

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE FISICA

DETERMINACION DE LA CURVA DE HISTERESIS EN UN CRISTAL
FERROELECTRICO (SAL DE ROCHELLE) Y SU VARIACION CON LA TEMPERATURA

TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
LICENCIADO EN FISICA

Asesor: M.S. Ethelvina Morillo de Escobar

P R E S E N T A

JOSE RAMON BELTRAN

San Salvador, 25 de Abril de 1977



37-244
453d
977
F.C.C. y HH.

F.S.1

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

ACTA

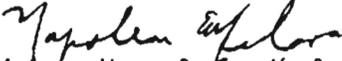
Los abajo firmantes miembros del Tribunal Examinador del Trabajo de Graduación del Br. José Ramón Beltrán Abrego, por acuerdo de Junta Directiva No. 22 de fecha diecisiete de mayo de mil novecientos setenta y siete, hacemos constar que en este día hemos oído una defensa oral sobre el trabajo de graduación titulado "Determinación de la curva de Histéresis en un Cristal Ferroeléctrico (Sal de Rochelle) y su variación con la Temperatura".

Después de las deliberaciones respectivas hemos acordado evaluar el trabajo como "APROBADO".

Ciudad Universitaria, a los veinte días del mes de mayo de mil novecientos setenta y siete.


Ing. David Escobar


Lic. Mario Saca


Lic. Napoleón Melara

C.C. Jefe del Depto. de Física
Ing. José Francisco Aguirre. -

bnsdes./



AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, M.S. Ethelvina Morillo de Escobar, por su constante preocupación para que el trabajo fuese un éxito y además por permitirme hacer dicho trabajo en el proyecto - "Propiedades Físicas de los Materiales Semiconductores y sus Aplicaciones" del cual ella es Coordinadora.

Al Dr. Milton Ferreira de Souza, por haber sugerido el tema de tesis y por sus consejos muy apropiados para poder realizar el trabajo.

A los Dres. Jaime González Basurto y Antonio Díaz Góngora por sus recomendaciones acertadas durante su visita al Departamento con el objeto de asesorar el proyecto antes mencionado.

Al Dr. Rolando Vlademir Jiménez, por haberme brindado - sugerencias de gran valor en la fase de la obtención de la curva de Histéresis.

Al Dr. Mauricio Hernández, del Departamento de Química por haberme dado ideas muy atinadas en la fase del crecimiento de cristales.

A mis compañeros del grupo de Estado Sólido: Rafael - Enrique Hernández Rosales y Orlando Zelaya Angel, por haberme dado ánimo y por sus valiosos consejos en el desarrollo - del trabajo.

Al compañero Pablo Aurelio Marroquín (PITO), por su de cidida ayuda en la realización de las ilustraciones.

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la ejecución del trabajo.

INTRODUCCION .

El presente trabajo de tesis fue un hecho como parte de las actividades del proyecto "Propiedades Físicas de los Materiales Semiconductores y sus Aplicaciones", y se trató de estudiar el fenómeno de la ferroelectricidad obteniendo la curva de histéresis como función de la temperatura en el cristal de la sal Rochelle y con ello lograr una mejor comprensión de las propiedades físicas de los materiales ferroeléctricos.

Como una consecuencia de este trabajo, hubo necesidad de crecer cristales y eso dejó una buena experiencia, pues se logró aprender una técnica, aunque sencilla, efectiva, para crecer cristales, a base de una solución. Con esta técnica y el estudio de algunos cristales en particular, se logró una mejor comprensión de la estructura interna de la materia.

El trabajo se desarrolló de acuerdo al siguiente orden : En el primer capítulo se trata de tener la idea clara acerca de qué es un cristal desde el punto de vista físico y además de conocer algunas propiedades generales de los cristales, finalizando con un breve estudio de los sistemas cristalinos monoclinico y ortorrómbico por cristalizar la sal en estudio en dichos sistemas.

En el segundo capítulo se trata de conocer el origen de la sal Rochelle y buscarle la ubicación que posee dentro de los cristales ferroelétricos.

En el tercer capítulo se plantean los dos métodos generales para crecer cristales a base de una solución.

En el cuarto capítulo se describe en forma sencilla el fenómeno de ferroelectricidad e histéresis pues es el fenó

menò que sirve de base a nuestro trabajo.

En el quinto capítulo se detalla todo el proceso experimental y se menciona el equipo utilizado.

En el sexto capítulo se muestran los resultados experimentales y su respectivo análisis.

En el séptimo capítulo se tiene las conclusiones y recomendaciones pertinentes del trabajo.

I N D I C E

	Pág.
CAPITULO I : LOS CRISTALES	1
CAPITULO II : CRISTAL DE TARTRATO DE SODIO Y POTASIO TETRAHIDRATADO.....	7
CAPITULO III : CRECIMIENTO DE CRISTALES	11
CAPITULO IV : FERROELECTRICIDAD : HISTERESIS	16
CAPITULO V : PARTE EXPERIMENTAL	20
CAPITULO VI : R E S U L T A D O S	29
CAPITULO VII : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
BIBLIOGRAFIA :	35
A N E X O S :	37

CAPITULO I

LOS CRISTALES

I-1 Introducción

Los sólidos cristalinos desde el punto de vista físico se consideran como cuerpos ya sea formados por átomos, moléculas o iones, de tal forma que presentan un ordenamiento regular y periódico, es por eso que necesitamos conocer acerca de la naturaleza de los cristales y para ello, en el desarrollo del presente capítulo se dan varias definiciones que son básicas para el análisis de la estructura cristalina; entre ellas citamos la de la red espacial, celda unidad, celda primitiva, etc.

I-2 La Red Espacial

La red espacial se puede interpretar como un conjunto de puntos distribuidos en el espacio en forma ordenada, si sustituimos cada punto por un ión, átomo o molécula generamos la red cristalina.

I-3 La Celda Unidad

Es una unidad modelo a través de la cual podemos conocer en forma completa el cristal; pues basta apilar -- un conjunto de ellas y especificar las características -- de dicha unidad tales como: sus dimensiones, forma y su constitución y tenemos el conocimiento del cristal como un todo.

I-4 La Celda Primitiva

La celda primitiva es aquella unidad estructural que posee al menos un átomo en su centro de gravedad, también

se puede considerar como la región del cristal definida - por tres vectores base (\vec{a} , \vec{b} , \vec{c}), los cuales cuando son trasladados un cierto múltiplo entero reproducen una región similar del cristal.

Las celdas primitivas poseen la propiedad de periodicidad de traslación, propiedad importante para comprender la naturaleza en sí del cristal. Supongamos que tenemos - una celda primitiva definida por tres vectores base ---- (\vec{a} , \vec{b} , \vec{c}) tal como lo muestra las siguientes redes en la - que cristaliza nuestra sal en estudio. (Ver figura 1).

Características:

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$$

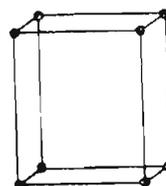
Característica

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Red Monoclínica



Red Ortorrómbica

Figura 1.

Tomemos un vector posición, \vec{R} , el cual nos da un punto de la red consideremos otro punto \vec{R}' el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$\vec{R}' = \vec{R} + m_1 \vec{a} + m_2 \vec{b} + m_3 \vec{c} \quad \text{donde}$$

m_1 , m_2 , m_3 son números enteros o sea que:

$$\vec{R}' = \vec{R} + \vec{T} \quad (I-1)$$

Tomando en cuenta la periodicidad de traslación de la red se tiene que un observador situado en el punto \vec{R}' verá el mismo arreglo a su alrededor que el situado en el punto \vec{R} .

La operación de traslación para estos dos puntos está representada en la ecuación (I-1)

El conjunto de operaciones de esta naturaleza para todos los valores enteros de m_1 , m_2 y m_3 constituye un grupo de traslaciones del cristal, entendiendo el grupo como una estructura que cumple con el rigorismo matemático.

I-5 Las Redes de Bravais

Hemos visto que al asociar un conjunto de átomos, moléculas con cada punto de la red en el espacio, generamos la estructura cristalina. Los puntos en la red pueden ser arreglados de catorce maneras distintas, con la condición de que cada punto tenga exactamente el mismo número de vecinos. Estas catorce combinaciones forman las catorce redes de Bravais, las cuales se clasifican en los siguientes sistemas cristalinos: Cúbico, Tetragonal, Hexagonal, Trigonal, Ortorrómbico, Monoclínico y el Triclínico.

I-6 Grupos Puntuales

A la serie de operaciones de Simetría que se pueden aplicar a un punto en el espacio perteneciente al cristal, sin alterar su posición se le conoce como grupo puntual. Es conveniente entonces tener claro en qué consiste un elemento de simetría; un elemento de simetría es aquella -

1 E. Flint "Principios de Cristalografía" Editorial Paz Moscú, 1965.

operación geométrica que efectuada sobre el cristal deja su forma inalterada; entre dichos elementos de simetría se tienen:

- a) Plano de reflexión
- b) Eje de simetría
- c) Eje de rotación
- d) Eje de rotación-inversión.

Como se ve, la teoría de los grupos es de importancia capital en el estudio de los cristales; pues tanto las traslaciones como las rotaciones de un cristal se pueden estudiar en base a estas estructuras matemáticas y con ello lograr entender sus propiedades físicas; existen treinta y dos grupos puntuales para los cristales los cuales se encuentran clasificados según el sistema cristali-
no²'

El cristal de la sal Rochelle, cristaliza sobre +23°C y por debajo de -18°C en el Sistema Ortorrómbico y en el intervalo de (-18°C ^ + 23°C) en el Sistema Monoclínico; - es por eso que trataremos en forma breve ambos sistemas.

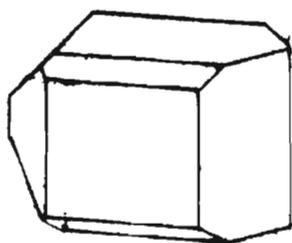
Sistema Monoclínico

El sistema monoclínico pertenece a la clase diédrica axial con simetría de L^2 . La clase presenta tres formas simples:

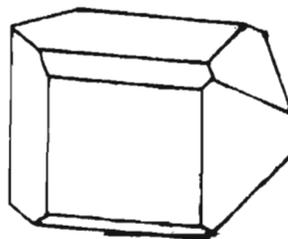
- a) el pedión {010 } ó {0 $\bar{1}$ 0 }
- b) el pinacoide {100}, { 001},{h 0 ℓ }
- c) el domo {0 k ℓ },{ h k 0} ,{ h k ℓ } forma general.

2' Frederick C. Brown "Física de los Sólidos" Editorial Reverte, S.A., 1970.-

Muchas sustancias cristalizan en esta clase y algunas de ellas nos dan combinaciones enantiomorfas, es decir, cuerpos en que uno es la imagen especular del otro; pero no superponibles, entonces se trata de sustancias distintas o sea con propiedades diferentes. El ácido tartárico, dextrógiro y levógiro es un buen ejemplo de las sustancias enantiomorfas, puesto que de aquí se derivan los dos enantiómeros de la sal Rochele (Ver figura 2).



Acido Levógiro



Acido Dextrógiro

Figura 2

El término dextrógiro y levógiro se discutirá en el Capítulo II.

Sistema Ortorrómbico

La clase 222 es la que agrupa al sistema ortorrómbico³ esfenoidal, observemos en la figura número 3 sus ejes y estereograma.

3 F.C. Phillips "Introducción a la Cristalografía"
John Wiley & Sons, Inc. New York 1971.-

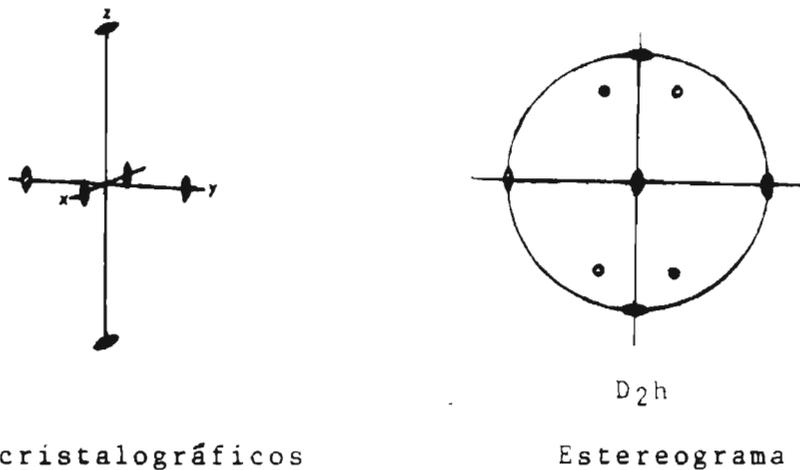
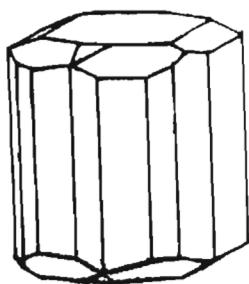


Figura 3.

Vemos que posee tres ejes binarios perpendiculares entre sí y además tres formas simples:

- a) El pinacoide $\{ 100 \}$, $\{ 010 \}$, $\{ 001 \}$
- b) El prisma $\{ 0kl \}$, $\{ h0l \}$, $\{ hk0 \}$
- c) El esfenoide $\{ hkl \}$ Forma general

El cristal de la sal Rochelle es un miembro de la serie de los tartratos y la forma esfenoïdal revela su verdadera simetría tal como se puede apreciar en la figura 4.

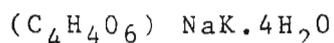


Cristal de la Sal Rochelle

Figura 4.

CAPITULO II

CRISTAL DE TARTRATO DE SODIO Y POTASIO TETRAHIDRATADO

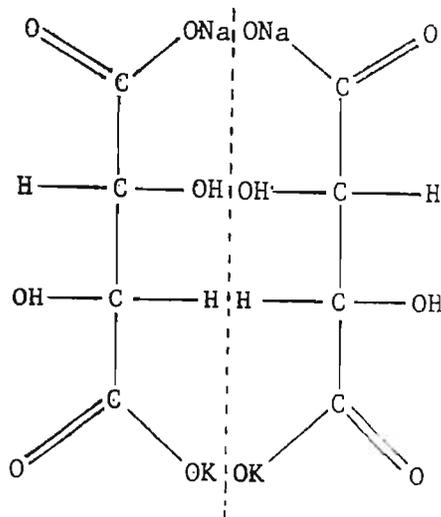
II-1 Introducción

El cristal con el cual se trabajó en este proyecto de tesis es el tartrato de sodio y potasio tetrahidratado, dicho cristal es crecido a base de una solución de la sal Rochelle en el agua, el nombre de Rochelle - le viene dado por ser ese el lugar donde se le preparó por la farmacéutica Seignette en el año 1672 por lo -- cual se llama también "Sal Seignette".

II-2 Propiedades Químicas y Físicas de la Sal Rochelle

Los isómeros son aquellas sustancias que poseen la misma fórmula molecular pero que presentan propiedades químicas y físicas diferentes. Dentro de los isómeros - se encuentran los estereoisómeros, que son cuerpos que po - seen la misma estructura molecular pero que cambia la - distribución de sus átomos en el espacio.

La sal Rochelle presenta dos enantiómeros (observar la figura N°5), es decir los estereoisómeros en el que - uno es la imagen especular del otro; pero no superponi-- bles por lo tanto se trata de dos compuestos distintos, y si mezclamos cantidades iguales de dichos enantiómeros obtenemos el racemato de la sal Rochelle.



Enantiómeros de la
Sal Rochelle

Figura N°5

Si entre una fuente de luz y el ojo de un observador colocamos un cristal, se puede afirmar que dicho cristal es un cuerpo ópticamente activo si desvía el plano de la luz polarizada ya sea a la izquierda o a la derecha. El ácido racémico es formado a partir del ácido tartárico dextrarrotatorio (+) y el levorrotario (-), llamados así por desviar el plano de la luz polarizada a la derecha e izquierda respectivamente.

El cristal Rochelle obtenido de los ácidos (+) y (-) es ópticamente inactivo si están mezclados en proporciones iguales, de lo contrario es ópticamente activo tal como sucedió en nuestro experimento.

Cristalográficamente el cristal se clasifica como vimos en el Capítulo I, en ortorrómbico en la fase no ferroeléctrica y monoclinico en la fase ferroeléctrica.

Es sabido que es uno de los primeros cristales en que se descubrieron propiedades ferroeléctricas; pues su comportamiento al aplicarle un campo eléctrico es análogo al de los materiales ferromagnéticos al aplicarles -

un campo magnético.

Los cristales ferroeléctricos son aquellos en los que el centro de cargas negativas no coincide con el centro de cargas positivas, el cristal Rochelle junto con las sales de: $\text{NaK}(\text{C}_4\text{H}_2\text{D}_2\text{O}_6) \cdot 4\text{D}_2\text{O}$ y $\text{LiNH}_4(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}$ conocidas como sales isomorfas asociadas representan el primer grupo natural de los cristales ferroeléctricos¹.

El cristal Rochelle mostró experimentalmente una intensidad de polarización espontánea $\vec{P}_{(s)}$ en la dirección del eje "a," muy poca en la dirección del eje "b," y no fue posible observar nada en el eje "c," este hecho nos conduce a afirmar que el cristal es anisotrópico pues vemos que la intensidad de $\vec{P}_{(s)}$ depende de la dirección en que se aplique el campo eléctrico.

El momento dipolar local \vec{P}_i está relacionado con el campo eléctrico por medio del tensor de polarizabilidad de la siguiente manera:

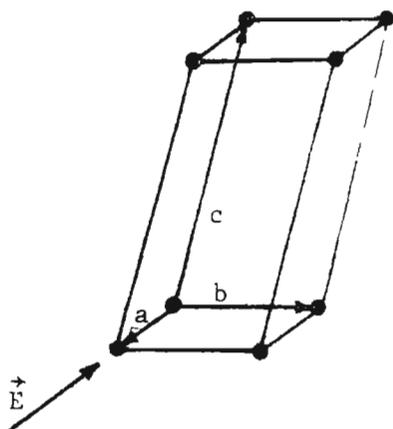
$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} & \alpha_{xz} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} & \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & \alpha_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \dots\dots(II-1)$$

La matriz α_{ij} representa el tensor de polarizabilidad, \vec{P}_i el momento dipolar y \vec{E}_i el campo local. Si la dirección de la polarización inducida en nuestro cristal coincide con la polarización espontánea podemos escribir la siguiente expresión matricial:

¹ Charles Kittel "Introducción a la Física del Estado Sólido. Editorial Reverté, S.A., 1956.-

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & \epsilon_{xz} \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ \epsilon_{zx} & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II-2)$$

El cristal mostró mayor valor para $\vec{p}_{(s)}$ en la dirección del eje "a" (ver figura 6).



Red monoclinica

Figura 6

Para finalizar este capítulo presentamos una serie de - datos importantes de la sal Rochelle en condiciones de temperatura y presión normal.

- 1) Indices de refracción (1.493 , 1.496) para la línea D del sodio.
- 2) Densidad 1.79 g/ml.
- 3) Punto de fusión 55°C
- 4) Punto de ebullición 215°C
- 5) Temperaturas de curie 255°K inferior, 296°K superior.
- 6) Muy soluble en el agua.
- 7) Es muy higroscópica.
- 8) Constante dieléctrica del orden de $10^4 \frac{\text{coul}^2}{\text{New-m}^2}$
- 9) Cristal ferroeléctrico en el rango de temperaturas de - (-18°C ^ + 23°C).

CAPITULO III

CRECIMIENTO DE CRISTALES

III-1 Introducción

Hasta aquí se tiene la idea aproximada de qué es un cristal; pues es una realidad que una de las características más importantes es que sus átomos se disponen en forma ordenada en la red cristalina, y este orden está basado en la repetición. Otra característica de relevancia en los cristales es su crecimiento, pues a menudo tenemos la oportunidad de observar y apreciar la forma de un cristal, que presenta sus caras muy bien formadas y casi perfectamente distribuidas de tal manera que nos causa admiración, sin embargo pocas veces nos preguntamos cómo un cristal llegó a tener ese tamaño y por qué esa forma y no otra; pues bien, todo cristal que existe en la naturaleza ha sido crecido ya sea en forma natural o artificial. De todo lo anterior podemos darnos cuenta que un cristal no se convierte súbitamente en lo que es, sino que crece para serlo. Los cristales que crecen en forma natural tienen el inconveniente que casi nunca están libres, pues hay otros cuerpos que los rodean y por ende se estropea su crecimiento, pues al chocar con otros, cesa de crecer. Para los cristales que crecen en forma artificial a base de una solución debe tenerse especial cuidado en mantener su temperatura más o menos constante, pues los cambios de temperatura afectan la velocidad de crecimiento lo cual da por resultado la formación de

cristales espúreos adheridos al cristal en proceso de crecimiento y por ende no se obtiene un monocristal como es deseado.

III-2 Como Preparar una Semilla Cristalina

Siempre que intentamos crecer un cristal a partir - de una sal en solución, necesitamos de gérmenes o semilla, entonces para ello hacemos una solución saturada y la dejamos con todo cuidado, en un lugar adecuado y libre de vibraciones, donde la temperatura sea más o menos constante y además la protegemos con un paño para evitar impurezas como el polvo o cuerpos extraños; pues recorde mos que un buen germen es un paso seguro para obtener un buen cristal, de lo contrario tendremos un cristal no -- deseado. Si la solución se sobresatura sin dar gérmenes, le agregamos una pequeña porción de sal para que cristalice y al cabo de cierto tiempo en el fondo del frasco estarán depositados una serie de cristalitos, los cuales son considerados gérmenes o cristales en potencia. Con sumo cuidado los extraemos con pinzas teniendo la precaución de no tocarlos con la mano, pues les podríamos afectar su - estructura con impurezas. Los cristales gérmenes así ob- tenidos deben tener un tamaño de aproximadamente de 4 a 5 mm de largo para poder ser manipulados, es decir, poder amarrarlos con el hilo y someterlos a crecimien to por cualquiera de los métodos que expondremos más adelante.

III-3 Proceso Para Obtener una Solución Saturada

Para preparar la solución saturada podemos proceder así: ya sea disolviendo sólido en una solución no satu- rada o bien separando soluto de una solución sobresaturada. Ahora veremos porque el último método es preferible.

Si se tiene una sal en el fondo de un frasco con agua, se disolverá rápidamente al principio, pero pronto estará rodeada de solución concentrada. Puesto que la solución es más densa que el agua, tenderá a permanecer en el fondo si no la agitamos, los ulteriores progresos hacia la saturación dependerán de la difusión de la sal hacia arriba o sea a la parte de la solución menos saturada, esto tiene el inconveniente de ser un proceso muy lento.

Quizás el método más conveniente, es el de dejar que una solución sobresaturada deposite el exceso de sal en el fondo del frasco, pues dichos cristallitos que forma la sal extraen sólido de la solución, dejando a ésta que le rodea menos densa que el resto. Entonces la solución de menor densidad trata de subir en forma lenta, de este modo la solución se agita por sí sola y la solución llega a saturarse con el tiempo.

III-4 Dos Métodos Generales para Crecer Cristales

La sal que se empleó en este trabajo, como ya se dijo, es la "ROCHELLE", la cual es soluble en el agua y cristaliza a partir de una solución, es por eso que aquí expondremos dos métodos generales para crecer cristales a partir de una solución.

1° Método del Frasco Sellado (a base de una solución sobresaturada).

Lo primero que se hace en este método, es preparar la solución saturada, a la temperatura a la cual el cristal va a crecer; luego, se calienta unos cuantos grados para que se vuelva no saturada y le agregamos una pequeña porción de sal, dejando que se enfríe hasta la temperatura inicial, la solución entonces se considera ----

sobresaturada; luego se selecciona un cristal ger--
men, más o menos geométricamente perfecto, se ama--
rra con hilo muy fino y se introduce en la solución,
cerrándose herméticamente el frasco; el germen cre--
cerá a medida que el exceso de sal en la solución -
cristalice sobre él lentamente. (Ver figura N° 7).

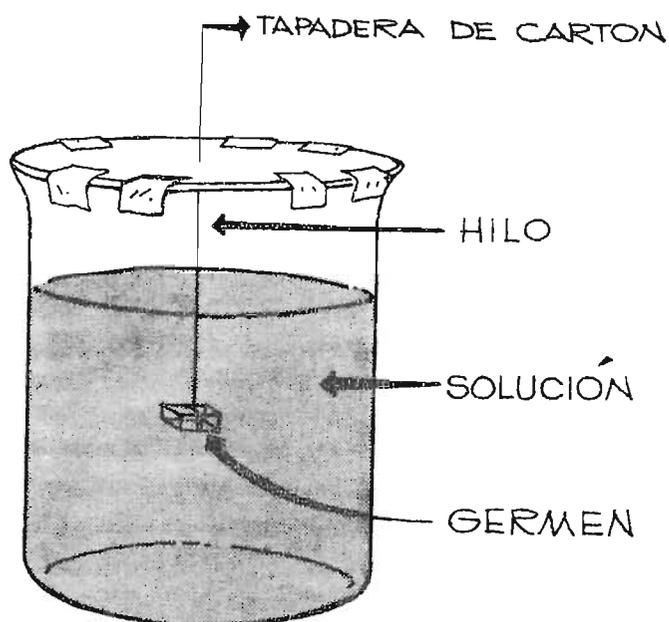


Figura N° 7

2° Método de Evaporación (a base de una solución saturada).

En este método, también lo primero que se hace es una solución saturada, se selecciona un monocristal - geométricamente perfecto como germen de un tamaño de más o menos de 5 mm. de longitud; para poder amarrarlo con un hilo muy fino; luego se introduce en la solución saturada suspendido de un alambre en forma de cobra, tal como lo muestra la figura N°8, el frasco se tapa con un paño de tal manera que se evapore el líquido y la solución se sobresature lentamente; como consecuencia el cristal comienza a crecer.

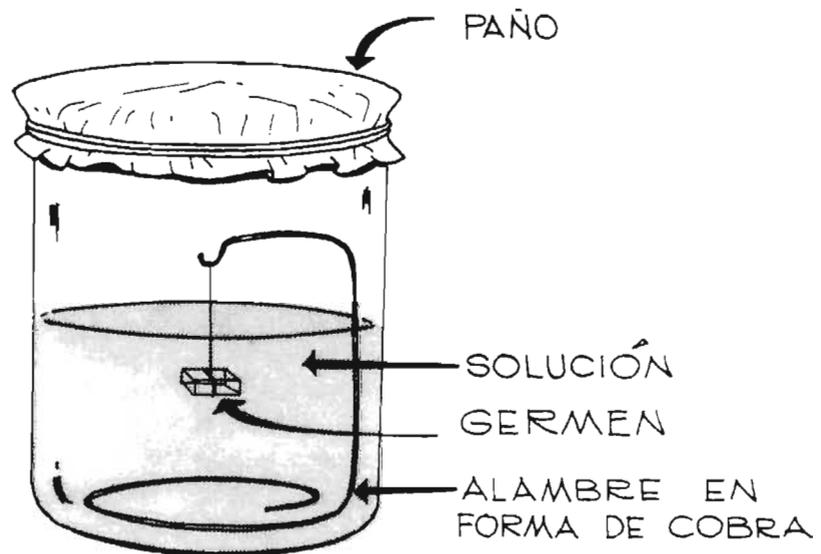


Figura N° 8.

CAPITULO IV.

FERROELECTRICIDAD : HISTERESIS

IV-1 Introducción

La sal Rochelle ha sido motivo de diversas investigaciones como son, el desdoblamiento que sufre la curva de histéresis al ser bombardeada la muestra con rayos γ o rayos X, lo mismo que las deformaciones bien marcadas en la curva por efectos de dopamiento con iones (Be^+) ¹.

Nuestra investigación trata solamente de comprobar la variación de la curva de histéresis en función de la temperatura para ello, se abordó el fenómeno de ferroelectricidad e histéresis tal como puede verse a continuación.

IV-2 Ferroelectricidad e Histéresis

El fenómeno físico de la ferroelectricidad e histéresis² se da en aquellos materiales que poseen una asimetría en el centro de sus cargas (cristales ferroeléctricos) y que gozan de una autopolarización, la cual da como resultado que en los dominios que presenta el cristal aparezca una polarización espontánea $\vec{p}_{(s)}$ representativa de cada dominio.

Supongamos que tenemos una muestra ferroeléctrica sin historia, luego apliquémosle un campo eléctrico \vec{E} de tal -

1 Gyoichi Nogami, Nobutaka Ishigaki and Masahide Imasaki. "The Internal Bias of Be Doped Rochelle Salt". Japanese Journal of Applied Physics, Vol 13 Octubre de 1974.

2 Wert y Thomson "Física de los Sólidos" Mc Graw-Hill Book Company, 1964.

forma que el proceso comience desde cero, es decir, $|\vec{E}| = 0$ y que vaya aumentando en una forma gradual para ir obteniendo la curva de histéresis, punto a punto como lo muestra la figura N°9.

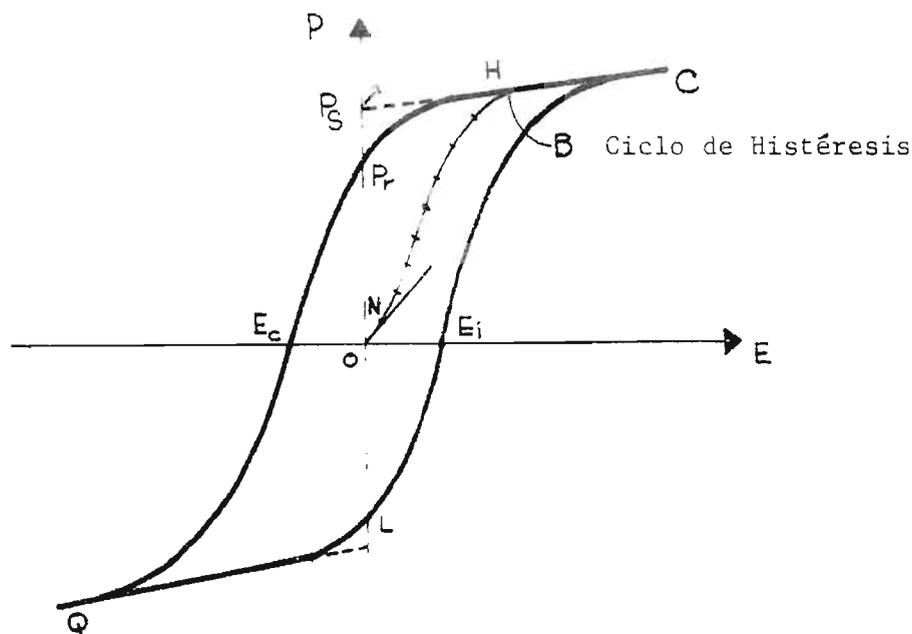


Figura N°9

A medida que el campo va aumentando los vectores polarización de cada dominio de la muestra se van alineando en el sentido del campo hasta llegar a la saturación. Luego comenzamos a disminuir el campo hasta alcanzar de nuevo un valor cero según muestra el trayecto $\overline{CHP_r}$, en donde se ve que aunque el campo sea cero, existe una polarización remanente, esto quiere decir que dentro de la muestra ha quedado una gran cantidad de dipolos orientados en el sentido original del campo y para desorientarlos, aplicamos un campo en sentido contrario al de su alineamiento, este paso se puede apreciar en el trayecto $\overline{P_r E_c}$, donde en el punto E_c la polarización muestra un valor de cero; pero como el campo sigue aumentando de nuevo, se vuelve a satu

rar pero en el sentido contrario, esto sucede en el trayecto $\overline{E_c Q}$ luego volvemos a hacer el campo cero según el trayecto \overline{QL} , finalmente aplicamos un campo mayor que cero tratando de desorientar los dipolos en el trayecto $\overline{LE_1}$ y de nuevo orientarlos hasta alcanzar la saturación como se puede ver según el trayecto $\overline{E_1 C}$ y con ello hemos completado un ciclo de histéresis. De la curva de histéresis de la figura 9, obtenemos la siguiente información:

$\overline{OP_s}$ = Valor de la polarización espontánea

$\overline{OP_r}$ = Valor de la polarización remanente

$\overline{OE_c}$ = Valor del campo coercitivo

$\frac{\Delta P(s)}{\Delta E}$ = Valor de la constante dieléctrica.

$\overline{HP_s}$ = Línea tangente a la zona de saturación y que corta al eje P, para obtener el valor de polarización espontánea. Cabe mencionar que es el método empleado en esta investigación para conocer los valores de $\vec{P}(s)$.

Una de las causas por la cual aparece el ciclo de histéresis descrito en la parte anterior es la oposición que ofrecen los dominios a ser desplazados por el campo eléctrico.

Es un hecho evidente que la curva de histéresis varía con la temperatura, pues si experimentalmente mantenemos el campo constante además de otros parámetros que puedan afectar el ciclo y variamos la temperatura, la curva varía notablemente, si alcanzamos la temperatura de curie del material el fenómeno se vuelve una línea inclinada. La temperatura de curie T_c es la temperatura a la cual la muestra pasa del estado polarizado al no polarizado. Es decir, que sobre el valor de dicha temperatura la polarización guarda una relación lineal con el campo aplicado y bajo dicha temperatura, T_c ,

presenta curva de histéresis y la polarización $\vec{P}_{(s)}$ está relacionada en una forma no lineal con el campo.

Es conocido que el cristal Rochelle es el único ferroeléctrico que posee dos temperaturas críticas o de curie de aproximadamente $(-18^{\circ}\text{C} \wedge + 23^{\circ}\text{C})$, presentando en este intervalo comportamiento ferroeléctrico.

Arriba de $+ 23^{\circ}\text{C}$ y debajo de -18°C la susceptibilidad dieléctrica obedece la ley de Curie-Weiss.

Sobre $+ 23^{\circ}$ se tiene:

$$\chi_a \approx \frac{\epsilon_a}{4\pi} = \frac{C_1}{T-T_c} \quad \begin{matrix} C_1 = 179^{\circ}\text{k} \\ T_c \approx 296^{\circ}\text{k} \end{matrix}$$

Bajo -18°C se tiene:

$$\chi_a = \frac{C_2}{T_c - T} \quad \begin{matrix} C_2 = 93.8^{\circ}\text{k} \\ T_c \approx 255^{\circ}\text{k} \end{matrix}$$

El subíndice "a" de χ indica que la sal Rochelle muestra polarización espontánea en forma intensa en la dirección ---
($+ a \wedge - a$).

CAPITULO V

PARTE EXPERIMENTAL

V-1 Introducción

La parte experimental del presente trabajo se dividió en dos fases: Crecimiento del cristal y la obtención de la curva de histéresis.

En la primera fase el objetivo fue crecer un monocristal con el mínimo de impurezas para lograr así, mejores resultados. Para ello se procedió a la purificación de la sal tomando como punto de referencia del grado de pureza, la determinación experimental del punto de fusión. Luego se obtuvieron los gérmenes como se describió en la página 12, y se procedió a sembrarlos en una solución saturada por evaporación.

V-2 Purificación de la Sal

Se tomaron 80 gramos de sal Rochelle y se disolvieron en 62 ml. de agua destilada a una temperatura de 38°C; luego se procedió a purificarla; para ello la solución obtenida se filtró con papel filtro ordinario y luego se cristalizó en un baño de hielo y agua a una temperatura de aproximadamente 1°C, la sal cristalizó en el instante debido al enfriamiento brusco. La sal así obtenida se cristalizó nuevamente dos veces más.

Después del proceso anterior el punto de fusión obtenido, en el aparato para determinar el punto de fusión FISHER JOHNS" son los siguientes:

muestra	Punto de fusión:
sal sin purificar	(54.1 ± 0.1)°C
sal cristalizada una vez	(54.4 ± 0.1)°C
sal recristalizada dos veces	(54.5 ± 0.1)°C
sal recristalizada tres veces	(54.6 ± 0.1)°C

No obstante los resultados anteriores sometimos a la sal a otro proceso de determinación del punto de fusión - con el objeto de verificar el grado de purificación ; el proceso en mención¹ consiste en lo siguiente: (Ver figura 10).

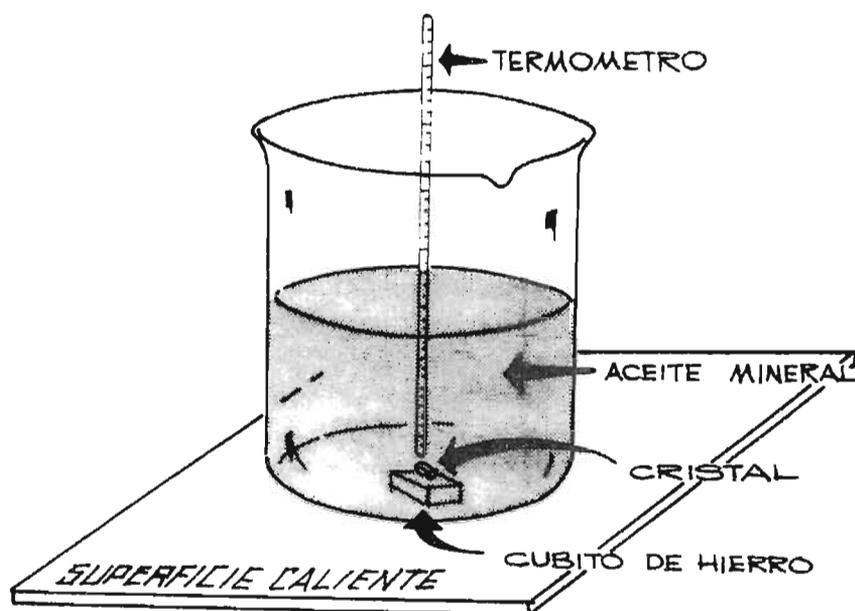


Figura N°10

Depositar 50 ml. de aceite mineral en un matraz de 100 ml luego en el fondo colocar un cubito de hierro dulce, y con una pinza muy limpia poner un cristal muy pequeño de sal Rochelle sobre el cubito de hierro y calentar lentamente en el momento que el cristal se funde y se adhiere al bulbo del termó-

¹ ALAN HOLDEN y PHYLIS SINGER "Los Cristales y su Crecimiento". Eudeba, 1966.

metro leer la temperatura, para nuestro caso fue de --- (54.5°C \pm 0.1 °C), esto confirmó de nuevo que la sal es taba casi en su totalidad libre de impurezas.

V-3 Obtención de Gérmenes

De la sal purificada se tomaron 75 gramos y se disolvieron en 58 ml de agua destilada (Ver Figura N°11).

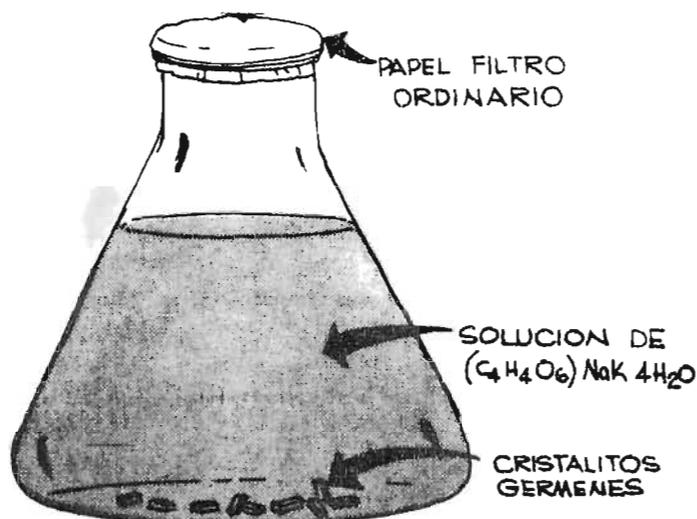


Figura N°11

Para lograr disolver los 75 gramos de sal, la solución se calentó hasta 45°C, en seguida la solución se protegió de todo tipo de movimiento y comenzó a enfriarse lentamente hasta alcanzar la temperatura del laboratorio de aproximadamente 24°C, después de un intervalo de tiempo de 24 horas en el fondo del erlenmeyer habían cristalitas que presentaban la forma del cristal de la sal Rochelle y de un tamaño que oscilaba entre tres y cinco mm de largo. Se decantó la solución y los cristalitas semilla se secaron con papel absorbente y se guardaron protegiéndolos de la humedad debido a que el cristal es higroscópico.

V-4 Crecimiento del Cristal

Para crecer el cristal de tartrato de sodio y potasio se ocupó el siguiente equipo:

Balón de 250 ml , Sal Rochelle, hot plate, papel filtro Whatman N°42, termómetro, balanza.

Primeramente se intentó crecer el cristal por el método de evaporación propuesto en el capítulo tercero página 15 pero el hilo le proporcionaba una discontinuidad interna, por lo cual se descartó este proceso de crecimiento ya que podía afectar al cristal en el momento de obtener la curva de histéresis. Se hicieron varios ensayos hasta que se obtuvo un monocristal de la forma y tamaño que se deseaba de la siguiente manera: Se tomaron 50 gramos de sal Rochelle para 39 ml de agua destilada, se calentó la solución hasta una temperatura de 45°C para lograr que toda la sal se disolviera, luego se dejó enfriar la solución hasta una temperatura de 24°C, en ese momento se le introdujo un germen geométricamente regular y de un tamaño de aproximadamente 5 mm y se le tapó con papel filtro Whatman N°42 - dejándosele en un lugar libre de movimientos. El crecimiento fue lento, duró 23 días, pero se obtuvo un monocristal de un volumen de 3 cm³. presentando la estructura cristalina del cristal Rochelle. Una vez dominada la técnica que dio resultado se crecieron 7 ejemplares más de los cuales solamente se conservan 3 ejemplares. El sistema sencillo que se montó para crecer el cristal puede verse en la Figura N°12.-

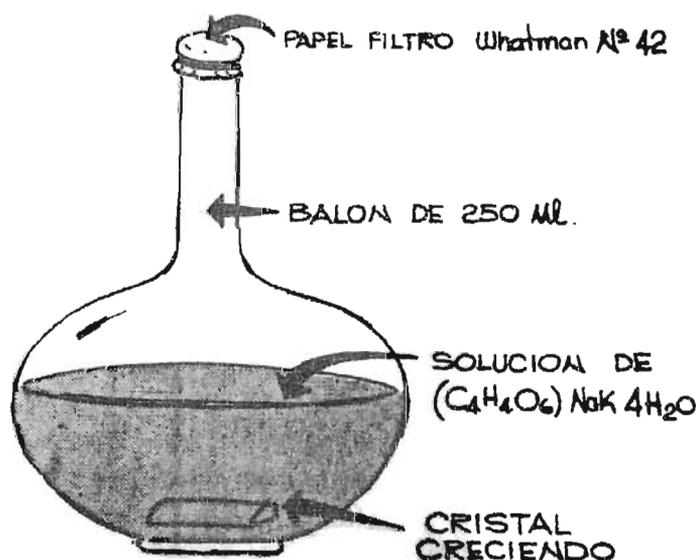


Figura N: 12

V-5 Obtención de la Curva de Histéresis

Como se mencionó antes, la segunda fase experimental - de este trabajo es la obtención de la curva de histéresis la cual se subdividió así:

- a) Preparación de la muestra.
- b) Diseño y construcción del circuito.
- c) Diseño del criostato.

V-a Preparación de la muestra:

La preparación de la muestra consistió, en construir - un capacitor a partir de un cristal de la sal Rochelle, para poder ser sometido a un circuito eléctrico y con - ello lograr obtener la curva de histéresis.

Como ya se explicó en el capítulo II, la Sal Rochelle da con mayor intensidad la polarización espontánea $P_{(s)}$ en el eje "a"; es por eso que a la muestra se le redujo de espesor perpendicularmente a dicho eje hasta un valor de aproximadamente 0.5 mm; esto fue hecho con lija de hierro N° 320 y 400. Después de pulir el cristal y -- limpiarlo muy cuidadosamente con acetona, se procedió a hacerle los electrodos óhmicos con pintura de plata con el fin de tener un capacitor de placas paralelas con -- sal Rochelle como dieléctrico, tal como lo muestra la Figura N° 13, y así poder adaptarlo al circuito para determinar la curva de histéresis.

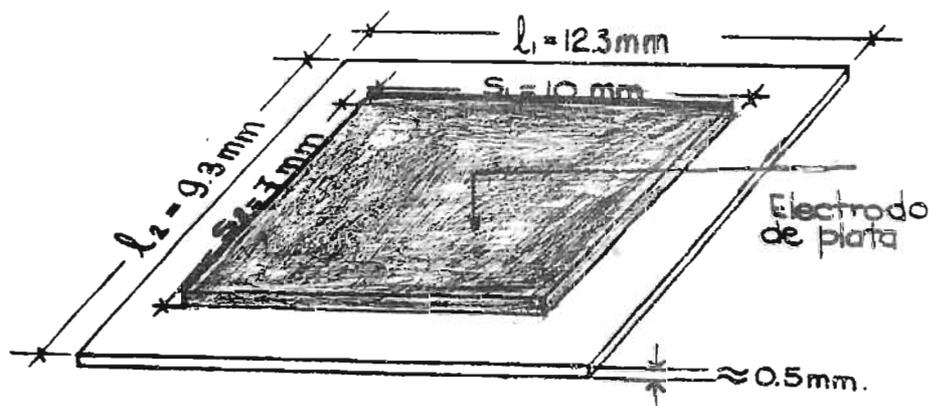


Figura N: 13

V-b Diseño y Construcción del circuito con el siguiente -
equipo:

V.O.M. (Stark MK-9)

Autotransformer variable (Type 116B)

Banco de prueba hecho en el laboratorio

Digital multimeter keithley modelo 160B

Bomba de vacío Hyvac Cenco Serie N°7341

Osciloscopio Type 561A Tektronix

Criostato construido en el Taller de Mecánica de la Fa
cultad de Ciencias y Humanidades.

Caja de capacitancias Heath, Modelo EUW-29

Transformador LeyBold N°56214

Con el equipo anteriormente descrito se construyó el -
circuito mostrado en la Figura N°14.

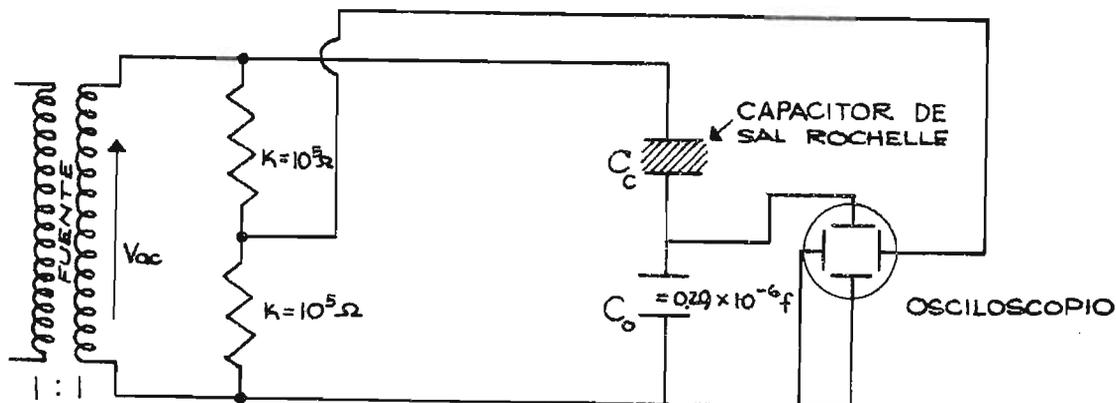


Figura N°14

La fuente es un transformador cuyas espiras están en una relación de 1 a 1; las resistencias tienen un valor de 10^5 ohmios, protegen el cristal y los demás elementos del circuito. El voltaje alterno producido por la fuente es directamente proporcional al campo que da origen a la polarización de la muestra y va conectado a las placas horizontales del osciloscopio. La polarización espontánea -

es directamente proporcional al voltaje del capacitor de 0.29×10^{-6} faradios por ende la polarización es proporcional al voltaje en Y, este voltaje va conectado a las placas de deflexión vertical.

Como el objeto fundamental de este trabajo consistía en analizar las variaciones de la curva de histéresis con la temperatura, hubo necesidad de construir un criostato (ver anexo 1) pues el cristal de la sal Rochelle, como ya se dijo es higroscópico y se tenía que bajar la temperatura unos dos grados más abajo de -18°C y en un aparato como el criostato se logran las condiciones adecuadas para poder experimentar.

El cristal fue montado en el criostato como muestra la Figura N°16

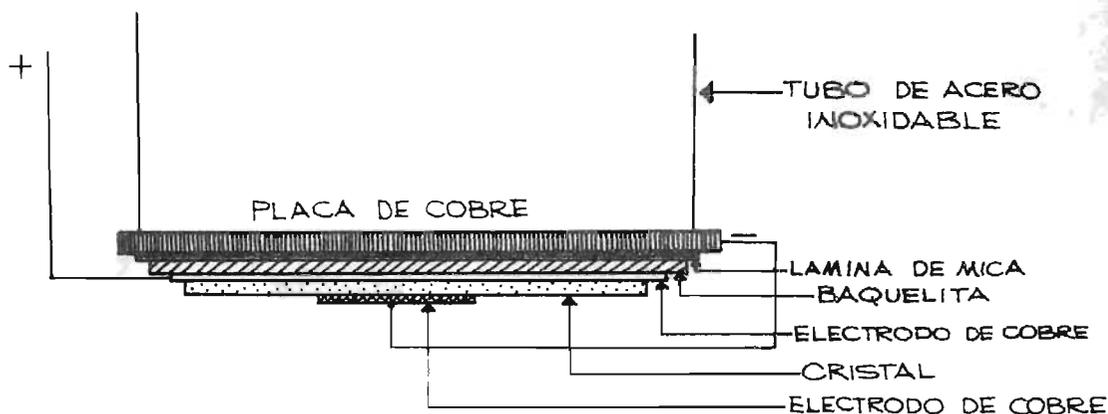


Figura N°16

V-6 Toma de Medidas

La mecánica que se siguió para tomar las medidas fue la siguiente:

- a) Una vez montada la muestra en el criostato y cerrado herméticamente se procedió hacer vacío durante tres horas con el fin de lograr un vacío del orden de 10^{-2} mmHg.

- b) Se comenzó a variar el voltaje alterno lentamente para que en la muestra se generara un campo que la polarizara en forma lenta hasta alcanzar un valor de 100 V.
- c) Los ajustes del osciloscopio permitieron variar el voltaje en las placas horizontales y verticales, hasta observar la mejor curva, es decir verla en forma nítida, los valores que se registraron para la mejor curva fueron 20V/d para las placas horizontales y 0.2V/d para las placas verticales.
- d) Observando constantemente la curva de histéresis en el osciloscopio, la caja de capacitancia por medio de su ajuste permitió variar la capacidad hasta lograr observar la mejor curva que se logró para un valor de --- $C_0 = 0.29 \times 10^{-6}$ faradios.
- e) Una vez lograda la mejor curva en la pantalla del osciloscopio y manteniendo todos los parámetros antes mencionados constantes, se procedió a depositar pequeñas cantidades de nitrógeno líquido dentro del tubo del -- criostato, para lograr bajar la temperatura de la muestra en una forma lenta unos dos grados más bajo de -18°C ; el hecho de depositar pequeñas cantidades de nitrógeno líquido se debe a que su temperatura es demasiado baja -195.8°C y eso perjudicaría la muestra.
- f) La temperatura fue controlada por medio de la termocupla hierro constantán.
- g) Lograda la variación de la curva de histéresis a voluntad en función de la temperatura en el rango de $(-18^{\circ}\text{C}$ y $+23^{\circ}\text{C})$, se observó, que abajo de -18°C la curva se volvía una línea inclinada. Es decir, que la curva de histéresis desaparecía en -18°C lo mismo que en $+23^{\circ}\text{C}$, ó sea, que en dichas temperaturas críticas la muestra pasaba del estado polarizado al no polarizado y desde --

luego su comportamiento era lineal tal como lo muestran las fotografías del Anexo N°2.

- h) Como se tenía los valores de cuanto representaba cada división por voltio en el eje X ^ Y del osciloscopio, se procedió a tomar fotografías cada dos grados centígrados comenzando desde -20°C hasta llegar a +24°C, las fotos fueron tomadas con un intervalo de aproximadamente dos minutos cada una.
- i) En el osciloscopio se midió realmente voltaje en el eje (X ^ Y), los cuales son directamente proporcionales al campo eléctrico y polarización espontánea respectivamente, tal como se muestra en el Anexo N°4.
- j) Con los parámetros conocidos de cada fotografía, es decir, su temperatura y sus respectivos valores del voltaje en "X" ^ "Y", se procedió a trazar la línea tangente en la región de saturación, de tal manera que cortara al eje "Y" con el objeto de conocer el valor de la polarización espontánea. Esto se hizo para cada curva.
- k) Con esto se logró el valor de la polarización espontánea para cada valor de temperatura.

CAPITULO VI

RESULTADOS

VI-1 Introducción

Cuando nos refiramos a $\vec{P}_{(s)}$ sin el símbolo de vector la consideraremos como su módulo.

Los datos experimentales se encontraron de acuerdo a la siguiente relación:

$$P_{(s)} = \frac{C_0}{A} V_y \dots\dots\dots (VI-1)$$

para la deducción véase anexo (4)

donde:

$C_0 = 0.29 \times 10^{-6}$ faradios = valor del capacitor auxiliar
 $A = 0.70 \text{ cm}^2$ = área del capacitor de la sal Rochelle

$$V_y = \frac{|V_y^+| + |V_y^-|}{2} \dots\dots\dots (VI-2)$$

V_y^+ = Valor del voltaje en la dirección positiva del eje V_y .

V_y^- = Valor del voltaje en la dirección negativa del eje V_y .

Se procedió a medir V_y trazando las líneas tangentes a las zonas de saturación de las curvas de histéresis de cada fotografía del anexo 2, de modo que cortarían al eje V_y y luego se sustituyó el valor encontrado en (VI-1), para luego conocer indirectamente los datos de polarización espontánea $P_{(s)}$ por cada valor de temperatura (ver anexo 5). Con los datos obtenidos se construyó la curva de polarización espontánea en función de la temperatura (ver anexo 3).

VI-2 Análisis de los Resultados

Para tener una idea del análisis del error a que fueron sometidos los datos experimentales se presenta el cálculo -

de la polarización espontánea $P_{(s)}$ para la curva de histéresis mostrada en la fotografía (A 2-8) del anexo 2 y que corresponde a una temperatura de $T = 267^\circ\text{k}$.

$$\text{Valores de } V_y^+ = \left\{ \begin{array}{l} (0.40 \pm 0.02) \text{ voltios} \\ (0.34 \pm 0.02) \text{ voltios} \end{array} \right\}$$

$$V_y^+ = \frac{(0.40 \pm 0.02) + (0.34 \pm 0.02)}{2} = (0.37 \pm 0.04) \text{ volt.}$$

$$\text{Valores de } V_y^- = \left\{ \begin{array}{l} (0.31 \pm 0.02) \text{ voltios} \\ (0.35 \pm 0.02) \text{ voltios} \end{array} \right\}$$

$$V_y^- = \frac{(0.31 \pm 0.02) + (0.35 \pm 0.02)}{2} = (0.33 \pm 0.04) \text{ voltios}$$

Luego:

$$V_y = \frac{(0.37 \pm 0.04) + (0.33 \pm 0.04) \text{ voltios}}{2} = (0.35 \pm 0.04) \text{ Volt.}$$

$$V_y \pm \Delta V_y = (0.35 \pm 0.04) \text{ voltios}$$

El valor de $P_{(s)} \pm \Delta P_{(s)}$ se calculó así:

$$P_{(s)} \pm \Delta P_{(s)} = \frac{C_o}{A} V_y \pm \Delta P_{(s)} = P_{(s)} \left[\frac{\Delta C_o}{C_o} + \frac{\Delta V_y}{V_y} + \frac{\Delta A}{A} \right]$$

$$P_{(s)} = \frac{0.29 \text{ faradios} \times 0.35 \text{ voltios} \times 10^{-6}}{0.70 \text{ cm}^2} = 0.15 \frac{\text{coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-6}$$

$$\Delta P_{(s)} = 0.15 \left[\frac{0.02}{0.29} + \frac{0.04}{0.35} + \frac{0.05}{0.70} \right] = 0.04 \frac{\text{coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-6}$$

$$P_{(s)} \pm \Delta P_{(s)} = (0.15 \pm 0.04) \times 10^{-6} \frac{\text{coul}}{\text{cm}^2}$$

$$P_{(s)} \pm \Delta P_{(s)} = (1.5 \pm 0.4) \times 10^{-7} \frac{\text{coul}}{\text{cm}^2}$$

Los cálculos restantes se hicieron de esta misma manera.

Las curvas mostradas en las fotografías del anexo 2, muestran en una forma evidente el comportamiento de la curva de histéresis en función de la temperatura, predicho para la sal Rochelle, en el rango de $(-18^{\circ}\text{C} \sim + 23^{\circ}\text{C})$.

La gráfica $P_{(s)} = f(T)$ tiene al menos la forma correcta, aunque los valores de polarización $P_{(s)}$ son más bajos que los mostrados en Dekker¹.

El hecho de que los valores experimentales de polarización $P_{(s)}$ resultaron más bajos, argumentamos que esta diferencia se debe a una serie de dificultades de las que solamente mencionamos por ser muy difícil cuantificarlas. Tales dificultades son:

- a) Si observamos el grosor del lazo de histéresis en la zona de saturación de cada fotografía, se comprende que la escala empleada es pequeña comparada con la magnitud medida.
- b) Es posible que durante el proceso de crecimiento del cristal, se le introdujeron moléculas de agua de la solución en su estructura y éstas actuando como impurezas modificaron en magnitud los valores de $P_{(s)}$.
- c) El error personal cometido a la hora de trazar las líneas tangentes a las curvas de histéresis en las zonas de saturación.
- d) El error propio del osciloscopio para darnos el V_y .

¹ Adrianus J. Dekker "Solid State Physics" Prentice-Hall, Inc. 1963.-

- e) La técnica empleada en la construcción de los electrodos óhmicos sobre la superficie del cristal, en este caso, consistió solamente en pintarlos con esmalte de plata.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII-1 Conclusiones

- a) Se comprobó que efectivamente la sal Rochelle posee dos temperaturas críticas o de curie.
- b) Solamente en la dirección (+ a ^ -a) mostró el cristal - el fenómeno de histéresis y fue poco apreciable en el eje "b" y no fue posible observar nada en eje "C".
- c) El punto de fusión del cristal fue de $(54.4 \pm 0.1)^\circ\text{C}$.
- d) Realmente el cristal es ferroeléctrico en el intervalo de temperatura de aproximadamente $(-18^\circ\text{C} \wedge + 23^\circ\text{C})$ el cristal de la sal Rochelle crece como un monocristal y en una forma adecuada a una temperatura más o menos constante de 24°C y con una velocidad de crecimiento muy lenta.
- e) Se logró un mejor conocimiento del fenómeno de la ferroelectricidad e histéresis y con ello una mejor comprensión del comportamiento del campo eléctrico en el interior de los cristales ferroeléctricos en particular para la sal Rochelle.
- f) Se conoció y se puso en práctica una técnica aunque sencilla muy útil para crecer cristales a base de una solución saturada.
- g) Debido a las grandes dificultades encontradas para desarrollar el presente trabajo se cree que es aceptable; pues en el futuro con mejor equipo se desarrollarán posiblemente trabajos de investigación más serios en el campo de los cristales, en especial para investigar sobre la ferroelectricidad.

- h) El alcance de este trabajo quizás sea mínimo, pero conociendo la física de la sal Rochelle: como su estructura, cambio de fase, ferroelectricidad, etc. se podría aprovechar mejor en trabajos técnicos como construcción de transductores, osciladores; muy ocupados para micrófonos y aparatos de audio que se comienzan a construir en nuestro medio.
- i) En el aspecto docente del Departamento, se cree que con trabajos de esta naturaleza se impulsa, pues una vez conocidos los fenómenos, ha sido posible el montaje de todo un sistema para poder estudiarlos experimentalmente para nuestro caso - particular el fenómeno de ferroelectricidad e histéresis.

VII-2 Recomendaciones

Para futuras investigaciones sería conveniente obtener la curva de histéresis con un graficador (X, Y), ya que eso -- permitiría construir la gráfica punto a punto y a partir del origen y desde luego sería muy fácil encontrar el valor de la constante dieléctrica de la muestra.

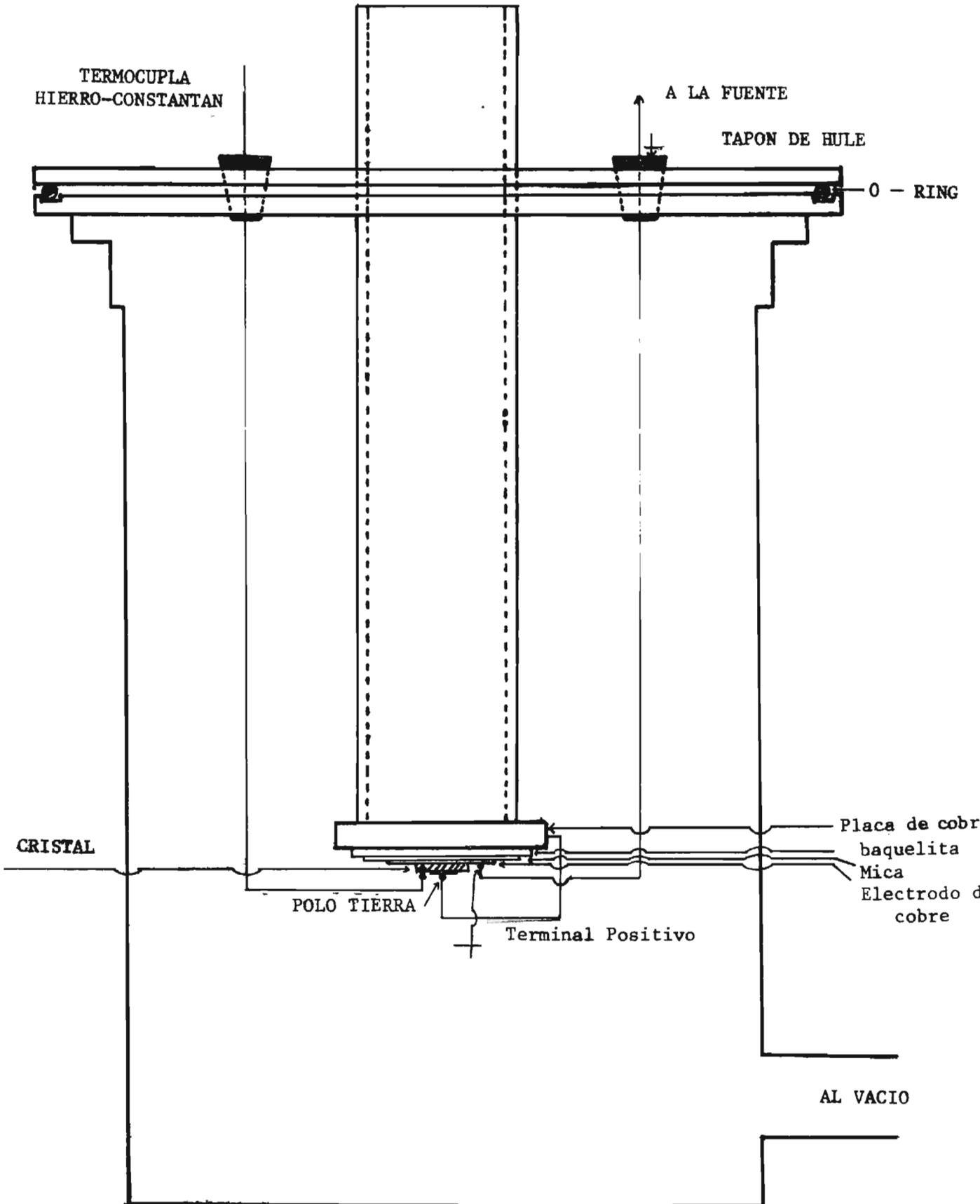
Es recomendable que para la sal Rochelle el vacío no sea muy alto, sino que lo justo para evitar la humedad. Un vacío de 10^{-2} mm Hg funciona bien.

Se recomienda una pequeña investigación con titanato de bario, ya que es un cristal muy conocido tanto teórico ----- como experimentalmente y por ende se tendría con que comparar, para después pasar a cristales un poco más complicados.

Es bueno tratar de crecer todos los cristales a emplearse para futuros trabajos, pues ello ayudaría a tener en un momento dado nuestros propios cristales y además se perfeccionaría la técnica para crecer cristales.

- MEINERS HARD (Editor)
- "PHYSICS DEMONSTRATION EXPERIMENTS"
Volume II, Editorial The Ronald
Company, New York, 1970.
- PHILLIPS, F.C.
- "An Introduction to Crystallography"
Fourth Edition. John Wiley & Sons,
Inc., New York, 1970.
- REITZ Y MILFORD
- "Fundamentos de la Teoría Electro-
magnética".
UTEHA, 1969.
- SCHMIDT, V. HUGO
- American Journal of Physics
Volume 37, Number 4 April 1969.
- WERT Y THOMSON
- "Física de los Sólidos"
Mc Graw-Hill Book Company, 1964.

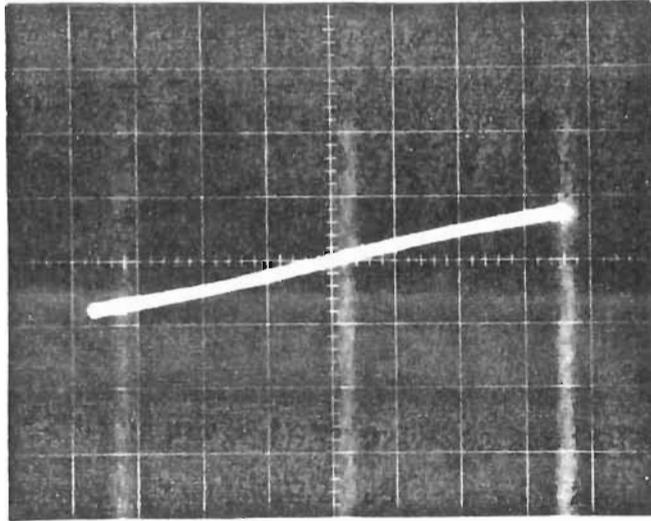
A N E X O S



A N E X O N o 2

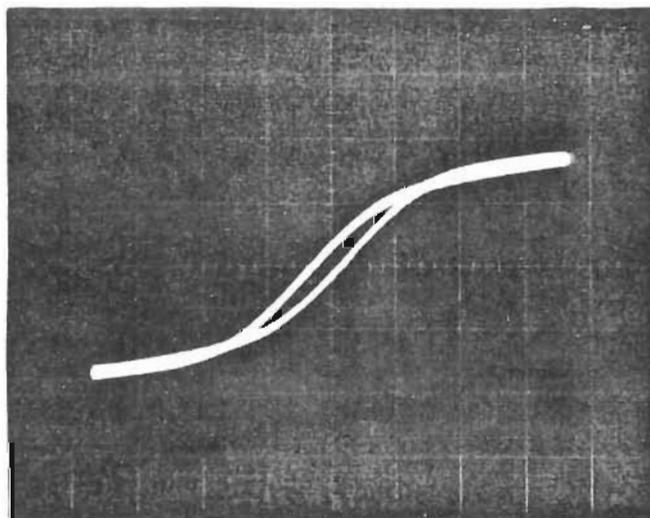
"CURVAS DE HISTERESIS PARA UN VOLTAJE CONSTANTE DE 100 VOLTIOS Y UNA CAPACIDAD CONSTANTE DE 0.29×10^{-6} FARADIOS. VARIANDO LA POLARIZACION EN FUNCION DE LA TEMPERATURA

A2-1



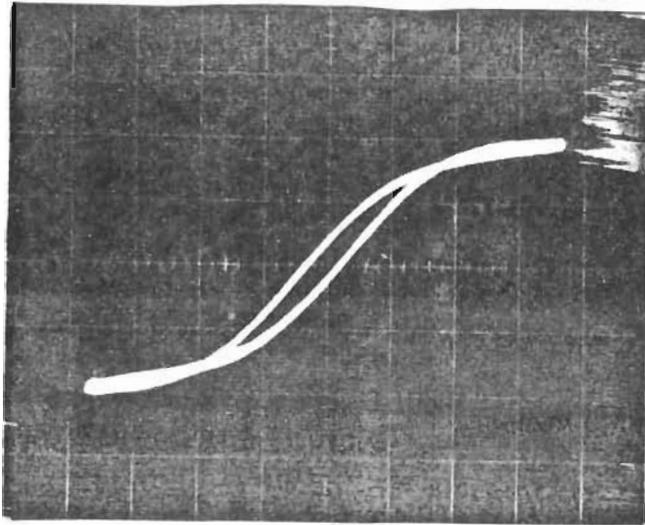
$$T = (253.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} \approx 0$$

A2-2



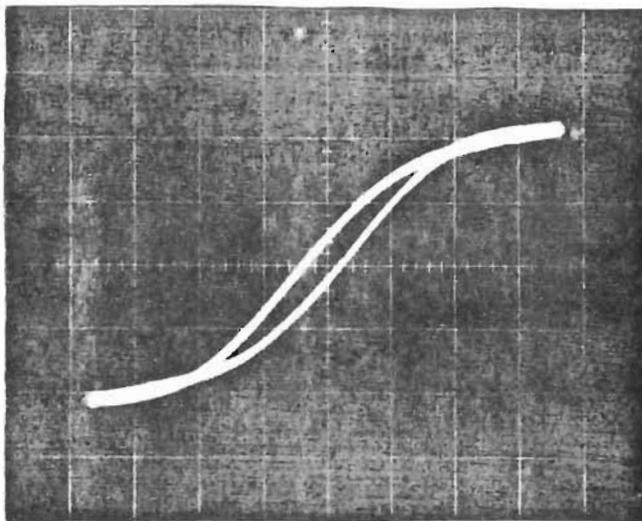
$$T = (255.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.0 \pm 0.2) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-3



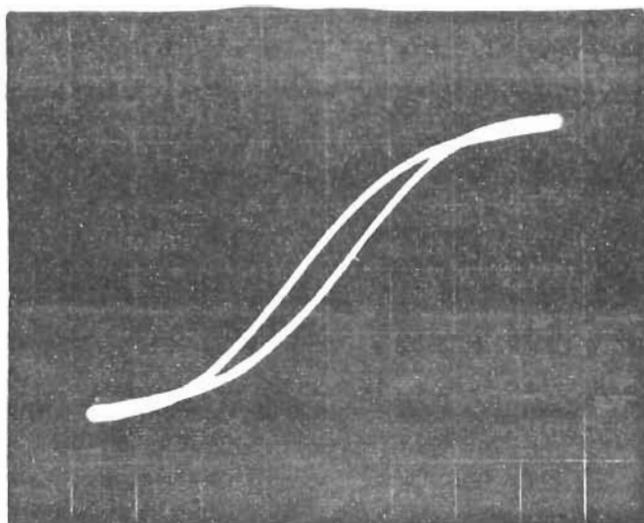
$$T = (257.0 \pm 0.2)^\circ\text{K} \quad P_{(s)} = (1.2 \pm 0.3) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-4



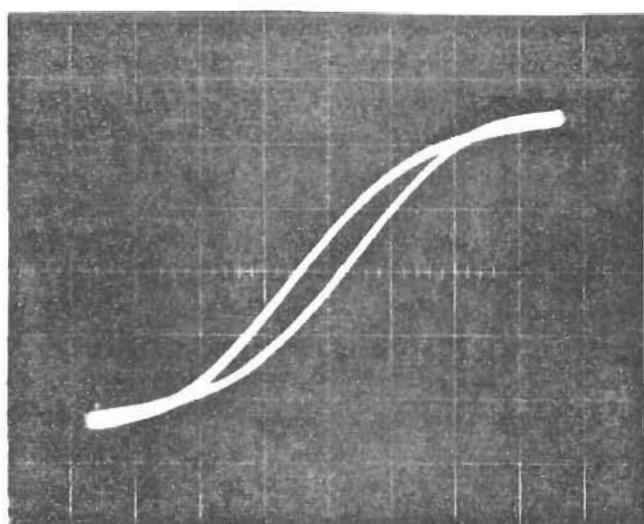
$$T = (259.0 \pm 0.2)^\circ\text{K} \quad P_{(s)} = (1.3 \pm 0.3) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-5



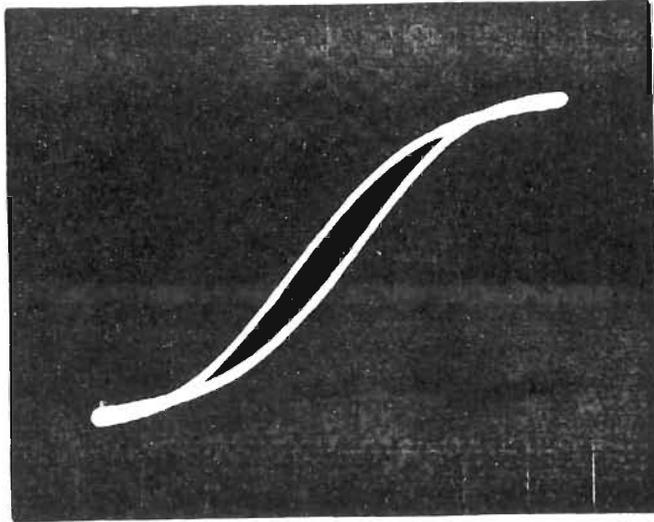
$$T = (261.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.4 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-6



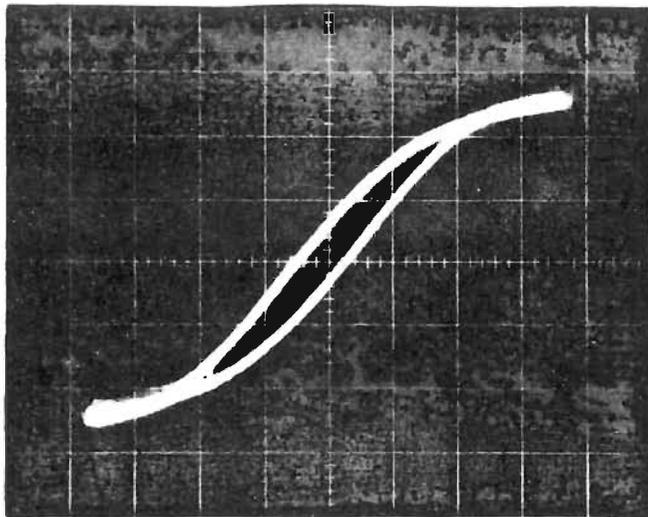
$$T = (263.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.4 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2 - 7



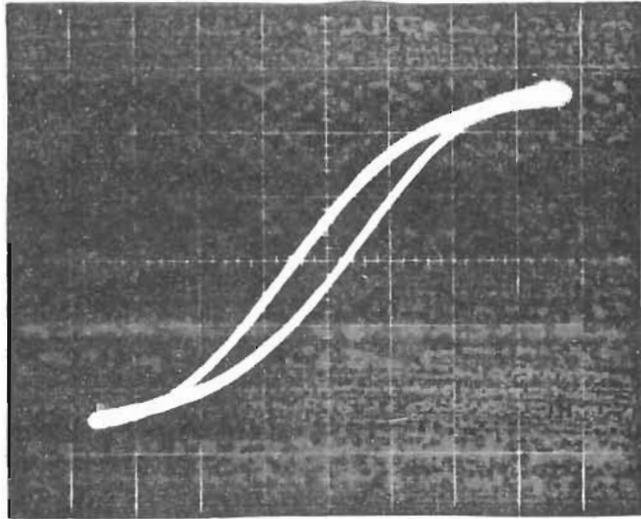
$$T (265.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.4 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-8



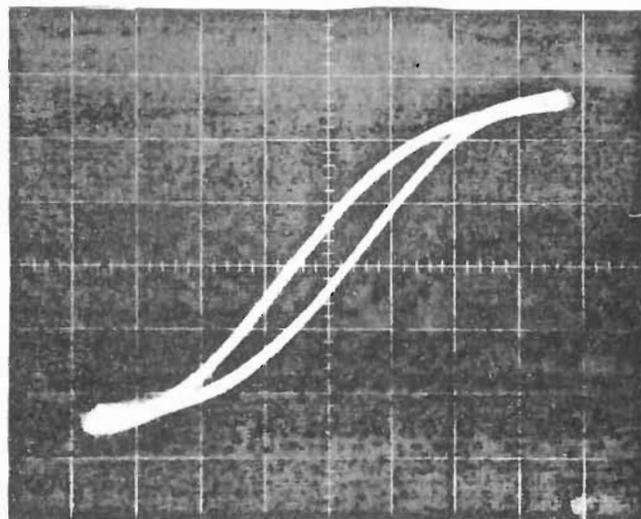
$$T (267.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.5 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-9



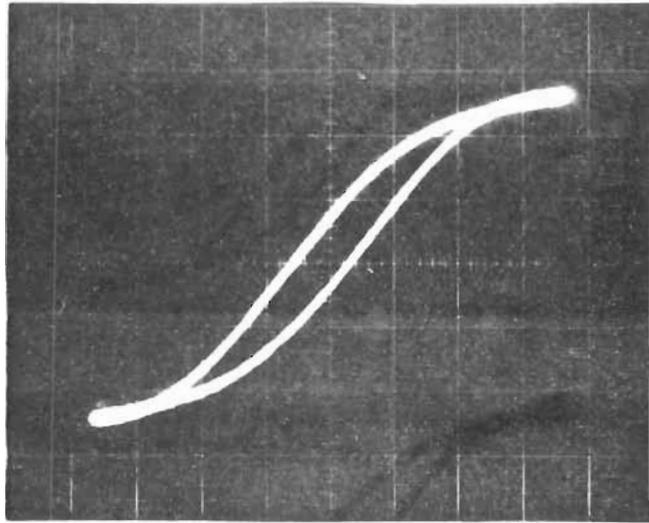
$$T = (269.0 \pm 0.2) \text{ } ^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.6 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-10



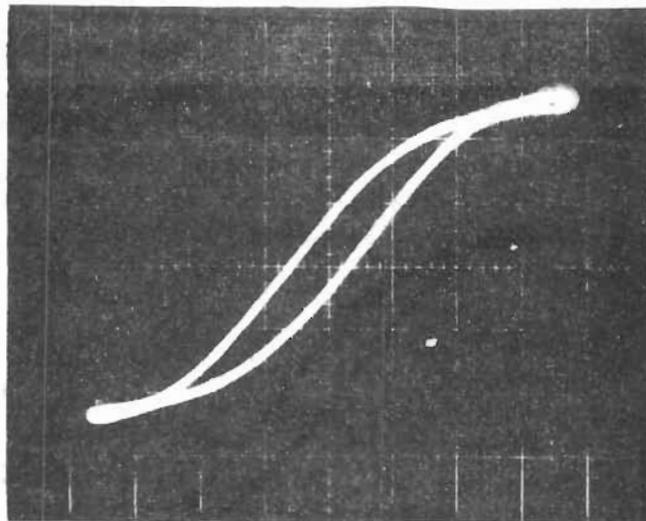
$$T = (273.0 \pm 0.2) \text{ } ^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.6 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-11



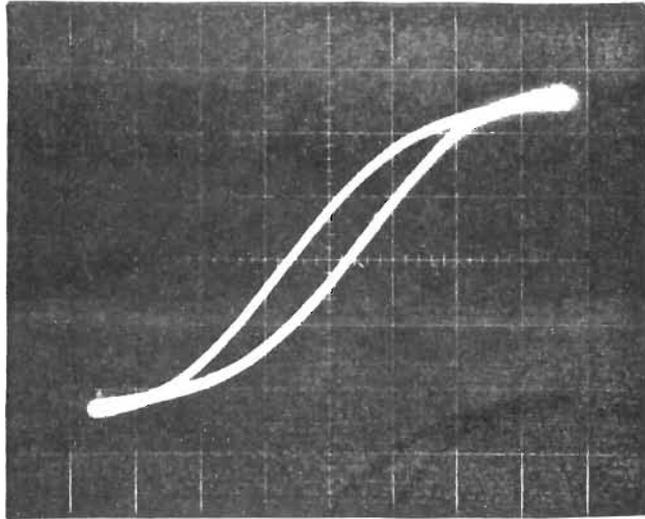
$$T = (275.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.5 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-12



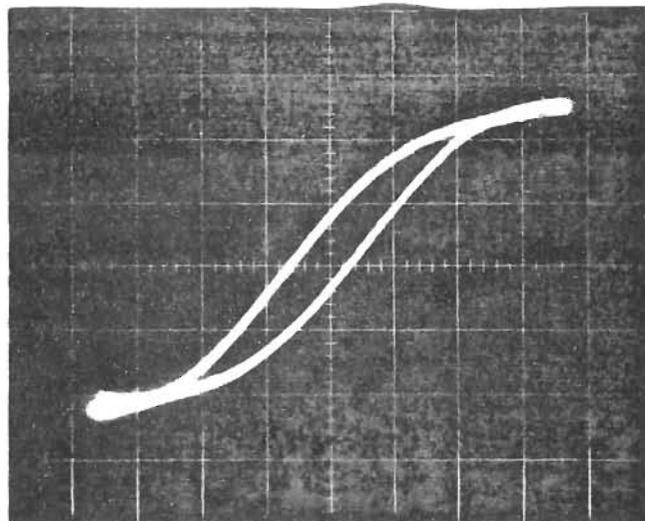
$$T = (277.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.4 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-13



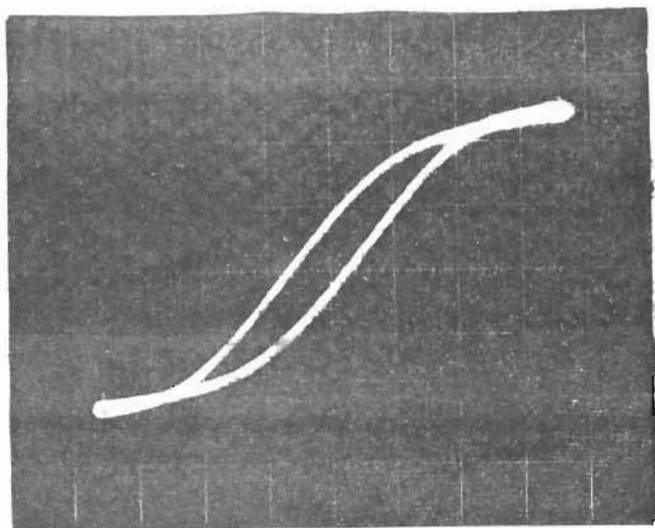
$$T = (279.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.4 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-14



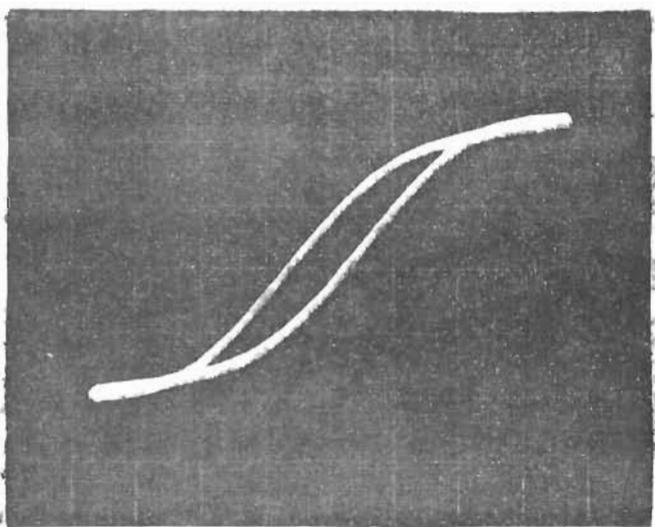
$$T = (281.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.3 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-15



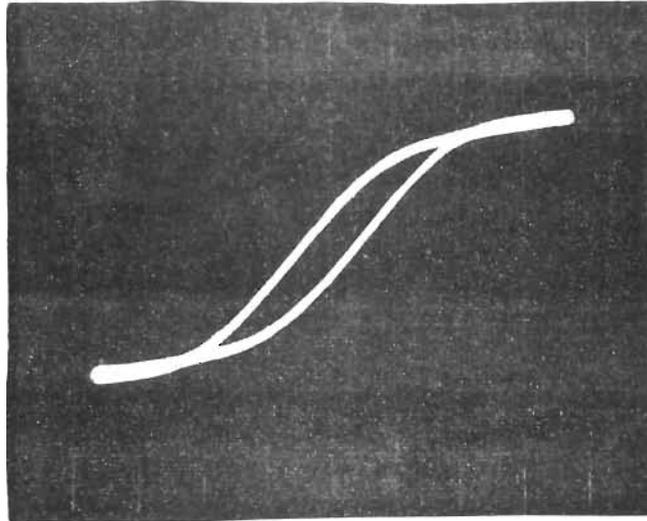
$$T = (283.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.3 \pm 0.4) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-16



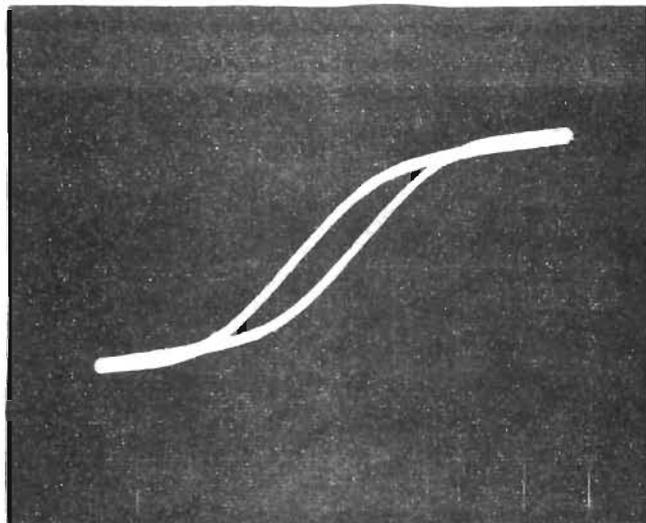
$$T = (285.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = 1.2 \pm 0.3 \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-17



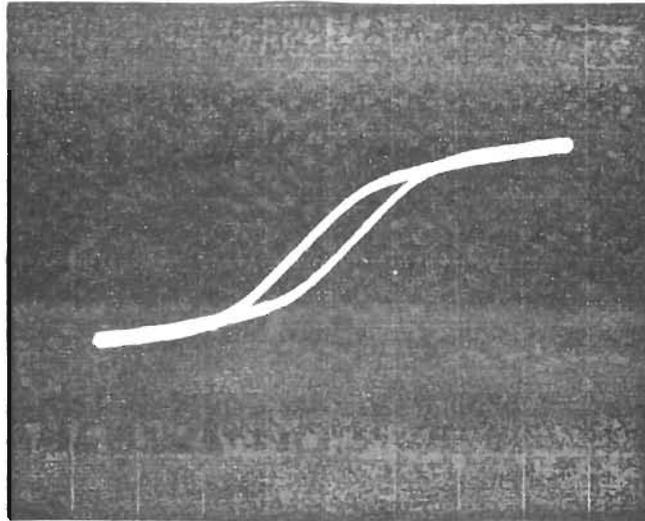
$$T = (287.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.1 \pm 0.3) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-18



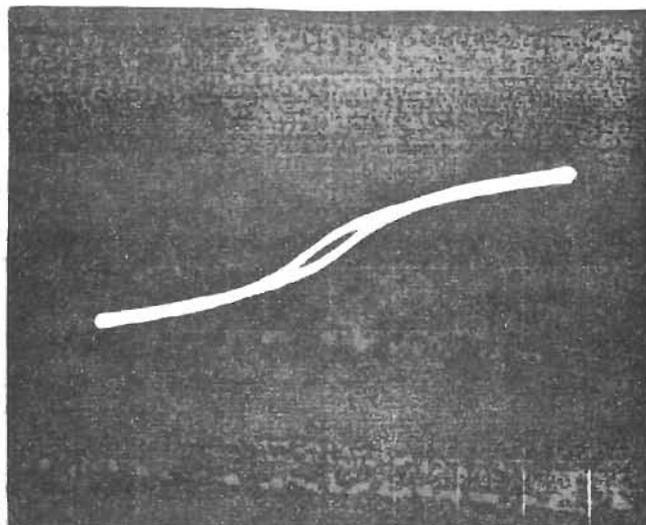
$$T = (289.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (1.0 \pm 0.3) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-19



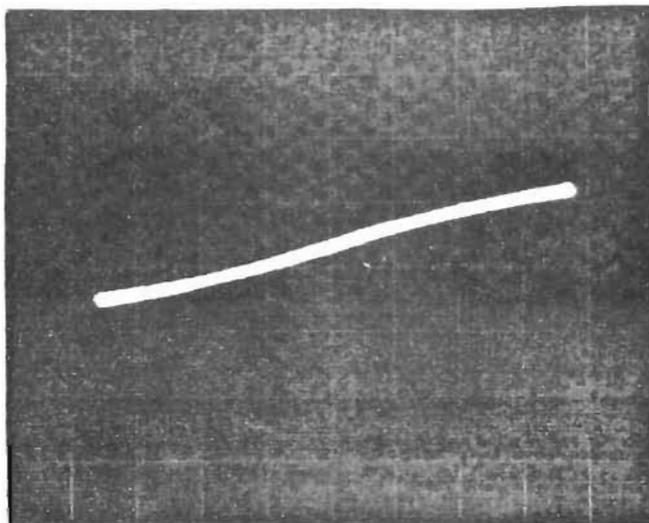
$$T = (291.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (0.7 \pm 0.2) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-20



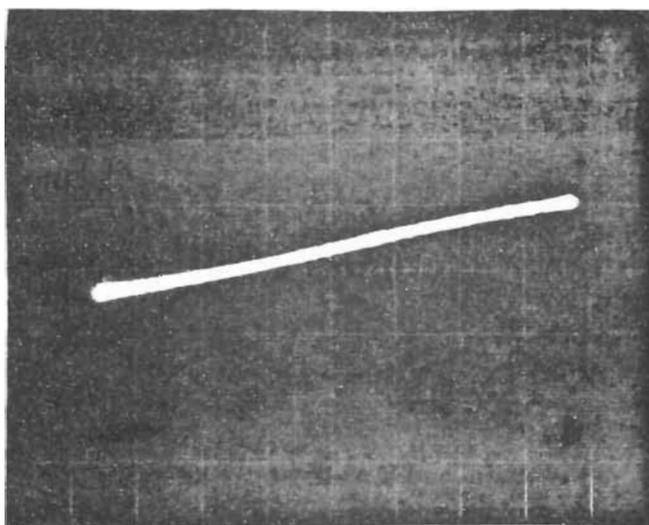
$$T = (293.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (0.4 \pm 0.2) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-21



$$T = (295.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} = (0.2 \pm 0.2) \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$$

A2-22

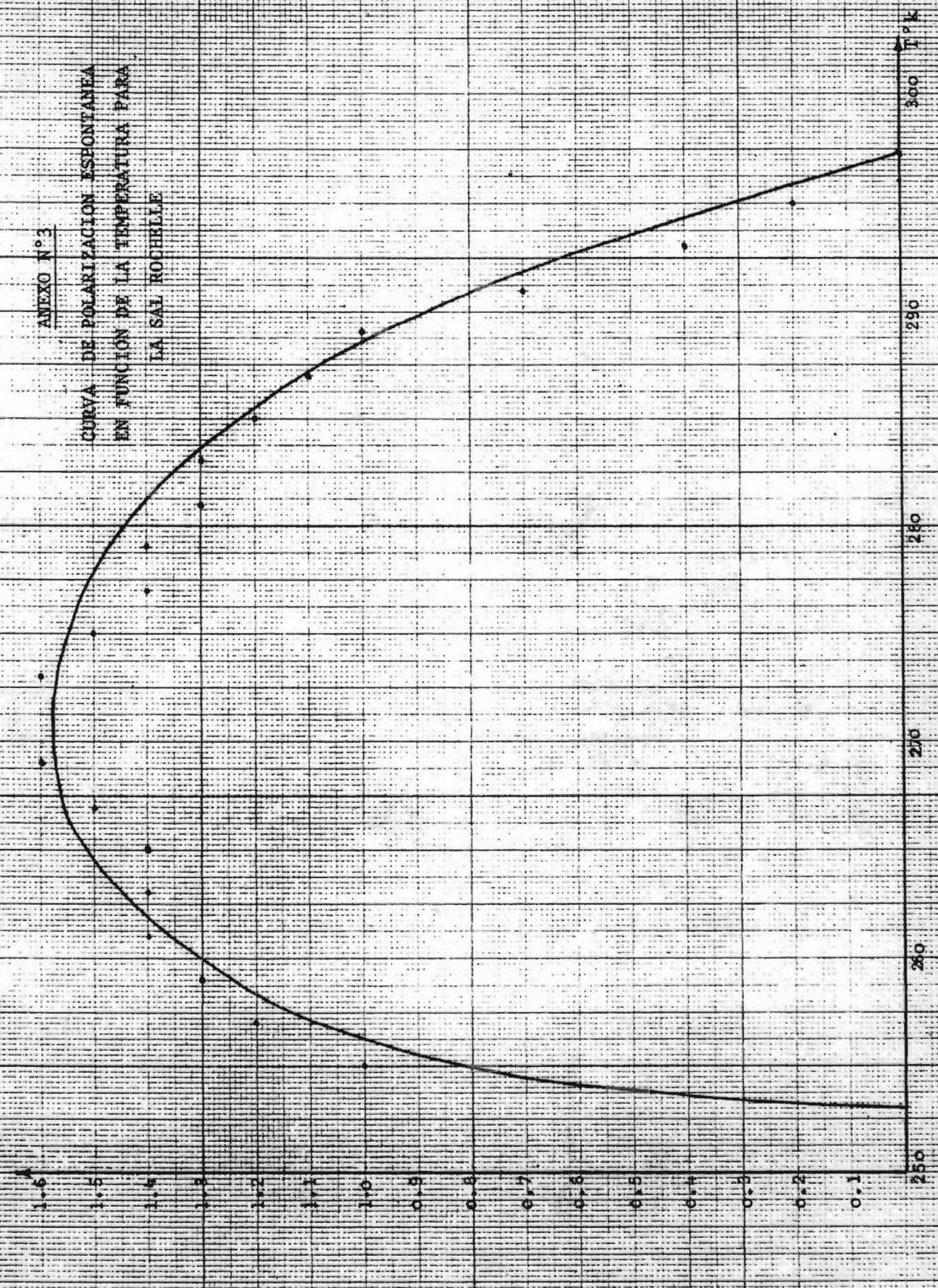


$$T = (297.0 \pm 0.2)^\circ\text{k} \quad P_{(s)} \approx 0$$

ANEXO N°3

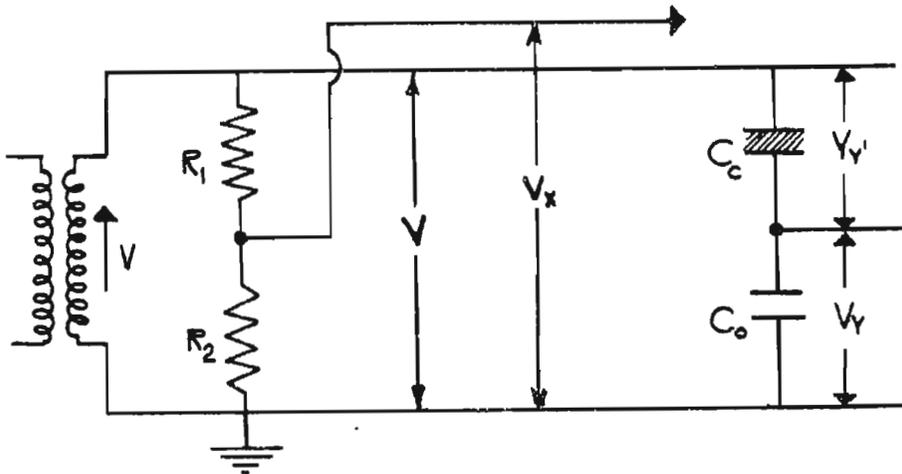
CURVA DE POLARIZACION ESPONTANEA
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA PARA
LA SAL ROCHELLE

$P(\theta) \times 10^7 \frac{\text{Coul}}{\text{cm}^2}$



ANEXO No 4

Supongamos que tenemos el siguiente circuito:



Donde:

$$R_1 = R_2 = 10^5 \Omega \pm 5\%$$

C_o = La capacidad del capacitor auxiliar,

C_c = La capacidad del cristal.

V = Voltaje alterno.

$$V_x = \frac{V}{2} \text{ por ser las resistencias iguales.}$$

$$V = V_y + V_y' \text{ por ser el circuito en paralelo.}$$

A = Area de los electrodos del cristal.

d = Espesor del cristal.

C_t = Capacidad equivalente de $C_c \wedge C_o$ ó

$$C_t = \frac{C_c C_o}{C_c + C_o}$$

Para poder observar la curva en el osciloscopio aplicamos un voltaje alterno, por eso se considera $V_y \wedge V_y'$ como voltajes instantáneos y en fase.

Sabemos que la corriente en el circuito es:

$$I = \frac{V}{Z_T} \quad \text{Siendo } Z_T = -\frac{i}{\omega C_c} - \frac{i}{\omega C_o} \quad \therefore$$

$$Z_T = -\frac{i}{\omega} \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_o} \right) \quad \therefore$$

$$Z_T = -\frac{i}{\omega C_t} \quad \text{pero}$$

$$I = \frac{V}{Z_T} = \frac{V}{-\frac{i}{\omega C_t}}$$

El voltaje en el capacitor C_o es

$$V_y = Z_o I \quad \wedge \quad Z_o = -\frac{i}{\omega C_o} \quad \therefore$$

$$V_y = \left(-\frac{i}{\omega C_o} \right) I \quad \text{Luego}$$

$$V_y = \left(-\frac{i}{\omega C_o} \right) \frac{V}{-\frac{i}{\omega C_t}} = \frac{C_t}{C_o} V \quad \text{ó sea que}$$

$$V_y = \frac{C_t}{C_o} V$$

Lo mismo sucede para V'_y luego

$$V'_y = Z_c I$$

$$Z_c = -\frac{i}{\omega C_c} \quad \text{Luego}$$

$$V'_y = -\frac{i}{\omega C_c} \frac{V}{-\frac{i}{\omega C_t}} = \frac{C_t}{C_c} V \quad \therefore$$

$$V'_y = \frac{C_t}{C_c} V$$

Si sumamos $V_y + V'_y$ nos debe dar V

$$\frac{C_t}{C_o} V + \frac{C_t}{C_c} V = \left(\frac{1}{C_o} + \frac{1}{C_c} \right) C_t V \dots$$

$$\frac{C_t}{C_o} V + \frac{C_t}{C_c} V = \left(\frac{C_c + C_o}{C_o C_c} \right) C_t V$$

$$V_y + V'_y = \left(\frac{1}{C_t} \right) C_t V \text{ donde se ve}$$

$$V_y + V'_y = V \text{ o sea que}$$

$$V = V$$

El campo aplicado al cristal es:

$$E_c = \frac{V'_y}{d} \text{ sustituyendo } V'_y \text{ nos queda que}$$

$$E_c = \frac{C_t}{C_{cd}} V \text{ pero } V = 2V_x \text{ luego}$$

$$E_c = \frac{C_t 2V_x}{C_{cd}} \dots \dots \dots \text{ (A4-1)}$$

La ecuación (A4-1) nos da el campo en función de lo que se mide como es V_x .

De la teoría electromagnética tenemos que la polarización es igual a:

$$\vec{P} = \chi \vec{E} \text{ donde}$$

\vec{P} = polarización

$$\chi = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1 \right) = \text{susceptibilidad}$$

\vec{E} = campo eléctrico

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r = \text{constante dieléctrica relativa}$$

En adelante tomaremos P y E como módulo de (\vec{P} y \vec{E})

como $\epsilon_r \gg 1$ se tiene que

$$P = \epsilon E \text{ luego}$$

$$P = \epsilon E_c \dots$$

$$P = \epsilon \frac{C_t}{C_{cd}} V \text{ pero } V = \frac{C_o V_y}{C_t} \dots$$

$$P = \epsilon \frac{C_t}{C_{cd}} \frac{C_o V_y}{C_t} \dots$$

$$P = \epsilon \frac{C_o}{C_{cd}} V_y \text{ pero } \epsilon = \frac{C_{cd}}{A} \text{ luego}$$

$$P = \left(\frac{C_{cd}}{A} \right) \left(\frac{C_o}{C_{cd}} \right) V_y \dots$$

$$P = \frac{C_o}{A} V_y \text{ donde se ve que } P \propto V_y$$

Para nuestro caso $P = P_{(s)}$ puesto que se mide en la zona de saturación, por ende

$$\boxed{P_{(s)} = \frac{C_o}{A} V_y} \quad *$$

* SCHMIDT, V.Hugo "Ferroelectricity Experiment for Advanced Laboratory" American Journal of Physics, Vol 37 Number 4, April 1969.

ANEXO No 5

RESULTADOS

$(T \pm \Delta T)^\circ k$	$(V_y \pm \Delta V_y)$ voltios	$[P_{(s)} \pm \Delta P_{(s)}] \frac{\text{coul}}{\text{cm}^2} \times 10^{-7}$
253.0 \pm 0.2	0	0
255.0 \pm 0.2	0.23 \pm 0.04	1.0 \pm 0.2
257.0 \pm 0.2	0.29 \pm 0.04	1.2 \pm 0.3
259.0 \pm 0.2	0.32 \pm 0.04	1.3 \pm 0.3
261.0 \pm 0.2	0.35 \pm 0.04	1.4 \pm 0.4
263.0 \pm 0.2	0.35 \pm 0.04	1.4 \pm 0.4
265.0 \pm 0.2	0.35 \pm 0.04	1.4 \pm 0.4
267.0 \pm 0.2	0.37 \pm 0.04	1.5 \pm 0.4
269.0 \pm 0.2	0.38 \pm 0.04	1.6 \pm 0.4
273.0 \pm 0.2	0.38 \pm 0.04	1.6 \pm 0.4
275.0 \pm 0.2	0.36 \pm 0.04	1.5 \pm 0.4
277.0 \pm 0.2	0.35 \pm 0.04	1.4 \pm 0.4
279.0 \pm 0.2	0.34 \pm 0.04	1.4 \pm 0.4
281.0 \pm 0.2	0.32 \pm 0.04	1.3 \pm 0.4
283.0 \pm 0.2	0.32 \pm 0.04	1.3 \pm 0.4
285.0 \pm 0.2	0.29 \pm 0.04	1.2 \pm 0.3
287.0 \pm 0.2	0.27 \pm 0.04	1.1 \pm 0.3
289.0 \pm 0.2	0.24 \pm 0.04	1.0 \pm 0.3
291.0 \pm 0.2	0.18 \pm 0.04	0.7 \pm 0.2
293.0 \pm 0.2	0.10 \pm 0.04	0.4 \pm 0.2
295.0 \pm 0.2	0.06 \pm 0.04	0.2 \pm 0.2
297.0 \pm 0.2	0	0