

0549

DESARROLLO
U. N. A. M.

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIAR LA APLICACION DE UN METODO ELECTRONICO
PARA LOCALIZAR FALLAS EN LINEAS DE TRANSMISION
DE ALTA TENSION.

T E S I S

que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a

DANIEL BARRIOS MORALES FRIAS

México, D. F.

1963



U. N. A. M.



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.

À la mémoire de mi padre

*Com profunda caritat para mi adorada
madre.*

Con mi gratitud

Para el Sr. Jng. Salvador Cisneros
Olániz, mercedísimo Maestro, que me
ha distinguido con una diáfana amistad,
y a quien debo muchas y valiosas comen-
taciones y atenciones inapreciables

Con mi agradecimiento
Para el Sr. Ing. Juan Carlos Seeliger
E., finísimo amigo, por todas las faci-
lidades que me brindó para llevar a cabo
el presente trabajo.

Atti:

Para ti con inmensa cariño y como reconocimiento por tu inestimable estímulo, sin el cual hubiera sido imposible la realización de este trabajo.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
Dirección
Núm. 73-
Exp. Núm. 73/214.2/1.-

Al Pasante señor Daniel BARRIOS MORALES FRIAS
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el señor profesor Ingeniero Salvador Cisneros Ch., para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero MECANICO ELECTRICISTA.

ESTUDIAR LA APLICACION DE UN METODO ELECTRONICO PARA LOCALIZAR FALLAS EN LINEAS DE TRANSMISION DE ALTA TENSION

- 1.- Comportamiento general de líneas de transmisión largas.
- 2.- Características estructurales de dichas líneas.
- 3.- Naturaleza de las fallas que frecuentemente se presentan.
- 4.- Formas comunes de detectar tales fallas.
- 5.- Estudio de un circuito electrónico apropiado que permita la detección de fallas en líneas y su aplicación en sistemas de transmisión."

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar examen profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D. F. 5 de Enero de 1962.
EL DIRECTOR

Antonio Dávalos Jaime
Ing. Antonio Dávalos Jaime

ADJUNTO a.s.g.

I N D I C E .

INTRODUCCION	1
CAPITULO I.	
COMPORTAMIENTO GENERAL DE LAS LINEAS DE TRANSMISION LARGAS.	6
I.- Presencia de una corriente con la línea en vacío y cambios muy notables en la corriente y voltaje de la línea.	7
Compensación en líneas.	10
II.- Efecto Ferranti.	14
III.- Efecto Corona y Radio Interferencia.	24
CAPITULO II.	
CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DE LAS LINEAS LARGAS.	34
Circuito equivalente "π"	34
Circuito equivalente "T"	36
Potencias para líneas de transmisión.	37
Potencia natural de una línea.	39
CAPITULO III.	
NATURALEZA DE LAS FALLAS QUE FRECUENTEMENTE SE PRESENTAN EN LAS LINEAS.	41
1.- Corto circuito trifásico.	41
2.- Corto circuito entre fases.	42
3.- Corto circuito entre dos fases y tierra.	43
4.- Corto circuito una fase y tierra.	44
CAPITULO IV.	
FORMAS COMUNES DE DETECTAR LAS FALLAS QUE FRECUENTEMENTE SE PRESENTAN EN LAS LINEAS DE TRANSMISION LARGAS.	48
1.- Relevador de distancia.	49
a).- Relevador de impedancia.	49
b).- Relevador de impedancia modificada.	53
c).- Relevador tipo de reactancia.	56
d).- Relevador tipo Mho	58
2.- Relevador de protección piloto.	59

3.- Relevador de Protección por Onda Portadora	61
a).- Relevadores de comparación direccional.	63
b).- Relevadores de comparación de fase.	64
CAPITULO V.	
ESTUDIO DE UN CIRCUITO ELECTRONICO QUE PERMITA LA DETECCION DE FALLAS EN LINEAS Y SU APLICACION EN SISTEMAS DE TRANSMISION.	
a).- Parte física	68
b).- Objeto.	70
c).- Conexión del instrumento y forma de efectuar la medición.	70
d).- Circuito electrónico.	73
d1.- Fuente de poder de baja tensión.	73
d2.- Fuente de poder de alta tensión.	73
d3.- Circuito del tubo de rayos catódicos	73
d4.- Circuito disparador (o Trigger).	74
d5.- Circuito generador de la señal marca dora.	74
d6.- Circuito generador de pulsos.	75
d7.- Circuito de entrada de barrido.	76
d8.- Circuito generador de barrido de diente de sierra.	77
d9.- Dispositivo para cortar el barrido.	78
Aplicación del detector de fallas.	82
APENDICE I	92
APENDICE II	94
BIBLIOGRAFIA.	98

ABREVIATURAS USADAS.

- a = Constante de atenuación ($= \alpha$).
- a = Operador.
- a, b, c, d = Angulos correspondientes y correlativos de las constantes generalizadas.
- A, B, C, D = Constantes generalizadas.
- b = Constante de fase ($= \beta$).
- b = Constante de longitud de onda.
- b = Susceptancia en mhos/unidad de longitud.
- C = Capacitancia.
- C_G = Capacitancia en derivación o shunt.
- e = Voltaje instantaneo.
- E_G = Vector de voltaje eficaz al neutro en el extremo generador de la línea.
- E_R = Vector de voltaje eficaz al neutro en el extremo receptor de la línea.
- E₁ = Voltaje de secuencia positiva.
- E₂ = Voltaje de secuencia negativa.
- E₀ = Voltaje de secuencia cero.
- f = Frecuencia en Hertz (Hz.) o ciclos por segundo (c.p.s.).
- g = Conductancia en mhos/unidad de longitud.
- G = Conductancia total en mhos/unidad de longitud.
- i = Corriente instantanea.
- I_G = Vector de corriente eficaz en el extremo generador de la línea.
- I_R = Vector de corriente eficaz en el extremo receptor de la línea.
- I_G' = Corriente en derivación en el extremo generador.
- I_R' = Corriente en derivación en el extremo receptor.
- I = Corriente en un punto intermedio de la línea.
- I₁ = Corriente de secuencia positiva.
- I₂ = Corriente de secuencia negativa.
- I₀ = Corriente de secuencia cero.
- l = Longitud de la línea.
- L = Inductancia.
- L_S = Inductancia en serie.

P_G	= Potencia activa trifásica en el extremo generador.
P_n	= Potencia natural de la línea.
P_R	= Potencia activa trifásica en el extremo receptor.
Q_G	= Potencia reactiva trifásica en el extremo generador.
Q_R	= Potencia reactiva trifásica en el extremo receptor.
r	= Reactancia unitaria.
r	= Resistencia efectiva en ohms/unidad de longitud.
R	= Resistencia efectiva total en ohms.
S_G	= Potencia total trifásica en el extremo generador.
S_R	= Potencia total trifásica en el extremo receptor.
v	= Velocidad de propagación.
x	= Reactancia inductiva unitaria.
x'	= Reactancia capacitiva unitaria.
Y	= Admitancia total en derivación, de la línea, de fase a neutro = $G + jB$.
Z	= Impedancia total en serie de la línea, por fase = $R + jX$.
Z_G	= Impedancia equivalente en serie, del lado generador.
Z_R	= Impedancia equivalente en serie, del lado receptor.
Z_G'	= Impedancia equivalente en derivación del lado generador.
Z_R'	= Impedancia equivalente en derivación del lado receptor.
Z_1	= Impedancia de secuencia positiva.
Z_2	= Impedancia de secuencia negativa.
Z_0	= Impedancia de secuencia cero.
Z_0	= Impedancia característica.
Z_n	= Impedancia en el neutro.
θ	= Constante de propagación de la línea. = \sqrt{ZY}
λ	= Longitud de onda.

INTRODUCCION.

El único medio conocido hasta ahora para la transmisión de energía eléctrica desde el lugar de su producción hasta el lugar de consumo es la LINEA DE TRANSMISION.

La línea de transmisión forma parte integrante de las plantas o centrales hidroeléctricas, pues la energía que se genera en ellas es llevada a través de la línea de transmisión a los lugares adonde ha de aprovecharse.

El crecimiento incontenible de las poblaciones demanda, cada día con mayor exigencia, la producción de capacidades superiores de energía eléctrica, energía que hay que llevar a centros de consumo de nuevo establecimiento, lo que implica la multiplicación de líneas de transmisión de longitudes cada vez mayores. La línea de transmisión es, pues, el medio de transporte de energía a cientos y cientos de kilómetros.

Algunas líneas de transmisión, durante la primera etapa de su instalación, operaron aisladamente; posteriormente se

fueron interconectando a otras formando un sistema eléctrico. Al aumentar la capacidad de las líneas de transmisión, se han ido interconectando los diversos sistemas, y seguramente en el futuro se formará una vasta red que permitirá distribuir al máximo toda la energía eléctrica, obteniendo su completo aprovechamiento.

La producción de muy grandes capacidades, hasta el presente, solo es factible por medio de centrales hidroeléctricas, aunque no dudo que, debido a los adelantos de la ciencia en materia de centrales termoeléctricas, en poco tiempo estas podrán proporcionar capacidades equiparables a las de las centrales hidroeléctricas.

Ahora bien, desde el punto de vista de las líneas de transmisión, la situación geográfica natural de las centrales hidroeléctricas, enclavadas en las cuencas de las montañas y alejadas de los centros de consumo, hace que dichas líneas, que son parte del conjunto eléctrico de una planta, requieran longitudes de cientos de kilómetros para transportar la energía generada. En cambio, las centrales termoeléctricas, que por lo general se localizan obedeciendo a estudios económicos y demográficos de nuevas regiones que demandan energía eléctrica, pueden o no incorporar, como componentes de su conjunto, a una o varias líneas de transmisión. De estas últimas centrales parten líneas de transmisión que podríamos clasificar como de interconexión con otras plantas o sistemas, o bien líneas cortas que abastecen centros de carga cercanos a la planta termoeléctrica. Esto no impide, desde luego, que de una central termoeléctrica partan una o varias líneas de transmisión de gran longitud, si el estudio realizado para su establecimiento, o causas de orden político u otras de fuerza mayor así lo exigen.

Las altas capacidades de las plantas y el consiguiente aumento en la longitud de las líneas de transmisión plantearon, para su realización, problemas económicos a los que tuvo que buscarse una solución, que culminó con el aumento de voltajes nominales de transmisión a valores insospechados veinte años atrás.

Los investigadores de los grandes laboratorios del mundo científico se enfrentaron a un nuevo problema: la obtención y transmisión a valores de voltaje, primero a 220 KV; después a 380 KV; más tarde a 450, 500 y 650 KV, y actualmente a 750 KV.

Ardua y tenaz labor se ha requerido para obtener nuevos materiales aislantes que soporten tensiones tan elevadas como las indicadas; diseños especialísimos de equipos tales como transformadores, interruptores, apartarrayos, estructuras, herrajes y conductores. Todos los estudios y experimentos realizados han originado como consecuencia la creación de nuevas especificaciones y normas de diseño y prueba de tales equipos, que vienen a enriquecer la ya existentes en el campo eléctrico, mecánico, químico y físico.

Para fortuna del mundo científico, todos estos problemas se han resuelto satisfactoriamente, y se prevé éxito igual en la resolución de nuevos problemas que vayan surgiendo en la evolución de la generación y transmisión de energía eléctrica a voltajes cada vez mayores.

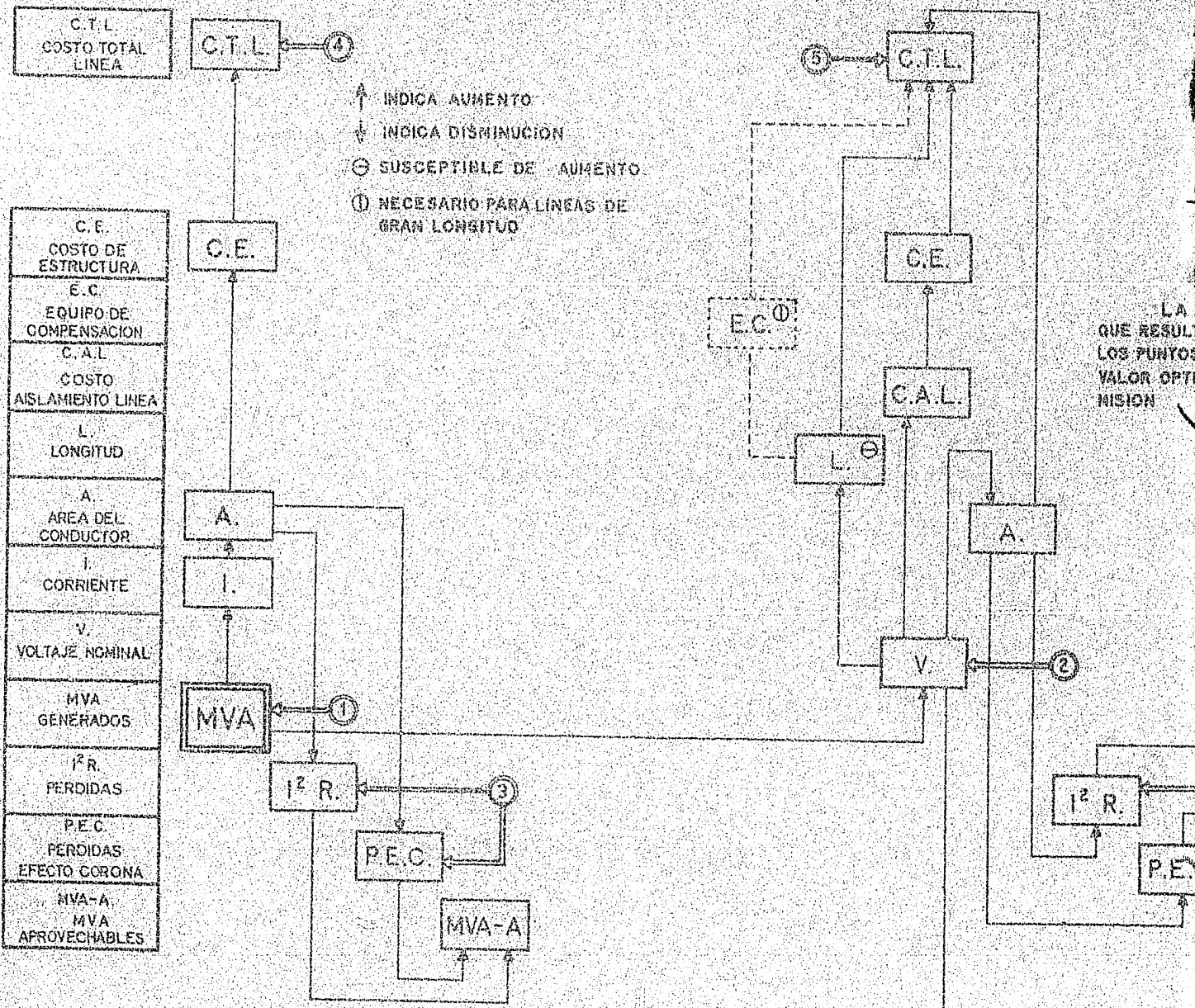
El valor del voltaje de transmisión es función creciente de la longitud; pero ese valor debe ser tal, que permita reducir al mínimo las pérdidas inevitables de energía en la transmisión, para que se obtenga la máxima economía posible.

Para lograr esta finalidad deberá realizarse un elaborado estudio, pues la transmisión de una mayor capacidad de MVA, origina un aumento en la corriente; el aumento en la corriente requiere un aumento en la sección del conductor, lo que aumenta asintóticamente el costo del mismo y consecuentemente el de la línea. Para reducir la sección del conductor y por tanto su costo, con la misma capacidad por transmitir, habrá que considerar un voltaje de valor superior. Esto, a su vez, trae consigo un aumento en el costo del aislamiento de la línea, un aumento en el costo de las estructuras y un aumento considerable en el costo de las subestaciones conectadas a la propia línea.

La complejidad del citado estudio, que combina multitud de variables que entran en juego, puede visualizarse, aunque no cuantitativamente, en el cuadro que se muestra en la siguiente página:

I- EL AUMENTO DE CAPACIDAD GENERADA Y POR TRANSMITIR, TRAE COMO CONSECUENCIA,

II- PARA OBTENER TRANSMISION ECONOMICA AL AUMENTAR LA EL VOLTAJE QUE TRAE COMO CONSECUENCIA.



OR TRANSMITIR TRAE

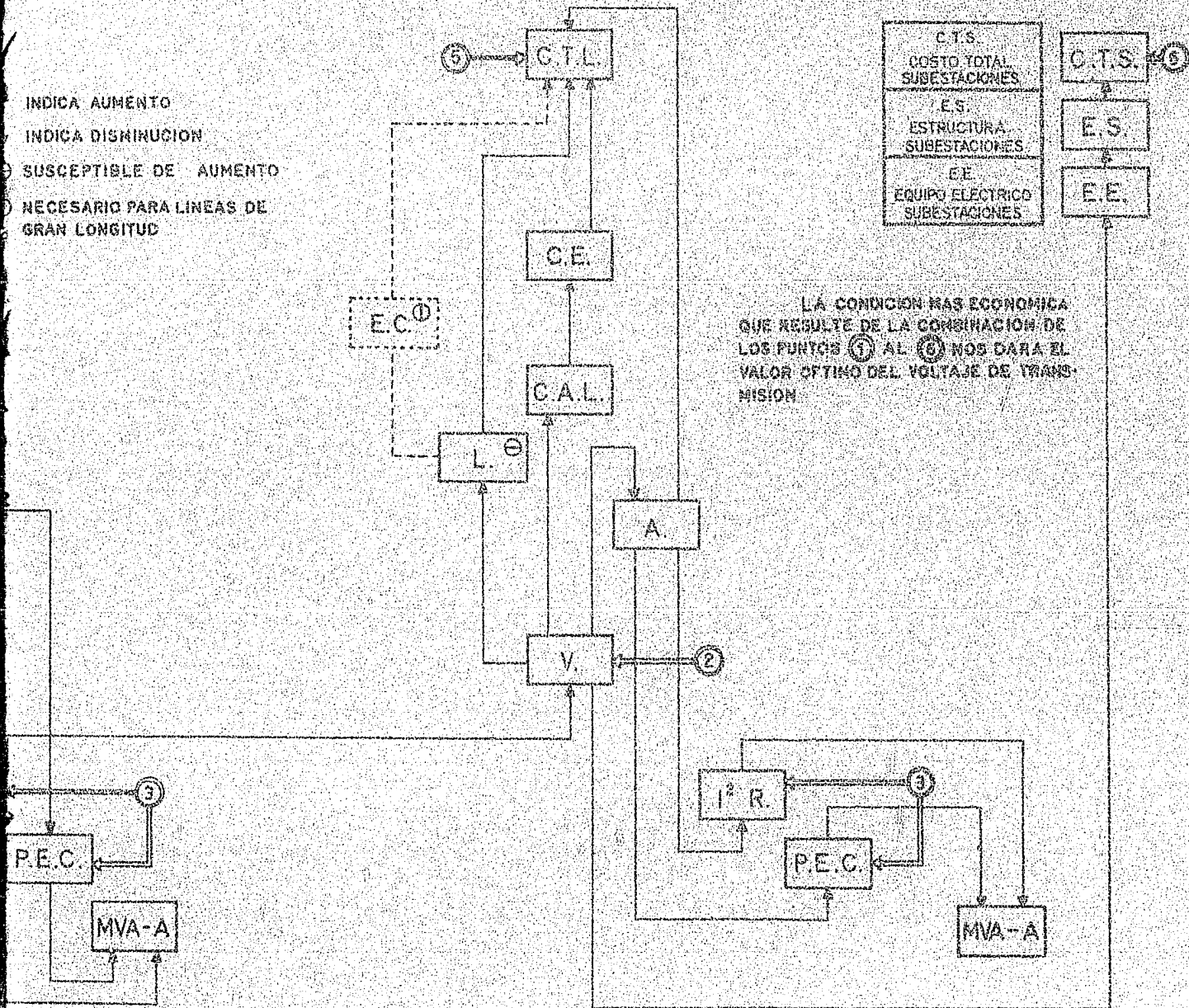
II- PARA OBTENER TRANSMISION ECONOMICA AL AUMENTAR LA CAPACIDAD GENERADA SE REQUIERE ELEVAREL VOLTAJE QUE TRAE COMO CONSECUENCIA:

INDICA AUMENTO

INDICA DISMINUCION

⊕ SUSCEPTIBLE DE AUMENTO

⊖ NECESARIO PARA LINEAS DE GRAN LONGITUD



El propósito de este trabajo no es ahondar en el estudio de los altos valores de voltaje que implican mayores longitudes en las líneas de transmisión y sus alternativas para obtener una economía máxima logrando el mínimo de pérdidas inevitables de energía en la transmisión, sino que, partiendo de la relación de altos voltajes con mayor longitud en las líneas de transmisión, trataré de hacer un breve estudio en cuanto a los fenómenos que en ellas se presentan y los efectos y fallas que dichos fenómenos producen, exponiendo una solución para detectar las fallas.

Al efecto, trataré los siguientes puntos:

- I.- Comportamiento general de líneas de transmisión largas.
- II.- Características estructurales de dichas líneas.
- III.- Naturaleza de las fallas que frecuentemente se presentan.
- IV.- Formas comunes de detectar tales fallas.
- V.- Estudio de un circuito electrónico apropiado que permita la detección de fallas en líneas y su aplicación en sistemas de transmisión.

C A P I T U L O I .

COMPORTAMIENTO GENERAL DE
LAS LINEAS DE TRANSMISION
LARGAS.

En cualquiera linea de transmision se presentan fenomenos tales como caida de voltaje, perdida por efecto Joule, perdida de energia por escape a traves del aislamiento, efecto Corona; pero en las lineas de transmision llamadas largas existen ademas otros fenomenos que las hacen distinguirse de las demas, porque solo en ellas se presentan marcadamente; asi, hallamos en dichas lineas la presencia de una corriente con la linea en vacio, es decir, sin carga, ademas de cambios muy notables en la corriente y voltaje de la linea, tanto en modulo como en argumento; la elevacion del potencial en el extremo receptor a valores superiores al del extremo generador, tanto mayores cuanto menor o nula es la carga, fenomeno conocido como efecto Ferranti; la ionizacion intensa del aire, o efecto Corona, que da origen a la generacion de ondas amortiguadas de alta frecuencia, o Radio Interferencia; fenomenos todos ellos, repito, que han servido para distinguirlos como

líneas largas.

Nos vamos a referir a cada uno de los fenómenos enunciados que se presentan en las líneas largas:

I.- PRESENCIA DE UNA CORRIENTE CON LA LINEA EN VACIO Y CAMBIOS MUY NOTABLES EN LA CORRIENTE Y VOLTAJE DE LA LINEA.-

Los parámetros en serie y en derivación de una línea de transmisión pueden ser representados por grupos concentrados de diferenciales de líneas en número tan grande como se quiera, tendiendo al infinito. (la representación gráfica se muestra en la fig. 1.1, página 9).

En la línea se aprecian dos corrientes:

a).- La motivada por la carga que debe compensar tanto la caída de tensión a lo largo de la línea, proporcional a la resistencia r y la cual está en fase con la corriente, como la caída de tensión proporcional a la reactancia x , caída que está en cuadratura con la misma corriente.

b).- El hecho de que toda línea larga presenta las características y se comporta como un gran condensador en el cual cada conductor representa una placa del mismo y la tierra otra placa y cuyo dieléctrico es el aire, da origen a una corriente que circula transversalmente entre los conductores y tierra, corriente que tiene dos componentes: una llamada de DISPERSION, proporcional a la conductancia g y en fase con el voltaje en el punto considerado y otra CAPACITIVA, proporcional a la susceptancia b , en cuadratura adelantada respecto a la misma tensión. Las dos componentes de la corriente en derivación dan como resultado dos caídas de voltaje, una óhmica y la otra reactiva, las cuales es necesario compensar.

La presencia de las corrientes de dispersión y capacitiva en la línea larga produce cambios notables tanto en la corriente total como en el voltaje. Estos cambios dan valores de corriente y voltaje dife

rentes en cada punto de la línea, dependiendo del valor de la carga en el extremo receptor.

Podemos considerar básicamente dos condiciones en la línea: con carga y en vacío. En la primera condición, es decir, con carga, la corriente en el extremo receptor es la misma que circula por la carga. Al considerar puntos de la línea que se van alejando del extremo receptor y acercándose al extremo generador, nos encontramos con la presencia, cada vez mayor, de la corriente capacitiva. La resultante de las dos corrientes dará por resultado una corriente cuyo valor absoluto será menor que la corriente receptora. Al llegar a un punto intermedio de la línea, el valor de la resultante de corriente llegará a un mínimo donde la corriente de la carga que es inductiva y por lo tanto atrasada y la corriente adelantada que es capacitiva se compensan, dando en ese punto para el factor de potencia el valor de uno ($\cos \varphi = 1$). Al seguir a lo largo de la línea hacia el extremo generador, la corriente adelantada sigue creciendo y el desfaseamiento cambia de signo quedando ahora la resultante de la corriente adelantada.

En forma gráfica pueden verse representadas en la fig. 1.2, (pág. 9), las variaciones de corriente y voltaje de una línea teórica de 1200 Km. y 750 Kv.

Podemos apuntar las siguientes características interesantes en líneas largas que teóricamente podemos considerar sin resistencia:

- a).- Con la línea en vacío, energizada al voltaje nominal de transmisión desde el extremo generador, el voltaje receptor tiende al infinito a medida que su longitud se acerca a un cuarto de longitud de onda.
- b).- La corriente capacitiva produce una carga reactiva en el extremo generador que tiende al infinito a medida que la longitud de la línea se acerca a un cuarto de longitud de onda.

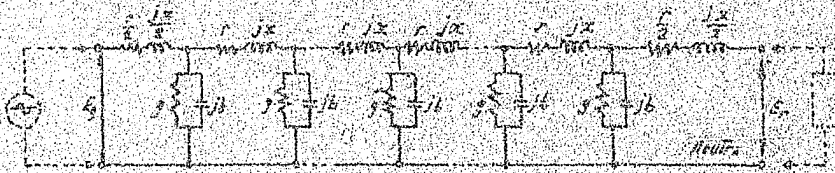
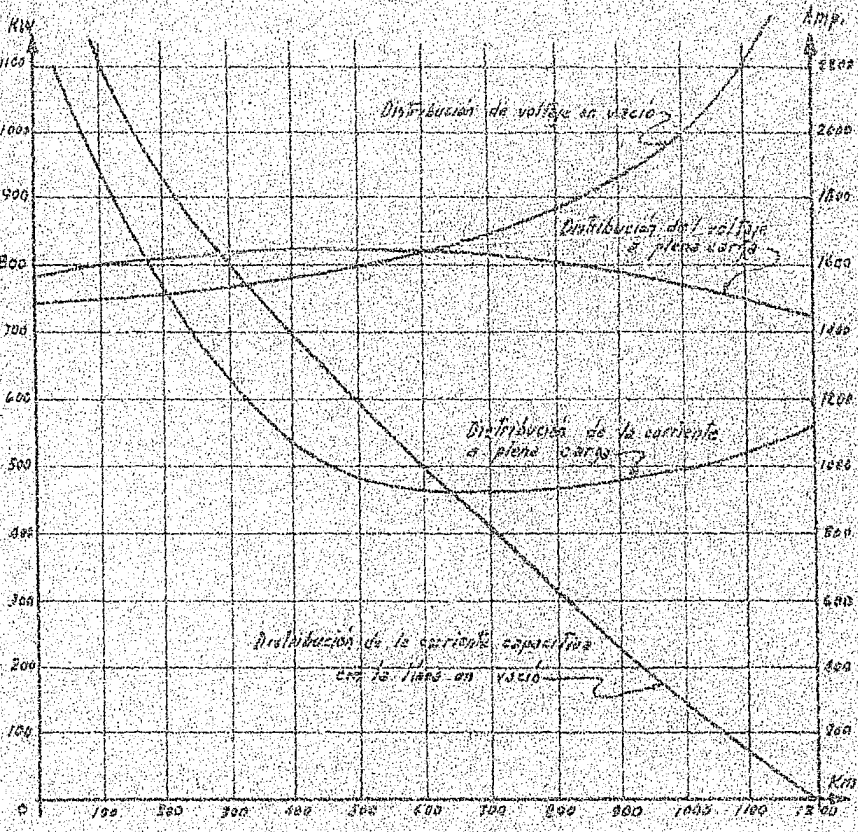


FIG. 1.1



DISTRIBUCION DE VOLTAJE Y CORRIENTE EN UNA LINEA LARGA A PLENA CARGA Y EN VACIO.

FIG. 1.2

c).- Bajo condiciones de plena carga, cuando los extremos generador y receptor están energizados al voltaje nominal, el voltaje máximo ocurre en el centro de la línea. La magnitud de este voltaje aumenta con la longitud de la línea y tiende al infinito cuando la longitud de la línea se acerca a media longitud de onda y decrece a medida que aumenta el ángulo entre los voltajes generador y receptor.

Las características a), b) y c), se presentan si la línea no tiene compensación.

Los problemas que entrañan los valores tan elevados de voltaje que pueden presentarse, son susceptibles de ser controlados mediante un sistema de COMPENSACION, según se detalla en seguida:

Compensación en líneas.-

El aumento de voltajes de transmisión viene acompañado por considerables dificultades, por lo que hay necesidad de investigar, entre otros puntos, la posible reducción de la Impedancia Característica Z_0 , ya que este valor es uno de los cuales depende el poder elevar el voltaje con menores dificultades.

Esta impedancia deriva de las constantes de la línea y consecuentemente éstas, a su vez, de las dimensiones de la línea en cuestión. Sin embargo, las dimensiones no son siempre susceptibles de modificarse o cambiarse, pues están supe-
ditadas a las condiciones que el aislamiento y el efecto corona les fijan.

Sabemos que las constantes de la línea son proporcionales al logaritmo de las dimensiones de la línea y, consecuentemente, cualquier cambio en las dimensiones se reflejará en forma mínima en el valor de las constantes.

Dada la limitación que el valor de las constantes tiene para variar, se hace necesario, para modificarlo apreciablemente, introducir inductancias y capacitancias adicionales que permitan lograr tal objeto.

La forma práctica de ello sería conectar grupos inductivos, capacitivos, o ambos, en forma de elementos eléctricos concentrados de manera de lograr un modo de variar las constantes distribuidas en la línea.

La impedancia característica vale:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.1)$$

y la constante de propagación será:

$$p = j\sqrt{LC} = j\alpha \quad (1.2)$$

Según se cambia la capacitancia o inductancia de la línea, así cambiará Z_0 , α , o ambas.

Brevemente consideraremos las diversas formas para efectuar L y C, según se ve en las figuras 1.3 a 1.6, pág. 13.

La figura 1.3 representa grupos de inductancias en serie (L_s), lo que produce que:

- a).- Z_0 decrezca, y consecuentemente α decrezca.
- b).- α decrezca.

Conclusión: El efecto es indeseable.

La figura 1.4 representa grupos de inductancias en derivación (L_d), lo que produce que:

- a).- C decrezca, y consecuentemente α decrezca.
- b).- Z_0 aumente, y consecuentemente α aumentará.

Conclusión: No es una solución satisfactoria.

La figura 1.5 representa grupos de capacitancias en derivación (C_d), lo que produce que:

- a).- C aumente, y consecuentemente Z_0 decrezca.
- b).- α aumente.

Conclusión: Aumentará la potencia natural de la línea (P_n), pero puede poner en peligro la estabilidad de la línea, por lo que no es aconsejable en líneas muy largas.

La figura 1.6 representa grupos de capacitancias en serie (C_s), lo que produce que:

- a).- L se reduzca, y consecuentemente Z_0 decrezca.
- b).- α decrezca.

Conclusión: Esta conexión es deseable, pero presenta dificultades prácticas, ya que la

corriente de la carga deberá pasar a través de ellos. En el caso de un corto circuito en la línea, aparecerán sobre voltajes a través de los condensadores, lo que exige equipo de protección adecuado que aun no ha sido posible obtener a satisfacción.

Quedará, por tanto, formar combinaciones de inductancias y capacitancias logrando circuitos PI, T o LC, según se demuestra en las figuras de la 1.7 a la 1.10 inclusive, y hacer un cuidadoso estudio desde el punto de vista eléctrico y económico.



Fig. 1.3



Fig. 1.4



Fig. 1.5



Fig. 1.6



Fig. 1.7 - Sección II

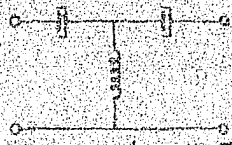


Fig. 1.8 - Sección I

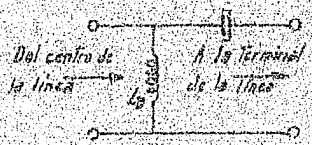


Fig. 1.9 - Sección LA

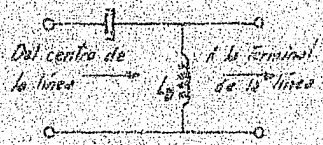


Fig. 1.10 - Sección LB

II.- EFECTO FERRANTI.

Este es el resultado de una neutralización parcial o total de la reactancia inductiva de la línea por la reactancia capacitiva entre fases y con respecto a tierra de la misma, lo que da como resultado una marcada tendencia a incrementar el valor del voltaje en el extremo receptor (E_r) respecto del valor del voltaje en el extremo generador (E_g). Este efecto existe, cualquiera que sea la carga del sistema, pero se manifiesta con mayor intensidad a medida que la carga disminuye o se anula.

Partimos de la ecuación fundamental que relaciona los voltajes generador y receptor (Apéndice I, pág. 92) y la impedancia (z) y admitancia (y) de la línea, la constante de propagación θ , así como las funciones hiperbólicas $\cos h\theta$ y

$$E_g = E_r \cos h\theta + IrZ \frac{\sin h\theta}{g} \text{ volts.} \quad (1.3)$$

Con la línea sin carga, o sea en vacío, la corriente receptora es nula, o sea $Ir=0$, luego la expresión (1.3) queda:

$$E_g = E_r \cosh\theta \quad (1.4)$$

o bien:

$$E_r = \frac{E_s}{\cos h\theta} \quad (1.5)$$

o tambien:

$$\frac{E_r}{E_g} = \frac{1}{\cos h\theta} \quad (1.6)$$

que nos hace ver que el Efecto Ferrauti tiene un valor igual al reciproco de $\cos h\theta$.

Dependiendo de la longitud de la linea y del valor de la carga, como queda dicho, el voltaje receptor puede entonces adquirir valores tales como $E_r < E_g$, pasando por valores que lleguen a dar $E_r = E_g$, y presentarse el caso en que $E_r > E_g$ o bien $E_r \gg E_g$; aun mas, puede llegar el caso en que E_r tienda al infinito. Lo anterior se deduce de las ecuaciones (1.5) y (1.6), en las que se ve claramente que los voltajes son funciones del $\cos h\theta$, por lo que conviene analizar este ultimo valor.

$\cos h\theta$ tiene una estructura compleja que puede escribirse como:

$$\cos h\theta = \cos h A \cos B + j \operatorname{sen} h A \operatorname{sen} B \quad (1.7)$$

o sea, formado a su vez por valores hiperbolicos y tambien circulares.

Si la expresion (1.7) la relacionamos con la longitud de la linea, para la frecuencia comercial resulta que A y B son funciones lineales de dicha longitud y la (1.7) puede escribirse como:

$$\cos h \theta = \cos h (A l) \cos (B l) + j \operatorname{sen} h (A l) \operatorname{sen} (B l) \quad (1.8)$$

Como puede verse en la fig. 1.11 (pag. 20) los factores hiperbolicos crecen indefinidamente: a partir de cero el $\operatorname{sen} h \theta$, y a partir de uno el $\cos h \theta$. Estos valores estan afectados por la longitud (l) como se ve en la ecuacion (1.8).

Por otra parte, los factores trigonometricos cuya representacion grafica se muestra en la fig. 1.12 (pag. 20), pueden adquirir valores positivos, negativos o nulos. El resultado sera que el modulo del factor $\cos h \theta$ esta sujeto a una variacion ciclica siempre creciente y como consecuencia E_r puede llegar a adquirir valores inapreciables, muchas veces ma-

tores que el de E_g , y sólo dependientes, tales valores, de la longitud de la línea para la frecuencia comercial y consecuentemente de la constante de propagación θ que es función a su vez de la raíz cuadrada del producto ZY , o sea:

$$\theta = \sqrt{ZY} \quad (1.9)$$

El límite del Efecto Ferranti depende también del valor de los elementos absorbentes de carga de la línea, o sea la resistencia (R) y la conductancia (G), que son las partes reales respectivamente de la impedancia (Z) y de la admitancia (Y). Mientras mayores sean R y G menor será el efecto y vice versa. Un caso concreto tratado más adelante muestra este efecto.

El concepto geométrico de longitud de onda (λ), (que se relaciona con la longitud de la línea) basado en velocidades y tiempos, a la frecuencia de trabajo (50 o 60 Hz) y cuyo valor es el espacio recorrido por los impulsos electromagnéticos durante el tiempo de un ciclo de variación del voltaje, representa la relación del ángulo de fase entre E_g y E_r y el cual puede variar desde 0° hasta 360° . Cuando dicho ángulo adquiere los valores de 90° , 180° e 270° se debe a que se trata de una longitud de línea cada vez mayor, y se dice entonces que la línea tiene respectivamente 1/4, 1/2 y 3/4 de longitud de onda, o bien su longitud de onda completa si el ángulo de fase valiera 360° .

La relación matemática que liga la longitud de onda y la frecuencia para encontrar el concepto de Velocidad de propagación de la onda es:

$$v = \lambda f \quad (1.10)$$

Si no existieran las pérdidas naturales en una línea y capacidad concentrada en los aisladores de la misma, la velocidad de propagación de la onda tendría como valor, que denominaremos teórico, el de 300 000 Km/seg., pero debido a las pérdidas naturales en la línea, se reduce tal velocidad a un valor real en un 2.2% aproximadamente, o sea un valor igual a 293 500 Km/seg. Esto, consecuentemente, reduce la longitud de la línea en la misma proporción, o sea:

Frecuencia de trabajo	Longitud teórica en Km.	Longitud real en Km.
50 Hz.	6 000	5 858
60 Hz.	5 000	4 890

y la representación gráfica de lo anterior puede verse en la fig. 1.14 (pág. 20).

Siendo una línea de transmisión de gran longitud un circuito oscilante en resonancia, pues contiene inductancia y capacitancia en consideración, puede establecerse una relación entre la frecuencia de trabajo y la frecuencia natural de la línea con un periodo especial propio, cuyo valor recíproco representa la frecuencia natural. Cuando en un sistema eléctrico, los estímulos externos al circuito son amplificados al máximo, se dice que dicho sistema entra en resonancia. En el caso de una línea de transmisión larga, el efecto Ferranti alcanza su más alto valor cuando dicha línea está en resonancia. Esto sucede cuando la línea tiene $1/4$ de longitud de la onda.

Existe una íntima relación entre la constante de propagación Θ y la longitud de la onda. Veamos cómo se relacionan: la constante de propagación $\Theta = \sqrt{ZY}$ es una expresión compleja de la forma

$$\Theta = \alpha + j\beta \quad (1.11)$$

(Por facilidad tipográfica, en lo subsiguiente haremos $\alpha = a$, que es la Constante de Ateruación, y $\beta = b$, que es la Constante de Fase).

Introduciremos los valores de la Impedancia Característica:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \text{ ohms.} \quad (1.12)$$

y de las funciones hiperbólicas en su forma exponencial:

$$\text{Sen } h \Theta = \frac{e^{h\Theta} - e^{-h\Theta}}{2} \quad (1.13)$$

$$\text{y } \text{Cos } h \Theta = \frac{e^{h\Theta} + e^{-h\Theta}}{2} \quad (1.14)$$

Partiendo de la ecuación fundamental para el voltaje generador en su solución exacta (Apéndice II, ecuación II.20

Pág. 94)

$$E_g = \left(\frac{E_r + I_r \sqrt{Z/Y}}{2} \right) e^{\sqrt{ZY} l} + \left(\frac{E_r - I_r \sqrt{Z/Y}}{2} \right) e^{-\sqrt{ZY} l} \text{ volts.} \quad (1.15)$$

o bien:

$$E_g = \left(\frac{E_r + I_r Z_0}{2} \right) e^{(a+jb)l} + \left(\frac{E_r - I_r Z_0}{2} \right) e^{-(a+jb)l} \text{ volts.} \quad (1.16)$$

Recordando que:

$e^{(a+jb)l} = e^{al} \cdot e^{jbl}$ y que $e^{-(a+jb)l} = e^{-al} \cdot e^{-jbl}$
 la ecuación (1.13) puede ser escrita como:

$$E_g = \left(\frac{E_r + I_r Z_0}{2} \right) e^{al} \cdot e^{jbl} + \left(\frac{E_r - I_r Z_0}{2} \right) e^{-al} \cdot e^{-jbl} \text{ volts.} \quad (1.17)$$

La constante de propagación $\theta = a + jb$, determina la forma en que se propaga la onda de voltaje a lo largo de la línea, con relación al cambio en magnitud y ángulo de fase.

La ecuación (1.16) consta de dos partes: el primer término del segundo miembro contiene una cantidad que es función decreciente a medida que el punto de línea considerado se aleja del extremo generador (el término e^{al} disminuye), o bien, es una función creciente si se va del extremo receptor al extremo generador (el término e^{al} aumenta). Dicho primer término no representa una onda de voltaje decreciente que se desplaza desde el extremo generador hasta el extremo receptor. El segundo término contiene un término decreciente a medida que aumenta la longitud de la línea a partir del extremo receptor, ya que e^{-al} decrece. El segundo término representa una onda de voltaje decreciente que se desplaza desde el extremo receptor hasta el extremo generador. La onda de voltaje representada por el primer término recibe el nombre de Onda Directa, y la representada por el segundo término se llama Onda Reflejada.

Otra manera de decir lo anterior sería que una onda de voltaje que llamamos Onda Directa, de determinada magnitud, se propaga en forma decreciente del extremo generador hacia el extremo receptor. Al llegar a este extremo la onda de voltaje se refleja hacia el extremo generador por lo que se le llama Onda Reflejada, y su propagación hacia el extremo generador también es decreciente.

De lo anterior puede verse que α , que es el término real de la constante de propagación, determina la magnitud de la onda en forma creciente o decreciente, por lo que recibe el nombre de Constante de Atenuación como ya se dijo antes.

Por lo que respecta a los términos $e^{j\beta l}$ y $e^{-j\beta l}$ son operadores que producen al voltaje receptor un movimiento rotatorio opuesto el uno al otro. Si representáramos gráficamente el lugar geométrico de la variación que sufren las ondas directa y reflejada para n valores consecutivos y crecientes con la longitud l , dicha variación quedará como se muestra en la fig. 1.13 (pág. 20).

El primer operador, o sea $e^{j\beta l}$, gira en sentido contrario a las manecillas del reloj, es decir, con rotación en adelanto, mientras que el segundo, o sea $e^{-j\beta l}$, gira con rotación en atraso. Puede verse también que β determina el cambio de fase para una distancia determinada l , a lo largo de la línea. Se la llama a β constante de fase, aunque también se le llama constante de longitud de onda, porque define la distancia de línea a lo largo de la cual una onda completa queda subtendida, como se ve en la figura No. 1.14 (pág. 20).

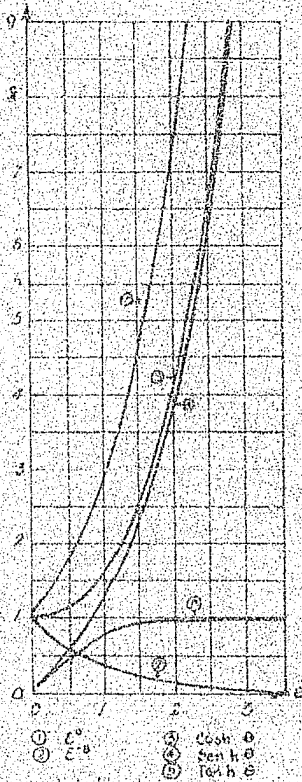
Volviendo a la figura No. 1.13, podremos observar que para cada longitud de línea habrá dos vectores de voltaje, el de la onda directa od y el de la onda reflejada or , cuya suma nos dará el voltaje of .

Cuando la Constante de Fase afectada de la longitud, o sea βl valga 90° , ambos voltajes, el directo y el reflejado estarán en oposición, haciendo que para este caso particular el vector of valga or , o sea un valor de voltaje muy bajo. Como dato curioso puede decirse que si fuera factible conectar en ese punto de la línea en que $\beta l = 90^\circ$, un generador de voltaje pequeño igual al vector or , se podría obtener en el extremo receptor, o sea para Er el valor que originó or , o sea muy superior a este último. Este es esencialmente un fenómeno de resonancia y se le llama por esto Resonancia de un cuarto de onda. Así podremos llamar también

Resonancia de $1/2$ de onda cuando $\beta l = 180^\circ$

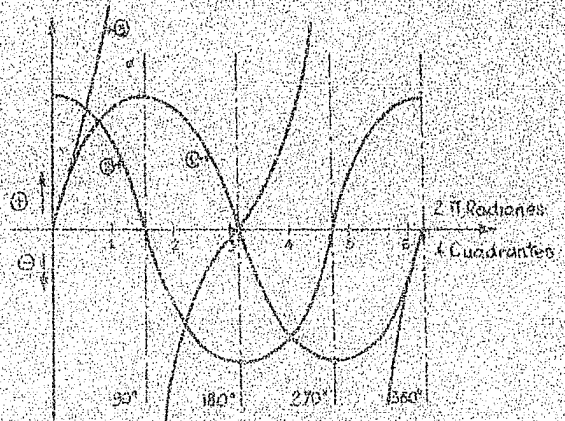
Resonancia de $3/4$ de onda cuando $\beta l = 270^\circ$

Es muy interesante el análisis de una línea de $1/4$ de



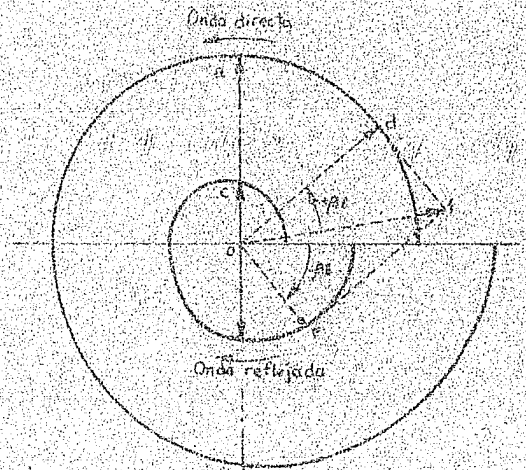
Variación de Funciones hiperbólicas y funciones exponenciales

Fig. 1.11



Variaciones de funciones trigonométricas

Fig. 1.12



Variación de las ondas de voltaje Directa y Reflejada

Fig. 1.13

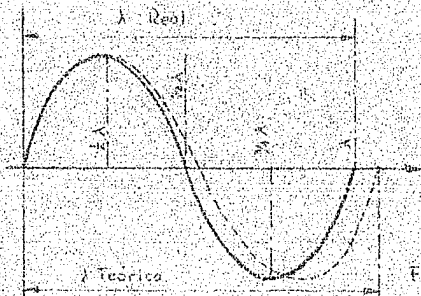


Fig. 1.14

longitud de onda, por los desastrosos problemas que en ella se presentan. Como es un circuito resonante, los valores de R y G, o sea las partes reales de la impedancia y la admitancia, son muy pequeños, al grado de que podríamos despreciarlos, o bien considerarlos teóricamente iguales a cero (aunque en la realidad tienen algún valor).

En tales circunstancias y partiendo de la constante de propagación que liga los valores de Z y de Y, tendremos:

$$\theta = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+jX)(G+jB)} \quad (1.18)$$

como $R = G = 0$

$$\theta = a + jb = 0 + j\sqrt{BX} \quad (1.19)$$

de donde: $a = 0$ y $b = \sqrt{BX}$

Se ve que la atenuación a es nula, por lo que el valor que adquieran las siguientes expresiones valdrán para este caso especial:

$$\cos h\theta = 0 + j0 = 0 \quad (1.20)$$

$$Z \frac{\sen h\theta}{\theta} = 0 + j\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.21)$$

$$Y \frac{\sen h\theta}{\theta} = 0 + j\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1.22)$$

y las ecuaciones generales de una línea que en su forma general son:

$$E_g = E_r \cos h\theta + I_r Z \frac{\sen h\theta}{\theta} \text{ volts.} \quad (1.23)$$

$$e \quad I_g = I_r \cos h\theta + E_r Y \frac{\sen h\theta}{\theta} \text{ amp.} \quad (1.23)$$

se convertirán en:

$$E_g = j\sqrt{\frac{L}{C}} I_r \text{ volts.} \quad (1.24)$$

$$e \quad I_g = j\sqrt{\frac{C}{L}} E_r \quad (1.25)$$

Si consideramos valores absolutos de E_g e I_g y los relacionamos

$$\frac{E_g}{I_g} = \frac{E_r}{I_r} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0 = \text{impedancia característica} \quad (1.26)$$

o bien:

$$\frac{E_g}{E_r} = \frac{I_g}{I_r} \quad (1.27)$$

de donde resulta que:

$$\cos \varphi_E = \cos \varphi_I \quad (1.28)$$

De las ecuaciones anteriores podremos obtener las siguientes conclusiones:

- 1.- Si el voltaje generador (E_g) es constante, la corriente en el receptor (I_r) es constante, defasada y atrasada 90° respecto a E_g .
- 2.- Si la corriente en el generador (I_g) es constante, el voltaje en el receptor (E_r) es también constante, defasado y atrasado 90° respecto a I_g .

La línea de $1/4$ de longitud de onda hace que el voltaje constante convierta la corriente en constante y viceversa.

- 3.- Con la línea en vacío, o sea cuando $I_r=0$, la relación $\frac{E_r}{E_g}$ de la ecuación (1.25) se vuelve infinita.

De lo anterior, puede decirse que para una línea de $1/4$ de longitud de onda el valor de E_r resulta tan elevado respecto a E_g , que sería desastrosa, ya que imposibilita la regulación y compromete severamente la seguridad de la línea.

Cabe hacer la siguiente consideración, casi nunca tomada en cuenta, cuando se trata de líneas de longitudes muy inferiores a las de $1/4$ de longitud de onda, cuya frecuencia de trabajo o fundamental es de 50 o 60 Hz: en esas líneas de relativa corta longitud pueden hacerse presentes las armónicas de dichas frecuencias fundamentales, las cuales pueden acarrear consigo los mismos desastrosos fenómenos que presenta la línea de $1/4$ de longitud de onda y bastará observar la tabla dada a continuación para encontrar longitudes de líneas de uso muy frecuente.

Si tomamos la velocidad de propagación teórica = 300 000 Km/seg., se tiene:

Onda	Frecuencia	Longitud en Km. de línea que corresponde a $1/4$ de long. de onda.
Fundamental	50 Hz.	1 500 Km.
3a. armónica	150 "	500 "
5a. "	250 "	300 "
7a. "	350 "	214 "
9a. "	450 "	166 "
11a. "	550 "	136 "

Onda	Frecuencia	Longitud en Km. de línea que corresponde a 1/4 de long. de onda.
Fundamental	60 Hz.	1 250 Km.
3a. armónica	180 "	417 "
5a. "	300 "	250 "
7a. "	420 "	179 "
9a. "	540 "	139 "
11a. "	660 "	114 "

La tabla anterior nos permite observar que en una línea de transmisión de relativa corta longitud como las que frecuentemente existen, ya sea aisladas o formando parte de un sistema, alguna de las armónicas de la frecuencia fundamental puede llegar a presentarse en un valor tal que introduzca valores de voltaje peligrosos para el aislamiento de la línea haciendo presentes los mismos fenómenos desastrosos de toda onda que está presente en una línea cuya longitud se acerca o es igual a 1/4 de longitud de onda.

Es probable que en algunas ocasiones en que se han llegado a presentar fallas en el aislamiento de una línea o en el equipo conectado a ella y cuya causa parece inexplicable, sea precisamente alguna onda de voltaje muy elevado producida por alguna de las armónicas, la que haya causado la falla.

III.- EFECTO CORONA Y RADIO INTERFERENCIA.

Durante el desarrollo de voltajes de transmisión a valores cada vez más elevados, el fenómeno de la ionización del aire que circunda al conductor se acrecienta cada vez más.

El aire atmosférico, aunque es un buen material aislante, no es perfecto debido a la presencia constante, en grado mínimo, de electrones y iones libres, que son el resultado de diversos efectos, tales como la radiación de rayos ultravioleta del sol, los rayos cósmicos y la radioactividad de la tierra.

Al ser energizado un conductor por un voltaje alterno elevado, el aire que circunda al conductor queda sujeto a un campo magnético con un valor que dependerá del voltaje que lo produce.

Si consideramos un conductor de gran longitud, energiza-

do, con una carga de Q coulombs por metro, se formará un campo eléctrico a su alrededor desde la superficie del conductor. Por razón natural toda carga se distribuye uniformemente sobre la superficie del conductor y todas las líneas del flujo eléctrico son rectas, radiales y uniformemente espaciadas, por lo tanto las superficies equipotenciales resultarán cilindros concéntricos alrededor del conductor.

Existe un valor de voltaje de energización del conductor, para el cual la intensidad del campo alcanza un valor característico de 30 KV/cm., siendo despreziable hasta ese valor la pérdida de energía por concepto de ionización. Hasta antes de este límite el fenómeno de ionización es imperceptible, pero si el voltaje de energización o energización del conductor aumenta, haciendo que la intensidad de campo exceda del valor crítico de 30 KV/cm., el fenómeno de ionización cambia radicalmente, pues los electrones y iones libres en el aire, en contacto con el conductor por el aumento de intensidad de campo, aumentan su energía; esto hace mayor su aceleración y consecuentemente su velocidad. Su rápido movimiento producirá colisiones inevitables contra átomos y moléculas de aire adyacentes, originando la producción de electrones y iones positivos por emisión secundaria. Estos nuevos electrones y iones libres serán a su vez acelerados y producirán electrones y iones libres. Así se producirá un exceso de iones en el aire circundante del conductor. Durante las colisiones habrá transformación de energía que originarán que los iones y electrones más alejados del conductor no alcancen la energía necesaria para producir más emisión secundaria, limitándose así el fenómeno a un cilindro concéntrico del conductor, de un radio superior al de dicho conductor y cuyo tamaño dependerá del voltaje de energización, del radio del propio conductor, de la presión barométrica del lugar, de la temperatura ambiente, de la distancia entre conductores de otras fases y de la tersura o aspereza de la superficie del conductor considerado.

A la ionización así producida se le conoce como EFECTO CORONA.

Debido a que hasta el presente las líneas de transmisión

comerciales son excitadas con corriente alterna, el campo que se produce es variable senoidalmente, por tanto la carga de los conductores podrá ser cero, positiva o negativa, dependiendo del instante en que se considere la onda.

Si el conductor es positivo en un instante dado, por ejemplo, deberá tratar de neutralizar todos los iones negativos de su alrededor, mientras que los iones positivos serán atraídos formando una capa alrededor del conductor, llamada Carga del Espacio. El efecto de esta carga del espacio es que reduce la intensidad del campo inicial en la vecindad del conductor a un valor ligeramente menor. La carga positiva del espacio hace que el diámetro del conductor aparezca de un diámetro mayor que el que realmente tiene. Una consecuencia de esto es un aumento en la intensidad del campo más allá de la zona de ionización, y otra, es un aparente aumento de la capacidad del conductor. Desde este punto de vista, equivale a considerar que el efecto corona representa un constante flujo de corriente del conductor hacia el espacio y consecuentemente una disipación de energía empleada para generar y mover iones a través del aire.

Quando el voltaje pasa por el valor de cero la ionización decrece. La carga del espacio no desaparece inmediatamente porque los iones positivos sólo se disipan por difusión y no por recombinación, y la disipación por difusión es lenta. La carga del espacio persistirá aún después de iniciarse el medio ciclo negativo. Ya avanzado este medio ciclo la carga del espacio se anulará. Sigue avanzando el ciclo y el conductor con carga negativa tratará de anular los iones positivos, y los iones negativos y electrones son repelidos formando ahora un cilindro concéntrico al conductor con carga negativa, o sea una carga del espacio negativa. Cuando el ciclo de alternación pasa por cero y se vuelve positivo, la carga del espacio persiste aún por algunos momentos entretanto los electrones y iones negativos son compensados por la carga positiva del conductor. Este ciclo se repetirá incesante y periódicamente mientras el conductor esté energizado. Una idea de las relaciones que guarda la onda de voltaje y los valores de corrientes capacitiva y de corona al acercarse al valor crítico de

de intensidad de campo, puede verse en la fig. 1.15 (pág. 28).

Ha quedado indicado que el campo magnético es de intensidad variable consecuentemente con la onda de voltaje aplicado, por lo tanto la ionización también es variable. Ha podido comprobarse que tal ionización se manifiesta en forma de descargas.

El conductor que presenta corona se convierte en una antena que radia pulsos (u ondas de gran amplitud y una duración de fracciones de microsegundo), los cuales tienen la característica de contener todas las armónicas de la frecuencia fundamental con la que se producen los pulsos. La radiación de tales pulsos produce seria interferencia en las comunicaciones eléctricas telefónicas, telegráficas, de radio, de televisión y aún en la comunicación por microonda. Es por eso que a este fenómeno se le llama RADIO INTERFERENCIA (RI).

Es interesante observar que la radio interferencia se produce en secuencias regulares que ocurren durante el medio ciclo negativo de la onda de voltaje. Este efecto se registra aún antes de llegar al valor crítico de intensidad de campo, cuando las condiciones atmosféricas son en extremo húmedas, como es el caso de lluvia. Desde que se manifiesta la RI., hasta que se alcanza el valor crítico de la intensidad de campo, la RI. va en aumento, y dicho aumento sólo queda restringido por el valor del medio ciclo negativo de la onda de voltaje. Es probable que la RI llegue a hacerse presente durante el medio ciclo positivo. Se verá que la RI precede al momento en que empieza a hacerse notorio el fenómeno de pérdida de energía por efecto corona, y se ha comprobado lo anterior para valores hasta 500 KV. de transmisión. Después de este valor se ha encontrado que las pérdidas por corona crecen más rápidamente que la RI.

La RI. es tan sensitiva a las condiciones atmosféricas como lo son las pérdidas de energía por efecto corona.

A manera de ilustración de la relación existente entre la RI. y las pérdidas por corona, se acompaña la fig. No. 1.16 (pág. 28), que indica la variación de la RI. y pérdidas por corona, registradas a 30 m. aproximadamente de una línea con

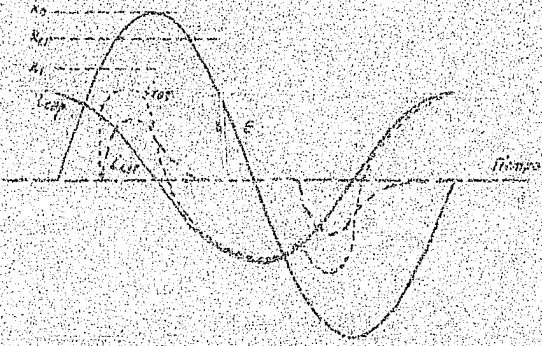
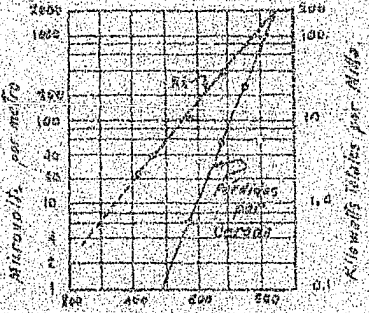


FIG. 1.95

RELACION DE VALORES INSTANTANEOS DE LAS CORRIENTES DE CARGA Y CORONA EN LA CERCANIA DEL VALOR CRITICO DE INTENSIDAD DE CAMPO.

- K = Intensidad de campo (Aosidos y unidos y aduados)
- E = Onda de voltaje
- I_{cap} = Corriente capacitiva antes de ondas de aparicion de efecto corona.
- I_{cor} = Corriente de ionizacion de corona.
- K_0 = Valor de intensidad de campo antes del critico.

- K_{crit} = Valor de intensidad de campo critico.
- K_1 = Valor de intensidad de campo superior al critico.
- $K_{cap} = K_1 \text{ o } K_0 = K_{crit}$
- $I_{cap} \text{ y } I_{cor} = I_{cor}$



KV. entre fases.

VARIACION DE R.I. Y PERDIDA POR CORONA EN UNA LINEA ENERGIZADA A DIVERSOS VOLTAJES.

FIG. 1.10

conductores ACSR, separados 5 cm., (de una misma fase) y 9.75 metros de distancia entre conductores. (Transaction No. 70, 1951, pág. 90, fig. 21).

Durante las investigaciones realizadas por los grandes laboratorios de fama internacional, se han encontrado expresiones matemáticas para la obtención del voltaje crítico disruptivo, pero cabe a W. F. Peterson el honor de haber establecido la primera ecuación para tal voltaje. La fórmula obtenida por él, perfeccionada con los refinamientos de la ciencia moderna, se expone en seguida:

$$E'_0 = \frac{d}{2c} \times \frac{n}{1 + \frac{d(n-1) \operatorname{sen} \alpha / n}{m_1 m_2}} \times 2.03 \times 10^{-6} \text{ KV. al neutro} \quad (1.29)$$

En el cual:

- E'_0 = voltaje crítico disruptivo en KV. al neutro, a partir del cual la RL. empieza a ser peligrosa.
- d = Diámetro del círculo que circunda a los conductores por fase, en cm.
- n = Número de conductores por fase.
- α = Espaciamiento entre los conductores en una misma fase, en cm.
- m_1 = Factor de superficie = 1 para un conductor ideal.
= 0.9 para un conductor nuevo.
= 0.8 para un conductor usado o envejecido.
- m_2 = Factor meteorológico = 1 para tiempo seco.
= 0.8 para tiempo húmedo, o con humo, o con lluvia o con nieve.
- c = Capacitancia de la línea en Farada/Km., calculada de acuerdo con la fórmula:

$$c = \frac{2.415 \times 10^{-6}}{\log_{10} \frac{2H}{B} \frac{2b}{a}} \text{ Farads/Km.} \quad (1.30)$$

En la cual:

- $H = \sqrt{H_1 H_2 H_3}$ = Distancia Media Geométrica entre conductores y tierra, en cm.

$B = \sqrt[3]{B_{12} B_{23} B_{31}}$ = Distancia Media Geométrica entre conductores y sus imágenes reflejadas, en cm.

$m_3 = \frac{2H}{B}$ es un cociente llamado "Característica de la Torre y alcanza valores del orden de:

$m_3 = 0.95$ a 1	para líneas del orden de	132 KV.
$m_3 = 0.90$ a 0.95	" " " " "	220 KV.
$m_3 = 0.85$ a 0.90	" " " " "	380 KV.
$m_3 = 0.80$ a 0.85	" " " " "	500 KV.
$m_3 = 0.75$ a 0.80	" " " " "	750 KV.

Teniendo como valor medio para $m_3 = 0.875$.

$b = \sqrt[3]{b_{12} b_{23} b_{31}}$ = Valor medio geométrico entre las... en cm.

$d_g = d \left(\frac{2g}{d} \right)^{\frac{n-1}{n}}$ = diámetro equivalente, en cm.

donde:

$g = 1, 1, 1.12$

Para $n = 2, 3, 4$

En el caso particular de un alambre en vez de un cable,

$d_g = d.$

La expresión (1.29), ya simplificada, puede ser escrita:

Para un conductor por fase:

$E_{O1} = 42.1 d \log_{10} \left(2.52 m_3 \frac{F}{d} \right) m_1 m_2$ KV. al neutro. (1.31)

Para dos conductores por fase: (separados 45 cm.)

$E_{O2} = 84.1 \frac{d}{\left(1 + \frac{d}{B_3} \right)} \log_{10} \left(0.266 m_3 \frac{F}{\sqrt{d}} \right) m_1 m_2$ KV. al neutro. (1.32)

Es importante considerar también la pérdida de energía originada por efecto corona, la cual puede alcanzar valores elevados bajo condiciones de tiempo húmedo.

$P_c = \frac{20.96 \times 10^{-6} \times f \times E_m^2 \times \phi^4}{\left(\log_{10} \frac{2F}{d} \right)} \frac{KV}{cm}$ y por fase. (1.33)

donde

F = separación entre fases, en cm.

d = diámetro del conductor, en cm.

f = frecuencia en Hz.

En = voltaje eficaz al neutro en KV.

$\frac{E_c}{E_n}$ = constante que depende de la relación entre En y Eo =

f $\left(\frac{E_n}{E_0}\right)$, y cuyo valor puede ser obtenido de la curva que aparece en la fig. 117 pág. 33.

$$E_o = \frac{4860 V^{2/3} m \left[\log_{10} \frac{2F}{Kd_t} + (t-1) \log_{10} \frac{2F}{d-Kdt} \right]}{\frac{200}{Kd_t} + \frac{100(t-1)}{d-Kdt}} \text{ KV. (1.34)}$$

Eo = voltaje crítico disruptivo, en que el efecto corona empieza a ser peligroso.

En la ecuación (1.34) anterior:

F y d: ya se ha indicado su significado y unidad.

d_t = diámetro del alambre en la capa exterior del cable en cm.

t = número de alambres en la última capa.

K = $\frac{\cos \pi/t}{\pi/2 + \pi/t}$ que da valores:

K =	0.472	0.445	0.436	0.417	0.410
para t =	12	16	18	24	28

m = 1. para un conductor ideal.

m = 0.9 para un conductor viejo o usado.

m = 0.8 para un conductor nuevo.

V = $\frac{3.92 b}{2.73 + t}$ = factor de densidad del aire, en el cual

b = presión barométrica, en cm. de Hg.

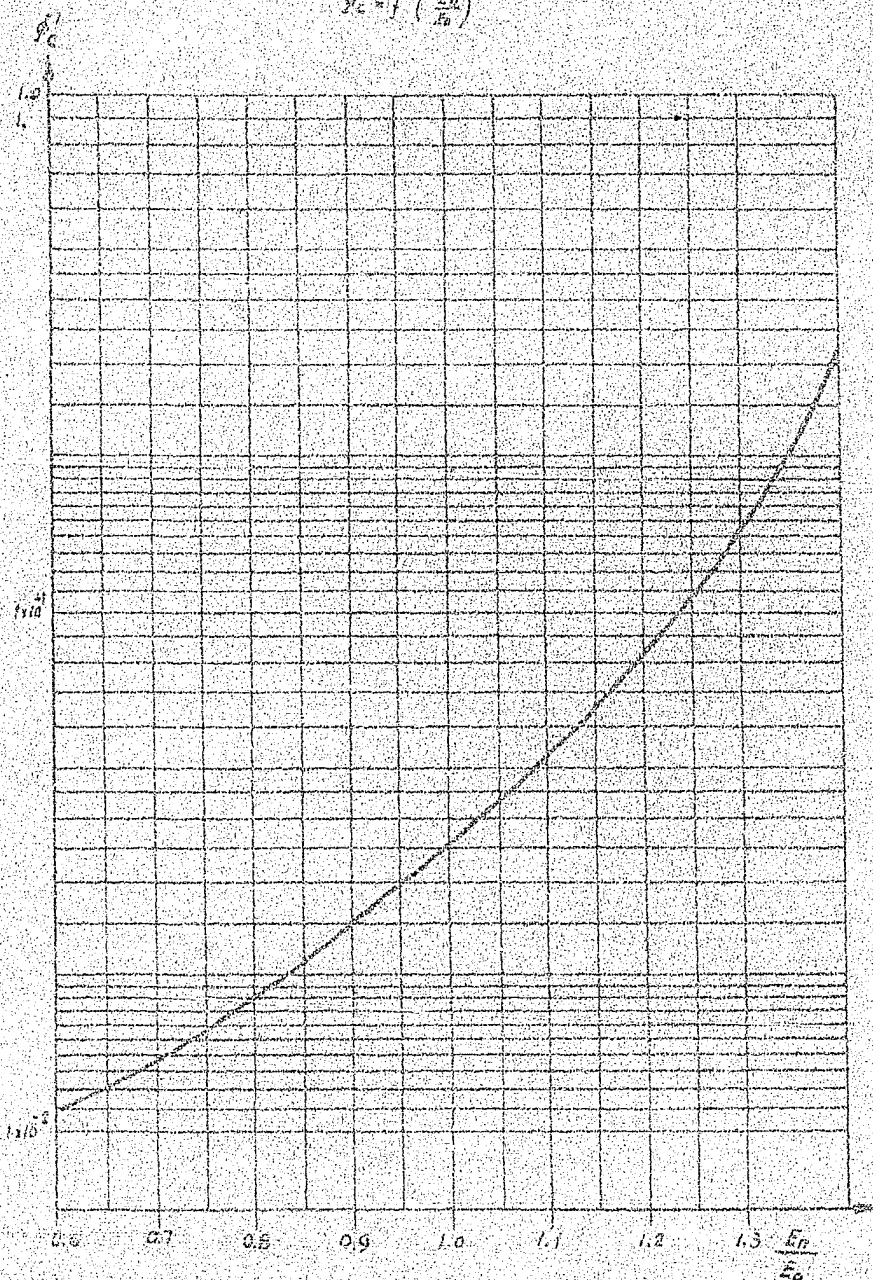
t = temperatura en °C.

La ecuación (1.34) es empleada con buenos resultados para cables de más de 6 hilos, lo cual es aplicable a cables usados en líneas de muy altos voltajes.

Como es sabido, el voltaje crítico disruptivo es una función directa del radio del conductor empleado; pero cuando se trató de voltajes muy elevados se requirió el uso de conductores de diámetro demasiado grande, de irrealizable construc-

ción y totalmente antieconómicos, para que las pérdidas de energía por efecto corona y la R. I. fueran admisibles. La solución a este problema se logró instalando dos, tres y hasta cuatro conductores por fase, espaciados a distancias variables entre conductores por fase. Esto equivale a aumentar varias veces el diámetro de un solo conductor, con lo cual el voltaje crítico disruptivo alcanza valores muy elevados, permitiendo así el uso de voltajes extra altos para transmisión de energía eléctrica.

$$f_c' = f \left(\frac{E_n}{E_0} \right)$$



CONSTANTE PARA EL CÁLCULO DE PERDIDAS POR
CORONA

FIG. 1.17.

C A P I T U L O I I

CARACTERISTICAS ESTRUCTURA LES DE LAS LINEAS LARGAS.

En el capítulo anterior se ha hecho referencia a los elementos constitutivos de una línea de transmisión larga, con las constantes de la línea distribuidas, fig. 1.1 (pág. 10) y cuyos desarrollos forman el Apéndice II, página 94.

La inductancia y capacitancia totales de una línea pueden ser consideradas en forma concentrada, dando lugar a dos circuitos clásicos representativos de una línea y que se conocen como circuito Pi y circuito T.

Estos circuitos permiten relacionar los voltajes y corrientes de ambos extremos de la línea con las constantes de la misma. Los circuitos que se logran son equivalentes.

Circuito equivalente "Pi".

Basándonos en las figuras 2.1 y 2.2 de la página 40 y mediante ecuaciones de Kirchhoff, podemos escribir:

$$E_g = E_r + IZ \quad 2.1$$

$$I = I_r + I_r' \quad 2.2$$

$$I_g = I + I_g' \quad 2.3$$

$$I_r = \frac{E_r}{Z} \quad 2.4$$

$$I_g = \frac{E_g}{Z} \quad 2.5$$

Estas ecuaciones permiten calcular los valores de E_s e I_s conociendo E_r e I_r .

$$E_g = E_r \left(1 + \frac{Z}{Z'}\right) + I_r Z \quad 2.6$$

$$I_g = \frac{E_r}{Z} + \frac{E_r}{Z'} + I_r \quad 2.7$$

o también:

$$I_g = E_r \left(\frac{2}{Z'} + \frac{Z}{Z' \cdot Z}\right) + I_r \left(1 + \frac{Z}{Z'}\right) \quad 2.8$$

En el caso de que se desee expresar las ecuaciones de una línea mediante las constantes generalizadas A, B, C y D, cuyas expresiones son:

$$E_g = A E_r + B I_r \quad 2.9$$

$$I_g = D I_r + C E_r \quad 2.10$$

el valor de cada una de dichas constantes para el circuito será:

$$A = 1 + \frac{Z}{Z'} = D \quad 2.11$$

$$B = Z \quad 2.12$$

$$C = \frac{2}{Z'} + \frac{Z}{Z' \cdot Z} \quad 2.13$$

Si son seleccionadas Z y Z' de tal manera que A, B y C en las ecuaciones 2.11 a 2.13 sean iguales a las constantes generalizadas de la línea, resulta:

$$Z = B = Z_0 \operatorname{sen} h \theta l \quad 2.14$$

$$Z' = \frac{B}{A-1} = \frac{Z_0 \operatorname{sen} h \theta l}{\cos h \theta l - 1} \quad 2.15$$

Sin embargo, para el caso de líneas de gran longitud los valores de Z y Z' deberán ser calculados con mayor precisión, mediante las series convergentes siguientes:

$$Z_{\pi} = Z \left(1 + \frac{Z}{5Z'} + \frac{Z^2}{120Z'^2} + \frac{Z^3}{5040Z'^3} + \frac{Z^4}{362880Z'^4} + \dots\right) \quad 2.16$$

$$Z'_{\pi} = 2Z' \left(1 + \frac{Z}{12Z'} - \frac{Z^2}{720Z'^2} + \frac{Z^3}{30240Z'^3} - \frac{Z^4}{1207680Z'^4} + \dots\right) \quad 2.17$$

De estas ecuaciones pueden tomarse los 2 primeros términos y despreciar los siguientes. En tal condición puede separarse la parte real y la parte imaginaria de las ecuaciones, quedando:

$$Z = r_l \left(1 - \frac{X}{Zr} \frac{l^2}{3} \right) + jXl \left[1 + \left(\frac{r^2}{2Zr} - \frac{X}{Zr} \right) \frac{l^2}{6} \right] \quad 2.18$$

$$y \quad Z' = -j \frac{2X'}{l} \left[\left(1 - \frac{X}{Zr} \frac{l^2}{12} \right) + j \frac{r}{Zr} \frac{l^2}{12} \right] \quad 2.19$$

en las cuales, X y r en ohms/Km., X' en ohms-Km. y l en Km.

Circuito equivalente "π".

Basándonos en las figuras 2.3 y 2.4, pág.40 y mediante ecuaciones de Kirchhoff, obtendremos:

$$I_g = E_r \frac{1}{Zr} + I_r \left(1 + \frac{Z}{Zr} \right) \quad 2.20$$

$$E_g = E_r \left(1 + \frac{Z}{Zr} \right) + I_r \left(2Z + \frac{Z^2}{Zr} \right) \quad 2.21$$

El valor de las constantes generalizadas para este circuito serán:

$$A = \left(1 + \frac{Z}{Zr} \right) = D \quad 2.22$$

$$B = \left(2Z + \frac{Z^2}{Zr} \right) \quad 2.23$$

$$C = \frac{1}{Zr} \quad 2.24$$

Bajo condiciones iguales a las impuestas a las ecuaciones 2.11 a 2.13, podremos escribir:

$$Z = \frac{A - 1}{C} = \frac{\cos h \theta l - 1}{\frac{1}{Z_0} \operatorname{sen} h \theta l} \quad 2.24$$

$$y \quad Z' = \frac{1}{C} = \frac{Z_0}{\operatorname{sen} h \theta l} \quad 2.25$$

Para el caso de líneas de gran longitud, es más correcto considerar para Z y Z' sus valores calculados por las series siguientes:

$$Z = \frac{Z}{2} \left(1 - \frac{Z}{12Zr} + \frac{Z^2}{120Z^2 \cdot 2} - \frac{17Z^3}{20160Z^3 \cdot 3} + \frac{31Z^4}{3628800Z^4 \cdot 4} - \dots \right) \quad 2.27$$

$$Z' = Z' \left(1 - \frac{Z}{6Zr} + \frac{7Z^2}{360Z^2 \cdot 2} - \frac{31Z^3}{15120Z^3 \cdot 3} + \frac{127Z^4}{604800Z^4 \cdot 4} - \dots \right) \quad 2.28$$

de las cuales, utilizando los primeros dos términos y separando la parte real y la parte imaginaria de las ecuaciones, obtendremos:

$$Z = \frac{1}{2} r_l \left(1 - \frac{r_l^2}{X^2} \right) + j \frac{1}{2} X_l \left[1 + \left(\frac{r_l^2}{X^2} - \frac{r_l^2}{X^2} \right) \frac{1}{2} \right] \quad 2.29$$

$$Z' = -j \frac{X_l}{2} \left[\left(1 + \frac{r_l^2}{X^2} \right) - j \frac{r_l^2}{X^2} \right] \quad 2.30$$

en las que X y r_l estarán dadas en ohms/Km., l en ohms-Km. y $\frac{1}{2}$ en Km.

Como dato complementario a la estructura de una línea que liga sus constantes para la obtención de la potencia activa y reactiva, así como la potencia natural de una línea, se expone el tema siguiente:

Potencias para líneas de transmisión.-

Las potencias activa y reactiva pueden representarse como:

$$S_g = P_g + j Q_g \quad \text{para el extremo generador} \quad 2.31$$

$$S_r = P_r + j Q_r \quad \text{" " " receptor.} \quad 2.32$$

Siendo cantidades complejas las constantes generalizadas podemos expresarlas en forma polar como:

$$A = A \angle a \quad 2.33$$

$$B = B \angle b \quad 2.34$$

$$C = C \angle c \quad 2.35$$

$$D = D \angle d \quad 2.36$$

y además:

$$E_r = E_r \angle \theta_r \quad 2.37$$

$$E_g = E_g \angle \theta_g \quad 2.38$$

$$\theta = \theta_g - \theta_r \quad 2.39$$

Las expresiones 2.31 y 2.32 podrán ser escritas como:

$$S_g = P_g + j Q_g = \frac{E_g^2 D}{B} \left[\frac{b-d}{B} - \frac{E_r E_r}{B} \right] \angle \theta + b \quad 2.40$$

$$S_r = P_r + j Q_r = \frac{E_r^2 A}{B} \left[\frac{b-a}{B} + \frac{E_g E_g}{B} \right] \angle -\theta + b \quad 2.41$$

Separando la parte real y la parte imaginaria de las dos expresiones anteriores, tendremos:

a).- La potencia activa:

$$P_g = \frac{E_g^2 D}{B} \cos(b-d) - \frac{E_g E_r}{B} \cos(\theta + b) \quad 2.42$$

$$Pr = \frac{E_g^2 A}{B} \cos(b - a) + \frac{E_g E_r}{B} \cos(\theta - b) \quad 2.43$$

b).- La potencia reactiva:

$$Qg = \frac{E_g^2 D}{B} \sin(b - a) - \frac{E_g E_r}{B} \sin(\theta + b) \quad 2.44$$

$$Qr = - \frac{E_r^2 A}{B} \sin(b - a) - \frac{E_g E_r}{B} \sin(\theta - b) \quad 2.45$$

Podemos obtener expresiones similares, partiendo de las constantes de un circuito \bar{U} o \bar{T} , teniendo en cuenta que:

$$I_g' = \frac{E_g - E_r}{Z} + \frac{E_g}{Z_g} \quad 2.46$$

$$a) \quad I_r = \frac{E_g - E_r}{Z} - \frac{E_r}{Z_r} \quad 2.47$$

ambas obtenidas de un circuito \bar{U} , luego las ecuaciones 2.40 y 2.41 podrán ser escritas como:

$$Sg = Pg + j Qg = \frac{E_g^2}{Z} \underline{[b]} - \frac{E_g E_r}{Z} \underline{[a + b]} + \frac{E_g^2}{Z_g} \underline{[a']} \quad 2.48$$

$$Sr = Pr + j Qr = - \frac{E_r^2}{Z} \underline{[b]} + \frac{E_g E_r}{Z} \underline{[-a + b]} - \frac{E_r^2}{Z_r} \underline{[b']} \quad 2.49$$

en las cuales

$$Z = Z \underline{[b]} \quad 2.50$$

$$Z_g' = Z_g' \underline{[b_g']} \quad 2.51$$

$$Z_r' = Z_r' \underline{[b_r']} \quad 2.52$$

Si en forma similar que con 2.40 y 2.41 separamos las partes real e imaginaria de las ecuaciones 2.48 y 2.49, obtenemos:

a).- La potencia activa:

$$Pg = \frac{E_g^2}{Z} \cos b - \frac{E_g E_r}{Z} \cos(\theta + b) + \frac{E_g^2}{Z_g} \cos b_g' \quad 2.53$$

$$Pr = - \frac{E_r^2}{Z} \cos b + \frac{E_g E_r}{Z} \cos(\theta - b) - \frac{E_r^2}{Z_r} \cos b_r' \quad 2.54$$

b).- La potencia reactiva:

$$Q_s = \frac{E_s^2}{Z} \operatorname{sen} b - \frac{E_s E_r}{Z} \operatorname{sen} (\theta + b) + \frac{E_r^2}{Z_r'} \operatorname{sen} b_r' \quad 2.55$$

$$Q_r = - \frac{E_r^2}{Z} \operatorname{sen} b - \frac{E_s E_r}{Z} \operatorname{sen} (\theta - b) + \frac{E_s^2}{Z_s'} \operatorname{sen} b_s' \quad 2.56$$

Un concepto interesante que cabe citar es el de la POTENCIA NATURAL DE UNA LÍNEA.

Si la línea está terminada en su impedancia característica Z_0 , su potencia reactiva interna está balanceada, por tanto no requiere de potencia reactiva externa. En estas condiciones, la corriente de línea es la mínima posible para una carga dada, y por tanto las pérdidas en la línea son mínimas. Como consecuencia de lo anterior, la caída de voltaje a lo largo de la línea es pequeña. Equivale a una línea con resistencia óhmica pura.

La potencia transmitida en estas condiciones será:

$$P_n = \frac{E_s^2}{Z_0} \text{ KW} \quad 2.57$$

que es llamada la potencia natural de la línea.

Se ha encontrado que si la impedancia característica de la línea no difiere de 10% en más o en menos de 400 ohms, se puede obtener una expresión aproximada para encontrar la potencia trifásica natural que resulta como la más económica, para un voltaje dado.

$$P_n = 2.5 E^2 \text{ KW} \quad 2.58$$

en la cual E es el voltaje entre fases, expresado en KV.

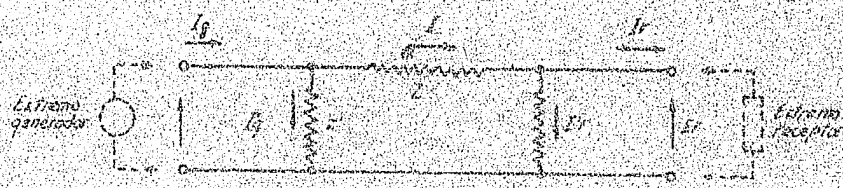


Fig. 2.1 - CIRCUITO EQUIVALENTE "π"

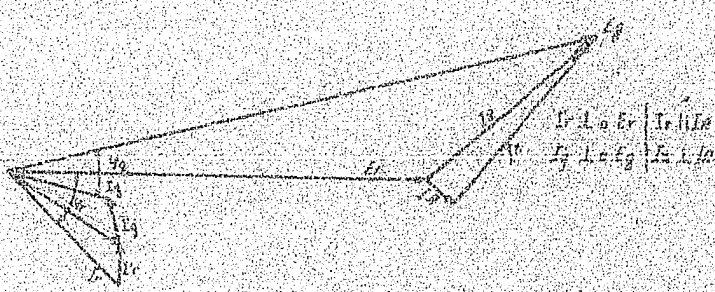


Fig. 2.2 - DIAGRAMA VECTORIAL DEL CIRCUITO "π"

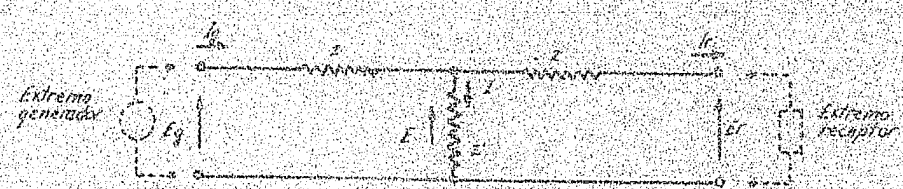


Fig. 2.3 - CIRCUITO EQUIVALENTE "T"

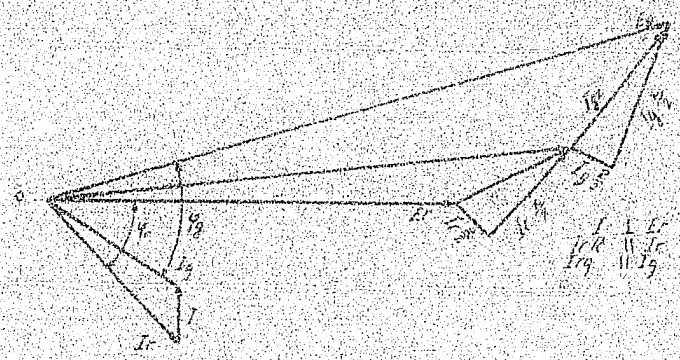


Fig. 2.4 - DIAGRAMA VECTORIAL DEL CIRCUITO "T"

C A P I T U L O III.

NATURALEZA DE LAS FALLAS QUE FRECUENTEMENTE SE PRE- SENTAN EN LAS LINEAS.

Desde el punto de vista eléctrico, las fallas que pueden presentarse en una línea de transmisión son cortos circuitos que podemos agrupar como sigue:

- 1.- Corto circuito trifásico.
- 2.- " " entre dos fases.
- 3.- " " " " " y tierra.
- 4.- " " " fase y tierra.

Cuando alguna de estas fallas ocurre en algún punto de la línea, el voltaje y la corriente de cada fase sufren alteraciones notables tanto en módulo como en argumento.

Haciendo un breve análisis de las figuras 3.1 a 3.5, inclusive, de la pág. 47, podremos ver:

La figura 3.1 representa los voltajes y corrientes en condiciones normales.

1.- Corto circuito trifásico.

La figura 3.2 representa el caso de una falla trifásica.

Los voltajes se reducen considerablemente y las corrientes continúan simétricas entre sí, aumentan considerablemente de valor y a la vez se atrasan, formando por lo general, respecto a sus correspondientes voltajes al neutro, un ángulo de 60°.

Sólomente los valores de secuencia positiva son involucrados, por lo tanto sólo la impedancia de secuencia positiva deberá aparecer en la red, cuya solución será, para la fase A, por ejemplo:

$$I_A = I_{a1} = \frac{E_a}{\text{Total } Z_1} \quad (3.1)$$

$$I_B = a^2 I_A \quad (3.2)$$

$$I_C = a I_A \quad (3.3)$$

2.- Corto circuito entre dos fases.-

La figura (3.3) se refiere al caso de una falla entre las fases B y C.

La corriente I_D aumenta y se atrasa respecto al voltaje BC un ángulo de 60° y la corriente I_C adquiere la misma magnitud de I_D , pero defasada 180° respecto a esta. Las corrientes de secuencias positiva y negativa en la fase A, serán:

$$I_{a1} = \frac{I_A + a I_B + a^2 I_C}{3} = \frac{0 + a I_B - a^2 I_B}{3} = \frac{(a - a^2) I_B}{3} \quad (3.4)$$

$$I_{a2} = \frac{I_a + a^2 I_B + a I_C}{3} = \frac{0 + a^2 I_B - a I_B}{3} = \frac{(a^2 - a) I_B}{3}$$

o bien

$$I_{a2} = - \frac{(a - a^2) I_B}{3} \quad (3.5)$$

$$I_{a1} = - I_{a2} \quad (3.6)$$

La solución depende de la igualdad de voltajes en las fases B y C, que quedan en corto circuito.

$$V_B = a^2 E_a - a^2 I_{a1} Z_1 - a I_{a2} Z_2 \quad (3.7)$$

$$V_C = a E_a - a I_{a1} Z_1 - a^2 I_{a2} Z_2 \quad (3.8)$$

como $V_B = V_C$ podemos igualar (3.7) y (3.8):

$$a^2 E_a - a^2 I_{a1} Z_1 - a I_{a2} Z_2 = a E_a - a I_{a1} Z_1 - a^2 I_{a2} Z_2 \quad (3.9)$$

Sabiendo que $I_{a2} = -I_{a1}$, según (3.6):

$$(a^2 - a) E_a = (a^2 - a) I_{a1} Z_1 - (a^2 - a)(-I_{a1}) Z_2 \quad (3.10)$$

$$E_a = I_{a1} Z_1 + I_{a1} Z_2 = I_{a1} (Z_1 + Z_2) \quad (3.11)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} = -I_{a2} \quad (3.12)$$

$$I_{b1} = a^2 I_{a1} = \frac{a^2 E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (3.13)$$

$$I_{b2} = a I_{a2} = -a I_{a1} = -\frac{a E_a}{Z_1 + Z_2} \quad (3.14)$$

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} = (a^2 - a) \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} = \sqrt{3} \ 90^\circ \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} = -I_C \quad (3.15)$$

y además $I_A = 0$

Es interesante observar en esta última ecuación el término $\frac{E_a}{Z_1 + Z_2}$ que claramente sugiere un circuito equivalente en el cual la red de secuencia positiva del sistema de impedancias, con su voltaje E_a y su impedancia Z_1 , está en serie con la red de secuencia negativa que contiene Z_2 .

Puede verse también, con referencia, a la fase A que se ha tomado como ejemplo, que la corriente de secuencia negativa es la negativa de la corriente de secuencia positiva (3.6).

La magnitud de la corriente total en las fases B o C alcanza valores de $\sqrt{3}$ veces el valor de sus componentes.

3.- Corto circuito entre dos fases y tierra.

La figura 3.4 nos muestra el caso de una falla entre dos

dos fases, B y C, en corto circuito y además solidamente a tierra.

Como en los casos anteriores, en términos de la fase A, podemos escribir:

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = E_a - I_{a1} Z_1 = I_{a1} \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (3.16)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_2 + Z_0}} \quad (3.17)$$

$$I_{a2} = I_{a1} \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \quad (3.18)$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \quad (3.19)$$

Ahora bien:

$$I_A = 0$$

$$I_B = \frac{E_B}{Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0} \left[(a^2 - 1) Z_2 + (a^2 - a) Z_0 \right] \quad (3.20)$$

y para

$$I_C = \frac{E_C}{Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0} \left[(a - 1) Z_2 + (a - a^2) Z_0 \right] \quad (3.21)$$

Por lo que respecta al voltaje E_a :

$$E_1 = E_2 = E_0 \quad (3.22)$$

$$E_2 = -I_2 Z_2 = E \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0} \quad (3.23)$$

$$E_a = 3E_2 = 3E \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 Z_1 + Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0} \quad (3.24)$$

4.- Corto circuito entre una fase y tierra:

La figura 3.5 muestra el caso de corto circuito entre la fase A y tierra.

La corriente de secuencia cero, fluye a través de la impedancia Z_n conectada al neutro. Su magnitud en Z_n es $3I_{a0}$, lo que producirá una caída de voltaje tres veces mayor en una forma igual que si Z_n estuviera conectada en cada fase.

El circuito es simétrico excepto para el corto circuito, por lo tanto las siguientes relaciones regirán en la parte simétrica del sistema; luego la solución será:

$$E_a = I_{a1} Z_1 + V_{a1} \quad (3.25)$$

$$0 = I_{a2} Z_2 + V_{a2} \quad (3.26)$$

$$0 = I_{a0} Z_0 + V_{a0} \quad (3.27)$$

Si tenemos en cuenta las condiciones límite, resultará:

$$V_A = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = E_a - I_{a1} Z_1 - I_{a2} Z_2 - I_{a0} Z_0 = 0 \quad (3.28)$$

$$I_B = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} = 0 \quad (3.29)$$

$$I_C = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0} = 0 \quad (3.30)$$

$$\text{Para } I_B - I_C = (a^2 - a) I_{a1} + (a - a^2) I_{a2} + 0 = 0 \quad (3.31)$$

$$(a^2 - a) I_{a1} = (a^2 - a) I_{a2} \quad (3.32)$$

o bien:

$$I_{a1} = I_{a2} \quad (3.33)$$

Si este resultado lo sustituimos en I_B :

$$I_B = a^2 I_{a1} + a I_{a1} + I_{a0} = 0 \quad (3.34)$$

$$= a^2 I_{a1} + a I_{a1} + I_{a1} - I_{a1} + I_{a0} = 0 \quad (3.35)$$

$$(a^2 + a + 1) I_{a1} - I_{a1} + I_{a0} = 0 \quad (3.36)$$

$$I_{a1} = I_{a0} \quad (3.37)$$

luego

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} \quad (3.38)$$

Teniendo en cuenta esta última ecuación y sustituyendo $I_{a2} =$

$$I_{a1} = I_{a0} = I_{a1},$$

$$E_a = I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (3.39)$$

$$\therefore I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (3.40)$$

Conociendo el valor de I_{a1} , el valor de la corriente de falla I_A será:

$$I_G = I_A = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 3 I_{a1} \quad (3.41)$$

o sea tres veces el valor encontrado en el circuito equivalente.

En los desarrollos anteriores se ha considerado que los cortos circuitos son sólidos, sin alguna impedancia incluida en el corto o bien en parte del circuito al neutro, etc., en cuyo caso las ecuaciones sufrirán algunas alteraciones para poder incluir la nueva impedancia que se presente.

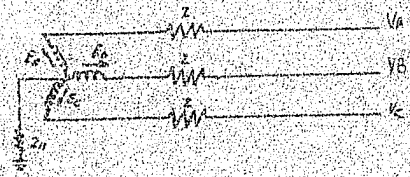
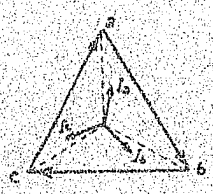


FIG. 3.1 - CONDICIONES NORMALES.

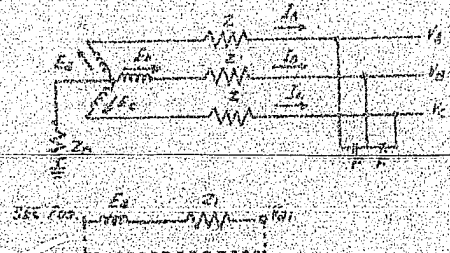
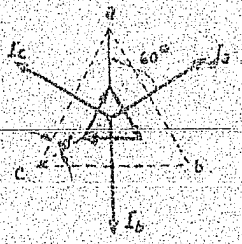


FIG. 3.2 - FALLA TRIFASICA.

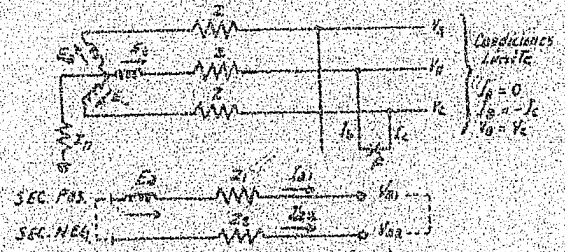
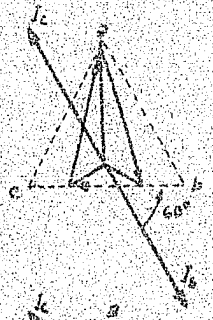


FIG. 3.3 - FALLA ENTRE 2 FASES (BC).

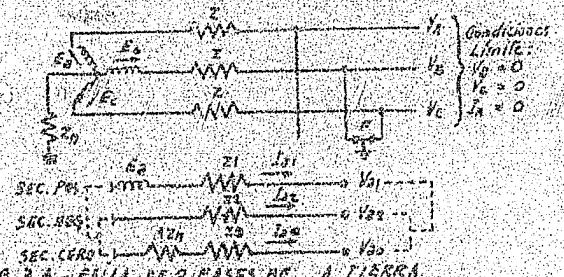
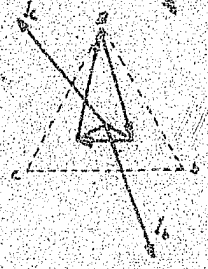


FIG. 3.4 - FALLA DE 2 FASES, BC, A TIERRA.

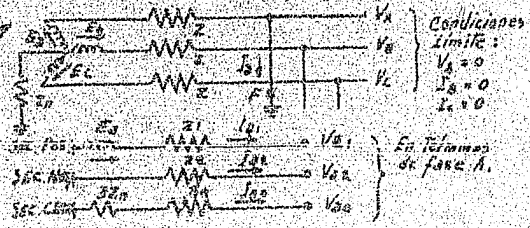
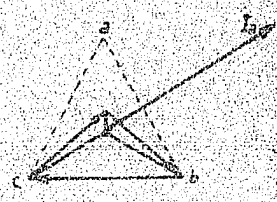


FIG. 3.5 - FALLA DE FASE A A TIERRA.

C A P I T U L O IV.

FORMAS COMUNES DE DETECTAR
LAS FALLAS QUE FRECUENTE -
MENTE SE PRESENTAN EN LAS
LINEAS DE TRANSMISION DAR-
GAS.

El problema de la detección de fallas en una línea de transmisión cuando no forma parte de un sistema eléctrico y sólo alimenta una carga en un extremo, es relativamente sencillo. Pero cuando una línea forma parte de un sistema, el problema de la detección de fallas se vuelve complejo; tanto mayor cuanto más grande o complicado es el sistema.

Mediante instrumentos de gran sensibilidad y precisión llamados relevadores o relés, es posible vigilar y dar órdenes de ejecutar operaciones adecuadas para la protección de l

neas y equipo eléctrico de un sistema.

Los relevadores están formados por dos circuitos básicos: el que detecta la falla y el que da la orden de ejecutar una operación determinada, todo esto, en un tiempo tan corto, que pueda medirse en unos cuantos ciclos de la frecuencia comercial.

De la diversidad y multitud de tipos de relevadores existentes se mencionan los de uso más frecuente en líneas de transmisión:

- 1.- Relevador de distancia.
- 2.- Relevador de protección piloto.
- 3.- Relevador de protección por Onda Portadora (o carrier).

A continuación se hace una breve descripción del funcionamiento y operación de los relevadores enumerados.

1.- Relevador de distancia.

Probablemente éste es el más interesante y versátil de los relevadores.

En esencia, actúa como un balance entre el voltaje y la corriente y su relación es expresada en términos de IMPEDANCIA. Es por esto que a uno de los tipos de distancia se le denomina de impedancia.

Existen dos tipos de relevadores de impedancia que se han clasificado como "de impedancia" y "de impedancia modificada". Aunque ambos se basan en los mismos principios de operación, indicaremos oportunamente las diferencias entre uno y otro.

La impedancia es una forma de expresar la longitud de una línea de transmisión en términos eléctricos. Sin embargo, deberá tenerse presente que si bien es cierto que en forma general una impedancia puede representar una resistencia sola, o una reactancia sola, o bien la combinación de ambas, en el caso de relevadores de impedancia deberá entenderse este término con una acepción muy especial.

Hay varios tipos de relevadores de distancia:

- a).- Relevador de Impedancia (en sentido estricto):

Un relevador de impedancia consta, esencialmente, de un elemento de voltaje y otro de corriente así como de un resorte cuya acción, sumada al efecto del voltaje, se contrapone a la acción de la corriente; una unidad direccional de fase; tres elementos o unidades de impedancia de alta velocidad; un medidor de tiempo o timer; un conjunto de contactos; unidades de sello; indicadores de bandera, y otros elementos eléctricos y mecánicos auxiliares.

El par producido por el elemento de corriente es balanceado por el par producido por el elemento de voltaje sumado al par del resorte.

El primer par es positivo y produce un par positivo que se inicia con la corriente mínima de operación (pick up), mientras que el segundo produce un par negativo de reposición a la posición inicial. Esto, dicho de otra manera, el relevador de impedancia es un relevador de sobrecorriente con restricción de voltaje.

La expresión que nos da el par (T) combinando los efectos de la corriente, voltaje y resorte, será:

$$T = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_3 \quad (4.1)$$

Siendo K_1 y K_2 constantes dependientes de los elementos de corriente y voltaje y K_3 una constante dependiente del resorte.

I y V son valores eficaces de corriente y voltaje respectivamente.

En el punto en que el relevador está balanceado, en que el par vale cero,

$$K_2 V^2 - K_1 I^2 - K_3 \quad (4.2)$$

dividiendo por $K_2 I^2$,

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2} \quad (4.3)$$

o bien:

$$\frac{V}{I} = Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}} \quad (4.4)$$

Si despreciamos el efecto del resorte y nos referimos ex

clusivamente a los valores electricos, y por tanto consideremos $K_3 = 0$, resulta:

$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = \text{Constante.} \quad (4.5)$$

expresión que nos indica que un relevador de impedancia se encuentra al borde de operación dado por una constante dependiente de la relación de V a I, y lo cual puede ser representado por una impedancia.

Esto puede expresarse gráficamente en ejes rectangulares en que las abscisas serán los valores de V y las ordenadas los valores de I. Una línea recta de pendiente positiva con origen en cero nos representará el punto de equilibrio, o sea cuando el par es nulo. La parte superior de esta línea inclinada corresponderá a pares positivos y la inferior a pares negativos.

Es más práctico representar la operación de un relevador de impedancia mediante el diagrama de impedancia fig. 4.1, página 55, en que se muestra la longitud del radio vector (Z) según la magnitud de la relación de V a I y el ángulo θ entre éstos. Cuando el par es positivo el radio vector es menor (el círculo de radio Z_1 , por ejemplo) y cuando el par es negativo el radio vector será mayor (el círculo de radio Z_2 , por ejemplo).

Como la bondad de un relevador depende de la rapidez de su operación, es evidente que el tiempo será un factor determinante. Se han logrado relevadores llamados de Alta Velocidad, cuyos principios se han aplicado a todos los tipos de relevadores.

Con la unidad direccional, es posible que en el diagrama de impedancias se desfase la línea representativa de las impedancias un cierto ángulo respecto a los ejes R-X. Esto permite que el relevador opere solamente en la zona de par positivo, enviando la orden de apertura del o de los interruptores sobre los cuales actúa.

Esta unidad direccional deberá ser aplicable:

- 1).- Si se prevé un retorno de corriente superior al 80% de la corriente para la cual la protección instantánea está ajustada.

- 2).- Si se prevé un retorno de corriente mayor al 25% del mínimo de corrientes, en aquel circuito en que las unidades de sobre corriente están fijadas para determinado sentido.
- 3).- Si se desea obtener un mínimo de operación (pick up) abajo del doble de corriente de plena carga, y donde la corriente de carga está en la dirección en que la unidad direccional no ordena una operación de día paro de los interruptores a su cargo.

La característica de la unidad o elemento direccional está indicada por la línea a b, figura 4.2, pág. 55.

Si tratamos de visualizar la característica de esta unidad, despreciaremos el efecto del resorte y entonces el par estará dado por:

$$T = K_1 VI \cos (\theta - \delta) \quad (4.6)$$

cuando el par es cero:

$$K_1 V I \cos (\theta - \delta) = 0 \quad (4.7)$$

Como K_1 , V e I no siempre son cero, se requerirá que:

$$\cos (\theta - \delta) = 0$$

o bien que $(\theta - \delta)$ valga $\pm 90^\circ$

$$\therefore \theta = \delta \pm 90^\circ \quad (4.8)$$

La expresión (4.8) nos describe la característica de desfaseamiento de las líneas de par cero y par máximo.

Ahora bien, las 3 unidades de impedancia, de alta velocidad, están diseñadas para ser ajustadas a diferente valor de impedancias, equivalente a tres diferentes longitudes de línea denominadas zonas, medidas a partir del punto donde se encuentra instalado el relevador. La zona 1 (Z_1), fig. 4.2, página 55, está limitada por medio círculo con centro en el lugar donde se encuentra el relevador y cuyo radio es Z_1 ; la zona 2 (Z_2) está limitada por medio círculo, concéntrico al primero, de radio Z_2 , de tal modo que Z_2 sea mayor que Z_1 ; la zona 3 abarca medio círculo Z_3 , concéntrico a los anteriores, con radio Z_3 , mayor que Z_2 .

Las dos primeras zonas se usan para protección primaria, mientras que la zona 3 se usa como protección de respaldo para interruptores adyacentes.

El elemento de cada zona estará ajustado para operar con

fallas que se localicen dentro de la zona que le ha sido fijada previamente.

b).- Relevador de Impedancia Modificada:

Este relevador es semejante a un relevador de impedancia, excepto que sus características de operación están desplazadas respecto del de impedancia, según se muestra en la figura 4.3a.

Este desplazamiento es realizado mediante lo que se llama una "corriente de polarización", que consiste en la introducción al voltaje V de un voltaje adicional proporcional a la corriente, lo que origina que el par se modifique.

Esto puede ser expresado matemáticamente como:

$$T = K_1 I^2 - K_2 (V + CI)^2 \quad (4.9)$$

en la cual:

T = par

K_1 y K_2 son constantes dependientes, respectivamente, de los elementos de corriente y voltaje.

El término $(V + CI)$ es la magnitud total en valor eficaz del vector de voltaje V , y CI que involucra el ángulo θ entre \underline{V} e \underline{I} , así como una constante del ángulo mismo en la constante C . Corresponde tal término, entonces, a la ecuación de un círculo cuyo centro se ha desplazado del origen de los ejes $R-X$.

El relevador de impedancia modificada es particularmente eficiente para la protección de líneas largas muy cargadas, logrando tal protección con facilidad y exactitud, pues aun tratándose de cargas máximas previstas, ya sea constantes o variables, sabe distinguir cuándo debe dar la orden de disparo a los interruptores y cuándo no; esto no sucede con el relevador de impedancia que confunde en ocasiones, tratándose de ciertas magnitudes, una fluctuación de carga con una falla en la línea. Esto puede explicarse en la figura 4.3 b, página :

Consideremos un sistema simple de dos máquinas M y M_1 conectadas por una línea de transmisión, en el cual todas las impedancias tienen la misma relación R/X . La línea $OACBO'$ representa la impedancia de una máquina a otra, y la línea $grue$

sa AB representa la línea de transmisión en estudio. La impedancia que ven los relevadores es la que se encuentra entre los ejes $+X$ y $+R$. luego la impedancia que ven los relevadores situados en A para una falla en la línea, será la línea AB con valores desde cero hasta la impedancia total de la línea.

Si los voltajes en los dos extremos del sistema son iguales en magnitud y están en fase al principio, y después fuera de fase, resultará una transferencia de carga sobre la línea AB y el lugar geométrico de la impedancia vista desde A, se encontrará a lo largo de la línea L-L', o sea, la impedancia vista por el relevador desde A, es el vector de impedancia trazado desde el origen A hasta el punto C. El punto C está equidistante de O y O'.

Los puntos de cero carga, correspondientes a un ángulo cero entre las máquinas, están en el infinito en cualquiera de las dos direcciones sobre la línea L-L' y el punto de plena carga y 180° fuera de fase se encuentra en C. Para cualquier carga intermedia, su punto estará en un sitio determinado de la línea L-L', correspondiendo el punto L al paso de la energía desde A hasta B y el punto L' al paso de energía de B a A.

Como se ve en la figura, el círculo mayor corresponde a un relevador de "impedancia", mientras que el círculo menor corresponde a un relevador de "impedancia modificada".

Si se observa la figura, ambos círculos tienen el mismo alcance, o sea más allá del punto B.

El relevador de impedancia modificada, cuyo círculo es el pequeño, puede dar la orden de disparo de interruptores para todas las fallas que se presenten en la línea, pero es menos probable que se ordene el disparo para cargas muy grandes o fluctuaciones de la carga. Las cargas sucesivamente mayores están representadas avanzando a través de los puntos L, D y E a lo largo de la línea L-L'.

Se podrá observar que el relevador de impedancia modificada dará órdenes de disparo para fallas o cargas en el arco acziurada N solamente, mientras que el relevador de impedancia

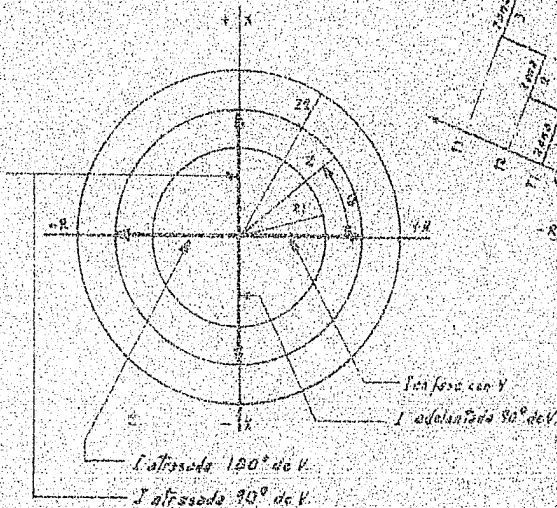
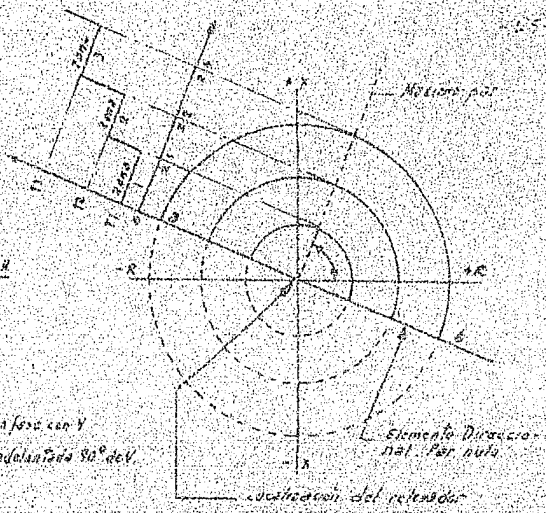


DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS R-X
Fig. 4.1.



CONSTITUCIÓN DEL RELEVADOR
CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN
DEL RELEVADOR DE IMPEDANCIA
CON ELEMENTO DIRECCIONAL.
Fig. 4.2.

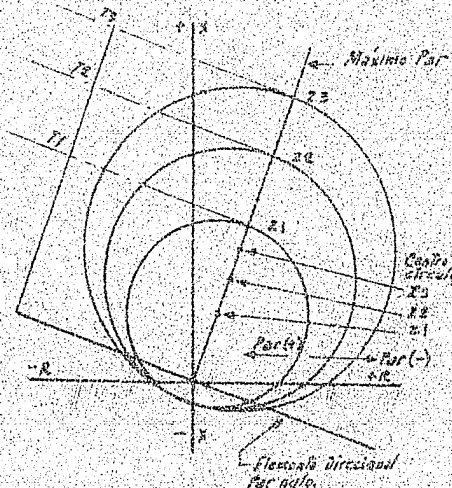


Fig. 4.3 (a)

CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN
DEL RELEVADOR DE IMPEDANCIA
MODIFICADA.

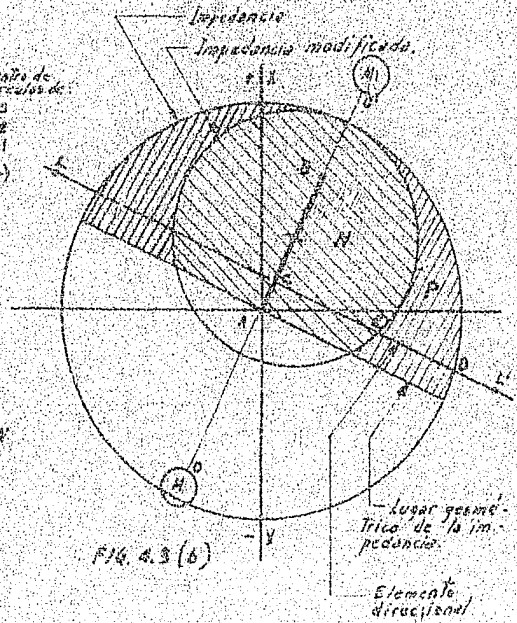


Fig. 4.3 (b)

cia dará órdenes de disparo tanto en el área II como en el área P.

La operación indicada sucede en cada una de las 3 zonas.

El ejemplo explicado anteriormente solo se ha hecho para la zona 1 (Z₁).

c).- Relevador tipo de Reactancia.

Este relevador está formado por una unidad de reactancia, un elemento de sobrecorriente y un elemento direccional de corriente y voltaje en el que ya sea la corriente o el voltaje, se oponen o ayudan al elemento de sobrecorriente, dependiendo del ángulo entre ambos. En otra palabra, un relevador de reactancia es un relevador de sobrecorriente con restricción direccional. Como en los relevadores anteriores, también existe un resorte que suma su efecto de par al producido por el voltaje.

El elemento direccional está diseñado para desarrollar un máximo par negativo cuando la corriente está atrasada respecto al voltaje un ángulo de 90°.

Si llamamos al efecto del resorte K₃, el par total producido será:

$$T = K_1 I^2 - K V I \sin\theta - K_3 \quad (4.10)$$

donde θ se ha llamado al ángulo de atraso de I respecto de V. El punto de balance del par será:

$$K_1 I^2 = K_2 V I \sin\theta + K_3 \quad (4.11)$$

en la cual, dividiendo entre I² ambos miembros:

$$K_1 = K_2 \frac{V}{I} \sin\theta + \frac{K_3}{I^2} \quad (4.12)$$

$$\text{Si } \frac{V}{I} \sin\theta = Z \sin\theta = X = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2} \quad (4.13)$$

y como en los casos anteriores, despreciamos el efecto del resorte:

$$X = \frac{K_1}{K_2} \quad (4.14)$$

que indica que la reactancia es constante.

Siendo constante la reactancia de este relevador, su ca-

racterística de operación, representada en ejes R-Z, quedará definida por una recta paralela al eje de las R como puede verse en la fig. 4.4, pág. 59.

Si tomamos en cuenta el efecto del resorte, se originará un desplazamiento de la línea característica de la operación hacia el eje R y paralela a sí misma.

Si, por otra parte, consideramos la ecuación del par (4.10) como:

$$T = K_1 I^2 - K_2 V I \cos(\theta - S) - K_3 \quad (4.15)$$

en la que S es un ángulo diferente de 90° , obtendremos una nueva línea característica de operación, pero que ya no será paralela al eje R. Esta es la línea a a' que se ve en la figura 4.5, página 59.

Un relevador de este tipo para la protección de una línea de transmisión no tiene unidad direccional simple como los relevadores de impedancia, porque ordenaría el disparo bajo condiciones de carga normal a factor de potencia muy cercano a la unidad. Este relevador requiere de una unidad direccional especial denominada unidad de arranque, que es inoperante bajo condiciones de carga normal. El tipo de unidad usado tiene a su vez un elemento con restricción de voltaje que se opone al elemento direccional.

La ecuación final del par resultará entonces:

$$T = K_1 V I \cos(\theta - S) - K_2 V^2 - K_3 \quad (4.16)$$

que al quedar balanceado:

$$K_2 V^2 = K_1 V I \cos(\theta - S) - K_3 \quad (4.17)$$

Dividiendo entre $K_2 V I$ ambos miembros:

$$\frac{V}{I} = Z = \frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - S) - \frac{K_3}{K_2 V I} \quad (4.18)$$

Si ahora sólo fijamos nuestra atención al efecto eléctrico, eliminando el efecto del resorte:

$$Z = \frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - S) \quad (4.19)$$

Esto da una característica circular cuyo diámetro es independiente del voltaje o la corriente. (Unidad de arranque R, fi-

gura 4.6, pág. 59).

Es interesante observar que la unidad de arranque llena una doble función: la primera es una función direccional y la segunda es proveer la tercera zona de detección de fallas.

La característica de tiempo es similar a la de los relevadores de impedancia.

d).- Relevador Tipo Mho.-

Este relevador fue una consecuencia del relevador de reactancia brevemente explicado en los párrafos anteriores.

Está formado esencialmente por un cilindro de inducción; tres unidades de alta velocidad para operar con mhos, denominados M1, M2 y M3, y una unidad medidora de tiempo o timer.

La figura 4.7, página 59, representa el diagrama de sus características de operación, las cuales son muy semejantes a las de los relevadores descritos anteriormente.

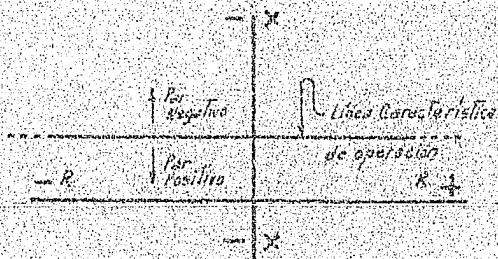
2.- Relevador de Protección Piloto.-

La protección de líneas de transmisión mediante el sistema de hilo piloto, ha sido desarrollado utilizando dos hilos adicionales de interconexión de las dos centrales o subestaciones localizadas en los extremos de la línea por proteger, conectados al equipo de protección.

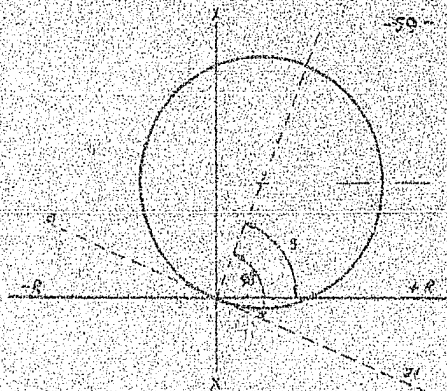
Este tipo de relevador no es aplicable a líneas con ramificaciones, sino solamente a una línea o tramo de línea. La razón de ésto es que el equipo utiliza transformadores saturables que no permiten usar en serie con el hilo piloto más de dos relevadores, y éstos son los que corresponderán a cada extremo de la línea protegida, como puede verse en la figura 4.8, página 62.

Ciertas funciones de las corrientes de línea transportadas a través de 2 hilos, se comparan entre sí en el equipo de relevadores de protección por hilo piloto, instalados en ambos extremos de la línea. Fig. 4.8, página 62.

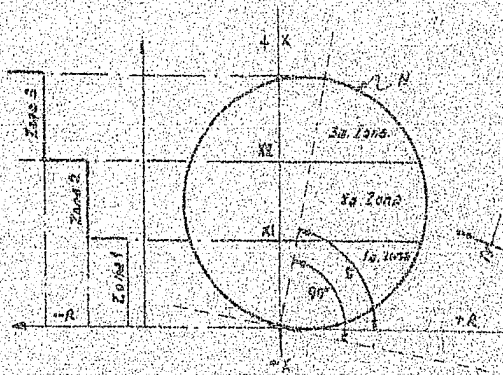
Existen tipos de protección de hilo piloto operados con corriente directa, pero cada día van siendo sustituidos por tipos que operan con corriente alterna, ya que los primeros requieren de un banco de baterías que exige un constante mante-



CARACTERÍSTICA DEL RELEVADOR TIPO REACTANCIA
FIG. 4.4

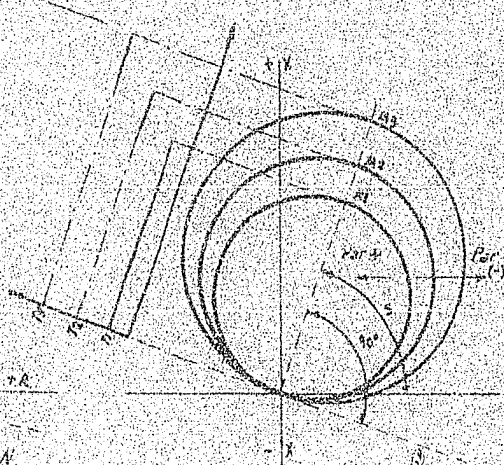


CARACTERÍSTICA DE OPERACION DE UN RELEVADOR TIPO REACTANCIA CON RESTRICCIÓN DE VOLTAJE.
FIG. 4.5



CARACTERÍSTICA DE OPERACION DE UN RELEVADOR DE REACTANCIA CON ELEMENTO DIRECCIONAL CON RESTRICCIÓN DE VOLTAJE.

FIG. 4.6



CARACTERÍSTICAS DE OPERACION DE UN RELEVADOR TIPO MHO

FIG. 4.7

nimiento, independientemente del normal que supone el resto del equipo. Los de corriente directa se aplican a sistemas de corta longitud y susceptibles de tener derivaciones en uno o más puntos de la línea para poder conectar equipos de protección en tales puntos. Es, en realidad, un equipo destinado a aplicaciones muy especiales.

En cambio, el relevador de corriente alterna presenta mayores ventajas por su mayor versatilidad de adaptación a problemas de protección de líneas, por su inmunidad a fluctuaciones de carga y a pérdidas de sincronismo, etc.

Nos concretaremos a estudiar brevemente los tipos operados con C. A.

Este tipo de relevador es esencialmente un relevador de corriente diferencial.

La corriente que opera los relevadores y circula por los hilos pilots es tomada de transformadores de corriente, por lo tanto la magnitud de la corriente es baja y a un potencial muy reducido, de manera que pueda circular ya sea por hilos telefónicos o por hilos especiales, así como por los relevadores, sin perjuicio alguno para el equipo ni para el personal.

Los relevadores de C. A. se clasifican en dos tipos:

El primer tipo es el llamado de "Corriente Circulante", en el que normalmente está circulando una corriente a través de los secundarios de los TC's y por el hilo piloto. Su operación es igual a la de un relevador tipo diferencial, sólo que se usan dos relevadores alimentados por los TC's en lugar de uno, o sea uno en cada extremo de la línea, con el fin de que el relevador quede cerca del interruptor sobre el cual va a operar. Un esquema de este relevador se muestra en la figura 4.9, página 62.

El segundo tipo es el llamado de "Voltaje en Oposición", (figura 4.10, pág. 62), en el cual, debido a su forma de conexión, normalmente no circula corriente a través del hilo piloto.

Se utilizan dos relevadores, uno a cada extremo de la línea, del tipo de corriente balanceada. Los TC's son conectados en tal forma que los voltajes a través de las bobinas de

restricción y las dos terminales del hilo piloto están en oposición, impidiendo que circulen a través del hilo piloto mientras se mantenga una circulación de corriente de carga normal en la línea protegida y por tanto se asume la condición de que no hay un desbalance de corrientes en los TC. En el caso de un desbalance entre los TC de ambos extremos de la línea, no originados por una falla, la bobina de restricción impedirá la operación incorrecta del relevador.

En caso de una falla en la línea protegida se establecerá un desbalance en las corrientes, lo que ocasionará una circulación de corriente en el hilo piloto y consecuentemente a través de la bobina de operación de cada relevador extremo de la línea; los relevadores actuarán enviando la orden de apertura a los interruptores.

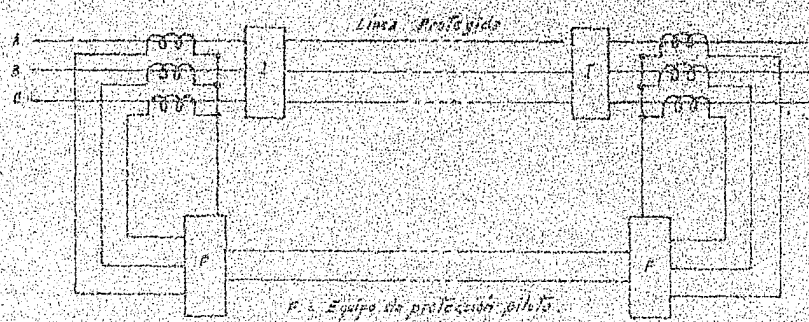
Es interesante hacer notar que este tipo de protección requiere una vigilancia cuidadosa en cuanto al hilo piloto se refiere. No deberá permitirse que en momento alguno fallen. La conexión de los hilos piloto deberá ser apropiada para que puedan conectarse a tierra, protegiendo así a los hilos contra voltajes elevados, ya sea directos o inducidos.

3.- Relevador de Protección por Onda Portadora.-

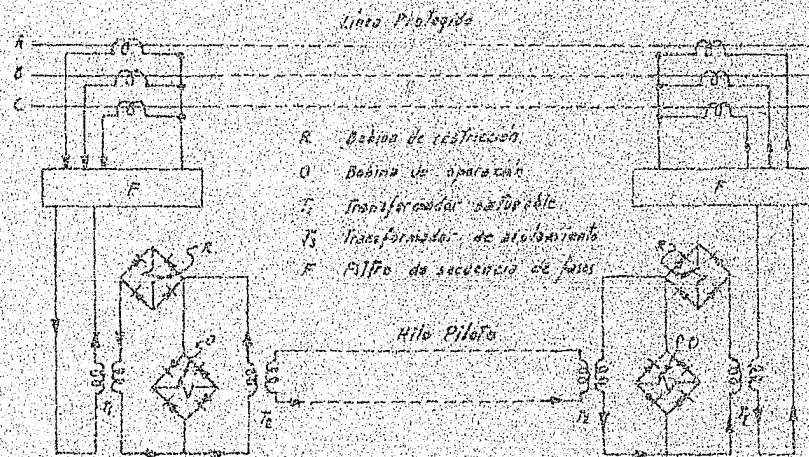
Este relevador es un sistema que participa de la característica de la protección por hilo piloto, en cuanto se refiere a un conductor para transmitir las corrientes o voltajes de un extremo al otro de la línea, solamente que el sistema de Onda Portadora utiliza un conductor de la propia línea que protege para la interconexión de los equipos extremos de la línea, en vez de dos hilos especiales, que son los hilos piloto.

La transmisión de corrientes se efectúa por ondas de alta frecuencia, de dos bandas distintas, lo que ha exigido dividir estos sistemas de protección en:

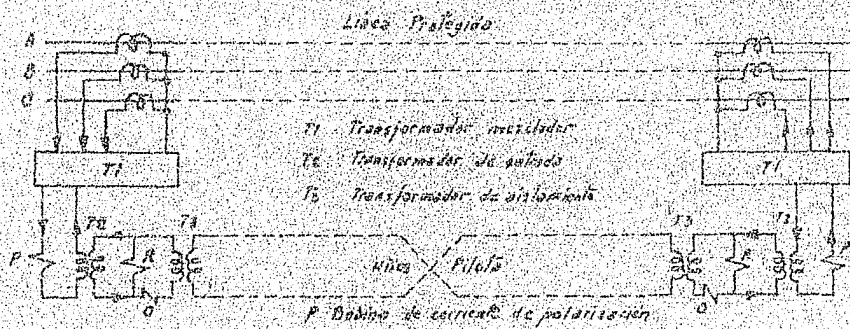
a).- Un sistema de protección de Corriente Portadora que opera con frecuencias de radio entre 30 y 200 KC, y la cual viaja sobre el conductor de la línea y entre un extremo y otro de ésta.



E = Equipo de protección piloto.
SISTEMA DE PROTECCION PILOTO.
 FIG. 4.8



RELEVADOR PARA HILO PILOTO DE CORRIENTE CIRCULANTE.
 FIG. 4.9



P = Bobina de corriente de polarización.
RELEVADOR PARA PROTECCION PILOTO TIPO DE VOLTAJE EN OPOSICION.
 FIG. 4.10

b).- Un sistema de protección de Micro Onda que opera con frecuencias del orden de 900 a 6000 Mc. y que viaja a través del espacio, sin requerir la presencia de un conductor entre ambos extremos de la línea, donde se encuentran localizados los equipos de protección.

Como puede observarse en la figura 4.11, página 66, el relevador de protección por Onda Portadora requiere un equipo adicional consistente esencialmente en una trampa de onda conectada en la línea, condensador de acoplamiento, transmisor y receptor de corriente portadora, y transformadores de corriente y potencial.

Debido a la velocidad extraordinaria con que se propagan las ondas de alta frecuencia (300 000 Km/seg.), el sistema de onda portadora es un dispositivo que elimina totalmente el tiempo entre zonas. Esto hace que este sistema sea de acción ultrarrápida.

Los relevadores que nos ocupan, tanto el de corriente portadora como el de micro onda, han permitido ser clasificados por la forma de operar, en relevadores de Comparación Direccional y relevadores de Comparación de Fase.

a).- Relevadores de Comparación Direccional.-

Estos operan en conjunto con relevadores de distancia como protección de respaldo, utilizando ciertos elementos de este último en forma común. Este es el caso de los elementos de impedancia escalonada, o zonas, usados por el relevador de comparación direccional como elementos fundamentales de actuación.

Como su nombre lo indica, la operación de estos relevadores se basa en la comparación de las corrientes detectadas en ambos extremos de la línea, por lo que respecta a su dirección. Según se hayan previsto tales direcciones, podrá ordenarse o no, el disparo de interruptores.

Estos son relevadores aptos para usarse en sistemas ramificados ya que proporcionan una mejor discriminación entre la variación de las cargas y las fallas, sobre todo cuando éstas se suceden en las derivaciones y no se desea que la línea principal quede fuera de servicio.

También son aplicables estos relevadores en los casos en que se desee operar con corrientes de falla relativamente pequeñas, inferiores al doble de la corriente de plena carga.

El mecanismo de operación, en su forma general, es el siguiente:

Si ocurre una falla en un sitio de la línea y esa falla la alcanzan a ver los relevadores de distancia mediante su elemento, por ejemplo, de la zona 3 (Z3), se cierra el circuito de arranque del equipo de onda portadora y envía una señal estableciendo un circuito tal, que el relevador de arranque del receptor opere. Este, al operar, ordena inmediatamente la apertura del interruptor de línea correspondiente, dejando fuera de servicio el circuito que puede ser perjudicado por la falla. Cosa similar sucederá con las otras zonas, Z1 y Z2.

b).- Relevadores de Comparación de fase.-

Estos relevadores se diferencian funcionalmente de los anteriores, en que se compara la relación de fase entre corrientes tomadas de ambos extremos de la línea.

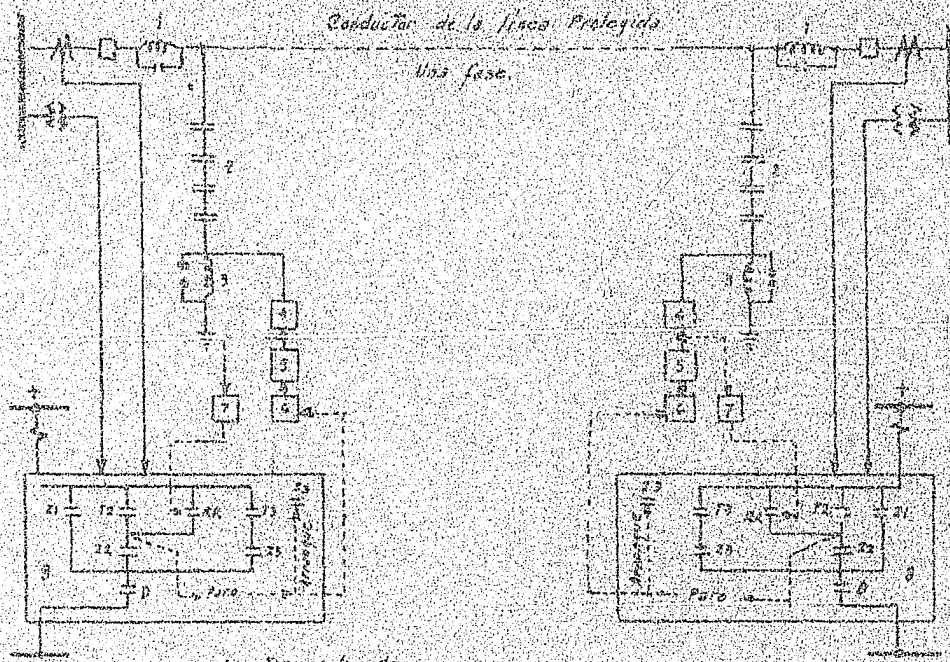
Si las corrientes en ambos extremos de la línea están en fase y tienen la magnitud de una falla, los transformadores de cada extremo envían una corriente portadora en semi ciclos, en forma alternada, dando como resultado una corriente sin interrupción de un extremo a otro, que permitirá dar la orden de arranque de cada receptor y éstos, a su vez, mandan al disparo del interruptor correspondiente, en ambos extremos de la línea.

Este tipo de relevador de muy alta velocidad, es de fácil adaptación a cualquier sistema de protección ya establecido; no requiere de transformadores de potencial, ni da órdenes de disparo por corrientes de tierra inducidas por alguna línea paralela.

De los relevadores descritos, los más aconsejables como protección básica para líneas de transmisión largas, son los de distancia y los de onda portadora, a los cuales pueden ser agregadas otras muchas protecciones de respaldo, como direccionales, de sobre corriente, de corriente balanceada, etc.,

dependiendo de la complejidad del sistema y del grado de protección y flexibilidad que quiera darse a la operación del mismo.

Conductor de la línea protegida
Una fase.



- 1. Trampa de onda
- 2. Condensador de acoplamiento
- 3. Relé de R.F.
- 4. Unidad entada de línea
- 5. Amplificador de potencia
- 6. Oscilador inverso
- 7. Receptor
- 8. Relé de control

La línea punteada indica simbólicamente la sucesión de control

SISTEMA DE PROTECCIÓN POR ONDA PORTADORA

FIG. 2.11

C A P I T U L O V

ESTUDIO DE UN CIRCUITO ELECTRONICO QUE PERMITE LA DETECCION DE FALLAS EN LINEAS Y SU APLICACION EN SISTEMAS DE TRANSMISION.

La Ingenieria Electronica se ha aplicado a todas las actividades técnicas y ha encontrado un vasto campo en la Ingenieria Eléctrica, en donde una multitud de circuitos electrónicos, con variadísimas aplicaciones, ha venido a evolucionar procedimientos de cálculo, diseño, construcción, medición, prueba y mantenimiento de equipos y maquinaria, etc.

Desde el punto de vista de la investigación, la Ingenieria Electrónica ha logrado obtener resultados maravillosos, de futuro imprevisible, en un tiempo tan corto, que hace un cuarto de siglo la mente humana no hubiera podido siquiera imaginar.

Pero volviendo al tema de líneas de transmisión largas, ya que hemos tratado acerca de su comportamiento general, sus características estructurales, las fallas que se presentan en

dichas líneas y los relevadores como detectores de esas fallas, vamos ahora a tratar de referirnos a los adelantos que ha marcado la electrónica al ser aplicada a la detección de fallas en sistemas de transmisión.

La Sierra Electronic Corp., a principios de la década pasada, fabricó un circuito electrónico denominado Analizador de Fallas en Líneas, diseñado para la rápida localización de fallas en líneas de transmisión, tales como cortos circuitos, circuitos abiertos, conexiones a tierra, así como para localizar derivaciones, capacitores, bancos de transformadores y transposiciones en la línea, usándose también para la localización de fallas en cables de baja o moderada atenuación teniendo en cuenta la más baja velocidad de propagación inherente a los cables.

Este aparato se ha usado con éxito por el Departamento de Laboratorio de la Comisión Federal de Electricidad en varias líneas de transmisión, para hacer una serie de mediciones e investigaciones en varios de los circuitos de las líneas de 150 KV. del Sistema Miguel Alemán, y los resultados principales se incluyen en otra parte de este capítulo.

Antes, haremos una breve descripción del aparato localizador de fallas en líneas.

a).- Parte física:

En su parte frontal, ver fotografía 5.1, página 69, se observa la pantalla de un osciloscopio con una escala horizontal calibrada en millas (10 divisiones de 10 millas cada una). A la derecha se encuentra un disco calibrado (o dial) con dos escalas: de 5 a 25 y de 20 a 100 millas. En la parte inferior una serie de perillas destinadas al foco, intensidad, posición vertical del haz electrónico; posición horizontal del mismo haz; ganancia horizontal; interruptor de encendido; control de tres posiciones: marcador fuera, marcador dentro y barrido retardado; control de rango de escalas del dial con dos posiciones: 25 y 100 millas; control del rango de barrido con 4 posiciones: 5, 25, 50 y 100 millas. En la parte posterior se encuentra la terminal de entrada y la terminal de tierra del

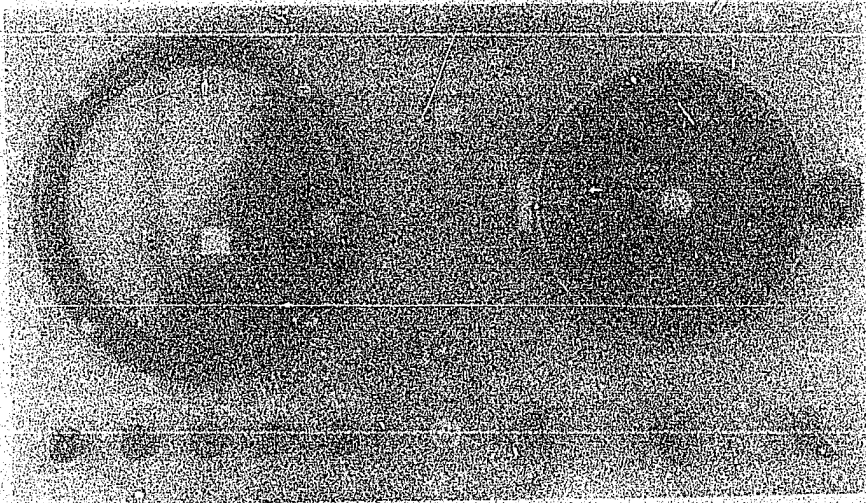


Foto 5.1

instrumento, así como la conexión para la alimentación de CA. 125 V. y fusibles.

b).- Objeto:

El objeto que se persigue con este instrumento es detectar en la pantalla del osciloscopio una marca que indique, sobre la escala calibrada, la distancia y el tipo de falla permanente que ha sufrido una línea de transmisión que desea analizarse. La distancia puede ser leída con mayor precisión en dial, en cualquiera de sus escalas. La naturaleza de la falla se podrá conocer por el signo y amplitud de una marca especial, como se explica más adelante.

c).- Conexión del instrumento y forma de efectuar la medición:

La terminal (LINE) se conectará a la fase de la línea de transmisión que desea medirse, a través de un condensador de acoplamiento del tipo usado en Onda Portadora. La terminal (GROUND) se conectará a otro condensador de acoplamiento conectado a una segunda fase y a su vez a tierra.

El instrumento en cuestión contiene un circuito generador de pulsos de 1000 volts de amplitud máxima y un microsegundo de duración cada uno. Estos pulsos son enviados a la línea bajo prueba, donde se propagan a lo largo de ella a una velocidad que depende de la construcción de la línea. Cada vez que un pulso encuentra un cambio de impedancia en la línea ya sea motivado por una discontinuidad, por un corto circuito entre fases, por un corto circuito entre fase y tierra, ya sea de la fase sobre la cual se está efectuando la medición o de cualquiera de las otras fases, se refleja en ese punto volviendo al instante por la misma terminal LINE y continuando dentro del circuito hasta llegar a una de las placas verticales del tubo de rayos catódicos del osciloscopio, marcándose una protuberancia muy delgada llamada "pip", sobre una "línea base" de ausencia de pulsos de regreso, como se indica en la figura 5.2, página 72. El pip así producido aparecerá en la pantalla en un punto que corresponderá a la distancia de la línea donde se encuentra la falla, medida desde el extremo de línea donde se encuentra instalado el detector.

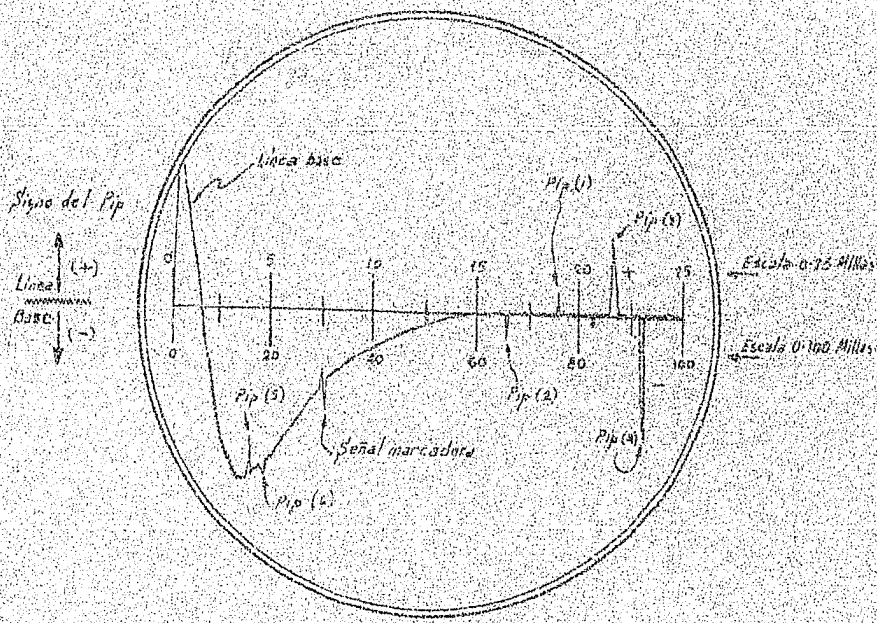
Se cuenta también con un circuito multivibrador que produce una onda rectangular de amplitud ajustable, que pueda ser viata superpuesta sobre la línea base, como una onda senoidal de muy corta longitud, o señal marcadora, la cual puede ser movida de posición a voluntad mediante dial, hasta superponer esta señal sobre el pip producido por los pulsos que regresan de la línea. La lectura sobre la escala de la pantalla y la escala del dial, indicarán el mismo valor en milles donde se registra la falla, en las mismas escalas sobre las cuales se hace la medición. Esto presupone que antes se han ajustado los controles correspondientes de la ganancia horizontal que ajusta la línea base, los de posición horizontal y vertical del haz, así como el control del dial, a la misma escala.

La naturaleza de la falla podrá ser apreciada de acuerdo con la posición y tamaño del pip respecto de la línea base.

Un pip positivo aparecerá siempre que el pulso se encuentre con una elevación brusca de impedancia o una impedancia muy alta (respecto a la impedancia característica de la línea). Esto sucederá cuando se encuentre una fase abierta, o dos, o las tres. (Cuchillas seccionadoras o interruptores abiertos, o bien uno o varios conductores rotos). (Pips 1, 3 y 5, página 72).

Un pip negativo aparecerá siempre que el pulso se encuentre con una reducción brusca de impedancia o una impedancia muy baja (menor que la impedancia característica de la línea). Esto sucederá cuando una, dos o las tres fases estén en corto circuito, ya sea entre sí o con tierra. (Pips 2, 4 y 6, página 72).

La magnitud de la falla en la línea puede ser apreciada mediante la amplitud del pip. Mientras la diferencia entre la impedancia característica de la línea bajo prueba y la impedancia en el punto de falla sea mayor, la amplitud del pip será mayor (pips 5, 3 y 4) y viceversa (pips 2, 1 y 6). Sin embargo, si se conocen las amplitudes de los pips, mediante observaciones previas con fallas intencionales conocidas en diversos puntos de la línea, con valores de impedancia que fluctúan desde cero hasta infinito y se mide a una escala arbitraria adecuada la amplitud de los pips que vayan apareciendo, po



PANTALLA DEL DETECTOR

FIG. 5.2

drá formarse una base de comparación muy valiosa que servirá para el momento en que en realidad se produzcan fallas en la línea durante su operación normal.

d).- Circuito electrónico:

La figura 5.3, página 79, nos muestra un esquema en bloque de los diversos circuitos de que consta el detector de fallas.

d.1).- Fuente de poder de baja tensión (1).

Consta de un rectificador de onda completa con filtro pi, y un regulador de voltaje constante formado por un tetrodo, un pentodo y un diodo regulador de gas. Este circuito regulador de voltaje mantendrá un voltaje de C.D. constante de 300 V. para mantener la polarización positiva de placas y rejillas pantalla de los tubos de todo el circuito electrónico, con excepción del tubo de rayos catódicos.

d.2).- Fuente de poder de alta tensión (2).

Consta de dos rectificadores de media onda, uno de los cuales da un voltaje negativo de 1500 Volts y el otro un voltaje positivo de 1700 V. para alimentar la rejilla de control y el ánodo post-acelerador, respectivamente, del tubo de rayos catódicos. Una derivación en el lado positivo, a 1150 V. provee el voltaje necesario para el circuito de placa del Thyatron generador de pulsos.

El circuito primario de los transformadores de poder que alimentan los circuitos de alta tensión de los rectificadores, tiene un relevador de retardo para permitir que los circuitos de placa no sean alimentados al encender el circuito, sino hasta 3 minutos después de que los filamentos de los tubos han alcanzado su temperatura normal para la correcta emisión de los cátodos.

d.3).- Circuito del tubo de rayos catódicos (3).

Además de la alimentación de alto voltaje ya indicado, está formado por reóstatos para el control horizontal y vertical (4) del haz electrónico, conectados a las placas deflectoras del tubo de rayos catódicos, y por el circuito que inyecta los pulsos de regreso de la línea que llegan a las placas deflectoras verticales, como se indicó en el inciso c). Tam-

bién existe una conexión al circuito de deflexión horizontal, d.4).- Circuito disparador (o Trigger), (5) figura 5.3, páginas 79 y figura 5.4, página 80.

El circuito operado a 50 Hz. genera pulsos a razón de 100 por segundo, pues las rejillas de control de los dos tubos Thyatron que forman este circuito, son excitadas por una onda senoidal del secundario de alta tensión que alimenta las placas del rectificador de la fuente de poder marcada con (1) en la figura 5.3.

El condensador C4 es cargado por un voltaje de pico de 500 V. a través de R1, por el medio ciclo positivo que viene del secundario ya indicado, al punto A. R3 y el capacitor C1 defasa el voltaje respecto al aplicado a la rejilla G1, 90°, permitiendo que el tubo V1 conduzca cuando C4 está completamente cargado. Cuando V1 conduce C4 se descarga a través de R5 y R6, produciendo una descarga o disparo positivo a través de R5 y una descarga negativa a través de R6. Estas descargas producirán una variación de carga o un pulso en los condensadores C6 y C7 respectivamente, que conectarán al circuito siguiente del generador de la señal marcadora (6), figura 5.3, página 79 y 5.5, página 80. Durante el primer medio ciclo de la alternación aplicada en el punto A, B es negativo, lo que impide que el tubo V2 conduzca. En el siguiente medio ciclo, el punto A es negativo y el punto B positivo, lo que permite que el condensador C5 se cargue con un voltaje de 500 voltios. El tubo V2 conducirá ahora cerrando el circuito de C5, el cual descargará positivamente cuando esté completamente cargado a través de R5 y negativamente a través de R6, produciéndose a través de C6 y C7 otro pulso, como se ha indicado antes para V1. Este proceso de producción de pulsos se repite alternativamente lográndose, como ya se indicó, 100 pulsos con alimentación de 50 Hz.

d.5).- Circuito generador de la señal marcadora (6) figura 5.3, página 79 y figura 5.5, página 80.

Este circuito lo forma un tubo doble triodo 6SN7. Es un circuito que acopla por cátodo a los dos triodos, formando un multivibrador monoestable. Denominaremos a cada triodo V3A y V3B.

Supongamos que al principio sólo V3B conduce. Cuando un pulso negativo es aplicado a la placa de V3A y a la rejilla de control del V3B proveniente del punto C del circuito disparador, el C7 y C9 (para 100 millas), o bien C7 y C10 (para 25 millas) iniciarán el efecto del multivibrador como sigue: Al ser negativa la rejilla de V3B corta la corriente de placa de este tubo dejando de conducir, desapareciendo la caída de voltaje a través de R11 y R13. Como los dos cátodos están conectados rigidamente, el cátodo de V3A será ligeramente positivo respecto a su propia rejilla, lo suficiente para que el tubo V3A empiece a conducir. Esta condición persiste hasta que la carga negativa de C9 o C10 se reduce lo suficiente a través de R15 para que la rejilla de V3B sea menos negativa y este tubo vuelva a conducir. Esta conducción producirá una caída de voltaje a través de R11 y R13, elevando el potencial positivo de los cátodos. Esto obligará al tubo V3A a dejar de conducir, iniciándose así el mismo ciclo de operaciones descrito, cada vez que en el punto C se recibe un pulso del circuito disparador.

La variación de este circuito genera en el cátodo de los tubos una onda rectangular negativa, la cual será aplicada a la de deflexión vertical del tubo de rayos catódicos V9 a través del condensador C13 y siempre que el interruptor S2A esté en la posición de IN. La duración de la onda rectangular negativa dependerá del voltaje de polarización negativo de la rejilla de control de V3A. Este puede ser ajustado mediante el reostato R10.

El interruptor de doble polo doble tiro S3A-S3B, permite efectuar el cambio de escalas y por tanto de medición, de 25 a 100 millas.

d.6).- Circuito generador de pulsos (7) figura 5.3, página 79 y figura 5.6, página 80.

Este circuito está formado por un Thyatron de hidrógeno 3045 (V5) y uno solo de los dos triodos de un 6BN7 (V4).

Dos de las fases de la línea de transmisión bajo prueba, quedarán conectadas (a través de condensadores de acoplamiento) a las terminales de línea y tierra del detector.

El condensador C11 se carga positivamente a través de R18 con un voltaje del orden de 1150 V. El tubo V5 no conduce.

Un pulso positivo procedente de los tubos V1 o V2 (a través del punto H, figuras 5.4 y 5.6) excitan la rejilla del amplificador por cátodo (cathode follower) del tubo V4 y éste conduce produciendo un pulso positivo a través de R17, que a su vez excita la rejilla de control del V5. Esto hace que el tubo V5 conduzca, permitiendo que el condensador se descargue a través de L y de la línea de transmisión bajo prueba, así como a través de R21 y R22. La descarga del condensador C11, sobre la línea, produce un pulso de 1000 volts con duración de un microsegundo. El valor de L limita el tiempo de elevación del pulso.

Como se ha explicado antes, el pulso regresa sobre la misma línea, tan pronto encuentra un cambio de impedancia. El pulso entra por la terminal de línea, encuentra la oposición de L2 y sigue por R19, R20 y C12, hasta una de las placas deflectoras verticales del tubo de rayos catódicos V9.

R19 y R20 forman un limitador de voltaje que limita el valor del pulso que se inyecta a V9, a un valor adecuado para que no sea perjudicial. Esto se logra con la R20, que es una Thyrite G.E. o resistencia variable, cuyo valor decrece al aumentar el voltaje que se le aplica y viceversa.

d.7).- Circuito de entrada de barrido. (S) figura 5.3 página 79 y figura 5.7 página 81.

Este circuito formado por un doble tródo 6SN7, conectado como un multivibrador moncestable con acoplamiento por cátodo, es similar al usado en el circuito generador de señal marcadora, de la figura 5.5.

El circuito de entrada de barrido permite la introducción de la señal marcadora sobre la línea base que aparece en la pantalla del tubo de rayos catódicos V9 y que coincide en valor a la longitud marcada por el dial.

Para lograr este objeto, se ha hecho que el periodo natural del tubo V6 sea mayor que el tiempo requerido por el máximo barrido de la línea base, que es de 100 millas. El tubo V6 para y arranca la línea base. En otras palabras, corta la lí

nea, introduce la señal marcadora o la señal del pip y deja que continúe la línea base.

El triodo V6A arranca por un pulso positivo proveniente del circuito de la señal marcadora (E, de la figura 5.5). Con el interruptor S2 en posición de OUT o IN, el barrido arranca simultáneamente con el generador de pulsos, o tubo V5, ya que el punto H de la figura 5.5 tiene conexión común con D y con E.

Si el interruptor S2 se encuentra ahora en la posición de barrido retardado (RET.) el arranque del barrido se atrasa al generador de pulsos por un tiempo igual al periodo de operación del generador de la señal marcadora.

En el momento en que el tubo V6A opera, produce una onda cuadrada negativa en su circuito de placa que excita la rejilla de control del tubo V7A que genera la línea base en forma de una onda de diente de sierra. El tubo V6B produce una onda cuadrada positiva, que envía a la rejilla de control del tubo de rayos catódicos V9 (punto M) para intensificar el trazo.

d.8).- Generador de barrido de diente de sierra. (9) figura 5.3, página 79 y figura 5.8, página 81.

Este generador produce una onda de diente de sierra constante de muy reducida amplitud, que aparece en la pantalla del V9 en forma de una línea gruesa, que se le ha llamado en esta descripción como LINEA BASE. El barrido horizontal de esta línea puede ser ajustado mediante el rebobato R29, antes de iniciar la medición o prueba de una línea y combinado este ajuste con el interruptor de cambios S4, que conecta los condensadores C19, C20 y C22 para el rango de 5 a 25 millas, o bien los condensadores C21, C23 y C24 para el rango de 20 a 100 millas. (El grupo formado por R32 y los condensadores del C19 al C24 fijan la constante de tiempo de la onda).

El circuito está formado por un doble triodo 6SN7, denominados V7A y V7B.

Presumiremos que V7A está conduciendo debido a que su rejilla tiene potencial positivo. El voltaje en su placa es de muy bajo valor. Cuando una onda cuadrada negativa proveniente del tubo V6 (por el punto K) se aplica a la rejilla de con

tro de V7A, este tubo deja de conducir, permitiendo que alguno de los condensadores seleccionados por el interruptor S4 se cargue a través de R32, la cual es constante, por lo que puede obtenerse un cambio lineal en el potencial a través de los capacitores y lograr así la forma de la onda de diente de sierra.

El tubo V7B es un amplificador por cátodo, que envía la onda de diente de sierra al tubo V9 a través de los puntos N y P.

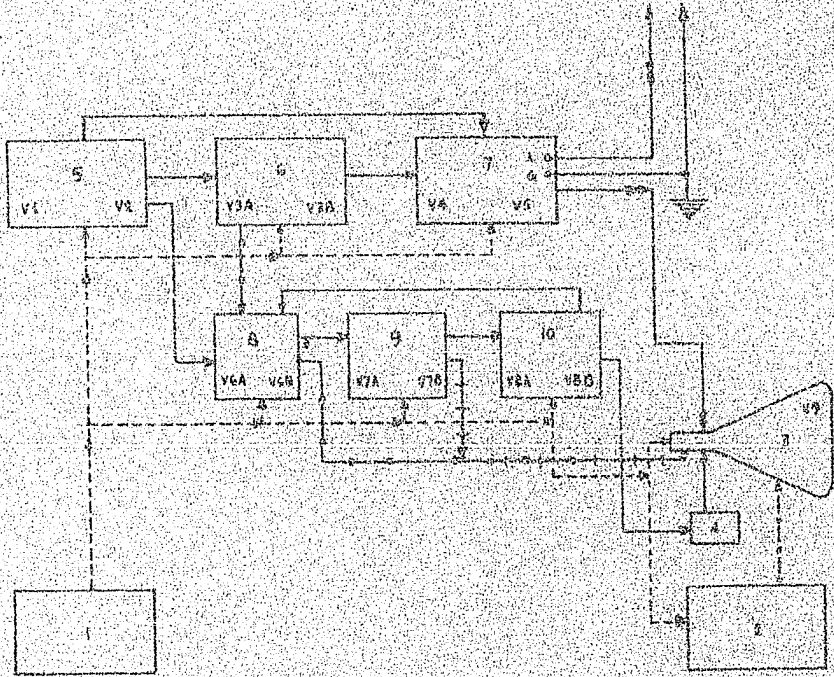
d.9).- Dispositivo para cortar el barrido. (10) figura 5.3, página 79 y figura 5.9, página 81.

El circuito lo forma un doble triodo 6SN7. Dichos triodos se han llamado V8A y V8B.

Una parte del voltaje de la onda de diente de sierra es aplicada al amplificador por cátodo V8A en su rejilla de control (punto P). Este tubo normalmente se encuentra sin conducir. Cuando el voltaje de barrido alcanza una amplitud predeterminada, el tubo V8A empieza a conducir, polarizando positivamente la rejilla del tubo V8B (punto L), lo que hará que este tubo también conduzca.

El efecto del tubo V8A sobre el tubo V8B origina el corte del barrido, ya que es bloqueada totalmente la emisión electrónica del cátodo de V9.

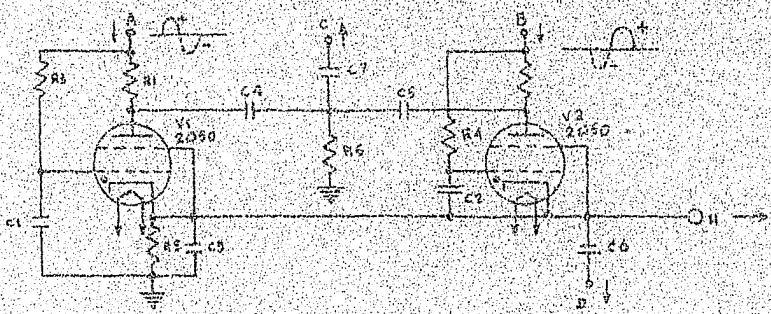
La onda de voltaje de diente de sierra, cuya salida es a través del amplificador por cátodo V8B, permite alimentar las placas deflectoras horizontales del V9, a través de los conductores G26 y G27. Por la forma en que se ha diseñado el circuito del tubo V8B, se ve que efectúa una operación similar a un circuito push-pull.



- Circuito de alimentación de C.D. de Baja Tensión.
- Circuito de alimentación de C.D. de Alta Tensión.
- Recorrido de los Pulsos.
- Regreso de los Pulsos.
- Repetido de la línea base.
- Recorrido de la señal marcadora.

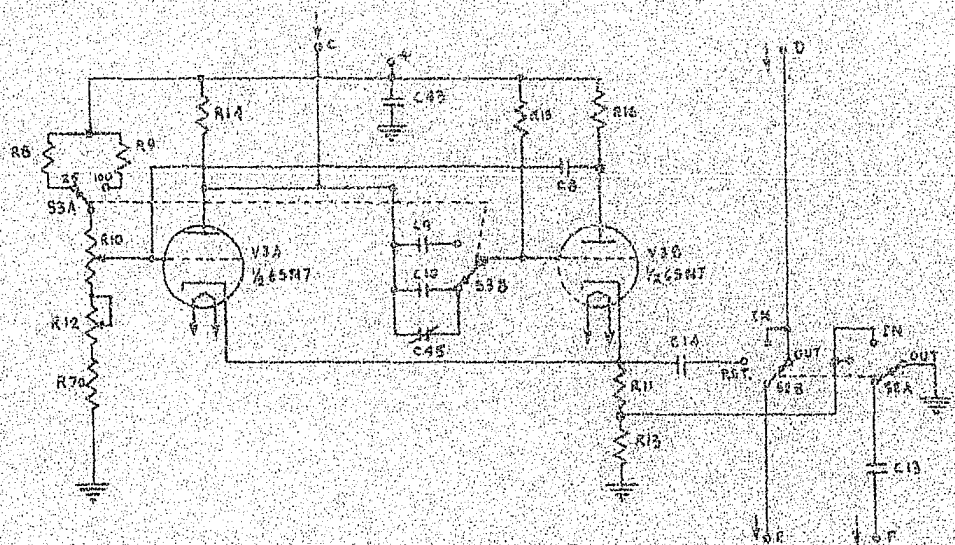
ESQUEMA EN BLOQUES DE LOS DIVERSOS CIRCUITOS DEL DETECTOR DE FALLAS.

FIG. 5.3



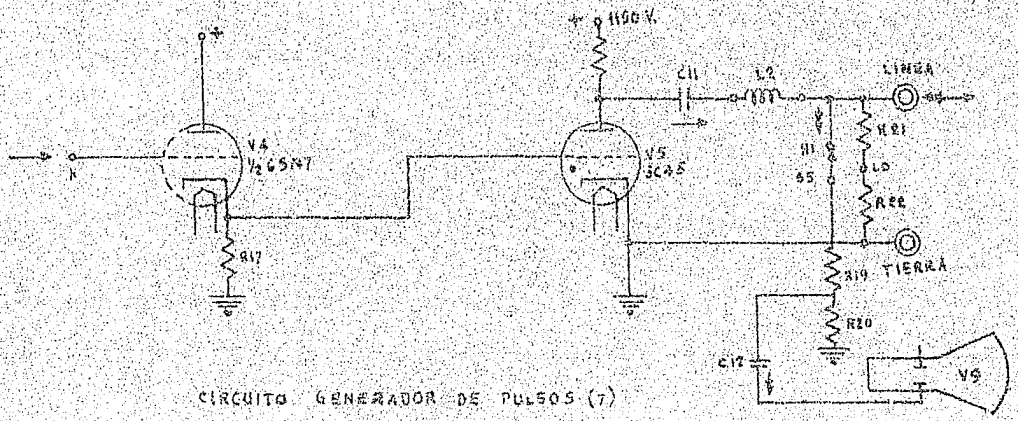
CIRCUITO DISPARADOR O TRIGGER (C)

FIG. 5.4



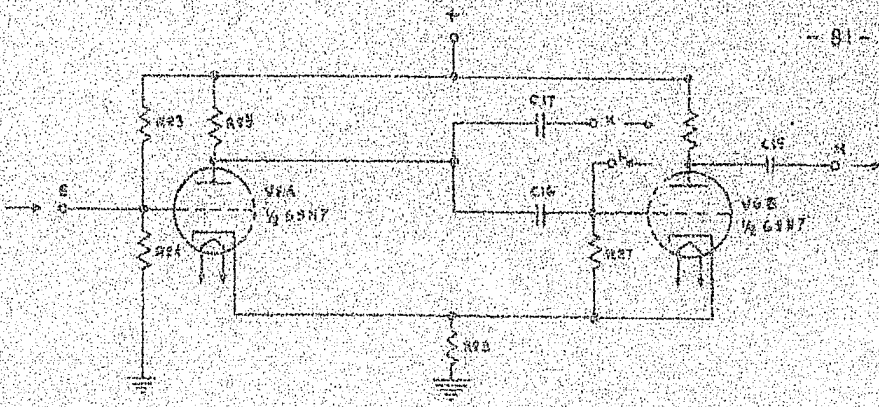
CIRCUITO GENERADOR DE LA SEÑAL MARCADORA (C)

FIG. 5.5

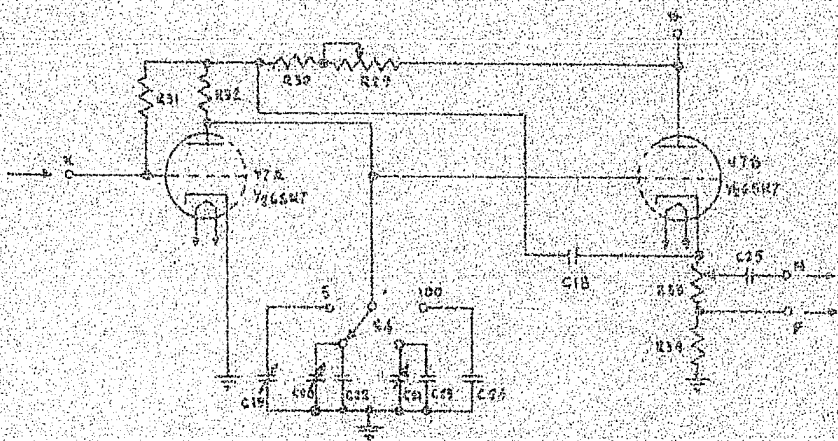


CIRCUITO GENERADOR DE PULSOS (C)

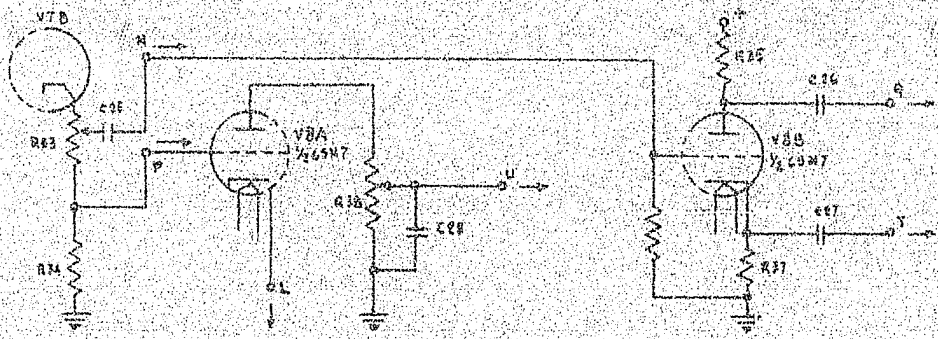
FIG. 5.6



CIRCUITO DE ENTRADA DE BARRIDO (B)
FIG. 5.7



CIRCUITO DEL GENERADOR DE BARRIDO DE DIENTE DE SIERRA (D)
FIG. 5.8



DISPOSITIVO PARA CORTAR EL BARRIDO (D)
FIG. 5.9

Aplicación del Detector de Fallas a una Línea de 150 KV. y 122 Km., entre la Subestación de El Alamo, D.F., y la Planta de Ixtapantongo, Estado de México.

Las pruebas se efectuaron en la Subestación de El Alamo, aprovechando una de las líneas que tienen condensador de acoplamiento en sus tres fases.

Se instalaron cables de control desde los condensadores de acoplamiento que se encuentran a la intemperie de la subestación, hasta un tablero provisional, con 5 interruptores de navaja, conectados de manera que fuera posible en cualquier momento, desde el tablero y junto al Detector de Fallas, conectar éste a cualquiera de las fases, pudiendo hacer combinaciones entre ellas sin pérdida de tiempo.

Las pruebas se realizaron en cinco ocasiones diferentes en que fué posible conseguir licencia en la línea y contar además con linieros que estuvieran efectuando las maniobras requeridas en diversos puntos de la línea. La comunicación con los linieros, entre la Subestación de El Alamo y el lugar de operaciones en la línea, se hizo por medio de la Onda Portadora propia de la línea y por radio.

Las operaciones consistieron en efectuar las conexiones adecuadas en un punto de la línea, según un programa previo.

Se seleccionaron los siguientes puntos para efectuar fallas intencionadas en la línea:

Subestación de El Alamo:

Torre No. 129 (aproximadamente a la tercera parte de la longitud):

Torre No. 266 (aproximadamente a las dos terceras partes de la longitud):

Subestación de Ixtapantongo:

Se realizaron pruebas en 4 sitios, y se pueden clasificar se como sigue:

1er. Grupo:

Fase 1 a tierra y Detección en la misma fase.

" 1 " " " " " fase 2.

" 1 " " " " " " 3.

" 2 y 3 en forma igual que con fase 1.

2o. Grupo:

Fase 1 y 2 a tierra y Detección en fase 1.

" 1 y 2 a tierra " " " 3.

" 2 y 3 y fases 3 y 1, igual que fases 1 y 2.

3er. Grupo:

Fases 1, 2 y 3 a tierra y Detección en una de ellas.

4o. Grupo:

Corto circuito entre fases 1 y 2.

Detección en fases 1 y 3.

Corto circuito entre fases 2 y 3.

Detección en fases 2 y 1.

Corto circuito entre fases 3 y 1.

Detección en fases 3 y 2.

5o. Grupo:

Corto circuito entre las 3 fases.

Detección en una de ellas.

Durante todas estas pruebas se obtuvieron 58 fotografías de la pantalla del tubo de rayos catódicos, con objeto de analizar detenidamente el aspecto de la falla, combinándose con la información escrita realizada en cada prueba y que forma un expediente de más de 50 hojas.

Se ha hecho una selección de algunas fotografías, en las que podrá apreciarse el resultado de las pruebas, así como el funcionamiento del Detector de Fallas.

Foto No. 5.10, página 37.

Torre No. 129.

Corto circuito entre las 3 fases.

Rango de lectura: 5 a 25 millas.

Distancia leída: 18.3 millas = 29.4 Km.

Distancia real en el terreno: 17.6 millas = 28.24 Km.

Posición del interruptor S2 en out. Los pulsos y la señal de barrido están sincronizados.

El error de 3.7 por ciento en más, dado en la lectura del instrumento, se debió a falta de ajuste. Sin embargo, aún así puede encontrarse el factor de corrección, con pruebas previas en la línea, para corregir las lecturas, estando en operación la línea y registrándose una falla real.

Foto No. 5.11, página 87.

Las mismas condiciones anteriores, pero el interruptor S2 se colocó en la posición de retardo. Claramente se ve que el barrido está atrasado respecto de los pulsos. Esto es ventajoso porque el pip puede ser ampliado varias veces y puede apreciarse como una onda amortiguada en vez de un solo ciclo o semiciclo, como se ve en la foto 5.10.

Puede observarse también que el pip indica que se trata de un corto circuito ya que la iniciación de dicho pip es negativa.

Nótese también la forma de la línea base en ambas fotos. Se verá que se trata de la misma línea y sin embargo presenta formas muy diversas. La razón de ello estriba en que cualquier cambio en la impedancia del circuito o en la impedancia característica de la línea determinará una forma distinta para la línea base.

Es lamentable que la definición tan nítida de la línea base que se observa en la pantalla del tubo de rayos catódicos no se aprecie en las fotografías. Esto se debe a que todas las fotos que se tomaron fueron de tiempo, pues aunque se usó película ultrarápida y lenta F:2, no fue posible obtener instantáneas. Esto obligó a investigar la causa por la cual el trazo no era estable, ya que se notaba un movimiento constante de trazos iguales defasados que se transportaban lateralmente de izquierda a derecha haciendo imposible obtener una foto definida del trazo. Se logró descubrir que esto se debía a la superposición de ondas inducidas por la Onda Portadora que se encontraba operando en una línea contigua. Al poner fuera de servicio la Onda Portadora por breves momentos, la interferencia desapareció y se lograron fotos mucho más nítidas como la 5.14.

Foto No. 5.12, página 87.

Presenta las mismas condiciones de la foto 5.10, pero usando un rango de lectura de 0 a 100 millas y el interruptor en out.

Es muy interesante observar que el primer pip corresponde al corto circuito entre fases en la torre 129. No obstante el corto circuito entre fases, los pulsos detectaron la fa

lla y además marcaron los lugares en que se encuentran 1 a 8 transposiciones de la línea, o sea donde se aprecian el 20, 30 y 40 pips con polaridad alternada, y finalmente alcanzaron a detectar corto circuito entre fases en la Subestación de la Planta de Ixtapantongo, en donde se encontraban cerradas las cuchillas de puesta a tierra como medida de precaución. Note se que el pip en este lugar es negativo, como corresponde a un corto circuito.

Foto No. 5.13, página 88.

Muestra un corto circuito a tierra de las 3 fases en la Subestación de El Alamo.

Longitud: 0 m.

Rango: 5 a 25 millas.

Interruptor 82: posición de retardo.

Con el fin de obtener una mayor amplitud en los pulsos y lograr mayor amplitud en los pips, se diseñó un circuito amplificador por placa conectado al Thyatron de salida V.5. Este amplificó los pulsos, la onda de diente de sierra y los pips se amplificaron también.

Como se agregó un amplificador por placa, que defasa 180° la onda de voltaje aplicada a su rejilla, los pips cambiaron de signo y se registraron las fallas con mayor impedancia que la impedancia característica de la línea hacia abajo, y las de menor impedancia, hacia arriba.

Foto No. 5.14, página 89.

Torre 266.

Fase 1 abierta y cuchillas de puesta a tierra conectadas en Ixtapantongo.

Rango de lectura: 20 a 100 millas.

Distancia leída: 54.9 millas - 88.2 Km.

Posición del interruptor 82 en cut.

Circuito amplificador previo al Thyatron, conectado.

La onda portadora fue sacada de servicio.

- a).- El pip que marca la falla es hacia abajo (debido al amplificador).
- b).- El pip que indica corto circuito en Ixtapantongo es hacia arriba.

- c).- La onda de diente de sierra que corresponde a la línea base se ve muy nítida. (Ausencia de interferencia).
- d).- Tanto la onda de diente de sierra como los pips se ven amplificados.

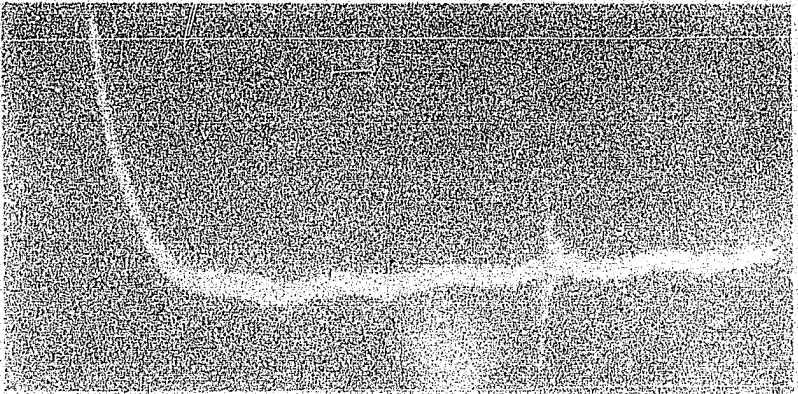


Foto 5.10

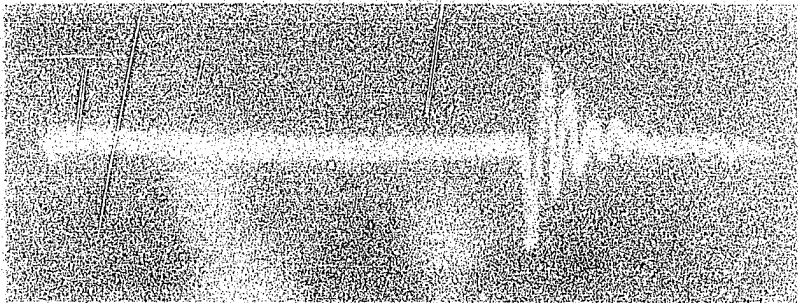


Foto 5.11

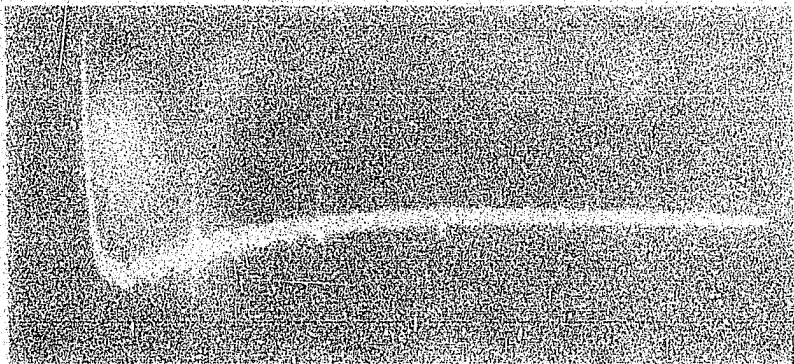


Foto 5.12

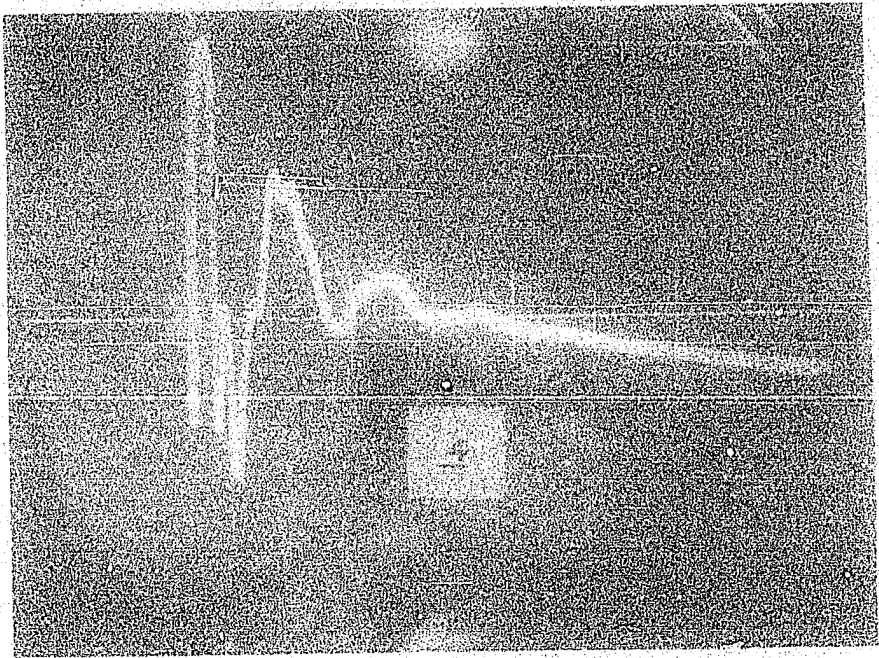


Foto 5.3

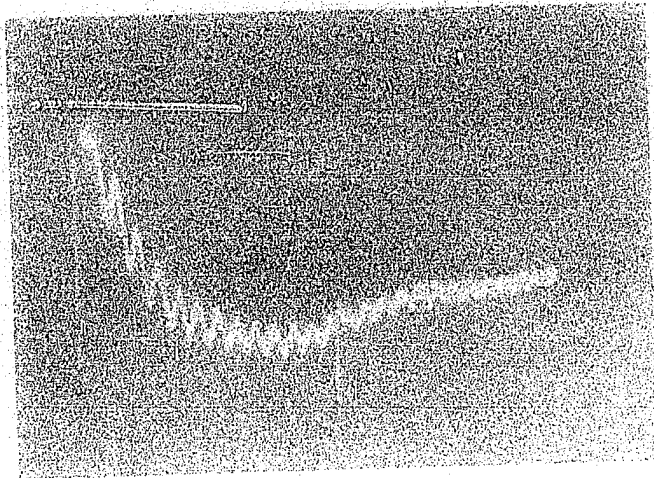


Foto 5.14

Del resumen anterior podrá concluirse que el Detector Electrónico de Fallas para líneas es un magnífico auxiliar para detectar el lugar y naturaleza de las fallas más comunes en líneas de transmisión, que permite efectuar reparaciones muy rápidas en las líneas, poniéndolas en servicio nuevamente en un tiempo mucho menor que el requerido cuando no se cuenta con un localizador de fallas adecuado, pues en este caso, se emplea por localizar sobre el terreno el lugar de la falla para conocer su naturaleza y después repararla.

Unas cuantas horas que esté fuera de servicio una línea de primera importancia, pueden arrojar un costo que bien podría cubrir la inversión de un equipo como el descrito.

Animado por el resultado eficaz de este detector, he obtenido el diseño de un circuito electrónico similar, que sin ser una idea original, presenta algunas ventajas respecto del descrito. Figura 5.15, página 91.

Se trata de un circuito transistorizado, con las ventajas que en seguida se exponen:

- a).- Es un equipo transistorizado, con excepción del tubo de rayos catódicos.
- b).- Su alimentación es por baterías de muy bajo costo.
- c).- Los circuitos deberán ser impresos y en paquetes, a los que corresponderán funciones perfectamente definidas, permitiendo su fácil inspección, mantenimiento y sustitución si es necesario.
- d).- Contiene un circuito oscilador de 800 Hz., que permitirá que los pulsos tengan mayor alcance (250 Km.) sin gran atenuación.
- e).- Tiene amplificación mayor de salida de pulsos.
- f).- Es un equipo realmente portátil.
- g).- Su costo es mucho menor.

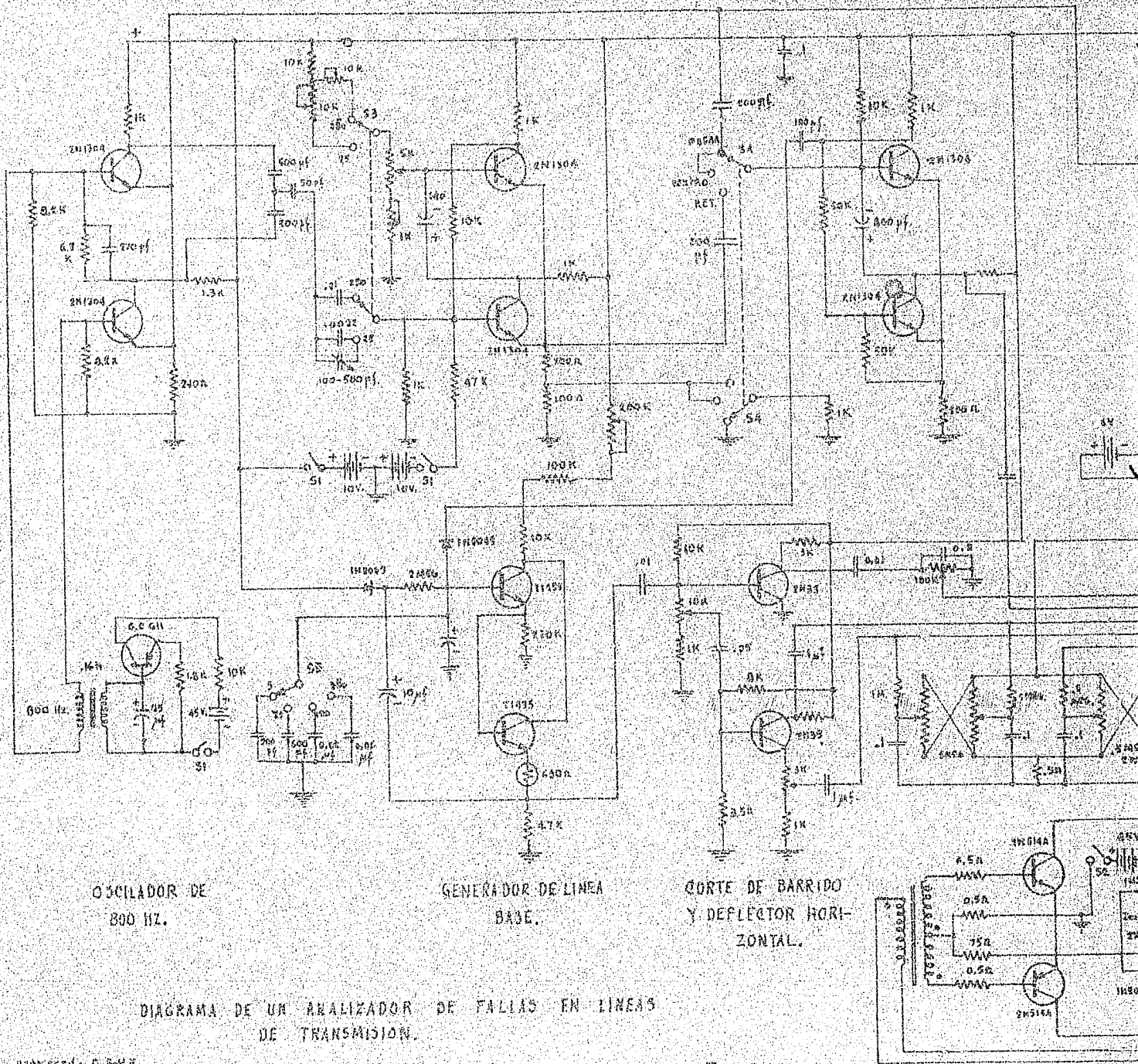
Sería de desear que en este capítulo se incluyeran los cálculos de todo el circuito, pero dado lo voluminoso de ellos han sido excluidos por razones obvias y solamente se incluye el diagrama electrónico correspondiente en su fase inicial. Figura 5.15, página 91.

Como todo diseño electrónico requiere de los refinamien-

tos del laboratorio, es lógico suponer que el circuito proyectado sufrirá modificaciones, algunas ligeras, otras tal vez radicales, al ser sometido a las pruebas de funcionamiento, ajuste y calibración imprescindibles.

DISPARADOR DE PULSOS (TRIGGER). GENERADOR DE SEÑAL MARCADORA.

CONTROL DEL BARRIDO.



OSCILADOR DE
800 HZ.

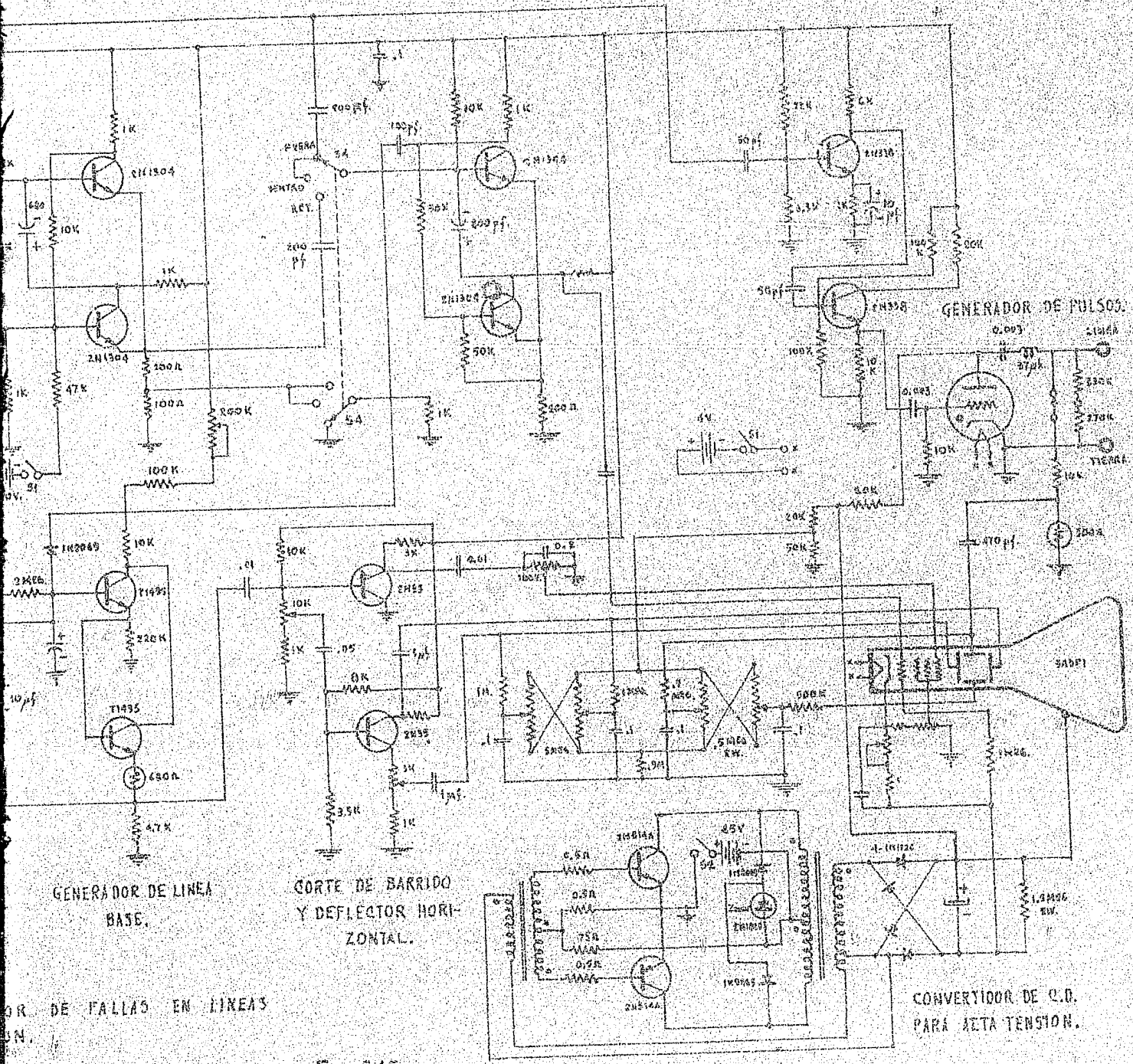
GENERADOR DE LINEA
BASE.

CORTE DE BARRIDO
Y DEFLECTOR HORI-
ZONTAL.

DIAGRAMA DE UN ANALIZADOR DE FALLAS EN LINEAS
DE TRANSMISION.

PROYECTO: R. SCHMIDT.

Fig. 5.15



GENERADOR DE LINEA BASE.

CORTE DE BARRIDO Y DEFLECTOR HORIZONTAL.

GENERADOR DE PULSOS.

CONVERTIDOR DE C.D. PARA ALTA TENSION.

Fig. 5.15

APENDICE I

Obtención de las ecuaciones fundamentales de una línea de transmisión larga. (Figuras A y B, pág. 97).

$$e + de = e + i z dx \quad (I.1)$$

$$\therefore \frac{de}{dx} = iz \text{ volts por unidad de longitud.} \quad (I.2)$$

$$i + di = i + e y dx \quad (I.3)$$

$$\frac{di}{dx} = e y \text{ amperes por unidad de longitud.} \quad (I.4)$$

Diferenciando las ecuaciones (I.2) y (I.4) respecto a x,

$$\frac{d^2 e}{dx^2} = z \frac{di}{dx} \quad (I.5)$$

$$\frac{d^2 i}{dx^2} = y \frac{de}{dx} \quad (I.6)$$

Sustituyendo los valores de $\frac{di}{dx}$ y $\frac{de}{dx}$ de las ecuaciones (I.4) y (I.2), en (I.5) y (I.6), respectivamente:

$$\frac{d^2 e}{dx^2} = z y e = a^2 e \quad (I.7)$$

$$\frac{d^2 i}{dx^2} = z i = a^2 i \quad (I.8)$$

Estas dos últimas ecuaciones representan, respectivamente, la distribución de voltaje y corriente en la línea y tienen la propiedad de que su segunda derivada es igual a a^2 veces las mismas ecuaciones. Sabemos que tal condición la cumplen también las relaciones siguientes de aplicación práctica:

$$\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} = \cos h ax \quad (I.9)$$

$$\frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} = \text{sen } h ax \quad (I.10)$$

La solución de las ecuaciones (7) y (8) será:

$$e = A \cos h ax + B \text{ sen } h ax \text{ volts} \quad (I.11)$$

$$i = C \cos h ax + D \text{ sen } h ax \text{ amp.} \quad (I.12)$$

en las cuales A, B, C y D son constantes arbitrarias cuyos valores sólo dependen de las condiciones terminales de la línea.

Para el extremo receptor en que la longitud es cero, $x=0$, luego

$$E_r = A \cos h \theta + B \operatorname{sen} h \theta = A \quad (I.13)$$

$$I_r = C \cos h \theta + D \operatorname{sen} h \theta = C \quad (I.14)$$

(Puede verse la representación gráfica de las funciones hiperbólicas, en la figura 1-11, páginas 20.

Las ecuaciones (I.13) y (I.14) nos dan los valores de A y C.

De las ecuaciones (I.2) y (I.4) podemos escribir:

$$\frac{dV}{dx} = I_r z \text{ volts} \quad (I.15)$$

$$\frac{dI}{dx} = E_r \text{ y amp.} \quad (I.16)$$

Diferenciando las (I.11) y (I.12) con respecto a x , considerando que $x = 0$ y sustituyendo valores en (I.15) y (I.16), tendremos:

$$Aa \operatorname{sen} h \theta + Ba \cos h \theta = I_r z \quad (I.17)$$

$$Ca \operatorname{sen} h \theta + Da \cos h \theta = E_r \text{ y} \quad (I.18)$$

lo que nos dará los valores de B y D.

$$B = \frac{I_r z}{a} = I_r Z_0 \text{ volts}$$

$$D = \frac{E_r z}{a} = \frac{E_r}{Z_0} \text{ amp.}$$

luego las ecuaciones de distribución del voltaje y corriente en la línea serán:

$$V = E_r \cos h ax + I_r Z_0 \operatorname{sen} h ax \text{ volts.} \quad (I.19)$$

$$i = I_r \cos h ax + \frac{E_r}{Z_0} \operatorname{sen} h ax \text{ amp.} \quad (I.20)$$

Finalmente, si $x = l$, $ax = \theta$, y sustituyendo $\frac{Z}{\theta}$ por z_0 y $\frac{Y}{\theta}$ por $\frac{1}{Z_0}$:

para el extremo generador

$$E_g = E_r \cos h \theta + I_r z \frac{\operatorname{Sen} h \theta}{\theta} \quad (I.21)$$

$$I_g = I_r \cos h \theta + E_r Y \frac{\operatorname{Sen} h \theta}{\theta} \quad (I.22)$$

y para el extremo receptor

$$E_r = E_g \cos h \theta - I_g z \frac{\operatorname{sen} h \theta}{\theta} \quad (I.23)$$

$$I_r = I_g \cos h \theta - E_g Y \frac{\operatorname{sen} h \theta}{\theta} \quad (I.24)$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = A a^2 e^{-ax} = zy A e^{-ax} \quad (11.10)$$

Donde

$$a^2 = zy \text{ ó } a = \pm \sqrt{zy} \quad (11.10)$$

cuyas dos soluciones permiten escribir:

$$E = A e^{\sqrt{zy} x} + B e^{-\sqrt{zy} x} \quad (11.11)$$

Sustituyendo en la ecuación (3) estos resultados:

$$I = \frac{1}{z} \frac{dE}{dx} = \frac{A \sqrt{zy}}{z} e^{\sqrt{zy} x} - \frac{B \sqrt{zy}}{z} e^{-\sqrt{zy} x} \quad (11.12)$$

A y B son constantes de integración que pueden ser evaluadas teniendo en cuenta las condiciones terminales de la línea. Si tomamos por ejemplo el extremo terminal en que tenemos valores E_r , I_r y en que $x = 0$; para las ecuaciones (11.11) y (11.12), tendremos respectivamente:

$$E_r = A + B \quad (11.13)$$

$$I_r = A \sqrt{\frac{z}{y}} - B \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (11.14)$$

y resolviendo los valores para A y B

$$E_r = \sqrt{\frac{z}{y}} = A \sqrt{\frac{z}{y}} + B \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (11.15)$$

$$I_r = A \sqrt{\frac{z}{y}} - B \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (11.16)$$

sumando miembro a miembro y despejando el término en A:

$$2 A \sqrt{\frac{z}{y}} = E_r \sqrt{\frac{z}{y}} + I_r \quad (11.17)$$

para A:

$$A = \frac{E_r}{2} + \sqrt{\frac{y}{z}} \frac{I_r}{2} \quad (11.18)$$

para B:

$$B = E_r - A = \frac{E_r}{2} - \sqrt{\frac{y}{z}} \frac{I_r}{2} \quad (11.19)$$

luego la ecuación (11) nos dará la ecuación general para el voltaje del extremo generador si en (11) hacemos $E_g = E$ y sustituimos los valores de A y B:

$$E_g = \left[\frac{E_r}{2} + \sqrt{\frac{y}{z}} \frac{I_r}{2} \right] e^{\sqrt{zy} x} + \left[\frac{E_r}{2} - \sqrt{\frac{y}{z}} \frac{I_r}{2} \right] e^{-\sqrt{zy} x} \quad (11.20)$$

$$E_g = E_r \left[\frac{e^{\sqrt{zy} x} + e^{-\sqrt{zy} x}}{2} \right] + I_r \sqrt{\frac{y}{z}} \left[\frac{e^{\sqrt{zy} x} - e^{-\sqrt{zy} x}}{2} \right] \quad (11.21)$$

Finalmente:

$$E_g = E_r \cos h\sqrt{zy} l + I_r \sqrt{\frac{z}{y}} \operatorname{sen} h\sqrt{zy} l \quad (\text{II.22})$$

De la misma manera, podemos tratar la ecuación (12) para obtener la ecuación general de la corriente para el extremo generador, haciendo $I_g = I$ y sustituyendo los valores de A y B :

$$I_g = \left[\frac{E_r}{2} + \sqrt{\frac{z}{y}} \frac{I_r}{2} \right] \sqrt{\frac{y}{z}} e^{\sqrt{zy} l} - \left[\frac{E_r}{2} - \sqrt{\frac{z}{y}} \frac{I_r}{2} \right] \sqrt{\frac{y}{z}} e^{-\sqrt{zy} l} \quad (\text{II.23})$$

o bien:

$$I_g = E_r \sqrt{\frac{y}{z}} \left[\frac{e^{\sqrt{zy} l} - e^{-\sqrt{zy} l}}{2} \right] + I_r \left[\frac{e^{\sqrt{zy} l} + e^{-\sqrt{zy} l}}{2} \right]$$

Finalmente:

$$I_g = I_r \cos h\sqrt{zy} l + E_r \sqrt{\frac{z}{y}} \operatorname{sen} h\sqrt{zy} l \quad (\text{II.24})$$

Las ecuaciones (II.22) y (II.24) son las ecuaciones generales de una línea de transmisión tomando como base que la distancia l ha sido medida a partir del extremo receptor, lo que nos dió los valores de E_g e I_g en función de E_r e I_r .

Para obtener los valores de E_r e I_r en función de E_g e I_g bastará sustituir l por $-l$ (o sea medida la distancia ahora a partir del extremo generador) y efectuando las operaciones consecuentes se llegará a:

$$E_r = E_g \cos h\sqrt{zy} l - I_g \sqrt{\frac{z}{y}} \operatorname{sen} h\sqrt{zy} l \quad (\text{II.25})$$

$$I_r = I_g \cos h\sqrt{zy} l - E_g \sqrt{\frac{y}{z}} \operatorname{sen} h\sqrt{zy} l \quad (\text{II.26})$$

Se verá ahora la igualdad de las siguientes ecuaciones obtenidas.

Apéndice I	Apéndice II	Para encontrar
(I.21)	= (II.22)	E_r
(I.22)	= (II.24)	I_r
(I.23)	= (II.25)	I_r
(I.24)	= (II.26)	E_r

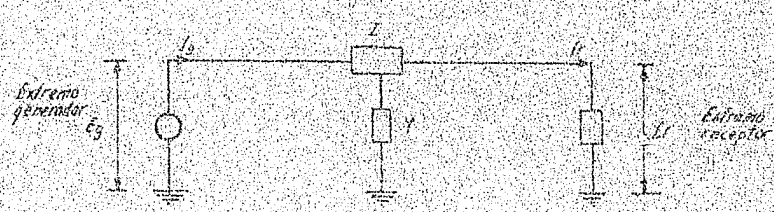


Fig. A - Apéndice I

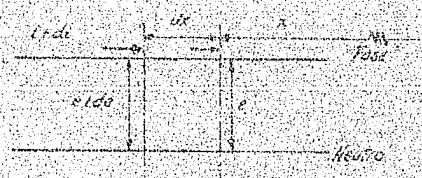


Fig. B - Apéndice I

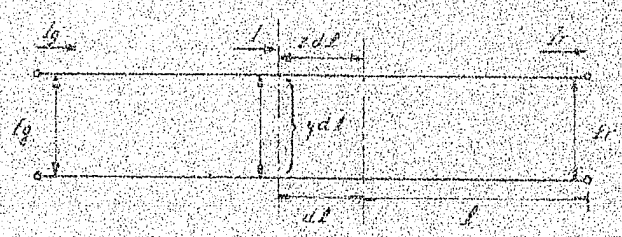


Fig. C - Apéndice

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

I.- LINEAS DE TRANSMISION.-

- 1).- Calcolazione Elettrica Della Grandi Linee Di Transmisione.- (Agostino Dalla Verde).
- 2).- Networks Lines and Fields 2nd. Ed. (John B. Ryder).
- 3).- Electric Power Transmission (Woodruff).
- 4).- Electrical Elements of Power Transmission Lines (H.B. Dwight).
- 5).- Electric Power Transmission (M. P. Wenbach).
- 6).- Lineas e Instalaciones Eléctricas. (Carlos Lucam).
- 7).- Electrical Transmission and Distribution Reference Book (Westinghouse).
- 8).- Transmission Line Theory (Kling).
- 9).- Alternating Current Circuits (Kerchner and Corcoran).
- 10).- Transmission Lines and Filter Networks (Karakash).
- 11).- Electric Power Transmission (J. Zaborsky - J. W. Rittenhouse).
- 12).- Communication Networks, Vol II.- The classical Theory of Long Lines, Filters and Related Networks. (E. A. Guillemin).
- 13).- Neutral Grounding in High Voltage Transmission (R. Wilhelm - M. Waters).
- 14).- The Art and Science of Protective Relaying. (C. R. Mason).
- 15).- Applied Protective Relaying (Westinghouse)
- 16).- Symmetrical Components. (C. F. Wagner and. R.D. Evans).
- 17).- Industrial Power Systems Handbook. (D. Beeman).
- 18).- Standard Handbook for Electrical Engineers (A.E. Knowlton).

II.- MATEMATICAS.-

- 1).- Mathematical Tables. 2nd. Ed. (H.B. Dwight).
- 2).- Differential Equations for Engineers (Phillip

Franklin).

- 3).- Introduction to the Theory of Linear Differential Equations. (E.G.C. Pade).
- 4).- Mathematics of Modern Engineering (Doherty and Keller).
- 5).- Charts of Complex Hyperbolic Functions (A. B. Kennelly).
- 6).- Higher Mathematics for Engineers and Physicists (Ivan and Elizabeth S. Sokolnikoff).

III.- ELECTRONICA.-

- 1).- Encyclopedia on Cathode-Ray Oscilloscopes and their uses. (Rider - Usian).
- 2).- The Cathode-Ray Tubes and their Uses. (Jacob H. Ruiter).
- 3).- Pulse and Digital Circuits. (Millman and Taub).
- 4).- Engineering Electronics. (John D. Ryder).
- 5).- Pulse Generators (Radiation Laboratory Series, M.I.T.).
- 6).- Line Fault Analyzer.- Instruction Book. (Sierra Electronic Corp.).
- 7).- Electronics. (Millman Seely).
- 8).- Control Engineers Handbook. (Truxal).
- 9).- Electronic Designers' Handbook. (Laudes D. Albracht).
- 10).- Handbook of Industrial Electronic Circuits. (Markus and Zeluff).
- 11).- Electronics for Engineers (Markus and Zeluff).
- 12).- An Introduction to Carrier Current Communications. (J.N. Petric and H. E. Clapham).
- 13).- Gaseous Conductors (James D. Cobine).
- 14).- Reference Data for Radio Engineers. (International Telephone and Telegraph Corp.).
- 15).- Ignitron and Thyatron tubes. (G.E. ETI-2388, 11-61).
- 16).- Using Transistors (D. J. Wjobbens.- Popular Series Phillips Technical Library).
- 17).- Transient Behaviour and Fundamental Transistor Parameters. (Phillips Electron Division).

- 18).- Transistor Circuit Design. (Texas Instrument Incorporated, Ed. Joseph A. Walston and John R. Miller.- 1961).
- 19).- Handbook of Semiconductor Electronics. (Gloyd P. Hunter).
- 20).- Radic Engineers Handbook. (Frederic E. Terman).
- 21).- Transistores. (Manuel Marin Bonelli, Buenos Aires).
- 22).- Transistor Electronics (David Dewitt and Arthur L. Rosoff).
- 23).- Principles of Transistor Circuits (Richard F. Shea).
- 24).- Transistors: Theory and Applications. (Abrams Coblentz).
- 25).- Transistor Electronics (Arthur W. Lo, Richard O. Endres, Jakob Zawels, Fred. D. Waldhauser, Chung-Chih-Cheng).
- 26).- Transistors Handbook. (W. S. Bevitt).
- 27).- Electronics.- (William G. Elemore and Matthew Sands).

IV.- ARTICULOS, BOLETINES Y REFERENCIAS DIVERSAS.-

- 1).- Extra long-distance Transmission.- Electrical Engineering.- Feb. 1962.
- 2).- The Electrical Design of Future EHV Systems and Overall view.- American Power Conference 1962.
- 3).- Project EHV.- AIEE Paper No. 60-186.
- 4).- Public Service Company of Colorado. 500 KV. High Altitude Corona Tests. AIEE No. 57-161. January 21-25, 1957.
- 5).- Tidd 500 KV. Test Project. Nov. 3-7, 1947.
- 6).- Important Technical and Economic Aspects of High Voltage Transmission.- American Power Conference 1960.
- 7).- Sweden-Land of long Transmission Lines 380 KV. Publ. No. 10, 1953.
- 8).- Electrical Data for High Tension Power Lines.- A.B. Svenska Metallverken.

- 9).-- Corona Tests on Hardware for HV Transmission Lines.-- Ontario Hydro Research News.-- Vol-14, No. 3.-- Third Quarter 1982.
- 10).-- International Special Committee on Radio Interference (C.I.S.P.R.)
- 11).-- Symposium on Corona ASTM-Special Technical Publication No. 198.
- 12).-- Report No. R.1.14.-- International Special Committee on Radio Interference (C.I.S.P.R.) 1958.
- 13).-- Spécification de l'appareillage de mesure C.I.S.P.R. pour les fréquences comprises entre 0.15 et 30 MHz. et entre 25 et 300 MHz.
- 14).-- AIEE Transaction. 70, 1951.
- 15).-- Calculation of Single-phase Short Circuits by The Method of Symmetrical Components. Part. I and II. (A.P. Mackerras) (C.E. Review, Vol. XXIX No. 4).
- 16).-- AIEE Transaction 48-186 sp. April 1948.
- 17).-- The Significance of the Hall Effect for Three Generator Configurations. I.F. Harris and J.D. Cobine. Transaction of the ASME.-- 192, October 1961.

