



DIVISION DE ESTUDIOS
SUPERIORES
FACULTAD DE QUIMICA
UNAM

Conductividad
ionica
en el
sistema
 $Li_4SiO_4 - Li_3PO_4$

TESIS

que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Químicas

presenta

Juan Manuel Aceves Hernández





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Mi eterno agradecimiento al Dr. Anthony R. West por la paciente dirección de esta tésis y por su gran entusiasmo para este trabajo.

Un sincero reconocimiento de gratitud al Dr. Fco. Javier Garfias A. y al Dr. Jaime Keller T. por su gran apoyo y por qué nunca perdieron la fé en la terminación de mi Maestría.

Al Ing. Armando López Martín del Campo y al Dr. Fernando E. Prieto Calderón, por las facilidades otorgadas para la realización de esta tésis.

A mis padres por su apoyo y por infundir en mí el deseo de llegar tan lejos. A mis hermanos y familiares por su estímulo, gracias.

A todos mis compañeros, por el gran espíritu de amistad y compañerismo, que sirvió de catalizador para la terminación de este trabajo.

A todas las personas que de alguna manera contribuyeron a alcanzar esta meta. muchas gracias.

CONTENIDO

	PAG.
SUMARIO	1
1.- INTRODUCCION	2
2.- EXPERIMENTAL	
2. 1 Material utilizado	5
2. 2 Preparación de materiales	5
2. 3 Análisis Térmico Diferencial	6
2. 4 Preparación de pastillas	6
2. 5 Rayos - X	6
2. 6 Preparación de Electrodo	7
2. 7 Celdas	7
2. 8 Puente de capacitancias	7
3.- FUNDAMENTACION TEORICA	
CIRCUITO EQUIVALENTE	
(Puente de Capacitancias)	
3. 1 CIRCUITO EN SERIE	
3. 1 1 Impedancia Compleja	11
3. 1 2 Admitancia Compleja	11
3. 2 CIRCUITO EN PARALELO	
3. 2 1 Admitancia Compleja	13
3. 2 2 Impedancia Compleja	13
3. 3 CIRCUITO DE LA PASTILLA	
3. 3 1 Impedancia Compleja	14
3. 3 2 Admitancia Compleja	16
3. 3 3 Admitancia de la pastilla	17

	PAG
3. 3 4 Impedancia de la pastilla	17
3. 4 COMPARACION DE LOS CIRCUITOS DE LA PASTILLA Y DEL EQUIPO.	
3. 4 1 RESISTENCIAS. Circuito en serie del equipo	19
3. 4 2 RESISTENCIAS. Circuito en paralelo del equipo	20
3. 4 3 CAPACITANCIAS. Circuito en serie del equipo	21
3. 4 4 CAPACITANCIAS. Circuito en paralelo del equipo	21
4.- DISCUSION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	40
4. 1 DIAGRAMA DE FASES DEL SISTEMA	47
5.- CONCLUSIONES	71
6.- BIBLIOGRAFIA	73
APENDICE	75

SUMARIO

El objetivo de este trabajo es determinar compuestos con alta conductividad iónica, en el sistema Li_4SiO_4 - Li_3PO_4 . Los compuestos con alta conductividad iónica tienen gran aplicación en Electroquímica, en dispositivos eléctricos de estado sólido y en baterías.

Para determinar la conductividad iónica en compuestos del sistema de silicato y fosfato de litio, se hicieron muestras de diferente composición se sinterizaron y se midió su resistencia y su capacitancia. Es importante encontrar la conductividad electrónica para conocer en forma precisa la conductividad iónica. Se desarrollaron dos formalismos teóricos para explicar el comportamiento de la pastilla, encontrándose que estos describen adecuadamente el sistema.

Los resultados obtenidos muestran que hay una conductividad electrónica pobre (menos del 0.01 %), que es despreciable en comparación con la conductividad iónica. Existe una gran concordancia entre los formalismos desarrollados y los resultados experimentales. Se obtuvo el diagrama de fases del sistema silicato-fosfato de litio, por medio de Análisis de Rayos-X y de Análisis Térmico Diferencial y se encontró una fase binaria para concentraciones de 8 y 10 % de Fosfato. Se determinó el intervalo de frecuencias para el cual se puede usar el equipo en este sistema. Se obtuvo la gráfica de Arrhenius para la nueva fase, se comparó con otros resultados de la literatura, habiéndose encontrado concordancia entre ellos.

Con el descubrimiento de la β -Alumina y del RbAg_4I_5 , hace diez años, se ha incrementado el interés en encontrar nuevos materiales con alta conductividad iónica, que puedan usarse como electrolitos sólidos. Estos compuestos son muy importantes por sus diversos usos, tales como celdas electroquímicas, baterías, etc.

Entre los compuestos de alta conductividad iónica se tienen principalmente tres grupos:

Materiales que contienen plata, entre los que destaca el yoduro de rubidio y plata, RbAg_4I_5 (1). Siendo de los primeros compuestos descubiertos de alta conductividad ($1\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) a temperatura ambiente. En la actualidad se conocen decenas de compuestos de plata, cuyos iones plata presentan una gran movilidad, como si estuvieran en una fase líquida por encontrarse deslocalizados a lo largo del cristal.

En la plata no se puede fijar el número de coordinación dentro del cristal, ya que los iones plata pueden ocupar cualquier hueco intersticial ya sea lineal, trigonal, tetraédrico u octaédrico, es por esto que la plata tiene un valor bajo de energía de activación, en estos materiales.

Otro grupo es el de los elementos alcalinos, al que pertenece la β -Alumina ($\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$) con una conductividad iónica de $0.033\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ (2), este valor a temperatura ambiente, es muy alto para cualquier cristal. Este compuesto puede tener sustituidos los iones sodio por iones potasio, litio, etc.

La estructura de la β -Alumina esta constituida por capas de Aluminio y por capas de Oxigeno, los iones se mueven entre capa y capa através de los tuneles que le forman.

En la actualidad ya se producen baterias de estado sólido que emplean azufre y sodio fundidos como electrodos y β -Alumina como electrolito. Estas baterias que trabajan a 300°C , presentan la ventaja de poseer una elevada densidad de energía, ya que, para volumenes iguales, la bateria de electrolito sólido tiene una energía 10 veces mayor que la de electrolito líquido.

El ultimo grupo está formado por materiales que contienen litio. El $\text{Li}_2\text{S}_2\text{O}_7$, fue de los primeros compuestos de este tipo que se estudiaron, a 600°C este compuesto muestra una conductividad iónica de $1.0 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ (3), mientras que a temperatura ambiente es casi un aislante. Otros compuestos de litio que ya han sido estudiados se presentan en la Tabla a-1(4) Posteriormente se investigó el silicato de litio, que tiene una conductividad igual a la del sulfato a 600°C , solo que a temperaturas más bajas ($\sim 300^{\circ}$). A partir de 1971 (5), se empezó a estudiar el Li_4SiO_4 , en el que se sustitua parte del silicio por germanio ó por titanio. Con estas composiciones se pretendía obtener una conductividad iónica hasta de 1 ó 2 ordenes de magnitud mayor que las del silicato. Lo anterior ocurre cuando se han formado soluciones solidas entre los componentes de la muestra.

Shannon y col., al estudiar el sistema silicato-fosfato, encontraron un intervalo de composiciones comprendido entre 0 y 30 % de fosfato, en el que había soluciones sólidas con una conductividad iónica mayor que el silicato puro (6). West y col., (7), han mostrado que para este sistema existe una sola fase binaria entre 8 y 10 % de fosfato, lo cual discrepa

con los resultados obtenidos por Shannon para este sistema.

Para el ión litio parece que es muy importante tener un número de coordinación fijo*, es por eso que estos materiales muestran una baja conductividad iónica a temperatura ambiente. Los esfuerzos están ahora encaminados a encontrar una malla cristalina que permita un movimiento más libre de los iones litio. Una mayor movilidad del litio, permitiría obtener un alto valor de la fem, debido en parte a su electronegatividad y a su radio iónico.

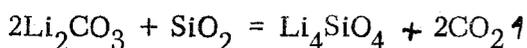
De lo anterior se puede ver la importancia de investigar nuevos materiales de litio que tengan alta conductividad iónica. En este trabajo se estudio el sistema silicato-fosfato, con el objeto de confrontar los resultados obtenidos por Shannon y col. (6), pretendiendo también obtener otros compuestos de litio con conductividad iónica elevada.

*Debido a su baja movilidad (5).

EXPERIMENTAL:

2-1-) Material utilizado: Se uso una mufla eléctrica marca Lindberg, para calentar los materiales. Los recipientes inertes eran barcos pequeños hechos de hoja de oro; los compuestos usados eran CO_3Li_2 , SiO_2 y $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ grado reactivo de la marca J.T.Baker.

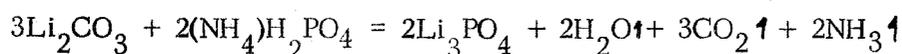
2-2) Preparación de los materiales. El Li_4SiO_4 se prepara con cantidades estequiométricas de carbonato de litio y óxido de silice, los cuales se humedecen con acetona para formar una mezcla, que se muele en un mortero hasta que se ha evaporado toda la acetona (~ 10 minutos); se lleva a una temperatura de 650°C de 12 a 24 horas, ocurriendo la siguiente reacción.



Se debe tener cuidado en mezclar las cantidades estequiométricamente necesarias, ya que si existe mayor cantidad de SiO_2 de la que se necesita, se forma metasilicato de litio. Si se tiene exceso de Li_2CO_3 este no reacciona y se tendrá otro componente más.

Si se deja reaccionar por mayor tiempo o si se lleva la temperatura a más de 750°C , ocurre una pérdida de óxido de litio y tendremos Li_2SiO_3 .

El Li_3PO_4 se prepara al hacer reaccionar los siguientes compuestos:



Se muelen los reactivos siguiendo el mismo tratamiento que para el Li_4SiO_4 cuando se tienen totalmente homogeneizados, se llevan a una temperatura de 450°C por dos horas, para eliminar los gases formados, luego se eleva la temperatura hasta 650°C por 12 horas.

Composiciones sólidas en el sistema $\text{Li}_4\text{SiO}_4 - \text{Li}_3\text{PO}_4$. Una vez que se tenían los compuestos Li_4SiO_4 y Li_3PO_4 se prepararon las composiciones de 2,

4, 6, 8, 15, 30 y 90 por ciento en moles de fosfato de litio, homogeneizando con acetona y moliendo hasta que la acetona se evaporó totalmente.

2-3) Análisis térmico Diferencial. Se define (8) el Análisis Térmico como la medición de cambios de propiedades físicas o químicas de los materiales en función de la temperatura. Esta relación entre la medida de la temperatura y el cambio en alguna propiedad física, tales como un cambio de fase o una propiedad química como descomposición, permite la caracterización de un compuesto. En este proyecto se usa el Análisis Térmico para obtener el diagrama de fase del sistema al medir puntos de fusión y transformaciones polimórficas. El equipo que se usó fue un aparato para DTA, marca DuPont modelo 990 con celda de 1600°C.

2-4) Preparación de pastillas. Una vez preparada la mezcla con la composición deseada, se prensa a 10,000 Kg/cm² en un molde de acero inoxidable, Fig. 2-1. La pastilla que se obtiene, es de 0.8 cm. de diámetro y un espesor de ~3mm; la porosidad es de un 20% (5), estas pastillas se llevan hasta 950°C con objeto de sinterizarlas para tener mayor rigidez y un mejor contacto entre los cristales y hacer reaccionar las fases presentes en mezclas de Li₄SiO₄ y Li₃PO₄.

2-5) Rayos X.—El análisis de rayos-X por el método de polvos es muy útil en la determinación de pureza de compuestos. Se analiza una muestra de Li₄SiO₄ ó de Li₃PO₄ y los picos se comparan con los que reporta la literatura para ver si realmente se tenían estos compuestos. Las mezclas de Li₄SiO₄ y Li₃PO₄ dan picos que se comparan con los patrones de Li₄SiO₄ y Li₃PO₄ puros; si aparecen otros picos en la gráfica de la muestra, esto significa que tenemos otros compuestos más. Si tenemos desplazamiento de picos al compararlos con los patrones de Li₄SiO₄ y Li₃PO₄, esto significa que se ha formado una solución sólida,

El equipo usado es un Difractómetro de Rayos X, marca Philips con radiación $\text{CuK}\alpha$.

2-6) Preparación de electrodos. Una vez que se tiene sinterizada la pastilla, se colocan electrodos de oro, los cuales se pegan a las caras de la pastilla con pasta de oro, marca Engelhard, se someten a la acción del calor elevando la temperatura a 100°C cada hora, hasta llegar a 450°C , permaneciendo a esta temperatura durante dos horas más, para asegurar la evaporación total del solvente; al finalizar esta operación se pueden efectuar medidas en la pastilla.

2-7) Celda. Cuando se tiene la pastilla y los electrodos fuertemente pegados, se une por presión mecánica a cada electrodo un alambre de platino puro de 0.1 cm. de diámetro y 30 cms. de longitud, los cuales se hacen pasar a través de un tubo bihoradado de alumina de 20 cm de longitud. Esta celda se coloca dentro del horno y los alambres de platino se conectan a las dos entradas del puente de capacitancia, para efectuar las medidas necesarias, esto se puede ver en la figura 2-2

2-8) Puente de Capacitancia. En la determinación de los valores de la conductividad eléctrica, se usó un puente de capacitancia de marca General Radio Company, tipo 1615a, con un oscilador de Audio tipo 1311-A y un selector-detector de nulos tipo 1232-A de la misma marca. Este equipo tiene un amplio rango desde un valor de 10^{-5} pF, hasta un máximo de $1 \mu\text{F}$ con patrones internos y con patrones externos se puede medir hasta $1000 \mu\text{F}$. Todas estas medidas con un error de 0.01% en patrones internos y una seguridad en la medida igual a la de la calibración en el patrón externo.

Muchas de las medidas pueden hacerse, ya sea con D o G y con Cs o

Cp. Cuando sólo una puede ser medida, la otra se puede calcular de las siguientes relaciones.

$$D = \omega R_s C_s = G / \omega C_p = 1 / \omega R_p C_p.$$

$$C_s = C_p(1 + D^2)$$

$$G = 1/R_p = \omega C_s D / (1 + D^2) - \omega C_s D.$$

$$R_s = G / (\omega C_p)^2 (1 + D)^2 - G / (\omega C_p)^2$$

en donde:

C = capacitancia en Faradios

G = conductancia en mohs ó ohms⁻¹

R = Resistencia en ohms.

$$\omega = 2 \pi f$$

f = frecuencia en cps.

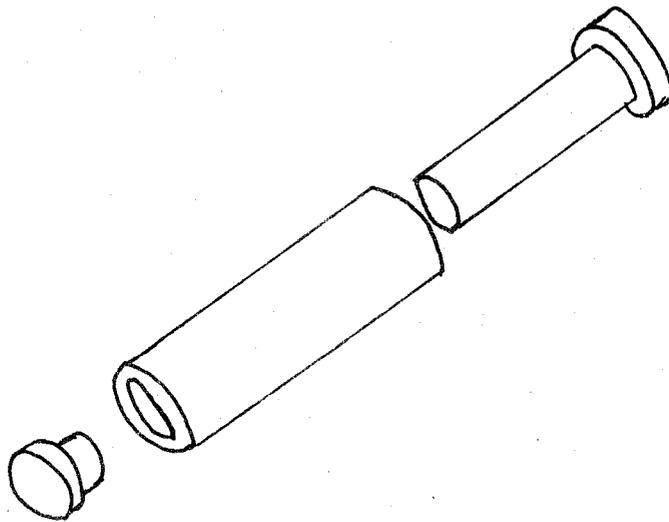


FIG 2-1

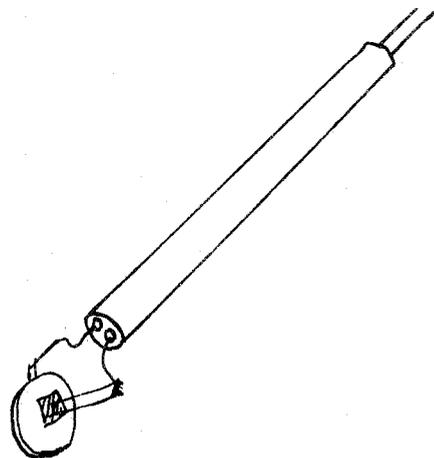


FIG. 2-2

TABLA IV CONDUCTORES ALCALINOS IONICOS (4)

(8A)

MATERIAL	ESTRUCTURA	σ (ohms-cm^{-1})	COMENTARIOS
NaSbO ₃ policristalino 92% denso	Esqueleto de SbO ₃ con iones alcalinos en los túneles a lo largo del eje (111)	6.8 x 10 ⁻² a 300°C con A.C. 1 KH ₃ , electrodos de NaNO ₃ y Aquadag.	Intercambio de iones desde los túneles 3-D del KSbO ₃ en la dirección (111)
NaSbO ₃ · $\frac{1}{6}$ Na F	cúbico	5-8 x 10 ⁻² a 300°C	Átomos F en las intersecciones de (111), los túneles tienen poco efecto en
NaTa ₂ O ₅ F	Pyrocloro	7 x 10 ⁻³ a 300°C	
K _{1-x} Mg _{1-x} Al _{1+x} F ₆		2.5 x 10 ⁻³ a 300°C	
NaZr ₂ PSi ₂ O ₁₂	Los octaedros ZrO ₆ tienen esquinas compartidas con SiO ₄ , hay un tetraedro de PO ₄ . El esqueleto tiene túneles que se intersectan en los cuales reside el Na ⁺ y se mueve.	0.2 a 300°C	Este compuesto tiene la más alta conductividad en el sistema Na _{1+x} Zr ₂ P _{3-x} Si _x O ₃ (0 < x < 3) y parece ser estable con sodio fundido.
Li ₄ SiO ₄ y sus soluciones, policristalino, prensado en frío y también sinterizados a 1000°C (no cambian sus propiedades)	Estructura 3-D de polihedros LiO ₄ con ventanas triangulares ocupación parcial de sitios Li	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴ a 300°C 1 a 700°C, electrodos de platino, fijados con pasta de oro para 10 ⁻² , 2 terminales y 10 ⁻² , 4 terminales desde 200 hasta 30 KH ₃	El más alto valor medido para σ fue para compuestos de Li ₄ Si _x T _{1-x} O ₄ con X = 0.6 los valores de tomados de porciones planas de gráficas de σ vs. frecuencia.
Li ₂ SiO ₅ Li ₂ SiO Li ₄ SiO ₄ LiAlSi ₂ O ₆ LiAlSiO ₄	-espomudeno -eucryptita -eucryptita vidrio cerámico vidrio	1.1 x 10 ⁻⁸ a 400°C 6.2 x 10 ⁻⁷ a 400°C 9.0 x 10 ⁻⁴ a 400°C 1.4 x 10 ⁻⁵ a 400°C 5.6 x 10 ⁻⁵ a 400°C 7.0 x 10 ⁻⁷ a 500°C 8.0 x 10 ⁻⁷ a 500°C 2.0 x 10 ⁻⁵ a 500°C	Se obtienen gráficas de conductividad en el plano complejo para estudiar las características interfaciales y burdas de los compuestos

3-1) La celda se puede representar por un circuito equivalente, hecho de elementos de resistencia R y capacitancia C, Fig. 3-1. Lo anterior se ha probado que funciona bien cuando no hay gran conducción electrónica (9).

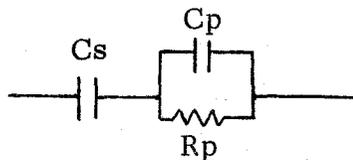


Fig. 3-1 Representación de un circuito equivalente.

Tenemos : C_s = capacitancia en serie.

C_p = capacitancia en paralelo

R_p = Resistencia en paralelo.

En la celda, R_p es la resistencia de la celda, C_s es la capacitancia en los electrodos y la pastilla (equivalente a capacitancia capa doble) usualmen-

te es de $\sim 10^{-6}$ F. C_p es la capacitancia total o geométrica de la pastilla y está relacionada con la constante dieléctrica por la siguiente ecuación.

$$\epsilon' = \frac{C_p(\text{pastilla})}{C_p(\text{vacfo})} \quad 3-1$$

en la cual

$$C_p(\text{vacfo}) = \frac{4\pi A}{d} \epsilon_0 \quad 3-2$$

A = sección transversal de la pastilla

d = espesor de la pastilla

Usualmente, en este trabajo

$$A/d \sim 2 \text{ cm}$$

$$C_p(\text{vacfo}) \sim 2 \times 10^{-12} \text{ F}$$

$$\epsilon \sim 10$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F(m)}^{-1}$$

$$C_p(\text{pastilla}) \approx 2 \times 10^{-11} \text{ F}$$

Este circuito de R_p y C_p es un caso ideal (9) en el cual no existe heterogeneidad y tampoco existen problemas entre las superficies de una pastilla policristalina

Se puede decir que C_s y C_p no dependen mucho de la temperatura, mientras R_p si cambia considerablemente; la pregunta es ¿Cómo se puede determinar en forma precisa el valor de R_p ?

El equipo para medir capacitancias y resistencias es un puente de Wheatstone, que puede medir el valor de R en dos formas: En serie, como un valor de D (Factor de disipación) y C_s , y en paralelo lo obtendremos como un valor de G (R_p^{-1}) y C_p . Los valores de R_p de la pastilla, no siempre corresponden a los valores R del equipo, ya que los circuitos no son equivalentes. Para resolver este problema, se desarrollan las ecuaciones de los circuitos equivalentes de la pastilla y del medidor de capacitancias y se realizan las comparaciones. Para efectuar lo anterior, hay dos formalismos teóricos; uno de

impedancia compleja Z^* y otro de admitancia compleja Y^* .

PUENTE DE CAPACITANCIAS

3-1) CIRCUITO EN SERIE

Impedancia Compleja

3 -1-1) cuando se mide D y Cs con el equipo, el circuito es el siguiente:



La impedancia compleja Z^* se define como:

$$Z^* = R_s - \frac{j}{\omega C_s}$$

en la cual $\omega = 2\pi f$

$$j = \sqrt{-1}$$

f = frecuencia en cps.

y la impedancia se puede representar también como $Z^* = Z' - jZ''$ en donde $Z' = R_s$, es la parte real y $Z'' = 1/\omega C_s$ es la parte imaginaria.

Hay varias formas de representar los resultados, se grafica Z'' contra Z' para tener el plano complejo.

Otra forma es graficar Z'' y Z' contra ω , lo que da un espectro característico del circuito equivalente.

Si se grafica Z'' contra Z' por el circuito del equipo, Fig. 3.1(a), se tiene una línea perpendicular al eje de las abscisas,

Los espectros de Z'' contra ω y Z' contra ω , se presentan en la Figs. 3-2(b) y 3-2(c) respectivamente.

3-1-2) Admitancia compleja.

La admitancia compleja para el circuito en serie, Fig. 3-1(a), se define como:

$$Y^* = (Z^*)^{-1} = \frac{1}{R_s - j/\omega C_s}$$

racionalizando queda que:

$$Y^* = \frac{1}{R_s - j/\omega C_s} = \frac{\omega C_s}{\omega R_s \omega C_s - j} = \frac{\omega C_s (\omega R_s \omega C_s + j)}{\omega^2 R_s^2 C_s^2 + 1} \quad 3-4$$

$$= \frac{\omega C_s (\omega R_s \omega C_s)}{\omega^2 R_s^2 C_s^2 + 1} + j \frac{C_s \omega}{\omega^2 R_s^2 C_s^2 + 1} \quad 3-5$$

pero

$$Y^* = Y' + jY''$$

de donde

$$Y' = \frac{\omega C_s (\omega R_s \omega C_s)}{\omega^2 R_s^2 C_s^2 + 1} \quad y \quad 3-6$$

$$Y'' = \frac{1}{R_s} \left(\frac{\omega R_s \omega C_s}{1 + (\omega R_s \omega C_s)^2} \right)$$

se debe notar que:

$\frac{\omega R_s \omega C_s}{1 + (\omega R_s \omega C_s)^2}$ corresponde, al graficar Y'' contra ω , a un pico de Debye, Fig.

3-3(b). En la figura 3-3 (c) se tiene el espectro de Y' contra ω .

El valor máximo del semicirculo en la gráfica del plano complejo, Y'' contra Y' , ver fig. 3-3 (a), se tiene cuando $\omega R_s \omega C_s = 1$.

El valor de R_s se puede determinar en esta figura, en la intersección del semicirculo con el eje de las abscisas como $1/R_s$ o en la Fig. 3-3 (c) como el valor que tiene la meseta superior, $1/R_s$.

Al hacer la comparación entre los dos formalismos admitancia e impedancia, para este circuito en serie, se puede ver que cuando interesa determinar R_s , es mucho más facil con la impedancia ya que no depende de la frecuencia, mientras que en el formalismo de la admitancia es muy importante el valor que tiene la frecuencia para la determinación del valor de R_s , ver Figs.

3-2 y 3-3

3-2 CIRCUITO EN PARALELO

(13)

3-2-1) Admitancia compleja.

Cuando se mide G y Cp con el equipo, el circuito es el siguiente:



Se tiene que la admitancia se define como:

$$Y^* = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p \quad 3-8$$

y así:

$$Y^* = Y' + jY'' \quad 3-9$$

en donde:

$$Y' = 1/R_p \quad \text{y} \quad Y'' = \omega C_p$$

Figs. 3-4(a),(b) y (c)

3-2-2) Impedancia Compleja

Nuevamente, recordando que la admitancia es el recíproco de la impedancia, se tiene:

$$Z^* = (Y^*)^{-1} = \frac{1}{1/R_p + j\omega C_p} \quad 3-11$$

$$\begin{aligned} &= \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_p} = \frac{R_p (1 - j\omega R_p C_p)}{1 + (\omega R_p C_p)^2} = \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} \\ &\quad - \frac{j\omega R_p^2 C_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p^2} \end{aligned}$$

y como:

$Y^* = Z' - jZ''$ se tiene

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad 3-12$$

y

$$Z'' = R_p \frac{\omega R_p C_p}{(1 + (\omega R_p C_p)^2)} \quad 3-13$$

Si se grafica Z'' contra Z' , ver Fig. 3-5 (a), se tiene el plano complejo de la impedancia para este circuito. En las Figs. 3-5 (b) y 3-5 (c), se tienen los espectros de Z'' vs. ω y Z' vs. ω , respectivamente. Se puede notar que en estas figuras resulta difícil determinar el valor de R_p en algunas frecuencias para el circuito en paralelo; pero es fácil determinarlo con el formalismo de la admitancia, ver Fig. 3-4.

3-3) EL CIRCUITO DE LA PASTILLA

3-3-1) Impedancia compleja

El circuito de la pastilla se puede representar como el circuito equivalente representado en la Fig. 3-1.

Para circuitos en paralelos se debe usar el formalismo llamado admitancia.

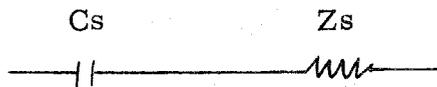
Así la admitancia para la parte del circuito en paralelo es:

$$Y^* = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p \quad 3-14$$

esto corresponde a una impedancia equivalente

$$\frac{1}{1/R_p + j\omega C_p} = Z_s \quad 3-11$$

que queda en serie con C_s resultando el siguiente circuito:



en el cual se emplea la impedancia, que es el formalismo para circuitos en serie, quedando la impedancia como:

$$Z^* = Z_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad \text{pero} \quad 3-15$$

$$Z_s = \frac{1}{1/R_p + j\omega C_p}. \quad 3-11$$

sustituyendo tenemos:

$$Z^* = \frac{1}{1/R_p + j\omega C_p} + \frac{1}{j\omega C_s} \quad 3-16$$

racionalizando tenemos

$$Z^* = \frac{jR_p\omega C_s + 1 + j\omega R_p C_p}{j\omega C_s - \omega^2 R_p C_p C_s} = \frac{1 + \omega jR_p(C_p + C_s)}{j\omega C_s - \omega^2 R_p C_p C_s} \quad 3-17$$

multiplicando esto por $\frac{j\omega Cs + \omega^2 Rp Cp Cs}{j\omega Cs + \omega^2 Rp Cp Cs}$ se tiene, separando la parte real de la imaginaria

$$Z^* = \frac{\omega^2 Rp Cs [Cp + Cs] - Cp}{\omega^2 Cs^2 + \omega^4 Cp^2 Cs^2 Rp^2} - j \frac{Cs \omega [1 + \omega^2 Rp^2 Cp (Cp + Cs)]}{\omega^2 Cs^2 + \omega^4 Cp^2 Cs^2 Rp^2} \quad 3-18$$

y como $Z^* = Z' - jZ''$ luego

$$Z' = \frac{Rp}{1 + (\omega Rp Cp)^2} \quad y \quad 3-19$$

$$Z'' = \frac{1 + \omega^2 Rp^2 Cp (Cp + Cs)}{\omega Cs (1 + \omega^2 Cp^2 Rp^2)} \quad 3-20$$

Para graficar los valores de la impedancia, se escogen los siguientes valores de $Cp = 10^{-12}$ F, $Cs = 10^{-6}$ F y $Rp = 10^6$ ohm, que son *constantes* en las Figs. 3-6 a 3-10.

Al graficar Z' de la ecuación 3-19 contra ω se obtiene una curva y el valor de la meseta a bajas frecuencias es el valor de Rp del circuito, ver Fig. 3-6.

La Fig. 3-7 es la misma que la Fig. 3-6, es sólo que en la forma logarítmica, se tiene $\log. Z'$ vs. $\log. \omega$, teniéndose que los valores de las mesetas dan nuevamente los valores de Rp para cada curva.

En la Fig. 3-8 se tiene la gráfica de Z'' contra ω , ecuación 3-20 que es un pico de Debye que corresponde a la parte de la ecuación en que $\omega Cp Rp$ toma el valor más grande y se hace importante la relación $Cp Cs \omega^2 Rp^2 / Cs (1 + \omega^2 Cp^2 Rp^2)$, la parte exponencial a bajas frecuencias reduce la ecuación a sólo $1/\omega Cs$, que es el valor que toma la curva en la gráfica de la Fig. 3-8.

La Fig. 3-9 es la misma gráfica que la Fig. 3-8, sólo que en escala logarítmica, se tiene $\log. Z''$ vs. $\log. \omega$, se puede notar que cada curva tiene un valor Rp correspondiente.

El plano complejo se tiene al graficar Z'' vs Z' , Fig. 3-10, en el - que hay un semicírculo que tiene un máximo cuando $\omega R_p C_p = 1$ y, en la intersección del eje de las abscisas, la línea vertical de la gráfica se tiene el valor de $R_p = 10^6 \Omega$, Z'' está determinada en la ecuación 3-20 y Z' en la ecuación 3-19.

3-3-2) Admitancia Compleja.

Recordando que $Y^* = (Z^*)^{-1}$ y como ya se obtuvo Z^* de la ecuación (3-17) se tiene:

$$Y^* = (Z^*)^{-1} = \left(\frac{1}{1/R_p + j\omega C_p + \frac{1}{j\omega C_s}} \right)^{-1} \quad 3-21$$

$$Y^* = \frac{R_p j\omega C_s}{(1 + j\omega R_p C_p) j C_s} + \frac{1 + j\omega R_p C_p}{(1 + j\omega C_p R_p) (j\omega C_s)} =$$

$$= \frac{j\omega C_s - \omega^2 R_p C_p C_s}{j\omega R_p C_s + 1 + j\omega R_p C_p}.$$

racionalizando se tiene:

$$= \frac{(j\omega C_s - \omega^2 R_p C_p C_s) (1 - j\omega R_p C_s - j\omega R_p C_p)}{1 + \omega^2 R_p^2 (C_p + C_s)^2}$$

separando la parte real de la imaginaria

$$Y^* = \frac{\omega^2 R_p C_s^2}{1 + \omega^2 R_p^2 (C_p + C_s)^2} + \quad 3-22$$

$$+ j \frac{\omega C_s + \omega^3 R_p^2 C_p C_s^2 + \omega^2 R_p^2 C_p^2 C_s}{1 + \omega^2 R_p^2 (C_p + C_s)^2} \quad 3-23$$

y como $Y^* = Y' + jY''$ y $C_s \gg C_p$

se tiene

$$Y' = \omega C_s \frac{R_p C_p}{1 + (\omega R_p C_s)^2} \quad 3-24$$

$$Y'' = \frac{\omega C_s (1 + \omega^2 R_p^2 C_p C_s)}{1 + \omega^2 R_p^2 C_s^2} \quad 3-25$$

tomando $C_s = 10^{-6} F$, $C_p = 10^{-12} F$ y $R_p = 10^6 \text{ ohm}$.

En la fig. 3-11 se presenta la gráfica del plano complejo, graficando Y'' vs. Y' . Se puede observar que el valor máximo en el semicírculo se tiene cuando $\omega R_p C_s = 1$, el valor de $1/R_p$ se obtiene en la intersección de la abscisa con la línea perpendicular que nace donde termina el semicírculo. En el centro del semicírculo, sobre el eje de las abscisas, se tiene el valor de $1/2 R_p$ y la línea está determinada por el valor de ωC_p , aumentando su valor cuando ω es mayor.

En la Fig. 3-12 se presenta la gráfica de $\log. Y'$ vs. ω en el que se tienen varias curvas. Las mesetas de estas curvas nos indican el valor de R_p en el circuito de la pastilla. Los valores que se indicaron anteriormente para C_s , C_p y R_p se usan en todas las gráficas siguientes.

La fig. 3-13 es la misma que la Fig. 3-7 sólo que ahora graficamos en escala lineal el valor de Y' vs. ω .

El pico de Debye se obtiene al graficar Y'' vs. ω , Fig. 3-14 en el que se obtiene también una parte exponencial debida a los valores que toma ωC_s .

La gráfica de $\log. Y''$ vs. ω nos da una serie de curvas que corresponden a distintos valores de R_p ver Fig. 3-15

3-3-3) Admitancia de la Pastilla.

Para graficar los valores de la admitancia, se eligen los siguientes valores de $C_p = 10^{-12} \text{F}$, $C_s = 10^{-6} \text{F}$ y $R_p = 10^6 \Omega$ para las figuras de 3-11 a 3-16.

En la fig. 3-11, se tiene la gráfica del plano complejo graficando Y'' ecuación 3-25, contra Y' , ecuación 3-24. Se observa que el valor máximo en el semicírculo se tiene cuando $\omega R_p C_p = 1$

El valor de $1/R_p$ se determina en la intersección del eje de las abscisas

con la línea vertical de la gráfica, cuyo valor está determinado por ωC_p .

En la Fig. 3-12 se tiene la gráfica de Y'' , ecuación 3-25 contra $\log \omega$

El pico de Debye se encuentra a bajas frecuencias, cuando la ecuación se reduce a una ecuación de Debye, $\omega C_s R_p / 1 + \omega^2 R_p^2 C_s^2$, a más altas frecuencias se tiene una curva exponencial que está determinada por el valor que toma ωC_s .

La fig. 3-13 es la misma gráfica que la Fig. 3-12 sólo que ahora se grafica $\text{Log. } Y''$ vs. ω , obteniéndose curvas diferentes para cada valor de R_p . Graficando Y' ecuación 3-24, contra $\log. \omega$, Fig. 3-14 se obtiene una curva en la que se tiene una meseta a frecuencias altas, que corresponden al valor de R_p .

En la Fig. 3-15 se tiene la misma gráfica, que en la Fig. 3-14, sólo que ahora se grafica $\log. Y'$ contra $\log. \omega$ y se obtienen curvas cuyas mesetas corresponden a valores diferentes de R_p .

3-4 COMPARACION DE LOS CIRCUITOS DE LA PASTILLA Y EL EQUIPO

3-4-1) Resistencias-Circuito en serie del equipo

Es importante saber que rango de ω se puede usar el equipo para determinar el valor de R_{past} . (resistencia de la pastilla). De la Fig. 3-6 se ve que el valor llmite, con una desviación de 1% que puede tomar ω es diferente para cada valor de R_{past} . Se presenta una tabla en donde se indican los valores de R_{past} . y ω , para cuando $C_p = 10^{-11}$ F, que es el valor real de C_p en la pastilla.

<u>R_{past}.</u>	<u>ω</u>
10^8	10^4
10^7	10^5
10^6	10^6
10^5	10^7
10^4	10^8
10^3	10^9

Se puede notar que la suma de los exponentes de ω y R_{past} . es una constante. Al graficarlos y sabiendo que el equipo trabaja entre 100 y 10^4 cps y $\omega = 2\pi f$, tendremos que el intervalo de ω es de 628cps a 62,832 cps, ver fig. 3-16.

3-4-2) Resistencias. - Circuito en paralelo del equipo

Como en el inciso anterior, nos interesa saber en que rango de se puede usar el equipo para determinar el valor de R_{past} . El valor que adquiere R_{past} , para diferentes valores de ω se puede determinar de la Fig. 3-1, con una desviación del 1%. En la tabla siguiente se presentan los valores de R_{past} . y ω Cuando $C_p = 10^{-11}$ F, valor real del C_p en la pastilla.

<u>Rpast.</u>	<u>ω</u>
10^2	10^4
10^3	10^3
10^4	10^2
10^5	10^1
10^6	10^0
10^7	10^{-1}

Nuevamente se puede observar que la suma de los exponentes de los valores de Rpast y ω son una constante.

El intervalo de ω para el equipo es de 628 a 62832 cps y en la Fig. 3-16 se presenta el intervalo en que se puede usar G y Cp para determinar Rpast.

Es importante ver que existe una región de traslape en la cual es posible determinar Rpast. por medio de los dos tipos de circuitos del equipo y con D y Cs y con G y Cp.

3-4-3) Capacitancias - Circuito en serie del equipo.

El problema de medir la capacitancia en el equipo, es que mientras hay una en el equipo, existen dos capacitancias en la celda; Cs de los electrodos y Cp de la pastilla. Es por eso, que la capacitancia que indica el equipo no es independiente de la frecuencia. Para entender esto, se iguala la parte imaginaria de la Impedancia del circuito que representa al equipo (3-3), con la misma de la pastilla.

$$\text{celda } Z'' = \frac{1 + \omega^2 R_p^2 C_p (C_p + C_s)}{\omega C_s + \omega^2 C_p^2 C_s R_p^2} \quad 3-25$$

$$\text{equipo } Z'' = \frac{1}{\omega C_{s\text{equipo}}}$$

$$\frac{1}{\omega C_s} = \frac{1 + \omega^2 R_p^2 C_p (C_p + C_s)}{\omega C_s + \omega^2 C_p^2 C_s R_p^2} \quad 3-26$$

(equipo)

y por eso:

$$C_{s \text{ equipo}} = \frac{\omega C_s + \omega^2 C_p^2 C_s R_p^2}{(1 + \omega^2 R_p^2 C_p (C_p + C_s))}$$

$$= \frac{C_s + \omega C_p C_s R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_p (C_p + C_s)} \quad 3-27$$

En la Fig. 3-17 se tiene la gráfica de C_s y equipo teorica vs ω , con valores de $C_p = 10^{-11}$ F, $C_s = 10^{-6}$ F y $R_p = 10^3$ ohms, $R_p = 10^6$ ohms y $R_p = 10^9$ ohms. En esta Fig. se puede ver que existen dos mesetas la de más baja frecuencia corresponde al valor de C_s y la de más altas frecuencias al valor de C_p .

3-4-4) Capacitancias. - Circuito en paralelo del equipo

El razonamiento anterior se aplica nuevamente cuando el circuito del equipo está en paralelo. Se igualan las partes imaginarias de la admitancia compleja del circuito, ecuación 3-8, y de la pastilla, ecuación 3-26.

$$Y'' = \frac{\omega^2 C_s (1 + \omega^2 R_p^2 C_p C_s)}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} \quad 3-25$$

$$Y'' = \frac{\omega C_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s} \quad 3-3$$

igualando se tiene:

$$\frac{\omega C_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2} = \frac{\omega^2 C_s (1 + R_p^2 C_p C_s)}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s} \quad 3-29$$

quedando

$$C_s = \omega C_s (1 + \omega^2 R_p^2 C_p C_s)$$

En la Fig. 3-18, se tiene la gráfica de C_s equipo teorica vs. ω con valores de $C_p = 10^{-11}$ F, $C_s = 10^{-6}$ F y $R_p = 10^3$ ohms, $R_p = 10^6$ ohms y

$$R_p = 10^9 \text{ ohms.}$$

En esta figura se puede ver que para cada valor de R_p existen dos mesetas, la de más baja frecuencia corresponde al valor de C_s y el de más alta frecuencia al valor de C_p .

En la Fig. 3-16 se tiene ahora la gráfica de Z''/ω (ecuación 3-20) vs $\log. \omega$, se tiene un valor de $C_s = 10^{-6}F$ y de $C_p = 10^{-12}F$ en la meseta superior y la inferior respectivamente. Se obtiene una curva diferente para cada valor de R_p , toda con el mismo valor de meseta superior e inferior.

En la Fig. 3-17 se tiene la gráfica de $\log. Y''/\omega$ contra $\log. \omega$ de la ecuación (3-25) se tiene dos mesetas, la superior corresponde al valor de $C_s = 10^{-6}F$ y la inferior corresponde al valor de $C_p = 10^{-12}F$, con lo cual cada curva es diferente para cada valor de R_p , pero a todas corresponde el mismo valor de la meseta superior y de la inferior.

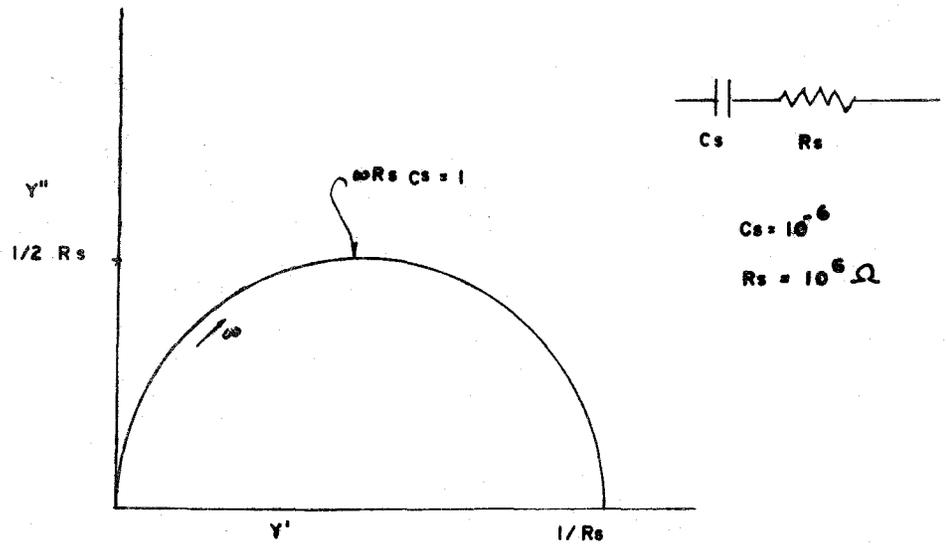


FIG 3 - 3 (a) Y'' vs Y'

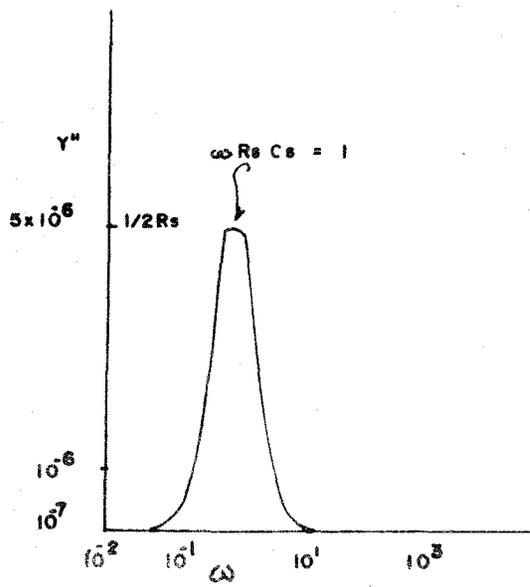


FIG 3 - 3 (b) Y'' vs ω

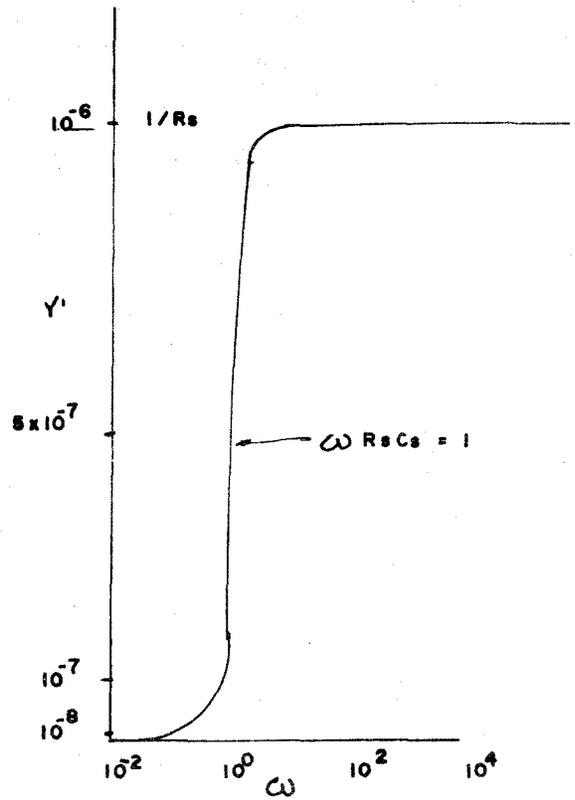


FIG 3 - 3 (c)

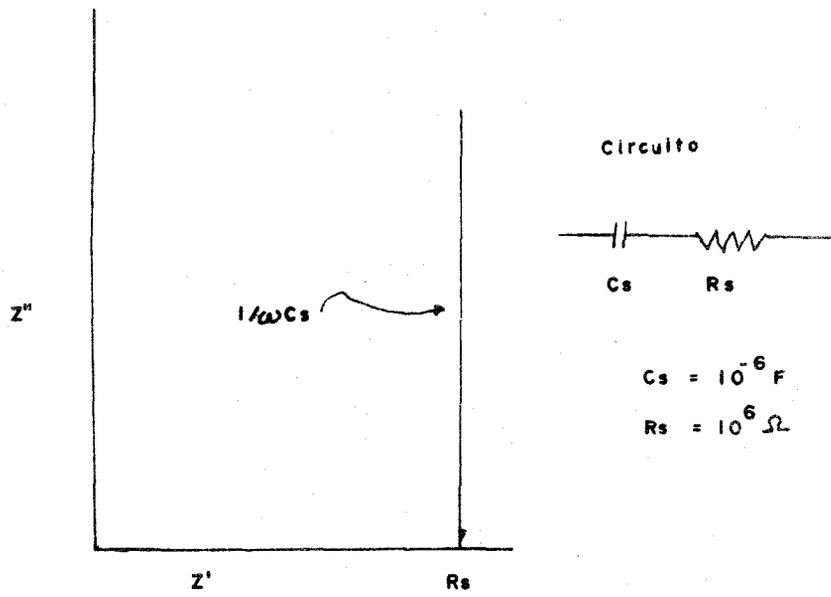


FIG 3 - 2 (a) Z'' vs Z'

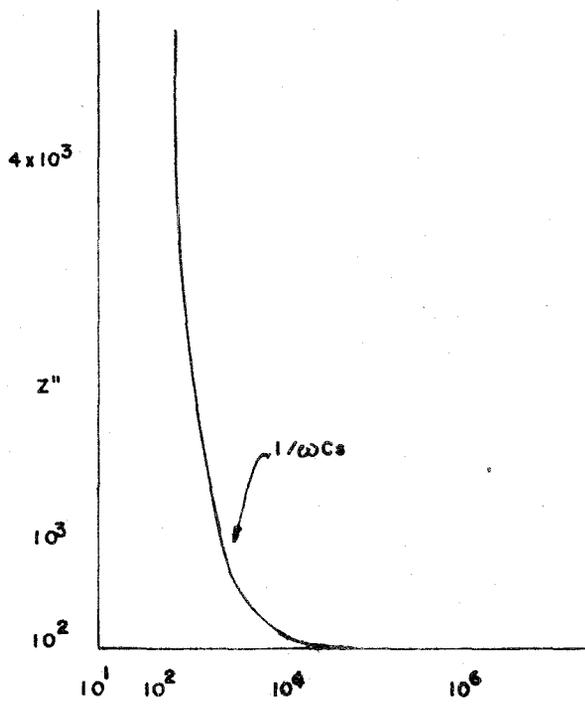


FIG. 3 - 2 (b) Z'' vs $\log \omega$

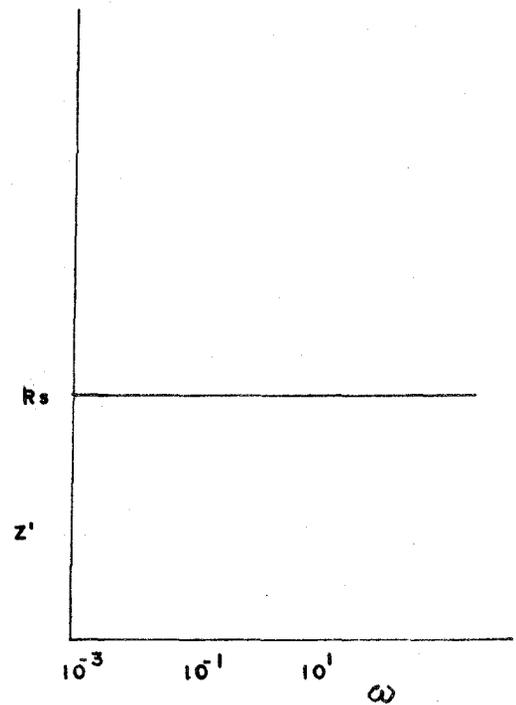


FIG 3 - 2 (c) Z' vs $\log \omega$

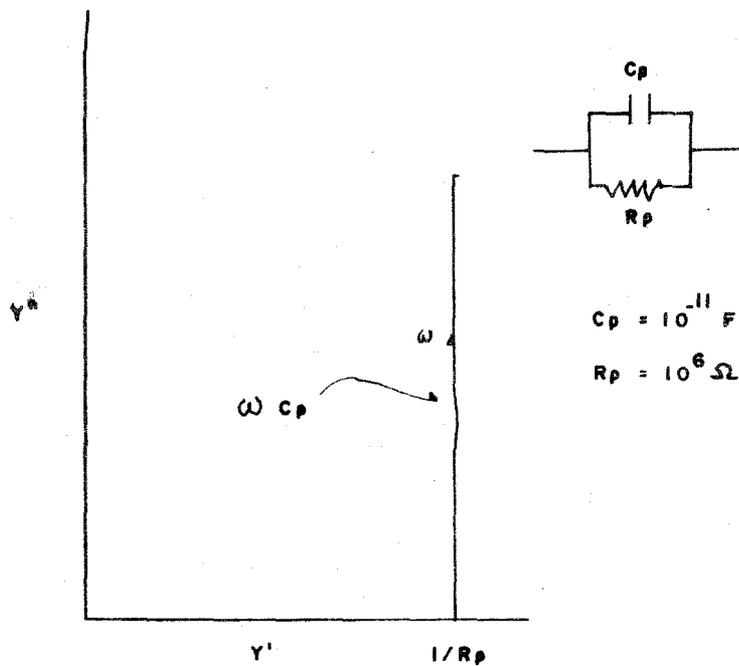


FIG. 3 - 4 (a) Y'' vs. Y'

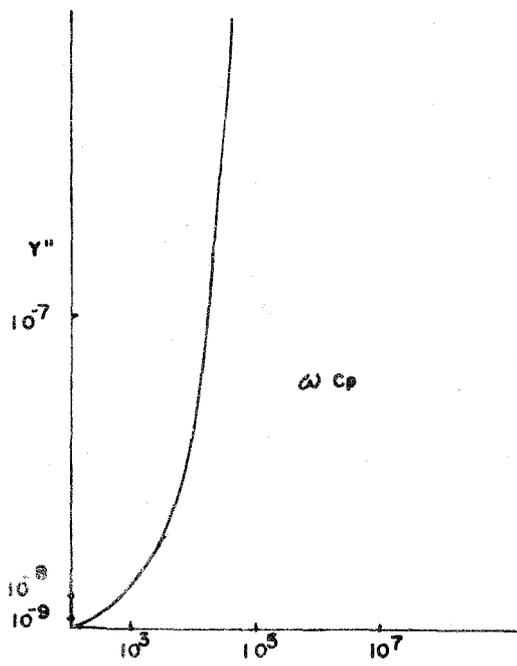


FIG. 3 - 4 (b) Y'' vs ω

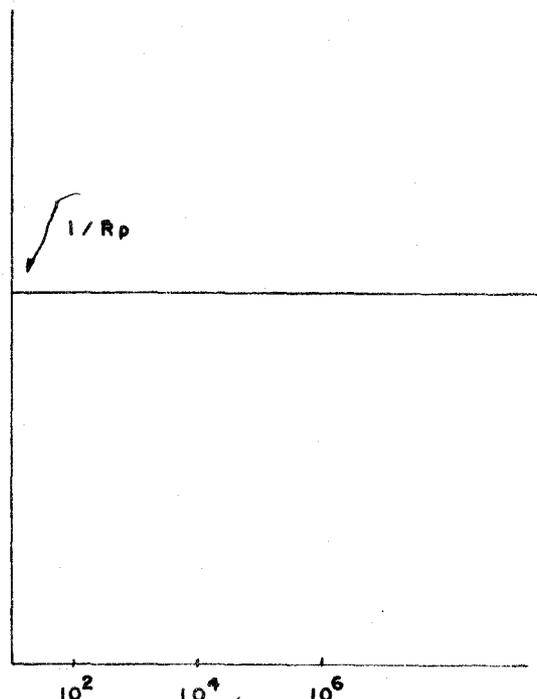


FIG. 3 - 4 (c) Y' vs. ω

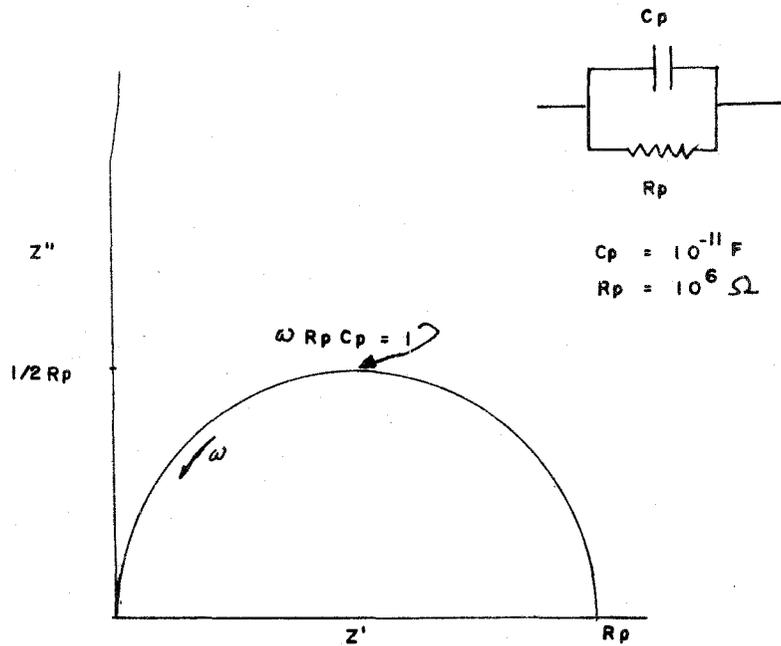


FIG 3 - 5 (a) Z'' vs Z'

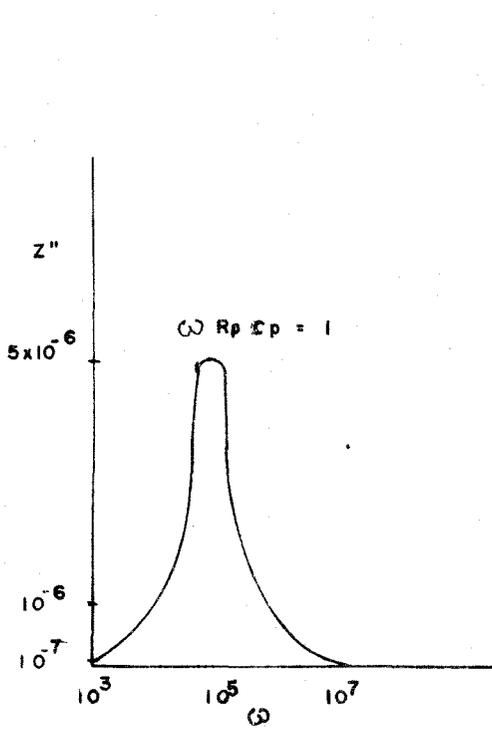


FIG 3 - 5 (b) Z'' vs ω

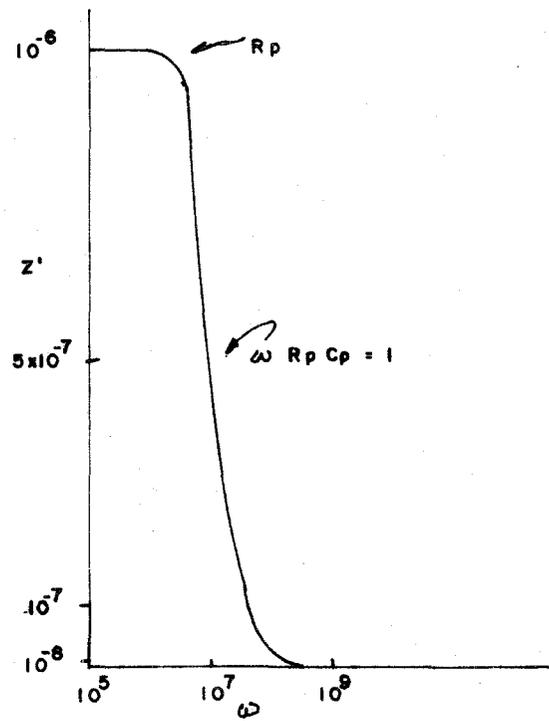


FIG 3 - 5 (c) Z' vs ω

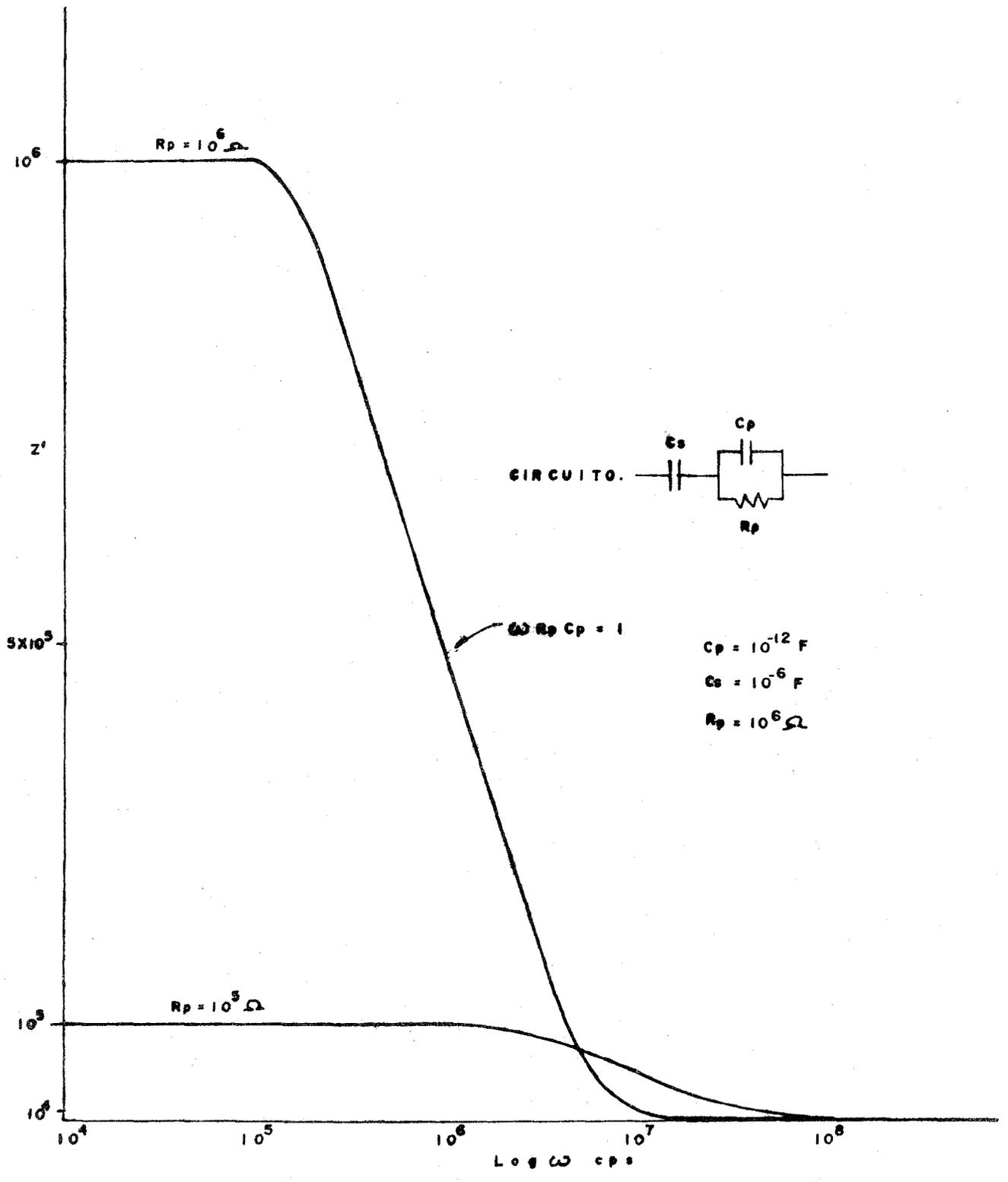
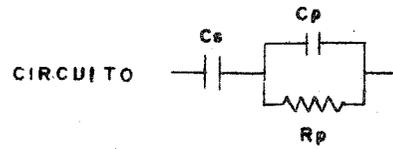


FIG. 3-6, Z' vs. $\text{Log } \omega$



$C_p = 10^{-12} \text{ F}$
 $C_s = 10^{-6} \text{ F}$
 $R_p = 10^6 \Omega$

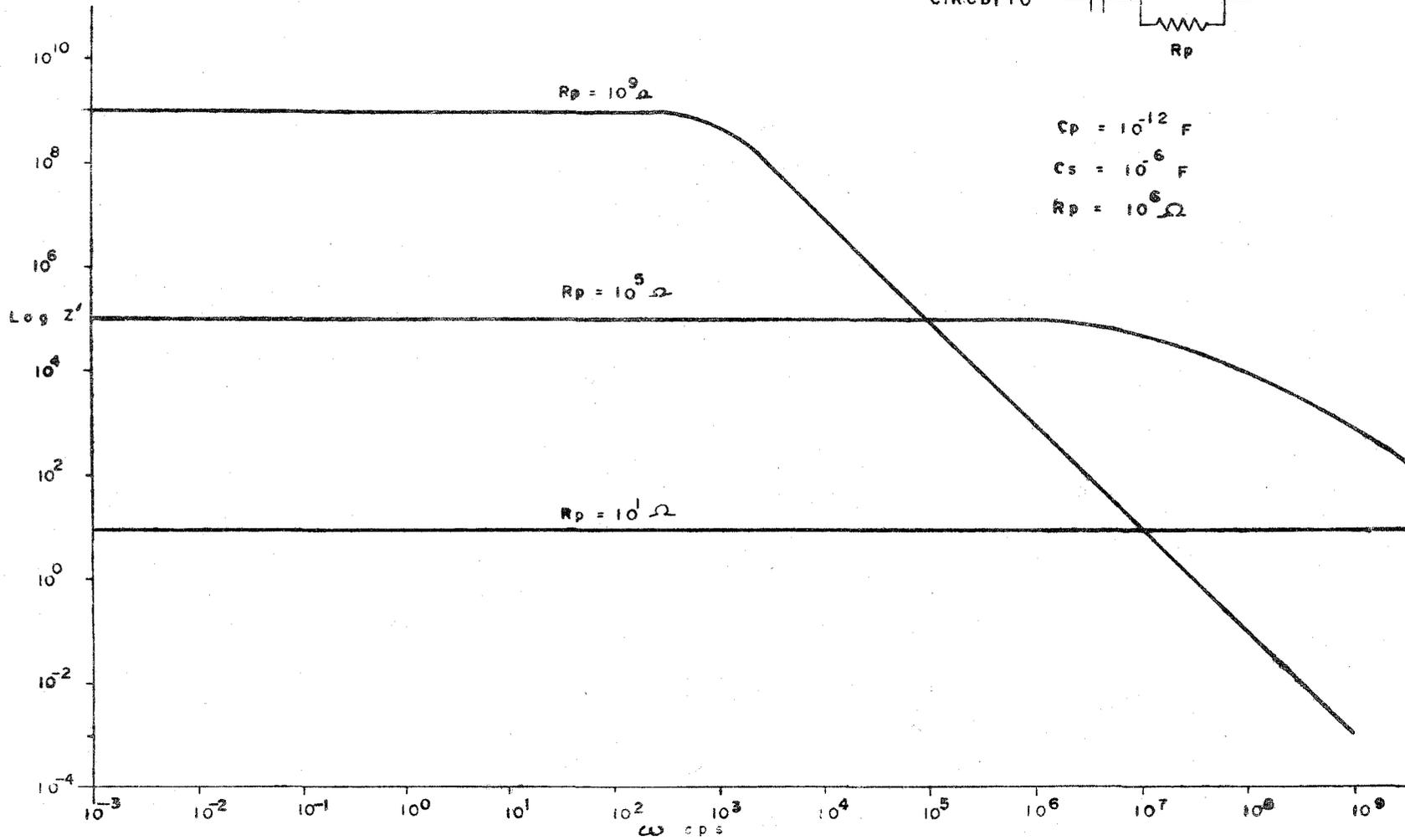


Fig. 3-7 Grafico $\log z'$ vs, $\log \omega$

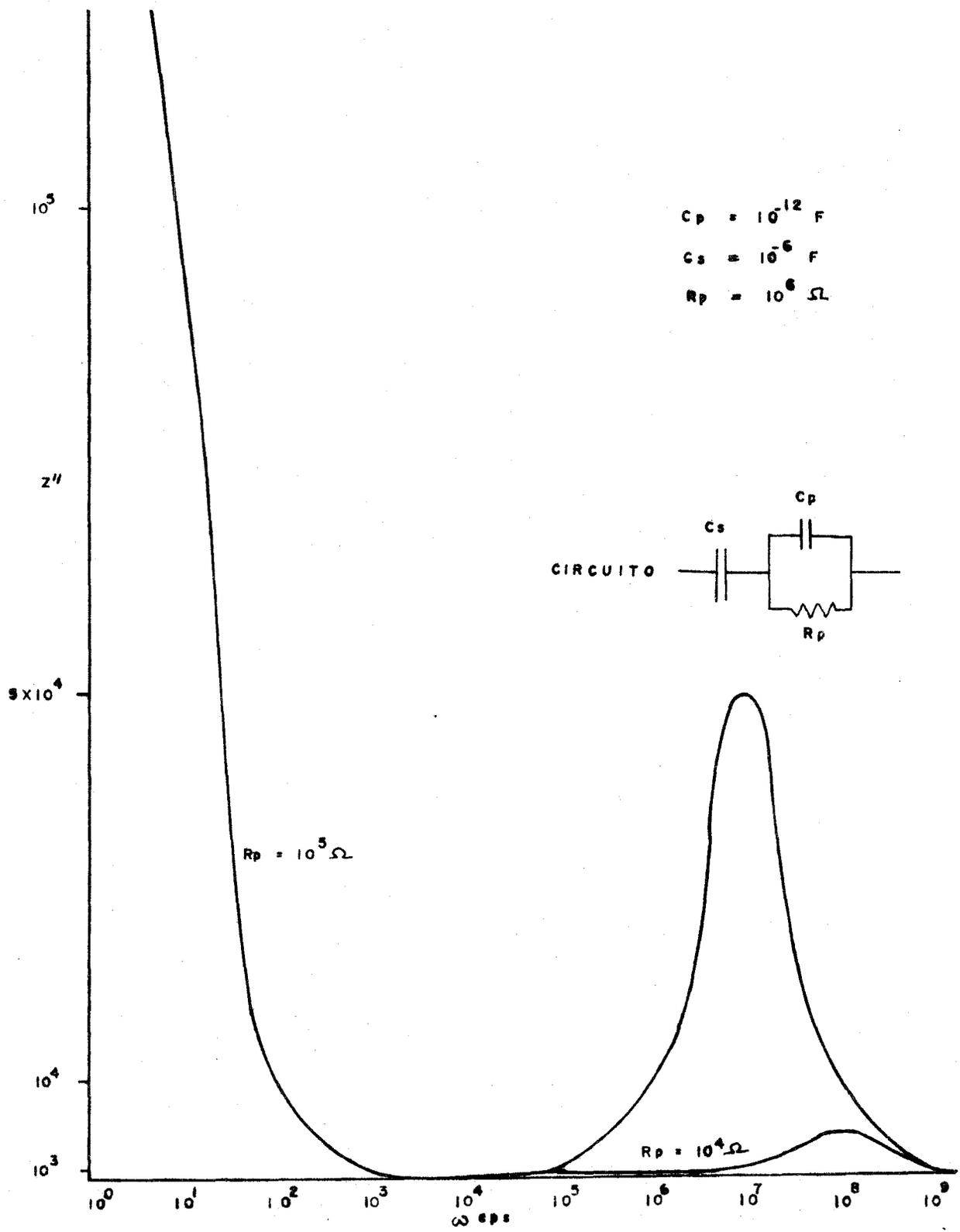


Fig. 3-8, Z'' vs. $\text{Log. } \omega$

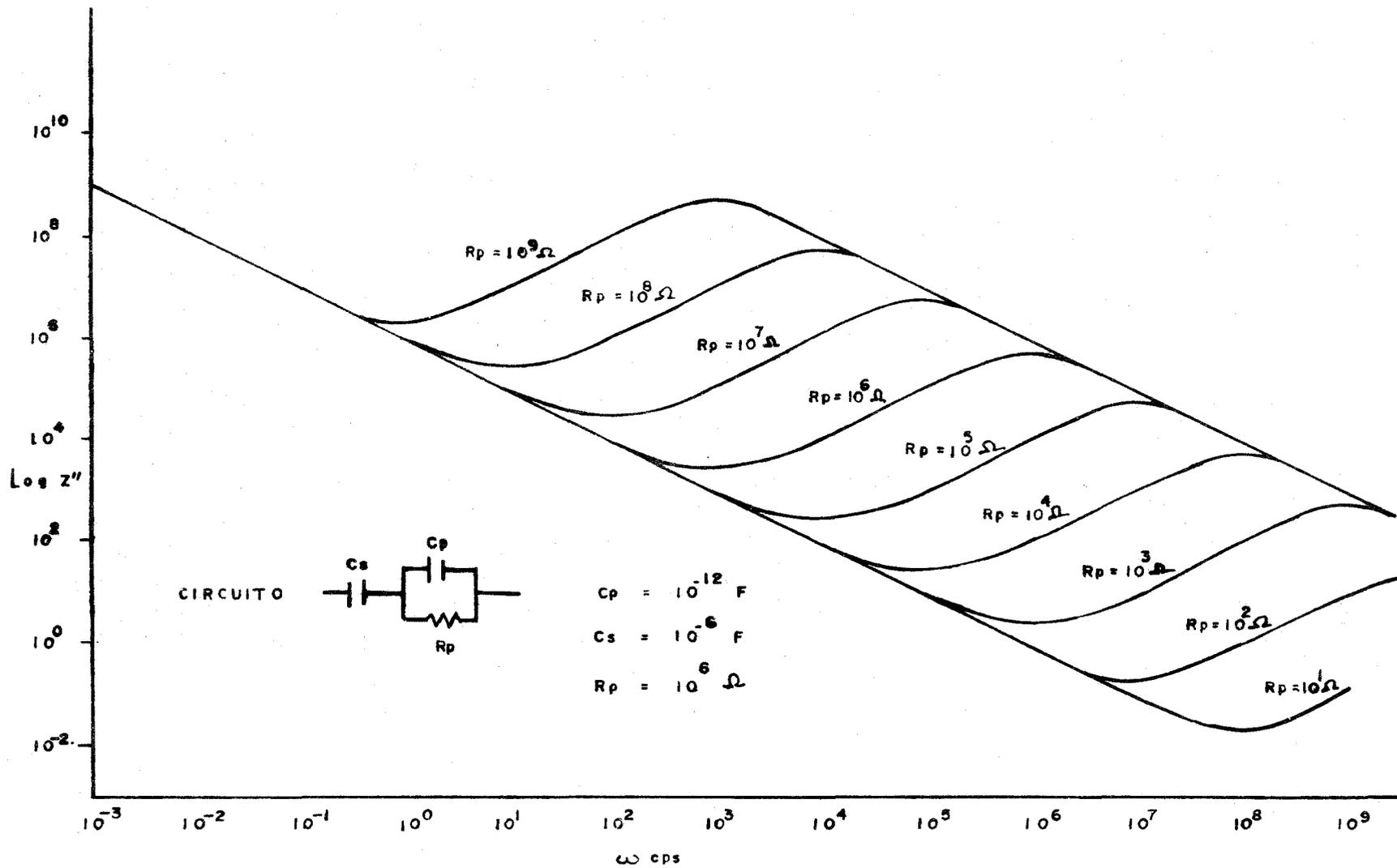


Fig. 3-9, Log. z'' vs. Log ω

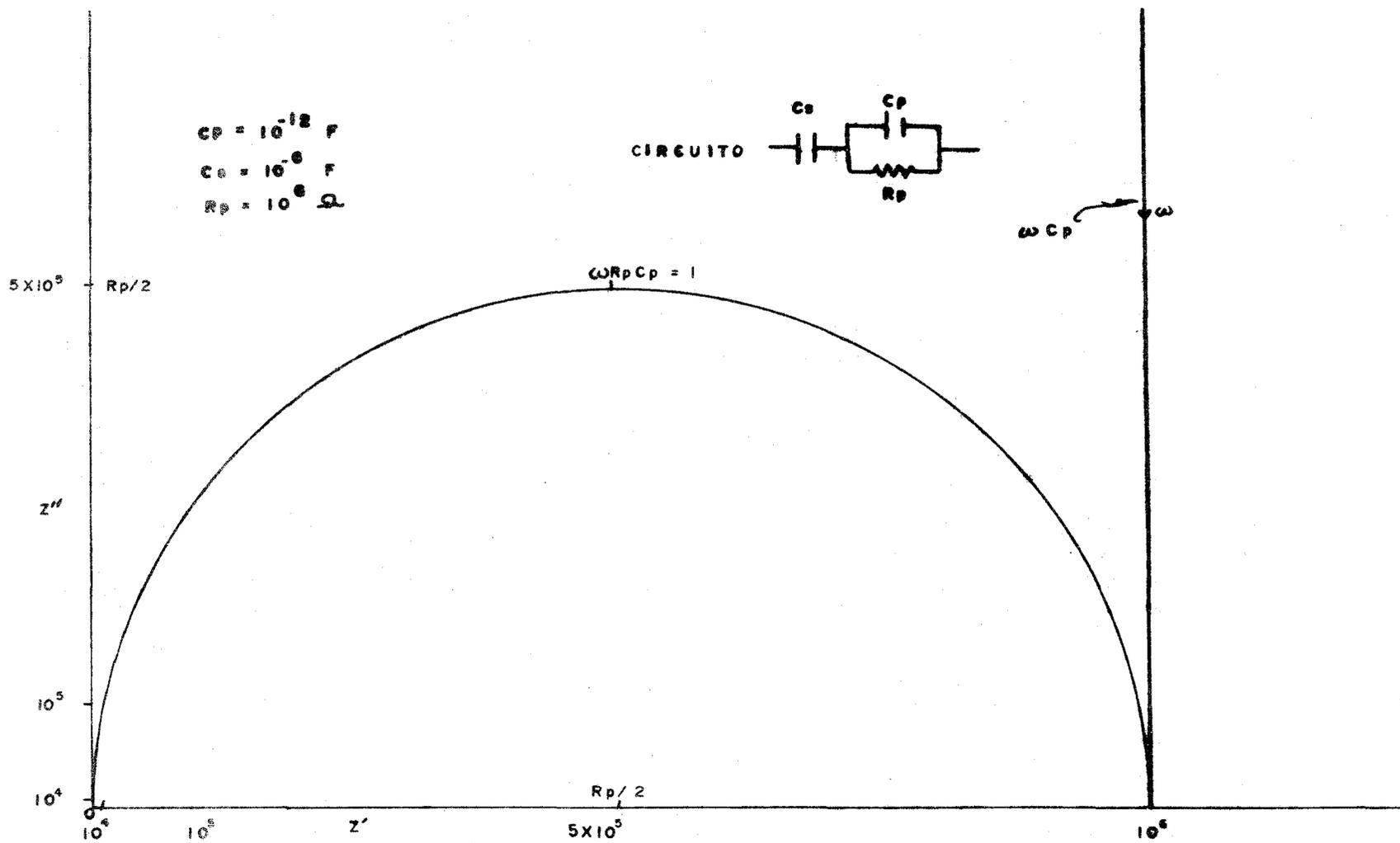


Fig. 3-10 Z'' vs. Z'

$C_p = 10^{-12} \text{ F}$
 $C_s = 10^{-6} \text{ F}$
 $R_p = 10^6 \Omega$

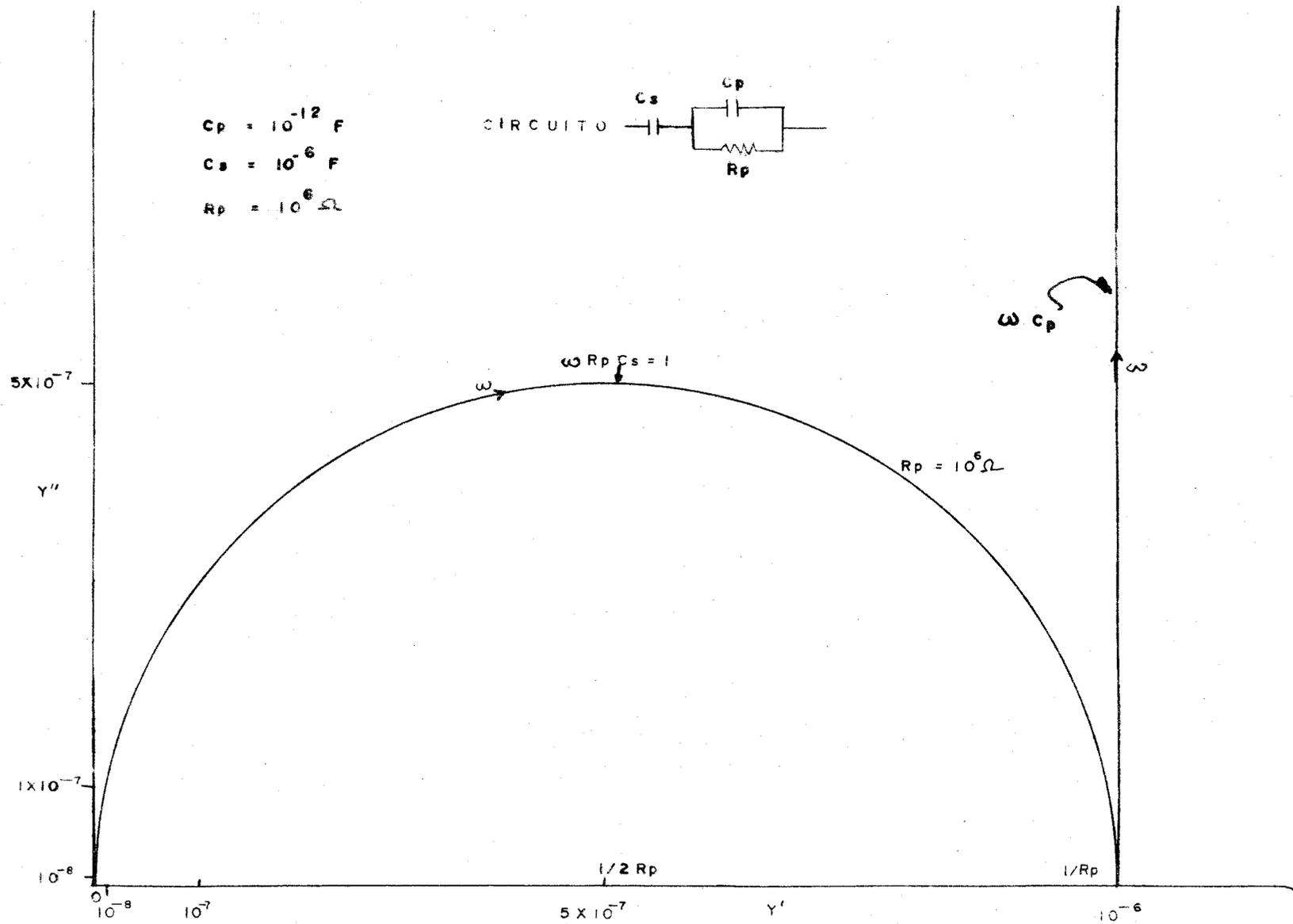
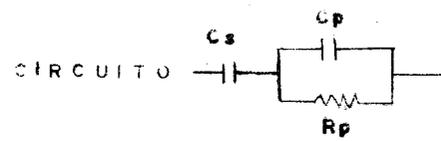


Fig. 3-11. Y'' vs. Y'

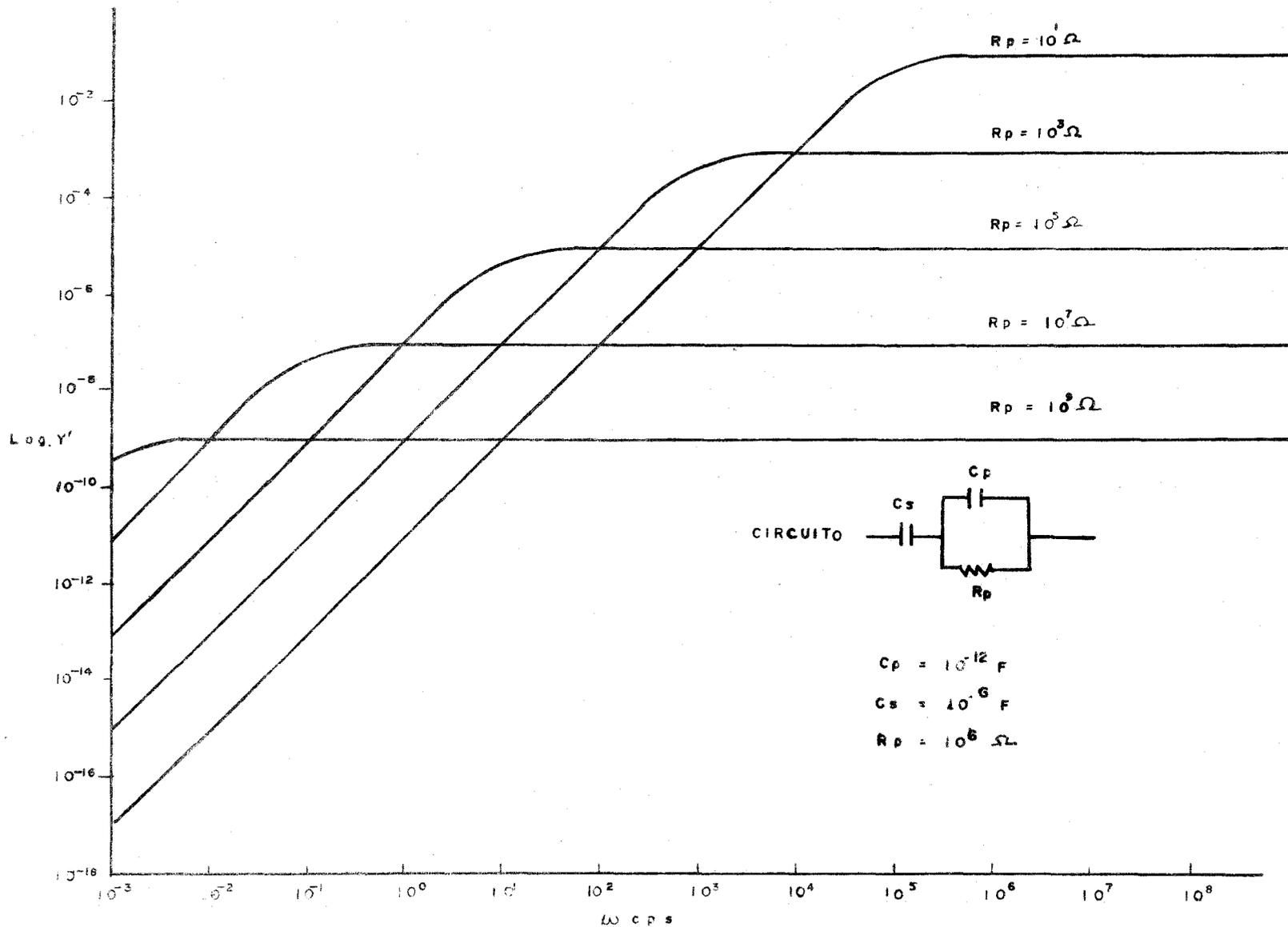


Fig. 3-12 Log. Y' vs. Log ω

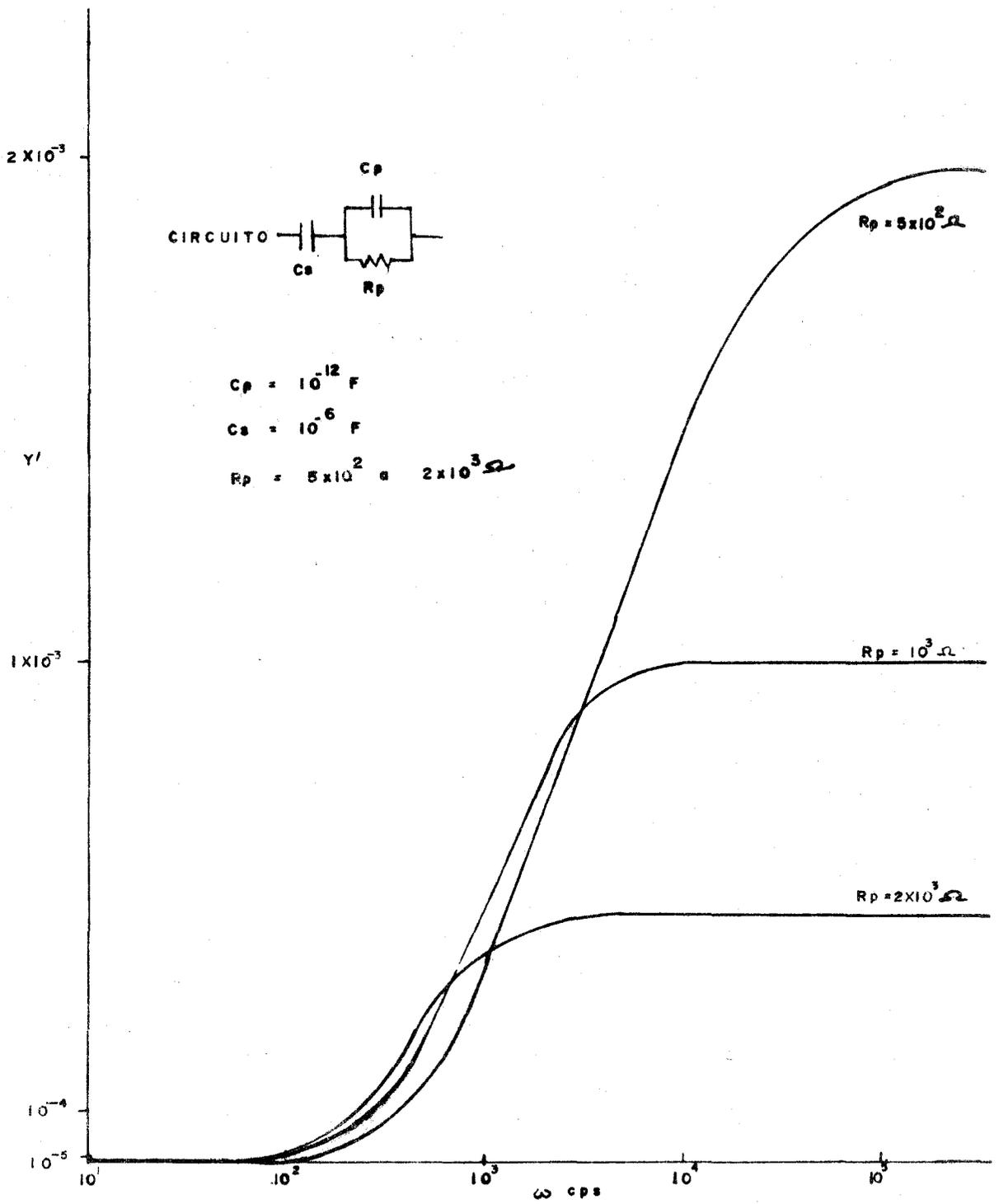


Fig. 3-13, Y' vs. $\text{Log } \omega$

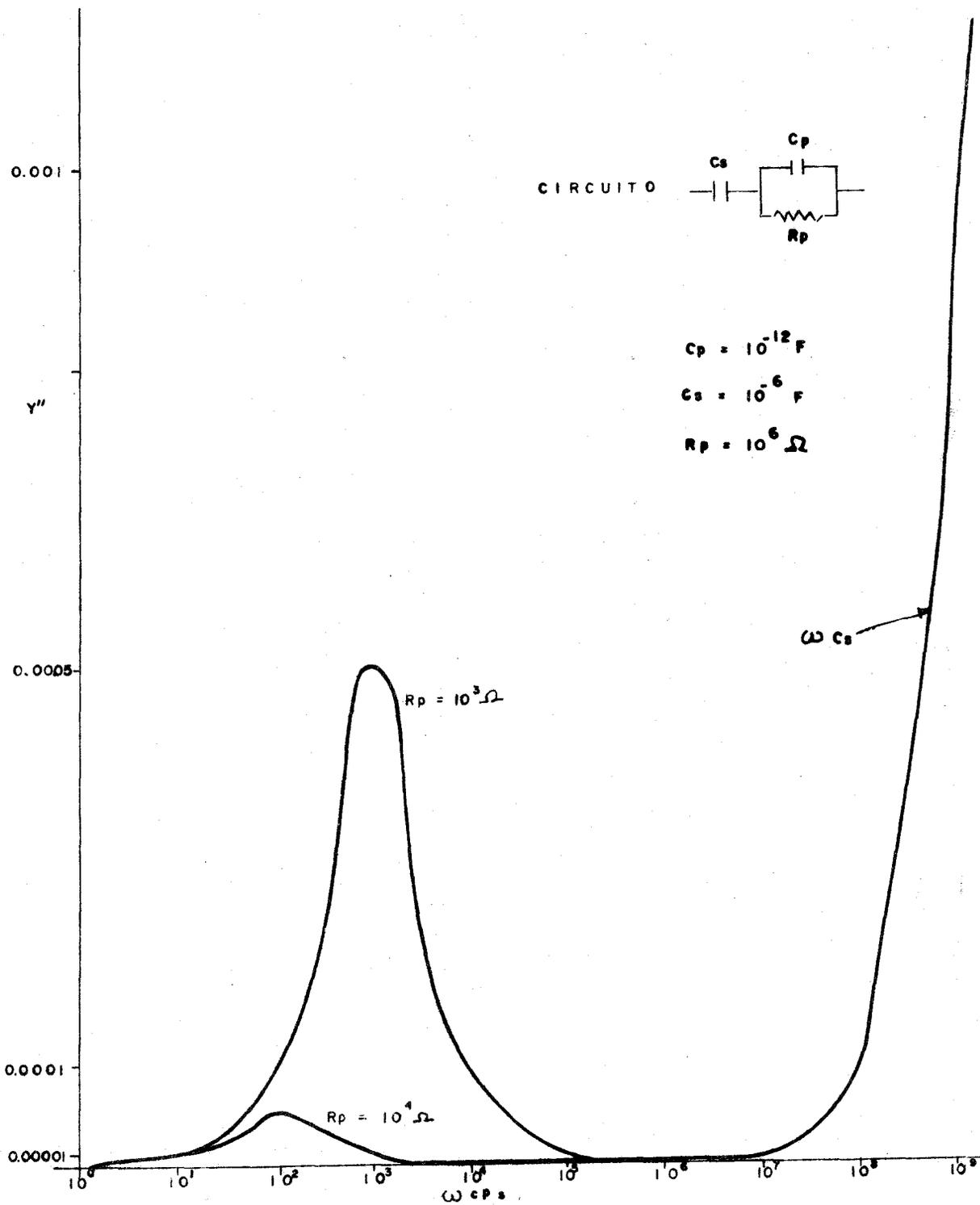


Fig. 3-14 Y'' vs. $\text{Log } \omega$

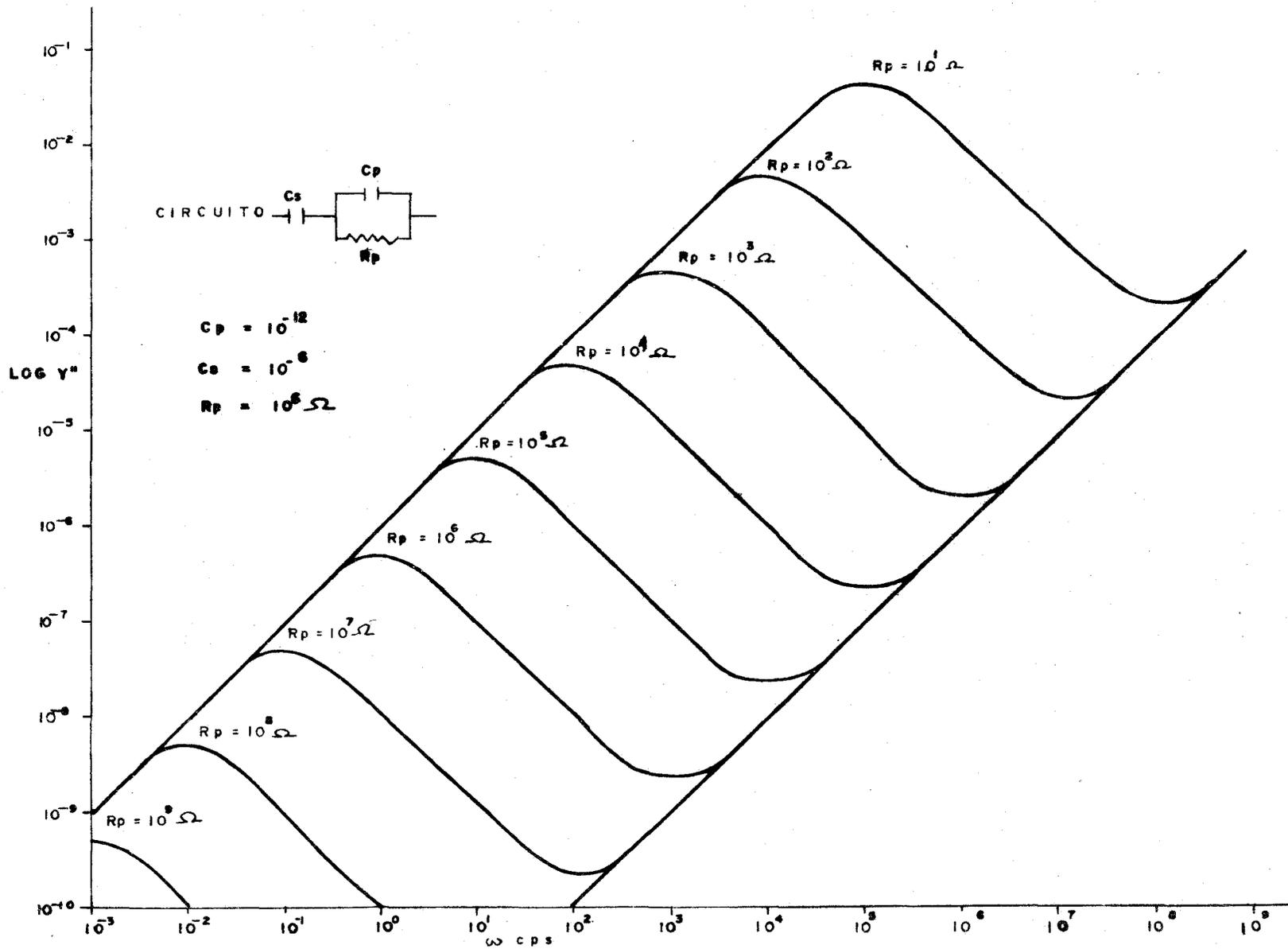


Fig. 3-18 Log Y'' vs. Log ω

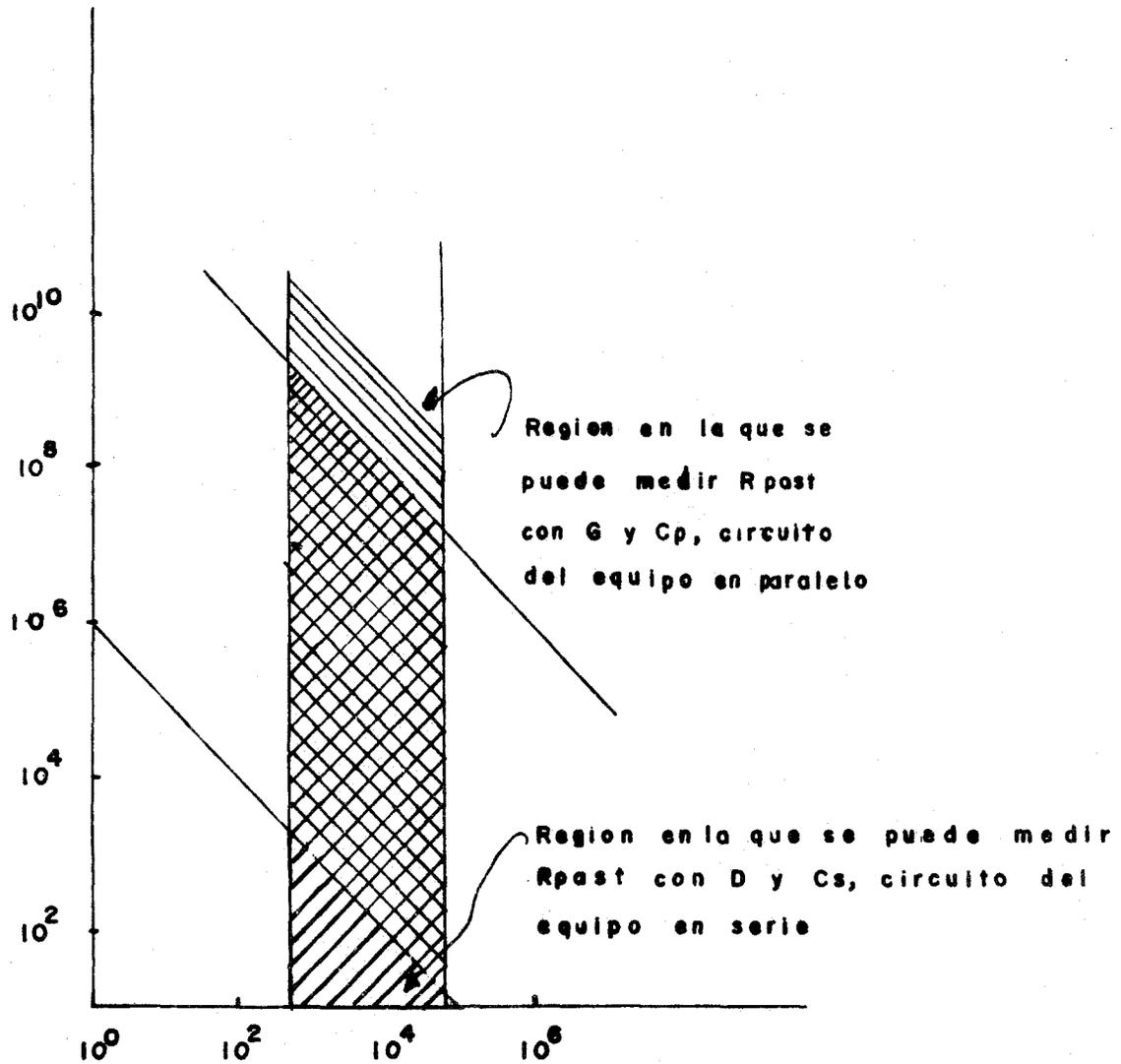


FIG 3 - 16 Region util del equipo.

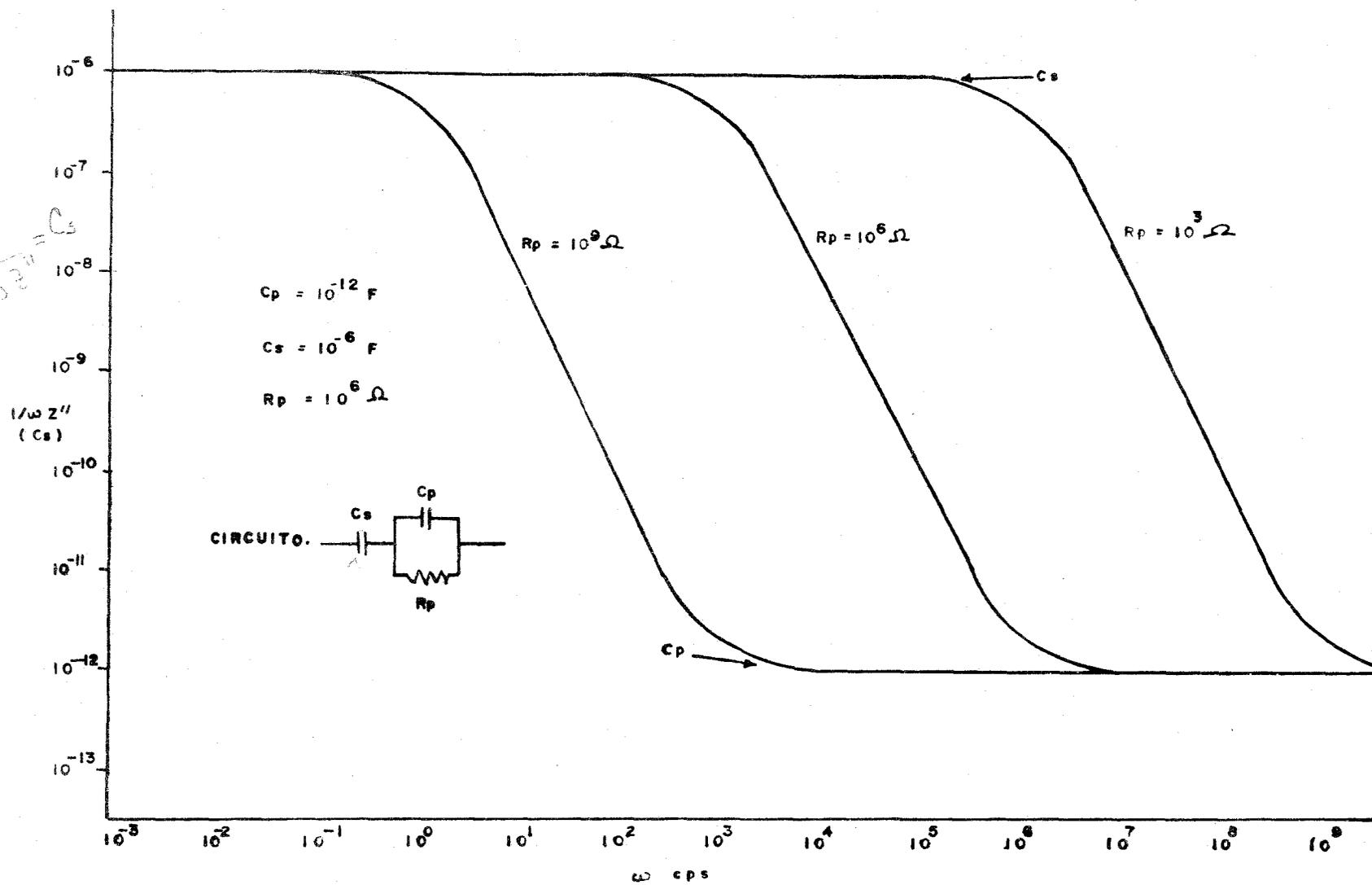


Fig. 3-17, $\text{Log } 1/\omega Z''$ vs. $\text{Log } \omega$

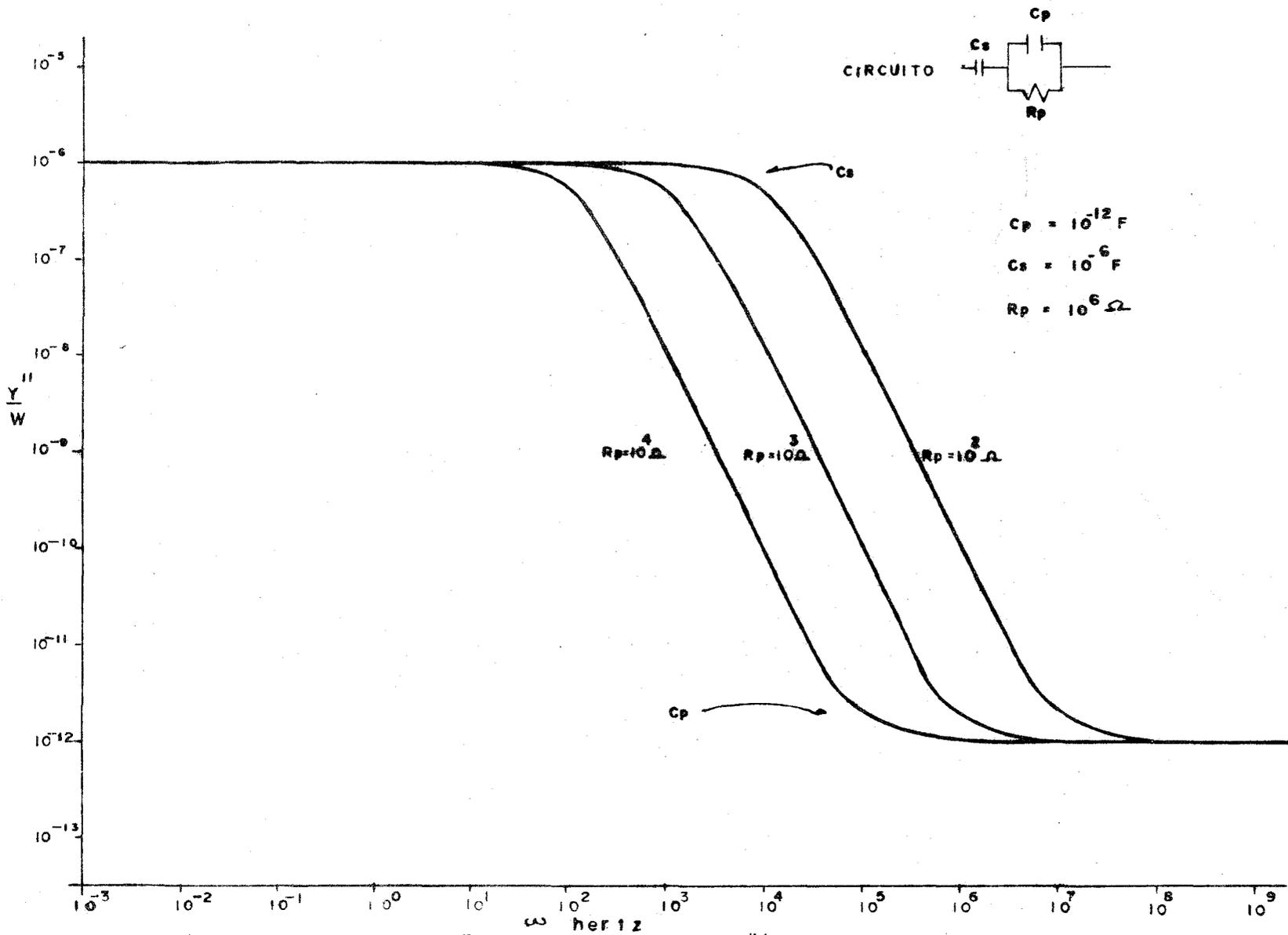


Fig. 3-18 Grafica de y''/w contra $\log w$

4-1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados experimentales se presentan en el Apéndice A.

Las figuras de la 4-2 a la 4-22 son las gráficas de los valores experimentales de G y σ , (calculado de D y C_s), C_p y C_s contra $\log. \omega$.

De las gráficas de G y σ contra $\log. \omega$, se puede ver que los resultados caen en dos grupos; el primero, en el cual hay una buena meseta de los valores de G y σ , lo mismo que una buena concordancia entre ellos y, que corresponden a muestras en las que se tiene una sola fase; en este grupo están las pastillas de Li_3PO_4 , Li_4SiO_4 y 8% y 10% de Li_3PO_4 .

Según el diagrama de fase, Fig. 4-16, existe una fase cerca de 8-10% Li_3PO_4 . En el grupo en que están las muestras de 2%, 4%, 6%, 15%, 30% y 90% de Li_3PO_4 se puede notar que hay una dependencia de los valores de G con la frecuencia. Esto se puede explicar, suponiendo que el circuito es más complicado de lo que se creía, pudiendo ser dos circuitos en serie que están constituidos por una resistencia en paralelo con una capacitancia. Es seguro que, por ejemplo, existen dos fases (7) en estas composiciones, y como cada tipo de cristal difiere aproximadamente en un orden de magnitud en su resistencia, se tiene como resultado que el valor de G aumenta con la frecuencia. El circuito equivalente se puede representar por la siguiente figura:

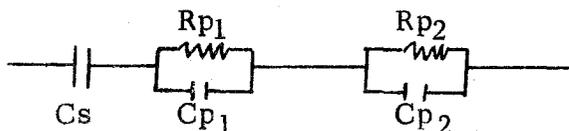


Fig. 4-1

en donde R_{p_1} y R_{p_2} son las resistencias que están presentes en la muestra.

Suponiendo que C_s no interfiere, a bajas frecuencias los valores de R serán la suma de R_{p_1} más R_{p_2} , cuando la frecuencia aumenta se produce un corto circuito de la resistencia más alta y sólo se mide la resistencia de valor más bajo, este proceso ocurre en un intervalo de dos o tres órdenes de magnitud del valor de ω , es por eso que G aumenta con la frecuencia.

Los valores de σ en la mayoría de las composiciones en donde hay dos fases, ver Fig. 4-4, por ejemplo, presentan una meseta en todo el intervalo de frecuencia, aunque se nota que hay una diferencia de hasta dos órdenes de magnitud entre σ y G en algunas de las gráficas de este grupo de dos fases. Este es seguramente porque los circuitos de las pastillas son más complicados que el de la Fig. 3-1 y no se hizo el análisis para estos circuitos en este trabajo.

Cuando σ es menor que 10^{-6-1} se puede ver una dependencia con la frecuencia. A bajas frecuencias, σ tiene bajos valores, no se puede usar D cuando R tiene un valor de 10^6 ohms, pareciendo que los resultados son muy malos, pues cruzan todas las mesetas que se obtienen a valores más bajos de R . ver Fig. 10% 24 Feb.77, Fig. 4-13

Lo anterior se puede explicar viendo la Fig. 3-6 de Z' contra $\log.$ de ω , en donde se ve que para bajos valores de R 10^5 , tiene una meseta hasta

valores arriba de 10^6 para ω .

Para comprobar si existía una buena concordancia entre los valores experimentales y la teoría, se calcularon los valores de Z' de la ecuación.

$$Z' = \frac{1}{\omega C_p} \frac{C_p R_p}{1 + (\omega C_p R_p)^2}$$

cuando $C_p = 2 \times 10^{-11} \text{F}$

$$R_p = 3 \times 10^5 \Omega \text{ y } R_p^1 = 5 \times 10^5 \text{ ohms.}$$

$$\omega = 10^3 \text{ a } 10^5 \text{ Hz}$$

Donde R_p y R_p^1 son los valores experimentales extremos obtenidos de la gráfica de G contra $\log. \omega$ y C_p es obtenido de la gráfica de C_p contra $\log. \omega$ para ese valor de R_p en la gráfica de 10% 24 Feb. 77. Fig. 4-13.

La gráfica de los valores teóricos se presentan en la Fig. 4-23, se puede ver que para bajas frecuencias la correlación no es mala, pero empeora cuando la frecuencia aumenta, debido probablemente a que se produce un corto circuito en alguna de sus capacitancias de circuito equivalente de la pastilla.

Otra explicación de las diferencias entre valores teóricos y experimentales a bajas frecuencias, es que éstos se deben a errores de estimación, ya que no existen buenas mesetas en la gráfica de G contra $\log. \omega$ mientras que a frecuencias más elevadas la diferencia entre valores teóricos y experimentales se debe probablemente a que el circuito equivalente de la pastilla es más complicado que el desarrollado en la teoría.

Del grupo en el que se tiene una sola fase y que corresponde a Li_4SiO_4 , 8% Li_3PO_4 y 10% Li_3PO_4 se determinaron los valores de σ para mesetas de cada temperatura y con estos valores se obtuvieron las gráficas de Arrhenius que se presentan en la Fig. 4-24 en donde $\log \sigma$ está graficado contra $1/T^\circ\text{K}$.

Se puede ver que la conductividad de 8% es mayor que incluso las composiciones de Germanio y Silicio obteniendo por I.M. Hodge et al (5).

La conductividad eléctrica para el Li_4SiO_4 presenta una muy buena -

concordancia con los resultados obtenidos por otros autores, por ejemplo A. R. West lo que indica que la técnica y equipo empleados pueden usarse en forma segura, para la determinación de conductividad eléctrica de otros compuestos (5).

La energía de activación se puede determinar por medio de la pendiente de las líneas de conductividad eléctrica contra el inverso de la temperatura, Fig. 4-24, los resultados para 8% y para Li_3PO_4 se calculan de la fórmula de Arrhenius.

$$\sigma = K e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad 4-1$$

donde K es una constante de proporcionalidad, E_a es la energía de activación de la muestra, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura en $^{\circ}\text{K}$. Tomando logaritmos se tiene:

$$\ln \sigma = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln K \quad 4-2$$

$$\text{Log } \sigma = -\frac{E_a}{2.303R} \frac{1}{T} + \log K \quad 4-3$$

En esta ecuación la pendiente en la gráfica de la Fig. 4-23 corresponde a:

$$m = -\frac{E_a}{2.303 R 10^{-3}} \quad 4-4$$

para la composición 8% de Li_3PO_4 se tiene que de la gráfica

$$m = 3.06$$

$$E_a = -(3.06) 2.303 R 10^3 \text{ si } R = 1.97 \frac{\text{cal}}{\text{mol } ^{\circ}\text{K}}$$

$$= 13,883 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} = 13.8 \frac{\text{Kcal}}{\text{mol}}$$

haciendo lo mismo para Li_4SiO_4 se tiene una pendiente $m = 3,93 \times 10^3 \text{ } ^{\circ}\text{K}$

$$E_a = -(3,97 \times 10^3 \text{ } ^{\circ}\text{K}) 2.303 R, \text{ si } R = 1.97 \frac{\text{cal}}{\text{mol } ^{\circ}\text{K}}$$

$$= 17,860 \frac{\text{cal}}{\text{mol}}$$

$$E_a = 17.9 \frac{\text{Kcal}}{\text{mol}}$$

En la literatura se reportan los siguientes valores para la energía de activación del Li_4SiO_4 .

$$E_a = 17.86 \text{ Kcal/mol}$$

$$E_a = 18.8 \text{ Kcal/mol (H)}$$

$$E_a = 18.05$$

Con lo cual se puede ver que el valor $E_a = 17.9 \frac{\text{Kcal}}{\text{mol}}$ obtenido, tiene una muy buena concordancia con estos valores de otros autores. Se puede asegurar por lo tanto, que el equipo y la técnica usadas en este trabajo son muy útiles para determinar la conductividad eléctrica de otros compuestos.

La composición de 8% Li_3PO_4 presenta una conductividad eléctrica uno o dos órdenes mayor que el Silicato y es mayor que la mejor de las composiciones de Germanato-Silicato, Fig. 4-24, por lo que es de gran interés investigar su comportamiento en condiciones diversas.

Los resultados aquí reportados presentan una gran diferencia con el trabajo de Shannon et Al. (6). Shannon et Al indican que hay un gran intervalo de soluciones sólidas entre Li_4SiO_4 y 30% de Li_3PO_4 y aquí se encontró que existe sólo una región cerca de 8 y 10% de Li_3PO_4 en que se tiene una sola fase (ver posteriormente la sección de diagrama de fases).

Shannon et Al (6), indican que la conductividad máxima en el sistema $\text{Li}_4\text{SiO}_4 - \text{Li}_3\text{PO}_4$ la tiene la composición de 30% de Li_3PO_4 , mientras que el autor encontró que esto ocurre en 8% de Li_3PO_4 ; los resultados obtenidos por Shannon et Al. (6), se pueden deber a 1) una reacción de desprendimiento de oxígeno pasando de P^{+5} a P^{+3} , (2) a una reacción de Li con el platino de crisol donde se prepararon las muestras posiblemente dando conducción electrónica. Lo anterior no se pudo comprobar experimentalmente por el autor.

Existe un gran interés en aumentar la conductividad eléctrica lo más posible. Una posibilidad es trabajar con muestras que se hayan formado de soluciones sólidas o fases completas de fosfato-germanato-silicato de Litio. La razón es que en el sistema Germanato-Silicato hubo un aumento en los valores

de la conductividad eléctrica a ciertas composiciones, lo mismo que ocurrió en el sistema fosfato-silicato.

Todos los valores de conductividad eléctrica presentados anteriormente tienen el problema de distinguir entre la conductividad debida a los iones y la conducción electrónica. Aunque existen métodos para diferenciar entre estos dos tipos de conductividad, ésto no es fácil.

Para explicar mejor el problema se puede representar el circuito como sigue:

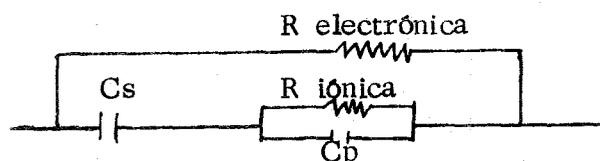


Fig. 4-25

en la cual la resistencia externa en paralelo con el circuito es la que presenta la muestra al paso de los electrones. Es difícil tratar de determinar R electrónica en forma absoluta, aunque es necesario para tener el valor real de la conductividad debida a los iones.

Un método que usualmente se emplea es el de medir la resistencia de la pastilla con corriente directa. Se tiene así, el valor de la resistencia al paso de los electrones proporcionados por la batería del medidor. El recíproco de esta resistencia da el valor de la conductividad de los electrones. a través de la pastilla y su diferencia con la conductividad total es la conductividad iónica.

Con una pastilla de 30% de Li_3PO_4 a 500°C se determinó su resistencia con d.c., inicialmente tenía un valor de $1,200\Omega$ incrementándose hasta $3 \times 10^7\Omega$

Con los valores anteriores se puede ver que la conductividad electrónica representa apenas el 0.01% de la conducción total, por lo cual se puede considerar, sin introducir mucho error, que es despreciable.

Como la gráfica de Arrhenius es una línea, se puede decir que aunque no se hicieron determinaciones de la conductividad electrónica a bajas temperaturas

ésta debe ser baja también. De otra forma, en la gráfica de Arrhenius se presentaría un cambio en la pendiente, lo que puede indicar que en el proceso de conducción, la conductividad electrónica tiene un valor importante entre otras razones.

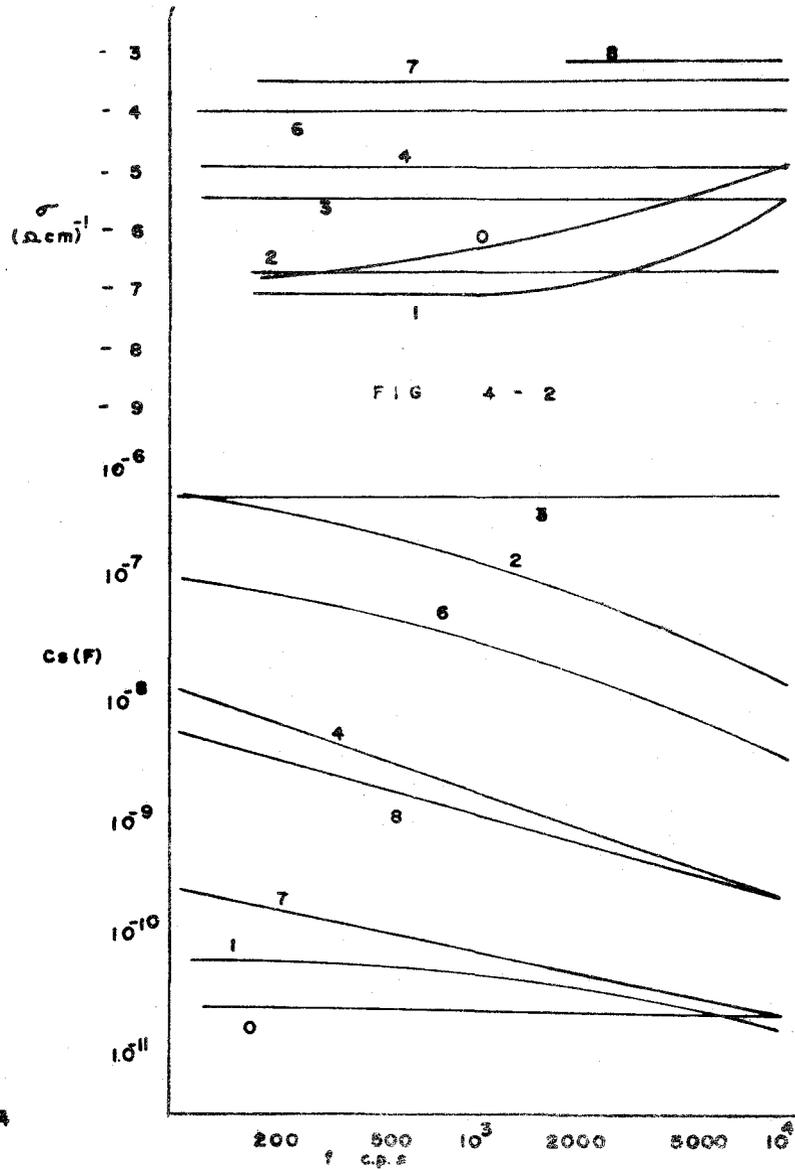
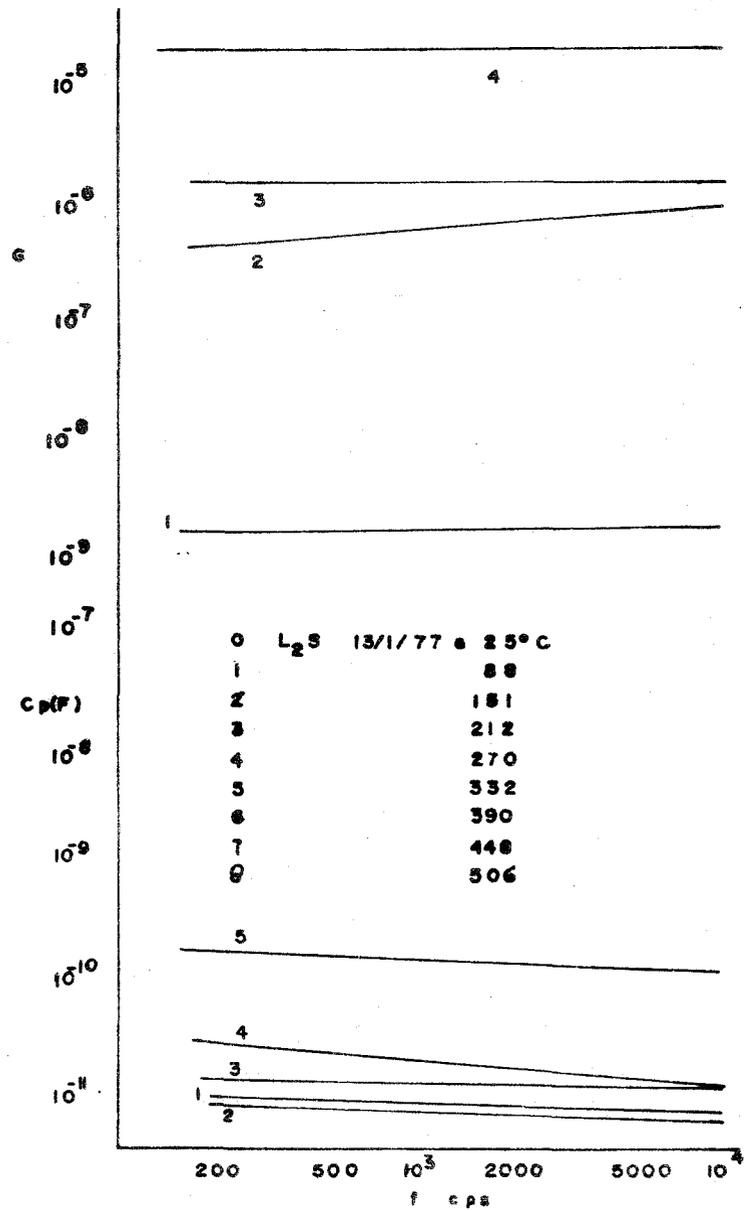
DIAGRAMA DE FASES DEL SISTEMA $\text{Li}_4\text{SiO}_4 - \text{Li}_3\text{PO}_4$

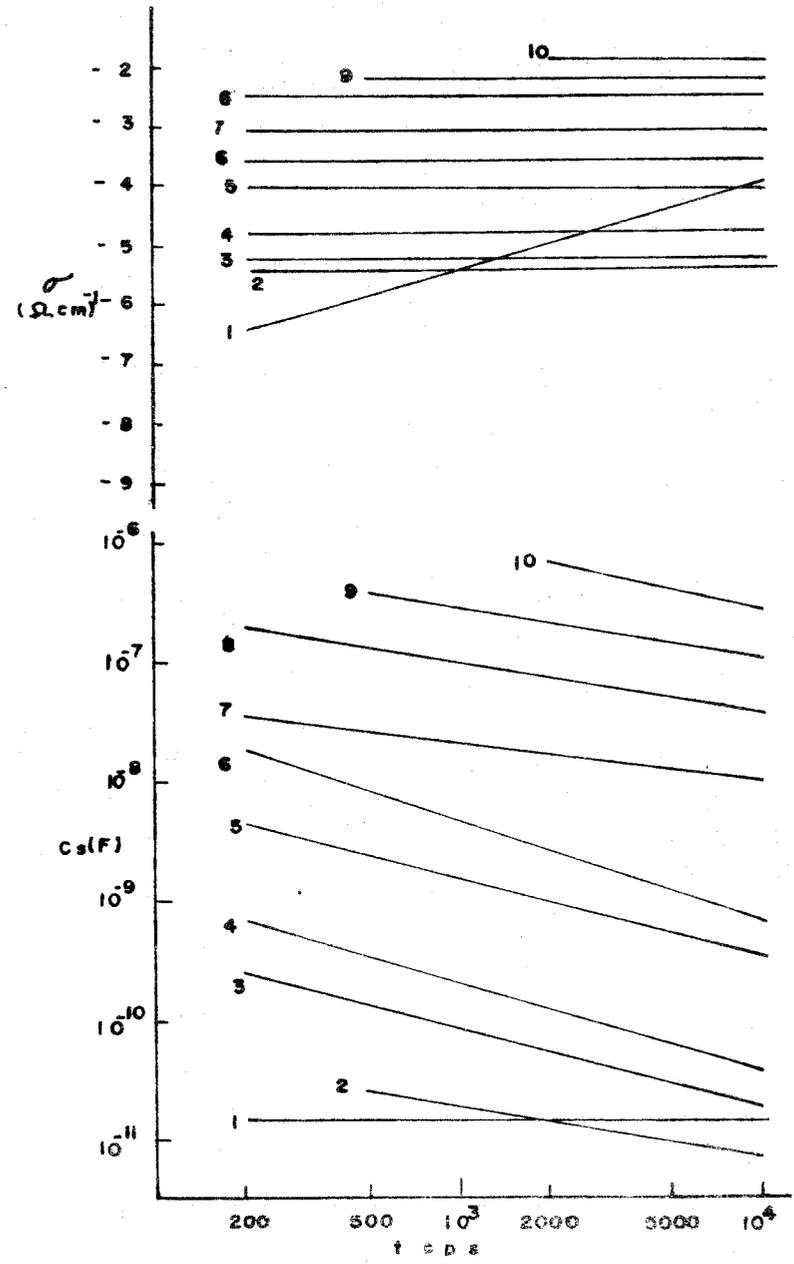
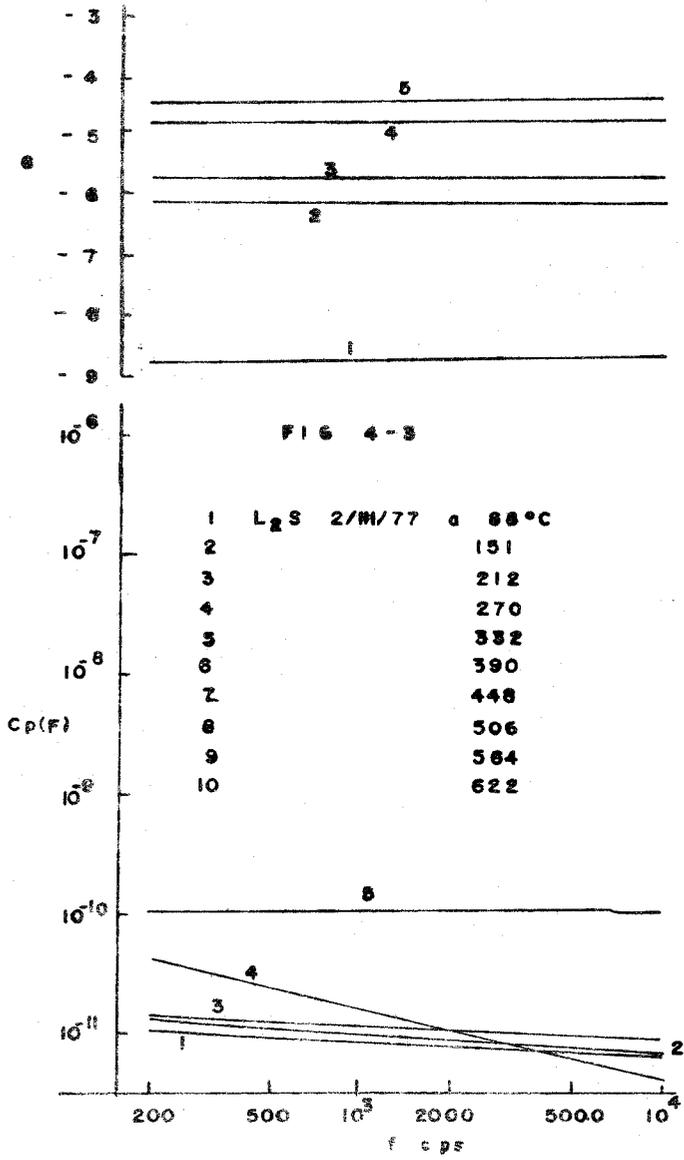
4.- 1 El diagrama de fases para este sistema se determinó por Análisis de Rayos x, metodo de polvos y por Análisis Térmico Diferencial.

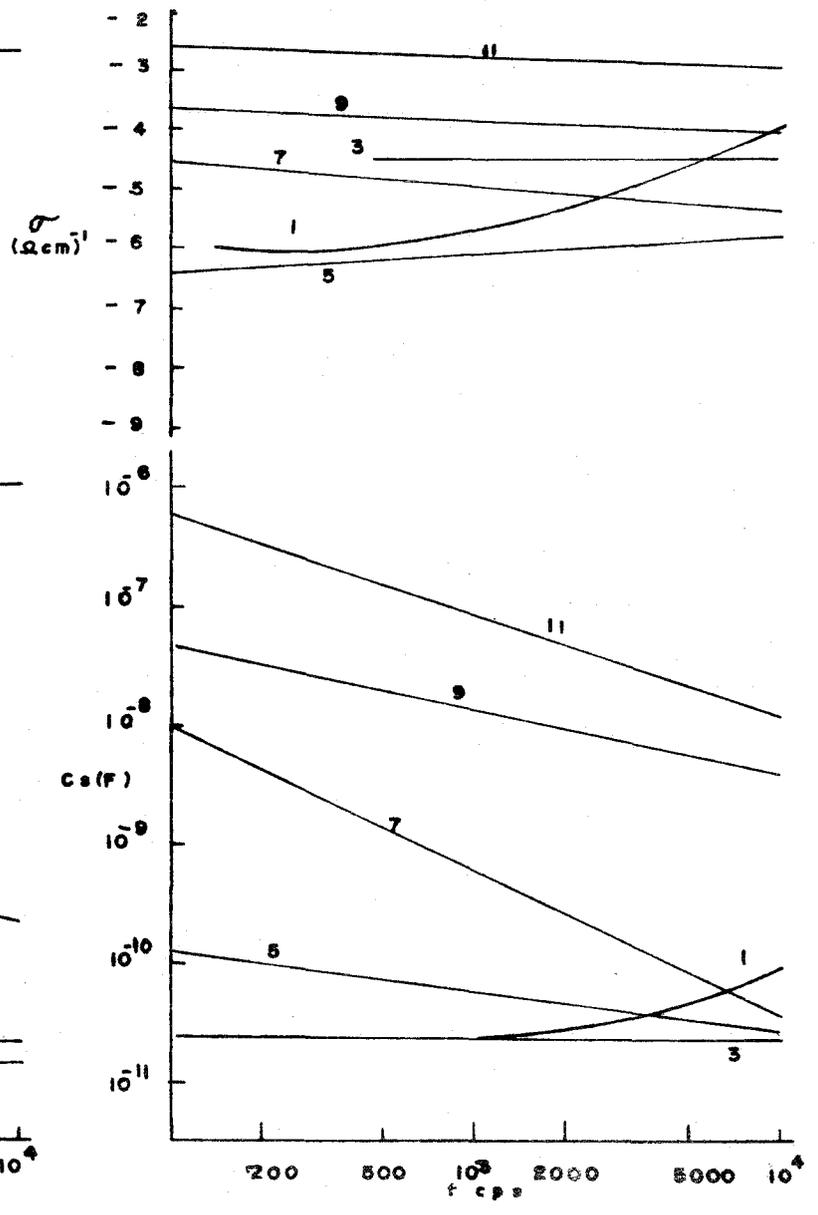
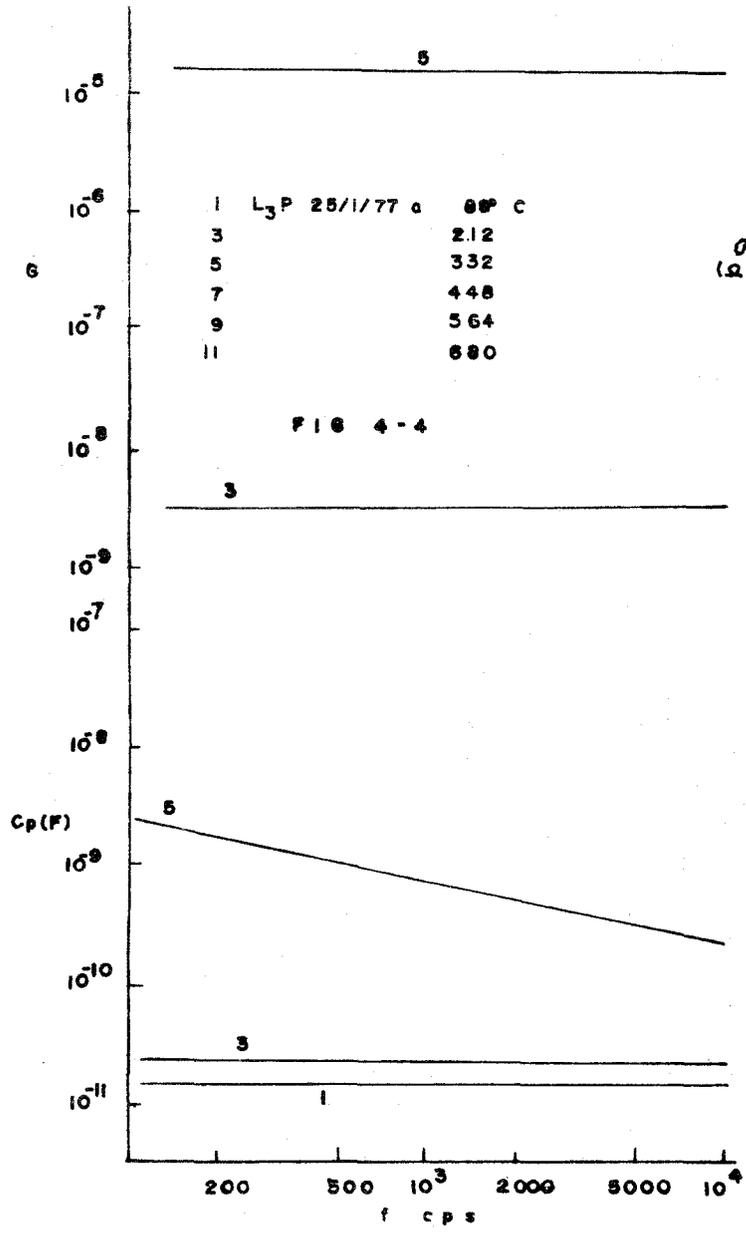
En el método de Rayos x, se prepararon muestras de varias composiciones, siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 2, (Experimental) y se encontró que había una sola fase binaria, , entre 8 y 10 % de fosfato.

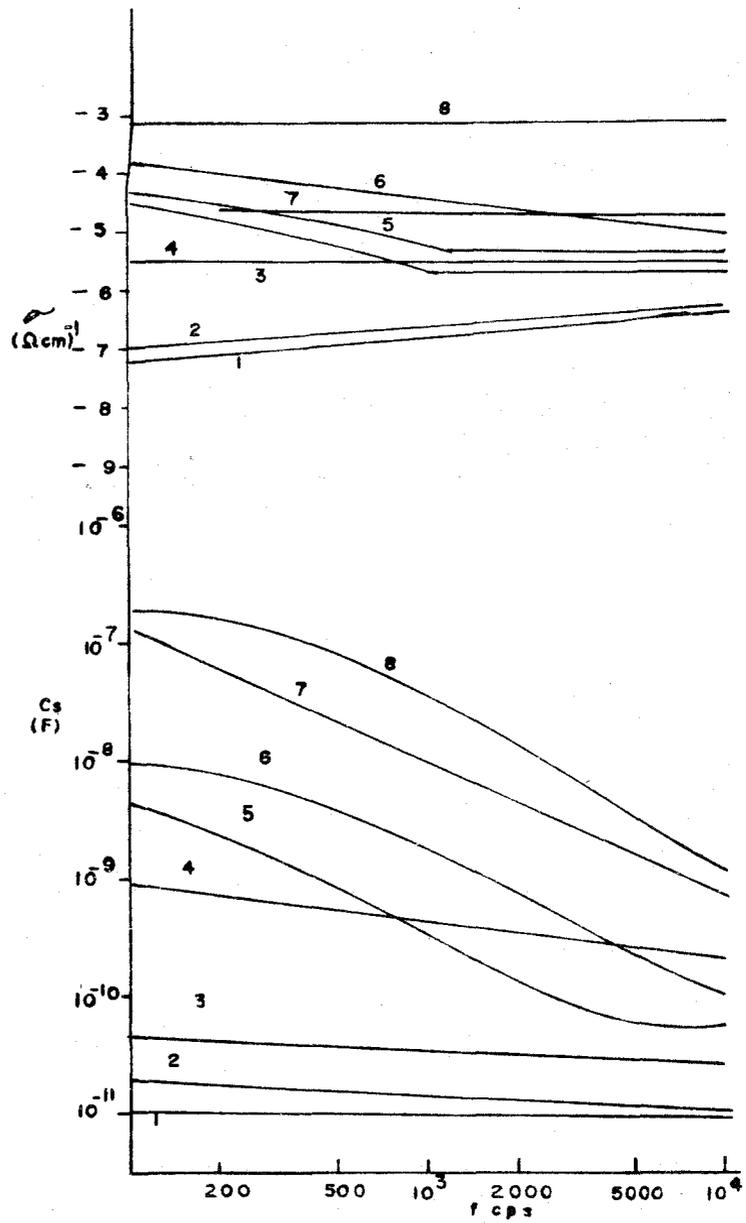
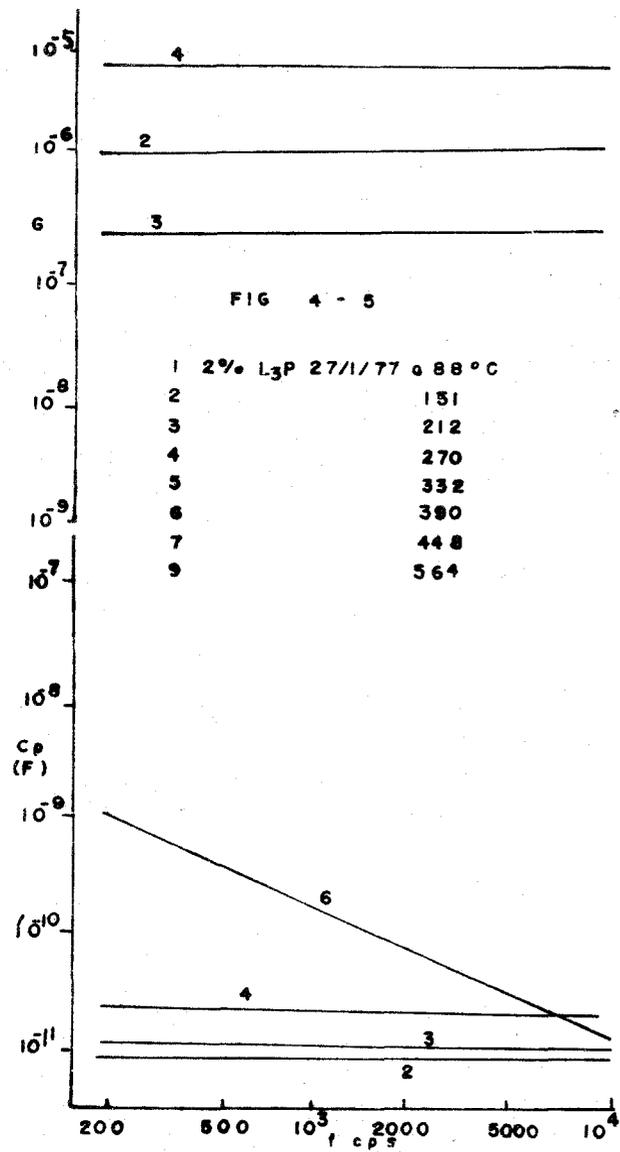
Con el método de Análisis Térmico Diferencial, se determinó el punto de fusión del Li_3PO_4 , para las composiciones de 4, 6, y 8 % de Li_3PO_4 , se hicieron las determinaciones de las transformaciones polimórficas a bajas temperaturas (hasta 800°C). Fue así como se obtuvo el diagrama de fases, en el cual, el punto de fusión del fosfato, presenta una pequeña diferencia ($\sim 10^\circ\text{C}$) con la literatura (10).

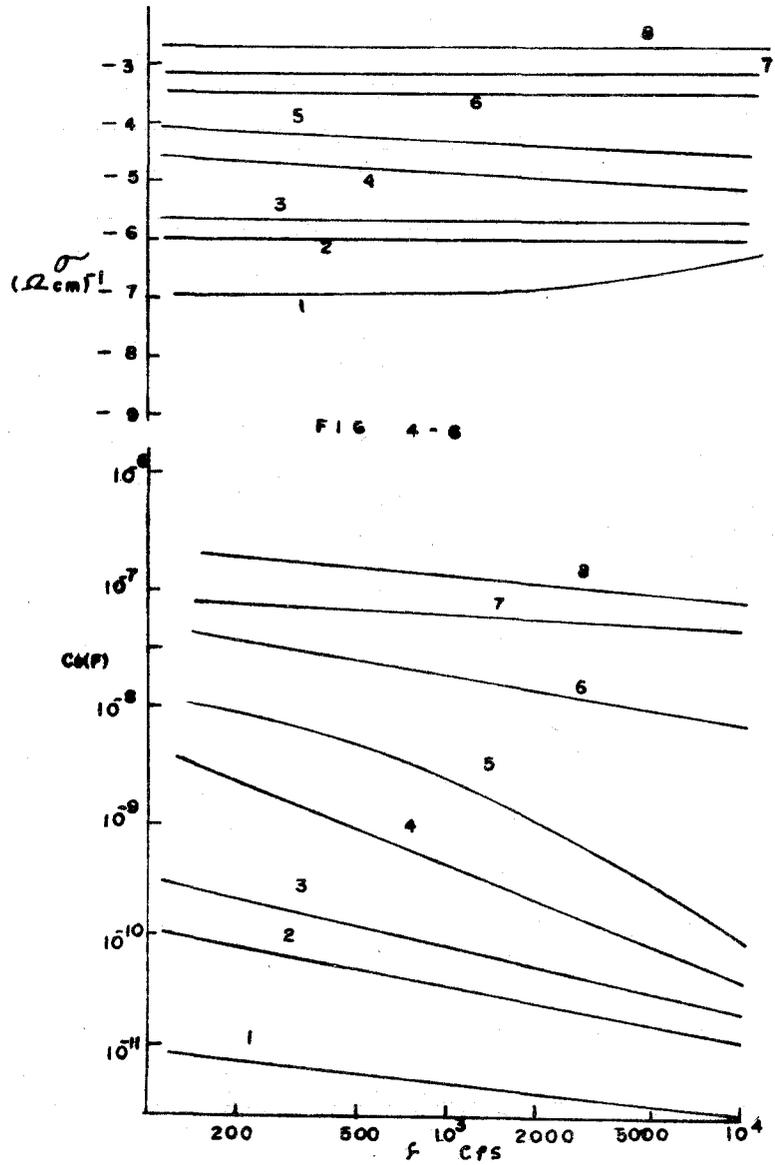
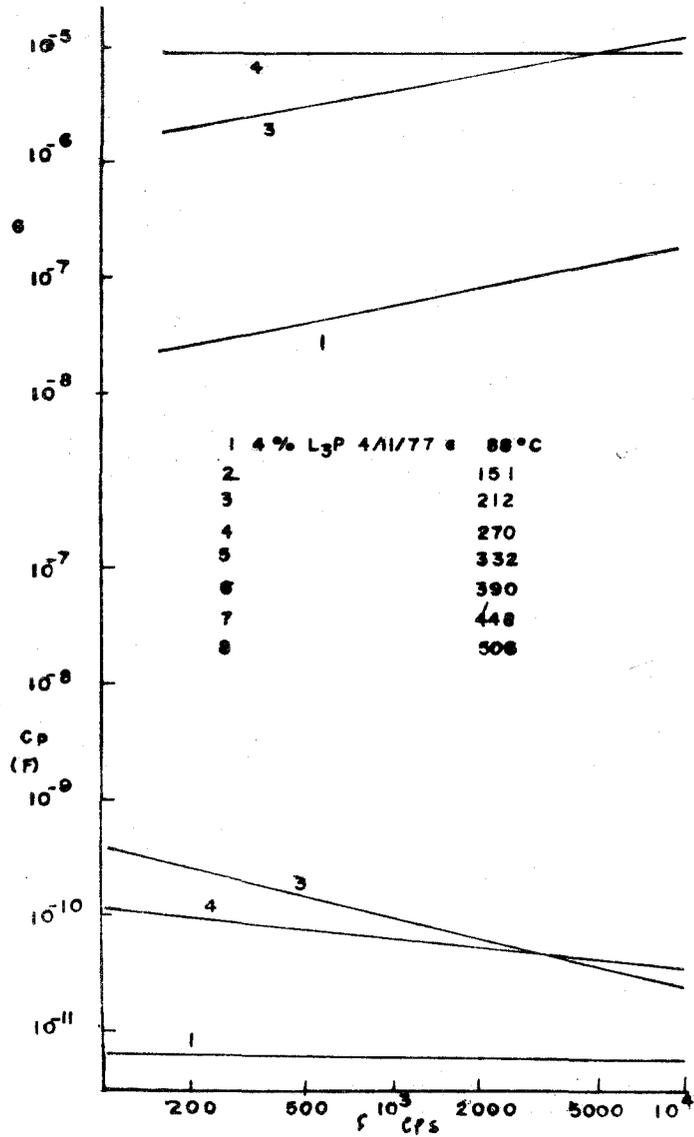
Shannon y col., han determinado un intervalo entre 0 y 30 % de fosfato con una fase binaria. Se preparó una muestra de 30 % de fosfato y se calentó hasta 1100°C , ocurriendo cambios irreversibles en la muestra tales como una reacción de descomposición con evaporación de oxido de litio ó una reacción del litio con el crisol de platino. Cualquiera de las reacciones anteriores pudo haber ocurrido en los experimentos de Shannon y col., dando así, resultados erroneos.

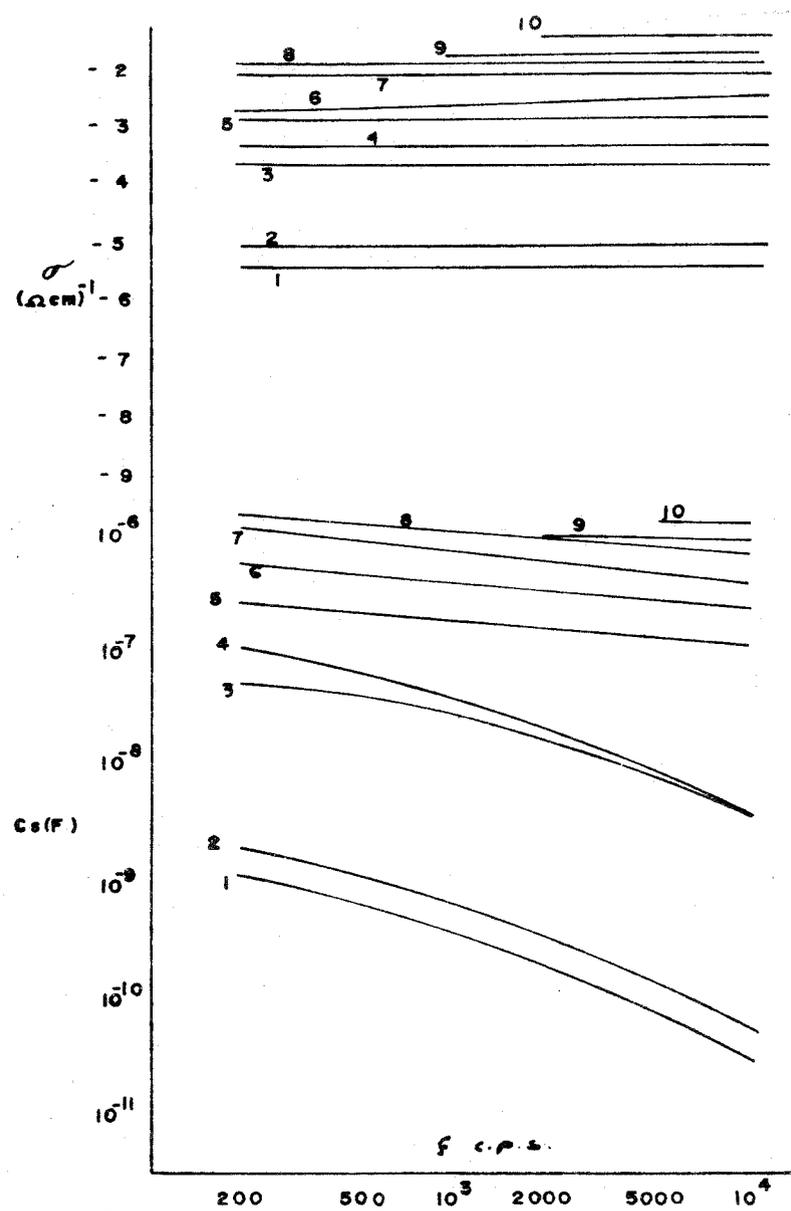
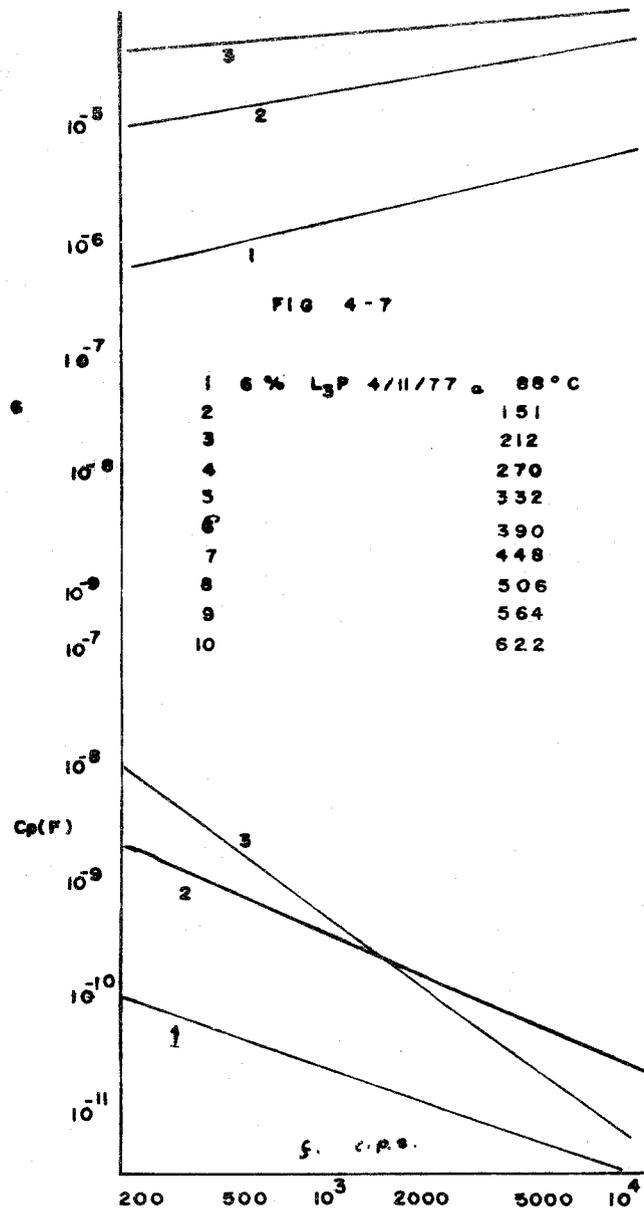


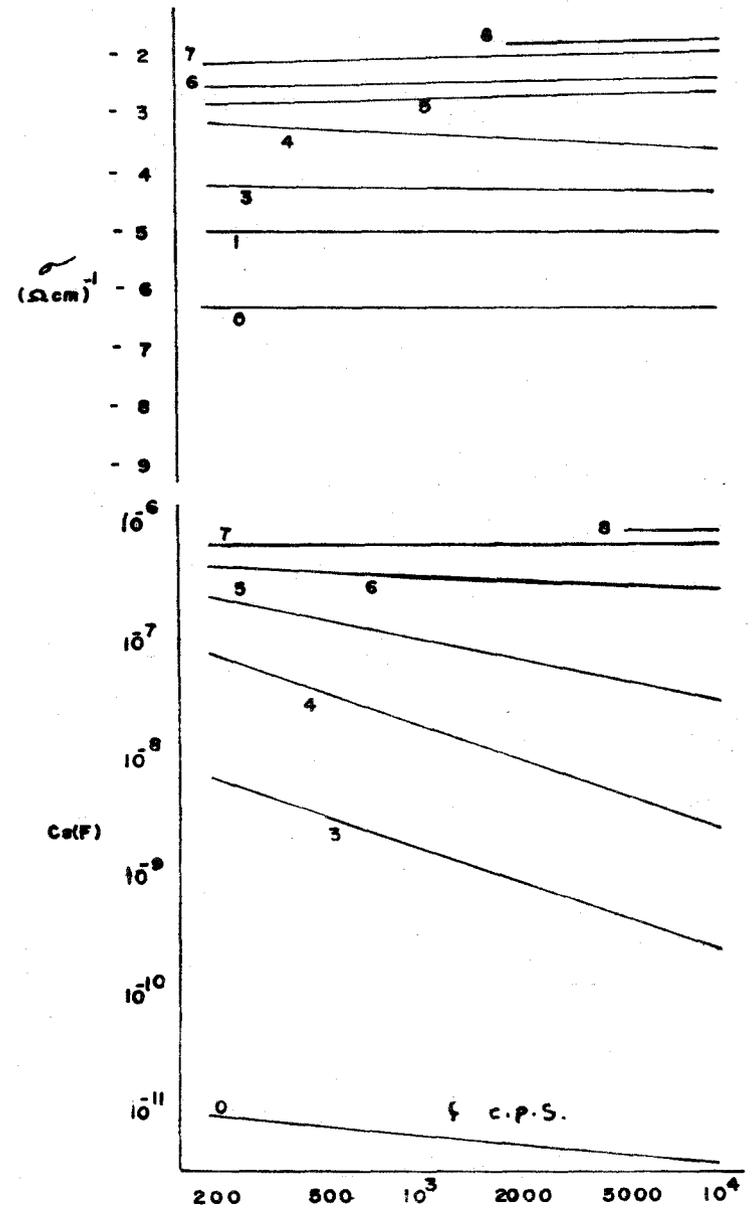
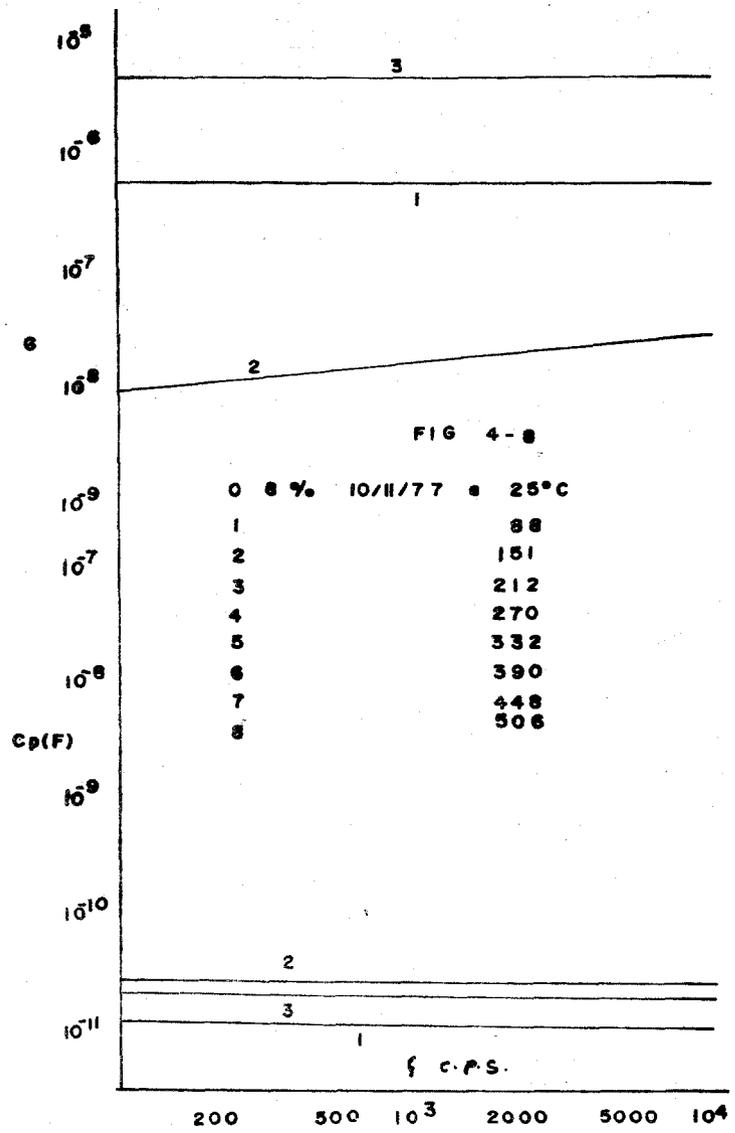


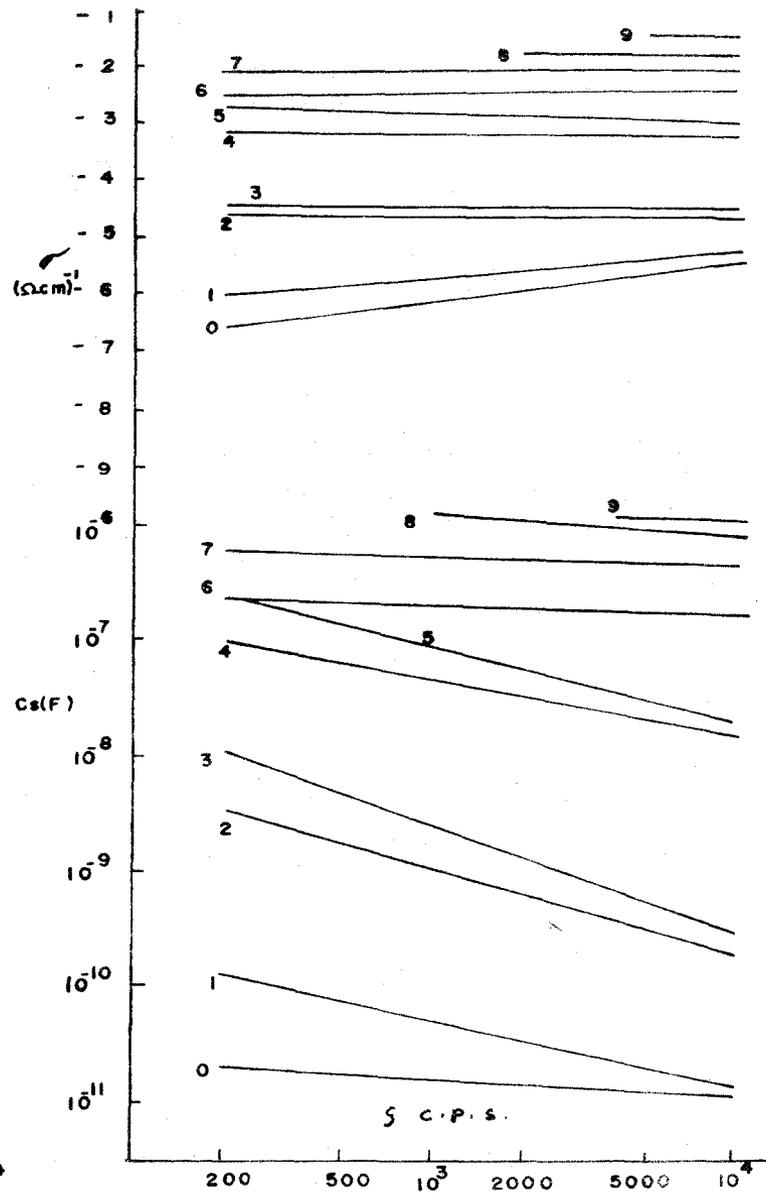
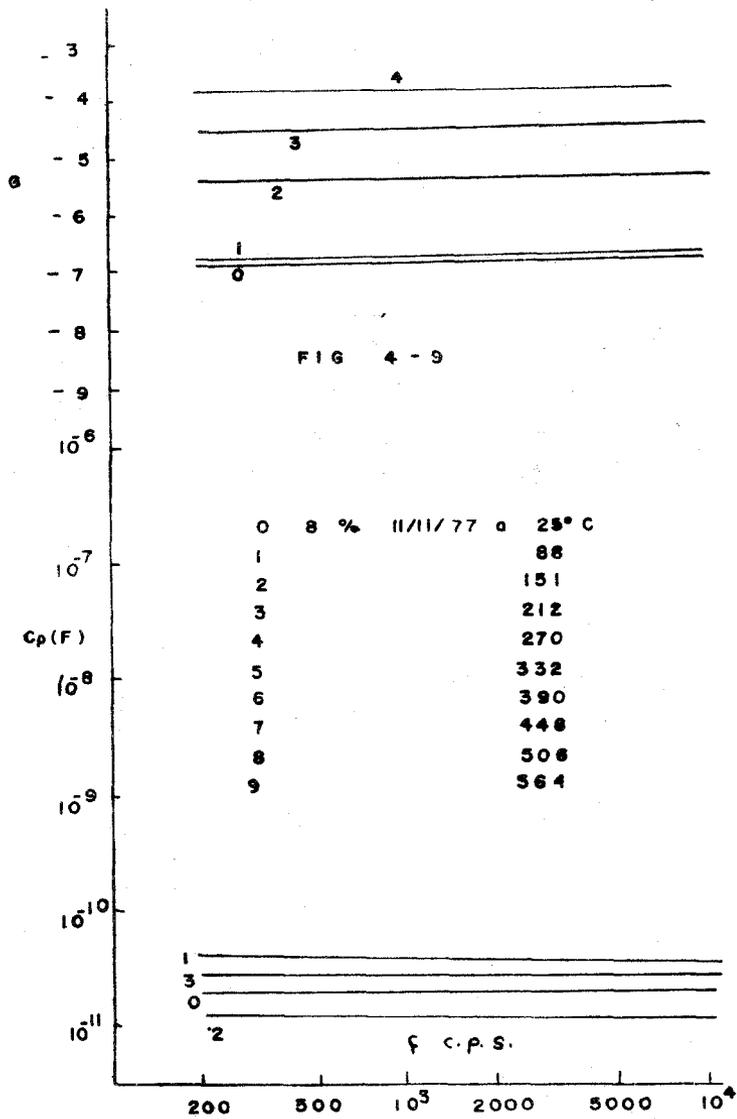


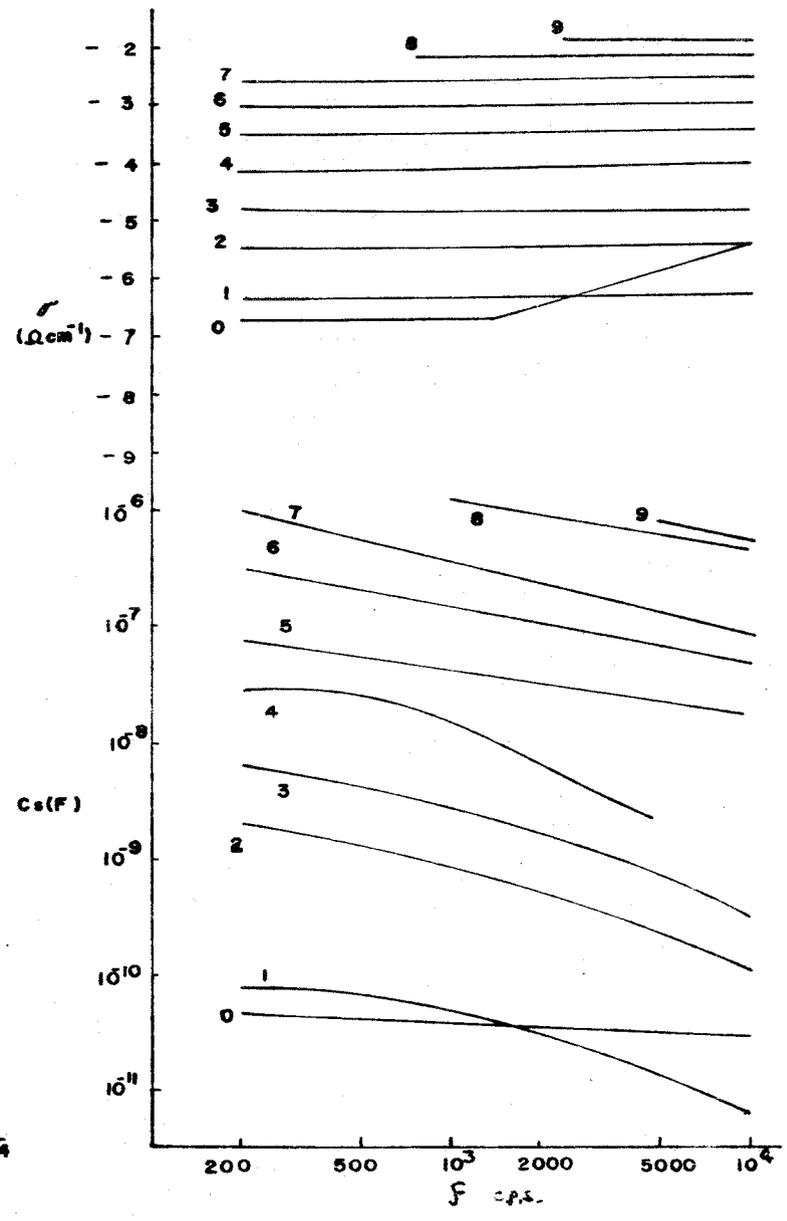
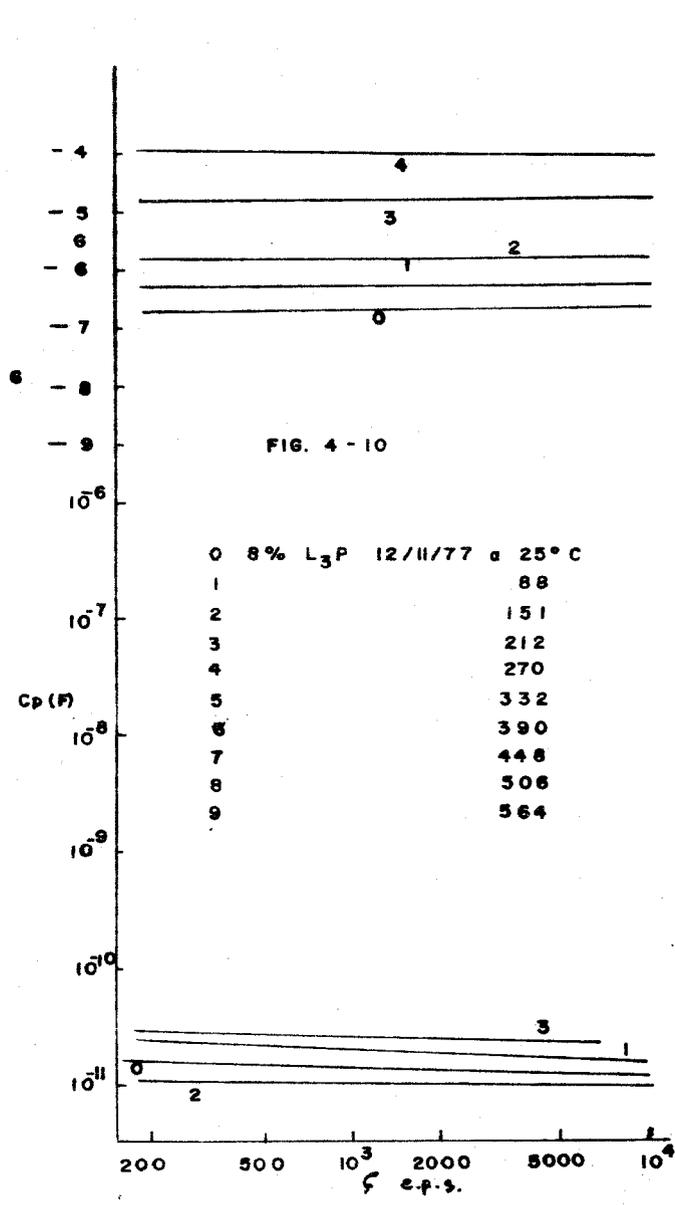












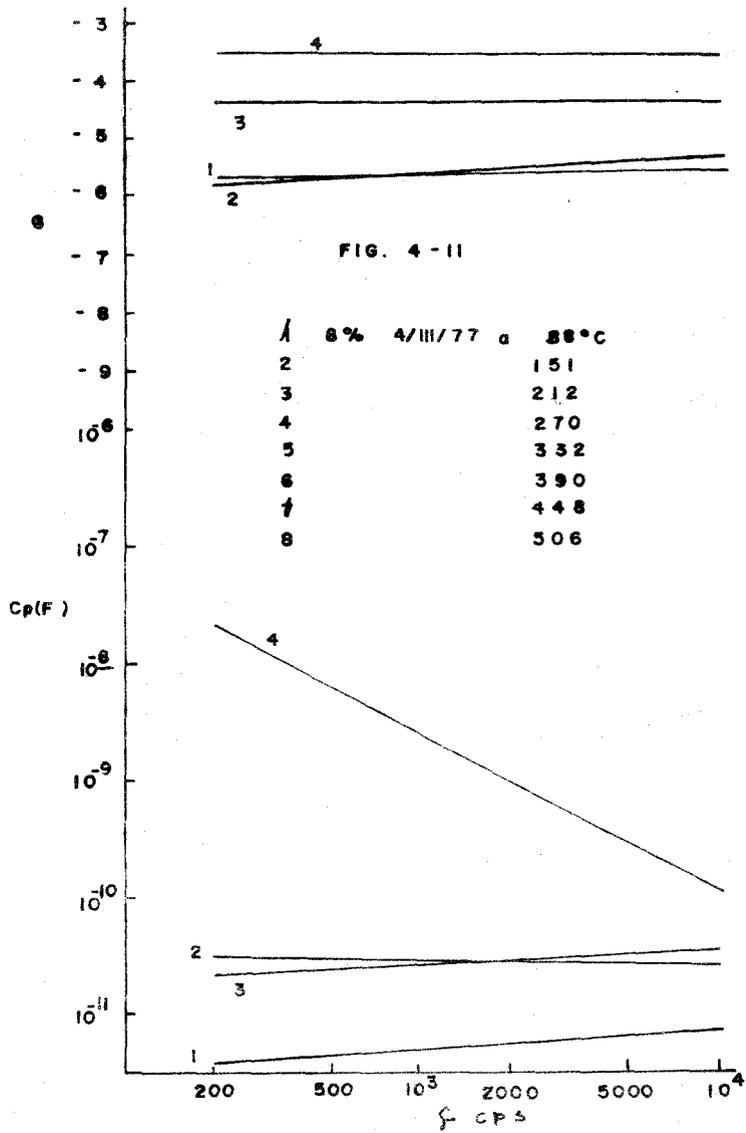
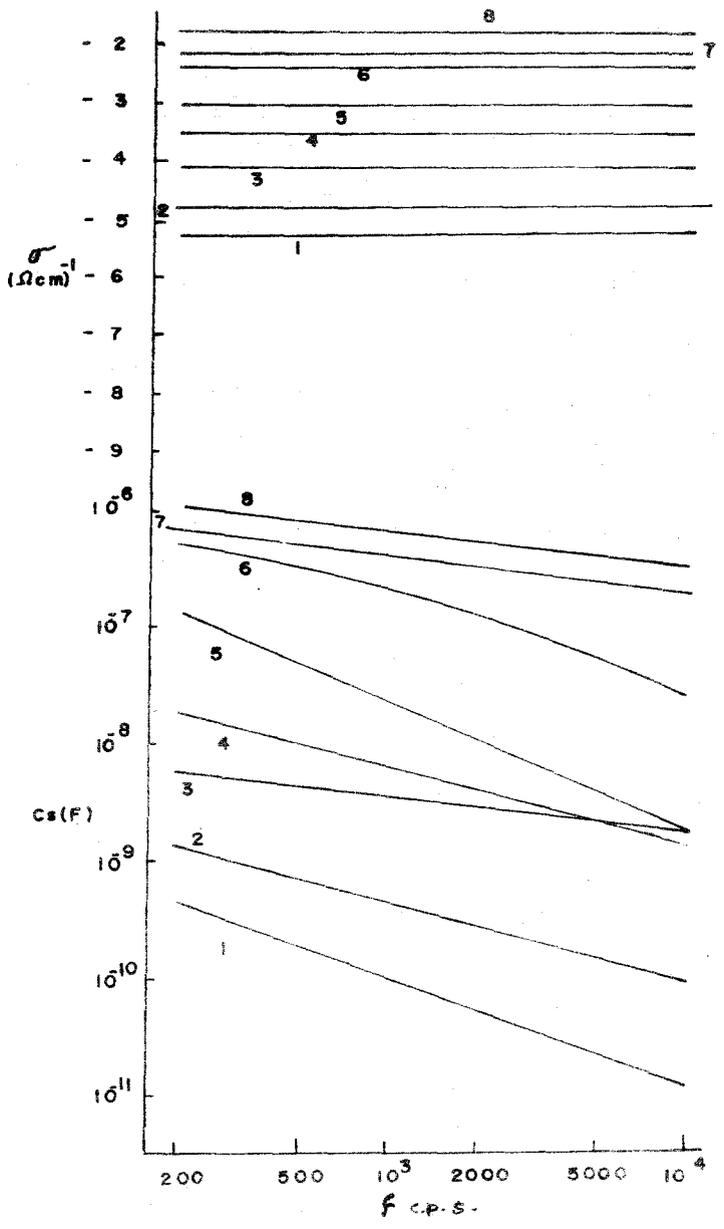


FIG. 4-11

λ	8%	4/III/77	a	88°C
2				151
3				212
4				270
5				332
6				390
7				448
8				506



σ^{-1}
(Ωcm)

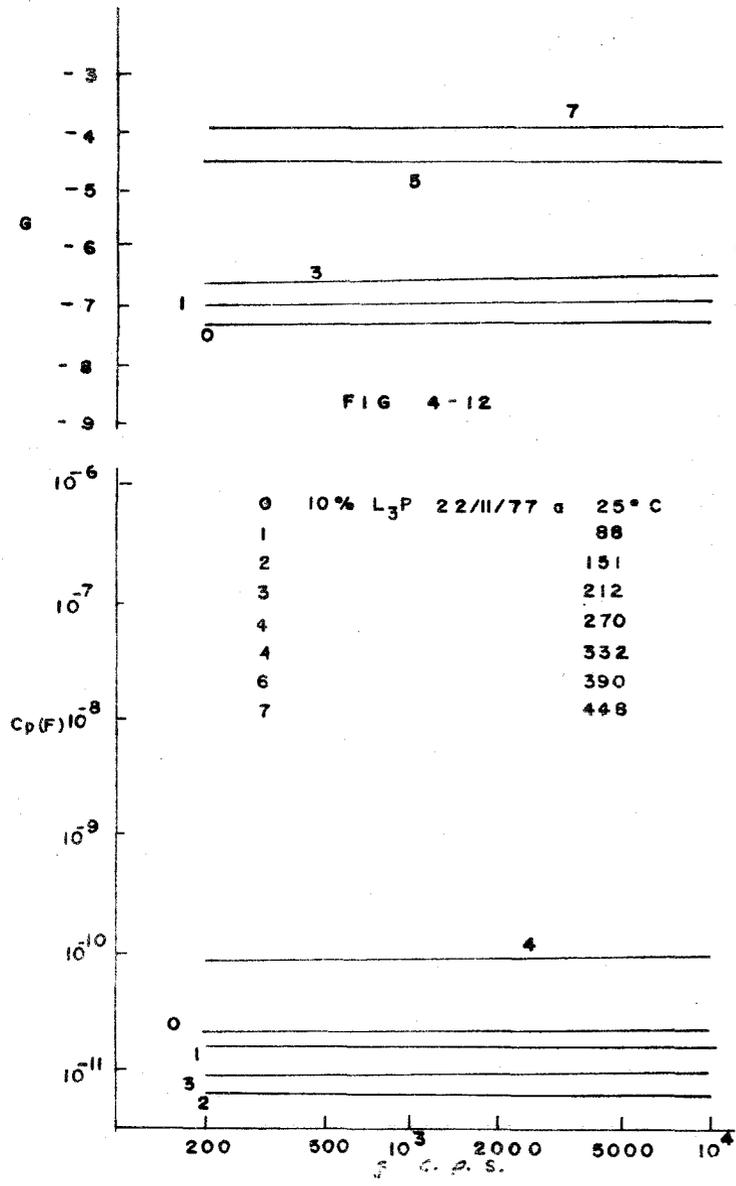
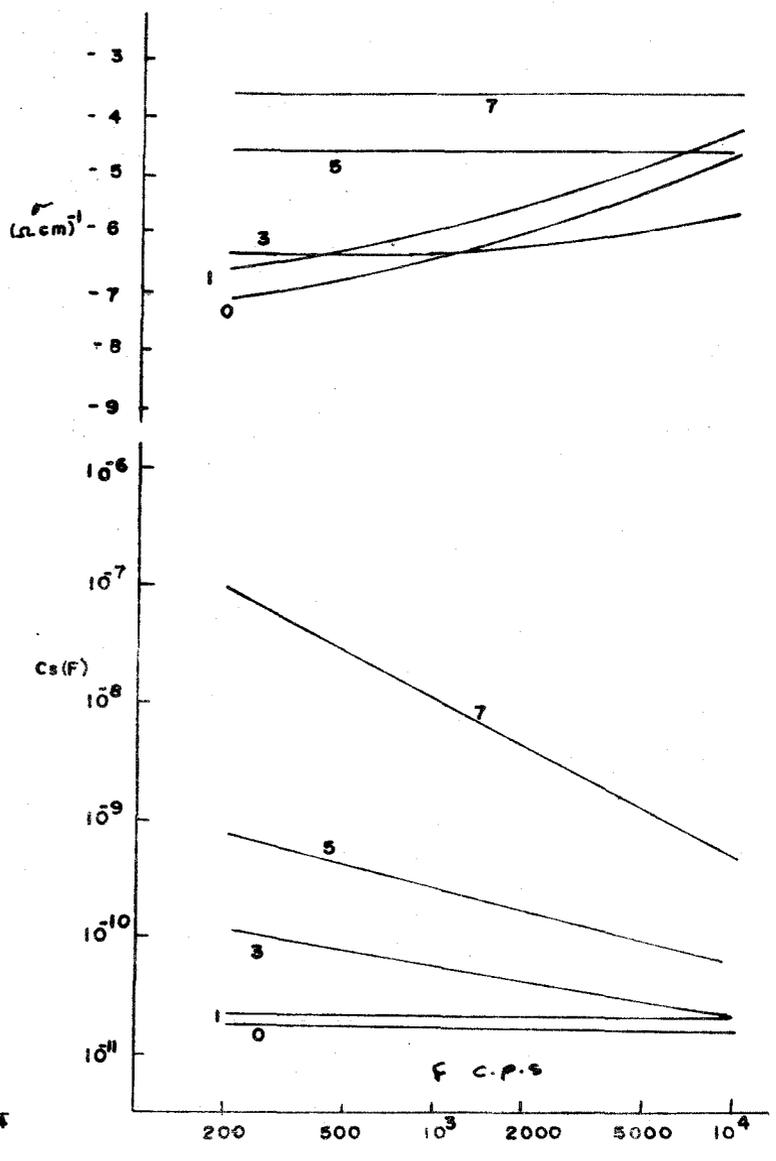


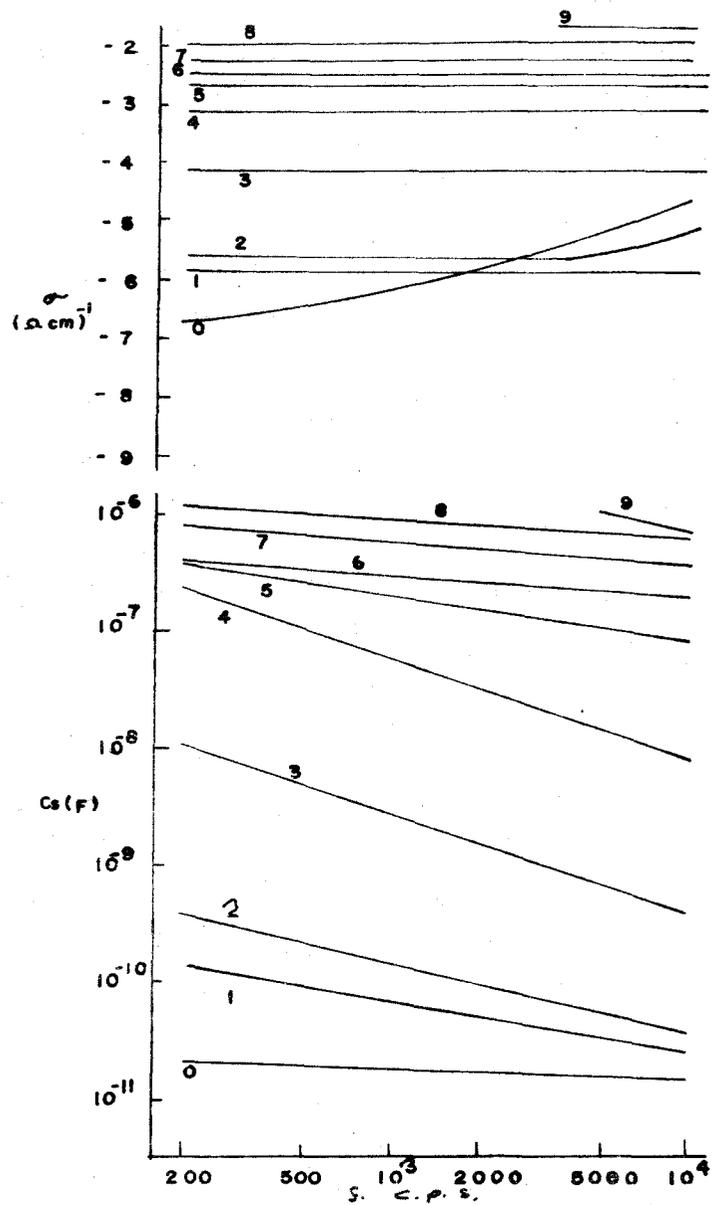
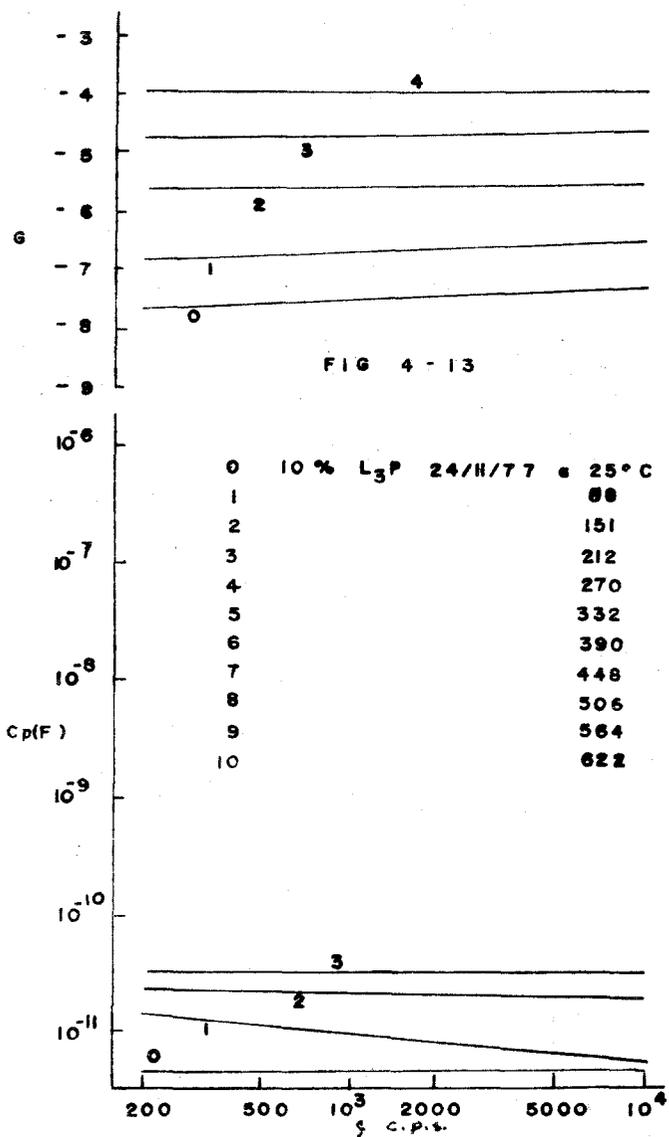
FIG 4-12

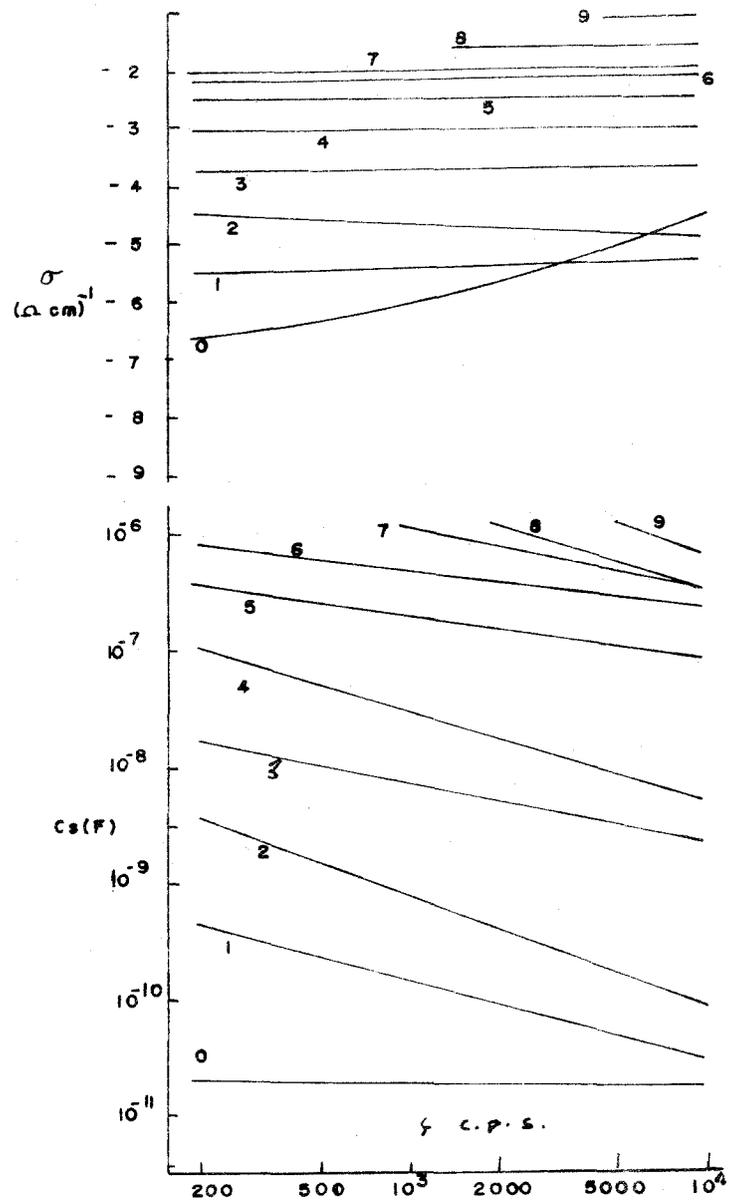
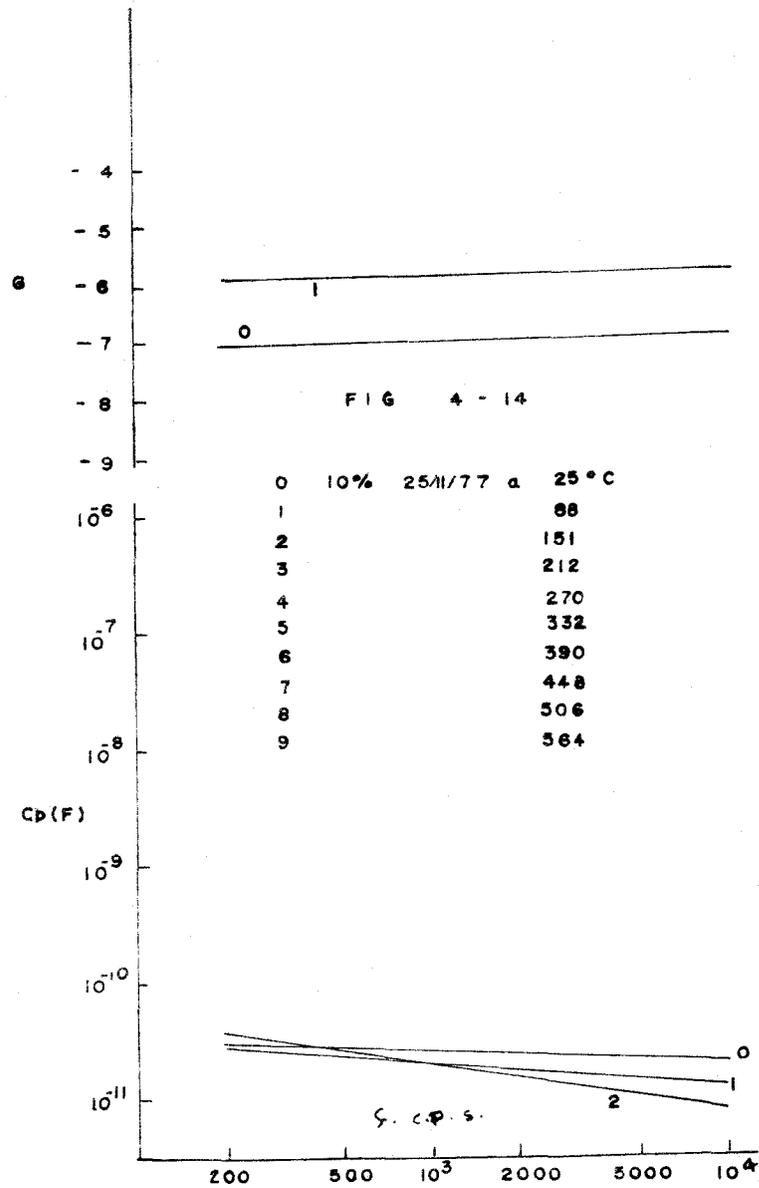
0	10% L ₃ P	22/11/77	a	25° C
1				88
2				151
3				212
4				270
4				332
6				390
7				448

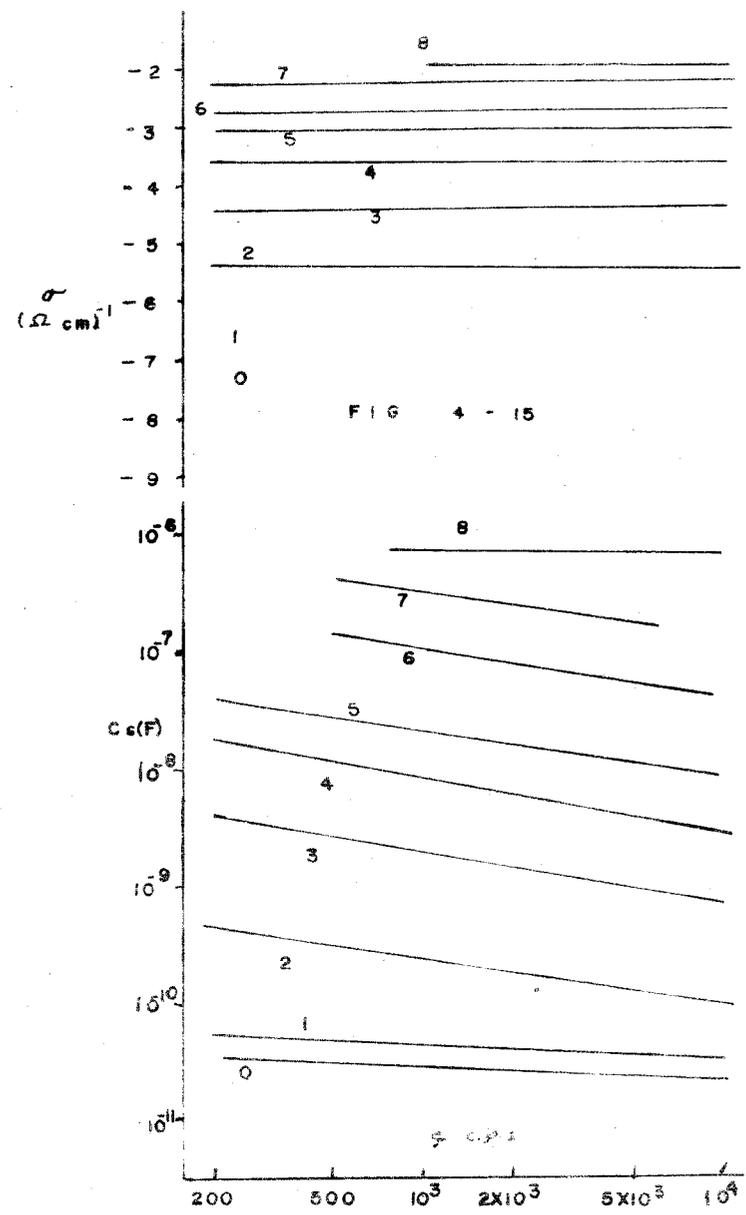
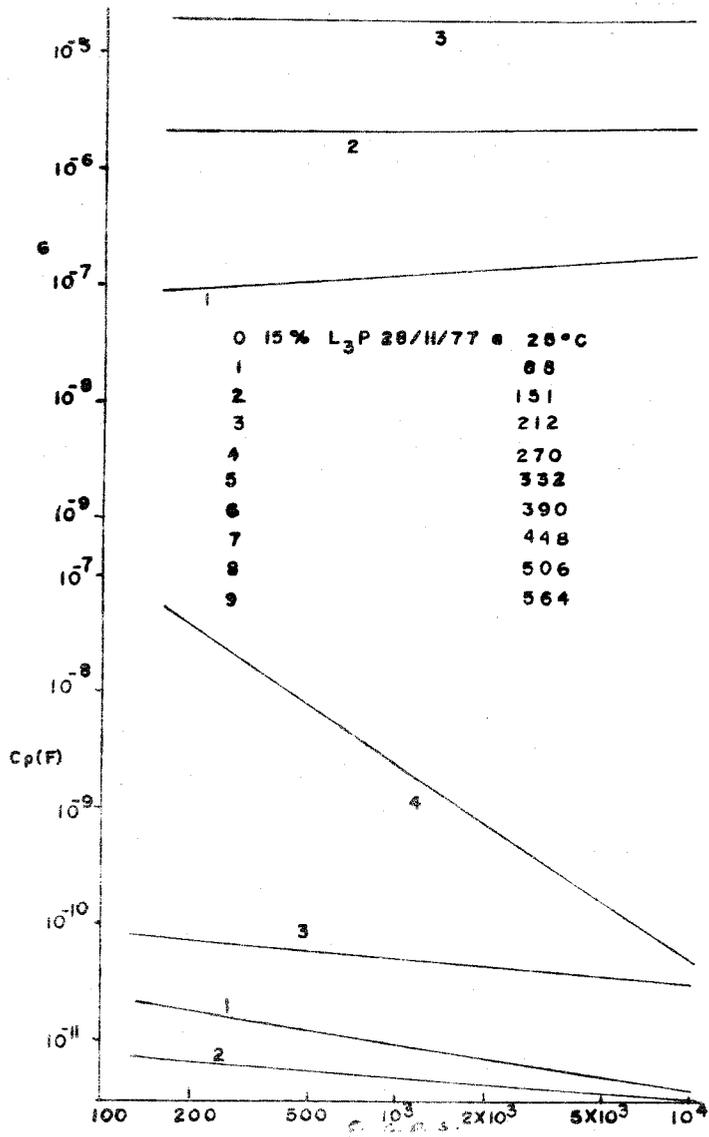


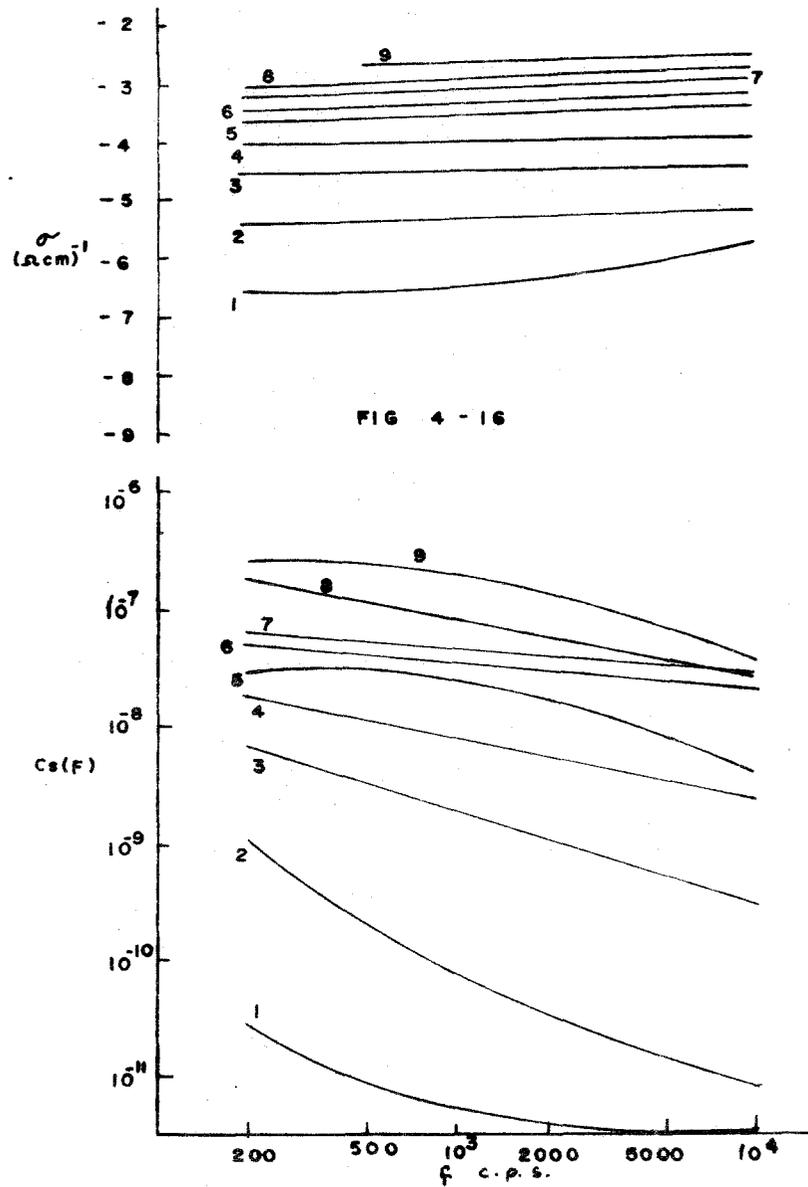
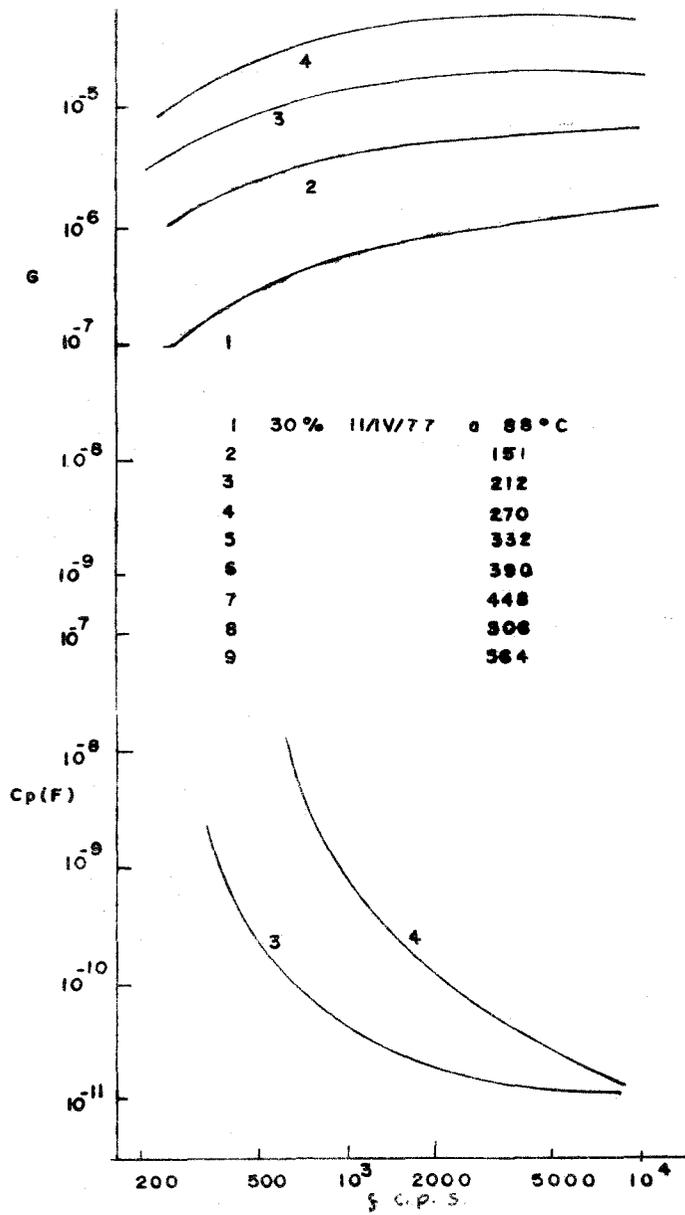
$(\mu\text{cm})^{-1}$

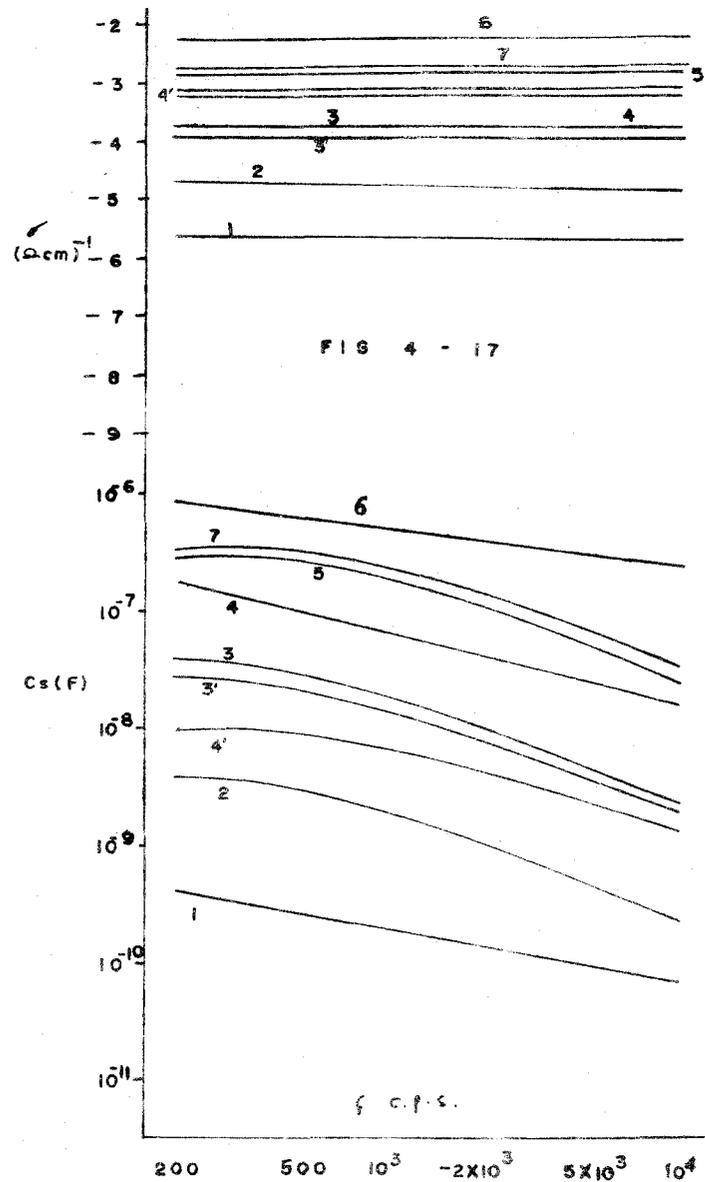
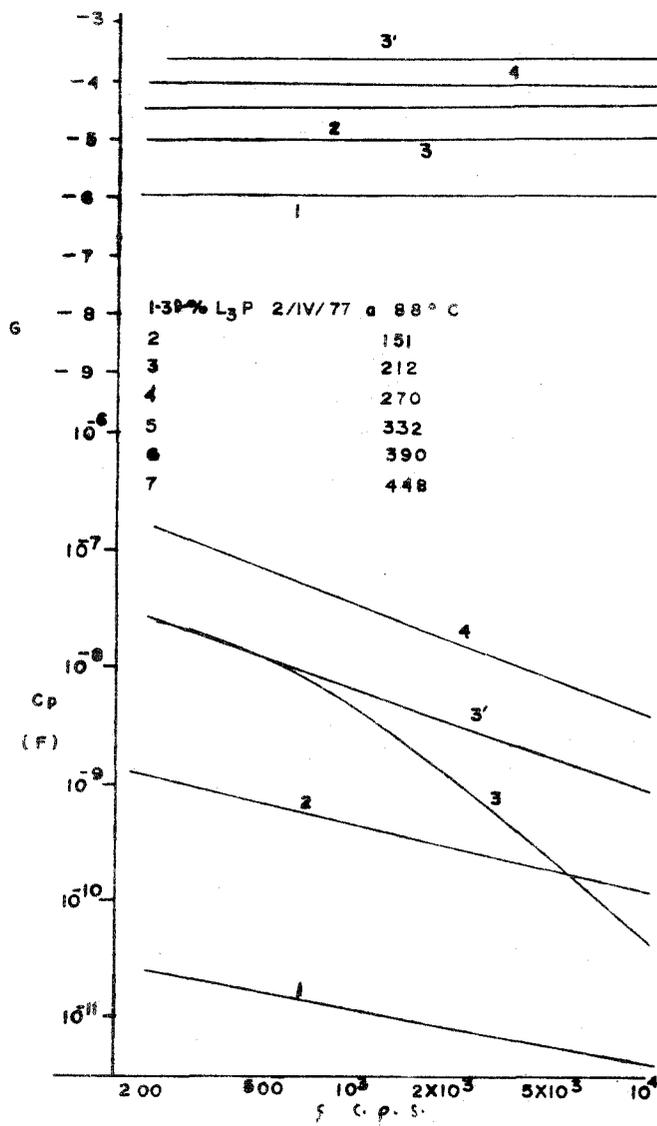
F C.P.S.

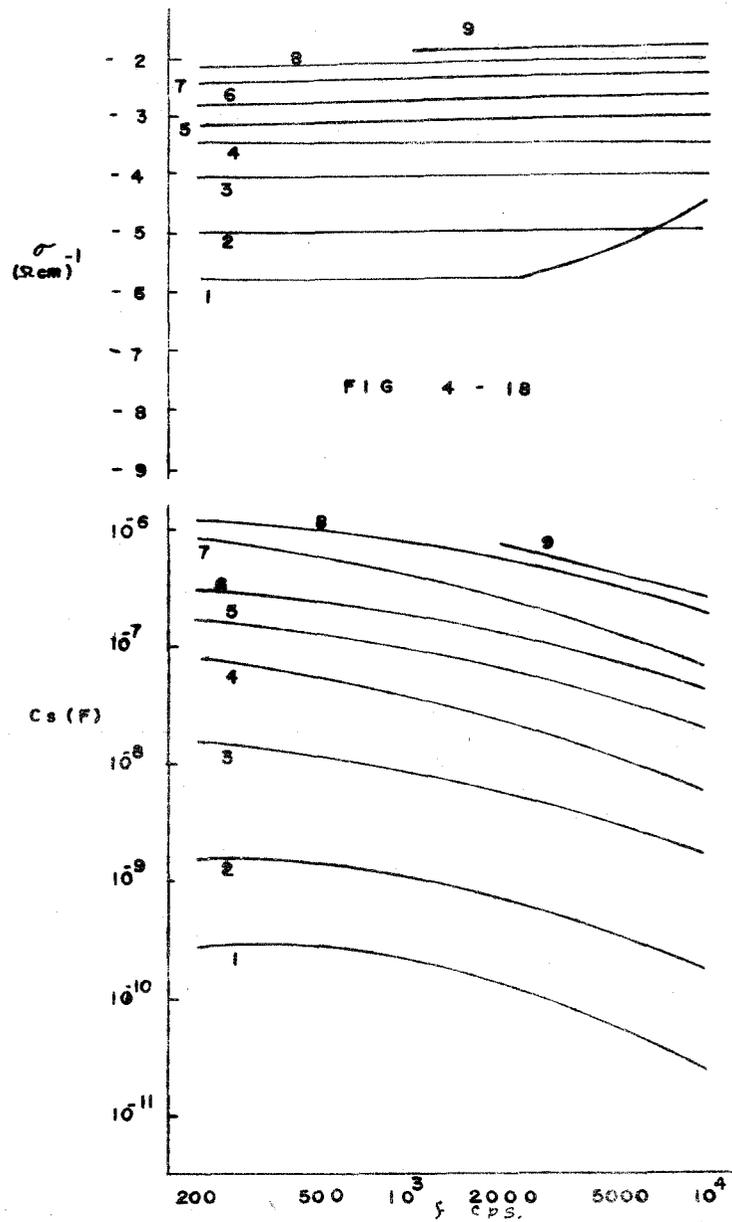
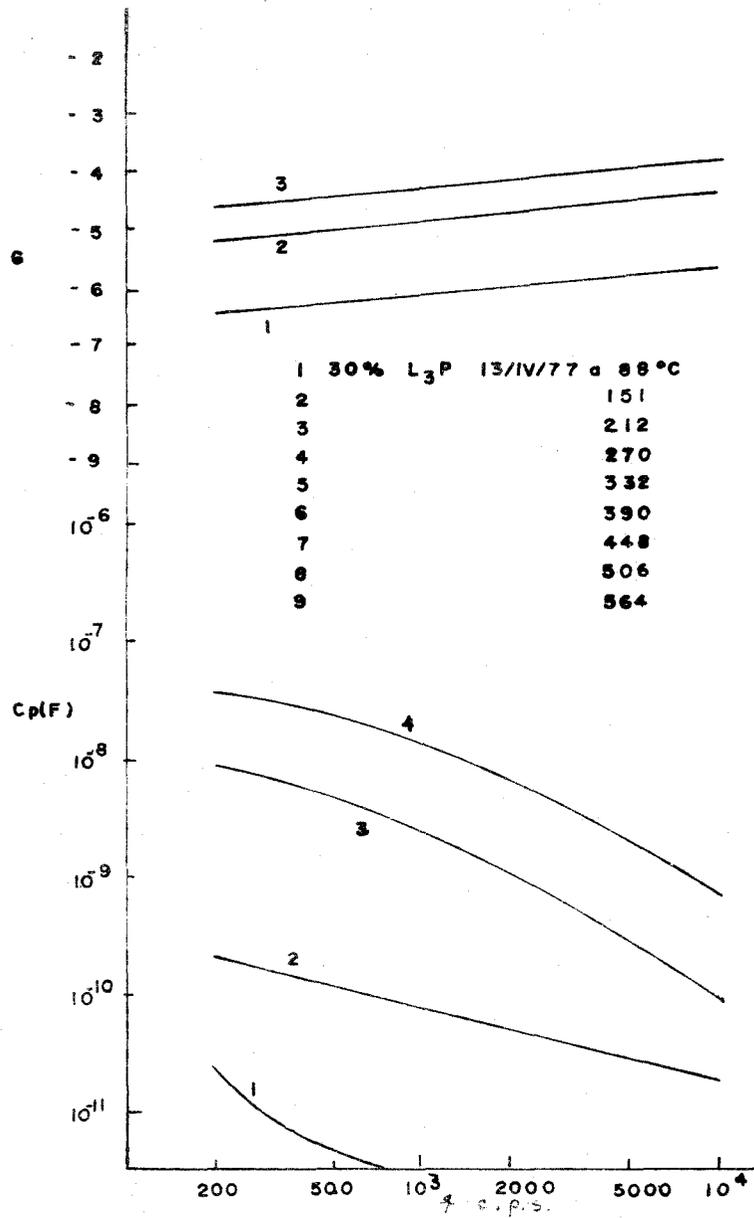


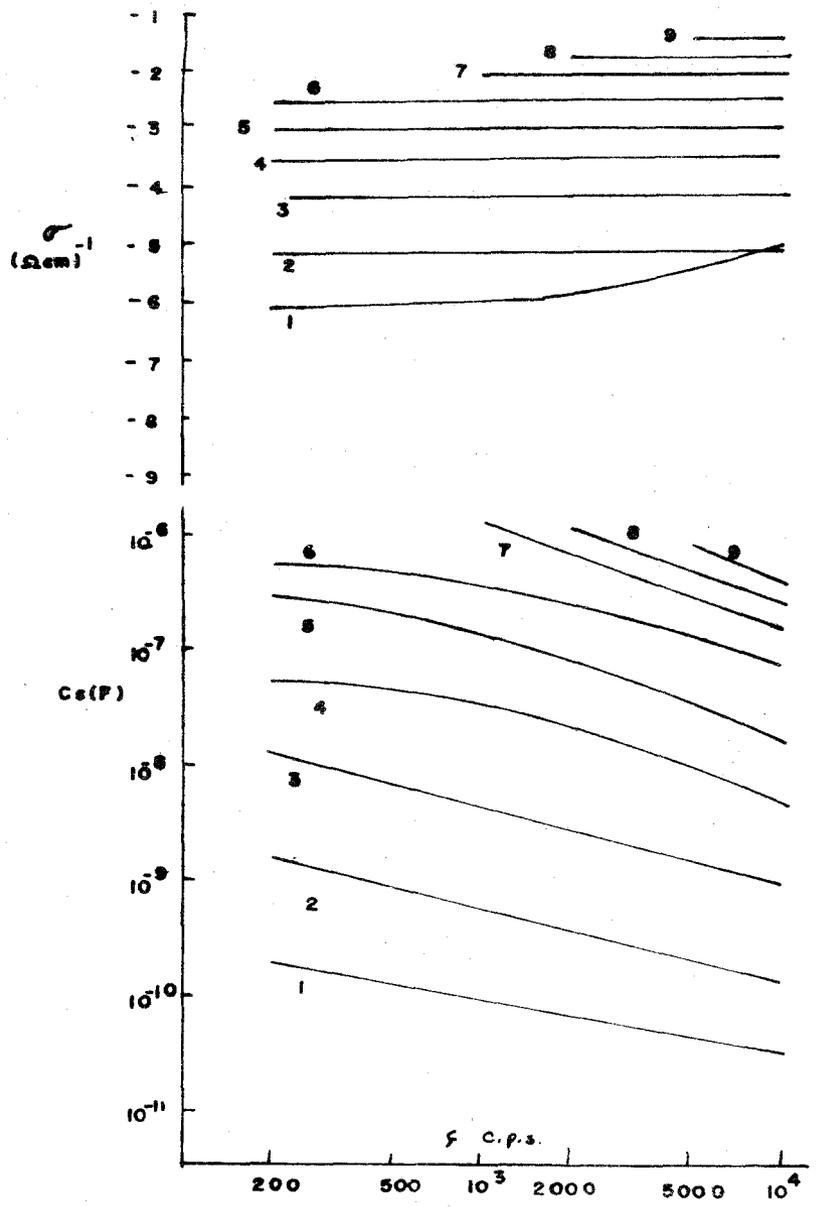
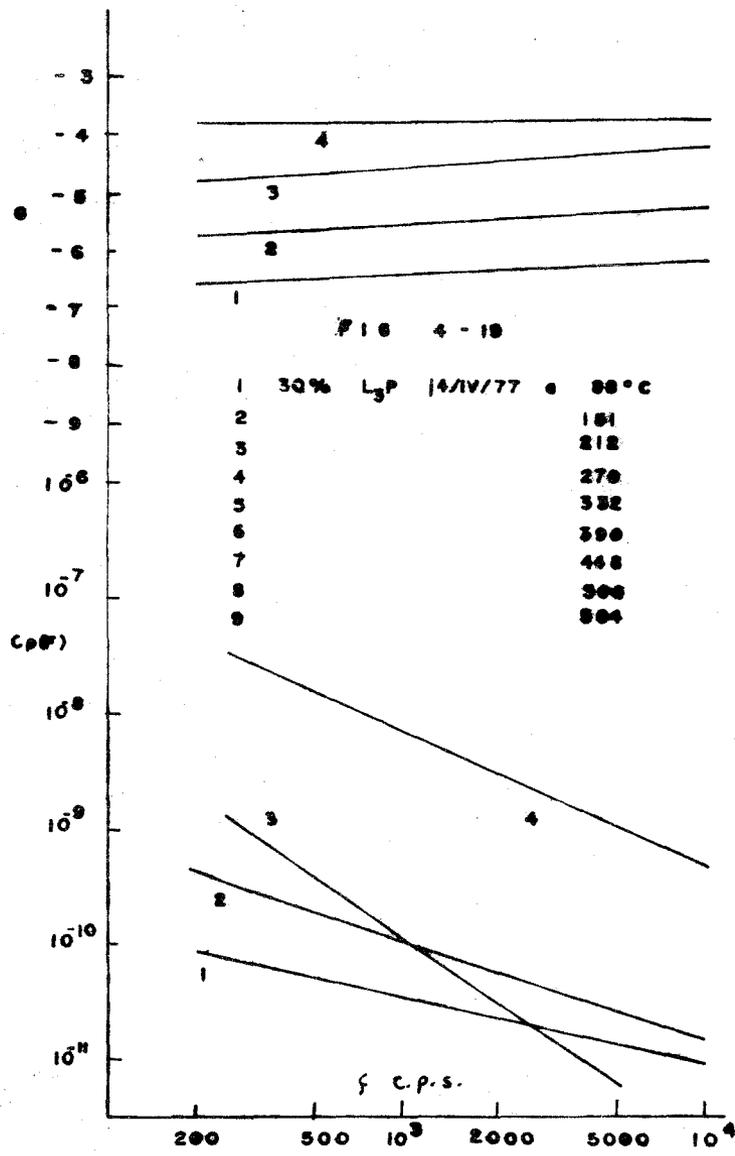


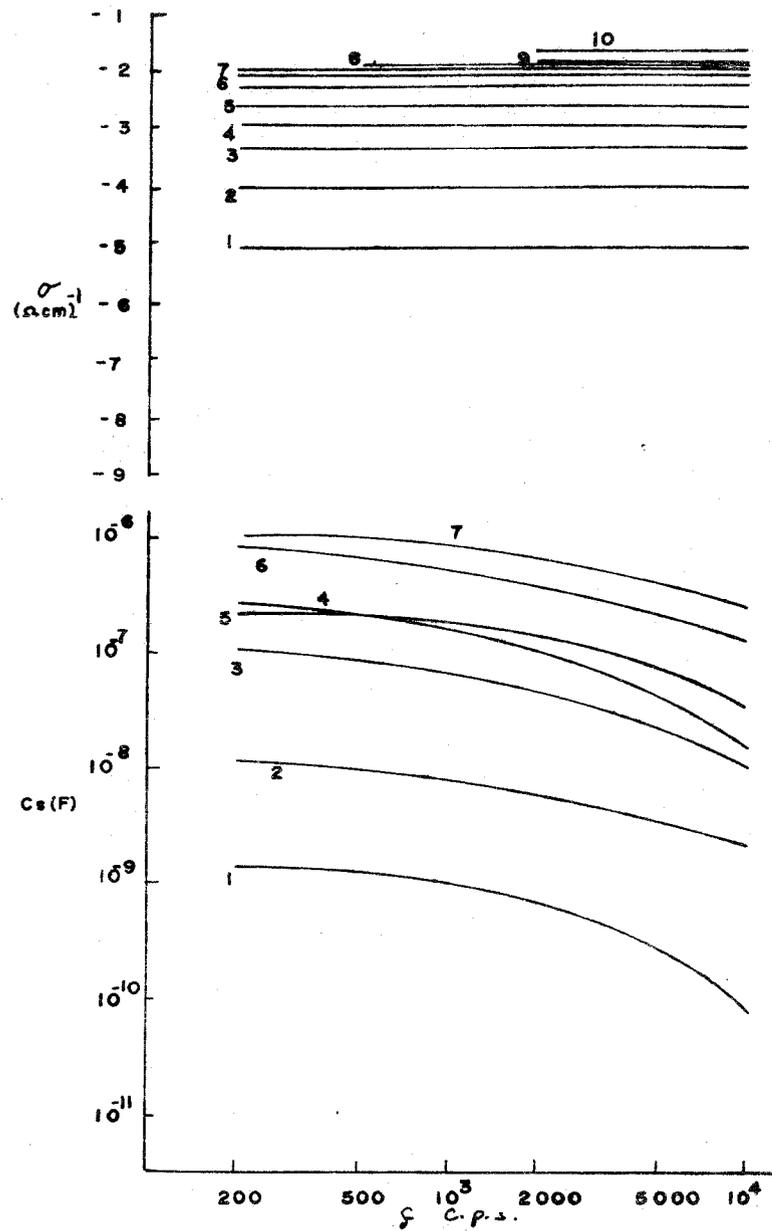
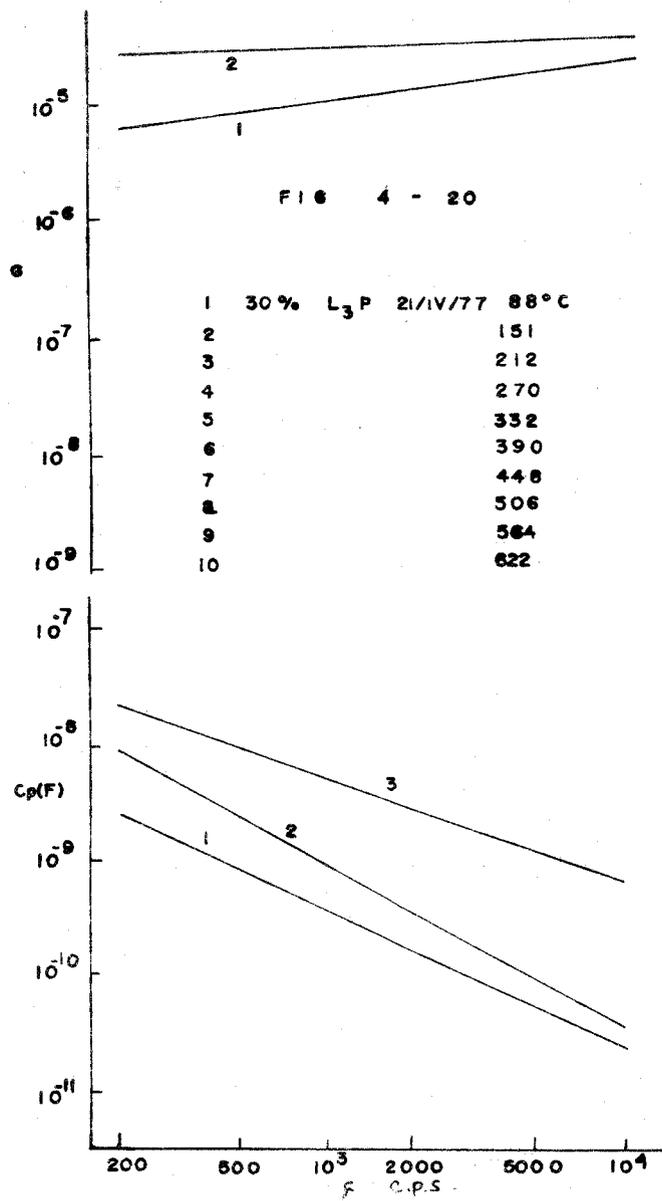


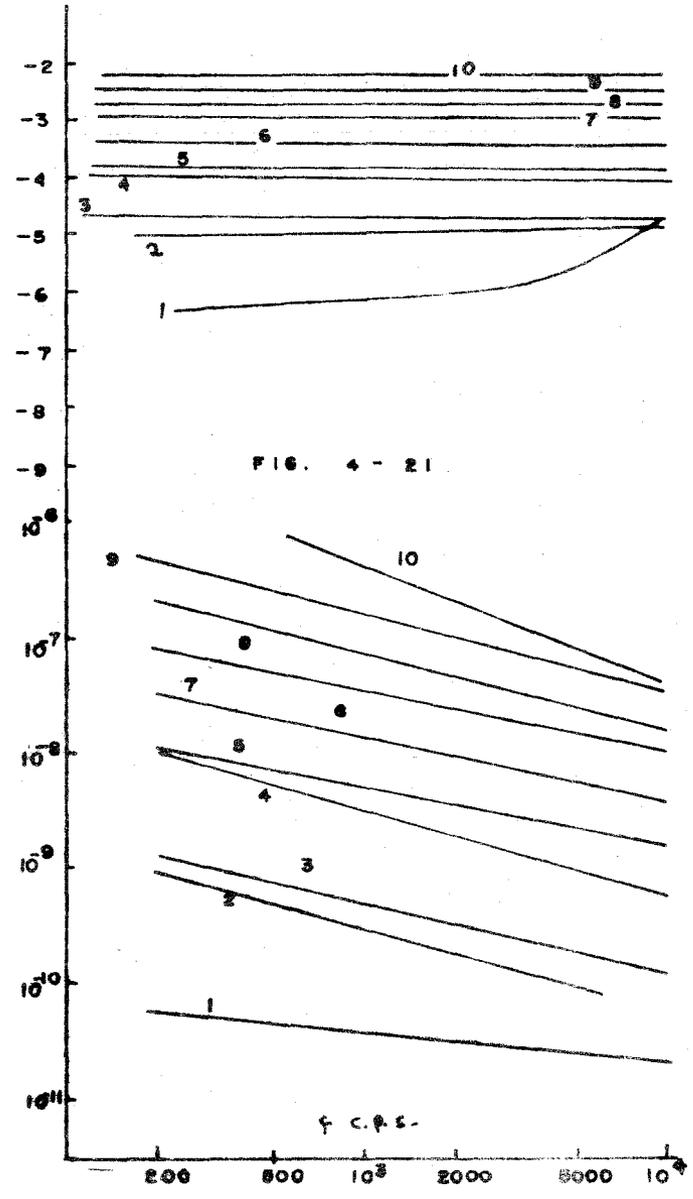
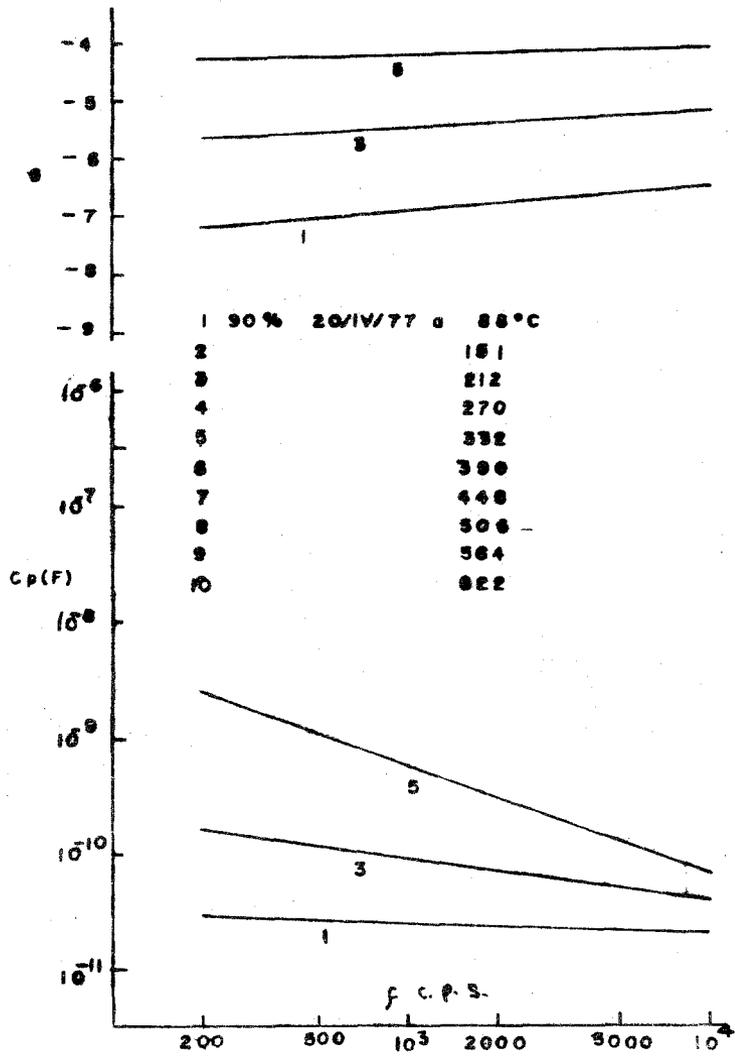












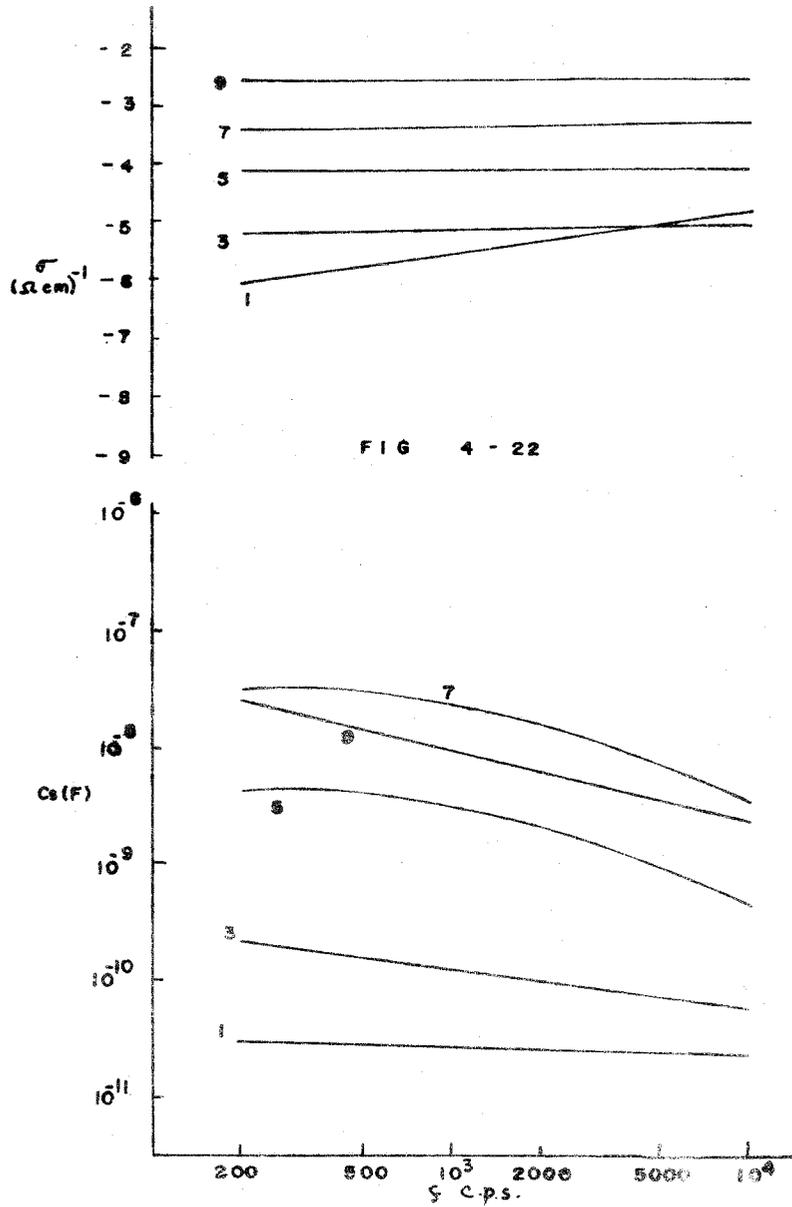
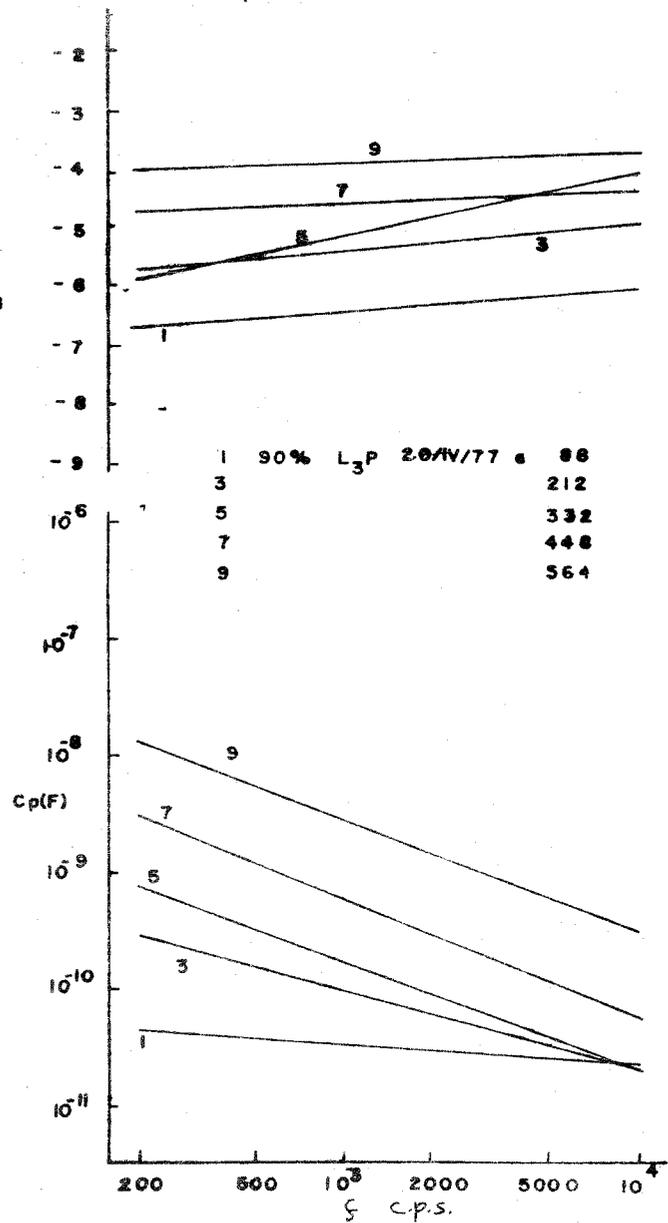


FIG 4 - 22

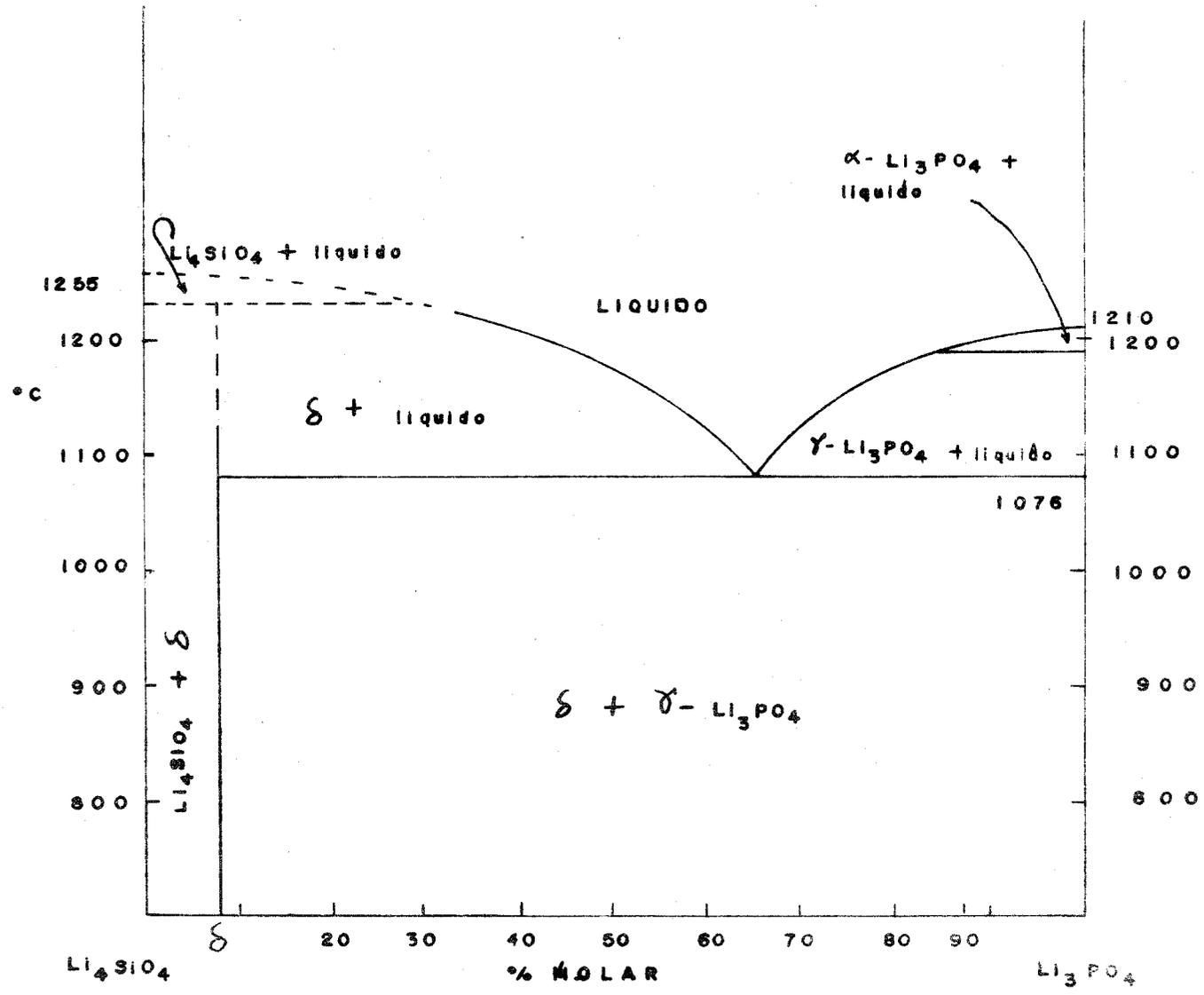


FIG 4-23 DIAGRAMA DE FASES, SISTEMA Li_4SiO_4 - Li_3PO_4

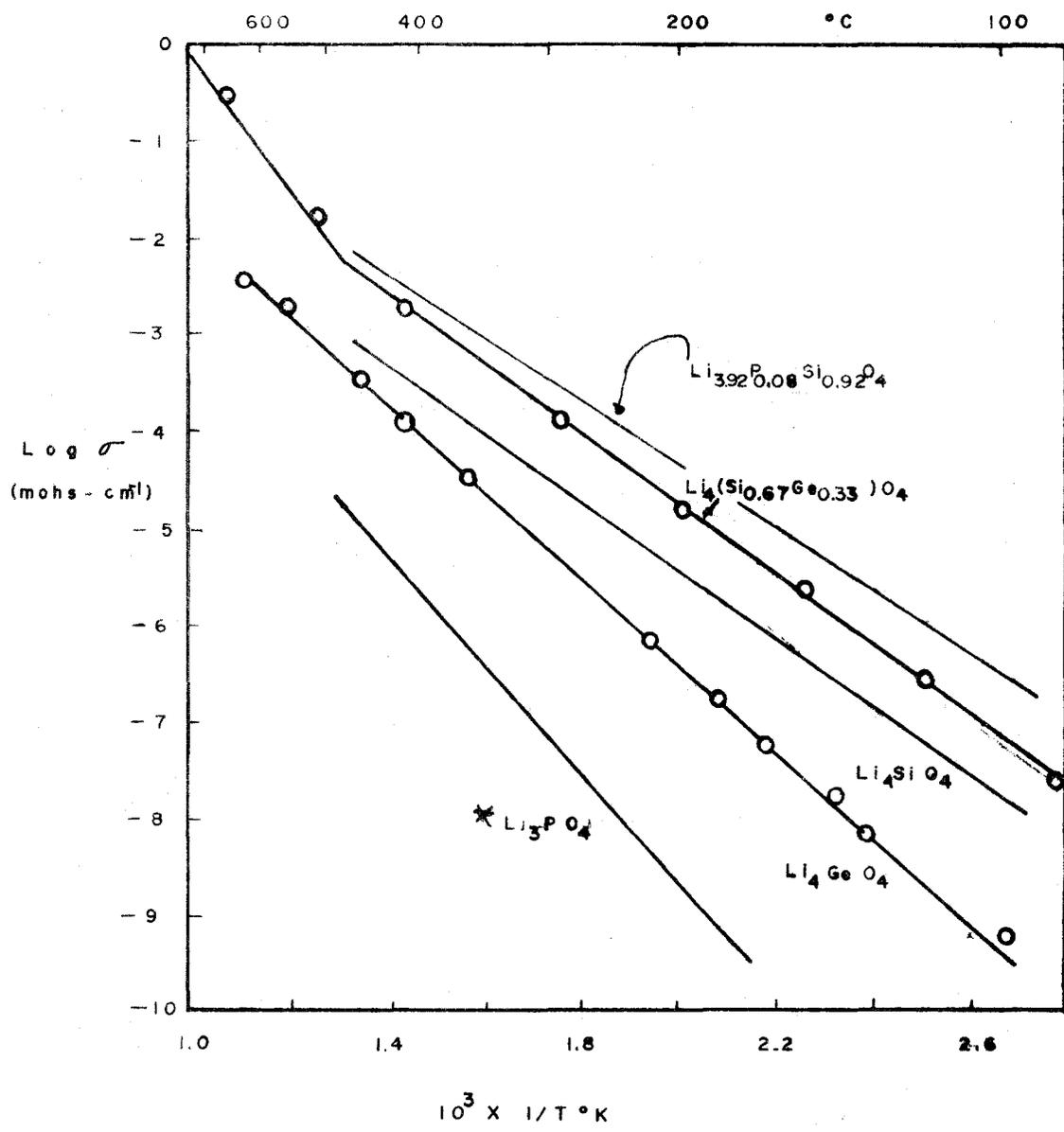


Fig. 4-24 Conductividad iónica

o I.M. Hodge et al. (5)

* estos valores no son confiables.

5-1 CONCLUSIONES

Se determinó el diagrama de fases del sistema $\text{Li}_4\text{SiO}_4\text{-Li}_3\text{PO}_4$, por medio de análisis térmico diferencial y Análisis de rayos X por el método de polvos. Se encontró una fase nueva, δ , cerca del intervalo entre 8% y 10%. El equipo se puede usar confiablemente en la determinación de la Conductión Eléctrica.

El equipo se puede usar confiablemente para determinar D, factor de disipación, cuando R es menor de $10^6 \Omega$ y cuando se mide G (conductividad eléctrica) para valores menores de $10^9 \Omega$ para la resistencia R.

Se desarrollaron los formalismos de Impedancia Compleja y de Admitancia Compleja para los circuitos equivalentes de la pastilla.

Los formalismos de Impedancia y Admitancia Compleja se graficaron para observar el comportamiento del equipo en función de la frecuencia.

Se pudo comprobar que existe una buena concordancia entre los valores experimentales y los indicados por el desarrollo de los formalismos de Admitancia e Impedancia Complejas.

La conducción electrónica se determinó que es aproximadamente 0.01%, a una temperatura de 500°C , de la conducción eléctrica total, por lo tanto, se considera que es despreciable.

Los valores de la conductividad del silicato de Litio coinciden con los reportados en la literatura (5 y 6) lo que indica el buen funcionamiento del equipo.

La conducción iónica de la fase δ , entre 8 y 10% de Li_3PO_4 es igual o un poco mayor que los reportados en la literatura (5 y 6) para los sistemas Germanato-Silicato de Litio. Es, así mismo, de uno a dos órdenes de magnitud mayor que la conducción iónica del Silicato de Litio a todas las temperaturas.

La fase δ tiene una conductividad iónica más alta que casi cualquier otro conductor cristalino de Litio. Sería de interés probar éste, como electrolito sólido en nuevos tipos de batería.

Shannon et Al (7), reportaron un gran intervalo de soluciones sólidas entre Li_4SiO_4 puro y 30% de Li_3PO_4 , mientras que aquí sólo se encontró un intervalo entre 8 y 10% de Li_3PO_4 para una fase que se llamó fase δ . Se discutieron las razones posibles que originan las diferencias en resultados.

Se espera que en sistemas más complicados, por ejemplo, Germanato-Fosfato-Silicato de Litio, los valores de la conductividad iónica aumentarán considerablemente.

- 1.- R. D. ARMSTRONG G., R. S. BULMER and T. DICKINSON, W. van GOOL, Ed. "Fast Ion Transport in Solids." Plenum, New York, 1973 p.269
- 2.- M. S. WITTINGHAM and R. A. HUGGINGS, J. Chem. Phys. 54(1971).
- 3.- A. KVIST, Z. Naturforsch. 22a, (1967) p. 208.
- 4.- P. McGEEHIN, A. HOOPER. Review Fast Ion Conduction Materials, Journal of materials Science 12, (1977) p 1 a 27
- 5.- I. M. HODGE, M. D. INGRAM and A. R. WEST. Ionic conductivity of Li_4SiO_4 , Li_4GeO_4 and their solid solutions, J. of Am. Cer. Soc. Vol. 59 No. 7-8, 1976.
- 6.- R. D. SHANNON, B. E. YAYLOR, and T BERZINS. To be published in Electrochimica Acta. "New Li Solid Electrolytes".
- 7.- A. R. WEST, Comunicación personal.
- 8.- M. PORTILLA y A. R. WEST. Análisis Térmico Diferencial. Principios y Aplicaciones, Revista de la Soc. Quim. de Mex. (En prensa).
- 9.- I. M. HODGE, M. D. INGRAM and A. R. WEST, IMPEDANCE AND MODULUS SPECTROSCOPY OF POLICRISTALLINE SOLID ELECTROLYTES. J. Electroanal. Chem. 74(1976) 125-143.
- 10.- ERNEST M. LEVIN, CARL R. ROBBINS and H F. McMURDIE, Phase Diagrams for Ceramist, M. K. Reser Ed. The American Ceramica Soc. 1974, p 91 y 232.
- 11.- W. GRATZER . dissertation, Thesis of Ph. D. University of Vienna 1970.

APENDICE

Se presentan los resultados experimentales obtenidos con el Puente de Capacitancias de la General Radio. Se indica la composición de la pastilla y la fecha, en el mismo orden en que están las gráficas de resultados en el Capítulo 4.

En la primera columna se tiene la frecuencia de Htz., en la segunda columna se tiene el factor de disipación, D .

En la tercera columna se tiene el valor correspondiente a C_p en pF.

En la cuarta y quinta columna están los valores de G en micro-mohs y de C_s en pF, respectivamente.

Se tiene después una columna con la temperatura a que se efectuó la medida y por último, el valor calculado con D , de la conductividad σ , en $(\text{ohms-cm})^{-1}$.

TABLA A - 1 L₂S 13/I/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T °C	σ (Ohms ⁻¹ cm ⁻¹)
10 000	0.004	20.0	0.010	17.9	25	7.60 x 10 ⁻⁶
5 000	0.008	17.0	0.008	17.8	"	3.20 x 10 ⁻⁶
2 000	0.012	18.0	0.006	18.0	"	2.30 x 10 ⁻⁶
1 000	0.037	18.3	0.004	18.3	"	7.70 x 10 ⁻⁷
500	0.102	18.3	0.003	18.5	"	2.80 x 10 ⁻⁷
200	0.502	19.1	0.002	20.1	"	5.90 x 10 ⁻⁸
100	0.802	20.1	0.002	21.1	"	3.90 x 10 ⁻⁸
10 000	0.4	26.1	1.0	10.0	151	1.02 x 10 ⁻⁶
5 000	0.13	30.1	1.0	10.0	"	1.57 x 10 ⁻⁶
2 000	0.98	120.0	1.0	10.0	"	1.90 x 10 ⁻⁷
1 000		121.0	1.0	9.0	"	
500		120.0	0.4	4.0	"	
200		170.0	0.4	4.0	"	
100		190.0	0.4	3.0	"	
10 000	0.06	216.0	1.1	33.0	212	5.65 x 10 ⁻⁶
5 000	0.17	466.0	1.1	23.0	"	4.30 x 10 ⁻⁶
2 000	0.32	1 000.0	1.1	173.0	"	4.90 x 10 ⁻⁶
1 000	0.92	2 400.0	1.1	233.0	"	4.09 x 10 ⁻⁶
500	0.98	2 800.0	1.1	330.0	"	4.48 x 10 ⁻⁶
200		3 200.0	1.1	430.0	"	
100		3 600.0	1.1	530.0	"	
10 000	0.02	300.0	90.0	60.0	270	2.35 x 10 ⁻⁵
5 000	0.05	500.0	60.0	60.0	"	1.50 x 10 ⁻⁵
2 000	0.18	1 800.0	50.0	50.0	"	1.50 x 10 ⁻⁵
1 000	0.38	3 300.0	44.0	40.0	"	1.30 x 10 ⁻⁵
500	0.68	6 300.0	44.0	30.0	"	1.45 x 10 ⁻⁵
200	0.98	8 000.0	37.0	30.0	"	1.28 x 10 ⁻⁵
100		12 000.0	38.0	30.0	"	

TABLA A-2 2% L₃P 27/II/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	ρ (Ohms-cm)
10 000	0.10	6	0.020	1	88	-6.522
5 000	0.10	8	0.020	2	"	-6.397
2 000	0.10	10	0.010	3	"	-6.300
1 000	0.12	12	0.010	3	"	-6.300
500	0.30	12	0.010	4	"	-6.699
200	0.40	12	0.001	4	"	-6.834
100	0.90	12	0.001	5	"	-7.174
10 000	0.05	7	0.50	8	151	-6.154
5 000	0.14	10	0.40	8	"	-6.447
2 000	0.31	12	0.30	9	"	-6.713
1 000	0.91	20	0.20	10	"	-6.959
500	0.99	20	0.17	10	"	-6.996
200		20	0.16	10	"	
100		20	0.14	18	"	
10 000	0.71	300	2.0	10	212	-5.674
5 000	0.71	300	2.0	9	"	-5.674
2 000	0.76	400	1.0	10	"	-5.699
1 000	0.91	500	1.0	10	"	-5.561
500		600	1.0	10	"	
200		800	0.9	10	"	
100		800	1.0	10	"	
10 000	0.04	20	10.0	10	270	-5.591
5 000	0.10	30	10.0	20	"	-5.824
2 000	0.10	30	10.0	40	"	-5.824
1 000	0.10	30	9.0	50	"	-5.824
500	0.50	30	4.0	20	"	-4.523
200	0.90	40	3.0	20	"	-4.658
100		100	4.0	20	"	

CONTINUA TABLA A - 2

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohms'cm ⁻¹)
10 000	0.03	30	30.0	9	332	-5.300
5 000	0.06	60	10.0	10	"	-5.300
2 000	0.09	100	20.0	40	"	-5.255
1 000	0.20	100	20.0	50	"	-5.603
500	0.50	900	20.0	90	"	-5.046
200		4 000	20.0	100	"	
100		5 000	20.0	220	"	
10 000	0.03	100	50.0	10	390	-4.796
5 000	0.10	200	50.0	50	"	-5.000
2 000	0.20	500	60.0	60	"	-4.904
1 000	0.30	1 000	60.0	120	"	-4.778
500	0.50	5 000	50.0	500	"	-4.300
200		7 000	60.0	1 000	"	
100		9 000	50.0	3 000	"	
10 000	0.09	1 000			448	-4.260
5 000	0.09	2 000			"	-4.959
2 000	0.10	3 000			"	-4.824
1 000	0.50	10 000			"	-5.000
500		30 000			"	
200		60 000			"	
100		90 000			"	
10 000	0.02	800			526	-3.699
5 000	0.04	5 100			"	-3.194
2 000	0.20	20 000			"	-3.300
1 000	0.70	60 000			"	-3.366
500		90 000			"	
200		120 000			"	
100		190 000			"	
10 000	0.10	20 000			584	-3.000
5 000	0.12	30 000			"	-2.904
2 000	0.40	80 000			"	-3.000
1 000		200 000			"	

TABLA A - 3 4 % L3P 4/II/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (ohms ⁻¹ cm ²)
10 000	0.04	2	0.20	3	88	-6.306
5 000	0.08	3	0.10	3	"	-6.430
2 000	0.30	4	0.09	5	"	-6.880
1 000	0.60	5	0.06	6	"	-7.084
500	0.90	7	0.04	6	"	-7.114
200		10	0.03	7	"	
100		12	0.03	5	"	
<hr/>						
10 000	0.04	10	1.0	6	151	-5.606
5 000	0.10	20	1.0	5	"	-6.704
2 000	0.30	28	0.6	9	"	-6.180
1 000	0.50	35	0.4	7	"	-6.159
500	0.90	60	0.2	10	"	-6.180
200		90	0.2	20	"	
100		140	0.1	30	"	
<hr/>						
10 000	0.09	20	10.0	17	212	-5.658
5 000	0.20	40	10.0	47	"	-5.204
2 000	0.33	70	7.0	90	"	-5.578
1 000	0.46	100	3.0	130	"	-5.668
500	0.83	160	2.0	200	"	-5.719
200		250	2.0	250	"	
100		300	1.0	300	"	
<hr/>						
10 000	0.05	40	10.0	30	270	-5.101
5 000	0.10	70	10.0	50	"	-5.159
2 000	0.20	250	10.0	70	"	-4.907
1 000	0.50	800	9.0	80	"	-4.802
500	0.80	1 900	8.0	90	"	-4.629
200		2 400	7.0	100	"	
100		3 300	7.0	120	"	

CONTINUA TABLA A - 3

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohms ⁻¹ cm ⁻¹)
10 000	0.02	60	50.0	50	332	-4.528
5 000	0.1	400	50.0	50	"	-4.403
2 000	0.2	900	40.0	40	"	-4.351
1 000	0.3	2 000	40.0	10	"	-4.180
500		6 000	40.0	20	"	
200		9 000	30.0	20	"	
100		11 000	30.0	20	"	
10 000	0.21	6 000	110.0	30	390	-3.553
5 000	0.26	8 000	110.0	50	"	-3.516
2 000	0.60	12 000	110.0	70	"	-3.704
1 000		17 000	107.0	870	"	
500		30 000	107.0	4 070	"	
200		40 000	91.0	17 070	"	
100						
10 000	0.9	50 000	110.0	300	448	-3.259
5 000	0.88	41 000	110.0	1 000	"	-3.336
2 000	0.93	47 000	110.0	3 000	"	-3.301
1 000		60 000	107.0	10 000	"	
500		70 000	106.0	20 000	"	
200		72 000	106.0	5 000	"	
10 000	0.5	67 000			506	-2.880
5 000	0.6	80 000			"	-2.880
2 000	0.7	100 000			"	-2.851
1 000		140 000			"	
500		150 000			"	
200		200 000			"	
10 000	0.06	22 000			564	-2.441
5 000	0.15	52 000			"	-2.465
2 000	0.40	100 000			"	-2.606
1 000	0.90	230 000			"	-2.597
500		330 000			"	
200		390 000			"	
10 000	0.52	320 000			622	-2.215
5 000	0.58	360 000			"	-2.212
2 000	0.90	400 000			"	-3.357



QUINTA

TABLA A - 4 6 % L₃P 4/II/77

Frecuencia (Hz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (ohms ⁻¹ cm ²)
10 000	0.05	50	5.0	6	88	-5.302
5 000	0.10	100	4.0	4	"	-5.302
2 000	0.20	260	2.0	2	"	-5.188
1 000	0.40	400	1.2	40	"	-5.302
500	0.80	600	0.8	60	"	-5.426
200		1 100	0.7	90	"	
10 000	0.06	80	85.0	40	151	-5.177
5 000	0.14	180	53.0	30	"	-5.193
2 000	0.30	380	31.0	40	"	-5.199
1 000	0.40	700	25.0	220	"	-5.058
500	0.70	1 000	18.0	810	"	-5.147
200		2 000	14.0	2 410	"	
10 000	0.1	4 100	110.0	10	212	-3.689
5 000	0.16	8 100	70.0	20	"	-3.597
2 000	0.30	15 000	70.0	30	"	-3.603
1 000		35 000	68.0	1 290	"	
500		40 000	57.0	3 290	"	
200		60 000	42.0	11 290	"	
10 000	0.05	3 000		700	270	-3.523
5 000	0.10	8 000		4 000	"	-3.398
2 000	0.20	20 000		20 000	"	-3.302
1 000	0.70	40 000		40 000	"	-3.546
500		70 000		70 000	"	
200		110 000		100 000	"	
10 000	0.28	104 000			332	-2.733
5 000	0.42	110 000			"	-2.883
2 000	0.59	150 000			"	-2.897
1 000	0.90	200 000			"	-2.955
500		220 000			"	
200		300 000			"	

CONTINUA TABLA A - 4

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs(pF)	T (°C)	σ (ohms ⁻¹ cm ²)
10 000	0.29	200 000			390	-2.469
5 000	0.40	240 000			"	-2.523
2 000	0.60	300 000			"	-2.603
1 000		380 000			"	
500		400 000			"	
200		500 000			"	
10 000	0.29	420 000			448	-2.130
5 000	0.33	460 000			"	-2.157
2 000	0.52	600 000			"	-2.239
1 000	0.90	800 000			"	-2.353
500		900 000			"	
200					"	
10 000	0.29	900 000			506	-1.810
5 000	0.33	790 000			"	-1.925
2 000	0.48	790 000			"	-2.086
1 000					"	
500					"	
200					"	
10 000	0.19	910 000			564	-1.622
5 000	0.24	940 000			"	-1.710
2 000					"	
1 000					"	
500					"	
200					"	
10 000	0.13	1 050 000			622	-1.395
5 000					"	

TABLA A - 5 8 % L₃P 10/II/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G ($\mu 75$)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohms'ear)
10 000	0.09	2	0.03	16	25	-6.706
5 000	0.10	5	0.03	17	"	-6.353
2 000	0.10	5	0.02	17	"	-6.353
1 000	0.09	7	0.016	18	"	-6.157
500	0.20	10	0.014	18	"	-6.353
200	0.30	8	0.011	20	"	-6.636
10 000	0.31	195.9	0.8	7	88	-5.251
5 000	0.04	4	0.6	10	"	-5.052
2 000	0.10	9	0.5	10	"	-5.097
1 000	0.11	10	0.4	14	"	-5.093
500	0.11	9	0.4	21	"	-5.139
200	0.91	105	0.35	20	"	-5.992
10 000	0.1	109	1.3	20	151	-5.014
5 000	0.05	100	1.3	19	"	-4.750
2 000	0.05	9	1.0	19	"	-5.796
1 000	0.07	11	0.9	29	"	-5.856
500	0.1	19	0.5	19	"	-5.773
200	0.1	29	0.4	19	"	-5.589
100	0.4	300	0.4	19	"	-5.176
10 000	0.1	300	30.0	20	212	-4.574
5 000	0.12	500	30.0	20	"	-4.432
2 000	0.14	600	30.0	10	"	-4.420
1 000	0.34	1 000	30.0	30	"	-4.586
500	0.74	5 000	30.0	10	"	-4.222
200	0.94	7 000	28.0		"	-4.181
10 000	0.13	3 000	110.0	200	270	-3.689
5 000	0.17	4 300	110.0	100	"	-3.648
2 000	0.17	7 100	110.0	1 000	"	-3.431
1 000	0.60	21 000	110.0	10 000	"	-3.508
500	0.90	41 000	110.0	30 000	"	-3.393
200		51 000			"	

CONTINUA TABLA A- 5

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohms ⁻¹ cm ⁻¹)
10 000	0.11	21 000			332	-2.773
5 000	0.20	39 000			"	-2.762
2 000	0.50	90 000			"	-2.796
1 000		150 000			"	
500		150 000			"	
200		170 000			"	
10 000	0.63	270 000			390	-2.666
5 000	0.82	300 000			"	-2.489
2 000	0.92	340 000			"	-2.485
1 000		360 000			"	
500		400 000			"	
200		420 000			"	
10 000	0.82	660 000			448	-2.146
5 000	0.90	670 000			"	-2.180
2 000	1.10	690 000			"	-2.255
1 000		720 000			"	
500		740 000			"	
200		760 000			"	
10 000	0.65	940 000			506	-1.893
5 000	0.70	990 000			"	-1.904
2 000					"	
10 000					564	

TABLA A - 6 8 % L₃P 11/11/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	τ (Ohms' sec)
10 000	0.01	19	0.030	17	25	-5.079
5 000	0.03	20	0.030	19	"	-5.534
2 000	0.15	21	0.024	22	"	-6.312
1 000	0.44	24	0.020	25	"	-6.621
500	0.64	31	0.017	28	"	-6.673
200	0.84	38	0.010	31	"	-6.703
<hr/>						
10 000	0.05	5	0.40	10	88	-6.358
5 000	0.15	15	0.50	10	"	-6.358
2 000	0.41	37	0.40	10	"	-6.403
1 000	0.81	50	0.33	16	"	-6.568
500	0.91	70	0.30	23	"	-6.472
200	0.96	72	0.27	41	"	-6.483
<hr/>						
10 000	0.04	30	5.0	7	151	-5.483
5 000	0.41	330	3.0	10	"	-5.452
2 000	0.41	440	2.7	12	"	-5.327
1 000	0.61	540	2.4	12	"	-5.411
500		1 040	2.4	11	"	
200		1 640	2.3	10	"	
<hr/>						
10 000	0.08	200	33.0	10	212	-4.932
5 000	0.31	770	27.0	50	"	-4.963
2 000	0.81	2 570	23.0	20	"	-4.856
1 000	0.71	2 370	17.0	20	"	-4.834
500		3 370	16.0	24	"	
200		5 370	15.0	22	"	
<hr/>						
10 000	0.40	8 400	90.0	7	270	-4.035
5 000	0.20	3 700	111.1	20	"	-4.091
2 000	0.40	8 300	111.1	30	"	-4.041
1 000	0.40	12 000	111.1	30	"	-4.237
500		17 000	111.1	30	"	
200		27 000	111.1	30	"	

CONTINUA TABLA A-6

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	r (Ohms ¹ cm ²)
10 000	0.16	13 000			332	-3.447
5 000	0.30	23 000			"	-3.463
2 000	0.60	43 000			"	-3.503
1 000	0.80	63 000			"	-3.462
500	0.90	83 000			"	-3.393
200		93 000			"	
10 000	0.21	49 000			390	-2.990
5 000	0.41	89 000			"	-3.021
2 000	0.81	169 000			"	-3.021
1 000	1.01	269 000			"	-2.937
500		279 000			"	
200		289 000			"	
10 000	0.15	90 000			448	-2.581
5 000	0.20	120 000			"	-2.580
2 000	0.50	330 000			"	-2.538
1 000	0.80	500 000			"	-2.562
500		650 000			"	
200		800 000			"	
10 000	0.29	490 000			506	-2.130
5 000	0.49	680 000			"	-2.526
2 000	0.70	800 000			"	-2.216
1 000					"	
500					"	
200					"	
10 000	0.19	500 000			564	-1.938
5 000	0.26	700 000			"	-1.928
2 000					"	
1 000						
500						
200						

TABLA A - 7 10 % L3P 24/II/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp(pF)	G (μS)	Cs(pF)	T (°C)	τ (ohms ⁻¹ cm ⁻¹)
10 000	0.010	19	0.094	18.2	25	-4.728
5 000	0.030	19	0.081	19.5	"	-5.205
2 000	0.13	20	0.062	19.5	"	-5.819
1 000	0.40	23	0.053	20.3	"	-6.247
500		32	0.047	22.4	"	
200		33	0.040	26.4	"	
10 000	0.05	27	1.11	14.0	88	-5.274
5 000	0.16	46	1.0	15.0	"	-5.548
2 000	0.30	99	0.8	17.0	"	-5.487
1 000	0.50	179	0.7	19.0	"	-5.452
500	0.90	279	0.6	20.0	"	-5.515
200		390	0.5	21.0	"	
10 000	0.07	100	19.0	8.0	151	-4.852
5 000	0.10	200	18.0	12.0	"	-4.705
2 000	0.15	300	19.0	16.0	"	-4.705
1 000	0.50	1 000	16.6	21.0	"	-4.705
500	0.90	2 000	12.0	22.0	"	-4.660
200		3 000	10.0	2.1	"	
10 000	0.1	1 900	79.0	210.0	212	-3.728
5 000	0.15	2 600	60.0	30.0	"	-3.768
2 000	0.29	4 900	54.0	20.0	"	-3.778
1 000	0.59	9 900	57.0	17.0	"	-3.781
500	0.99	14 000	54.0	55.0	"	-3.855
200		18 000	48.0	395.0	"	
10 000	0.10	5 963			270	-3.231
5 000	0.10	6 963			"	-3.263
2 000	0.30	12 000			"	-3.404
1 000	0.50	30 000			"	-3.228
500	1.00	61 000			"	-3.221
200		120 000			"	

CONTINUA TABLA A-7

Frecuencia (Htz)	D	Cp(pF)	G ($\mu\bar{v}$)	Cs(pF)	T (°C)	σ (ohms'cm)
10 000	0.39	110 000			332	-2.556
5 000	0.24	80 000			"	-2.484
2 000	0.50	130 000			"	-2.591
1 000		230 000			"	
500		280 000			"	
200		380 000			"	
10 000	0.57	330 000			390	-2.244
5 000	0.62	340 000			"	-2.267
2 000	0.80	410 000			"	-2.297
1 000		600 000			"	
500		620 000			"	
200		640 000			"	
10 000	0.57	660 000			448	-1.942
5 000	0.64	680 000			"	-1.980
2 000	0.76	800 000			"	-1.984
1 000		1 100 000			"	
10 000	0.20	520 000			506	-1.501
5 000	0.30	670 000			"	-1.057
2 000	0.60	1 100 000			"	-1.743
1 000	0.90				"	
10 000	0.17	850 000			622	-1.207
5 000	0.22	1 100 000			"	-1.207

TABLA A - 8 10 % L₃P 25/II/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohms ⁻¹ cm ⁻¹)
10 000	0.003	16.7	0.051	17.2	25	-4.302
5 000	0.016	17.2	0.040	17.4	"	-5.016
2 000	0.070	18.1	0.030	18.0	"	-5.635
1 000	0.260	20.0	0.027	18.7	"	-6.162
500	0.740	22.0	0.023	20.0	"	-6.574
200	1.060	25.0	0.018	22.0	"	-6.675
10 000	0.08	29.0	0.42	4.0	88	-5.675
5 000	0.12	37.0	0.31	6.0	"	-5.558
2 000	0.61	80.0	0.20	9.0	"	-5.930
1 000	0.99	108.0	0.19	10.0	"	-6.010
500	0.99	100.0	0.16	13.0	"	-6.043
200	0.99	130.0	0.14	15.0	"	-5.939
10 000	0.063	42.0	3.0	3.0	151	-5.224
5 000	0.200	65.0	5.0	4.0	"	-5.636
2 000	0.560	130.0	4.0	5.0	"	-5.682
1 000	0.850	210.0	3.0	5.0	"	-5.655
500	0.980	310.0	2.6	4.0	"	-5.547
200		410.0	2.3	2.0	"	
10 000	0.080	510.0	20.0	50.0	212	-4.243
5 000	0.150	1 000.0	26.0	30.0	"	-4.223
2 000	0.200	1 800.0	20.0	30.0	"	-4.093
1 000	0.600	4 800.0	20.0	25.0	"	-4.144
500	0.800	6 000.0	20.0	20.0	"	-4.172
200		9 000.0	20.0	25.0	"	
10 000	0.10	9 000.0		20.0	270	-3.093
5 000	0.21	22 000.0		40.0	"	-3.027
2 000	0.47	46 000.0		300.0	"	-3.057
1 000	0.67	70 000.0		1 000.0	"	-3.028
500	1.07	100 000.0		6 000.0	"	-3.077
200		200 000.0		20 000.0	"	

CONTINUA TABLA A- 8

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ ($Ohms^{-1} ems^{-2}$)
10 000	0.46	98 000			332	-2.719
5 000	0.50	100 000			"	-2.746
2 000	0.66	140 000			"	-2.721
1 000	0.86	200 000			"	-2.681
500	0.88	240 000			"	-2.612
200		280 000			"	
10 000	0.58	220 000			390	-2.468
5 000	0.63	230 000			"	-2.485
2 000	0.73	260 000			"	-2.496
1 000	0.83	320 000			"	-2.462
500	0.93	360 000			"	-2.460
200		460 000			"	
10 000	0.57	460 000			448	-2.141
5 000	0.69	530 000			"	-2.162
2 000	0.84	620 000			"	-2.177
1 000		840 000			"	
500		900.000			"	
200						
10 000	0.47	670 000			506	-1.894
5 000	0.48	700 000			"	-1.883
2 000	0.63	900 000			"	-1.892
1 000	0.93				"	
500					"	
10 000	0.24	701 000			564	-1.582
5 000	0.34	1 001 000			"	-1.579
2 000						

TABLA A - 9 15 % L₃P 28/II/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp(pF)	G (μS)	Cs(pF)	T (°C)	σ ($\text{Ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$)
10 000	0.008	17.8	0.091	18.2	25	-4.702
5 000	0.023	18.5	0.072	18.6	"	-5.142
2 000	0.108	20.3	0.056	19.2	"	-5.772
1 000	0.330	22.6	0.048	20.1	"	-6.218
500	0.890	27.9	0.042	21.7	"	-6.552
200		30.9	0.035	25.0	"	
10 000	0.020	20.0	0.22	4.0	88	-5.047
5 000	0.070	22.0	0.20	5.0	"	-5.550
2 000	0.30	28.0	0.16	7.0	"	-6.078
1 000	0.80	41.0	0.12	10.0	"	-6.337
500		52.0	0.11	15.0	"	
200		62.0	0.10	22.0	"	
10 000	0.12	79.0	3.0	2.0	151	-5.229
5 000	0.33	140.0	2.4	4.0	"	-5.419
2 000	0.53	220.0	1.9	6.0	"	-5.429
1 000	0.87	280.0	1.9	7.0	"	-5.540
500	0.99	380.0	2.1	6.0	"	-5.464
200		420	1.8	9.0	"	
10 000	0.14	800.0	15.0	130.0	212	-4.291
5 000	0.20	1 000.0	11.0	40.0	"	-4.348
2 000	0.40	1 200.0	10.0	50.0	"	-4.571
1 000	0.50	2 100.0	17.0	40.0	"	-4.424
500	0.80	3 100.0	20.0	70.0	"	-4.459
200		4 100.0	16.0	90.0	"	
10 000	0.40	10 000.0	111.1	98.0	270	-3.650
5 000	0.45	11 000.0	111.1	88.0	"	-3.660
2 000	0.48	13 000.0	111.1	1 000.0	"	-3.615
1 000	0.80	22 000.0	111.1	5 000.0	"	-3.608
500		30 000.0	90.0	11 000.0	"	
200		50 000.0	80.0	30 000.0	"	

CONTINUA TABLA A - 9

Frecuencia (Htz)	D	Cp(pF)	G (μS)	Cs(pF)	T (°C)	σ (chms ⁻¹ -cm ²)
10 000	0.20	25 000			332	-2.951
5 000	0.30	34 000			"	-2.991
2 000	0.33	51 000			"	-2.860
1 000	0.73	71 000			"	-3.059
500	0.93	101 000			"	-3.012
200	1.03	161 000			"	-4.854
10 000	0.14	44 000			390	-2.550
5 000	0.22	57 000			"	-2.615
2 000	0.60	90 000			"	-2.873
1 000		150 000			"	
500		200 000			"	
200						
10 000	0.07	35 000			448	-2.348
5 000	0.30	155 000			"	-2.334
2 000	0.50	225 000			"	-2.394
1 000	0.80	325 000			"	-2.438
500		405 000			"	
10 000	0.60	700 000			506	-1.979
5 000	0.70	770 000			"	-2.006
2 000	0.80	840 000			"	-2.027
1 000		940 000			"	
10 000	0.343	985 900			564	-1.589
5 000	0.373	1 115 900			"	-1.572
10 000	0.20	111 111			622	-1.303

TABLA A - 10 30 % L₃P 11/IV/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	<i>(Ohms' cu')</i>
10 000	0.04	100	41	14	88	-4.804
5 000	0.20	300	22	90	"	-5.026
2 000	0.50	700	14	200	"	-5.056
1 000	0.90	1 000	11	500	"	-5.157
500		1 200	9	900	"	
200		1 400	6	2 000	"	
10 000	0.14	2 000	40	50	151	-4.047
5 000	0.20	3 400	36	70	"	-3.972
2 000	0.40	6 400	30	600	"	-3.998
1 000	0.50	7 400	28	1 200	"	-4.032
500	0.70	9 000	23	2 700	"	-4.093
200	0.90	10 000	16	7 800	"	-4.157
10 000	0.20	12 000		700	212	-3.424
5 000	0.34	22 000		1 400	"	-3.391
2 000	0.50	37 000		3 400	"	-3.333
1 000	0.80	60 000	99.00	6 000	"	-3.327
500	1.00	80 000	83.00	10 000	"	-3.299
200		100 000	60.00	23 000	"	
10 000	0.11	15 000			270	-3.068
5 000	0.30	50 000			"	-2.980
2 000	0.60	100 000			"	-2.980
1 000	0.90	140 000			"	-3.009
500		190 000			"	
200		200 000			"	
10 000	0.1	40 000			332	-2.600
5 000	0.2	70 000			"	-2.658
2 000	0.53	120 000			"	-2.837
1 000	0.80	250 000			"	-2.707
500	0.90	280 000			"	-2.709
200		290 000			"	

CONTINUA TABLA A - 10

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Omnis' cur')
10 000	0.12	220 000			506	-1.939
5 000	0.23	300 000			"	-2.087
2 000	0.96	460 000			"	-2.202
1 000		700 000			"	
500		700 000			"	
10 000	0.12	340 000			564	-1.750
5 000	0.21	450 000			"	-1.871
2 000	0.52	700 000			"	-2.073
10 000	0.12	600 000			622	-1.503
5 000	0.23	820 000			"	-1.650
2 000	0.40	1 050 000			"	-1.783

TABLA A - 11 30% L₃P 11/IV/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G ($\mu\bar{v}$)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohm ⁻¹ cm ⁻¹)
10 000	0.007	2	0.08	2	88	-5.748
5 000	0.02	2	0.06	4	"	-6.201
2 000	0.012	1.5	0.09	3	"	-6.105
1 000	0.12	4.5	0.08	5	"	-6.629
500	0.22	9.5	0.10	2	"	-6.568
200	1.42	20.5	0.02	1	"	-6.515
10 000	0.09	5	5.0	5	151	-5.458
5 000	0.13	13	4.0	4	"	-6.202
2 000	0.06	40	3.0	4	"	-5.378
1 000	0.20	100	2.6	2	"	-5.504
500	0.80	300	2.3	3	"	-5.628
200	1.00	900	1.8	2	"	-5.248
10 000	0.1	400	30.0	20	212	-4.601
5 000	0.09	500	30.0	13	"	-4.458
2 000	0.3	1 000	18.0	17	"	-4.680
1 000	0.6	2 600	13.0	15	"	-4.566
500	0.86	4 900	9.0	900	"	-4.535
200	1.00	5 000	4.0	3 000	"	-4.504
10 000	0.1	2 000	70.0	200	270	-3.900
5 000	0.27	4 700	80.0	20	"	-3.963
2 000	0.52	6 800	50.0	100	"	-4.084
1 000	0.94	10 000	40.0	4 000	"	-4.176
500		12 000	25.0	7 000	"	
200		13 000	20.0	11 000	"	
10 000	0.1	5 000	111.11	1 000	332	-3.504
5 000	0.1	6 000	110.00	3 000	"	-3.428
2 000	0.4	16 000	110.00	7 000	"	-3.601
1 000	0.8	23 000	85.00	12 000	"	-3.743
500	0.96	24 000	54.00	17 000	"	-3.889
200	1.00	30 000	32.00	30 000	"	-3.736

CONTINUA TABLA A - 11

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohm' em')
10 000	0.18	16 000			390	-3.253
5 000	0.24	18 000			"	-3.328
2 000	0.45	26 000			"	-3.441
1 000	0.75	34 000			"	-3.543
500	1.10	42 000			"	-3.624
200		50 000			"	
10 000	0.1	24 000			448	-2.822
5 000	0.27	31 000			"	-3.143
2 000	0.40	37 000			"	-3.236
1 000	0.70	46 000			"	-3.385
500		60 000			"	
200		70 000			"	
10 000	0.13	33 000			506	-2.799
5 000	0.21	42 000			"	-2.900
2 000	0.42	62 000			"	-3.033
1 000	0.70	83 000			"	-3.129
500		110 000			"	
200		130 000			"	
10 000	0.13	58 000			564	-2.553
5 000	0.21	75 000			"	-2.650
2 000	0.56	130 000			"	-2.836
1 000	0.82	170 000			"	-2.886
500		210 000			"	
200		220 000			"	

TABLA A-12 30 % L₃P 14/IV/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohms' eni)
10 000	0.05	30	2	0.6	88	-4.424
5 000	0.14	72	1.6	1.0	"	-5.495
2 000	0.40	130	0.9	3.0	"	-5.601
1 000	0.99	210	0.5	3.0	"	-5.877
500		240	0.5	2.0	"	
200		250	0.4	20.0	"	
10 000	0.1	210	50.0	20.0	15Γ	-4.880
5 000	0.22	440	23.0	300.0	"	-4.900
2 000	0.45	670	14.0	400.0	"	-5.030
1 000	0.70	920	8.0	700.0	"	-5.084
500		1 520	6.0	1 100.0	"	
200		1 620	4.0	2 000.0	"	
10 000	0.1	2 500		70.0	212	-3.805
5 000	0.17	3 000	60.0	300.0	"	-3.955
2 000	0.40	6 000	53.0	1 300.0	"	-4.027
1 000	1.00	13 000	40.0	2 500.0	"	-4.088
500		14 000	31.0	4 700.0	"	
200		15 000	21.0	10 000.0	"	
10 000	0.07	3 000		600.0	270	-3.571
5 000	0.25	10 000		2 000.0	"	-3.601
2 000	0.57	23 000		5 000.0	"	-3.597
1 000	0.78	32 000		13 000.0	"	-3.589
500	0.90	50 000		24 000.0	"	-3.458
200		70 000		40 000.0	"	
10 000	0.1	17 000			332	-2.971
5 000	0.33	43 000			"	-3.088
2 000	0.53	63 000			"	-3.127
1 000	0.83	93 000			"	-3.153
500		130 000			"	
200		140 000			"	

CONTINUA TABLA A- 12

Frecuencia (Hz)	D	Cp (pF)	G ($\mu\mathcal{E}$)	Cs (pF)	T (°C)	\mathcal{T} ($\text{Ohms}^{-1}\text{cm}^{-1}$)
10 000	0.15	50 000			390	-2.680
5 000	0.18	60 000			"	-2.680
2 000	0.43	100 000			"	-2.836
1 000	0.93	180 000			"	-2.137
500		250 000			"	
200		300 000			"	
10 000	0.1	80 000			448	-2.299
5 000	0.25	170 000			"	-2.370
2 000	0.46	260 000			"	-2.450
1 000	0.70	400 000			"	-2.445
500	1.00	600 000			"	-2.424
200	1.00	800 000			"	-2.345
10 000	0.1	170 000			506	-1.971
5 000	0.3	360 000			"	-2.123
2 000	0.5	490 000			"	-2.211
1 000	0.8	800 000			"	-2.203
500	1.0	1 000 000			"	-2.203
10 000	0.1	300 000			564	-1.726
5 000	0.26	400 000			"	-2.015
2 000	0.46	700 000			"	-2.020
1 000	0.76				"	

TABLA A - 13 30% L₃P 21/IV/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	τ (Ohm ² cm ⁻¹)
10 000	0.098	64	1.6	4	88	-5.616
5 000	0.23	89	1.4	10	"	-5.620
2 000	0.40	150	1.2	12	"	-5.620
1 000	0.80	280	1.0	16	"	-5.658
500	0.90	350	1.11	19	"	-5.620
200	1.00	400	1.2	20	"	-5.603
10 000	0.10	200	50.0	200	151	-4.900
5 000	0.17	530	40.0	200	"	-4.708
2 000	0.50	1 400	39.0	200	"	-4.873
1 000	0.70	2 000	27.0	100	"	-4.747
500	0.90	3 000	22.0	700	"	-4.680
200		4 000	17.0	3 000	"	
10 000	0.10	3 000	111.0	50	212	-3.726
5 000	0.15	4 000	111.0	350	"	-3.775
2 000	0.30	7 000	111.0	2 000	"	-3.833
1 000	0.50	9 000	111.0	5 000	"	-3.947
500	0.900	20 000	94.0	10 000	"	-3.854
200		80 000	77.0	30 000	"	
10 000	0.12	14 000			270	-3.137
5 000	0.20	26 000			"	-3.187
2 000	0.35	40 000			"	-3.144
1 000	0.50	60 000			"	-3.123
500	0.70	70 000			"	-3.203
200	0.90	90 000			"	-3.203
10 000	0.10	41 000			332	-2.588
5 000	0.22	70 000			"	-2.700
2 000	0.60	160 000			"	-2.775
1 000	1.00	200 000			"	-2.900
500		250 000			"	
200		300 000			"	

CONTINUA TABLA A - 13

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Am ¹ cm ¹)
10 000	0.1	120 000			390	-2.123
5 000	0.22	230 000			"	-2.187
2 000	0.65	530 000			"	-2.291
1 000	0.75	600 000			"	-2.299
500	0.85	800 000			"	-2.229
200	0.95	850 000			"	-2.251

TABLA A - 14 90 % L₃P 20/IV/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (ohms ⁻¹ cm ⁻¹)
10 000	0.01	20	0.082	18	25	-5.051
5 000	0.02	18	0.072	20	"	-5.397
2 000	0.10	19	0.045	19	"	-6.070
1 000	0.32	20	0.039	20	"	-6.553
500	0.79	26	0.037	20	"	-6.830
200		30	0.037	21	"	
10 000	0.002	16.5	0.250	16.8	88	-4.438
5 000	0.008	17.0	0.200	17.0	"	-4.992
2 000	0.030	17.4	0.130	17.5	"	-5.586
1 000	0.070	18.1	0.093	17.9	"	-5.936
500	0.200	19.0	0.060	18.2	"	-6.371
200	0.830	20.0	0.040	19.4	"	-6.967
10 000	0.035	24.1	0.270	6.0	212	-5.511
5 000	0.122	30.1	0.230	7.0	"	-5.955
2 000	0.500	42.2	0.200	7.5	"	-6.423
1 000	0.890	62.2	0.210	7.6	"	-6.505
500	1.020	80.0	0.191	6.7	"	-6.455
200		100.0	0.196	6.1	"	
10 000	0.03	59.0	7.0	1.8	332	-5.056
5 000	0.02	109.0	6.0	3.8	"	-4.611
2 000	0.09	409.0	30.0	9.0	"	-4.691
1 000	0.29	1 209.0	26.0	40.0	"	-4.629
500	0.89	4 209.0	26.0	9.0	"	-4.674
200		7 209.0	26.0	9.0	"	
10 000	0.03	700.0		90.0	448	-3.979
5 000	0.05	1 000.0		90.0	"	-4.047
2 000	0.10	7 000.0		90.0	"	-3.504
1 000	0.31	10 000.0		90.0	"	-3.839
500	0.80	30 000.0		90.0	"	-3.775
200	0.90	100 000.0		90.0	"	-3.307

TABLA A - 15 90 % L3P 20/IV/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohms/cm ²)
10 000	0.02	20	0.62	17	88	-4.855
5 000	0.09	25	0.30	22	"	-5.411
2 000	0.27	30	0.17	24	"	-5.810
1 000	0.47	36	0.13	28	"	-5.971
500	0.77	40	0.11	32	"	-6.140
200	0.90	60	0.09	93	"	-6.031
10 000	0.05	20	5.0	20	151	-5.253
5 000	0.12	100	3.0	90	"	-4.934
2 000	0.20	200	1.9	60	"	-4.855
1 000	0.50	440	1.4	90	"	-4.811
500	1.00	640	1.2	130	"	-5.049
200		840	0.9	300	"	
10 000	0.10	130	40.0	30	212	-4.741
5 000	0.24	210	10.0	40	"	-4.913
2 000	0.34	410	7.0	70	"	-4.774
1 000	0.64	600	4.0	190	"	-4.884
500	0.84	800	3.0	400	"	-4.877
200	1.00	1 000	3.0	700	"	-4.855
10 000	0.1	600	27.0	50	270	-4.077
5 000	0.16	1 000	20.0	100	"	-4.060
2 000	0.20	2 000	16.0	400	"	-3.855
1 000	0.40	4 000	14.0	600	"	-3.855
500	0.90	7 000	12.0	1 300	"	-3.964
200	1.00	8 000	9.0	3 100	"	-3.952
10 000	0.10	1 500	104.0	200	332	-3.780
5 000	0.20	2 500	82.0	500	"	-3.758
2 000	0.50	4 500	66.0	1 200	"	-3.901
1 000	0.70	7 500	53.0	2 100	"	-3.825
500	0.90	8 500	50.0	4 100	"	-3.880
200	1.00	10 000	40.0	11 000	"	-3.855

CONTINUA TABLA A - 15

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	σ (Ohm's em)
10 000	0.10	3 000		300	390	-3.378
5 000	0.23	6 000		100	"	-3.439
2 000	0.40	8 000			"	-3.555
1 000	0.80	20 000			"	-3.457
500		30 000			"	
200		31 000			"	
10 000	0.10	10 000			448	-2.856
5 000	0.20	20 000			"	-2.856
2 000	0.30	30 000			"	-2.856
1 000	0.50	50 000			"	-2.856
500	0.70	70 000			"	-2.856
200	1.00	100 000			"	
10 000	0.10	14 000			506	-2.711
5 000	0.2	31 000			"	-2.666
2 000	0.4	63 000			"	-2.660
1 000	0.7	100 000			"	-2.702
500	0.8	140 000			"	-2.614
200	0.9	190 000			"	-2.631
10 000	0.10	26 000			564	-2.442
5 000	0.20	54 000			"	-2.425
2 000	0.50	130 000			"	-2.662
1 000	0.90	230 000			"	-2.449
500	1.00	350 000			"	-2.313
200		430 000			"	
10 000	0.10	50 000			622	-2.158
5 000	0.20	90 000			"	-2.204
2 000	0.60	200 000			"	-2.333
1 000	1.00	400 000			"	-2.255
500		500 000			"	

TABLA A - 16 90% L₃P 25/II/77

Frecuencia (Htz)	D	Cp (pF)	G (μS)	Cs (pF)	T (°C)	τ (Ohm'cm ⁻¹)
10 000	0.03	22	0.2	20	88	-4.990
5 000	0.05	24	0.13	21	"	-5.174
2 000	0.10	26	0.10	24	"	-5.441
1 000	0.20	30	0.05	27	"	-5.680
500	0.50	38	0.03	30	"	-5.974
200	0.60	40	0.02	40	"	-6.031
10 000	0.1	60	3.3	40	212	-5.077
5 000	0.2	80	2.6	53	"	-5.253
2 000	0.3	100	1.9	65	"	-5.333
1 000	0.4	120	1.6	89	"	-5.378
500	0.45	160	1.3	120	"	-5.305
200	0.50	200	0.8	170	"	-5.253
10 000	0.1	600	40.0	90	332	-4.007
5 000	0.3	1 000	37.0	150	"	-4.333
2 000	0.4	1 800	29.0	310	"	-4.202
1 000	0.7	2 500	23.0	600	"	-4.303
500	0.8	3 000	18.0	1 100	"	-4.281
200	1.0	4 500	18.0	3 300	"	-4.202
10 000	0.1	4 000			448	-3.253
5 000	0.2	6 700			"	-3.331
2 000	0.4	10 000			"	-3.453
1 000	0.6	18 000			"	-3.378
500	1.0	27 000			"	-3.424
200		34 000			"	
10 000	0.13	19 000			560	-2.601
5 000	0.31	40 000			"	-2.745
2 000	0.61	80 000			"	-2.737
1 000	0.81	100 000			"	-2.764
500	1.0	140 000			"	-2.719
200	1.0	160 000			"	-2.651