

$$\vec{J} = \frac{1}{4\pi^3} \iiint e^2 \tau \vec{v}_k \cdot (\vec{v}_k \cdot \vec{E}) \left(-\frac{\partial f^0}{\partial \epsilon}\right) \frac{ds}{\hbar v_k} d\epsilon \quad (2.21)$$

Para obtener la ecuación (2.21) se utiliza la ecuación (2.17), también:

$$\vec{v}_k = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial \epsilon(k)}{\partial \vec{k}} \quad (2.22)$$

$$N(\epsilon) = \frac{1}{4\pi N \hbar} \frac{d s}{|\vec{v}_k|} \quad (2.23)$$

Transformando la integral sobre un volumen en \vec{k} en integrales sobre superficies de energía constante.

Utilizando la solución dada en la ecuación (2.17) para evaluar la integral (2.21), para evaluar la corriente

eléctrica, se tiene:

$$\vec{J} = \frac{1}{4\pi^3} \frac{e^2 \tau}{\hbar} \iint \vec{v}_k \vec{v}_k^* \left(- \frac{\partial f^0}{\partial \epsilon} \right) \frac{ds}{v_k} d\epsilon \left(\vec{E} - \frac{1}{e} \nabla \delta \right) + \frac{1}{4\pi^3} \frac{e^2 \tau}{\hbar} \iint \vec{v}_k \vec{v}_k^* \left(\frac{\epsilon - \delta}{T} \right) \left(- \frac{\partial f^0}{\partial \epsilon} \right) \frac{ds}{v_k} d\epsilon (-\nabla T) \quad (2.24)$$

Esta ecuación muestra que el gradiente térmico ∇T , por sí sólo, da lugar a una corriente eléctrica, evidenciando un efecto termoeléctrico. Pero el efecto más importante de un gradiente de temperatura, consiste en originar una corriente de calor.

El calor es "energía interna" menos "energía libre". La energía libre del electrón es δ , su potencial químico. Entonces el calor acarreado por el electrón en el estado \vec{k} es $\epsilon(k) - \delta$.

Para calcular el flujo total de calor (por unidad de volumen) hay que evaluar.

$$\vec{U} = 2 \int f_k \{ \epsilon_k - \delta \} \vec{v}_k d\vec{k} \quad (2.25)$$

Antes de escribir \vec{U} en forma más explícita es de notar que hay un término en $\nabla \delta$ contenido en el (2.24), un cambio que procede del cambio en el potencial químico debi

do al cambio de temperatura en el gas electrónico. En una medida ordinaria de las propiedades eléctricas se deben incluir todos estos gradientes en las fuerzas electromotrices medidas en el circuito.

Se puede ignorar este término, suponiendo que está contenido en \vec{E} , (campo eléctrico observado).

Usando las ecuaciones (2.17), (2.24) y (2.25), se pueden construir las siguientes ecuaciones generales de transporte.

$$\vec{J} = e^2 \vec{k} \cdot \vec{E} + \frac{e}{T} \vec{k}_1 \cdot (-\nabla T) \quad (2.26a)$$

$$\vec{U} = e \vec{k}_1 \cdot \vec{E} + \frac{1}{T} \vec{k}_2 \cdot (-\nabla T) \quad (2.26b)$$

Dónde los coeficientes están definidos por:

$$\vec{k}_n = \frac{T}{4\pi^3 \hbar} \iint \vec{V} \cdot \vec{V} (\epsilon - \delta)^n \left(-\frac{\partial f^0}{\partial \epsilon} \right) \frac{ds}{v} d\epsilon \quad (2.27)$$

2.3 Efectos Termoeléctricos.

Las relaciones generales (2.26a y 2.26b) muestran que efectos de interacción entre la corriente eléctrica y térmica.

Así, si se establece un gradiente de temperatura en una muestra en circuito abierto. Haciendo $J = 0$ se obtiene (tomando coeficientes escalares).

$$E = -\frac{1}{eT}(k_0^{-1}) \nabla T \quad (2.28)$$

Haciendo:

$$Q = -\frac{1}{eT}(k_0^{-1} k_1) \quad (2.29)$$

Se tiene:

$$E = Q \nabla T \quad (2.30)$$

2.3.1 Efecto Seebeck.

Para mostrar este efecto y medirlo, se establece un circuito cerrado de dos metales A y B con las uniones a diferentes temperaturas T_1 y T_2 . Se conecta un voltímetro a una temperatura T_0 , en un punto intermedio, un esquema de este circuito se muestra en la Fig. 6

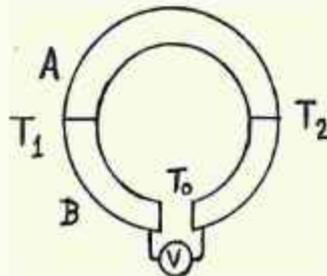


Fig.6.- Circuito para mostrar el efecto Seebeck.
A y B: Materiales termoeléctricos
 T_1 y T_2 : Temperatura de las uniones.

La Fem que atraviesa el circuito es definida por la integral de E a lo largo del alambre.

$$\varnothing = \int_0^1 E_B dx + \int_1^2 E_A dx + \int_2^0 E_B dx \quad (2.31)$$

$$\varnothing = \int_2^1 Q_B \frac{\partial T}{\partial x} dx + \int_1^2 Q_A \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (2.32)$$

$$\varnothing = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dt \quad (2.33)$$

El voltaje generado en el circuito es una función de la diferencia de temperatura de las dos uniones, y de la diferencia en el poder termoeléctrico absoluto Q, de los dos metales, esto es lo que se conoce como efecto Seebeck.

2.3.2 Efecto Peltier.

Existe otro fenómeno asociado con la cantidad kl - que aparece en las relaciones (2.26a y 2.26b) si se supone que se mantiene $\nabla T = 0$, como se muestra en la Fig. 7, para las ecuaciones (2.26a y 2.26b), suponiendo coeficientes es calares se obtiene:

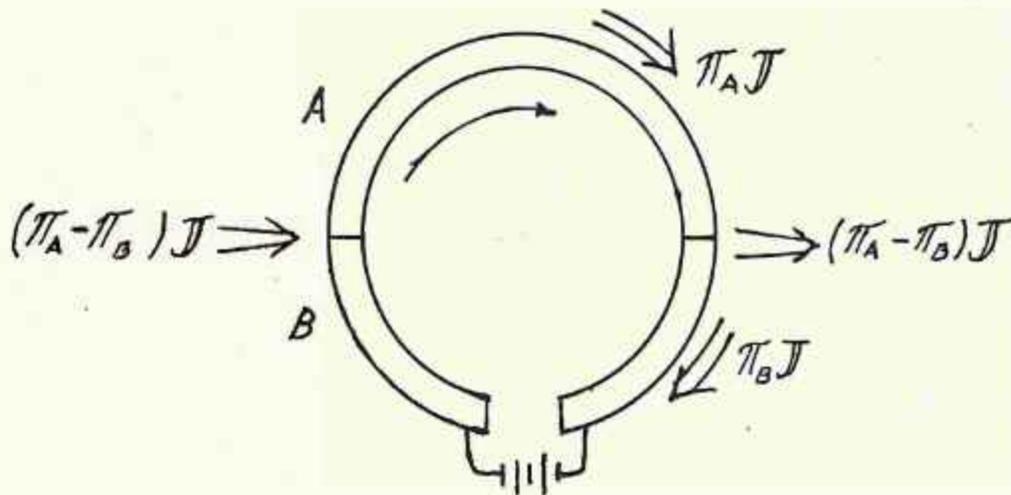


Fig. 7.- Circuito para mostrar el efecto Peltier

$$\vec{U} = e \vec{k}_1 \vec{E} \quad (2.34)$$

$$\vec{J} = e2 \vec{k}_0 \vec{E} \quad (2.35)$$

Por tanto:

$$\vec{U} = \frac{1}{e} k_0^{-1} k_1 \vec{J} \quad (2.36)$$

$$\vec{U} = \pi \vec{J} \quad (2.37)$$

Si ahora se establece una corriente (mediante una batería) \vec{J} en el circuito. En la rama A se mantendrá una corriente térmica, $\pi_A \vec{J}$, en la rama B habrá una corriente

eléctrica, distinta, $\pi_B \vec{J}$ el balance calorífico debe ser tal, que se reestablezca en las uniones; el flujo calorífico $(\pi_A - \pi_B) \vec{J}$ será emitido en unión y absorbido en la otra. Así, una unión será calentada y la otra será enfriada. Esto es el efecto Peltier.

El coeficiente Peltier se relaciona con el poder termoeléctrico por:

$$\pi = Q T \quad (2.38)$$

Esta ecuación es una de las relaciones de Kelvin, de la termoelectricidad y es un caso especial de las relaciones de Onsager para la termodinámica de procesos irreversibles.

Las ecuaciones (2.26a y 2.26b) expresándolas en términos de \vec{J} y \vec{U}/T , poseen una matriz simétrica de coeficientes, lo que explica por que k_1 aparece dos veces como coeficiente.

2.3.3 Efecto Thomson.

Otro efecto termoeléctrico es el efecto Thomson, el cual se observa en un circuito en el que hay simultáneamente una corriente eléctrica y una corriente de calor (térmica).



El coeficiente que mide este efecto está contenido en las relaciones generales (2.26a y 2.26b). Se observa que cuando los flujos de calor y eléctrico son en la misma dirección, el calor emitido es mayor que el calor Joule y si los flujos son en sentido contrario, hay un defecto en el calor Joule.

C A P I T U L O 3

SISTEMAS DE VACIO.

En este capítulo se describe un sistema de vacío, así como los accesorios necesarios para construirlos; tales como: bombas de vacío, mecánicas y de difusión, medidores de presión, válvulas, etc.

3.1 Componentes del Aire Atmosférico en Condiciones Normales.

El aire en condiciones normales (presión de 760 torr y 0°C). está constituido por:

<u>ELEMENTO</u>	<u>SIMBOLO</u>	<u>PORCENTAJE</u>
Nitrógeno	N ₂	78.09
Oxígeno	O ₂	20.95
Argón	A ₂	0.93
Dióxido de carbono	CO ₂	0.03
Neón	Ne	1.8 x 10 ⁻³
Helio	He	5.24 x 10 ⁻⁴
Kriptón	Kr	1.0 x 10 ⁻⁴
Hidrógeno	H ₂	5.0 x 10 ⁻⁵
Xenón	Xe	8. x 10 ⁻⁶

1: Rafaél E. H. Rosales. Diseño y Construcción de un Sistema de alto vacío. Pag. 1, 1976.

El comportamiento de un gas se puede describir satisfactoriamente, asumiendo que cumple con la Ley de los gases ideales:

$$PV = N R T \quad (3.1)$$

Dónde:

P = Presión

V = Volumen

N = Número de Moles

R = Constante de los gases ideales

T = Temperatura absoluta

Para una masa de aire la presión es la suma de todas las presiones parciales de los gases que lo forman:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (3.2)$$

Donde:

P_T = Presión Total

P_n = Presiones parciales

El valor de la constante R es independiente del tipo de gas, pero su valor depende de las unidades en que se expresen las demás variables. Para los trabajos en vacío, la presión se trabaja en torr. y el volumen en centímetros cúbicos siendo $R = 62320 \text{ torr cm}^3/\text{mol } ^\circ\text{K}$.

Las ecuaciones (3.1) y (3.2) se basan en los supuestos:

- a) Las moléculas son infinitamente pequeñas, su volumen es despreciable.
- b) No existen fuerzas intermoleculares.

Las suposiciones anteriores, describen el comportamiento de los gases reales, así como el de vapores, con bastante precisión.

3.2 Presión Absoluta y Presión Manométrica.

La presión absoluta se refiere al valor absoluto de la fuerza por unidad de área, ejercida en la pared que contiene un fluido.

La presión manométrica representa la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica. Cuando se habla de vacío se hace referencia a la cantidad en que la presión absoluta es menor que la presión atmosférica.

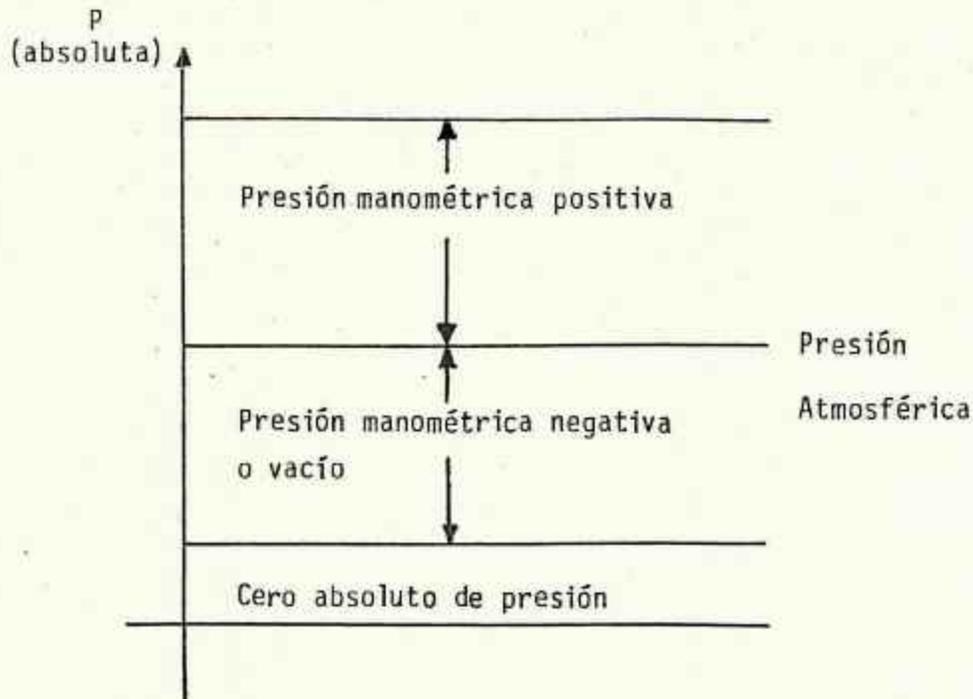


Fig. 8.- Relación entre los términos de la presión

Así la presión absoluta no puede ser negativa y el vacío no puede ser mayor que la presión atmosférica local.

Para hacer vacío dentro de un recipiente es necesario llevar la presión a valores menores que los que existen en la presión atmosférica local. Esto básicamente es disminuir la densidad del gas a niveles menores que en el ambiente.

3.3 Sistemas de Vacío.

Para realizar vacío en un recipiente debe reducirse la densidad del gas existente en el recipiente a niveles -

menores que en el ambiente, esto se logra conectando a una cámara sellada, bombas de vacío.

Las bombas de vacío se clasifican, de acuerdo al nivel de presión que alcanza, en: bombas de vacío grueso que alcanzan un vacío máximo de 10^{-2} a 10^{-3} torr; bombas de vacío alto que alcanzan un vacío de 10^{-6} torr; - aunque en algunos casos tienen valores máximos de 10^{-9} torr.

Para realizar vacío también se necesitan accesorios tales como: válvulas de paso para conectar o desconectar las bombas a la cámara; trampas de agua de onitrógeno líquido para condensar vapores de aceite o metales evaporados así como algunos de los componentes del aire, con el objeto de evacuarlos de la cámara. También se tienen medidores de vacío que se colocan en lugares necesarios. Dependiendo del trabajo a realizar (evaporaciones, emisión termoiónica, efecto fotoeléctrico, etc.), así se rán los dispositivos que se utilizarán para formar el sistema de vacío, de hecho existen sistemas de vacío diseñados específicamente para ciertos trabajos, tomando en cuenta los niveles de vacío que se debe obtener.

La figura 9 muestra un esquema general de un sistema de vacío.

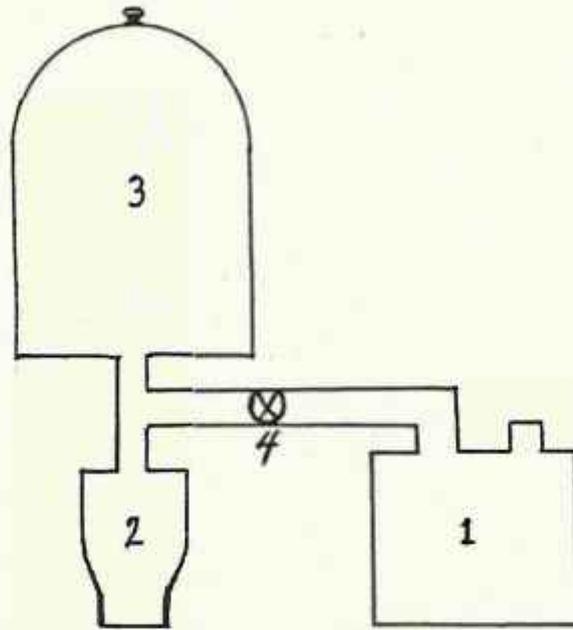


Fig. 9.- Esquema de un Sistema de Vacío

- 1) Bomba Mecánica
- 2) Bomba de Difusión
- 3) Cámara
- 4) Válvula de paso

3.3.1. Sistema de Vacío Estático.

Entre estos sistemas se tienen aquellos que obtienen un alto grado de vacío (10^{-6} a 10^{-9} torr). Estos requieren una desgasificación completa de la cámara y conexiones, y un hermetismo absoluto del sistema.

Estos sistemas se utilizan cuando se requiere evitar escrupulosamente la contaminación por gases residuales de materiales y superficies con que trabajó. Estos sistemas se utilizan para investigar: el efecto fotoeléctrico, la emisión termoiónica, etc.

3.3.2. Sistemas de Vacío Dinámico.

Estos sistemas permiten que no haya desgasificación en la cámara y conexiones e incluso pueden haber pequeñas pérdidas de presión en el sistema, por el uso de bombas extremadamente rápidas. Estos sistemas obtienen una presión final de 10^{-4} a 10^{-6} torr.

Los sistemas de vacío dinámico resultan inferiores a los sistemas estáticos cuando se requiere eliminar la contaminación de materiales con que se trabaja, pero son satisfactorios cuando la función del vacío es permitir el movimiento de moléculas evaporadas, electrones, iones y fotones.

En algunas ocasiones los sistemas de vacío dinámico se utilizan para metalizar grandes espejos de laboratorio, procesos de evaporación, en la preparación de películas delgadas, pilas termoeléctricas evaporadas, mantenimiento del vacío en tubos de rayos X, evacuación de espectrógrafos, tubos de descarga, etc.

3.4.- Bombas de Vacío Mecánicas.

Existen muchos tipos de bombas mecánicas, tal es el caso de las bombas de agua y presión que alcanzan un vacío de 15 a 25 torr, o de las bombas de agua con anillo que alcanzan una presión de 25 torr.

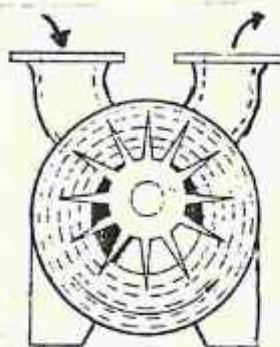


Fig. 10.- Bomba de agua con anillo
Tomado de N.T.M. Dennis. Vacuum System Desing.
Barnes & Noble, Inc. 1968.

Otras bombas son de vapor a presión y alcanzan un valor de presión de 0.03 torr. Los tipos de bombas mecánicas anteriores, son poco usadas para los sistemas de vacío que se usan en Física.

Las bombas mecánicas utilizadas en física, son las bombas selladas que trabajan con aceite, pueden alcanzar presiones hasta de 10^{-4} torr, cuando se utilizan trampas de nitrógeno.

Estas bombas proveen el vacío preliminar para el funcionamiento de las bombas de difusión. La Fig. 11, muestra un diseño de bombas rotativas por aspas con sello de aceite, el principio de funcionamiento de esta bomba no difiere mucho de las demás bombas mecánicas.

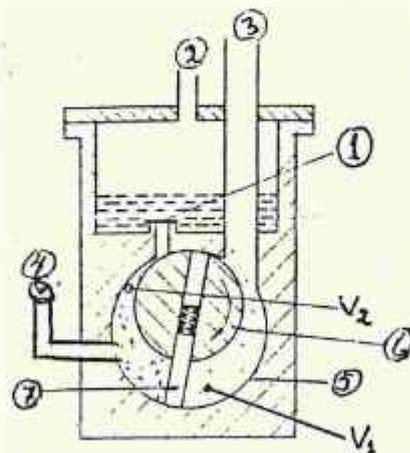


Fig. 11.- Bomba rotativa de aspas con sello de aceite.
1) Válvula de descarga; 2) Salida; 3) Entrada
4) Gas Ballast; 5) Estator 6) Rotor
7) Aspas.

Tomado de N.T.M. Dennis. Vacuum System Desing. Barnes & Noble, Inc, 1986.

Al funcionar la bomba de la Fig.11, el volumen de gas V_1 , es transportado por rotación a la válvula de descarga, como el gas es comprimido, la presión en el volumen V_2 aumenta y la válvula de descarga se abre, escapando el gas hacia la atmósfera.

3.5.- Bombas de Difusión.

Estas bombas proveen un alto vacío. La cámara y la bomba de difusión deben ser inicialmente evacuadas por una bomba mecánica. La Fig. 12, presenta una bomba de difusión típica, de aceite.

El fluido de la bomba es calentado por medio de un calefactor eléctrico externo, calentando una caldera que genera un aumento de presión en ella, haciendo que salga vapor de aceite con alta velocidad.

Debido a la baja densidad del aire en la entrada y al enfriamiento por agua en las paredes de la bomba, el vapor de aceite se condensa, retornando por gravedad a la caldera. Así con las condiciones de la bomba, una porción de cualquier gas que llegue a la sección de salida de la bomba. Debido a la diferencia de presiones, algunas moléculas de gas pueden escapar hacia la cámara, por lo que se deben usar

trampas de nitrógeno líquido. Otro aspecto es que vapores de aceite de las bombas mecánicas pueden contaminar el --- aceite de la bomba de difusión aumentando su tensión de va por y disminuyendo la cantidad del vacío final a obtener, por lo que se recomienda utilizar bombas de difusión en se rie.

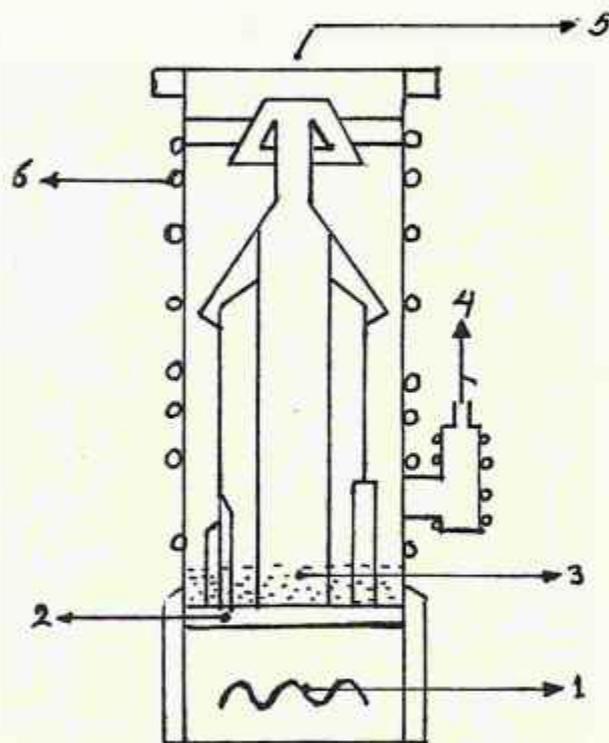


Fig. 12.- Bomba de difusión de aceite
1) Calefactor; 2) Aceite; 3) Caldera
4) Salida de bomba
5) Entrada; 6) Serpentín de enfriamiento por agua.

3.6 Medidores de Vacío (Vacuómetros).

Al diseñar un sistema de vacío es necesario conocer el vacío obtenido en cada una de las etapas, así como en la cámara.

Los medidores de vacío tienen que tomar como parámetros algunas características físicas de los gases residuales. Propiedades físicas tales como: viscosidad, resistencia eléctrica, conductividad térmica, etc.

El uso de un tipo de vacuómetro depende de las características físicas del medidor como del rango de trabajo, sensibilidad, uso continuo, mantenimiento, etc.

3.6.1 Vacuómetro Pirani.

Mide la presión de un rango de 200 a 10^{-4} torr, toma como parámetro de medida la variación de la resistencia eléctrica de un filamento en función de la disipación de energía térmica. La disipación de energía es proporcional a la frecuencia de las colisiones moleculares con el filamento.

Se aplican para monitorear continuamente la presión particularmente en las líneas de conducción, el filamento no debe encenderse cuando está expuesto a presión atmosférica.

3.6.2. Vacuómetro Penning.

Mide la presión en un rango de 10^{-2} a 10^{-6} torr. Usa como parámetro de medida una corriente continua de iones positivos que llegan al cátodo. La razón de iones producidos es proporcional a la concentración molecular y de las probabilidades de ionización de la moléculas residuales.

Estos vacuómetros se utilizan a partir del vacío logrado con las bombas mecánicas. Es normalmente operando con voltajes de alrededor de 2.5 KV, en el ánodo y construídas de materiales tales como el acero y níquel que son inactivos y no producen "sputter" (desprendimiento de moléculas al incidir electrones sobre el material) facilmente.

C A P I T U L O 4

PELICULAS DELGADAS POR EVAPORACION.

En este capítulo se define el término películas delgadas y se describe el procedimiento para prepararlas, por evaporación. También se describe la preparación de termopilas por evaporación.

4.1.- Películas Delgadas.

El término "películas delgadas" se usa para llamar a capas delgadas de un material determinado, usualmente estas capas son de un espesor de $1 \mu\text{m}$ (10^{-6}m) o de 1 nm (10^{-9}m), es de notar que un átomo simple tiene un diámetro aproximado de 0.5 nm , es decir, que las películas delgadas son de algunos espesores atómicos.

Existen varios métodos para la preparación de películas delgadas, sobre diferentes superficies o sustratos, la mayoría de estos métodos, son de naturaleza química. También se pueden fabricar películas delgadas empleando aspectos físicos, como la evaporación en vacío.

Las películas delgadas tienen mucho interés tanto para la investigación como para fines comerciales, ya que tienen muchas aplicaciones, entre las cuales se tienen: cons--

truir componentes eléctricos, como resistores o capacitores, en el campo de la óptica, se pueden utilizar en la construcción de equipos de conocida reflexión y transmisión de la luz, como en microscopios, telescopios; se pueden preparar películas decorativas de metales preciosos - en bases baratas, se utilizan también en la preparación - de termopilas evaporadas, superconductores, etc.

Una forma de preparar las películas delgadas es evitando en un gran porcentaje la contaminación, con este fin se preparan en vacío, mediante la evaporación del material el cual es condensado sobre un sustrato.

4.2.- Preparación de Películas Delgadas en Vacío.

El descubrimiento de la deposición en vacío se atribuye a EDISON, él observó la deposición de películas de carbón en el vidrio que encerraba su lámpara incandescente.

El método de evaporación para depositar películas delgadas sobre sustratos de vidrio, cuarzo, cristales iónicos, mica, cerámica, etc., consiste esencialmente en calentar una pequeña cantidad de metal o semimetal, en una cámara a la cual se ha realizado un vacío (10^{-4} a 10^{-6} torr), - hasta que el material se evapora, produciendo rayos moleculares en todas direcciones.

Si se produce la evaporación a presión ambiente, el libre camino medio de las moléculas es de aproximadamente 5×10^{-6} cm. Pero como la probabilidad de colisionar con otras moléculas o átomos es inversamente proporcional a la presión o densidad de moléculas, al reducir la presión por un factor de 107 torr, el cual se logra y, es fácilmente obtenible con los equipos modernos de vacío, el libre camino medio de las partículas aumenta a 50 cm.

Para evaporar un material, éste se debe calentar a una temperatura suficientemente alta, en vacío, así los átomos evaporados viajarán en línea recta, hasta que se condensen sobre las paredes del sistema evacuado (cámara) o sobre un sustrato especialmente preparado y colocado sobre una placa metálica para evitar que su temperatura se eleve demasiado.

Un esquema del dispositivo experimental para realizar evaporaciones en vacío se presenta en la Fig. 13.

El sistema para la evaporación en vacío consiste en una campana de vidrio o metal, la cual se le extrae el -- aire usualmente por dos bombas en serie (primero una mecánica y luego una de difusión). Cuando se tiene el vacío, -- provisto por la bomba de difusión con la cual se obtiene --

un alto vacío (10^{-5} torr); en el interior de la campana se coloca un crisol, al que se le aplica una diferencia de potencial. En el crisol se coloca el material a evaporar; bajo las condiciones de presión obtenida por medio del sistema, el material se evapora en un 99% aproximadamente, el sustrato se debe colocar a una distancia de 5 a 10 cm. del crisol, esta distancia debe ser menor que el libre camino medio de las moléculas evaporadas, para eliminar en un alto grado la contaminación y los choques entre moléculas.

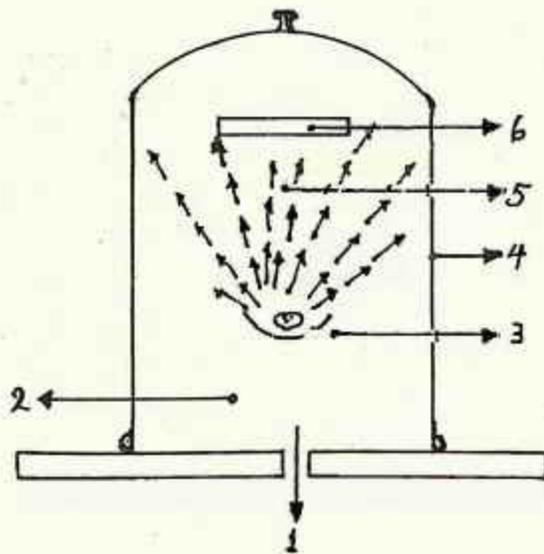


Fig. 13.- Sistema de evaporación en vacío (cámara).

- 1) A las bombas de vacío;
- 2) Presión de 10^{-4} torra 10^{-6} torr;
- 3) Fuente de evaporación;
- 4) Campana de vidrio
- 5) Moléculas evaporadas
- 6) Sustrato.

Es difícil mantener por mucho tiempo las evaporaciones, ya que no se pueden calentar grandes cantidades de un determinado material, lo cual da problemas.

El sustrato sobre el cual se desea depositar la película delgada puede ser expuesto a los rayos moleculares, los cuales se condensan para formar la película deseada. El sustrato puede ser calentado previamente o colocado sobre un trozo de metal para enfriarlo, a fin de obtener las propiedades particulares de las películas que se deseen, tal como una estructura de determinado grosor, forma, tamaño del grano, etc.

Para que un material se adapte en la preparación de películas delgadas, depende de las posibilidades de llevar este material a la temperatura de evaporación, bajo las condiciones de vacío que se tenga (10^{-5} torr) y, por tanto de las características materiales.

En muchos casos la película delgada que se quiere preparar debe tener ciertas características como:

- a) Espesor específico
- b) Pureza de la película
- c) Adherencia
- d) Estructura del grano, etc.

Para obtener estas características se deben tener cuidados como:

- a) Distancia de la fuente de evaporación al sustrato.
- b) Temperatura del sustrato
- c) Nivel de vacío
- d) Limpieza y pureza del sustrato
- e) Pureza del material evaporado
- f) Fuente de evaporación, etc.

La cantidad de detalles y cuidados al preparar una película delgada es grande. La mayoría de ellos se controlan, y varía solo uno de ellos cuando se desea tener una película delgada con características específicas.

4.3.- Termopilas Evaporadas.

Para construir pilas termoeléctricas por evaporación, se deben realizar dos evaporaciones seguidas y limitar las zonas donde se depositará el material evaporado por medio de mascarillas.

Los materiales termoeléctricos usados deben ser susceptibles de evaporarse con el equipo disponible.

Cuando el vacío obtenido es de 10^{-4} torra 10^{-5} torr, se recomienda(John Strog. "Técnicas de Física Experimental", Tomo II, 1965) utilizar los materiales: Bismuto -- (Bi) y una aleación de bismuto más 5% de estaño. Estos materiales se escogen en base a su poder termoeléctrico (cambio en el voltaje de salida por cambio de temperatura), el cual varía dependiendo de la combinación de mate riales que se utilicen. El sustrato usado puede ser de mica, laca, vidrio, etc.

Cuando se deposita por evaporación el material termoeléctrico sobre el sustrato, tanto el calor de condensa ción del vapor del material, como el calor irradiado por la caldera tienden a elevar la temperatura del sustrato, para impedir esto y evitar que el sustrato se deteriore, éste se debe colocar en contacto con un trozo de metal que lo enfría.

La región del material que se evapora primero debe sobrepasar un poco el punto de unión (0.2mm ó más), luego el siguiente debe sobrepasar una distancia igual.

Para establecer el contacto eléctrico con el medidor se deben soldar alambres de cobre en las conexiones de salida, lo cual se puede hacer evaporando oro en los puntos adecuados y soldando al oro los alambres de cone-

xi3n. Otra forma de preparar las conexiones, es colocando gotas de galio en las conexiones de salida y fijando estas gotas en los alambres de cobre, cubriendo todo con laca por aspersi3n.

C A P I T U L O 5

DESCRIPCION DE EQUIPO Y DISEÑO DE TERMOPILA.

En este capítulo se describe el equipo de vacío - utilizado, su mantenimiento y el procedimiento para trabajar con él. Se presenta el equipo diseñado para realizar dos evaporaciones seguidas. Por otra parte, se presenta el diseño de la termopila construida.

5.1. Equipo a Utilizar.

El sistema de vacío utilizado fué construido en La Sección de Estado Sólido, del Departamento de Física, bajo el desarrollo del Programa "Propiedades Físicas de los Materiales Semiconductores y sus Aplicaciones".

El diseño del equipo para realizar dos evaporaciones seguidas se adaptó a las dimensiones del sistema de vacío, así como a las dimensiones de la termopila a construir.

5.1.1 Sistema de Vacío.

La construcción del sistema de vacío se hizo con el objetivo de preparar películas delgadas por evaporación.

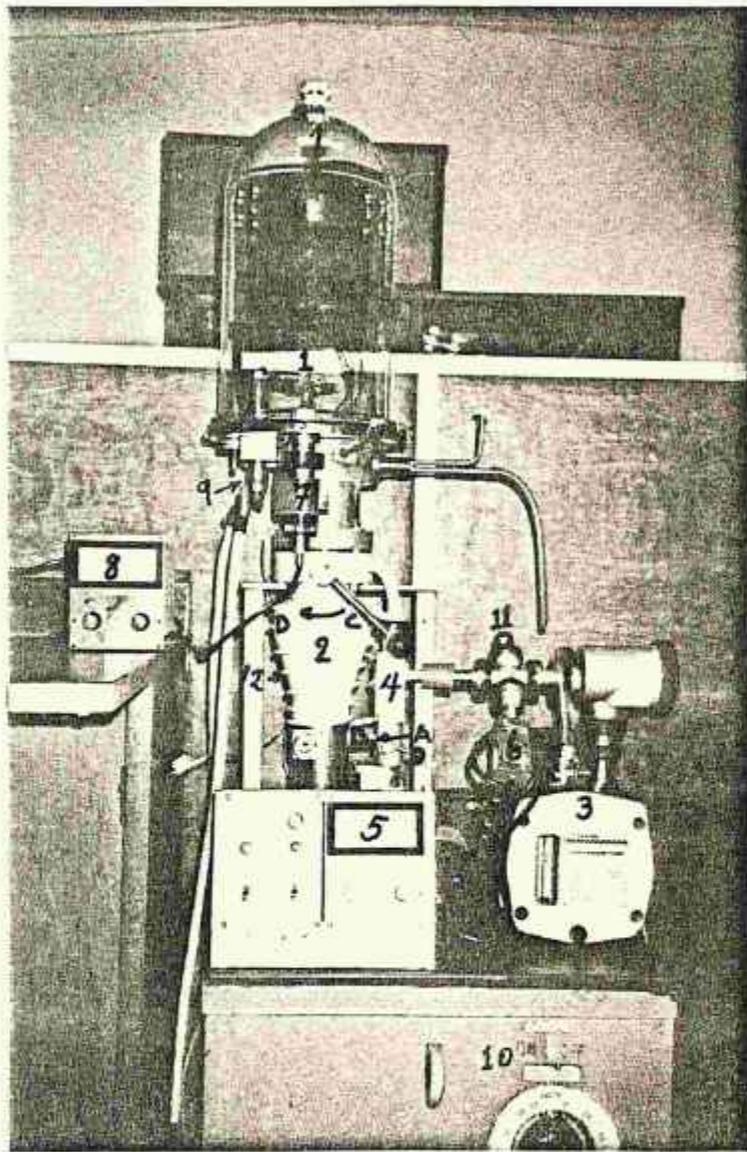


Fig. 14.- Sistema de Vacío Usado.
1) Cámara de Vacío; 2) Bomba de Difusión;
3) Bomba Mecánica; 4) Válvula de paso;
5) y 6) Vacuómetro Pirani;
7) y 8) Vacuómetro Penning.
9) y 10) Sistema de Evaporación
11) Válvula de ventilación
12) Sistema de enfriamiento por agua

El sistema consta básicamente de una bomba mecánica, una bomba de difusión, campana de vacío, medidor de vacío -- penning, medidor de vacío pirani, válvula de doble paso, enfriamiento por agua, sistema calefactor. Este sistema de vacío se muestra en la Fig. 14.

Es de notar que para poner a funcionar el sistema de vacío fue necesario realizar una limpieza y engrasado de todo el sistema, lo cual implica una revisión completa y realización de varias pruebas para detectar fugas y eliminarlas.

5.1.2 Procedimiento para obtener Vacío.

Para empezar se debe revisar las conexiones, si la válvula de ventilación está abierta y conectar el sistema de enfriamiento por agua. Hecho ésto se siguen los siguientes pasos:

- 1) Colocar las palancas en las posiciones A y C (ver figura 14), encender la bomba mecánica y luego cerrar la válvula de ventilación, mantener esta situación por 30 minutos.
- 2) Cambiar la palanca de la posición A hacia B, hasta que el medidor Pirani marque 4×10^{-2} torr (10 minutos).

- 3) Luego de 10 minutos cambiar la palanca de la posición C a la posición D (hasta que el pirani marque 4×10^{-2} torr.
- 4) Después de 5 minutos, encender la bomba de difusión hasta que el vacuómetro penning marque 10^{-4} torr (lo cual ocurre aproximadamente después de 30 minutos).

Con este procedimiento se obtiene el vacío que la bomba de difusión puede alcanzar como máximo, siempre y cuando no existan fugas.

5.1.3 Equipo Diseñado para Realizar dos Evaporaciones Seguidas.

Para realizar dos evaporaciones seguidas, sin necesidad de eliminar el vacío y reubicar el sustrato en la segunda evaporación, se diseñó el equipo mostrado en la Fig. 15. Este diseño se basa en las características de la cámara de vacío, así como de las dimensiones de la termopila a construir y las características de las mascarillas para limitar las zonas evaporadas.

Básicamente el sistema para realizar dos evaporaciones consta de una base triangular en la que están dos orificios sobre un círculo centrado en uno de los sopor-

tes de la base triangular, en los orificios se colocan las mascarillas para realizar las dos evaporaciones. El brazo giratorio sirve para colocar el sustrato y poder cambiar su posición hacia la mascarilla que limita la zona en que se realiza la segunda evaporación. (Ver Fig. 15.).

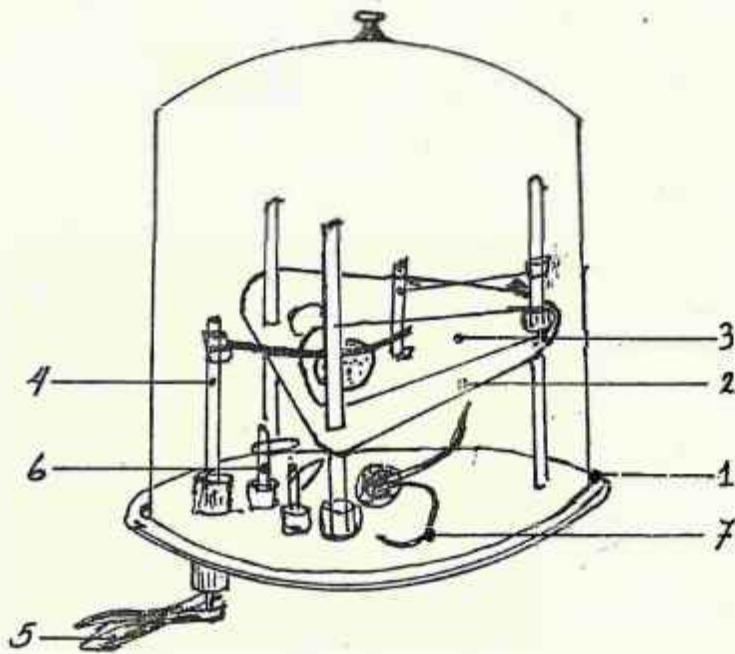


Fig. 15. - Sistema para realizar dos evaporaciones seguidas.

- 1) Plato y campana del sistema de vacío
- 2) Base triangular
- 3) Brazo giratorio
- 4) Espiga para mover el brazo giratorio
- 5) Tenaza de presión
- 6) Electrodo para calderas
- 7) Termopares de Cromel-Alumel.

5.1.4 Procedimiento para Realizar dos Evaporaciones Seguidas.

Previamente a la obtención del vacío, se deben de colocar en la cámara de vacío, las mascarillas, el sustrato; y los materiales a evaporar.

Los crisoles utilizados son de tungsteno y se colocan en los tres electrodos del plato del sistema.

Para realizar la evaporación del material se debe aplicar una corriente a la caldera deseada, después de esto, el sustrato se hace girar mediante la tenaza de presión hasta que se coloca sobre el segundo diafragma que delimita la zona donde se depositará la segunda evaporación. Las mascarillas deben estar colocadas de tal forma que después de efectuadas las dos evaporaciones se forme la figura deseada.

Realizadas las evaporaciones se deben colocar las palancas en las posiciones C y A apagando la bomba de difusión y se abre la válvula de ventilación, luego se apaga la bomba mecánica. El sistema de enfriamiento se debe desconectar 10 minutos después.

5.2 Diseño de Termopila.

Para diseñar la termopila se tomó en cuenta trabajos hechos anteriormente en la Sección de Estado Sólido - tales como: "Construcción de un Solarímetro", Trabajo de Tesis de MAURICIO MACHADO⁽¹⁾, así como trabajos en la preparación de películas delgadas por evaporación para células solares. Por otra parte se tomó en cuenta que la termopila que se construyera serviría como elemento sensor - de un piranómetro, el cual tenía su parte mecánica completa, esto limita sus dimensiones.

5.2.1 Materiales.

Los materiales termoeléctricos utilizados son: Bismuto y aleación de bismuto más 5% de estaño. Estos materiales se escogieron tomando en cuenta las sugerencias del libro "Técnicas de Física Experimental" de John Strong, así como de M.S. Ethelvina Morillo de Escobar, que ha desarrollado un amplio trabajo en el estudio de la Energía Solar.

Es de notar que otras combinaciones de materiales termoeléctricos como Bismuto-Plata, Bismuto-Antimonio, Bismuto-Estaño no producen resultados satisfactorios para las

(1) Mauricio Machado "Construcción de un Solarímetro". 1982.

características de la termopila, tales como: resistencia, poder termoeléctrico, etc.

5.2.2. Dimensiones de la Termopila.

Las dimensiones de la termopila, número de uniones longitud de los materiales termoeléctricos está determinado por el espacio disponible en un círculo de 3.47 cm. de diámetro que es la zona donde se ubica el elemento sensor de un piranómetro, cuya parte mecánica se construyó anteriormente. La solución que se obtuvo fue la de colocar las uniones de la termopila sobre dos círculos concéntricos de 1.00 cm. y 2.50 cm., como se muestra en la figura 16.

El número de uniones o termopares que constituyen la termopila es 8; un esquema del grosor, número de uniones longitud de cada termopar, se muestra en la figura 16 (a), (b) y (c).

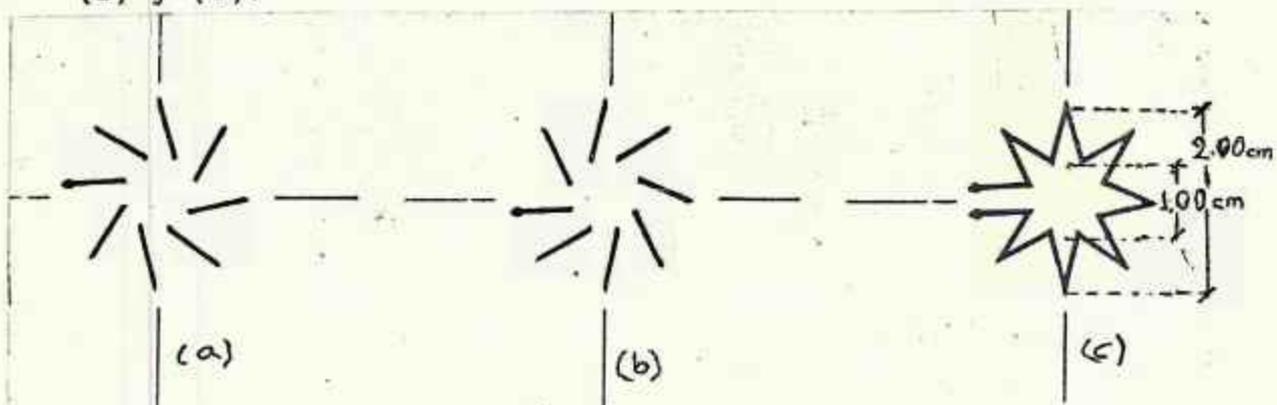


Fig. 16.- Diseño de Termopila. (a) y (b) Segmentos termoeléctricos.
(c) Termopila. Escala 1:1.

Para los diseños de las figuras 16a) y 16b) se mandaron a construir mascarillas, que permiten la deposición de material evaporado, a un laboratorio de fotograbados.

5.2.3 Sustrato.

El sustrato que se utilizó fue de mica que es un buen aislante térmico y eléctrico⁽¹⁾. Además se intentó realizar las evaporaciones en sustrato de vidrio o plástico, pero en ningún caso se puede obtener deposiciones satisfactorias. Las dimensiones del sustrato son las mismas de la zona del piranómetro donde se coloca el elemento sensor (Disco de 3.47 cm. de diámetro). Una cara sirve para la deposición de las evaporaciones y la otra para montarla sobre el piranómetro.

5.2.4. Delimitación de Zonas Caliente y Fría en la Termopila.

Para determinar las uniones de referencia (zona fría) y las uniones activas (zona caliente) se tomó como referencia el Trabajo de Tesis de Mauricio Machado (1982), en el cual las uniones exteriores constituyen la zona fría como se muestra en la Fig. 17.

(1) John Strong. "Técnicas de Física Experimental". Tomo II, 1965.

Al determinar las dimensiones de estas zonas se debe tomar en cuenta que la Fem de salida de una termopila solo depende de la diferencia de temperatura entre las uniones activas y uniones de referencia y no de la distribución de temperaturas entre ellas.

Un esquema completo de la termopila se muestra en la Fig. 17.

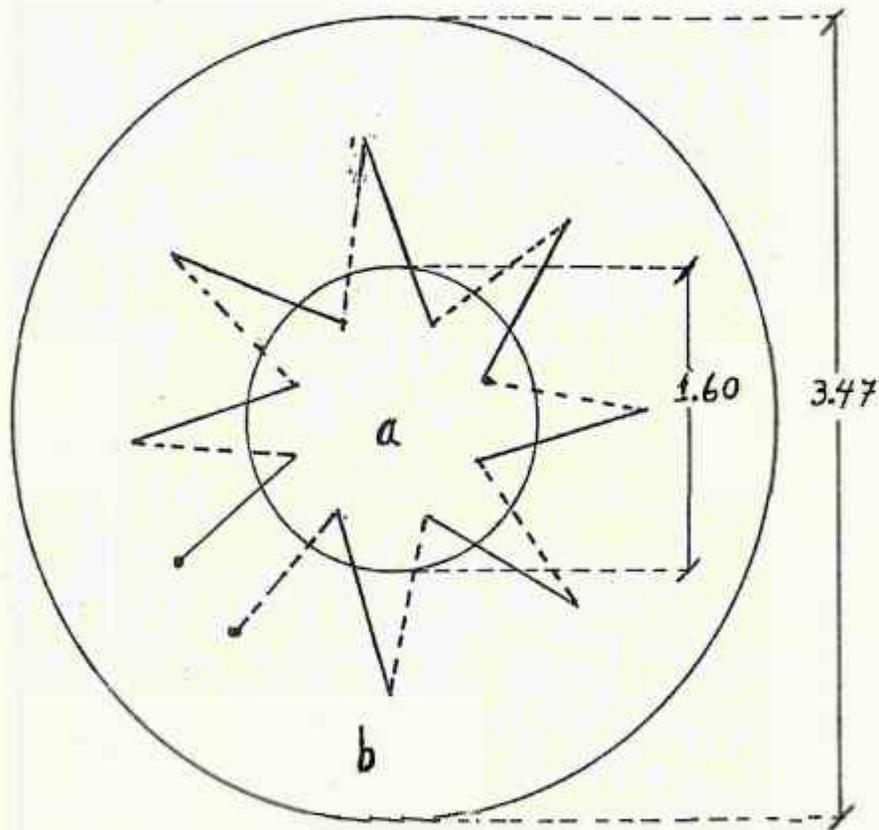


Fig. 17. - Esquema de Termopila Construida.
a) Zona Caliente
b) Zona Fría
Todas las cotas están en centímetros.

C A P I T U L O 6

CONSTRUCCION Y CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR TERMoeLECTRICO.

En este capítulo se explican las condiciones en que se efectuaron las evaporaciones, así como los procedimientos para medir la señal de la termopila, pintar la zona caliente y fría, montaje de la termopila en el piranómetro y el proceso para determinar los parámetros: Constante de calibración, linealidad (basado en el coeficiente de correlación de Pearson) y tiempo de respuesta.

6.1.- Construcción de Transductor.

La evaporación de la termopila se puede efectuar, cuando las mascarillas han sido colocadas correctamente y los materiales a evaporar han sido pesados y colocados en los crisoles.

6.1.1. Realización de las Evaporaciones.

Para realizar las evaporaciones los crisoles son de Tungsteno. La cantidad de material a evaporar se pesa en una balanza, las cantidades no necesitan ser iguales ya que la Fem en un termopar no depende ni de la longitud, ni de la

sección de los alambres de que esté constituido, solo depende del tipo de materiales y la diferencia de temperaturas entre sus uniones.

Para realizar las evaporaciones se debe obtener primero el vacío, mediante el procedimiento descrito en 5.1.2 y luego el procedimiento 5.1. 4, de tal manera que el primer material evaporado es el Bismuto, luego se evapora la aleación.

Las condiciones de evaporación: Temperatura en el crisol, presión en la cámara de vacío, masa de los materiales a evaporar y tiempo de evaporación se presentan en la Tabla III.

TABLA III.- CONDICIONES DE EVAPORACION PARA LA TERMOPILA DE BISMUTO-ALEACION DE BISMUTO MAS 5% DE ESTAÑO.

MATERIAL	BISMUTO	ALEACION
Masa (gr) \pm 0.005	0.922	0.628
Temperatura del Crisol (°C) \pm 0.05	1349.65	888.65
Tiempo (Mint.) \pm 0.1	3.5	3.5
Presión (Torr) \pm 0.5×10^{-3}	1.5×10^{-5}	1.5×10^{-5}

Después de realizadas las evaporaciones, se revisa la termopila para ver si las deposiciones se efectuaron en la zona deseada, la adherencia de las películas, se verifica midiendo la conductividad entre sus uniones de salida y - se mide también su resistencia eléctrica, la cual resultó ser de $158.96 \pm 0.05 \Omega$.

6.1.2. Conexiones de Salida de la Termopila.

Para medir la Fem de salida de la termopila se conectaron alambres de cobre de un diámetro de 0.12 mm, en los extremos de la termopila, que por ser evaporada presenta muchos problemas, ya que se deteriora por el calor o por contacto con otro material; por tal motivo la soldadura para las conexiones de salida se realizaron con Galio (de una pureza de 99.9999%) que es un material que tiene un punto de fusión de 29°C, esto permite realizar las conexiones -- sin deteriorar los extremos de la termopila, pero presenta el problema de que la soldadura es líquida y se cae fácilmente, además los materiales evaporados están expuestos to davía a rayaduras u oxidaciones por el medio ambiente por lo cual es necesario revestir esta cara del sustrato con - una película de laca, aplicada por aspersión.-

6.1.3 Protección de la Termopila.

Para proteger los materiales evaporados y fijar la soldadura de Galio, se aplica laca para el cabello por aspersion, ya que todas estas no poseen disolventes que deterioren los materiales evaporados. La capa de laca colocada, aisla la termopila del medio, mantiene fijos los alambres de conexión y la soldadura de Galio. Es de notar que se probaron otros materiales como: Barniz para madera, laca acrílica, pero no dieron los resultados deseados, ya que deterioraban las evaporaciones.

6.2. Pintura de las Zonas Fría y Caliente de la Termopila.

Las dimensiones de las zonas fría y caliente se muestran en la Fig. 18. La zona fría es la que cae en la franja exterior delimitada por los círculos concéntricos de diámetros 1.57 cm. y 3.47 cm. y la zona caliente es el círculo interno con diámetro de 1.57 cm.

Para pintar la zona caliente se prepara una mascarilla de cartulina con un orificio de 1.57 de diámetro. Luego la mascarilla se coloca sobre la termopila dejando el orificio donde estará la zona caliente. La superficie negra, de la zona caliente se obtiene por la deposición de -

humo de alcanfor, el cual se ha usado mucho para la construcción de piranómetros en solarimetría, en trabajos como los de la fábrica de instrumentos solarimétricos INSOLAR & METRIX, de México. La zona blanca (fría) se pinta con blanco de pintura oleo de Titanio, la capa se deja -- gruesa para que la temperatura de las uniones permanezca constante aunque la radiación solar incida por mucho tiempo.

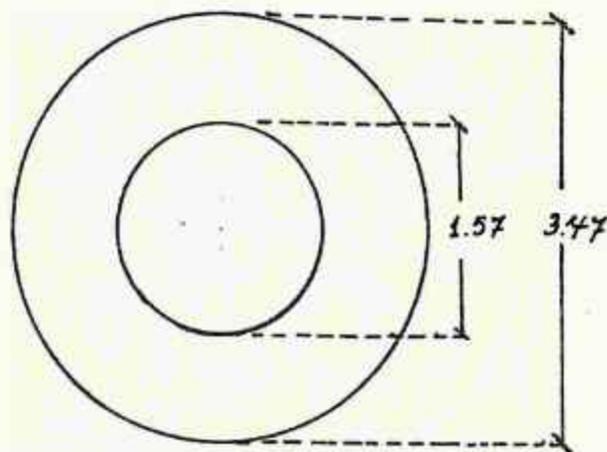


Fig. 18.- Dimensiones de la zona caliente y fría para la termopila de Bismuto y aleación de Bismuto más 5% de estaño. Las cotas en centímetros.

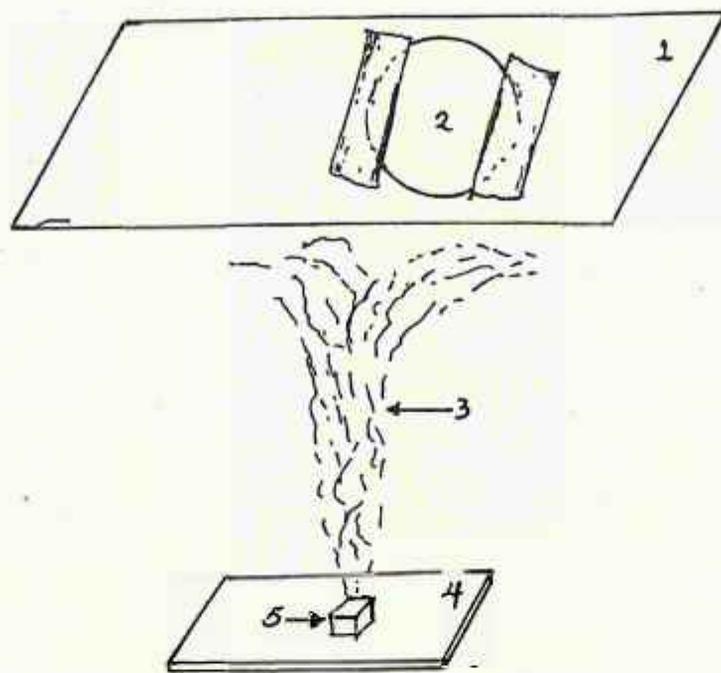


Fig. 19.- Arreglo experimental para depositar el humo de alcanfor sobre la termopila.

- | | |
|----------------------------|--------------|
| 1) Mascarilla de cartulina | 2) Termopila |
| 3) Humo de Alcanfor | 4) Platina |
| 5) Alcanfor. | |

6.3 Determinación de algunos parámetros de Transductor montado en el Piranómetro (Parte Mecánica).

Los parámetros que se determinaron a la termopila montada, como elemento sensor, en la parte mecánica del Piranómetro son: Constante de calibración, Linearidad, Constante de Tiempo.

6.3.1 Constante de Calibración y Linearidad del Transductor.

Uno de los métodos para calibrar un piranómetro, es por comparación de la Fem de salida del piranómetro a calibrar con la de un estandar cuya constante de calibración se conoce.

Esta comparación se hizo, usando el sol como fuente de energía y en condiciones de Laboratorio.

6.3.1.1 Usando el Sol como Fuente de Energía.

En este caso la calibración se hizo utilizando dos métodos diferentes:

- i) Midiendo la Fem de salida que produce la radiación solar global en ambos piranómetros, el estandar y el que se desea calibrar.
- ii) Mediante los registros de la Fem de salida que produce la radiación solar global en ambos piranómetros.
- i) Midiendo la Fem de Salida

Para realizar esta comparación los piranómetros se deben colocar a la par, en horas del mediodía preferiblemente, situados sobre una línea perpendicular al desplazamiento del sol. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla IV.-

TABLA IV.- Valores de Fem para el Piranómetro estandar, Eppley, Modelo 8-48, cuya constante $K_e = 8.46 \times 10^{-3} \text{ mV/W mt}^{-2}$, y el piranómetro a calibrar. VI. Tomados desde 2.05 pm del día 19 de julio, día soleado, con intervalos de 1 minuto.

V_1 mV \pm 0.005	EPPLEG mV \pm 0.005
5.301	7.276
5.183	7.293
5.196	7.280
5.034	7.242
4.976	7.204
4.690	6.954
4.640	6.956
4.584	6.812
4.474	6.717
4.453	6.727
4.402	6.678
4.324	6.586
4.205	6.383
4.208	6.363
4.217	6.348
4.134	6.232
4.026	6.138
3.986	6.070
3.921	6.023
3.859	5.891
3.680	5.662
3.564	5.491
3.585	5.493
3.560	5.486
3.508	5.438
3.439	5.320
3.263	5.114
3.067	4.911
3.119	4.867
3.033	4.749

Los datos se ajustan mediante el método de mínimos cuadrados (Regresión Lineal) tomando B como la pendiente y A, como el intercepto de la recta ajustada, se obtuvo la ecuación:

$$V_1 = 0.841 V_e - 1.080 \text{ mV} \quad (6.1)$$

Donde:

V_1 : Es el voltaje de salida del piranómetro a calibrar.

V_e : Voltaje de salida del piranómetro Eppley.

La potencia por unidad de área E, recibida por ambos piranómetros es la misma, se puede escribir:

$$E = \frac{V_e}{k_e} = \frac{V_1}{k_1} \quad (6.2)$$

Por lo que la pendiente de la recta ajustada es:

$$B = \frac{k_1}{k_e} \quad (6.3)$$

Donde:

k_1 : Constante de calibración del piranómetro a calibrar (V_1).

k_e : Constante de calibración del piranómetro estandar (Eppley).

Por tanto, la constante de calibración del piranómetro V_1 , es:

$$k_1 = k_e B \quad (6.4)$$

$$k_1 = (8.46 \times 10^{-3} \text{ mV/watt } \text{m}^{-2}) (0.841) \quad (6.5)$$

$$k_1 = 7.11 \times 10^{-3} \text{ mV/watt } \text{m}^{-2} \quad (6.6)$$

siendo el coeficiente de correlación lineal (r)

$$r = 0.991 \quad (6.7)$$

ii) Mediante los registros de la Fem de salida.

Este método se basa siempre en la comparación de las Fem de salida, pero las señales se registran en un graficador Hewlett Packard de dos canales previamente calibrados. La gráfica obtenida se presenta en la Fig. 20. Los datos tomados de la gráfica se presentan en la Tabla V.

Utilizando los datos de la Tabla V, se tiene que la recta ajustada es:

$$V_1 = 0.546 V_e - 0.183 \text{ mV} \quad (6.8)$$

Por tanto, la constante es:

$$k_1 = (0.546)(11.05 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt } \text{m}^{-2}) \quad (6.9)$$

$$k_1 = 6.03 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt } \text{m}^{-2} \quad (6.10)$$

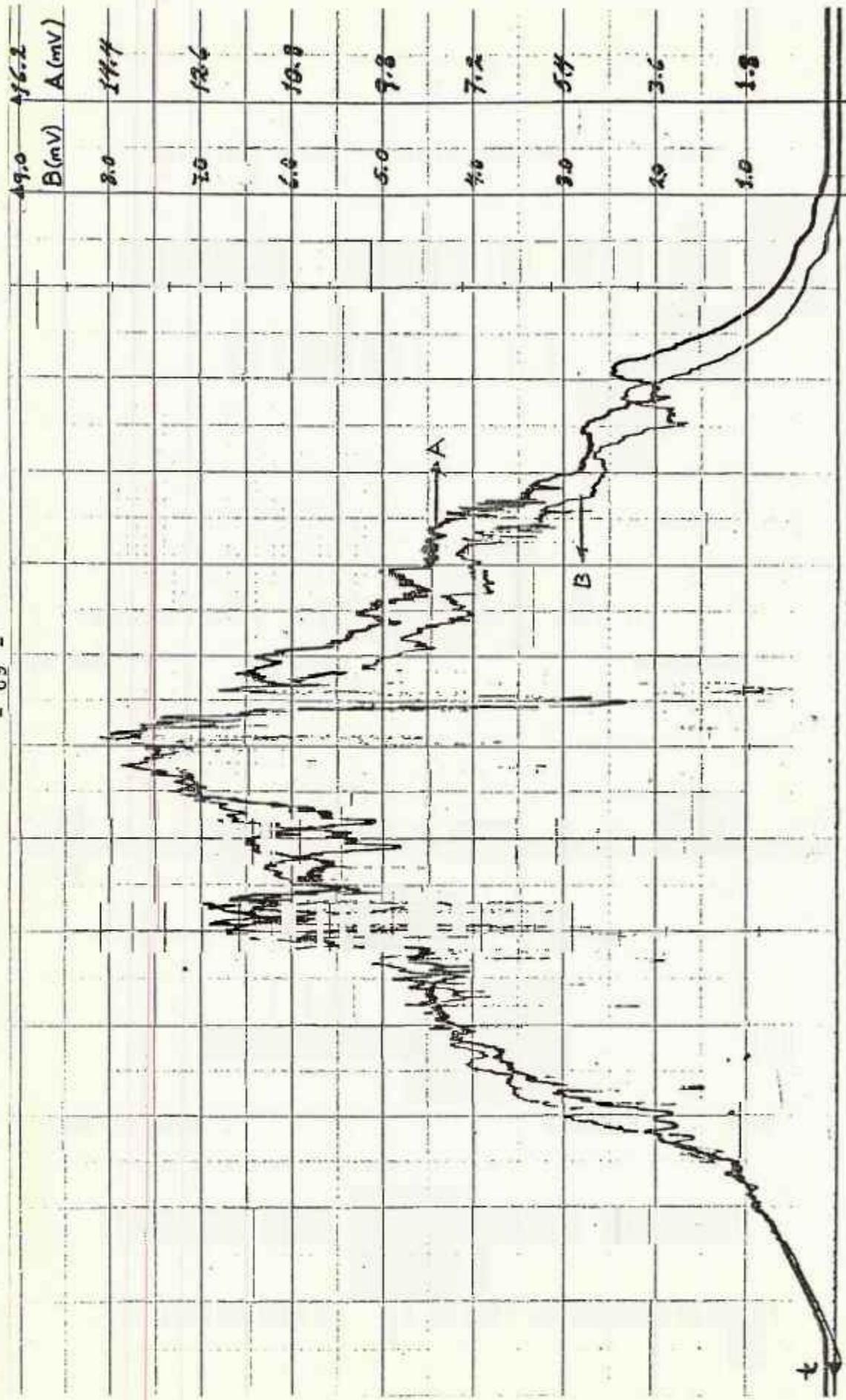


Figura 20. Fem de salida para los Piranómetros Eppley (Trazo A), V_1 (Trazo B) correspondiente al 31 de julio de 1991. Sobre una superficie horizontal. (Desfase de las trazas 3 divisiones).

TABLA V.- Valores de Fem para piranómetros estandar, Eppley Modelo 8.48, cuya constante es $k_e = 11.05 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}$, y el piranómetro a calibrar V_j . Tomados de la Fig. 20, a intervalos de 30 minutos.

V_j mV \pm	EPPLEY mV \pm
0.30	0.90
0.55	1.45
1.55	3.24
2.45	4.86
3.55	6.66
3.56	6.84
3.80	7.56
3.80	7.02
5.80	10.62
5.80	10.80
6.00	11.70
5.30	10.26
4.20	7.92
5.10	9.54
5.50	10.44
5.10	9.72
3.90	7.56
2.50	4.86
2.30	4.68
1.60	3.24
0.60	1.44
0.40	0.90
0.10	0.54

Siendo el coeficiente de correlación:

$$r = 0.998 \quad (6.11)$$

6.3.1.2 En Condiciones de Laboratorio

Es necesario conocer la respuesta del piranómetro a diferentes tipos de radiación incidente y su comportamiento en diferentes condiciones del medio ambiente. En el laboratorio se puede mantener fija (relativamente) - la temperatura ambiente y hacer incidir sobre el piranómetro determinada radiación. Calibrar el piranómetro en condiciones de laboratorio consiste en exponer ambos piranómetros a iguales distancias de una fuente de radiación.

Como fuente de radiación se utiliza un foco de 150 Watts, el cual se deja estabilizar durante 8 horas. Un esquema de la disposición del equipo se muestra en la -- Fig. 21.

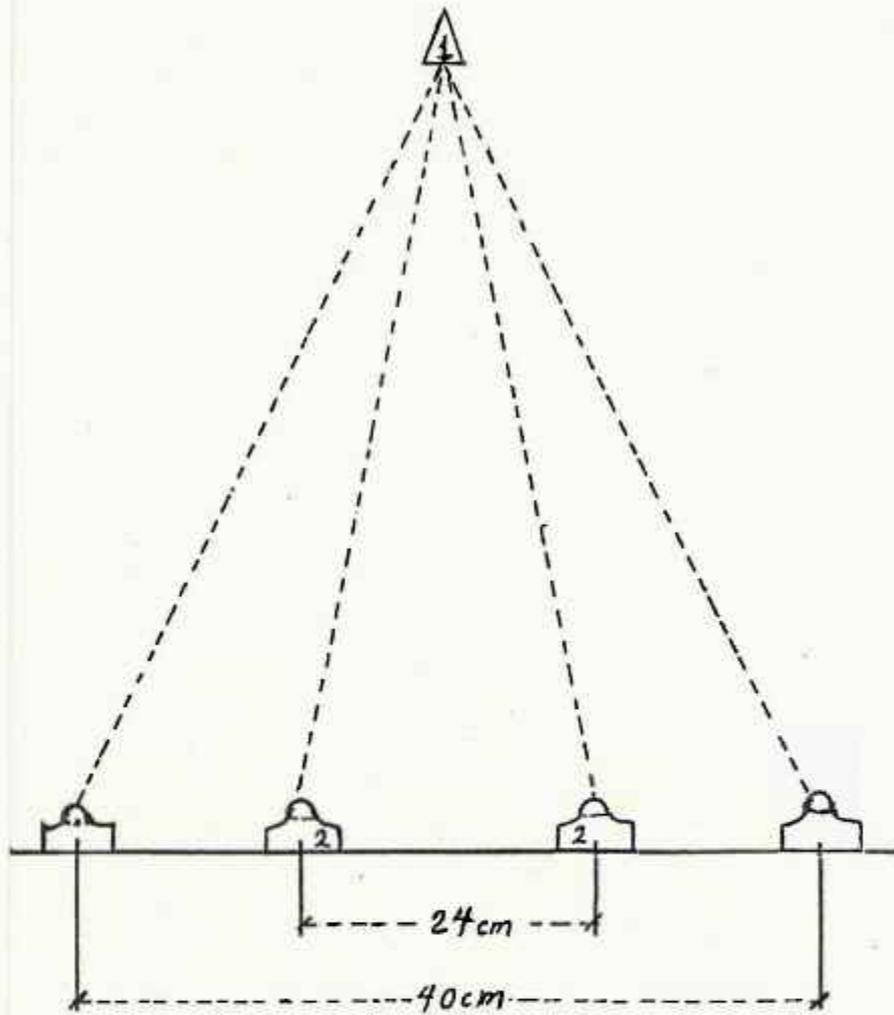


Fig. 21.- Arreglo experimental utilizado para calibrar un piranómetro por comparación en condiciones de laboratorio.

- 1) Fuente de radiación
- 2) Piranómetros

Es de notar que los piranómetros colocados en una posición (A o B) tienen dos alternativas por lo que en total se tienen cuatro condiciones diferentes para efectuar las medidas. Los datos obtenidos por cada una de estas condiciones se presentan en la Tabla VI .-

TABLA VI .- Fem obtenidas para los piranómetros V_1 y Eppley (Serie 27346, Modelo 8-48) en condiciones de laboratorio.

V_1 Fem mV \pm 0.005	EPPLEY mV \pm 0.005
2.345	2.839
2.348	2.837
2.344	2.833
2.345	2.836
2.337	2.839
2.330	2.825
2.341	2.841
2.338	2.836
2.340	2.837
2.339	2.836
2.174	2.867
2.205	2.861
2.214	2.862
2.210	2.856
2.213	2.847
2.204	2.848

continúa

Continuación de Tabla VII.-

2.196	2.828
2.200	2.839
2.206	2.863
2.212	2.860
2.213	2.850
1.184	1.425
1.153	1.417
1.145	1.404
1.131	1.400
1.127	1.405
1.125	1.313
1.114	1.382
1.113	1.387
1.116	1.391
1.115	1.387
1.093	1.492
1.106	1.506
1.105	1.507
1.107	1.505
1.109	1.506
1.107	1.503
1.106	1.496
1.096	1.489
1.095	1.490
1.096	1.484

Obteniendo un promedio para los valores de V_e en ambos piranómetros, en cada situación y utilizando el método de mínimos cuadrados, la recta ajustada es:

$$v_1 = 0.835 V_e - 0.095 \text{ mV} \quad (6.12)$$

Con lo cual se tiene que la constante es:

$$k_1 = (0.835) (8.46 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}) \quad (6.13)$$

$$k_1 = 7.06 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2} \quad (6.14)$$

El coeficiente de correlación es:

$$r = 0.994 \quad (6.15)$$

El valor promedio de las constantes encontradas por los diferentes métodos es:

$$\bar{k}_1 = \frac{(7.11+6.03+7.06) \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}}{3} \quad (6.16)$$

$$\bar{k}_1 = 6.73 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2} \quad (6.17)$$

Para el coeficiente de correlación, su valor promedio es:

$$\bar{r} = 0.994 \quad (6.18)$$

6.3.3 Tiempo de Respuesta (τ)

La constante de tiempo, o tiempo de respuesta es un parámetro que indica el tiempo que tarda el aparato en - -

alcanzar el 63% del valor máximo de la Fem de salida.

Para obtener el tiempo de respuesta se procedió de la siguiente forma:

- a) Se estabiliza un foco de 150 Watt durante 8 horas en un cuarto oscuro.
- b) El piranómetro tapado se coloca perpendicularmente a la radiación (foco) conectado al graficador HP, como se muestra en la Fig. 22.



Fig. 22. Disposición del piranómetro y el graficador para medir el tiempo de respuesta
1) Graficador H.P.
2) Piranómetro con termopila construida

Las curvas obtenidas del graficador se muestran en las gráficas 22 (a) y 22 (b), se observa que la señal de salida V (mV) y el tiempo t , tienen una relación exponencial de la forma.

$$V = V_{\max} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (6.19)$$

En esta ecuación τ es el tiempo de respuesta correspondiente a un 63% del voltaje máximo obtenido.

De las gráficas se puede tomar como valores máximos de F_{em} , las alturas máximas y obtener el 63% de estas alturas máximas, luego por medio de interpolación conocemos el desplazamiento en la coordenada del tiempo, que depende de la velocidad en que el graficador H.P. esté trabajando.

Para Fig. 5(a) el graficador trabajaba con una velocidad de 10 pulgadas/minuto, la altura máxima es 20.6 cm. así el 63% es 12.9 cm. a este 63% le corresponde un desplazamiento de 1.3 cm. (0.52 Pulg.). Con lo que se tiene un tiempo de respuesta de:

$$\tau = \frac{0.52 \text{ pulg.}}{10 \text{ Pulg./Min.}} = 0.052 \text{ minutos} \quad (6.20)$$

$$\tau = 3.12 \text{ seg.} \quad (6.21)$$

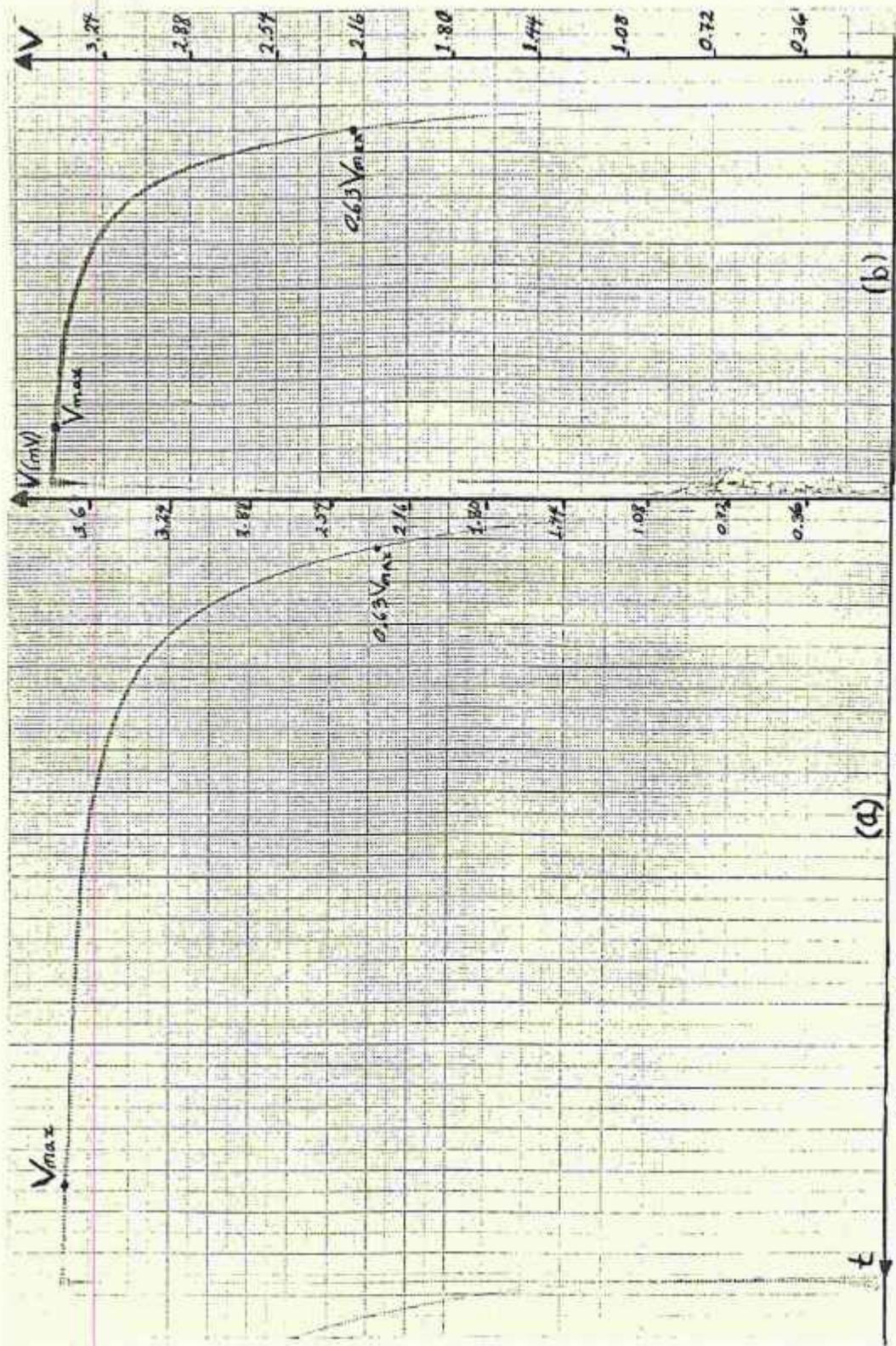


Fig. 23.- Gráficos para medir el tiempo de respuesta, se utiliza un graficador H.P.

Para la Fig. 5(b) el graficado trabaja con una velocidad de 5 pulg/minuto, la altura máxima alcanzada por la señal es de 19.3 cm. el 63% es 12.2 cm. y a esta altura corresponde un desplazamiento horizontal de 0.7 cm. - (0.28 pulg.) por lo tanto el tiempo de respuesta es:

$$\tau = \frac{0.28 \text{ Pulg.}}{5 \text{ Pulg/minuto}} = 0.056 \text{ minutos}$$

$$\tau = 3.36 \text{ seg.}$$

Obteniendo un promedio se tiene un tiempo de respuesta igual a:

$$\tau = 3.24 \text{ seg.}$$

Es de observar que al comparar con el tiempo de respuesta los piranómetros Eppley Modelo 8-48, Serie 27346 y 23569, el cual es de 3 a 4 seg.⁽¹⁾. El tiempo de respuesta obtenido es aceptable.

(1) The Eppley Laboratory Inc. Certificación 1983.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 Conclusiones.

- 1) El objetivo de construir un transductor termoeléctrico por el método de evaporación, para medir radiación solar se ha cumplido, teniendo las características:

Ecuación de medición:

$$\text{Irradiancia} = \frac{V_1}{6.43 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt m}^{-2}}$$

Linealidad (coeficiente de correlación de Pearson):

$$r = 0.995$$

Tiempo de Respuesta:

$$\tau = 3.24 \text{ seg.}$$

- 2) La respuesta de la termopila, como elemento sensor del piranómetro, es confiable, esto se deduce por que el valor de r es muy cercano a 1.

- 3) Las termopilas evaporadas de Bismuto y Aleación de Bismuto más 5% de estaño, poseen una constante de calibración similar a la de los piranómetros Eppley.
- 4) Al comparar los gráficos obtenidos en la Fig. 20, se observa que la respuesta de ambos piranómetros es -- muy similar.
- 5) Excepto por el Bismuto y Galio, todos los demás materiales utilizados y el equipo se tienen en la Sección de Estado Sólido del Departamento de Física.
- 6) Su costo resulta bajo al comparar con los piranómetros Eppley comprados y más importante es la experiencia -- que se obtiene en la preparación de termopilas evaporadas.
- 7) En la construcción de la termopila se da un paso más en el desarrollo de una tecnología propia, un desarrollo en la preparación de películas delgadas por el método de evaporación.
- 8) Se rescata equipo de la Sección de Estado Sólido por la puesta en funcionamiento de una evaporadora (sin ocuparse por muchos años) y se incrementa el equipo

de medición para radiación solar al construir el elemento sensor de un piranómetro que tenía su parte mecánica construida.

- 9) Al comparar las constantes de los piranómetros Eppley (estandar ocupado) el de Mauricio Machado (Ver trabajo de Tesis "Construcción de un Solarímetro") y el -- construido en este trabajo:

$$\text{Eppley: } k_E = 8.46 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}$$

$$\text{Machado: } k_m = 4.25 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}$$

$$V_1: k_V = 6.43 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}$$

Se observa que el valor de la constante del piranómetro Machado es menor que la de Eppley y V1.

7.2 Recomendaciones.

Los resultados obtenidos en este trabajo son satisfactorios a pesar de varios inconvenientes encontrados - durante la puesta en funcionamiento de la evaporadora, - construcción del equipo para realizar dos evaporaciones - seguidas, calibración de la termopila como elemento sensor del piranómetro. Se recomienda:

- a) Experimentar con la construcción de termopilas con diferentes materiales como Plata-Bismuto, Plata-Estaño, Estaño-Aluminio, etc. buscando una Fem de salida aceptable y materiales de más fácil obtención en nuestro medio.
- b) Buscar nuevos métodos para realizar la soldadura de las conexiones de salida en la termopila.
- c) Experimentar con diferentes materiales para la protección de las evaporaciones, como: resinas para madera, laca para dibujos, etc. (En este trabajo se usa laca para el cabello).
- d) Realizar investigación en la comercialización y del piranómetro construido.
- e) Obtener diferentes crisoles para realizar las evaporaciones.

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla No.</u>	<u>Pag.</u>
I.- Tipos de Transductores más comunes	2
II.- Tipos de Termopares más usados	6
III.- Condiciones de Evaporación para la termopila de Bismuto-Aleación de Bismuto más 5% de Estaño.	60
IV.- Valores de Fem para el Piranómetro estándar Eppley Modelo 8-48, cuya constante es $K_e = 8.46 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}$, y el Piranómetro a calibrar V_1 . Tomados desde 2:05 p.m. - del día 19 de julio, día soleado, con intervalos de un minuto.	66
V.- Valores de Fem para Piranómetros estándar Eppley Modelo 8-48 cuya constante es $K_e = 11.05 \times 10^{-3} \text{ mV/Watt mt}^{-2}$, y el Piranómetro a calibrar V_1 . Tomados de la Fig. 20, a intervalos de 30 minutos.	70
VI.- Fem obtenidos para los Piranómetros V_1 y Eppley (Serie 27346, Modelo 8-48), en condiciones de Laboratorio.	73

LISTA DE FIGURAS

<u>Fig.</u>		<u>Pag.</u>
<u>Capítulo 1.</u>		
1	Esquema de un Termopar	4
2	Esquema representativo de la Primera Ley de Aditividad.	7
3	Esquema de la Segunda Ley de Aditividad	9
4	Esquema de una Termopila	10
5	Sensores de Termopila para Radiómetros	11
<u>Capítulo 2.</u>		
6	Circuito para mostrar el Efecto Seebeck	23
7	Circuito para mostrar el Efecto Peltier	25
<u>Capítulo 3.</u>		
8	Relación entre los Términos de la Presión	31
9	Esquema de un Sistema de Vacío	33
10	Bomba de Agua con Anillo	35
11	Bomba de Aspas con sello de aceite	36
12	Bomba de Difusión de Aceite	38
<u>Capítulo 4.</u>		
13	Sistema de Evaporación en Vacío	44

...

<u>Fig.</u>		<u>Pag.</u>
<u>Capítulo 5.</u>		
14	Sistema de Vacío Utilizado.	50
15	Sistema para realizar dos evaporaciones. seguidas.	53
16	Diseño de Termopila.	56
17	Esquema de Termopila construida.	58
<u>Capítulo 6.</u>		
18	Dimensiones de la Zona caliente y fría para la Termopila de Bismuto y aleación de Bismuto más 5% de Estaño.	63
19	Arreglo Experimental para depositar el humo de alcanfor sobre la termopila.	64
20	Fem de Salida para los Piranómetros Eppley (Trazo A) y VI (Trazo B) correspondiente al día 31 de julio de 1991. Sobre una superfi- cie horizontal (Desfase de los trazos, 3 di- visiones.	69
21	Arreglo experimental utilizado para calibrar un piranómetro por comparación en condicio- nes de laboratorio.	72
22	Disposición del piranómetro y el graficador para medir el tiempo de respuesta.	76
23	Gráficos para medir el tiempo de respuesta , se utiliza un graficador H.P.	78

B I B L I O G R A F I A

- 1) ASTM/NBS
Manual on the use of Thermocouples in Temperature
Measurement.
U.S.A., 1976.
- 2) BRIDGMAN, P.W.
The Thermodynamics of Electrical Phenomena in Metals
New York, Dover Publication, Inc. 1961.
- 3) DASH, J.G.
Films on Solid Surfaces
New York. Academic Press, 1975.
- 4) DENNIS, N.T.M. HEPPELL, T.A.
Vacuum System Design
Great Britain, Willmer Brothers Limited. 1968.
- 5) EISBERG, R. RESNICK, R.
Física Cuántica, México.
Editorial Limusa, 1983.
- 6) HERNANDEZ ROSALES, RAFAEL E.
Diseño y Construcción de un Sistema de Alto Vacío
Estructuración de un Evaporador para depositar películas
delgadas.
San Salvador, 1976.
- 7) HOLMAN, JACK P.
Métodos Experimentales para Ingenieros
Cuarta Edición, México.
Mc Graw-Hill, 1978
- 8) JAIN, Q.C.
Propiedades of Electrical Engineering Material
New York, a Harper International Edition.
1967.

- 9) LEE, JOHN F., SEAR FRANCIS W., TURCOTTE DONALD.
Statistics Thermo-Dynamics.
California Addison-Wesley Publishing,
Company. Inc. 1973.

- 10) MACHADO, MAURICIO
Construcción de un Solarímetro
San Salvador, Universidad de El Salvador
1982. Tesis Mecanografiada.

- 11) MANRIQUE, JOSE A.
Energía Solar. Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicos
México, Harla S.A. de C.V. 1984.

- 12) MORAN ORELLANA, GUILLERMO N.
Calibración de un Solarímetro
San Salvador, Universidad de El Salvador
1984. Tesis Mecanografiada.

- 13) RIVEROS, H.G. y ROSA LUCIA
El Método Científico Aplicado a las Ciencias
Experimentales
2a. Edición. México.
Editorial Trillas. 1990.

- 14) STRONG., JOHN
Técnicas de Física Experimental
Buenos Aires Argentina.
EUDEBA, 1965.

- 15) ZEMANSKY, N.W.
Heat and Thermodynamics
Rogakusha, Tokyo Mc-Graw-Hill
1958.

- 16) ZIMAN, J.M.
Principles of the Theory of Solids.
Cambridge, the University Press. 1972.