

Curso de Comunicaciones Eléctricas

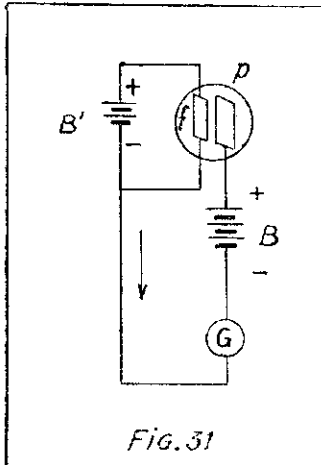
CAPITULO NOVENO

El Audión

1. El audión, llamado también lámpara de tres electrodos, es, como este último nombre lo indica, una ampollita en la que se ha hecho el vacío y que contiene en su interior tres electrodos: el filamento, la grilla y la placa.

2. El audión puede desempeñar tres funciones de gran importancia: rectificador o detector, amplificador y oscilador. Sólo con enunciar estos usos se comprende la trascendencia de este pequeño dispositivo en radio-transmisión. Sin exagerar puede afirmarse que el triunfo de la radio se debe únicamente al descubrimiento del audión.

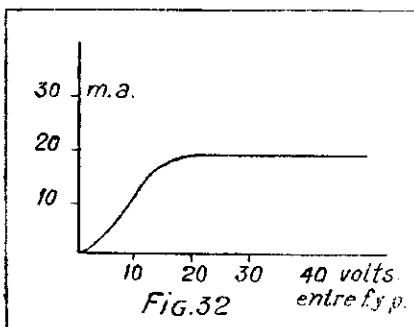
3. No debe confundirse el Audión con el rectificador de vapor de mercurio, pues aunque tienen funciones parecidas—en cuanto se trata de rectificar—, su principio de funcionamiento es enteramente diverso, de modo que los resultados que se obtienen con el uno no pueden asimilarse a los que se obtengan con el otro.



4. Si en una ampollita de vidrio donde se ha hecho el vacío tan perfecto como lo permiten los aparatos actuales, se tiene un filamento de tungsteno *f* frente a una placa metálica *p*, y se une el polo positivo de una batería *B*—cuyo polo negativo está conectado al filamento—, a la placa; estando el filamento incandescente por la acción de la batería *B'*, el galvanómetro *G* indica el paso de una corriente eléctrica generada por la batería *B*, y que pasa a través del espacio vacío entre *f* y *p*. El mecanismo del transporte de las cargas eléctricas de *f* a *p*, se explica por la emisión electrónica del filamento. El sentido de la corriente es de *p* a *f*; pero la emisión de electrones es de *f* a *p* y por consiguiente si se coloca el polo negativo de *B* sobre *p* y el positivo sobre *f*, se obtiene el efecto deseado.

sobre f la corriente cesa. En esto consiste el efecto válvula de la lámpara de dos electrodos y a esto se debe su aptitud rectificadora.

5. Si se miden las intensidades de la corriente para valores sucesivos creciendo la D. P. aplicada (batería B), se constata que la corriente aumenta primero en proporción a la potencia $3/2$ de la D. P. y que la relación entre éstas dos cantidades sigue en general la marcha indicada por la curva de la figura. La corriente máxima que puede circular por este circuito y cuyo límite no puede sobrepasarse por más que se aumente la D. P. se llama la «corriente de saturación».



6. Esta «corriente de saturación» no es una constante para cada lámpara sino que es una función creciente con la temperatura del filamento; lo que es fácil de comprender ya que a mayor temperatura la emisión de electrones del filamento es más activa. Analíticamente esta función puede expresarse por la fórmula de Richardson:

$$j_s = a \sqrt{T} e^{-\frac{b}{T}}$$

en que a y b son constantes; T la temperatura absoluta del filamento, y e la base de los logs. naturales.

7. Como razón entre la d. p. aplicada y la corriente no permanece constante no es dable atribuir al espacio entre filamento y placa una resistencia ohmica corriente. Sin embargo es útil definir y llamar «resistencia interior» de la lámpara:

$$\rho = \frac{dv}{dj}$$

ya que para pequeñas variaciones de la d. de p. alrededor del valor v , el «circuito de placa» tiene una «resistencia aparente» igual a ρ .

8. Esta lámpara de dos electrodos que acabamos de estudiar fué usada por Fleming en la detección de corrientes de alta frecuencia y hoy día se usa a menudo como rectificador. Pero el audión propiamente dicho, el que ha resuelto definitivamente tantos problemas de comunicaciones eléctricas y que constituye el relay por excelencia, sólo quedó constituido cuando a De Forest se le ocurrió agregar a la lámpara de dos electrodos, un tercero en forma de grilla colocado entre los otros dos.

Conectemos la grilla al filamento por un conductor en el que se intercala una tercera Batería B'' y un galvanómetro. La corriente que circula en el «circuito de placa» la podremos hacer variar en intensidad, variando la diferencia de potencial entre grilla y filamento.

Si se une el polo negativo de B'' a la grilla, ésta rechazará los electrones emitidos por f y si su potencial es lo suficientemente bajo (los potenciales se refieren al punto O) ningún electrón alcanzará la placa p . y por consiguiente no habrá corriente en el circuito de placa. Si empezamos ahora a elevar la potencial de la grilla, iremos aumentando el flujo de electrones que atraviesan la grilla y el galvanómetro G detectará una corriente que aumentará conjuntamente con el potencial de la grilla. Cuando el potencial de la grilla sobrepase al del f . atraerá hacia sí electrones (G detectará una corriente) pero gran número de ellos pasarán a través de ella y alcanzarán a la placa: la corriente en el circuito de placa continuará pues aumentando.

9. De esta manera se puede interrumpir, restablecer o modificar la corriente en el circuito de placa, actuando sobre el potencial de la grilla.

La corriente a través de la grilla (la marcada por el galvanómetro G') es siempre muy débil y en algunos casos nula, cuando su potencial es inferior al del punto O . Como por otra parte la capacidad electro estática de la grilla es muy pequeña se requiere una cantidad de energía mínima para hacer variar su potencial.

De aquí se deducen las excelentes cualidades del Audión como relay: gran sensibilidad, muy fiel (ya que no posee órganos materiales con inercia) y capaz de seguir sin atraso variaciones de frecuencia elevada.

10. Es de gran importancia conocer la relación que existe entre las variaciones del potencial de la grilla y las de la corriente en el circuito de placa. Este estudio se hace experimentalmente construyendo la *característica de placa a tensión de placa constante* y la *característica de grilla a tensión de placa constante*.

11. Para obtener la característica de placa a tensión de placa constante, se mantienen constantes la temperatura del filamento y la d. de p. entre placa y filamento (120 volts)—lo que equivale a mantener invariable la f. e. m. de las baterías B y B'' —(fig. 33) y se conecta la grilla al polo negativo de B'' , batería

cuya d. de p. se hace variar durante la experiencia, desde un valor que corresponda a una potencial en la grilla inferior al del f . hasta valores correspondientes a potenciales, más elevados que el de filamento, que originen en el circuito de placa la «corriente de saturación».

La fig. 34 indica la marcha que sigue esta curva característica del Audión.

Es de importancia notar que el potencial de g . para el cual la corriente en el circuito de placa alcanza el valor de saturación, es siempre inferior al potencial cte. de la placa el cual en todo momento es superior al de los otros dos electrodos.

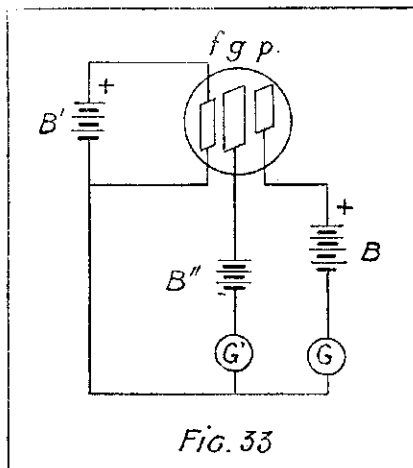


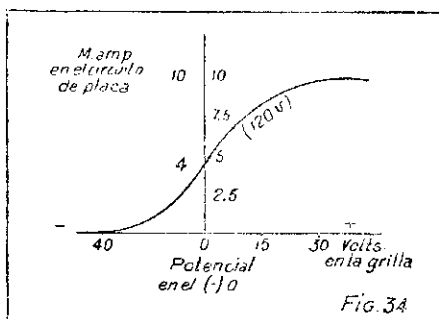
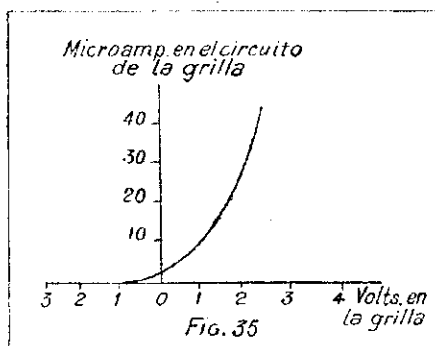
Fig. 33

12. Para obtener la característica de grilla a tensión de placa cte. se anotan

las lecturas en el galvanómetro G' que indican los valores sucesivos de la corriente que circula por el circuito de grilla variando la diferencia de potencial aplicada entre grilla y filamento y manteniendo constante la d. de p. entre placa y filamento.

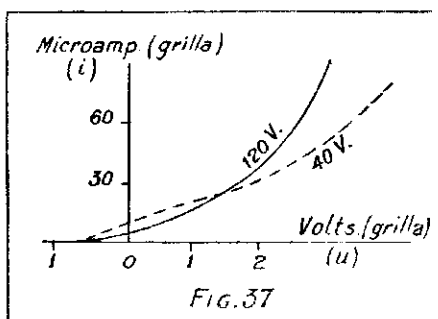
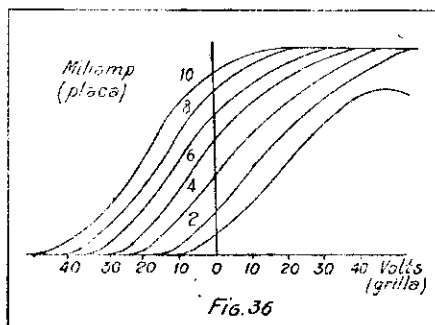
Nótese que la corriente está graduada en este diagrama en micro amperes. La corriente en el circuito de grilla, para d. de p. moderadas, es muy inferior a la corriente de placa correspondiente (100 veces menor m/m), cuando esta d. p. es positiva con respecto al filamento y nula cuando esta d. p. es negativa.

Así pues «variaciones del potencial de grilla alrededor de un potencial medio negativo originan variaciones importantes de la corriente de placa», sin gasto de energía apreciable en el circuito de grilla. De aquí la gran sensibilidad del Audión como relay.



13. Si se construye un sistema de características de placa correspondientes a diversas tensiones de placa, se obtiene un sistema de curvas como el del diagrama; es de notar que si la tensión de placa descende de un cierto valor, en ninguna circunstancia alcanza la corriente de placa el valor de «saturación». Este fenómeno tiene su origen en la captación de electrones por la grilla, que viene a

disminuir el número de los aprovechados por la placa, ya que el número total de electrones emanados del filamento sólo depende de su temperatura. Cuando se eleva



la tensión de placa, la corriente de grilla disminuye para tensiones de grilla bajas y aumenta para tensiones de grilla altas, como lo muestra el diagrama.

La resistencia grilla definida por la relación:

$$r_g = \frac{du}{di}$$

es muy variable: infinita para tensiones de grilla negativas, baja casi a cero para tensiones positivas de cuatro o cinco volts.

14. La corriente J en el circuito de placa (que es la cantidad que más nos interesa) es una función de dos variables (como se desprende de todo lo dicho antes): el potencial o tensión de grilla U y el potencial o tensión de placa V . Analíticamente se tiene, p. e., la relación:

$$J = f(U, V)$$

Esta ecuación que representa en un sistema de tres ejes coordenadas una superficie, se designa a veces con el nombre de «superficie característica» del audión.

15. Dada esta relación entre J , U y V , las variaciones de U se traducen en variaciones de J ; ahora bien, como J es la corriente en el circuito de placa, se puede también variar J con variaciones de la tensión de placa V . Mientras U quede cte. se tendrá la relación:

$$J = \frac{V}{\rho} \quad ; \quad \rho = \frac{\delta V}{\delta J}$$

Ahora bien, si U varía en una cantidad ΔU , la corriente J de placa variará en una cantidad $\Delta_1 J$. Si hacemos abstracción de U y sus variaciones y sólo contemplamos las variaciones de J , estas variaciones las podemos considerar causadas por variaciones ficticias de V o de ρ . Se ha preferido considerarlas causadas por variaciones de V y se acostumbra escribir:

$$J + \Delta_1 J = \frac{V + \Delta f V}{\rho}$$

$$\rho (\Delta_1 J) = \Delta f V$$

$\Delta f V$ representando la variación ficticia de V equivalente al efecto ΔJ . Pero la verdadera causa de la variación ΔJ es la variación ΔU sufrida por el potencial de grilla U . La relación:

$$\frac{\Delta f V}{\Delta U} = k$$

se define como *factor de amplificación* del Audión. Luego. $\rho (\Delta_1 J) = k (\Delta U)$.

Conviene dejar esclarecido que en el caso de variaciones simultáneas de V y U , cuando estas variaciones son pequeñas, de modo que sea admisible aplicar el principio de la superposición de los pequeños efectos, la variación ΔJ sería igual a la suma de la variación producida en J por la variación de U y la ocasionada por la variación de V . Así pues:

$$\begin{aligned}\rho(\Delta_1 J) &= k(\Delta U) \\ \rho(\Delta_2 J) &= \Delta V\end{aligned}$$

$$\rho(\Delta_1 J + \Delta_2 J) = \rho(\Delta J) = \Delta V + k\Delta U$$

El valor corriente de k fluctúa alrededor de 8.

16. Un método para determinar experimentalmente la resistencia interior y el factor de amplificación del audión, es el ideado por Miller. El diagrama indica las conexiones. La parte de segmentos se refiere a la medida de ρ ; la parte llena a la medida de K . Para producir alteraciones en el potencial de la grilla se emplea un alternador de audio-frecuencia (800) conectado mediante resistencias potenciométricas r_1 r_2 a los circuitos de placa y grilla. En el circuito de placa se intercala un Teléfono. Para medir K se lleva el cursor M a la posición en que el Teléfono produzca un zumbido mínimo. En este momento se tiene:

$$k = \frac{r_1}{r_2}$$

ya que por ser r_1 y r_2 resistencias mucho menores que ρ la corriente que circula por ellas se sensiblemente igual en ambas y p. c. en el momento en que el

efecto producido por el alternador en la grilla es compensado por el efecto producido directamente en el circuito de placa, se puede escribir:

$$(1) r_1 i = k r_2 i$$

como $r_2 i$ es equivalente a una f.e.m. en serie con B'' y $r_1 i$ a una f.e.m. en serie con B , esta igualdad viene de considerar que una variación $\Delta U = r_2 i = r_1 i$ es equivalente y puede ser anulada por otra variación de sentido contrario $\Delta fV = k \Delta U = k r_2 i = r_1 i$. Las variaciones son de sentido contrario porque una baja del potencial de grilla hace disminuir la corriente en el circuito de placa y el agregar una f.e.m. en serie a B tiene por efecto aumentarla.

17. Para medir ρ , se dan valores cualesquiera a r_1 y r_2 y con el botón de presión apretado se actúa sobre el cursor N hasta que el teléfono produzca un zumbido mínimo. En este momento se tiene:

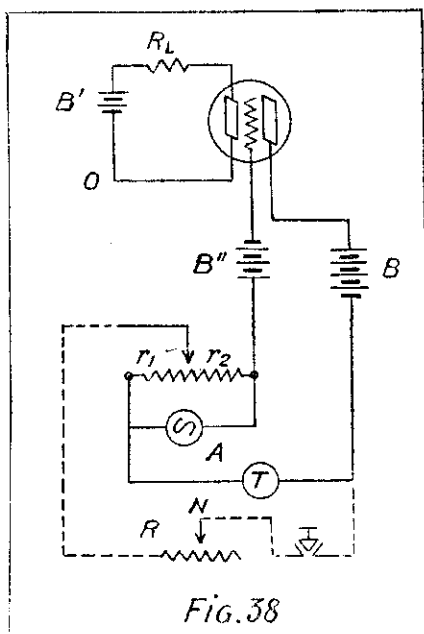


Fig. 38

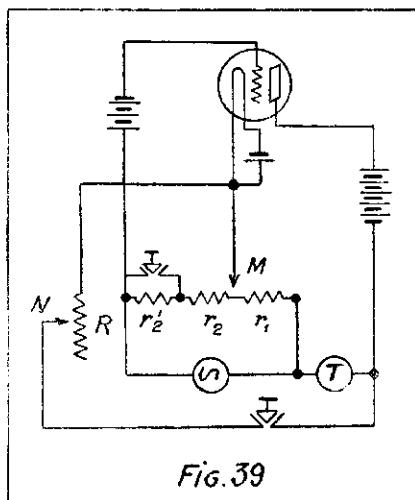
$$R \Delta J = r_1 i$$

i como anteriormente es la corriente en las resistencias potenciométricas. Por otra parte se tiene:

$$\rho \Delta J = \Delta V + k \Delta U$$

$$\rho \Delta J = -R \Delta J + k r_2 i = -R \Delta J + k r_2 \frac{R}{r_1} \Delta J$$

$$(2) \quad \rho = R \left(k \frac{r_2}{r_1} - 1 \right)$$



18. Un procedimiento curioso, ideado por Stevenson para obtener el valor de ρ directamente, sin ningún cálculo aritmético, consiste en colocar en serie con r_2 otra resistencia r_2^1 del mismo valor y que se inserta en el mismo momento que R . Sin haber insertado ni R ni r_2^1 se procede primero a colocar el cursor M en la posición de zumbido telefónico mínimo. En seguida se insertan R y r_2^1 . El teléfono principia a zumbar de nuevo y se procede a silenciarlo con el cursor N . En este momento se tiene:

$$\rho = R \left(k \frac{r_2 + r_2^1}{r_1} - 1 \right)$$

Por otra parte: $k = \frac{r_1}{r_2}$ y $r_2 + r_2^1 = 2r_2$

Luego:

$$(3) \quad \rho = R \left(\frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{2r_2}{r_1} - 1 \right) = R$$

CAPITULO DECIMO

REPETIDORES.—TRANSMISIÓN A LARGA DISTANCIA

1. Cuando las líneas telefónicas son muy largas, es necesario, como en el caso de los telégrafos, emplear repetidores. El repetidor tiene por objeto amplificar la cantidad de energía que ha puesto en juego el trasmisor cuando gran parte de ella se ha disipado en la línea. El repetidor telefónico debe cumplir con la condición de ser reversible. Pero los relay empleados en telegrafía y los que podrían

emplearse en telefonía, no son reversibles y por consiguiente es necesario emplear algún artificio de instalación para poder obtener la reversibilidad.

La figura 40 indica uno de estos artificios que no se usa en la práctica pero que por su sencillez es el más a propósito para comprender el principio en que se basa la instalación de los repetidores.

2. Los primeros relay que se usaron como repetidores eran mecánicos y se encontraban constituidos esencialmente por un receptor telefónico unido mecánicamente a un transmisor telefónico. La figura 41 es un dibujo esquemático del repetidor Shreeve que se usó en la línea San Francisco a Nueva York.

3. En la actualidad el relay telefónico que se usa de preferencia es el audi3n de tres electrodos. Como puede verse en la figura 40, la corriente que vien3 del

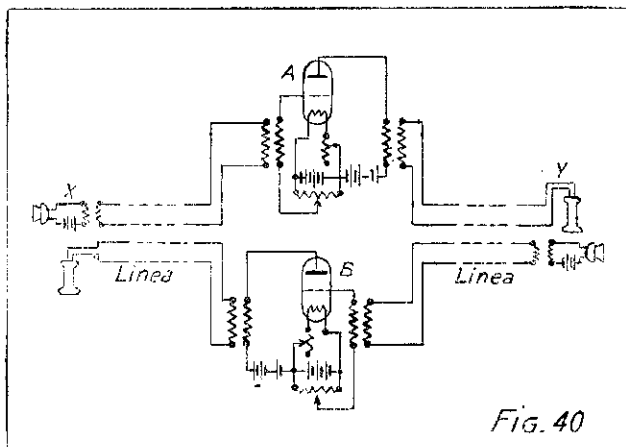


Fig. 40

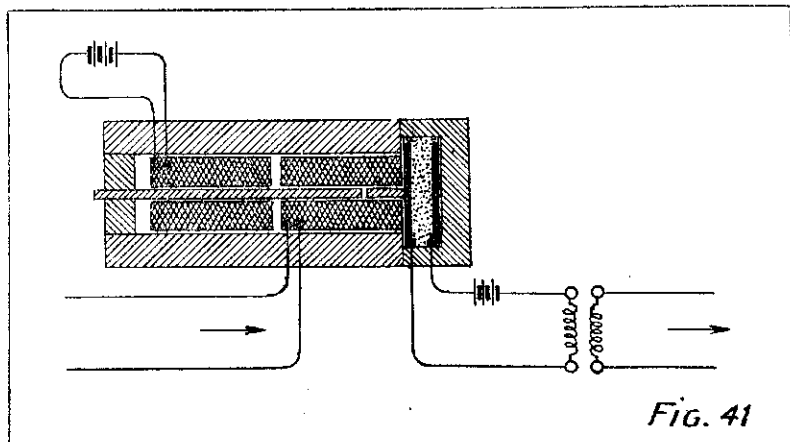


Fig. 41

transmisor de la estaci3n X imprime su voltaje a la grilla del audi3n A el cual retransmite las ondas amplificadas al receptor Y.

La disposici3n de la figura 40 no se usa en la pr3ctica porque no podr3a prolongarse hasta los tel3fonos de los suscriptores de una Central ya que 3stos est3n

conectados para circuitos de dos conductores y no de cuatro. La *figura 42* mues-

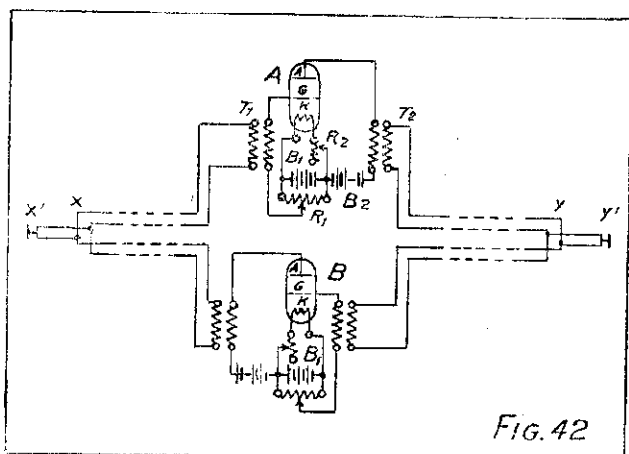


FIG. 42

tra el Repetidor Van Kersten de cuatro conductores, pero que puede prolongarse hasta teléfonos corrientes conectados para dos conductores. Con este repetidor en casos de terminados hay reacción de un audión sobre otro, lo que da origen a ecos y zumbidos.

Los audiones usados en los repetidores telefónicos tienen características distintas de los usados en Radio transmisión: son de ma-

yor potencia pero de coeficiente de amplificación menor.

4. El correo británico usa dos clases de repetidores. El de la *figura 43* con

un solo audión y el de la *figura 44*, llamado repetidor duplex con dos audiones. En el primero se usa un transformador diferencial como el que se ve en la *figura*. Las corrientes que llegan por cualquiera de los lados de la línea actúan sobre la grilla del audión a través de un pequeño transformador y las corrientes amplificadas se cierran a través del primario del transformador diferencial. La corriente amplificada se divide en partes iguales en los secundarios,

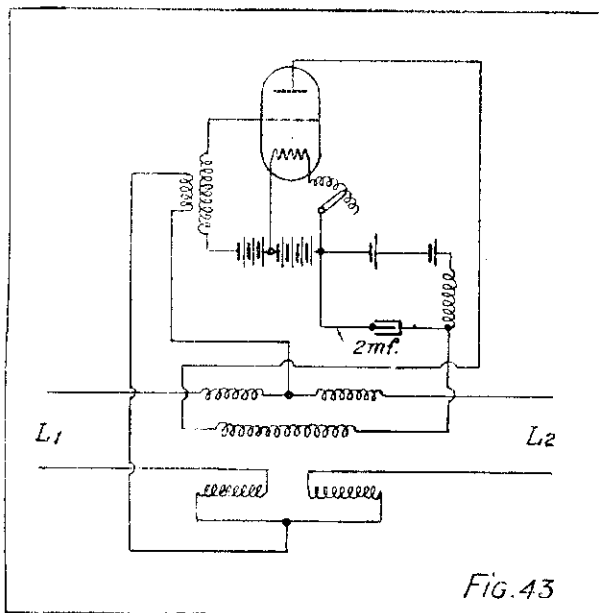


FIG. 43

siempre que las constantes y la longitud de la línea hacia ambos lados sean iguales, y de este modo se evita que afecte al primario del transformador de la grilla. Se comprende que con esta disposición del repetidor, circulan en ambos sentidos en la línea y por con-

siguiente si hay en ella dos repetidores de esta clase distanciados de modo que la pérdida en amplitud sea menor que la amplificación, se originará en la línea un zumbido permanente, de la misma naturaleza que el que se produce cuando se coloca el fono de un teléfono frente al receptor.

El funcionamiento del repetidor de la figura 44 es análogo al ya explicado pero para evitar las reacciones entre los repetidores vecinos cada línea se encuentra equilibrada por una impedancia equivalente, en la misma forma que se hace en la telegrafía duplex.

5. En Norte América se usan los repetidores de las figuras 45 y 46. El pri-

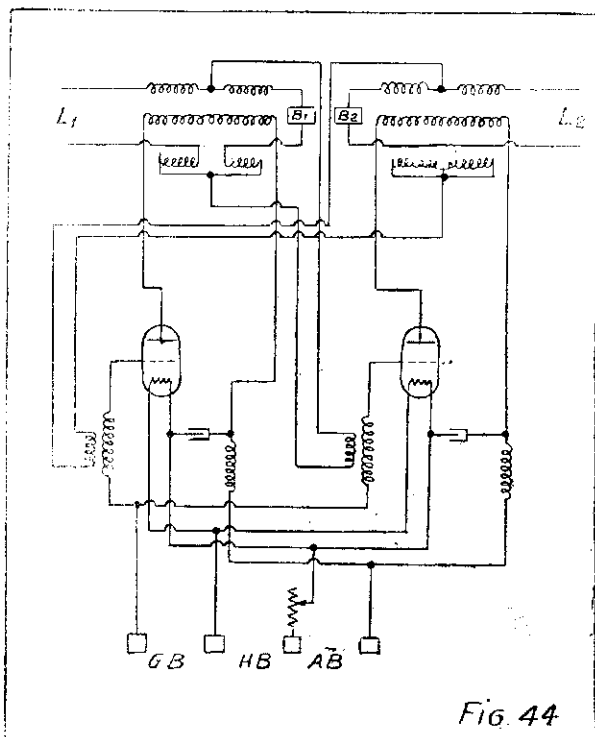


Fig. 44

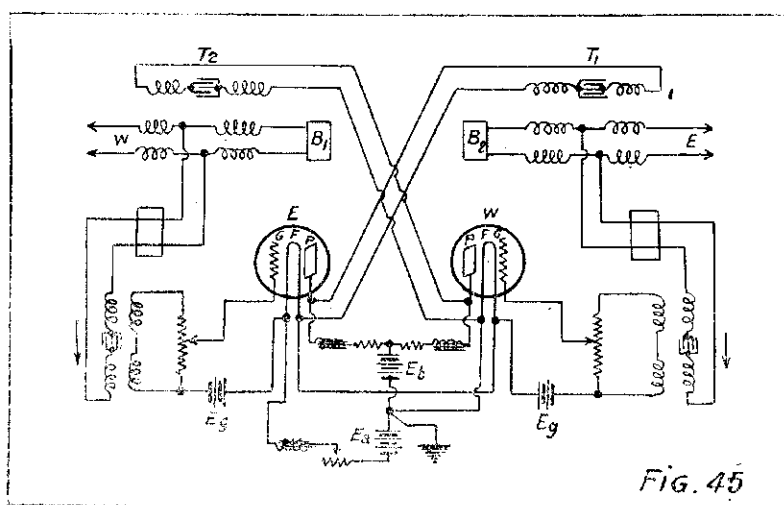
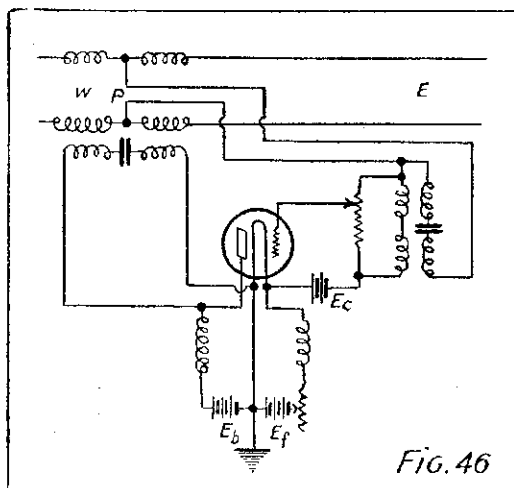


Fig. 45

mero se designa con el nombre de tipo 22 por ser un circuito de dos vías y dos audíones, y el segundo con el de tipo 21 por ser un circuito de dos vías y un audíón. Su funcionamiento y sus cualidades son análogos a los descritos en el párrafo 3.



Los filtros indicados en el circuito tipo 22 tienen por objeto permitir el paso únicamente a corriente de frecuencia telefónica para evitar así la amplificación de corrientes telegráficas o de otra naturaleza que circulen por el mismo circuito metálico. Los potenciómetros tienen por objeto permitir el ajuste de la amplificación al valor deseado.

6. Líneas con sobrecarga artificial.—Se ha visto en un capítulo anterior que una buena transmisión telefónica exige que la atenuación no

baje de cierto valor y que el coeficiente de distorsión se mantenga dentro de ciertos límites; y que la línea perfecta sería aquella que no tuviera distorsión, es decir, que atenuara en la misma proporción la fundamental y las armónicas de la voz humana.

Si se logra compensar la capacidad de una línea aumentando su inductancia o vice versa, obtendremos una línea sin distorsión. Además esta compensación origina una disminución de la atenuación.

El desarrollo de la teoría matemática correspondiente se encuentra en la obra «Telephonic Transmission», de J. G. Hill, pero no presenta un gran interés práctico porque no permite llegar a resultados numéricos dignos de fe. Sólo es un guía que nos indica la dirección del camino mejor, pero que nada nos puede decir sobre su longitud. Hay tres métodos de sobrecargar artificialmente las líneas telefónicas o telegráficas:

- a) El de sobrecarga continua o de Krarup.
- b) El de sobrecarga concentrada en serie o de Pupin.
- c) El de sobrecarga concentrada en paralelo o de Thompson.

Los dos primeros son los que se usan en la práctica. El método de Krarup sólo es aplicable en cables; el de Pupin puede aplicarse a cables y a líneas aéreas.

El método de Krarup consiste en enrollar sobre cada uno de los conductores del cable un alambre de material de gran permeabilidad magnética y así aumentar la inductancia. Se comprende que este procedimiento sólo se puede aplicar a nuevas instalaciones.

El método de Pupin consiste en insertar en serie con la línea bobinas de débil resistencia ohmica y gran inductancia distanciadas más o menos según las necesidades. La ventaja de este método consiste en que puede aplicarse a cables ya

instalados y a líneas aéreas. Su eficacia, sin embargo, es inferior que la del método Krarup. Las bobinas que se usan son toroidales con cuatro terminales de modo que los dos conductores de la línea quedan ligados magnéticamente. Para cables se usan bobinas de R/L alrededor de 50 a 800 p/s, y para líneas aéreas bobinas de R/L alrededor de 25 a 800 p/s. El Correo Británico usa la siguiente fórmula empírica para calcular el espaciamiento de las bobinas Pupin:

$$CLD = 25$$

en la cual C es la capacidad en microfarads de una milla de circuito doble, L la inductancia de la bobina en milihenrys, y D la distancia entre bobinas en millas.

CAPITULO UNDECIMO

INTERFERENCIAS

1. Las interferencias entre servicios eléctricos pueden ser originadas:

- a) Por corrientes extraviadas.
- b) Por inducción eléctrica.
- c) Por inducción magnética.

2. Caso típico de interferencia de la categoría (a) es el de una línea telegráfica y el de un ferrocarril eléctrico. Si el eclisaje eléctrico de los rieles del f. c. es defectuoso la caída de potencial por unidad de longitud será elevada y puede suceder (y sucede con frecuencia) que la diferencia de potencial entre dos puntos de riel vecinas a dos tierras telegráficas sea del mismo orden que la f.c.m. con que trabaja el telégrafo. En este caso una parte de la corriente de retorno del f. c. pasará por la línea telegráfica y aparatos receptores, impidiendo la transmisión correcta de las señales. Este fenómeno se nota es especial, en los momentos de demarraje de los trenes eléctricos, por aumentar en ese momento la densidad de corriente en los rieles y p. c. la caída de potencial.

3. La «Railroad Comission of the State of California», clasifica como «inducción eléctrica» «a los voltajes y corrientes producidas en un circuito y originados por su presencia en el campo eléctrico variable generado por los voltajes de un circuito vecino».

4. La misma autoridad clasifica como «inducción magnética» «a los voltajes y corrientes producidas en un circuito y originadas por su presencia en el campo magnético variable generado por las corrientes de un circuito vecino».

5. Las interferencias de cualquiera de las tres categorías enumeradas pueden ser de carácter transitorio o de carácter permanente. Son transitorias aquellas interferencias que se producen en el circuito perturbado ya sea por accidentes o por situaciones momentáneas (como la puesta en marcha o la detención de los generadores) del sistema perturbador. Son permanentes aquellas interferencias sufridas por el circuito perturbado en el régimen normal de marcha del circuito perturbador.

6. Interferencias de carácter permanente de la categoría (a) sólo pueden afectar a circuitos con retorno por tierra, es decir, en general a todas las líneas tele-

gráficas y a las líneas telefónicas que usan retorno por tierra. Circuitos perturbadores son en este caso todos aquellos sistemas de transmisión de energía que usan la tierra como retorno. *El sistema perturbador es siempre aquel que utiliza una potencia eléctrica de orden superior a la del circuito perturbado.* Así un circuito telegráfico no puede ser perturbado por un circuito telefónico; pero sí puede suceder la recíproca. *Esto es verdadero para las tres categorías de interferencias.*

Interferencias de carácter transitorio de la categoría (a) pueden afectar tanto a los circuitos con retorno por tierra como a los metálicos. Caso típico de interferencia de esta clase es la caída de un conductor en un cruce de líneas que pone en contacto casual la línea perturbada con la línea perturbadora.

7. Para subsanar las interferencias de carácter permanente de la categoría (a), por una parte el circuito perturbador debe mantener su retorno en forma que en ningún caso las diferencias de potencial entre los puntos vecinos a las tomas de tierra del circuito perturbado sean capaces de originar en el corrientes del orden de la corriente de trabajo de este circuito; por otra parte el circuito perturbado puede defenderse, entre ciertos límites, elevando su potencial de trabajo e intercalando resistencias adicionales.

Interferencias de carácter transitorio de la categoría (a) se subsanan en sus efectos más graves con el uso de fusibles y pararrayos protectores que ponen la línea a tierra aislando el aparato receptor; y con precauciones del orden constructivo en los puntos de cruce.

8. *Teoría de la inducción eléctrica* (Revue Générale de l'Electricité, Tome XIX, N.º 24. 12-Junio-1926). (E. Brylinski). Si se considera una línea bifilar de transmisión de energía eléctrica (lo que se diga a este respecto es aplicable a una línea trifásica o a líneas más complicadas) se constata que el hecho de elevar el potencial de los conductores a V_1 y V_2 crea en el espacio vecino un campo eléctrico. Líneas de fuerza van del conductor de potencial más elevado a los otros; la mayoría atraviesan el aire, pero otras líneas alcanzan el suelo, que se admite se mantiene a potencial nulo, hacen parte de su recorrido en la parte superficial del suelo y lo abandonan en un sitio dado para alcanzar el segundo conductor.

A los potenciales V_1 y V_2 corresponden en los conductores cargas eléctricas q_1 y q_2 que se encuentran relacionadas a los potenciales por ecuaciones lineales, de modo que se puede considerar que a cada conductor corresponde una capacidad determinada con respecto a cada uno de los otros conductores y con respecto a tierra.

Considérese, en particular, una línea trifásica cuyos conductores sean 1, 2 y 3 y una línea telefónica cuyos conductores 4 y 5 están aislados de tierra pero unidos entre sí por aparatos de resistencia R . Sea l la longitud común de dos líneas, en kilómetros, $V_1, V_2, \dots$ los potenciales de los conductores $K_{\mu\nu}$ la capacidad lineal del conductor μ con respecto del conductor ν y $K_{\sigma\mu}$ la capacidad del conductor μ con respecto a tierra.

Las cargas de los conductores 4 y 5 tienen por valores,

$$q_4 = - [K_{14} (V_1 - V_4) + K_{24} (V_2 - V_4) + K_{34} (V_3 - V_4) - K_{40} V_4 + K_{54} (V_5 - V_4)] l$$

$$q_5 = - [K_{15} (V_1 - V_5) + K_{25} (V_2 - V_5) + K_{35} (V_3 - V_5) + K_{45} (V_4 - V_5) - K_{50} V_5] l$$

haciendo

$$C_{\mu \nu} = -K_{\mu \nu} \text{ para } \mu \text{ diferente de } \nu$$

$$C_{\mu \mu} = K_{\mu 1} + K_{\mu 2} + \dots + K_{\mu (\mu-1)} + K_{\mu n} + K_{\mu (\mu+1)} + \dots + K_{\mu n}$$

si hay n conductores, se tiene:

$$q_4 = (C_{14} V_1 + C_{24} V_2 + C_{34} V_3 + C_{44} V_4 + C_{54} V_5) l$$

Por otra parte, las corrientes de carga correspondientes si se trata de una corriente alterna de pulsación ω , serán respectivamente:

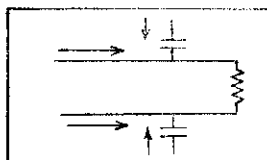
$$\frac{dq_4}{dt} = \omega q_4 \quad \frac{dq_5}{dt} = \omega q_5$$

con un desfase de $\frac{\pi}{2}$ en avance sobre la tensión; para hacer aparente este desfase, multiplicaremos ωq_4 y ωq_5 por $(-j)$, j símbolo de las imaginarias; luego:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dq_4}{dt} &= -j \omega l (C_{14} V_1 + C_{24} V_2 + C_{34} V_3 + C_{44} V_4 + C_{54} V_5) \\ \frac{dq_5}{dt} &= -j \omega l (C_{15} V_1 + C_{25} V_2 + C_{35} V_3 + C_{45} V_4 + C_{55} V_5) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Por otra parte, la resistencia de conexión R será recorrida por una corriente:

$$I_{45} = \frac{V_4 - V_5}{R} \quad (5)$$



que en virtud de una de las leyes de Kirchhoff, es igual a la corriente de carga en cada uno de los puntos de conexión; de donde se deducen las dos ecuaciones siguientes:

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_4 - V_5}{R} &= j \omega l (C_{14} V_1 + C_{24} V_2 + C_{34} V_3 + C_{44} V_4 + C_{54} V_5) \\ \frac{V_5 - V_4}{R} &= j \omega l (C_{15} V_1 + C_{25} V_2 + C_{35} V_3 + C_{45} V_4 + C_{55} V_5) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

de las cuales se obtienen los valores

$$\left. \begin{aligned} V_4 &= \frac{-j \omega l (C_{14} V_1 + C_{24} V_2 + C_{34} V_3) \left(j \omega l C_{55} + \frac{1}{R} \right) + j \omega l (C_{45} V_4 + C_{25} V_2 + C_{35} V_3) \left(j \omega l C_{55} - \frac{1}{R} \right)}{\left(j \omega l C_{44} + \frac{1}{R} \right) \left(j \omega l C_{55} + \frac{1}{R} \right) - \left(j \omega l C_{45} - \frac{1}{R} \right)^2} \\ V_5 &= \frac{-j \omega l (C_{14} V_1 + C_{24} V_2 + C_{34} V_3) \left(j \omega l C_{45} - \frac{1}{R} \right) + j \omega l (C_{45} V_4 + C_{25} V_2 + C_{35} V_3) \left(j \omega l C_{44} + \frac{1}{R} \right)}{\left(j \omega l C_{45} - \frac{1}{R} \right)^2 - \left(j \omega l C_{44} + \frac{1}{R} \right) \left(j \omega l C_{55} + \frac{1}{R} \right)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$I_{45} = \frac{\omega l [(C_{14}V_1 + C_{24}V_2 + C_{34}V_3)(C_{45} + C_{55}) - (C_{15}V_1 + C_{25}V_2 + C_{35}V_3)(C_{44} + C_{45})]}{j(C_{44} + 2C_{45} + C_{55}) + R \omega l (C_{45}^2 - C_{44}C_{55})} \quad (8)$$

Ahora bien, en toda línea de telecomunicación, excepto algunas de servicio colocadas en la misma postación que la de energía, R es pequeño con respecto a las reactancias de capacidad, como es fácil de comprobar. Si, en consecuencia, se desprecia R delante de las reactancias de capacidad, V_5 y V_4 resultan sensiblemente iguales, y se tiene:

$$V_4 = V_5 = - \frac{(C_{14} + C_{15})V_1 + (C_{24} + C_{25})V_2 + (C_{34} + C_{35})V_3}{C_{44} + 2C_{45} + C_{55}}$$

$$I_{45} = -j \omega l \frac{(C_{14}V_1 + C_{24}V_2 + C_{34}V_3)(C_{45} + C_{55}) - (C_{15}V_1 + C_{25}V_2 + C_{35}V_3)(C_{44} + C_{45})}{C_{44} + 2C_{45} + C_{55}}$$

Se observa inmediatamente que si, mediante trasposiciones convenientes de la línea de energía, se logra tener en término medio, en el conjunto de la longitud común (paralelismo):

$$\begin{aligned} C_{14} &= C_{24} = C_{34} \\ C_{15} &= C_{25} = C_{35} \end{aligned}$$

resulta

$$V_4 = V_5 = - \frac{C_{14} + C_{15}}{C_{44} + 2C_{45} + C_{55}} (V_1 + V_2 + V_3) = 0$$

$$I_{45} = -j \omega l \frac{C_{14}(C_{45} + C_{55}) - C_{15}(C_{44} + C_{45})}{C_{44} + 2C_{45} + C_{55}} (V_1 + V_2 + V_3) = 0$$

ya que en toda distribución trifásica se tiene:

$$V_1 + V_2 + V_3 = 0$$

a no ser que exista un conductor a tierra».

9. *Teoría de la inducción magnética* (Induction Interference—Railroad Comission of the State of California—Technical Report N.º 64—III).—«La f.e.m. inducida en un circuito es igual a la razón de disminución del flujo magnético que se entrelaza con el circuito.

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

El primer paso en el cómputo de voltajes o corrientes inducidas en un circuito, originados por la corriente del circuito vecino, es la determinación del flujo entrelazado con el circuito perturbado o secundario y generado por la corriente

del circuito perturbado o primario. Ya que el flujo es directamente proporcional a la corriente puede expresarse como el producto de la corriente en el circuito perturbador y la inducción mutua M de ambos circuitos; definiéndose, ésta última, como el flujo que atraviesa uno de los circuitos, cuando la unidad de corriente circula por el otro... »

... «Luego:

$$M = -\frac{\phi}{i} = 2 \log h \frac{s}{r}$$

s = límite más alejado de la zona de interferencia

$r =$ » » «cercano» » » » »

es la inducción mutua por unidad de longitud entre el conductor considerado y un circuito paralelo cuyos conductores distan r y s del conductor donde circula la corriente i . En estas condiciones el voltaje inducido en el circuito perturbado es:

$$e = -M \frac{di}{dt}$$

y si la corriente es una función armónica del tiempo:

$$E = -j2\pi fMI$$

en que E e I son los valores eficaces de voltaje y corriente y f la frecuencia en ciclos por segundo».

«Considérese un sistema de cinco conductores paralelos y tierra, como sería el caso de un circuito de energía trifásico y de un circuito telefónico; las distancias entre los conductores y sus alturas sobre la tierra, siendo grandes en comparación de sus diámetros y sus longitudes también grandes en comparación de todas las otras dimensiones. La tierra, como conductor común de los circuitos y como paso de corrientes extraviadas (eddy-currents), puede ser sustituida por las imágenes de los conductores».

«La experiencia ha demostrado que no es admisible, como en el caso de la inducción eléctrica, considerar las imágenes de los conductores en una distancia bajo la superficie de la tierra igual a la altura de los conductores sobre ella. Puesto que la tierra no es un conductor perfecto, la localización de las corrientes de tierra se encuentra a una distancia considerable bajo la superficie terrestre. Esta distancia varía con la frecuencia de la corriente y el carácter de la región».

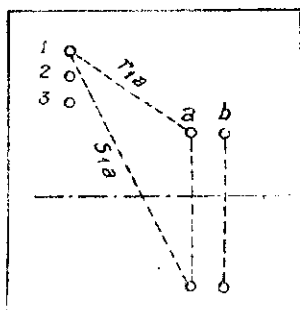
«Resultados de experiencias hechas por el Comité de la Junta en tres diferentes localidades, demuestran que la imagen de los conductores para el cálculo de la inducción magnética debe tomarse con respecto a un «plano terrestre virtual» de 100 a 170 m. bajo la superficie terrestre efectiva. Estas cifras se refieren a una frecuencia de 60 períodos. A frecuencias más elevadas corresponden «planos terrestres virtuales» más cercanos de la superficie efectiva».

«Denotando los conductores de energía por 1, 2 y 3 y por I_1 , I_2 y I_3 sus corrientes respectivas; y los conductores telefónicos por las letras a y b , el voltaje E_a inducido en el conductor telefónico a es dado por la expresión:

$$E_a = -j 2 \pi f (M_{1a} I_1 + M_{2a} I_2 + M_{3a} I_3)$$

en que:

$$M_{1a} = 2 \log h \frac{S_{1a}}{r_{1a}}; M_{2a} = 2 \log h \frac{S_{2a}}{r_{2a}}; M_{3a} = 2 \log h \frac{S_{3a}}{r_{3a}}$$



S_{1a} , S_{2a} y S_{3a} son respectivamente las distancias desde el eje del conductor denotado por un índice al eje del conductor-imagen denotado por el otro índice. Las cantidades r_{1a} , r_{2a} y r_{3a} son las distancias entre los ejes de los conductores denotados por los índices. Los tres términos entre paréntesis deben adicionarse vectorialmente, a ángulos determinados por los desfases de las corrientes I_1 , I_2 e I_3 .

Como caso especial considérese el de una corriente trifásica equilibrada. Luego

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Por otra parte,

$$E_3 = -j 2 \pi f (M_{1b} I_1 + M_{2b} I_2 + M_{3b} I_3)$$

El voltaje inducido en el circuito metálico telefónico es igual a

$$E_{a-b} = E_a - E_b = -j 2 \pi f (I_1 (M_{1a} - M_{1b}) + I_2 (M_{2a} - M_{2b}) + I_3 (M_{3a} - M_{3b}))$$

Si se consigue por medio de trasposiciones

$$M_{1a} - M_{1b} = M_{2a} - M_{2b} = M_{3a} - M_{3b}$$

se tiene

$$E_{a-b} = -j 2 \pi f (M_{1a} - M_{1b}) (I_1 + I_2 + I_3) = 0$$

Además aunque:

$$I_1 + I_2 + I_3 \text{ diferente de } 0$$

si:

$$M_{1a} - M_{1b} = M_{2a} - M_{2b} = M_{3a} - M_{3b} = 0$$

en el paralelismo, se tiene:

$$E_{a-b} = 0.$$

10. *Interferencias eléctricas y magnéticas y sus remedios.* — (Power Circuit Interference with Telegraphs + Telephones by S. C. Bartholomew.—Estudio presentado el 10 de Marzo de 1924 al «Institution of Electrical Engineers» de Lon-

dres).—La siguiente es una comparación de los efectos de ambos campos (eléctrico y magnético):

La inducción eléctrica es proporcional al voltaje del sistema de energía, pero es independiente de la corriente, mientras que la inducción magnética es función de la corriente del sistema de energía, sin ser afectada por su voltaje. Tanto el efecto dinámico eléctrico como el magnético son proporcionales a la frecuencia del circuito de energía. Donde líneas de energía y líneas de comunicación van tan próximas que puede preverse que habrá interferencia inductiva, se dice que hay una «exposición». Los voltajes originados por inducción eléctrica son independientes del largo de la «exposición», mientras que los efectos electromagnéticos son proporcionales al largo de la «exposición». Por otra parte, la magnitud de la corriente de circulación es en ambos casos aproximadamente proporcional al largo de la «exposición», la corriente generada por inducción magnética siendo la misma en todas las partes del circuito, lo que no es el caso en la generada por inducción eléctrica»....

.... «Los efectos inductivos de «voltajes o corrientes residuales» son generalmente mayores que los originados por «voltajes o corrientes equilibradas». «Esto se debe a que los componentes residuales en los distintos conductores están todos en fase y sus efectos inductivos son aditivos, mientras que los componentes equilibrados están en los diferentes conductores fuera de fase»....

.... «Corrientes y voltajes residuales actúan como si el sistema de energía fuera un sistema monofase con los conductores de la línea en paralelo y retorno por tierra y transposiciones o cruces de las líneas de energía no disminuyen los efectos inductivos, excepto en el caso en que este proceder traiga consigo una reducción de la magnitud de las «residuales» mismas; v. gr. las capacidades la línea pueden equilibrarse mejor por este medio. Por otro lado, la transposición o la instalación en espiral de los alambres del circuito telefónico perturbado por estos efectos inductivos reducirá la interferencia».

«En el caso de perturbaciones debidas a corrientes y voltajes equilibrados, la transposición o la torsión (espiral) tanto de la línea de energía como de la telefónica, reducirá los efectos inductivos».

«Corrientes y voltajes residuales pueden producirse en el sistema de energía en los casos siguientes:

- a) Capacidad desequilibrada y fugas entre los diversos conductores y tierra.
- b) Carga desequilibrada entre fases en un sistema en que el punto neutro está a tierra.
- c) Desarrollo de la 3.^a armónica y de sus múltiples impares en generadores y transformadores en sistemas de conexiones estrella con el punto neutro a tierra.

Con respecto a (a) es evidente que para reducir estas residuales, los distintos conductores deben distribuirse uniformemente, con respecto a tierra y otros cuerpos. Análogamente, (b) puede subsanarse con un arreglo apropiado del sistema y sus cargas.

En el caso (c), el remedio consiste en la elección de un alternador que genere voltajes y corrientes que se acerquen tanto como sea posible a la forma sinusoidal, y en el empleo de transformadores de pequeña corriente magnetizante y conec-

tados en forma que los efectos de histerisis y variaciones de inductancia en las perturbaciones sobre la onda de corriente y voltaje sean reducidas a un mínimo».

11. En resumen, las precauciones que deben tomarse para evitar las interferencias son las siguientes:

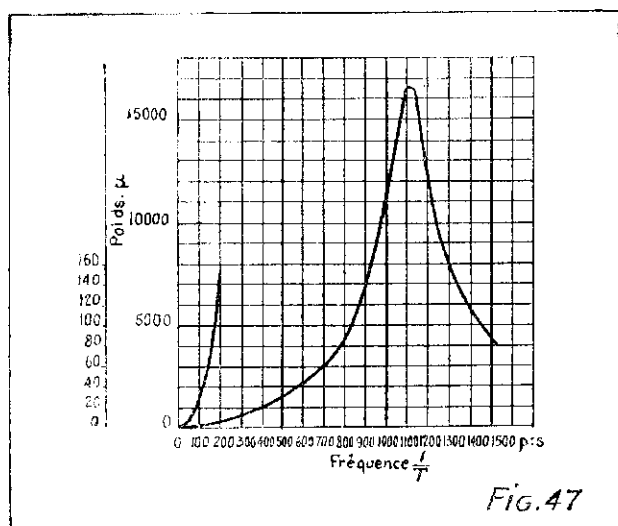
- a) La mayor distancia entre circuitos paralelos.
- b) Uso de aparatos libres de armónicas.
- c) Transposición de los conductores tanto del circuito perturbador como del perturbado.
- d) Equilibrio de los circuitos de telecomunicación (simetría).

12. Con respecto a la precaución (b) es necesario dar algunas explicaciones.

Tanto el oído humano, como el receptor normal telefónico, tienen sensibilidades distintas para diferentes frecuencias.

La curva de la figura 47 muestra la variación del coeficiente de sensibilidad con frecuencias simples.

La sensibilidad del oído a una onda compleja puede considerarse, como primera aproximación,

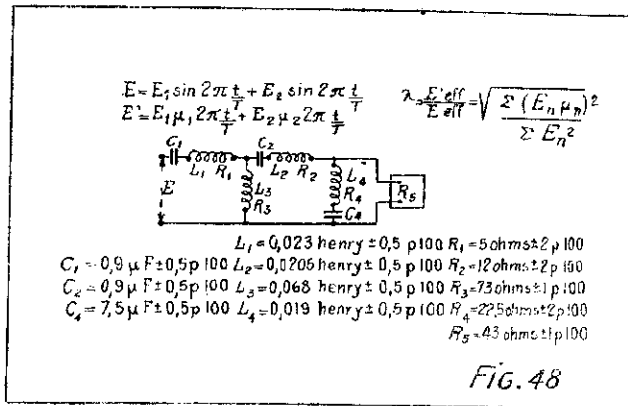


primera aproximación, (H. S. Osborne T. of. The A. I. of. E. 1919, vol. 28 página 261), como proporcional a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las vibraciones elementales. Esta relación, que aun no está rigurosamente establecida, permite definir para cada forma de onda o corriente un factor llamado de *interferencia telefónica* (La C. R. C. lo llama «Wave factor»).

La C. R. C. lo define así:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum (E_n \mu_n)^2}{\sum E_n^2}}$$

El cálculo analítico de λ sería muy laborioso pues habría que descomponer la onda E en sus armónicas, sumar los cuadrados de sus productos por los pesos o coeficientes de sensibilidad μ , etc...



H. S. Osborne ha ideado el circuito que indicamos que tiene la propiedad de que la lectura del Amperímetro es proporcional a

$$\sqrt{\sum (E_n \mu_n)^2} = E^1$$

y como por otra parte la lectura directa del Amperí-

metro sobre la máquina es proporcional a

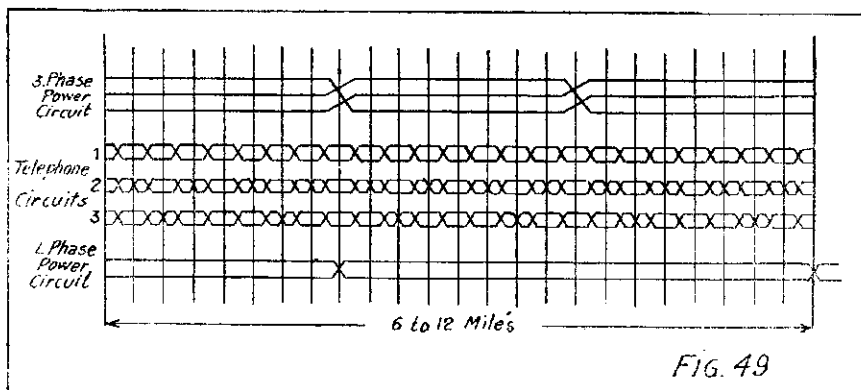
$$\sqrt{\sum E_n^2} = E$$

Se tiene

$$\lambda = \frac{E^1}{E}$$

No hay acuerdo sobre el valor máximo aceptable para λ .

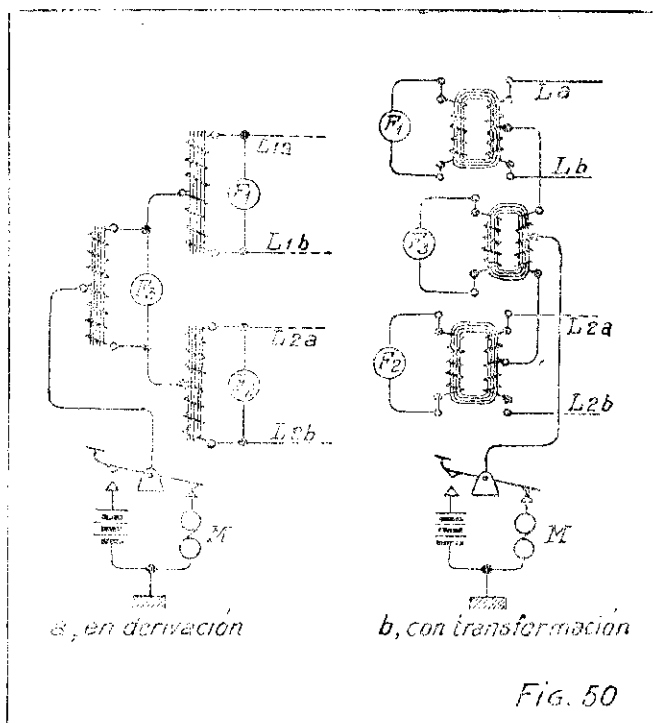
13. Las transposiciones se efectúan cruzando los alambres en los postes en un orden análogo al que se indica en la fig. 49. Los circuitos telefónicos deben



transponerse en todo caso para evitar las interferencias entre ellos que dan lugar a que en un circuito se oiga lo conversado en el otro.

CAPITULO XII

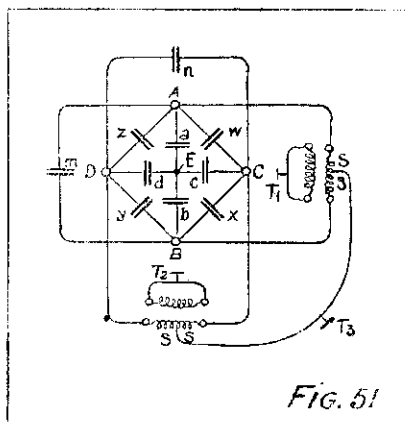
TELÉFONOS Y TELÉGRAFOS SUPERPUESTOS. TELEFONÍA MÚLTIPLE



1. Sobre una línea telefónica doble, o sea compuesta de dos conductores, se puede superponer una comunicación telegráfica de modo que su funcionamiento simultáneo no origine interferencias. Para conseguirlo basta colocar en los extremos de la línea telefónica bobinas de repetición, o sean pequeños transformadores del tipo toroidal, y tomar del punto medio del primario una derivación del aparato teleográfico que

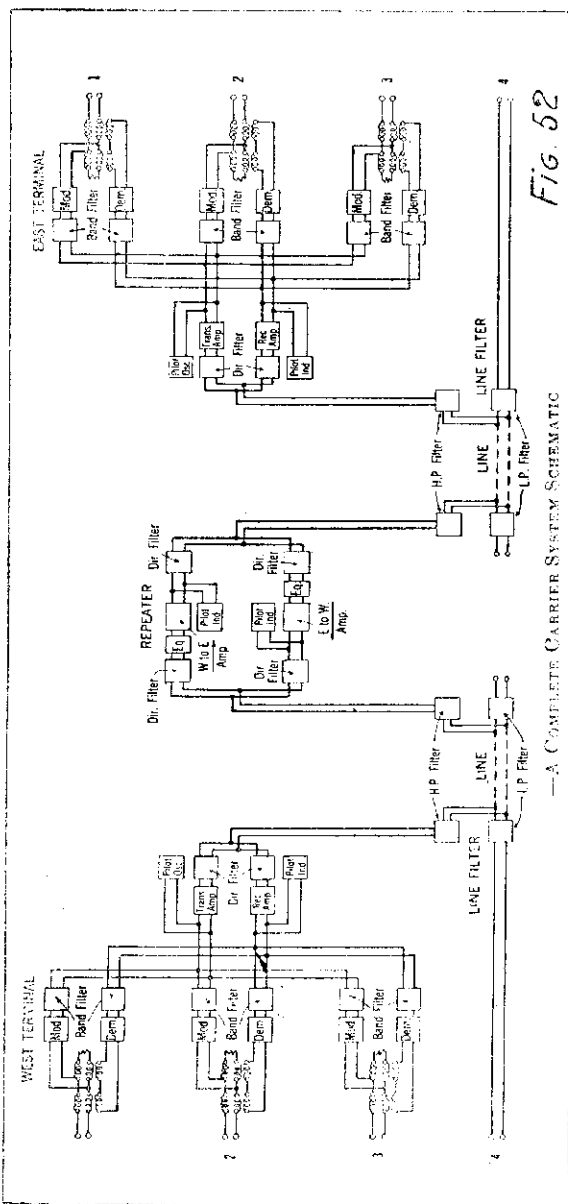
funciona como si la doble línea telefónica fuera una sola línea con retorno por tierra. La corriente telegráfica no tiene acción sobre los teléfonos siempre que la derivación esté tomada exactamente en el punto central del primario del transformador y que las dos ramas del circuito telefónico sean de características iguales, porque en este caso, la corriente telegráfica se reparte por igual en las dos mitades del primario de los transformadores y su acción, en consecuencia, es nula sobre los secundarios.

2. Sobre dos líneas telefónicas dobles se puede superponer una tercera comu-



nicación telefónica sin originar interferencias, siempre que las características de las líneas sean iguales. El principio es el mismo que en el caso de la superposición telegráfica. Basta examinar la fig. 50 para comprender el funcionamiento de estas instalaciones. Sin embargo, en este caso es de mayor importancia obtener el balance perfecto de las dos líneas telefónicas sobre las cuales debe funcionar el teléfono superpuesto y no sólo deben compensarse las resistencias sino también las capacidades que quedan indicadas en la fig. 51. Otra precaución que debe tomarse es tener en cuenta el circuito superpuesto en las transposiciones. Si se trata de un cable debe emplearse de los llamados «double twin», o sea que tienen cada dos pares retorcidos que son los que deben tomarse para la supersposición. Los ingleses y norteamericanos distinguen con el nombre de circuitos físicos a los circuitos metálicos y circuito fantasma (phantom circuit) al superpuesto.

3. El «Wire Carrier System» que en castellano puede designarse por «Sistema de alta frecuencia con alambre portador» es el sistema más moderno de telefonía múltiple. Este sistema fué patentado en 1911 por el ingeniero norteamericano Major Squier y desarrollado, hasta darle posibilidades comerciales, en los laboratorios y por los ingenieros de la American Telegraph and Telephone



C.º En 1914 esta Compañía instaló el primero de estos sistemas entre Pittsburgh y Baltimore.

El sistema consiste en llevar por un circuito metálico una corriente eléctrica de radio frecuencia que es modulada por el aparato telefónico transmisor, es decir,

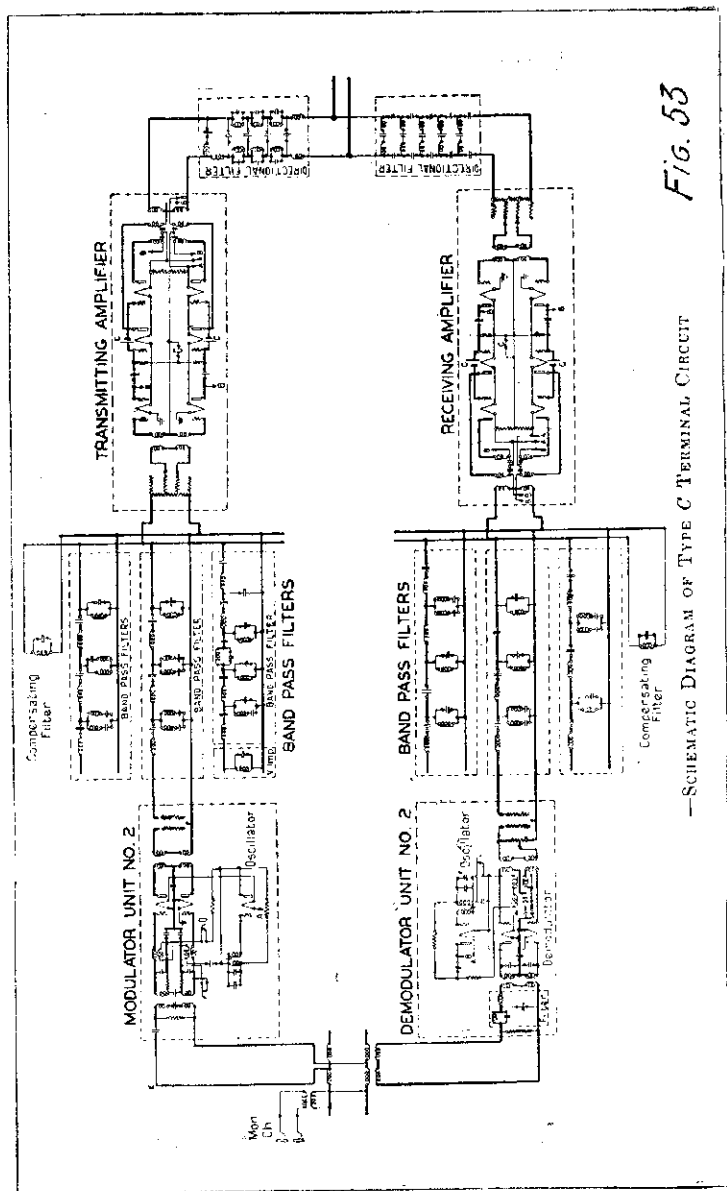


Fig. 53

—SCHEMATIC DIAGRAM OF TYPE C TERMINAL CIRCUIT

la amplitud de la onda portadora es modificada de acuerdo con las variaciones de la onda sonora. En el extremo receptor esta corriente es rectificadora y se obtiene una corriente pulsatoria capaz de accionar el fono. Con el objeto de evitar fenómenos de ecos, la onda portadora con que se transmite es de frecuencia diferente que la onda portadora con que se recibe. En radiotelefonía se estudiará con más detención la teoría de la modulación.

El Major Squier empleó para la onda portadora frecuencias hasta de 600 kilociclos, pero los ingenieros de la A. T. & T. las han limitado a 50 kilociclos porque la atenuación sobre circuito metálico aumenta muy rápidamente con la frecuencia. En la práctica las frecuencias usadas quedan en los alrededores de 30 kilociclos.

Este sistema sólo se usa en líneas de larga distancia cuando resulta más caro instalar nuevas líneas metálicas. Sobre cada línea metálica existente es posible superponer sobre la comunicación telefónica a audiofrecuencia tres y más comunicaciones con ondas portadoras a alta frecuencia distanciadas de 3 en 3 kilociclos. La atenuación de las ondas portadoras obliga a instalar repetidores cada 200 a 500 kilómetros.

En los generadores de alta frecuencia, moduladores, amplificadores y repetidores se emplea el Audión. Las figs. 52 y 53 dan el esquema del circuito más moderno desarrollado por la A. T. & T.

Detalles completos sobre este sistema de telefonía múltiple se encuentran en las Transactions del A. I. E. E. de los años 1921 y 1928.

4. Este mismo sistema de telefonía con onda portadora a alta frecuencia se ha utilizado con resultados medianos, para superponer una vía telefónica sobre una línea de transmisión de energía eléctrica. Para acoplar el sistema telefónico al sistema de energía se emplean o condensadores o una antena paralela a la línea de transmisión.

El inconveniente que presenta este sistema es su excesiva complicación para un personal no especializado y la necesidad de mantener los audiones encendidos aunque el tráfico sea muy poco intenso. Se comprende que este sistema lo emplea la Empresa dueña de la línea de transmisión con el objeto de tener una vía telefónica de uso privado.

Detalles de este sistema se encuentran en las Transactions del A. I. E. E. del año 1924.

(Continuará)