



FACULTAD DE INGENIERIA  
U. N. A. M.

PROTECCION CONTRA OSCILACIONES EN  
SISTEMAS DE POTENCIA

TESIS PROFESIONAL

JORGE PEDRO RODRIGUEZ ARREDONDO



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## C O N T E N I D O :

### CAPITULO I

### PAGINA

Naturaleza del Fenómeno de Oscilación.	1
Estabilidad.	1
Curvas P-6.	2
Estabilidad Transitoria.	5

### CAPITULO II

Análisis Matemático.	15
Impedancia Vista por el Relevador Durante una Oscilación.	15

### CAPITULO III

Relevadores Electromagnéticos.	30
Principios Generales.	30
Elemento de Copa.	33
Elemento de Reactancia.	37
Elemento Tipo MHO.	40
Relevador KD (Westinghouse).	44
Relevador KS de Bloqueo en Oscilaciones (Westinghouse).	65
Relevador Tipo CEB51A (General Electric).	67
Relevador NAA19B y CEX17E (General Electric).	70

### CAPITULO IV

Semiconductores.	83
Diodos.	87

PAGINA

Transistores.	93
Transistor Unijunction.	96
Rectificador de Silicio Controlado.	99

CAPITULO V

Circuitos de Protección Transistorizado.	104
Circuitos Lógicos.	106
Circuitos de Tiempo.	112
Circuitos Auxiliares.	115
Circuitos Discriminadores.	117
Circuito Block - Block (MT).	117
Circuito Block - Spike (MB).	130
Relevadores Transistorizados (Mitsubishi).	132

Apéndice 1	24
Apéndice 2	26
Apéndice 3	76
Apéndice 4	142

## CAPITULO I

### NATURALEZA DEL FENOMENO DE OSCILACION.

#### I.1 Estabilidad:

Se dice que un sistema de potencia es estable - cuando todas sus máquinas están en sincronismo; esta situación debe ser mantenida en condiciones normales o anormales. Cuando una máquina síncro na trabaja en condiciones estables, existe equilibrio entre la potencia mecánica entregada por la turbina y la potencia eléctrica tomada del ge nerador. De hecho, despreciando pérdidas, debe - cumplirse que:

Pot. Mecánica = Pot. Eléctrica.

Cuando el sistema pierde el equilibrio entre las dos potencias en forma momentánea pero con recuperación rápida, se dice que es Estable y cuando no posee la habilidad para recuperar su balance se dice que es Inestable.

La solución del problema de estabilidad en Siste ma de Potencias se reduce a determinar si la potencia eléctrica máxima que es transferida de - una máquina o grupo de máquinas a otra máquina - o grupo de máquinas, es o no mayor que la potencia mecánica máxima que puede ser suministrada - o tomada de sus flechas. A ese valor máximo de potencia transferida que ocurre sin pérdida de - sincronismo se le llama Límite de Estabilidad.

Para facilitar el análisis del problema de estabilidad, éste se ha dividido en tres grupos regidos por los mismos principios; división hecha en forma totalmente arbitraria.

a.) Hunting:

Oscilaciones sostenidas o permanentes entre máquinas, que no alcanzan a perjudicar el sistema.

b.) Estabilidad en Estado Estable:

Las variaciones que afectan al sistema ocurren lentamente en relación con las oscilaciones naturales de éste o con los cambios de flujo en máquinas rotatorias.

c.) Estabilidad Transitoria:

Las variaciones que afectan al sistema ocurren de manera súbita motivadas por operación manual de interruptores o por cortos circuitos.

Desde el punto de vista de protecciones el único interesante es el tercero, conclusión que será justificada a través de este trabajo.

I.2 Curvas P-5:

Consideremos el sistema mostrado en la Fig. 1-1, donde  $eA1$ ,  $eB1$ , y  $eC1$ , son tensiones trifásicas balanceadas en el punto 1, separadas por una impedancia  $Z$  en cada fase de las tensiones trifásicas  $eA2$ ,  $eB2$  y  $eC2$ , presentes en el punto 2. Las diferencias en magnitud de las tensiones entre -

(1) y (2), producen flujo de potencia reactiva y las diferencias en el ángulo de fase de esas tensiones causan flujo de potencia real.

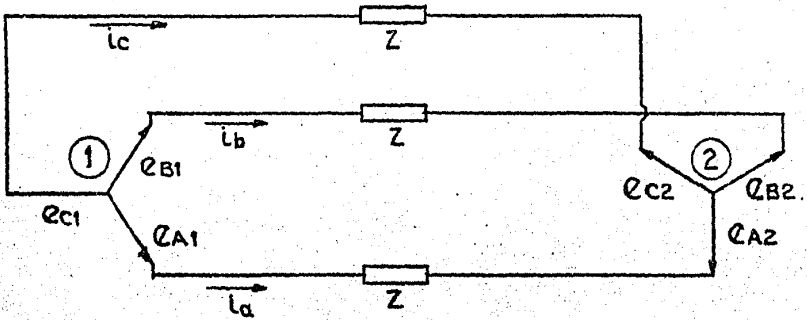


Fig. 1 - 1

Concluimos por lo anterior que para que exista transferencia de potencia entre (1) y (2) deberá existir defasamiento entre voltajes.

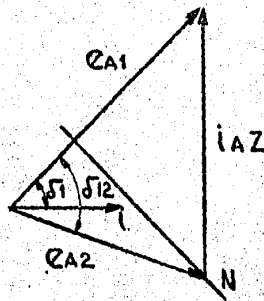


Fig. 1 - 2

El valor de P será:

$$P = E_{A1} I A \cos \delta \quad (1-1)$$

De acuerdo con la Fig. 1-2:

$$E_{A2} \sin \delta_{12} = N \quad (1-2)$$

$$E_{A2} \sin \delta_{12} = I A Z \sin \alpha \quad (1-3)$$

$$\alpha = 90^\circ - \delta_1$$

$$\operatorname{sen} \alpha = \cos \delta_1 \quad (1-4)$$

Despejando  $\operatorname{sen} \delta_1$  de la ecuación (1-3), e igualando con (1-4).

$$\cos \delta_1 = \frac{e_{A2} \operatorname{sen} \delta_{12}}{LZ} \quad (1-5)$$

y sustituyendo (1-5) en (1-1):

$$P = \frac{e_{A1} e_{A2}}{Z} \operatorname{sen} \delta_{12} \quad (1-6)$$

Esta relación graficada en ejes  $P-\delta$  Fig. 1-3, nos indica que el valor crítico de  $\delta_{12}$  es  $90^\circ$ , y que la potencia máxima que puede ser transferida es:

$$P_{\max} = \frac{e_{A1} e_{A2}}{Z} \quad (1-7)$$

Generalmente en:  $Z=R+jX$ , es predominante la  $X$ , - por lo que si se desprecia  $R$ , el error no es considerable, por lo tanto:

$$P_{\max} = \frac{e_{A1} e_{A2}}{X} \quad (1-8)$$

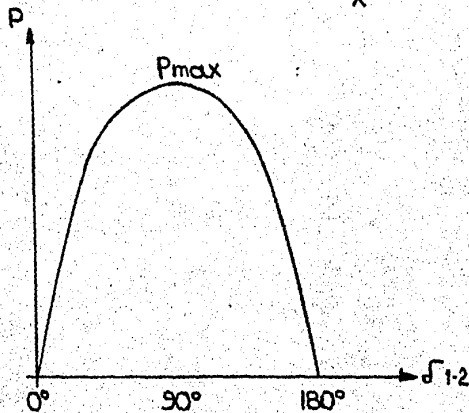


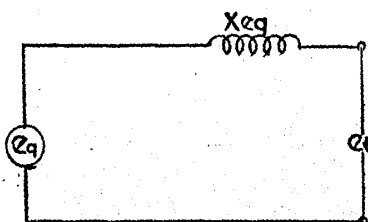
Fig. 1 - 3

Las tensiones y reactancias representados en la ecuación (1-8) por los símbolos  $e_{A1}$ ,  $e_{A2}$  y  $X$  - tienen el siguiente significado:  $e_{A1}$  y  $e_{A2}$  defasados un ángulo  $\delta_{1-2}$ ; son las tensiones aplica-



das en los extremos de Z. La reactancia X usada en los cálculos de estabilidad incluye las reactancias de máquina.

Las tensiones eA1, eA2 son las tensiones atrás de la reactancia como se indica en la Fig. 1-4.



$X_{eq} = 0.75X_d$  para estabilidad en estado estable.

$X_{eq} = X'_d$  para estabilidad transitoria.

Fig. 1 - 4

Si  $\delta$  1-2 es pequeño la potencia transferida y la corriente son pequeñas y si el valor de  $\delta$  1-2 es cercano a  $90^\circ$ , considerado como el límite de estabilidad, la potencia transferida y la corriente serán máximas. El valor de  $X_{eq}$  considera la saturación del Generador en presencia de corrientes cercanas a plena carga.

### I.3 Estabilidad Transitoria:

Un estudio de estabilidad nos dará información relacionada con la habilidad del sistema, para permanecer en sincronismo durante disturbios más o menos graves que resulten de pérdida de generaciones o de transmisión, cambios bruscos de carga o fallas, o sea que se involucran transitorios eléctricos y mecánicos. En la Ec:

$$P = \frac{e_{A1} e_{A2}}{X} \sin \delta_{12} \quad (1-9)$$

Las cantidades eléctricas que se usan son valores subtransitorios. El voltaje atrás de reactancia  $X'd$  será:

$$e'q = e_t + R_a I_t + jX'd I_t \quad (1-10)$$

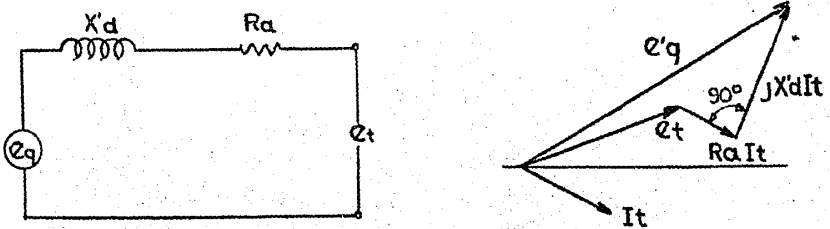


Fig. 1 - 5

Y de la misma manera, los transitorios de naturaleza mecánica están íntimamente ligados con las inercias de máquinas rotatorias. Estas inercias determinan qué tan rápido y qué tan lejos tienden los componentes del sistema a separarse en posición angular relativa cuando existe falla y determina así mismo si el sistema recupera sincronismo una vez librada la falla.

Los relés electromecánicos o transistorizados para bloqueo o para disparo, por oscilaciones o pérdidas de sincronismo se rigen de acuerdo con el siguiente criterio:

- 1.- Si existe falla, el esquema de bloqueo (OSB) o disparo (OST) no debe ejercer influencia alguna sobre el esquema de protecciones.
- 2.- Si existe falla con recierre inmediato, los esquemas OSB y OST no deben ejercer influencia

sobre el esquema de protecciones ni sobre el re cierre automático.

3.- Si existe oscilación sin pérdida de sincronismo, el esquema generalmente usado es de bloqueo (OSB) de tal manera que el esquema de protección primaria, quede imposibilitado para ordenar un disparo equivocado.

4.- Si existe oscilación y pérdida de sincronismo, el esquema será de disparo (OST) con bloqueo de la función de recierre.

Lo anterior visto en curvas  $P-\delta$  resume los casos interesantes, mostrados a continuación:

La figura 1-6, establece una comparación entre las curvas  $P-\delta_0$  en estado estable y  $P-\delta'$  en estado transitorio. En realidad se pretende establecer un concepto cualitativo mediante el uso de la ecuación de potencia. El sistema se ha reducido a uno equivalente de dos máquinas representadas por sus tensiones generadas internas. La línea horizontal representa la potencia mecánica de la máquina considerada constante, despreciando las variaciones o fluctuaciones debidas al mecanismo de control de velocidad.

Consideremos ahora que inicialmente los generados están operando con  $e_1$ , atrás de reactancias en el momento en que súbitamente se varía el valor de  $x_{e1}$  a otro  $x_{e2}$ . Las curvas  $P-\delta$  para análisis transitorio se muestran en la figura 1-7.

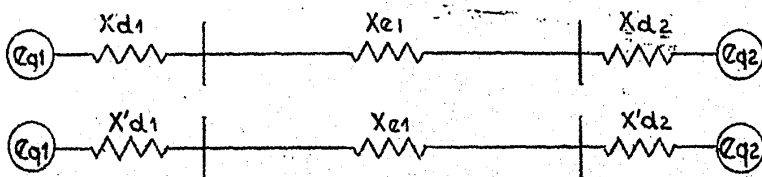
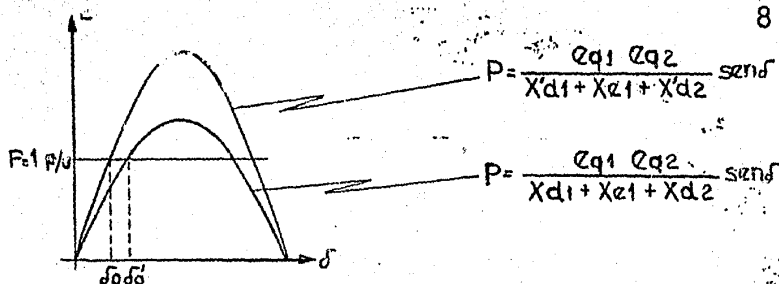


Fig. 1 - 6

La única diferencia entre las dos curvas es la variación en la reactancia interna de las máquinas.

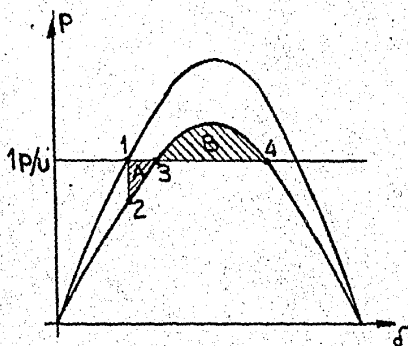


Fig. 1 - 7

En el punto (1) la potencia mecánica de entrada es igual a la potencia eléctrica de salida; - cuando  $X_{e1}$  cambia a  $X_{e2}$ , la potencia eléctrica disminuye (punto 2) en relación con la potencia entregada por la turbina. La máquina se acelera y el ángulo  $\delta$  aumenta sobre la curva  $P-\delta'$  final; al llegar al punto (3) el rotor ha almacenado energía cinética o de aceleración proporcional -

al área A. Este exceso de energía mueve el punto de operación hacia (4). En la región ascendente (B) de la figura 1-7, la potencia eléctrica es mayor que la mecánica y el rotor se desacelera; aparentemente, observando escalas, el área A (puntos (1), (2) y (3)), es mayor que el área B (puntos (3) y (4)), lo cual indica que la energía almacenada no fue totalmente consumida, por lo que  $\delta$  continúa aumentando a un valor correspondiente a un punto más alto de (4), de par neto acelerante. Es evidente que en estas condiciones el sistema ha perdido estabilidad y que debe, dependiendo de su importancia, ser provisto con algún dispositivo de protección que de orden de apertura a uno o varios interruptores para dividir el sistema y conservar áreas autosuficientes.

El siguiente caso interesante sería uno en que el punto (4) aunque cercano al valor crítico no causará pérdida de estabilidad en el sistema. - Fig. 1-8.

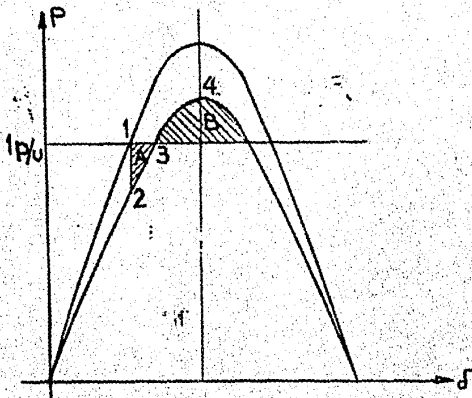


Fig. 1 - 8

Consideramos ahora que la energía cinética almacenada por el rotor en su camino de (2) a (3) es totalmente disipada de tal modo que las áreas A y B sean iguales. El punto (A) se encuentra en la zona de par neto desacelerante, por lo que el rotor se desacelera hasta un punto localizado en la zona de aceleración entre (2) y (3). Esta oscilación perdura hasta alcanzar equilibrio permanente en el punto (3).

Es evidente en este caso, que los esquemas de protección sensibles a este tipo de fenómeno, deben ser bloqueados, considerando que el sistema se recupera y que un disparo equivocado causaría en esas condiciones variaciones que afectarían seriamente el sistema.

Si ocurre un falla trifásica, la potencia transmitida hacia el sistema se reduce a cero, o mejor dicho en la curva P- $\delta$  la potencia de salida del generador se reduce y se mantiene en cero hasta el libramiento de la falla; cuando esto ocurre, la potencia crece instantáneamente hasta la curva P- $\delta$  final.

En este caso la energía de aceleración representada por el área A de la figura 19, es mayor que en el caso anterior. Para lograr que las áreas A y B sean iguales, el ángulo  $\delta_0$  máximo alcanzado en la primera oscilación es también mayor que en el caso anterior.

El esquema para disparo o bloqueo por oscilaciones deberá comportarse de la siguiente manera; al presentarse al falla, no deberá impedir bajo

ningún concepto la operación de la protección - que debe encargarse de la medición y libramiento de la misma y tomar decisión de bloqueo si el sistema se recupera o dispara si se ha perdido estabilidad. En este momento, es oportuno confirmar el hecho de que si el tiempo de operación de protecciones, es exageradamente grande, el área (A) lo será también y las posibilidades de perder estabilidad aumentan considerablemente.

Entre más corto sea dicho tiempo, mayores serán las posibilidades de mantener estabilidad.

Para analizar la función de recierre y su influencia en la estabilidad del sistema, consideremos que  $e'_{q1}$  y  $e'_{q2}$  están conectadas a través de un doble circuito cada uno con un valor de reactancia igual a  $2X_{e1}$ .

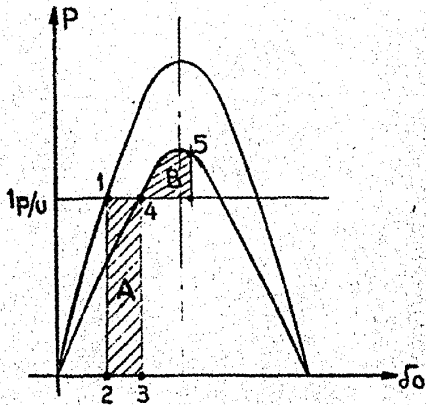
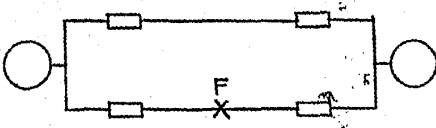


Fig. 1 - 9

$X_t$  es la reactancia equivalente o de transferencia que conecta  $e'_{q1}$  y  $e'_{q2}$  con la falla conectada en un circuito.



$$P_{2L} = \frac{E'_{q1} E'_{q2}}{X'd_1 + X_{e1} + X'd_2} \sin \delta$$

$$P_{1L} = \frac{E'_{q1} E'_{q2}}{X'd_1 + 2X_{e1} + X'd_2} \sin \delta$$

$$P_{cc} = \frac{E'_{q1} E'_{q2}}{X'd_1 + X_T + X'd_2} \sin \delta$$

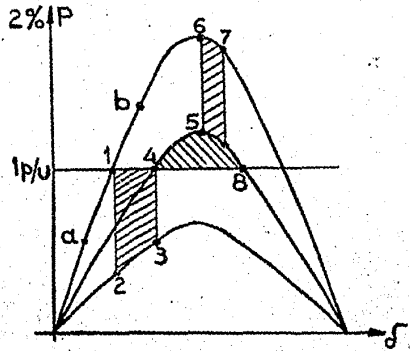


Fig. 1 - 10

En la figura 1-10, (1) es el punto inicial de operación, ocurre el corto circuito que reduce instantáneamente la habilidad del sistema, para transferir potencia (punto (2)).  $\delta$  aumenta a lo largo de la curva Pcc hasta el punto (3) donde ocurre el libramiento de la falla. Esto permite una recuperación parcial, (punto (4)), sin embargo, la energía cinética almacenada por el rotor debe ser disipada;  $\delta$  aumenta sobre la curva P1L hasta el punto (5) donde ocurre el recierre rápido (6). La variación de  $\delta$  sobre la curva P2L- $\delta$  es pequeña; de hecho el rotor se desacelera, llega al punto (a), se acelera, llega al punto (b) y oscilando llega finalmente al punto (1) de equilibrio inicial.



De no haber ocurrido el recierre en el punto - (5) es probable que el sistema hubiera perdido estabilidad (Area 1-2-3 > Area 4-5-7), al ocurrir éste. El área sobre la recta  $p=1$  p.u. crece considerablemente y existe casi en forma absoluta la seguridad de que el sistema permanece estable.

En este caso, considerando la probable existencia de esquemas de disparo y bloqueo en los 4 interruptores el comportamiento debe ser como sigue:

- a) Al ocurrir la falla el esquema OSB no debe tomar influencia sobre la protección primaria de la línea fallada.
- b) El esquema OSB no debe tener influencia sobre el recierre rápido.
- c) El esquema OSB debe bloquear el esquema de protección primaria de la línea sana durante las oscilaciones o "power - swings" que ocurren debido a la falla.
- d) En caso de que el sistema fuera inestable el esquema OST debe disparar la línea sana con bloqueo del recierre - rápido.

Una última conclusión interesante es la siguiente: oscilaciones entre sistemas en la cual se involucran inercias de máquinas rotatorias, se llevan a cabo en períodos de tiempo más o menos prolongados, en relación con el tiempo de opera

ción de protecciones o el tiempo (considerado - instantáneo) de variación de los vectores ten--- sión y corriente cuando ocurre el corto circuito.

\* Oscilación de potencia mecánica, durante la - cual las variaciones son sólo de 'corriente y ten sión, permaneciendo constante la frecuencia.

## CAPITULO II

### ANALISIS MATEMATICO.

Impedancia vista por el relevador durante una oscilación:

La respuesta de los relés a las oscilaciones depende de las magnitudes de tensión y corriente de operación, puede ser por supuesto, una combinación de ambos, pero teniendo en cuenta siempre la característica de operación.

Los principales tipos de relevadores que son afectados por oscilaciones de potencia son aquellos que miden la impedancia aparente al ocurrir una oscilación.

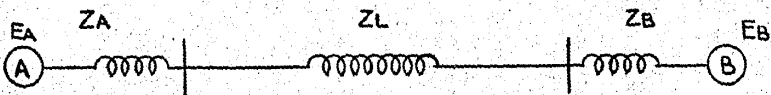


Fig. 2 - 1

La figura 2-1 representa dos fuentes generadoras A y B que tienen una impedancia interna  $Z_A$  y  $Z_B$  conectadas por la línea de transmisión con una impedancia  $Z_L$ . Cada fuente generadora puede contar con una o varias máquinas, las cuales están en sincronismo. El relevador cuyo comportamiento

to en una oscilación será investigado, es el localizado al final de A. Para los propósitos del cálculo serán despreciadas las capacitancias y las cargas en paralelo, suponiendo constante la tensión a través de la oscilación.

Los valores de tensión y corriente en las terminales del rele y la impedancia resultante  $Z_R$ , están dadas por la siguiente ecuación. (Apéndice 1).

$$\frac{V}{I} = Z_R = (Z_A + Z_L + Z_B) \frac{n(n \cos \Theta - j \operatorname{sen} \Theta)}{(n \cos \Theta)^2 + \operatorname{sen}^2 \Theta} - Z_A \quad (2-1)$$

donde  $n = E_A / E_B$ .

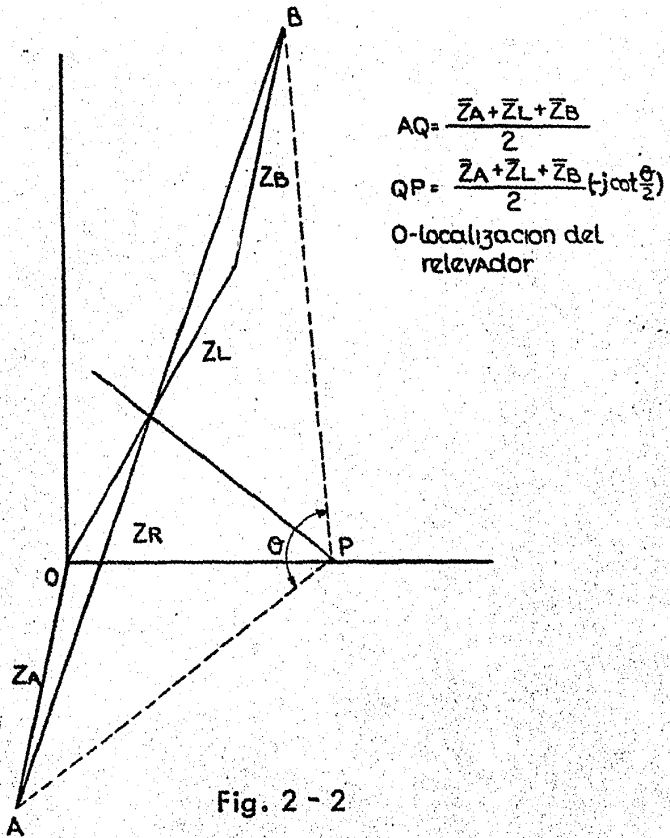
$\Theta$  = ángulo que  $E_A$  ha avanzado con respecto a  $E_B$  en un tiempo dado.

Para fijar el comportamiento de los relevadores en una oscilación es en general suficientemente exacto suponer que las dos tensiones generadas  $E_A$  y  $E_B$  son iguales en magnitud y por lo tanto  $n=1$  en la ecuación 2-1 y la impedancia entonces es:

$$Z_R = \frac{Z_A + Z_L + Z_B}{2} (1 - j \cot \Theta / 2) - Z_A \quad (2-2)$$

Este valor de  $Z_R$  se esquematiza en el diagrama R-X de la figura 2-2 para un valor de  $\Theta$  menor a  $180^\circ$ , en donde el punto P es un punto de la característica de oscilación. Si nuevos valores de  $Z_R$  son calculados para diferentes valores de  $\Theta$  el lugar geométrico de las puntas de todos los vectores impedancia será una línea recta -

(Ver apéndice 2) que es perpendicular y bisectriz de la impedancia total de la línea AB.



Como se muestra en la figura 2-3 para localizar el punto P correspondiente a un ángulo  $\theta$  entre los dos generadores, éste se encuentra dibujando una línea desde el final de AB, la cual representa la impedancia total del sistema y a un

ángulo  $90^\circ - \frac{\theta}{2}$ . La intersección de esta línea con la de la oscilación nos da la localización del punto correspondiente al ángulo  $\theta$ .

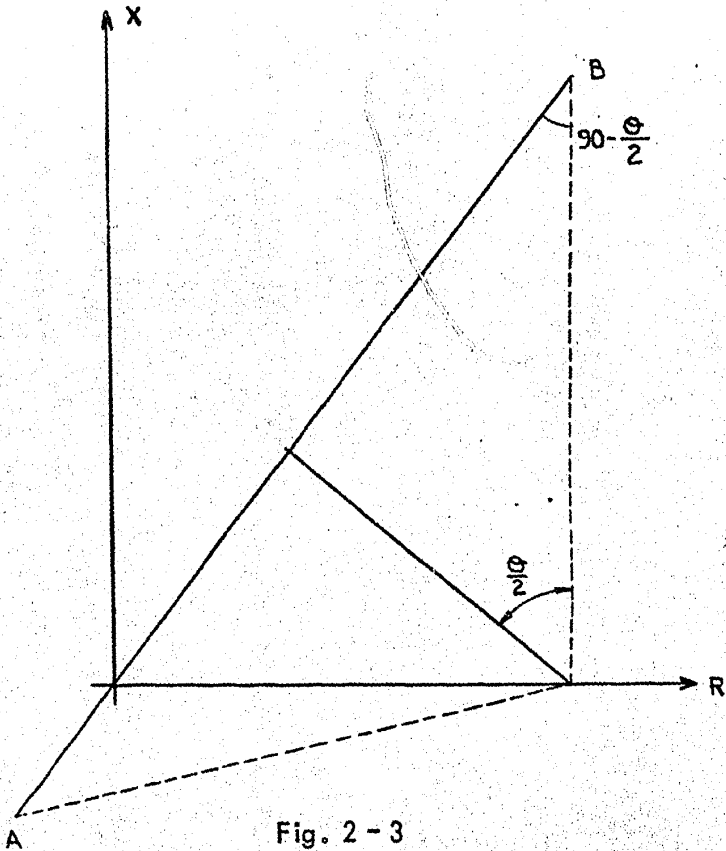


Fig. 2 - 3

En caso de que las tensiones generadas no sean iguales, los lugares geométricos de las oscilaciones de potencia son círculos con centros en la línea AB o en su prolongación.

La figura 2-4 muestra las tres características de oscilación para  $n > 1$ ,  $n = 1$  y  $n < 1$ . Para determinar la respuesta de cualquier relevador de distancia, se superpone la característica de operación en el mismo diagrama R-X de la característica de oscilación.

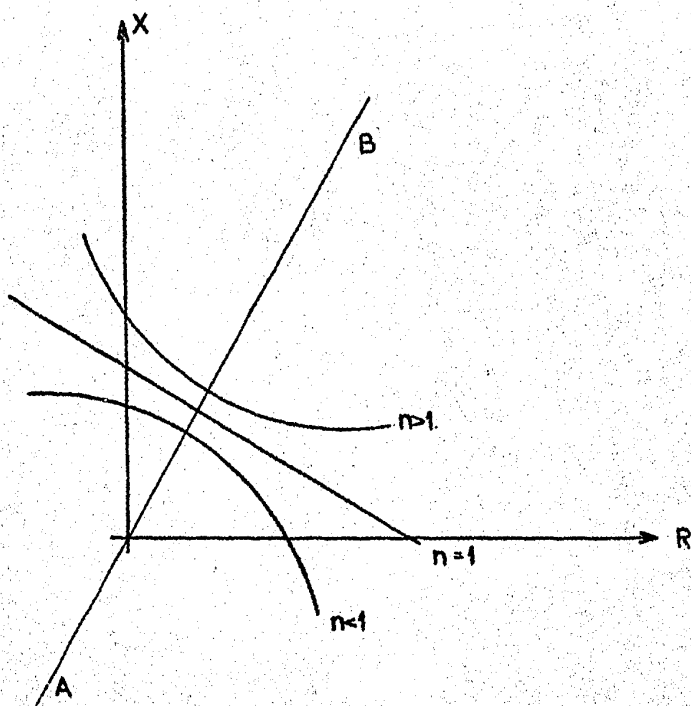


Fig. 2 - 4

La figura 2-5 muestra la característica de operación de un relevador tipo MHO, localizado en el extremo A de la línea anteriormente considerada.

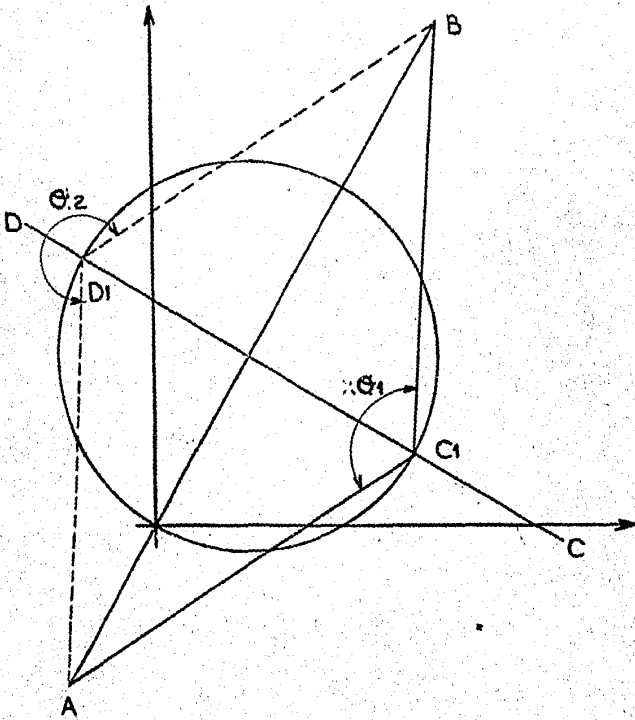


Fig. 2 - 5

También se muestra en este diagrama, la característica de oscilación  $\overline{CD}$ . El relevador opera dependiendo de su tiempo de operación y del tiempo que toma la oscilación en pasar a través de la característica del relevador desde C1 a D1. Este tiempo puede ser fácilmente calculado si la curva de oscilación o curva ángulo-tiempo para el sistema ha sido determinada para una condición dada y los valores de  $\Theta$  correspondientes a los



diferentes tiempos substituídos en la ecuación 2-1. Esto nos dará un valor de Z correspondiente a un tiempo dado después de que comenzó el disturbio.

En la figura 2-5, ( $\Theta 2 - \Theta 1$ ) es el cambio angular relativo del generador A al generador B, durante el tiempo que la característica de oscilación está atravesando la característica del relevador. Los tiempos, desde el principio del disturbio correspondientes a estos dos ángulos, pueden ser encontrados en la curva de oscilación; la diferencia, es el tiempo durante el cual el relevador MHO tendrá una tendencia a operar.

Si una curva de oscilación no ha sido calculada para el sistema, una aproximación cercana al comportamiento del relevador, puede ser obtenida si se supone un incremento constante de deslizamiento (S) entre los dos generadores en cuyo caso el tiempo durante el cual el relevador tendrá una tendencia a operar está dado por:

$$t = \frac{\Theta 2 - \Theta 1}{360S} \quad (2-3)$$

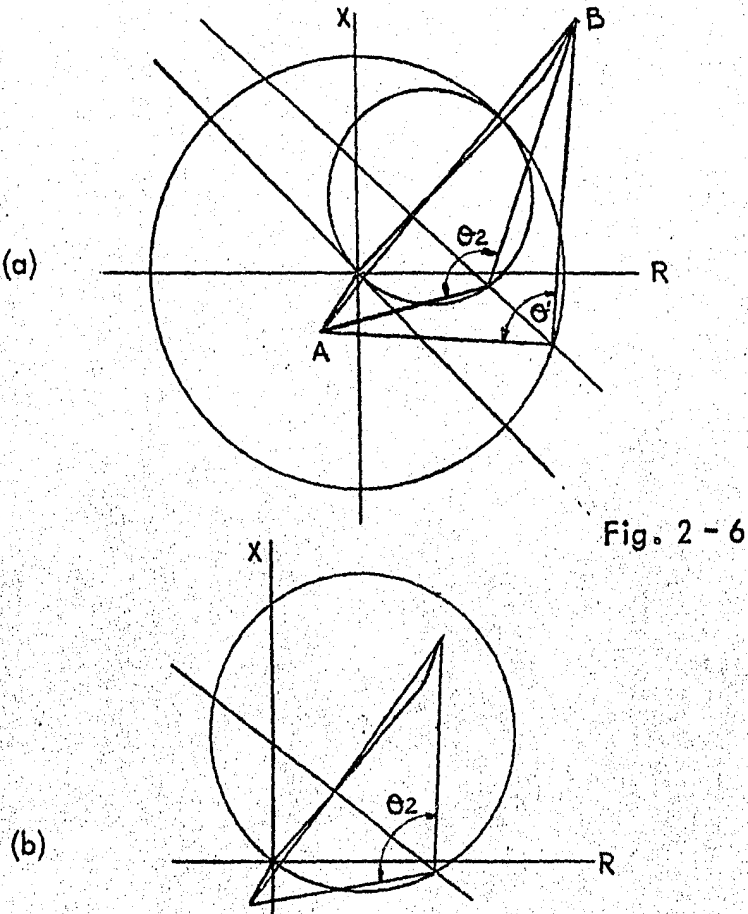
Deben ser considerados los efectos de cambio en los sistemas debidos a switcheos y cambios de generación, para fijar el comportamiento de los relevadores de distancia a los efectos de las oscilaciones. Estos cambios de impedancia pueden mostrar el centro eléctrico del sistema, sacando alguna parte del mismo de la región protegida.

Como la oscilación de potencia siempre pasa a través del centro eléctrico del sistema, la ten-

dencia a operar del relevador dependerá del lugar y en gran parte de la configuración del sistema en ese tiempo.

Entre más pequeña sea el área encerrada por la característica de operación del relevador, mayor será la inmunidad del mismo para operación en oscilaciones.

Las características de los tres principales tipos de relevadores de distancia se muestran en la figura 2-6, teniendo cada una el mismo ajuste de alcance.



De la figura 2-6a, se puede ver que de los tres tipos, el MHO es el relevador menos propenso para operar en una oscilación e igualmente permitirá a las tensiones generadas internas separarse un ángulo mayor.

La figura 2-6b muestra la característica del relevador de reactancia y la característica del relevador tipo MHO que es necesaria para definir la operación del de reactancia. Como el relevador MHO debe tener un alcance más grande, dado que su función es detectar fallas, esta combinación de relevadores es la más expuesta a operar en oscilaciones.

Selección de las líneas a ser libradas al ocurrir una oscilación:

En la sección precedente se vió que los relevadores son afectados de diferente manera por las oscilaciones. Es obvio que el mejor relevador para usarse desde este punto de vista es aquel que no opere en una oscilación de la que pueda recobrase el sistema.

Por otro lado, cuando los generadores o conjuntos de generadores pierden sincronismo uno con otro, es esencial, que sean separados para mantener el servicio. Es deseable bajo estas condiciones que el punto del sistema donde el disparo sea hecho, sea elegido lo más adecuadamente posible para que la capacidad generadora sea sensiblemente igual a la carga en cada sección del sistema. Es frecuente el caso de que los relevadores de distancia instalados en los puntos se--

leccionados efectúen esta función además de la normal de protección, pero como ya se discutió - previamente puede haber alteraciones en los parámetros del sistema debido al disparo de líneas o generadores que cambian el lugar geométrico de la impedancia en la oscilación.

### APENDICE 1.-

#### FORMULA GENERAL PARA OBTENER LA IMPEDANCIA VISTA DESDE UN RELEVADOR.

El sistema de la figura (2-7), la corriente será:

$$I = \frac{E_A - E_B}{Z_A + Z_L + Z_B} \quad (2-4)$$

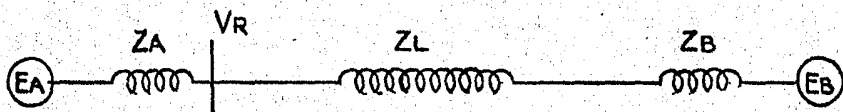


Fig. 2 - 7

El voltaje en el relevador:

$$V_R = E_A - I Z_A \quad (2-5)$$

Substituyendo 2-4 en 2-5:

$$V_R = E_A - \frac{(E_A - E_B) Z_A}{Z_A + Z_L + Z_B} \quad (2-6)$$

Dividiendo 2-6 entre I:

$$\frac{V_R}{I} = Z = (Z_A + Z_L + Z_B) \left( \frac{E_A}{E_A - E_B} \right) - Z_A \quad (2-7)$$

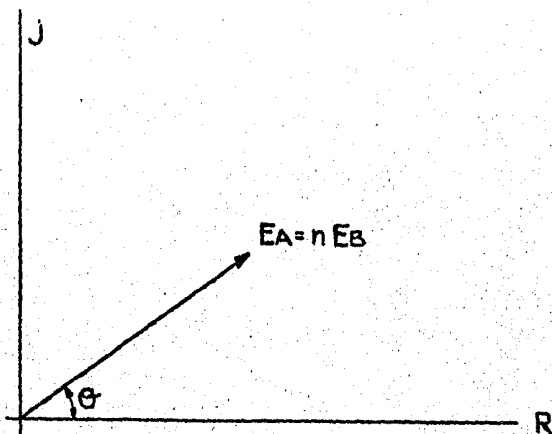


Fig. 2 - 8

Si  $E_a$  se adelanta a  $E_b$  un ángulo  $\theta$ , como se ve en la figura 2-8 y si  $E_a = n E_b$ , podemos deducir que:

$$\begin{aligned} \frac{E_A}{E_A - E_B} &= \frac{n(\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta)}{n(\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta) - 1} = \frac{n(\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta)}{n \cos \theta + j n \operatorname{sen} \theta - 1} \times \frac{n \cos \theta - j n \operatorname{sen} \theta - 1}{n \cos \theta - j n \operatorname{sen} \theta - 1} \\ &= \frac{n^2 \cos^2 \theta + n^2 j \operatorname{sen} \theta \cos \theta - j n^2 \cos \theta \operatorname{sen} \theta - n \cos \theta - j n \operatorname{sen} \theta}{n^2 \cos^2 \theta + n^2 j \operatorname{sen} \theta \cos \theta - n \cos \theta - n^2 j \operatorname{sen} \theta \cos \theta + n^2 \operatorname{sen}^2 \theta + j n \operatorname{sen} \theta} \\ &= \frac{n^2(\cos^2 \theta + \operatorname{sen}^2 \theta) - n \cos \theta - j n \operatorname{sen} \theta}{n^2(\cos^2 \theta + \operatorname{sen}^2 \theta - 2n \cos \theta + 1)} \end{aligned}$$

$$= \frac{n^2 - n \cos \theta - j n \sin \theta}{n^2 - 2n \cos \theta + (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}$$

$$\frac{E_A}{E_A - E_B} = \frac{n(n \cos \theta - j \sin \theta)}{(n \cos \theta)^2 + \sin^2 \theta}$$

$$Z = \frac{(\bar{Z}_A + \bar{Z}_L + \bar{Z}_B) n (n \cos \theta - j \sin \theta)}{(n \cos \theta)^2 + \sin^2 \theta} = Z_A \quad (2-9)$$

### APENDICE 2.-

#### ANALISIS MATEMATICO DE LA IMPEDANCIA VISTA POR EL RELEVADOR DURANTE UNA OSCILACION.

Sean  $e_A$  y  $e_B$ , las tensiones atrás de la reactancia transitoria. Consideremos que las tensiones son constantes en magnitud pero varían en ángulo durante la oscilación o pérdida de sincronismo.

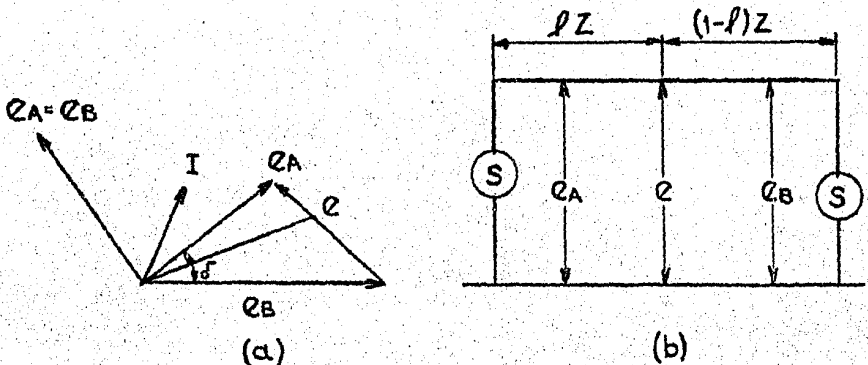


Fig. 2 - 9

La corriente  $I$  con respecto a  $e_B$  será:

$$I = \frac{e_A \mathcal{E} - e_B}{Z} \quad (2-10)$$

Donde  $Z$  es la impedancia que conecta ambos circuitos incluyendo la reactancia transitoria de las dos máquinas,  $Z$  dependiendo de la localización del punto está dividida en 2 partes  $lZ$  y  $(1-l)Z$  donde la magnitud total  $lZ + (1-l)Z = Z$ .

Por lo anterior el valor de la tensión  $e$  visto por el relevador será:

$$e = e_A \mathcal{E} - I(lZ) = e_A \mathcal{E} - \frac{e_A \mathcal{E} - e_B}{Z} (lZ) \quad (2-11)$$

$$e = e_A \mathcal{E} - e_A \mathcal{E} l + e_B l$$

$$e = e_A \mathcal{E} (1-l) + e_B l$$

La impedancia vista por el relevador es:

$$Z_R = \frac{e}{I} \quad (2-12)$$

Y substituyendo (2-10) y (2-11) en (2-12):

$$Z_R = \frac{e_A \mathcal{E} (1-l) + e_B l}{\frac{e_A \mathcal{E} - e_B}{Z}} \quad (2-13)$$

Recordando que:  $e_A = e_B$

$$\frac{Z_R}{Z} = \frac{e_A [\mathcal{E} (1-l) + l]}{e_A [\mathcal{E} - 1]}$$

$$\frac{Z_R}{Z} = \frac{(1-l)\epsilon + l}{\epsilon - 1} = \frac{\epsilon - l\epsilon + l}{\epsilon - 1}$$

$$\frac{-l(\epsilon - 1) + \epsilon}{\epsilon - 1} = -l \frac{\epsilon - 1}{\epsilon - 1} + \frac{\epsilon}{\epsilon - 1}$$

$$-l + \frac{\epsilon}{\epsilon - 1} = -l + \frac{\frac{\epsilon}{\epsilon}}{\frac{\epsilon}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon}} = -l + \frac{1}{1 - l\epsilon}$$

$$\frac{1 \cdot \epsilon^0}{1 \cdot \epsilon} = 1 \cdot \epsilon$$

$$\frac{Z_R}{Z} = -l + \frac{1(1 + \epsilon)}{(1 - l\epsilon)(1 + \epsilon)} = -l + \frac{1 + \epsilon}{1 + \epsilon - l\epsilon - 1}$$

$$\frac{Z_R}{Z} = -l + \frac{1 + \epsilon}{\epsilon - l\epsilon} \quad (2-14)$$

Expresando el vector  $\delta$  en su forma compleja en (2-14) tenemos:

$$\frac{Z_R}{Z} = -l + \frac{1 + \cos \delta + j \sin \delta}{\cos \delta + j \sin \delta - \cos \delta + j \sin \delta} = -l + \frac{1 + \cos \delta + j \sin \delta}{2j \sin \delta}$$

$$= -l + \frac{1}{2j \sin \delta} + \frac{\cos \delta}{2j \sin \delta} + \frac{j \sin \delta}{2j \sin \delta}$$

$$= (-l + \frac{1}{2}) + \frac{1 + \cos \delta}{2j \sin \delta}$$

$$= (-l + \frac{1}{2}) - j \frac{1 + \cos \delta}{2 \sin \delta}$$

PERO  $\frac{1 + \cos 2\alpha}{\sin 2\alpha} = \cot \alpha$

$$\frac{Z_R}{Z} = \left[ \frac{1}{2} - l \right] - j \frac{1}{2} \cot \frac{\delta}{2} \quad (2-15)$$



Esta última ecuación corresponde a una recta vertical dado que la parte real permanece constante y la imaginaria varía en función de  $\delta$  .

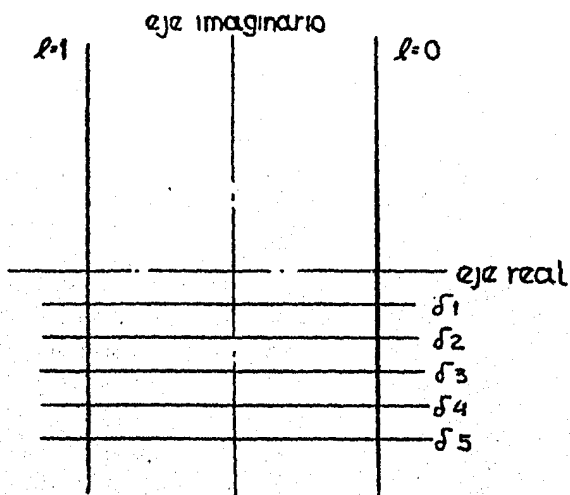


Fig. 2 - 10

Al multiplicar por  $Z$ , esta línea recta gira en contra de las manecillas del reloj, un ángulo igual al de la impedancia  $Z$ .

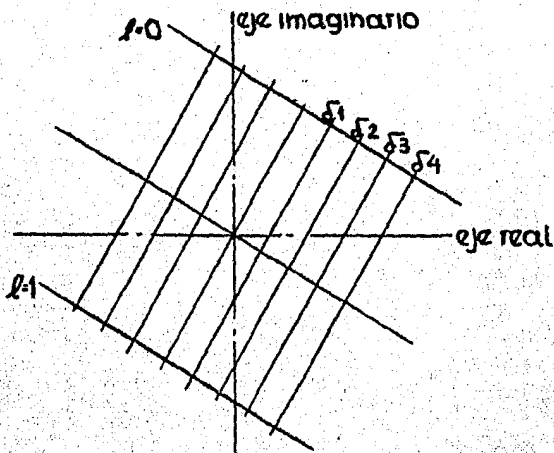


Fig. 2 - 11

### CAPITULO III

#### RELEVADORES ELECTROMAGNETICOS.

##### Principios Generales:

El principio fundamental, está basado en la fuerza experimentada por un conductor colocado en un campo magnético, si por él circula una corriente. Usualmente el conductor toma la forma de un "disco" o de una "copa" de material no magnético (cobre o aluminio).

Consideremos un disco pivotado y girando, tal como se indica en la figura 3-1, en el cual existe un campo magnético, confinado y perpendicular al plano del disco. Como el elemento OB se mueve a través del campo, se induce en él una f.e.m., mientras que como los elementos OA y OC están ubicados fuera del mismo no se inducirá f.e.m.

Esta f.e.m. inducida, de acuerdo con la ley de Faraday será:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3-1)$$

OA, OC y todos los elementos situados fuera del campo magnético, ofrecen trayectorias a través de las cuales, las cargas positivas desplazadas, regresan de B a O, originando corrientes que reciben el nombre de corrientes de Eddy.

La fuerza debida a estas corrientes circulantes es:

$$f = Bli \quad (3-2)$$

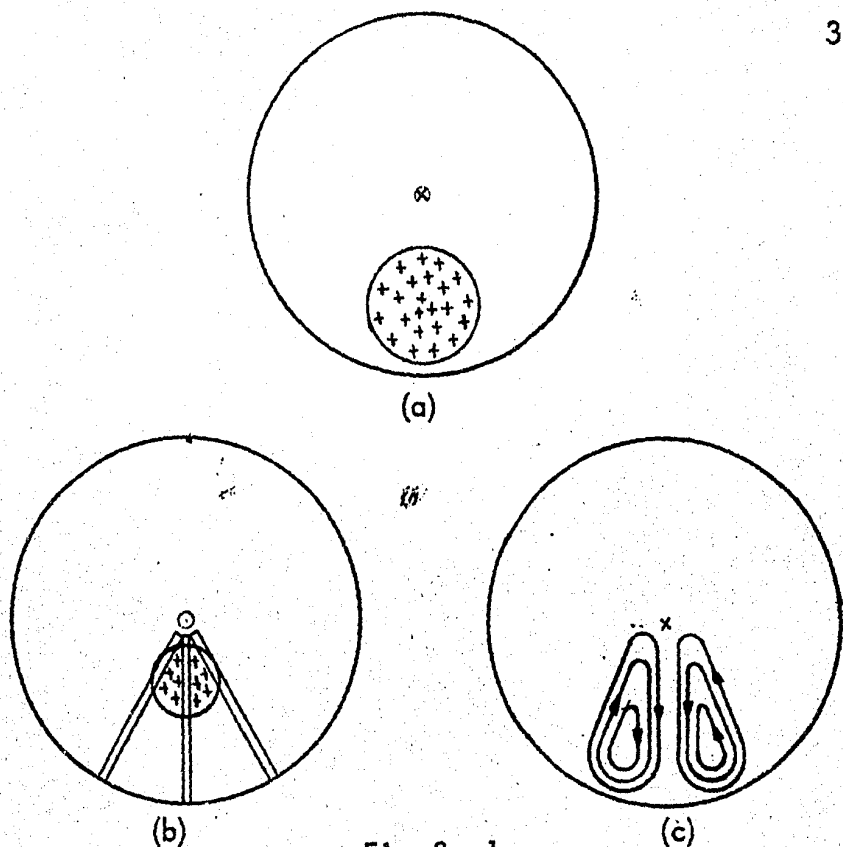


Fig. 3 - 1

Y el flujo magnético está dado por:

$$\Phi = \int_A B \, dA \cos \eta \quad (3-3)$$

Si en la ecuación (3-3)  $B$  es uniforme y perpendicular al área, y  $A$  permanece constante.

$$\Phi = BA \quad (3-4)$$

Análisis de un relevadro electromagnético de disco:

La figura 3-2 muestra los flujos  $\phi_1$  y  $\phi_2$  producidos por las corrientes  $I_1$  e  $I_2$  respectivamente, que circulan por los conductores arrollados en las barras A y B.

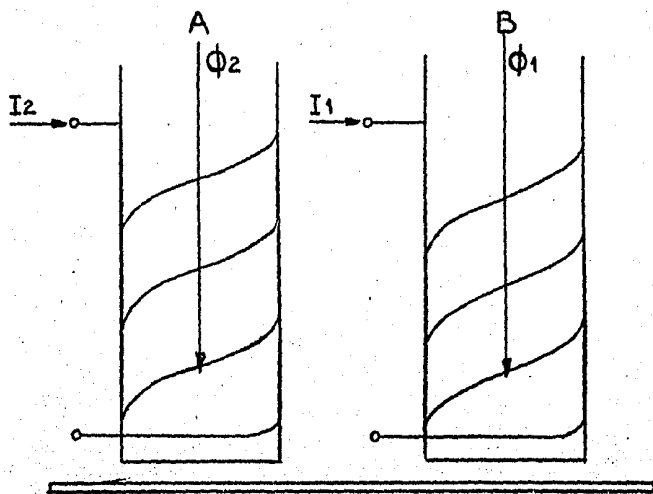


Fig. 3 - 2

De lo anterior se deduce que las fuerzas, flujos y corrientes experimentadas en un disco, atravesado por dos flujos magnéticos son como se muestra en la figura 3-3.

En la figura (3-3)  $F_1$  y  $F_2$  producen un par igual a:

$$T = K_1 \lambda_1 \phi_2 \cos(90 - \theta + \alpha) - K_1 \lambda_2 \phi \cos(90 + \theta + \alpha)$$

Como  $\phi_1 \sim \lambda_1$  y  $\phi_2 \sim \lambda_2$

$$T = K_2 [\phi_1 \phi_2 \sin(\theta - \alpha) + \sin(\theta + \alpha)]$$

Donde  $\alpha =$  cte. de diseño

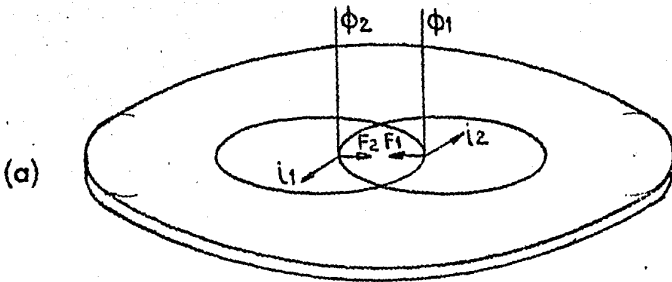
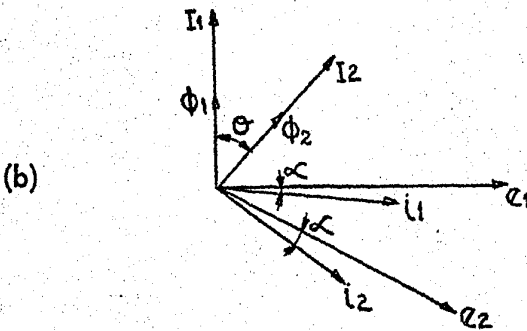


Fig. 3 -3



Finalmente:

$$T = K \phi_1 \phi_2 \sin \Theta \quad (3-5)$$

Si la cantidad o magnitud de corriente que debe ra hacer operar el dispositivo de protecci3n es única,  $\Theta$  sólo podrá ser  $0^\circ$  ó  $180^\circ$ , y como consecuencia  $T=0$ . Este inconveniente encuentra una soluci3n acertada, produciendo un defasamiento en uno de los flujos, con una bobina de sombra, como se muestra en la figura 3-4.

Con lo que la ecuaci3n 3-5 adquiere sentido.

Elemento de copa.

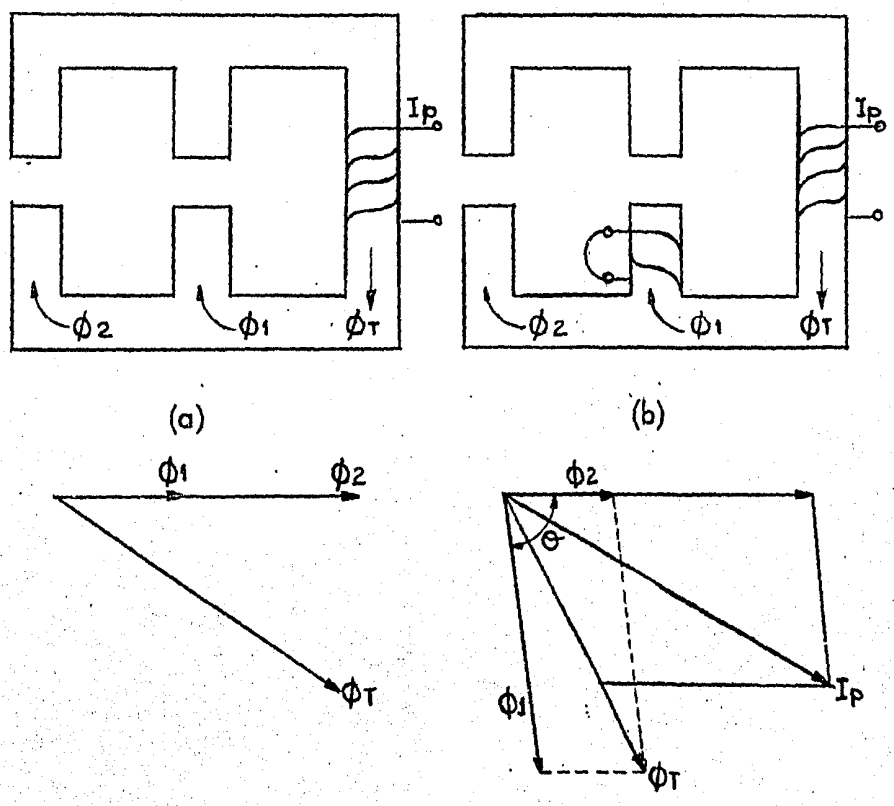


Fig. 3 - 4

Este elemento, es el más eficiente de los que emplean el principio de inducción. Por construcción sus bobinas pueden ser arregladas de tal manera que se obtengan elementos tales como el MHO, el de impedancia, el de reactancia, los direccionales y los diferenciales. Sus características principales son alta velocidad y poca inercia, - su circuito magnético excitado por bobinas puede ser de 4 u 8 polos.

Un circuito magnético laminado de 4 polos se muestra en la figura 3-5, así como el elemento de copa que tiene su eje pivotado. Cuando el dispositi

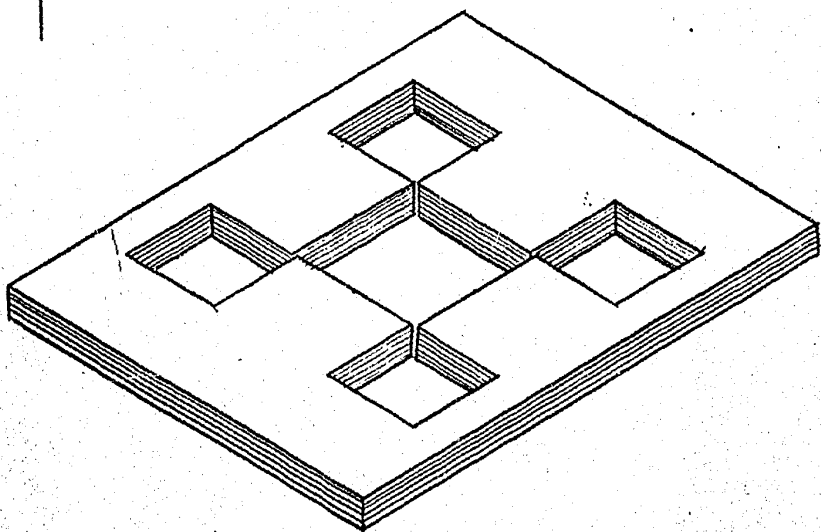


Fig. 3 - 5

tivo de protección manda una señal, se inducen las corrientes circulantes en la superficie de la copa, provocando un giro que cierra los contactos, que a su vez mandan una señal de disparo al interruptor. El par que se presenta en la copa de este dispositivo requiere en sí del mismo mecanismo que se emplea en el disco.

La figura 3-6 muestra las corrientes circulantes  $I_{\phi_1}$  e  $I_{\phi_2}$  en la superficie de la copa, que reaccionan respectivamente con los flujos  $\phi_1$  y

$\phi_2$  que pasan a través de los brazos o polos del circuito magnético, es decir:

$I_1$  reacciona con  $\phi_2$

$I_2$  reacciona con  $\phi_1$

por lo tanto:  $T = KI_1I_2 \text{ sen } \theta$  (3-6)

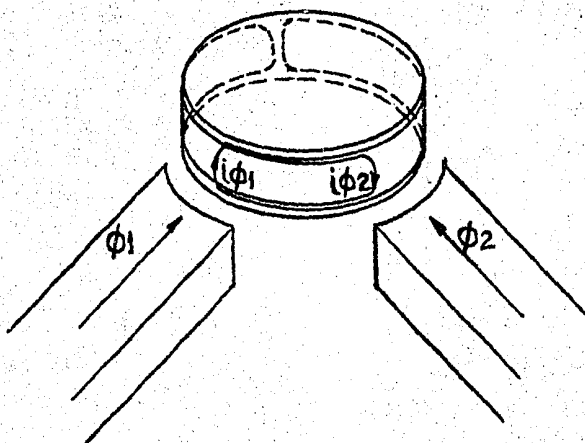


Fig. 3 - 6

En un dispositivo electromagnético se distinguen dos clases de pares, que toman su nombre de acuerdo a la labor que desempeñan:

a) Par de retención, es el momento producido por la fuerza que impide o se opone al movimiento de la copa.



b) Par de operación, es el que motiva el giro de la copa.

En condiciones de falla el par de operación es mayor que el de retención, ocurriendo el giro y el cierre de contactos.

### Elemento de reactancia.

Dispositivo electromagnético de copa que contiene el circuito magnético de la figura 3-7. Puede verse en el polo 3 una bobina conectada con un capacitor en corto circuito que genera su propio flujo como fuente de fuerza electromotriz.

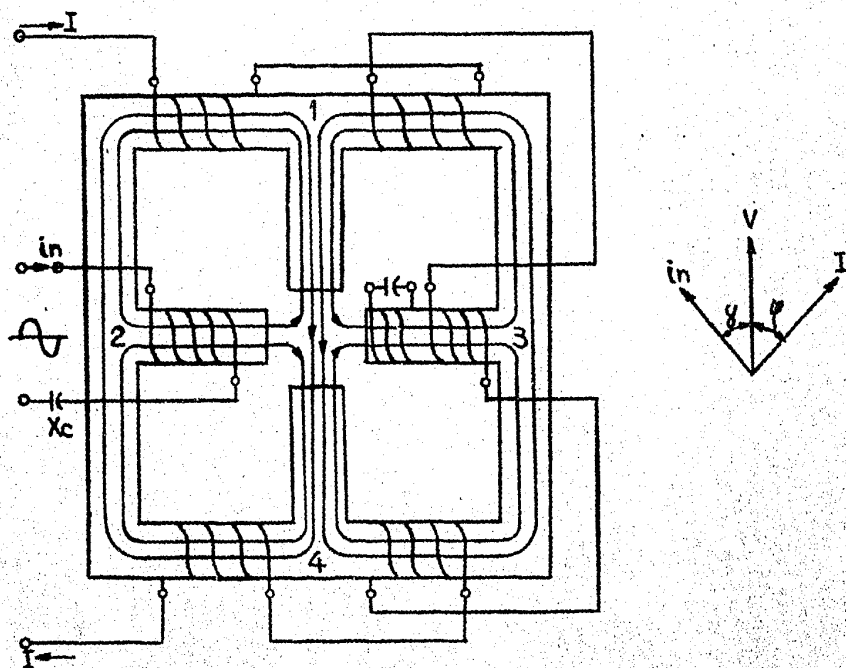


Fig. 3 - 7

Esta bobina tiene la propiedad de defasar los flujos  $\phi_1$  y  $\phi_2$  y es la bobina de sombra.

De la figura 3-7 y basándonos en la ecuación 3-6:

$$(3) \text{ reacciona con } (1) = K_2 I^2$$

$$(3) \text{ reacciona con } (2) = K_2 I^2$$

$$(4) \text{ reacciona con } (1) = -K_3 VI \text{ sen}(\gamma + \psi)$$

$$(4) \text{ reacciona con } (2) = -K_3 VI \text{ sen}(\gamma + \psi)$$

y el par neto resultante es:

$$T_n = K_4 I^2 - K_3 VI \text{ sen}(\gamma + \psi) \quad (3-7)$$

$T_n = 0$  cuando el par de retención es igual al par de operación; es decir, se presenta el momento crítico.

Analizando esta situación:

$$K_4 I^2 = K_3 VI (\gamma + \psi)$$

$$K_4 = K_3 \frac{VI}{I^2} \text{ sen}(\gamma + \psi)$$

$$K_4 = K \frac{V}{I} \text{ sen}(\gamma + \psi)$$

Pero  $Z = V/I$  y  $\text{sen}(\gamma + \psi) = \text{sen} \gamma \cos \psi + \text{sen} \psi \cos \gamma$

Reemplazando las constantes, tenemos:

$$K = Z \text{ sen} \gamma \cos \psi + Z \text{ sen} \psi \cos \gamma$$

y tomando en cuenta las ecuaciones de la impedancia:

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$\sin \delta = \frac{X}{Z} \quad (3-8)$$

$$\cos \delta = \frac{R}{Z}$$

Llegamos a:

$$K' = Z \frac{R}{Z} \sin \delta + Z \frac{X}{Z} \cos \delta$$

$$K' = R \sin \delta + X \cos \delta$$

Dividiendo entre  $\cos \delta$  la ecuación:

$$\frac{K'}{\cos \delta} = R \tan \delta + X \quad (3-9)$$

$$X = -R \tan \delta + \frac{K'}{\cos \delta}$$

Que es la ecuación de una recta que representamos en la figura 3-8 conocida como característica del relevador, con elementos de reactancia modificada.

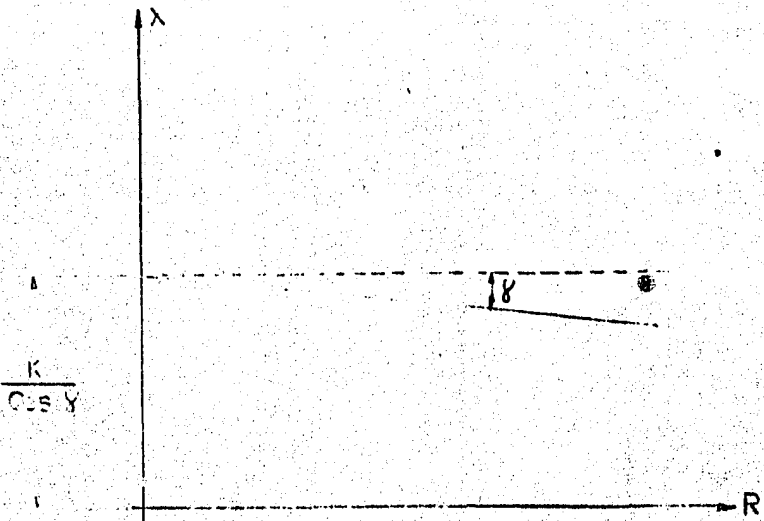


Fig. 3 - 8

Un caso interesante resulta de formar un circuito resonante en serie en este elemento; es decir cuando  $X_1 = X_C$  y por lo tanto  $\delta = 0$ ; la figura 3-9 muestra la característica del relevador en este caso y:

$$V=IZ=I \sqrt{R^2+(X_1-X_C)^2}$$

Como  $X_1=X_C$

$$V=RI$$

y V está en fase con I.

La interpretación de las gráficas características indica que:

Las zonas de operación y de no operación están limitadas por las rectas características y estas zonas se pueden modificar a criterio, dando diferentes valores al ángulo  $\delta$ , lo que se hará variando los valores  $X_C$  y  $X_1$ , de tal forma que se obtenga el resultado deseado.

La figura 3-10 nos muestra las zonas de operación y de no operación de 2 elementos de reactancia conocida en el diagrama R-X.

### Elemento Tipo MHO.

Es un dispositivo electromagnético de copa, formado por un circuito magnético como el mostrado en la figura 3-11.

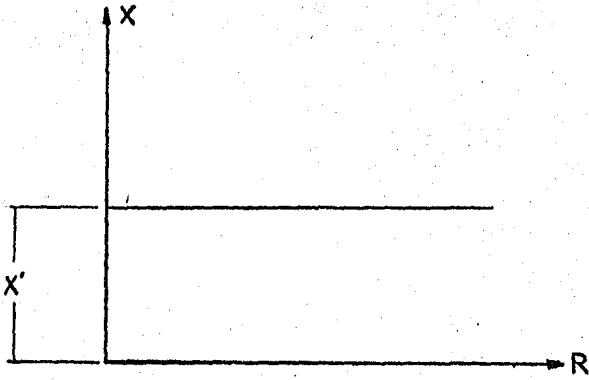


Fig. 3 - 9

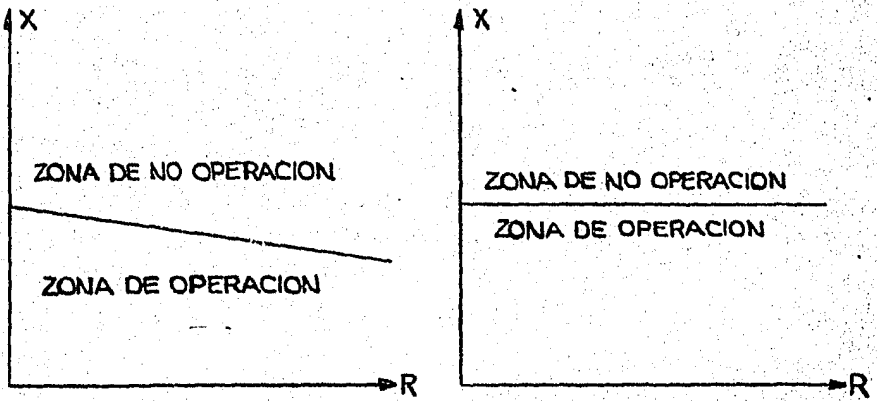


Fig. 3 - 10

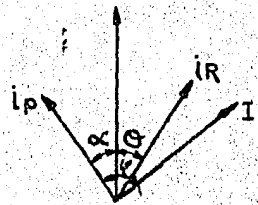
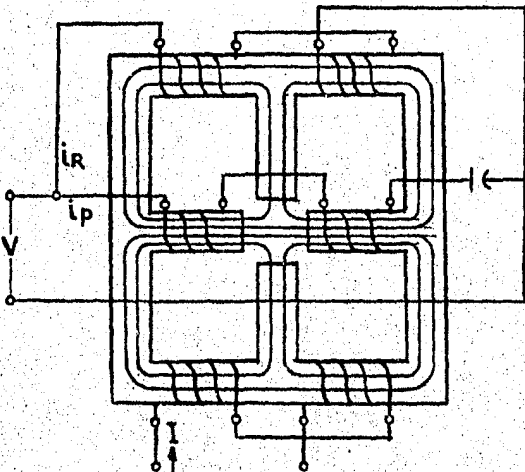


Fig. 3 - 11

De la figura anterior, podemos deducir que:

$$\begin{aligned}
 \text{Par de retención} &= -K_1 I_p I_r \text{ sen } (\alpha + \theta) \\
 &= -K_2 V^2 \text{ sen } (\alpha + \theta) \\
 &= -K_3 V^2 \qquad (3-10)
 \end{aligned}$$

Ya que  $\alpha$  y  $\theta$  son constantes de diseño.

$$\begin{aligned}
 \text{Par de operación:} &= K_4 I_p I \text{ sen } (\alpha + \psi) \\
 &= K_5 VI \text{ sen } (\alpha + \psi) \qquad (3-11)
 \end{aligned}$$

Y el par neto total será:

$$= K_5 VI \text{ sen } (\alpha + \psi) - K_3 V^2 \quad (3-12)$$

$$\text{Si } T_N = 0: \quad K_5 VI \text{ sen } (\alpha + \psi) - K_3 V^2 = 0$$

Dividiendo entre  $I^2$ :

$$K_5 \frac{VI}{I^2} \text{ sen } (\alpha + \psi) - K_3 \frac{V^2}{I^2} = 0$$

$$K_5 \frac{V}{I} \text{ sen } (\alpha + \psi) - K_3 \frac{V^2}{I^2} = 0$$

$$K_5 Z \text{ sen } (\alpha + \psi) - K_3 Z^2 = 0$$

$$\begin{aligned}
 K_6 Z \text{ sen } \alpha \cos \psi + K_6 Z \text{ sen } \psi \\
 \cos \alpha - Z^2 = 0
 \end{aligned}$$

Tomando en cuenta las ecuaciones 3-8, queda:

$$K_6 Z \frac{R}{Z} \operatorname{sen} \alpha + K_6 Z \frac{X}{Z} \operatorname{cos} \alpha -$$

$$(X^2 + R^2) = 0$$

$$X^2 - KX \operatorname{cos} \alpha + K^2 \operatorname{cos}^2 \alpha + R^2 -$$

$$R \operatorname{sen} \alpha + K^2 \operatorname{sen}^2 \alpha = K^2 \operatorname{sen}^2 \alpha$$

$$+ K^2 \operatorname{cos}^2 \alpha$$

$$(X - K \operatorname{cos} \alpha)^2 + (R - K \operatorname{sen} \alpha)^2 = K^2$$

(3-13)

La fórmula 3-13 corresponde a la ecuación de un círculo con centro en  $(K \operatorname{cos} \alpha, K \operatorname{sen} \alpha)$  y radio  $K$  en un diagrama  $R$ - $X$ .

La figura 3-12 representa la característica de un relevador con elemento MHO:

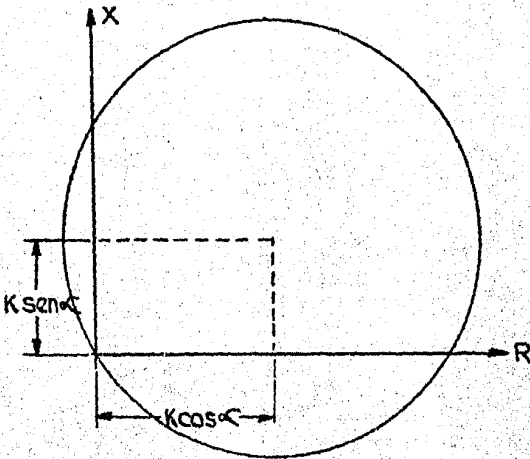


Fig. 3 - 12

Las zonas de operación y no operación, están limitadas por el círculo que resulta ser la característica del relevador, como lo muestra la figura 3-13.

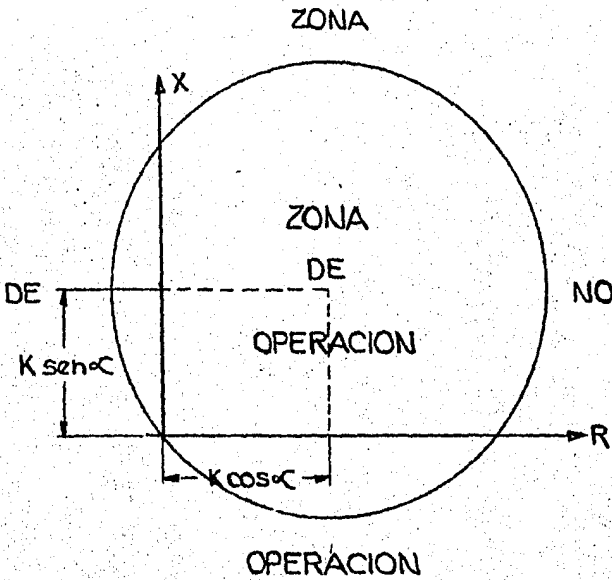


Fig. 3 - 13

### Relevador KD (Westinghouse):

Es un relevador compensador de distancia. El principio en el cual se basan los relevadores de este tipo, reciben su nombre de los compensadores, los cuales son esencialmente transformadores con entre-hierro, teniendo el devanado prima



rio energizado con corriente, la cual induce una tensión a través del devanado secundario.

Esta tensión inducida por la corriente se combina vectorialmente con la tensión del sistema ABC (Fig. 3-14).

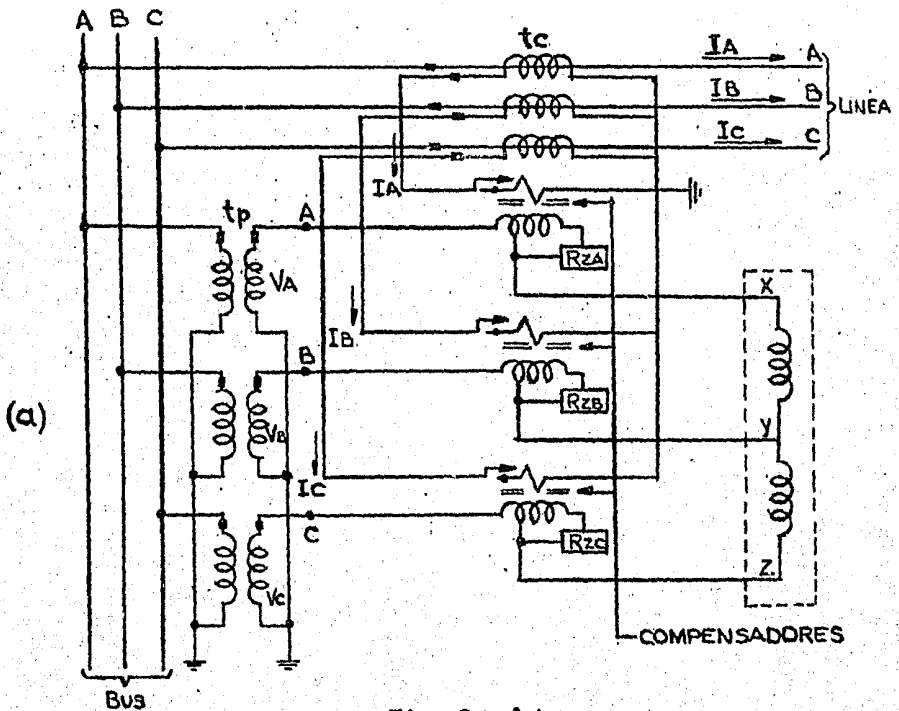
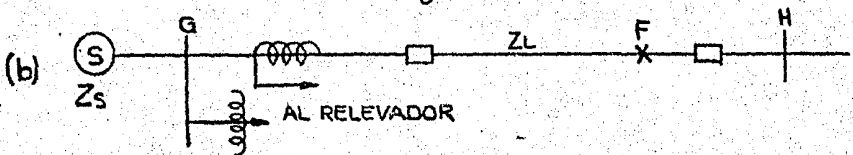


Fig. 3 - 14



La tensión neta resultante aplicada al elemento de copa, desarrolla el par de cierre o apertura de contactos, dependiendo del tipo de falla y de su localización. El par es proporcional al área del triángulo XYZ y está aplicado al elemen

to como lo muestra la figura 3-14, la dirección del par depende de la secuencia de fases de la tensión.

Una carga resistiva (Fig. 3-14), conectada a través de una porción del devanado secundario del compensador, es usada para ajustar el ángulo de fase entre la corriente primaria y la tensión secundaria del compensador al ángulo de la sección de línea protegida.

Analícemos la operación del relevador KD en los principales tipos de falla:

a) Falla entre fases en el punto de balance del relevador.

Con respecto a las figuras 3-14 y 3-15, considere mos falla entre B y C en el punto de balance. La corriente de línea se supone  $90^\circ$  atrás de la tensión al neutro. Para la supuesta falla entre B y C, la tensión trifásica normal (línea punteada), cae al triángulo de tensiones ABC, y la corriente de falla no fluye en la fase A, por lo que el potencial del punto X permanece igual al del punto A. Sin embargo la tensión de fase a neutro  $V_B$  (Fig. 3-15) es modificada por la caída de tensión ( $-I_B Z_C$ ) a través del secundario del compensador de la fase B reduciéndose  $V_B$  a  $V_Y$  y de este modo el punto B pasa al punto Y.

Similarmente se modifica el potencial del punto C por la caída de tensión a través del compensador de la fase C. Moviéndose el punto C al punto Z ya que los compensadores tienen una impedancia mutua

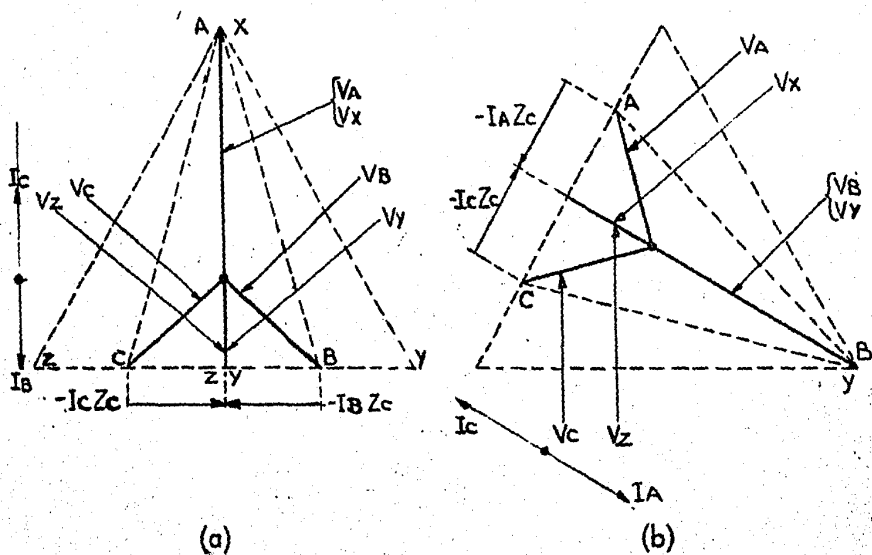


Fig. 3 - 15

igual al deseado punto de impedancia de balance en términos de ohms secundarios, el potencial de los puntos Y y Z, coincidirán y la tensión aplicada en ese momento a las bobinas del relevador es XYZ (el valor de XY es aplicado a un par de polos, y la caída de tensión YZ, la cual es 0 para esta condición de falla del punto de balance, es aplicada al otro par de polos). El triángulo de tensiones se convierte en una línea recta y el relevador estará en el punto de equilibrio.

Otra condición de equilibrio se obtiene, cuando las tensiones aplicadas a la unidad de fase a fase están en fase. La figura 3-15a, ilustra esta condición para una falla entre las fases C y A, el sistema de tensiones está mostrado por el triángulo ABC, la corriente de falla en las fases C y A genera las tensiones compensadoras  $-I_A Z_C$  y  $-I_C Z_C$ , las cuales modifican a las tensiones de fase a neutro  $V_A$  y  $V_C$ , produciendo las tensiones  $V_X$  y  $V_Z$ . Nótese que las tensiones XY e YZ no son 0, pero están defasadas  $180^\circ$ , por lo tanto no se produce el par de operación en el elemento de co pa.

b) Falla entre fases adelante del punto de balance del relevador.

Para una falla entre fases B y C adelante del punto de balance o del alcance del relevador, existe una caída de tensión más grande entre la localización de la falla y el relevador, porque hay un incremento de impedancia, entre el relevador y la falla; el triángulo de tensiones del sistema no decaerá mucho para una falla más allá del punto de balance, como en el caso de una falla en dicho punto, Fig. 3-16, los potenciales en los puntos B y C se modifican por la caída de tensión en los compensadores de las fases B y C, produciendo el triángulo XYZ, que es el aplicado a la unidad del relevador entre fases, este triángulo tiene secuencia positiva y el relevador recibe un par de no operación. De esta forma el relevador no operarará para fallas más allá del punto de balance.

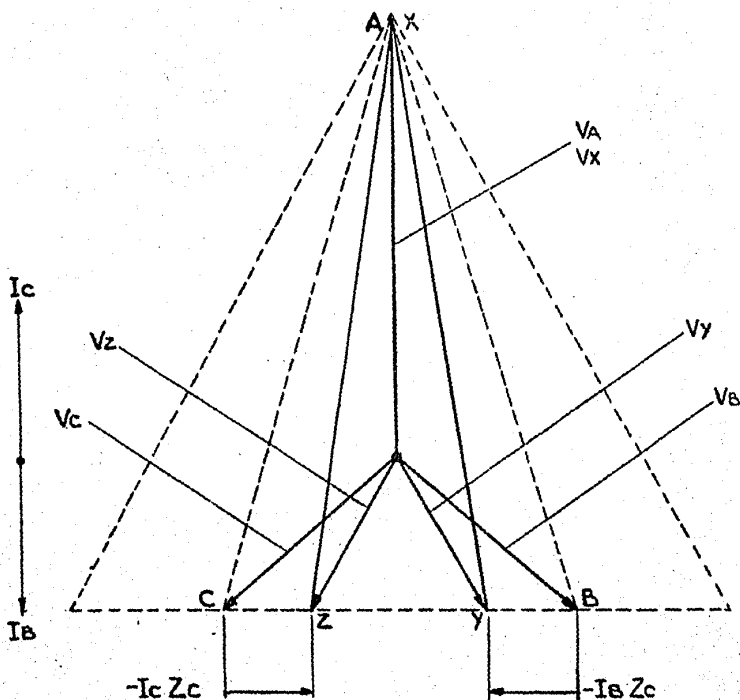


Fig. 3 - 16

c) Falla entre fases, entre el relevador y el punto de balance.

Para una falla dentro del punto de balance, la tensión del sistema en el relevador se reduce considerablemente porque decae la impedancia de la línea entre el relevador y la falla con el consiguiente incremento en las corrientes de falla, puesto que ésta no fluye en la fase A, el punto A coincide nuevamente con el punto X del triángulo de tensiones de la figura 3-17. Las tensiones compensadoras  $-I_c Z_c$  y  $-I_b Z_b$  se restan otra vez de las tensiones del sistema, pero como el sistema inicial de tensiones ABC es más

pequeño y las magnitudes de las corrientes de falla  $I_B$  e  $I_C$  se incrementan, las posiciones de los puntos Y y Z se cruzan, produciéndose un triángulo de tensiones con rotación de fase XZY; como esta tensión tiene sentido contrario o rotación de secuencia negativa, se aplica al relevador un par de operación o de cierre, produciendo el cierre del contacto del relevador, por lo que este dispara.

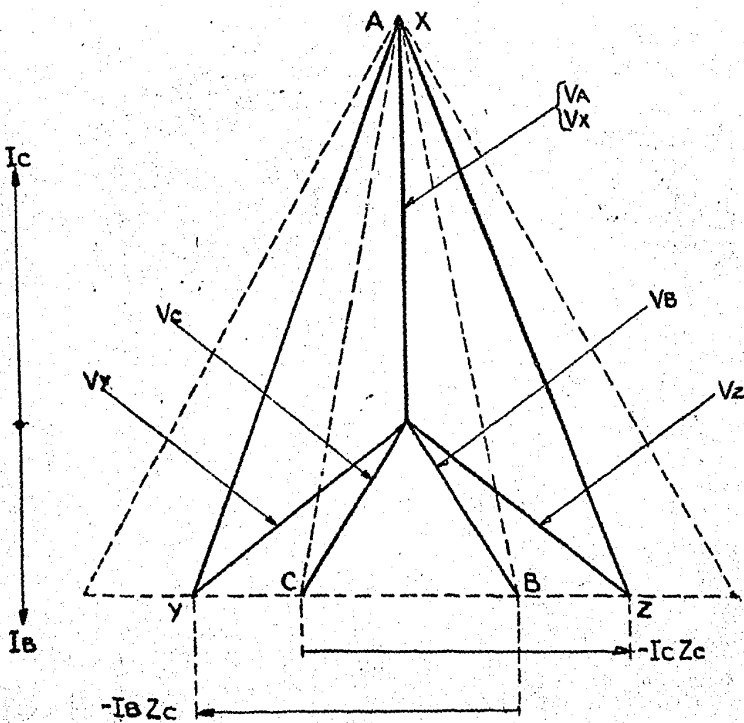


Fig. 3 - 17

d) Falla entre fases atrás del relevador.

Otra vez las tensiones del sistema se reducen al triángulo ABC de la figura 3-18, de aquí que la dirección de las corrientes  $I_B$  e  $I_C$ , tengan sentido contrario. Para las fallas internas descritas previamente, la corriente de falla flúa dentro de la sección de la línea protegida. Para una falla externa detrás del relevador, la corriente fluye fuera de la sección de línea protegida, cambiando la dirección o polaridad de las tensiones inducidas en los secundarios del compensador, de este modo la tensión de línea a neutro  $V_B$  se añade a la tensión del compensador  $-I_B Z_C$  y produce  $V_y$ , la cual cambia el potencial del punto Y a la derecha del punto B, simultáneamente la tensión del compensador  $-I_C Z_C$  añade  $V_c$  a la tensión de línea a neutro, obteniéndose el punto Z a la izquierda del punto C.

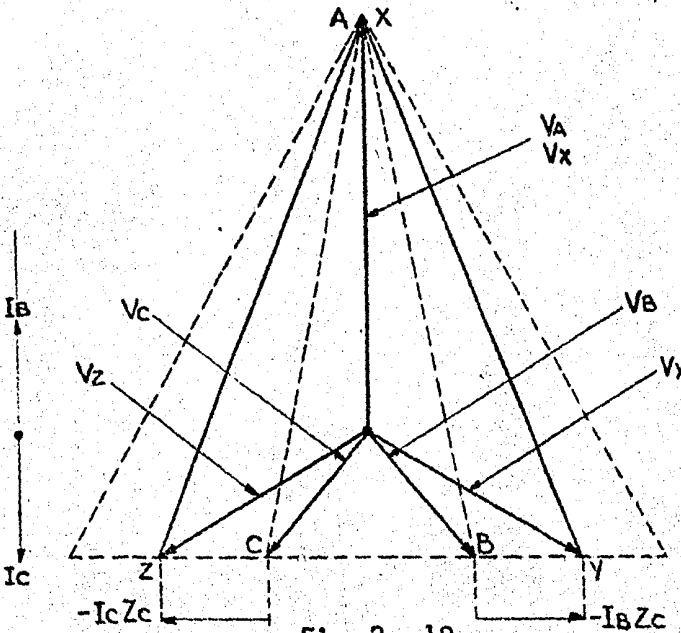


Fig. 3 - 18

El triángulo de tensiones XYZ, de área comparativamente grande y secuencia positiva se aplica al relevador y se produce un fuerte par de no operación o apertura de contacto. Consecuentemente hay un punto de regreso del par del relevador, - porque la falla se mueve desde la línea hacia el bus de los transformadores de corriente, con una fuerza de operación para una falla dentro de la línea y una fuerza de retención para una falla - fuera de la sección de línea protegida atrás del relevador. De aquí, que la unidad entre fases - sea inherentemente direccional, y responda para cualquier falla entre ellas, no respondiendo a - fallas balanceadas o con condiciones de carga balanceadas. Refiriéndonos a la figura 3-14, la - corriente balanceada de carga trifásica creará - iguales caídas de tensión en el compensador. Estas tensiones en el secundario del compensador se restarán del sistema de tensiones trifásicas balanceadas, y la tensión resultante neta de los puntos XYZ, seguirá estando balanceada y con secuencia de fase positiva, por lo que el par de - retención o de apertura de contactos se producirá.

#### Características de operación del relevador KD.

Las características de la unidad de fase a fase, se muestran en la figura 3-19,  $Z_C$  es la impedancia ajustable del compensador y  $Z_S$  se refiere a la impedancia de la fuente. La impedancia de la fuente es la impedancia del sistema atrás del relevador Fig. 3-14b. Las fórmulas para la  $Z$  radial y la  $Z$  de offset se obtuvieron por derivación matemática, esta se basó en las condiciones



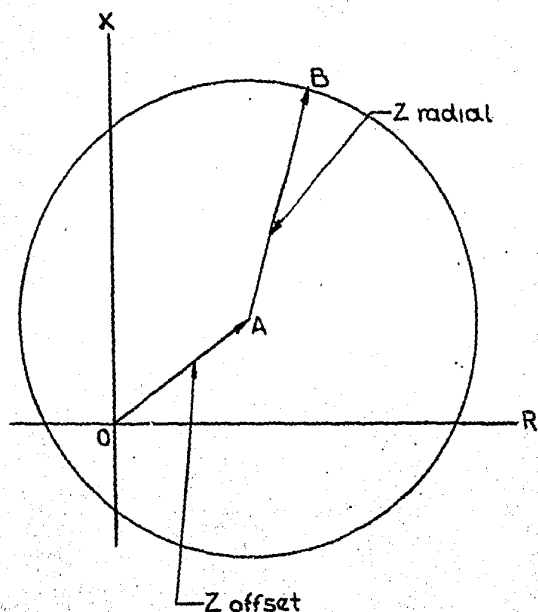


Fig.3 - 19

que hay en una falla entre fases y la corriente que fluye en la dirección del disparo. El ajuste  $OA$  del círculo de impedancia es igual a la mitad de la suma de la impedancia de la fuente y del compensador, es decir:

$$OA = \frac{1}{2}(-Z_s - Z_c) \quad (3-14)$$

$$OA = \frac{1}{2}(Z_s + Z_c) \quad (3-15)$$

El círculo que resulta, nos permite concluir - que el relevador no es direccional porque incluye áreas en los cuatro cuadrantes, figura 3-20.

Las áreas de los cuadrantes II y III no son reales, de aquí que indiquen resistencia negativa - en las líneas de transmisión, y siendo sólo una consideración matemática no tienen valor en la aplicación del relevador. El área de operación actual del círculo de impedancia deja de operar con el ángulo de la línea de transmisión; esta es la línea OQ, mostrada en la figura 3-20. Si las tensiones generadas en los extremos de la sección de la línea protegida están un poco fuera de fase, entonces la operación del relevador puede obtenerse ligeramente dentro del área de reactancia negativa mostrada entre los puntos O y P, por lo que la unidad entre fase es inherentemente direccional en la operación y no se requiere otra unidad direccional, eliminando así el problema de unidad de operación o coordinación de contactos.

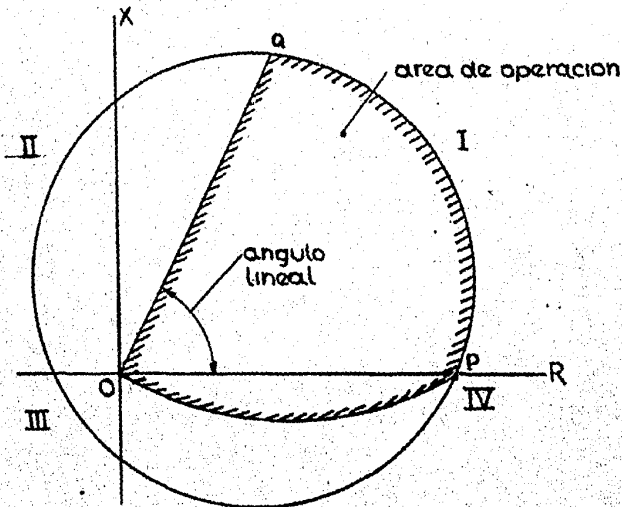


Fig. 3 - 20

La figura 3-21 indica que el valor de impedancia de la unidad de entre fases depende de la impedancia de la fuente  $Z_s$ . El círculo pasará siempre por el punto de balance en el diagrama R-X. Si  $Z$  radial y  $Z$  de offset se suman, la impedancia de la fuente  $Z_s$  disminuye, y el alcance del relevador es igual a  $Z_c$ , pudiéndose ajustar al ángulo de la impedancia de la línea. La figura 3-21 ilustra la característica de operación de la unidad entre fases, cuando  $Z_s$  es menor que  $Z_c$ . El radio del círculo se hace pequeño para poder localizar al punto B sobre el círculo y como la impedancia de la fuente  $Z_s$  se hace más pequeña, la parte del círculo en el tercer cuadrante se limita en el origen. Si la impedancia de la fuente fuera cero, el círculo pasaría por el origen.

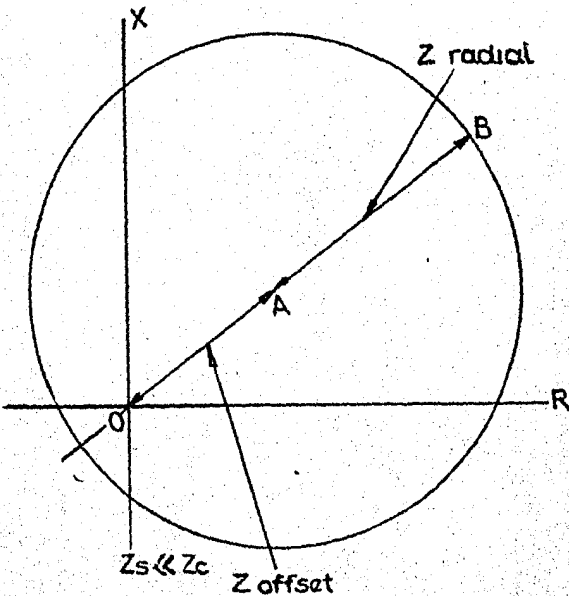


Fig. 3 - 21

En la figura 3-22, se ilustra el caso en que la impedancia de la fuente sea más grande que la impedancia de la línea. Utilizando la ecuación (3.15) se localiza al punto A, centro del círculo, cuyo radio está dado por la ecuación (3.14). De la construcción de la figura 3-22 es evidente que la distancia OB es el alcance del relevador (en ohms), con un ángulo de la línea igual al de OB de la figura 3-21.

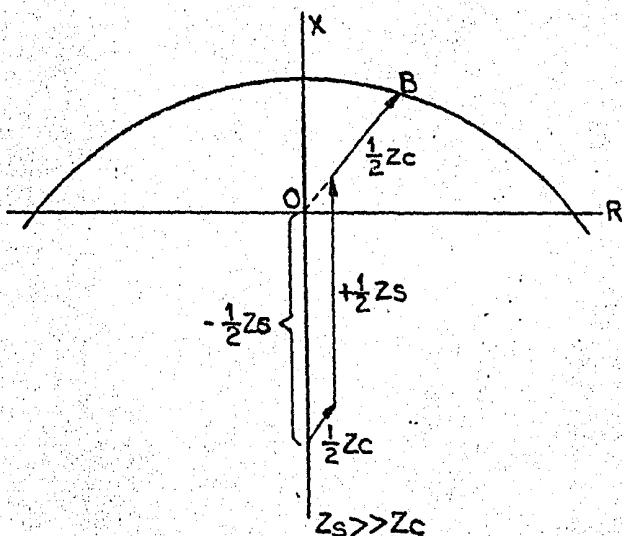


Fig. 3 - 22

Operación del relevador para fallas trifásicas.

La segunda unidad del relevador KD, es la unidad trifásica. La figura 3-23 ilustra el circuito -

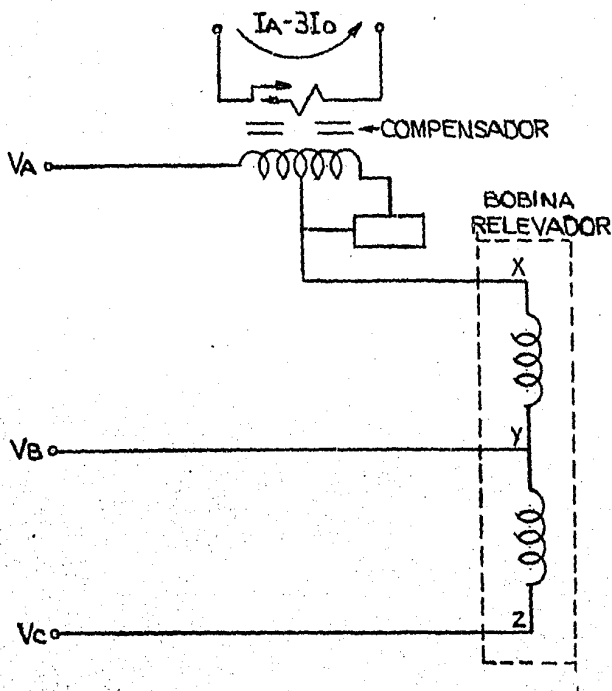


Fig. 3 - 23

eléctrico básico, la unidad trifásica también consiste de un elemento de copa de 4 polos, similar al de la unidad entre fases, solamente - que se usa un compensador como se ilustra en la figura 3-23. Este compensador tiene una impedancia mutua igual a 1.5 veces la impedancia de mandada en el punto de equilibrio en términos de ohms secundarios, y se conecta en serie con la fase A de tensión de mando a la unidad trifásica del relevador. El primario del compensador se energiza por la corriente  $I_A - 3I_0$ . Las tensiones de las fases B y C del sistema se co-

nectan directamente a los puntos Y y Z, figura - 3-23; la característica de la impedancia, figura 3-24, es independiente de la impedancia de la fuente.

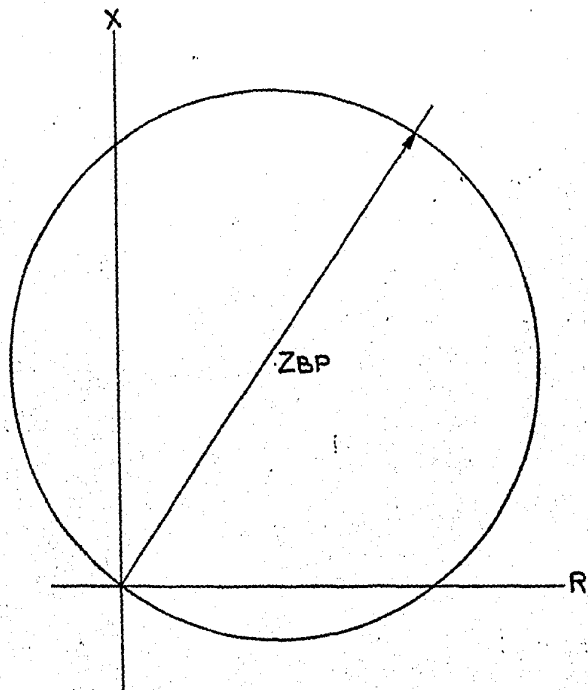


Fig. 3 - 24

c) Falla trifásica en el punto de balance del re l e v a d o r .

Se supone un ángulo de  $90^\circ$ . Esto es, la corriente de línea  $I_A$  se atrasa a la tensión de línea - al neutro  $V_A$  por  $90^\circ$ . Para una falla en el punto de equilibrio, la corriente de falla de la f a l l a .

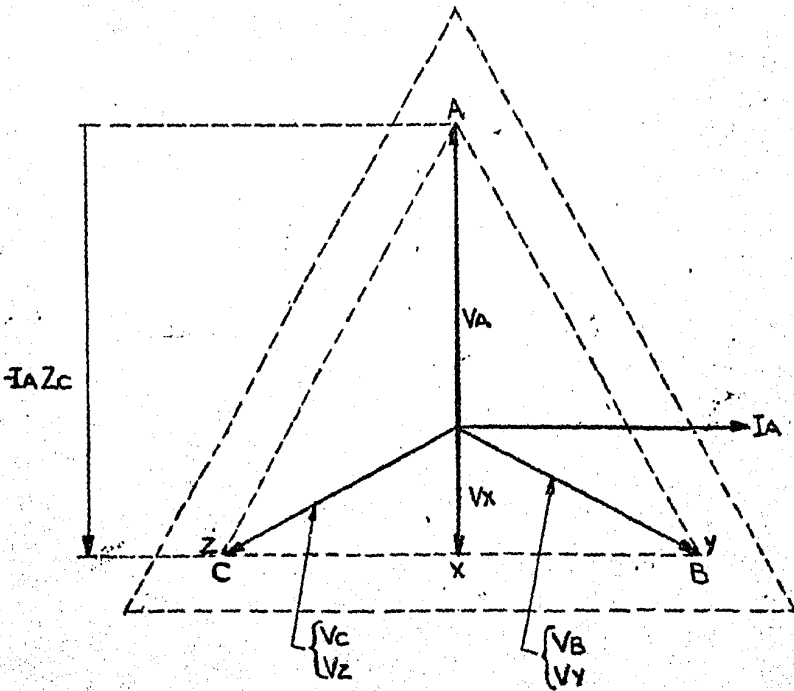


Fig. 3 - 25

se A fluye a través del primario del compensador e induce una tensión secundaria  $-I_A Z_C$ , la cual reduce la tensión al neutro de la fase A, del punto A al punto X, figura 3-25.

Así que, los puntos XYZ están en una línea recta y el área del triángulo de tensiones se reduce a cero. Consecuentemente, se logra una condición de punto de equilibrio.

f) Falla trifásica adelante del punto de balance del relevador.

La corriente de falla de la fase A acarreará de nuevo la tensión indicadora del compensador  $-I_A Z_C$ , figura 3-26, la cual reduce la tensión de la línea a neutro,  $V_A$  del punto A al punto X. El triángulo de tensión actual es ahora XYZ, el cual pone una tensión de secuencia positiva en la unidad trifásica y crea restricción o par de apertura de contactos y el relevador no opera.

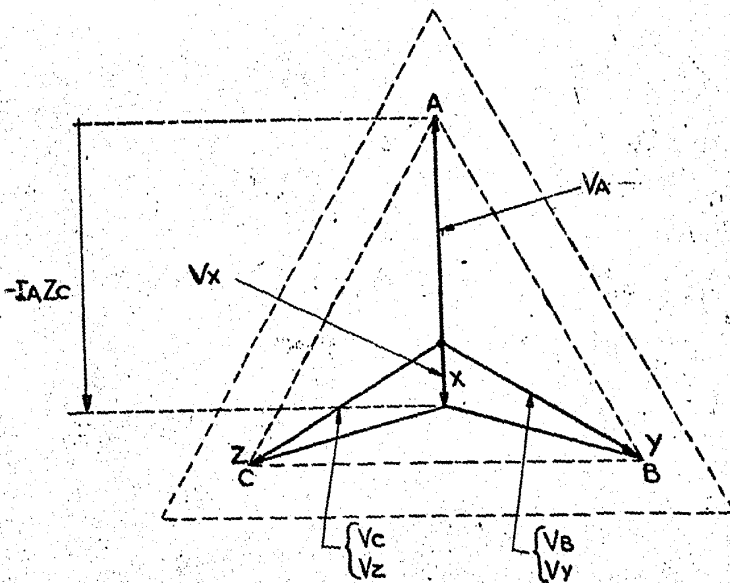


Fig. 3 - 26

g) Falla trifásica entre el relevador y el punto de balance.



Para una falla trifásica dentro del punto de balance circula una mayor cantidad de corriente de falla, debido a la disminución de la impedancia de línea cuando se compara con fallas en o - adelante del punto de balance. Así que, una mayor caída de tensión  $-I_A Z_C$  se crea en el secundario del compensador en la fase A, y el punto A se mueve al punto X como se muestra en la figura 3-27. La rotación de secuencia de fase negativa, ahora existe como XZY y un cierre de contactos o par de operación induce la unidad trifásica del relevador a disparar.

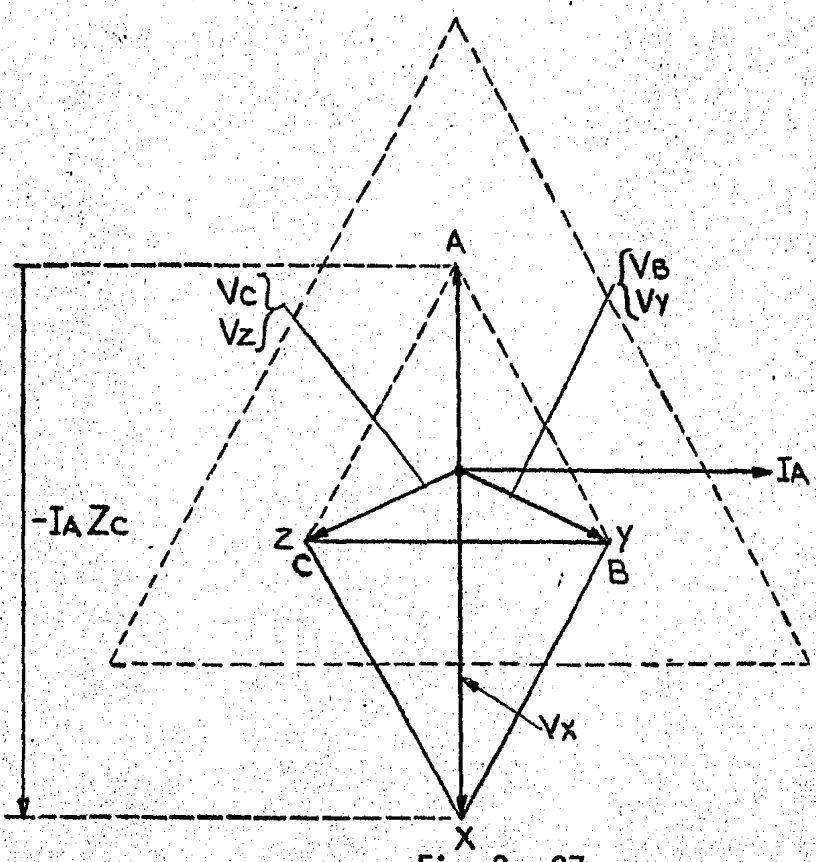


Fig. 3 - 27

### h) Fallas trifásicas atrás del relevador.

Para esta condición, la corriente de falla es inversa, por lo que también se invierte la polari-dad de la tensión del compensador  $-I_A Z_C$ , sumándose a la de fase A al neutro  $V_A$ , y la tensión resultante XYZ, tiene una rotación de secuencia positiva, aplicando un par de restricción a la un-idad trifásica para mantener los contactos abiertos. Ver figura 3-28.

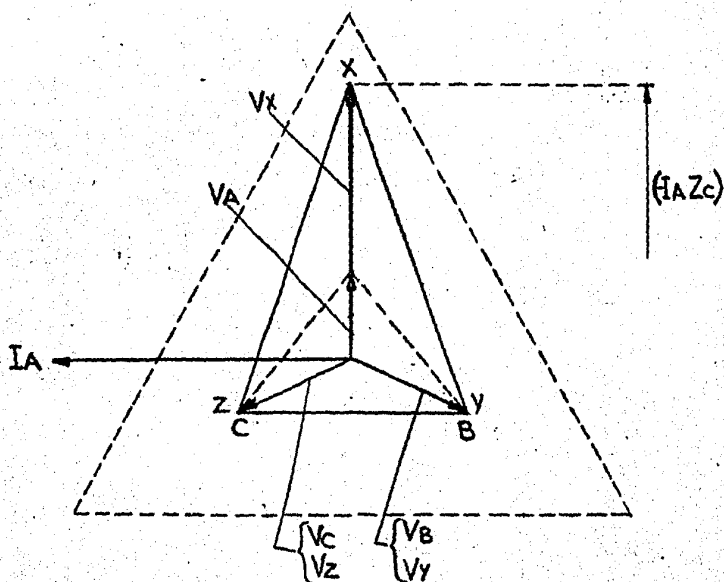


Fig. 3 - 28

Si ocurre una falla franca trifásica, precisamente en la localización del relevador, pero dentro de la sección protegida de la línea, el triángulo de tensión del sistema se cierra a cero; así que, la tensión YZ es cero y el relevador es in-

capaz de determinar si una falla interna o externa ha ocurrido, porque la tensión del compensador  $-I_A Z_C$  no tiene referencia a la tensión YZ para reaccionar con él. Para corregir esta condición, se aplica a la tensión BC del circuito del relevador una operación memoria. Esto permite a la tensión YZ disminuir gradualmente, dando una tensión de referencia para la tensión del compensador  $-I_A Z_C$ , y determinar si la falla está en la sección protegida de la línea o atrás del relevador. Así que, la unidad trifásica es inherentemente direccional y no se requiere una unidad direccional separada.

i) Respuesta a falla de dos fases a tierra.

Para este tipo de falla, la unidad de fase a fase y la unidad trifásica se complementan una a otra para proporcionar una protección completa. Cuando la impedancia de secuencia cero de la fuente es muy pequeña comparada con la impedancia de secuencia positiva de la misma, un libramiento en falla de dos fases a tierra pudiera no ser visto por la unidad de fase a fase en el relevador, porque la tensión y la corriente de secuencia negativa se aproximan a cero.

No obstante, que el compensador de la unidad trifásica en la fase A se energiza con la componente  $3I_0$ , esta unidad responde para el libramiento de la falla.

Las tensiones en la unidad trifásica para una falla de BC a tierra se muestran en la figura 3-29. Después que la falla ocurre, el triángulo de ten

siones se reduce al triángulo ABC.

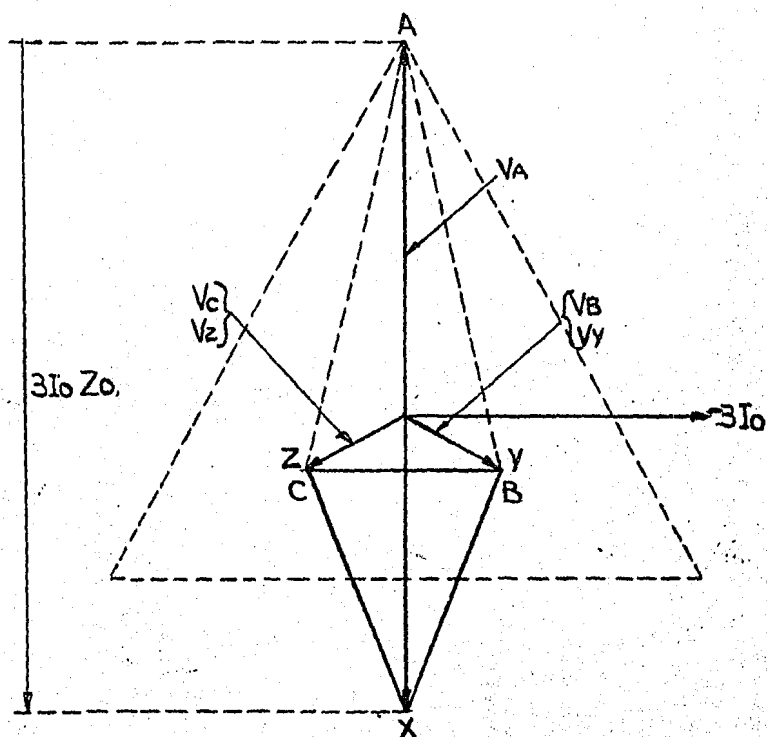


Fig. 3 - 29

El primario del compensador se energiza por la corriente  $3I_0$ , la cual induce la tensión  $3I_0 Z_0$ . La unidad de operación se energiza por XZY, la cual es contraria a la rotación de fase normal, y por lo tanto produce par de cierre de contactos.

### Relevador KS de Bloqueo en Oscilaciones (Westinghouse).

El KS es un relevador de distancia polifásico, se usa con el relevador de distancia KD para preveer el disparo en condiciones de fuera de sincronismo de un sistema. Sin embargo, retarda la operación del KD para fallas entre fases que ocurran durante una oscilación.

El relevador KS consta de 3 transformadores con entrehierro (compensadores), 2 autotransformadores y un elemento de copa; además un relevador telefónico de retraso de tiempo.

El dispositivo que actúa para iniciar el bloqueo, es una unidad de copa de cuatro polos, conectada en delta abierta y que opera como un motor de inducción trifásico. El par de cierre de contactos, lo produce la unidad, cuando la tensión aplicada a sus bornes tiene secuencia positiva. El par de apertura de contactos, se produce cuando la tensión es de secuencia negativa, de aquí que la unidad de copa está restringida al par de operación, determinado por la secuencia de fases de la tensión aplicada a sus terminales.

Normalmente la bobina del relevador telefónico OS está en corto circuito. Cuando hay un par de operación, éste abre los contactos quitando el corto circuito a través de OS, permitiendo así que este se energice. Este relevador es de operación lenta y el retardo se obtiene por medio de una pieza de cobre que disminuye la densidad

de flujo magnético. Cuando se energiza, abren numerosos contactos que están conectados en serie con el relevador KD y previene completamente el disparo del circuito, durante una condición de oscilación.

El relevador KS tiene la ventaja de distinguir entre una falla y una oscilación, para esta última condición, el relevador toma un cierto tiempo de retraso, en el que KD actúa para un aparente corto circuito, tanto en la zona 1 como en la 2; a menos que dentro de un corto tiempo opere el KS, seguirá la secuencia descrita para la oscilación, bloqueando al anterior.

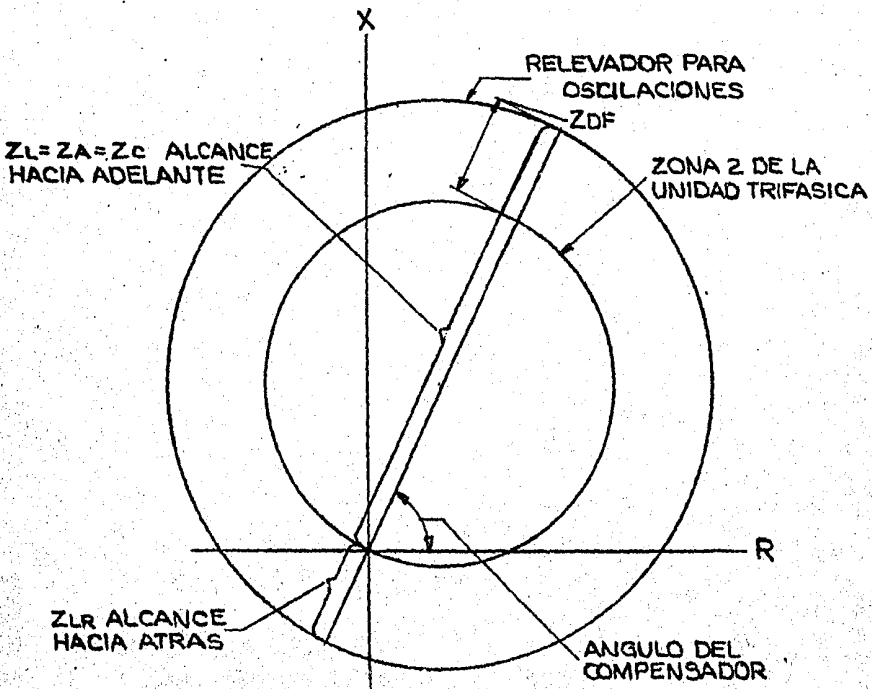


Fig. 3 - 30

El círculo de impedancia del relevador se ajusta para encerrar al relevador trifásico KD de la zona 2. (Fig. 3-30). La diferencia proporciona un margen en ohms, suficiente para dar al relevador telefónico tiempo de operación antes que la oscilación entre el círculo de características de la zona 2, después de haber pasado el círculo del relevador KS. El relevador tipo telefónico abrirá sus contactos en 3 ó 4 ciclos.

### Relevador tipo CEB51A. (General Electric).

El relevador CEB51A es de bloqueo con offset monofásico, que opera bajo el principio del cilindro de inducción. Además de una unidad Mho, el relevador contiene una auxiliar de corriente directa, designada por OB, la cual es una bobina de retardo tipo relevador telefónico para proporcionar el tiempo de retraso.

El relevador telefónico auxiliar (OB) es arreglado para proporcionar bloqueo de recierre o disparo en una oscilación. El retraso de tiempo de la unidad OB proporciona la discriminación entre las condiciones de oscilación y las de falla. Este dispositivo es tal que no opera bajo condiciones de falla cuando la unidad impedancia y la de bloqueo MHO operan simultáneamente.

La unidad mho se alimenta con una tensión de fase a fase y con la diferencia vectorial de las corrientes en las mismas. Consecuentemente el alcance de una unidad es el mismo para fallas trifásicas, de dos fases o dos fases a tierra.

El alcance óhmico es ajustado por medio de un transformador con derivaciones en el circuito de retardo. Un diagrama típico de conexiones exteriores se muestra en la figura 3-31.

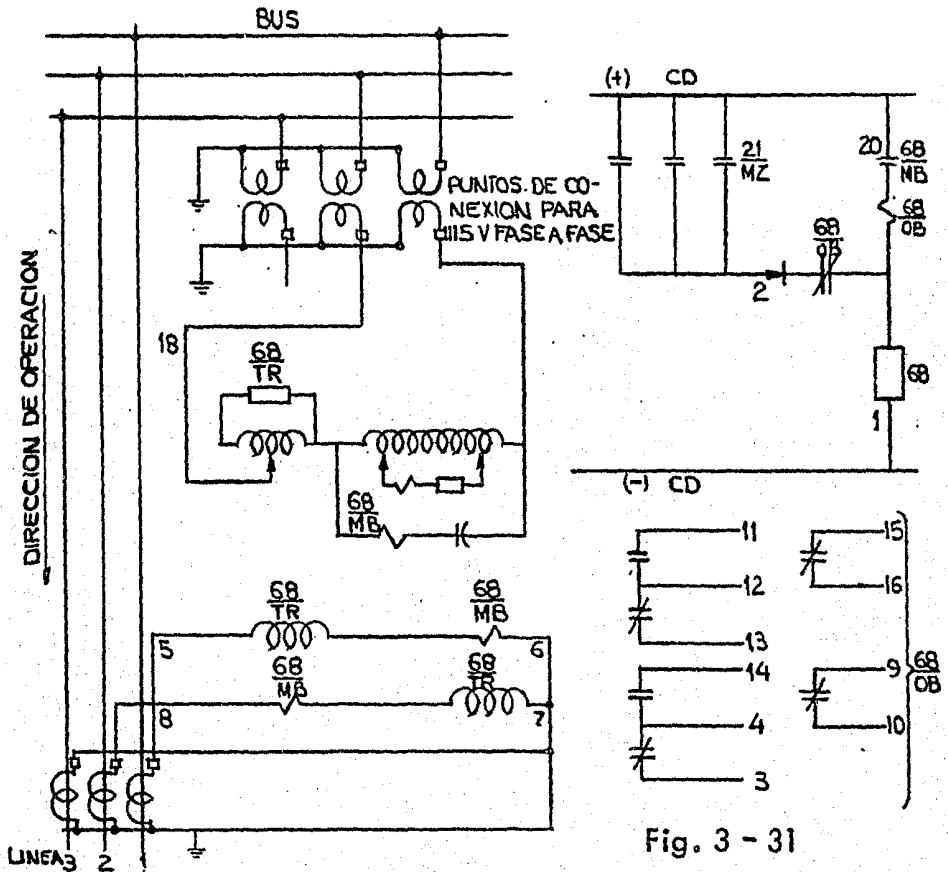


Fig. 3 - 31

La unidad MHO con offset es similar a la unidad MHO básica con la adición de un transactor. Al agregar la tensión secundaria del transactor en serie con la tensión terminal, y aplicando la suma vectorial a la unidad de operación; se logra el efecto de offset, sin cambiar el diámetro de la característica óhmica. Las características de offset se ajustan a ser aproximadamente



concéntricas con las características de detección de fallas. En la figura 3-32, la curva 3 a  $75^\circ$  muestra el alcance mínimo básico incrementado con el cambio en ángulo de fase. Este es 3.5 a  $75^\circ$  para un relevador de 3 ohms a  $60^\circ$ . Cuando se utiliza el valor 0 en offset, todas estas curvas pasan a través del origen; el ángulo de offset también es ajustable sobre un rango de  $60$  a  $75^\circ$ .

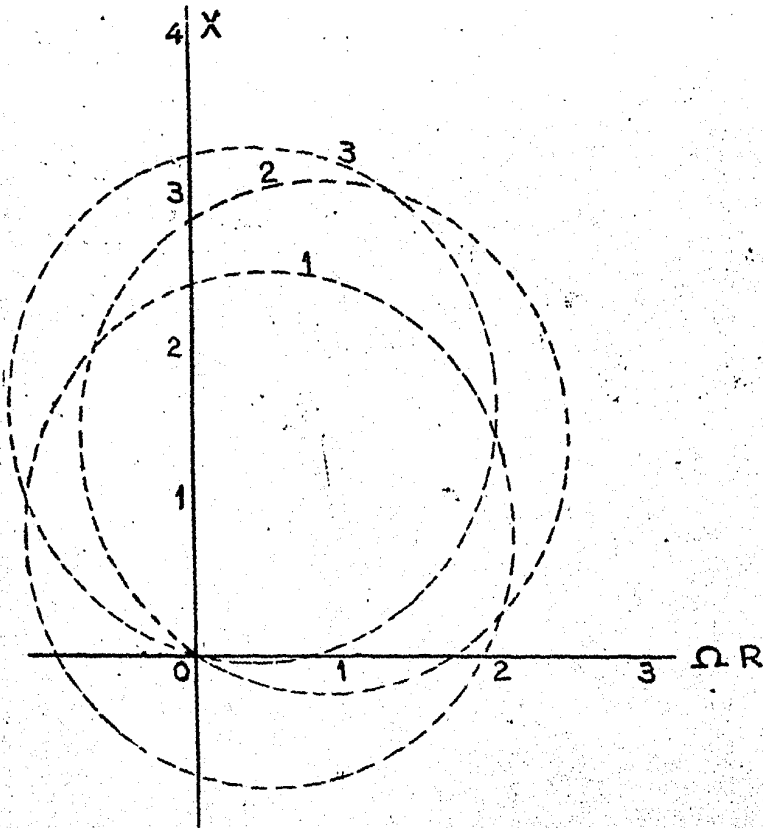


Fig. 3 - 32

Relevador NAA19B y CEX17E (General Electric).

El NAA19B es un relevador auxiliar que fue especialmente diseñado para usarse en conjunto con el relevador de ángulo de impedancia tipo CEX17E, para disparo en un sistema en condiciones de oscilación, Fig. (3-33), para detectar tales condiciones e iniciar el disparo de interruptores locales propios y/o remotos en orden de separar el sistema.

En este esquema, los relevadores detectan la condición de oscilación por la operación secuencial de las unidades de ángulo de impedancia en el relevador CEX17E.

En el diagrama R-X de la figura 3-34, las dos líneas paralelas representan las características de operación de las unidades de ángulo de impedancia CEX17E. En la unidad superior el contacto derecho ( $B_2$ ) cierra cuando la impedancia del sistema así vista por el relevador, se traza a la derecha de la característica. El contacto izquierdo ( $B_1$ ) cierra cuando esta impedancia se traza a la izquierda de la característica. En la unidad base el contacto izquierdo ( $A_2$ ) cierra cuando la impedancia del sistema vista por el relevador se desplaza a la derecha de la característica mientras que el contacto derecho ( $A_1$ ) cierra cuando esta impedancia se desplaza a la izquierda de la característica. En este caso, si la impedancia aparente del sistema es  $Z_m$ , los contactos  $A_2$  y  $B_2$  están cerrados. Para una impedancia  $Z_0$ , los contactos  $A_2$

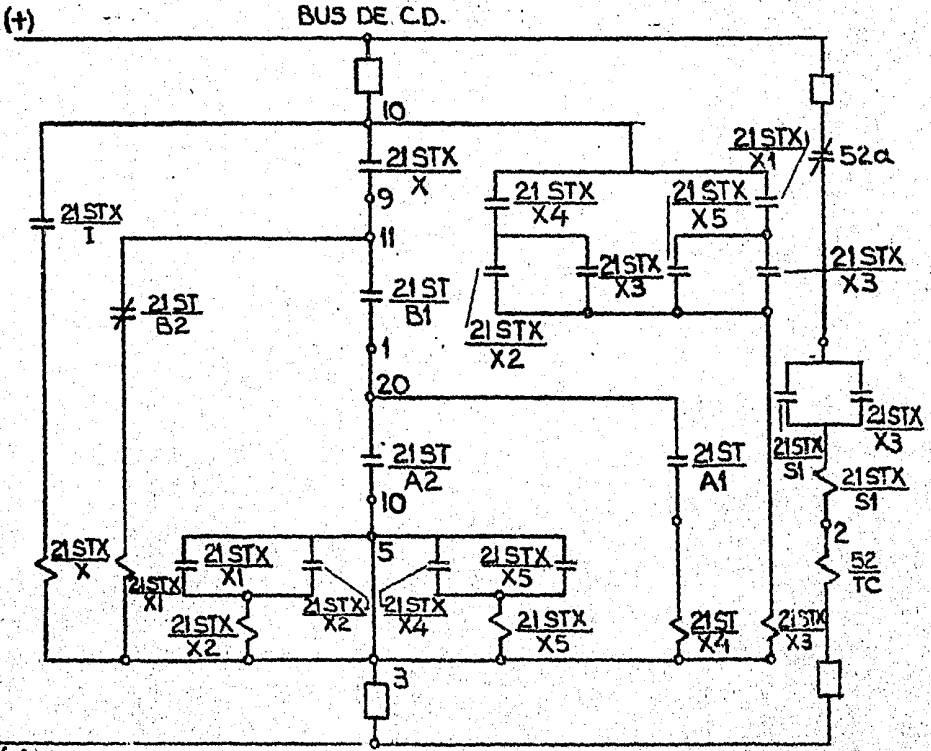
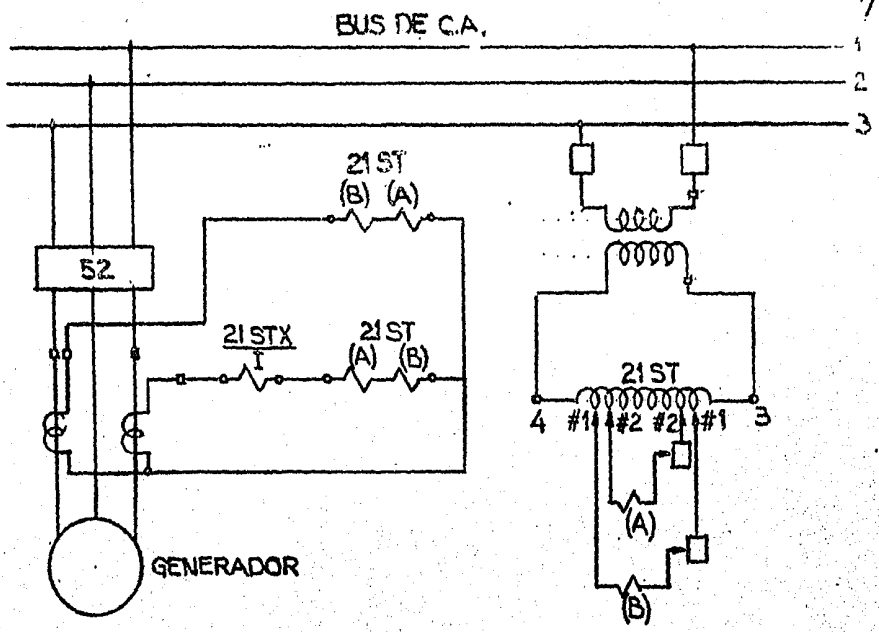


Fig. 3 - 33

y  $B_1$  están cerrados; para una impedancia  $Z_p$ , los contactos  $A_1$  y  $B_1$  están cerrados.

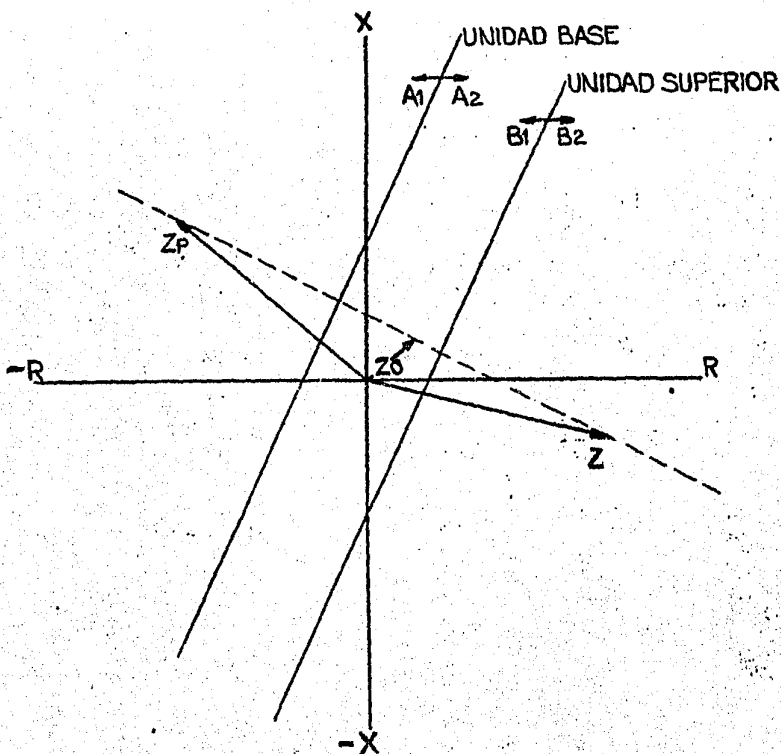


Fig. 3 - 34

Cuando una condición de oscilación aparece en un sistema, la impedancia aparente vista por el relé vador CEX pasará rápidamente a través del diagrama  $R-X$ , sea de derecha a izquierda o de izquierda a derecha de una manera similar a la que se ilustra por la línea punteada en la figura.

Si por ejemplo, la oscilación es de derecha a izquierda, la impedancia cambiará progresivamente desde  $Z_m$  a  $Z_0$  a  $Z_p$ . Para la impedancia  $Z_m$ , los contactos  $A_2$  y  $B_2$  están cerrados, mientras que  $A_1$  y  $B_1$  están abiertos. Estas posiciones de los contactos son mantenidas hasta que la impedancia aparente cruza la característica de la unidad superior. Una posición como ésta sería representada por la impedancia  $Z_0$ ; en este momento, el contacto  $B_2$  abre y  $B_1$  cierra, mientras que  $A_1$  y  $A_2$  permanecen como antes. Como la oscilación continúa avanzando, la variación de impedancia se mueve a la izquierda de la característica de la unidad base representada por la impedancia  $Z_p$ . Cuando esto ocurre, el contacto  $A_2$  abre y  $A_1$  cierra mientras que  $B_1$  permanece cerrado y  $B_2$  permanece abierto.

Las interconexiones entre los relevadores CEX17E y NAA19B más los enlaces entre las diversas unidades en el NAA se combinan para dar una señal de disparo solamente si la secuencia de las operaciones de contacto de CEX indica que la variación de impedancia cruza ambas características de la unidad CEX ya sea de derecha a izquierda o de izquierda a derecha. La figura 3-33 ilustra las conexiones externas y puede ser consultada para el análisis de la operación del esquema.

Consideremos el caso en que las condiciones del sistema sean tales que la oscilación del mismo empieza a la derecha, en la figura 3-34. Para esta condición los contactos  $A_2$  y  $B_2$ , están cerrados, pero nada sucede hasta que la oscilación ha avanzado lo suficientemente lejos que

produce corriente suficiente para operar la unidad instantánea de sobrecorriente I. En este punto la inductancia del relevador X se energiza y el contacto X cierra. Esta hace operar al relevador X<sub>1</sub> a través de los contactos B<sub>2</sub>, los cuales están también cerrados. Si en este punto la oscilación retrocede y el sistema se inclina hacia atrás a la normalidad, la unidad instantánea de sobrecorriente I suelta, abriendo X y X<sub>1</sub>. Si la oscilación continúa al punto donde la variación de impedancia cruza la característica de la unidad superior, el contacto B<sub>2</sub> abre y el B<sub>1</sub> cierra, mientras que A<sub>2</sub> permanece cerrado. Tan pronto como B<sub>2</sub> abre, desenergiza X<sub>1</sub> pero el relevador X<sub>1</sub> tiene característica de tiempo para soltar atrasada. Puesto que B<sub>1</sub> cierra inmediatamente después que B<sub>2</sub> abre, el relevador X<sub>2</sub> queda energizado a través de los contactos X, B<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> y X<sub>1</sub> en serie.

Un contacto en X<sub>2</sub> sella alrededor del contacto X<sub>1</sub>, el cual abre en corto circuito. Si en este punto la oscilación retrocede, el contacto B<sub>1</sub> se abre, soltando X<sub>2</sub> y el contacto I abre algo más tarde, restituyendo X.

Si de otra forma la oscilación continúa al punto donde la variación de la impedancia cruza la característica de la unidad base, el contacto A<sub>2</sub> abre y A<sub>1</sub> cierra inmediatamente después, mientras que B<sub>1</sub> permanece cerrado. Esto desenergiza la inductancia X<sub>2</sub> y energiza los circuitos de la inductancia X<sub>4</sub>. Puesto que el relevador X<sub>2</sub> tiene características de disparo con retraso de tiempo,

los contactos  $X_4$  quedan cerrados antes que los contactos  $X_2$  abran y la inductancia  $X_3$  queda energizada. Un contacto  $X_3$  sella alrededor del contacto  $X_2$ , el cual suelta. Un segundo contacto  $X_3$  dispara el circuito del interruptor. Esta es la operación deseada porque la oscilación es ahora muy severa, y las dos porciones del sistema han deslizado un polo.

Si la oscilación del sistema hubiera venido de izquierda a derecha resultaría una secuencia si milar de acontecimientos.

APENDICE 3.-Relevadores de Oscilaciones.

El efecto de pérdida de sincronismo en relevadores de distancia está mostrado en la Fig. (3-35), la impedancia de la línea es grande comparada con la impedancia del sistema; el relevador OSB se utilizaría para bloquear un disparo, puesto que los relevadores de falla dispararían para oscilaciones de las cuales el sistema podría recobrase. Si durante una pérdida de sincronismo se desea la separación del sistema, se utilizará un relevador suplementario OST de reactancia, modificado. En un sistema de este tipo es difícil obtener un ajuste razonable para un relevador MHO de bloqueo con offset, puesto que el ajuste requerido puede ser tan grande que la impedancia de la carga puede establecer bloqueo indebido. Este problema puede resolverse con el uso de relevadores de estado sólido, usando características lenticulares como las de la figura 3-36, cuando se utiliza un relevador electromecánico con características MHO, el único recurso sería utilizar "blindings", como se muestra en la fig. 3-37. Se utilizarían un par de "blindings" por fase, los cuales se ajustan para restringir el área de disparo de tal manera que éste solo puede ocurrir para ángulos del sistema con una separación mayor de  $120^\circ$ .

El relevador OSB se ajusta con respecto a los "blindings" de tal manera que en una oscilación,



el tiempo que tome la impedancia aparente en cruzar las del OSB a las del blinder (más o menos 4 ciclos). En muchos casos, el uso de blinders - permitirá un ajuste razonable del relevador OSB y proporcionará mayor flexibilidad a la selección de la función del bloqueo.

El relevador OSB tipo MHO, causa bloqueo incorrecto sobre una línea de tres terminales. El sistema y las características del relevador se ilustra en la figura 3-38. Si la terminal A es está relativamente más cargada comparada con la terminal B, puede ser imposible establecer los relevadores de disparo en A, para ver una falla en C, debido a que el alcance requerido por el relevador será tan grande que el relevador puede operar para una oscilación o carga menor. En esta situación, los relevadores en A se ajustan para ver la falla en C con la terminal B abierta; y un disparo secuencial de alta rapidez cuando la terminal B este en servicio.

Con este ajuste de los relevadores y bloqueo en oscilaciones en A, puede ser que exista un bloqueo incorrecto en ella, para una falla cercana aparente vista por C. Por ejemplo, con carga máxima en B, la impedancia de falla aparente - vista por A puede estar en C' como se muestra - en la figura 3-38b; bajo estas condiciones no - habrá problema. Mientras A no vea la falla inicialmente, verá la falla después de que B opere y ocurrirá un disparo secuencial de alta rapidez. Por otro lado, si se reduce la carga en B debido a que el sistema cambie detrás de B, la falla - aparente vista por A puede estar en C'', la cual

está dentro de las características de OSB, pero fuera del círculo de disparo. Si el disparo en C y B se retrasa por varios ciclos, se establece un bloqueo por oscilación en A y la falla se rá librada eventualmente en un tiempo de zona - 3, para evitar tal bloqueo incorrecto, se utilizan las características del relevador que se muestran en la figura 3-38c y el bloqueo en una oscilación se restringe al área sombreada.

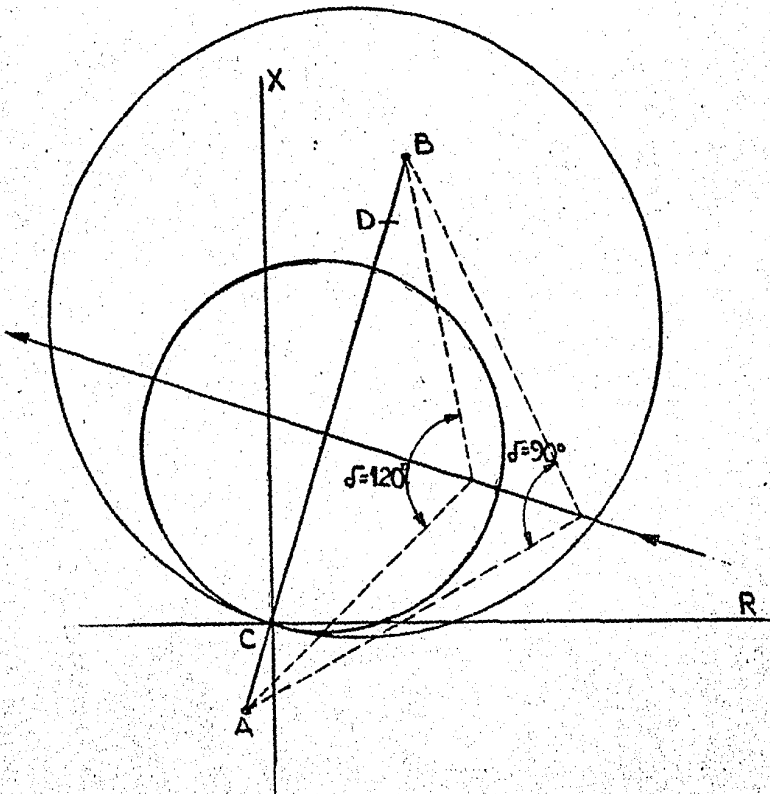


Fig. 3 - 35

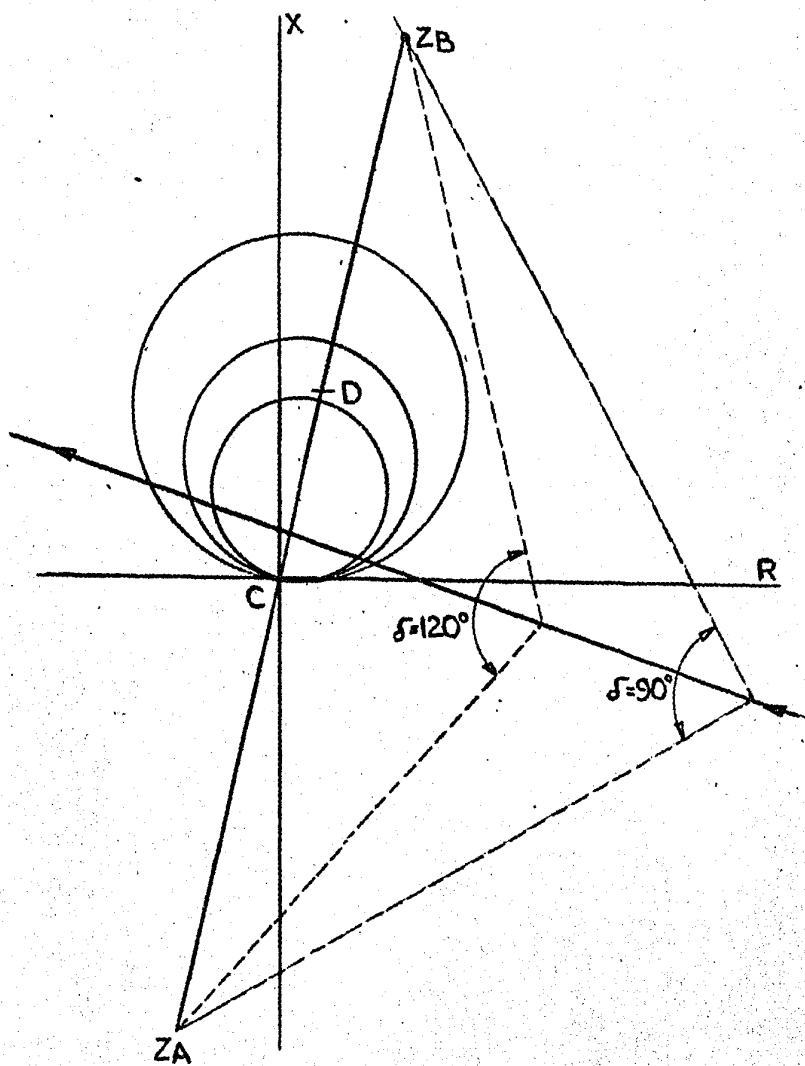


Fig. 3 - 35b

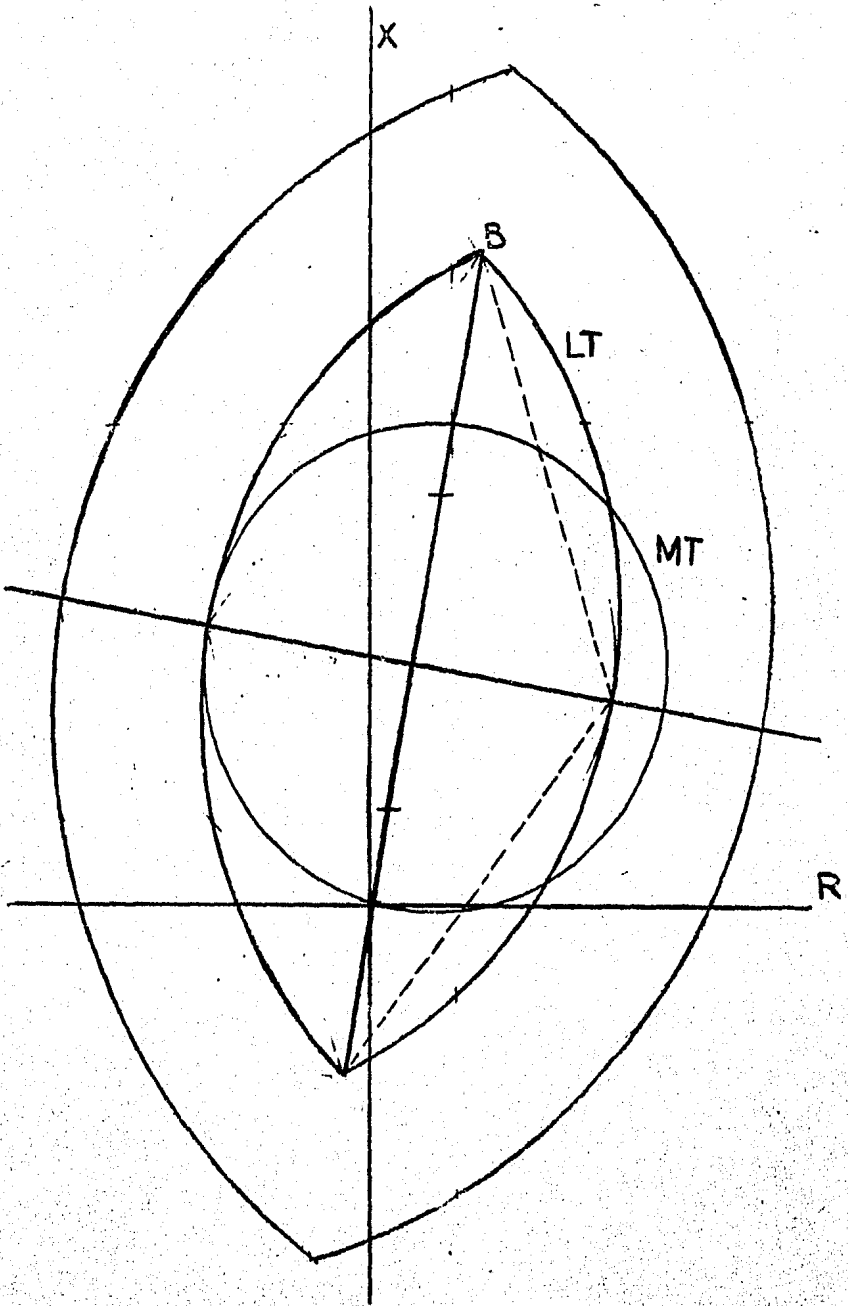


Fig. 3 - 36

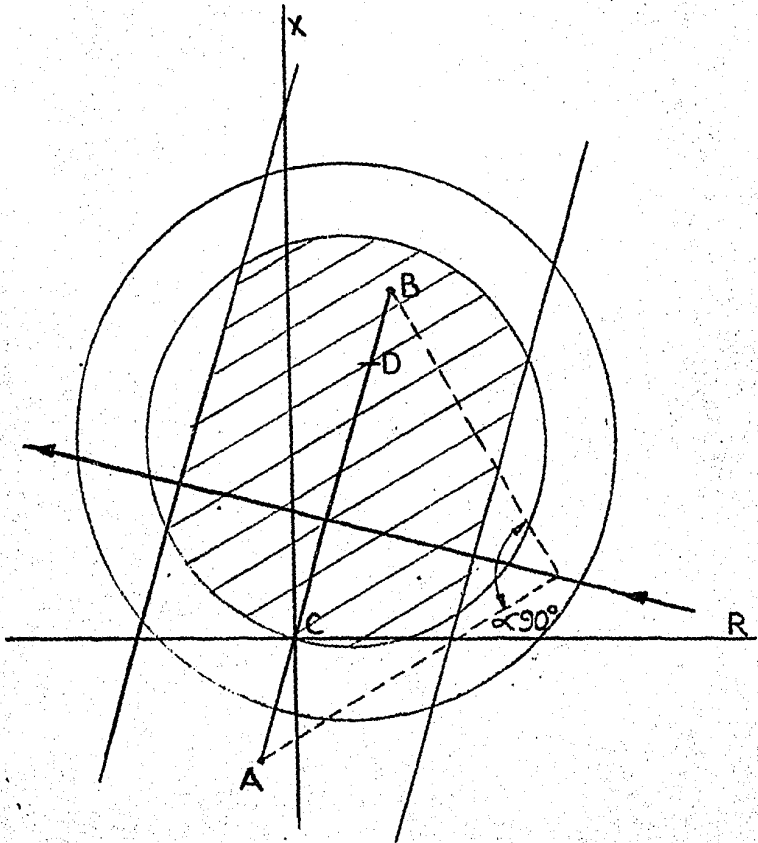
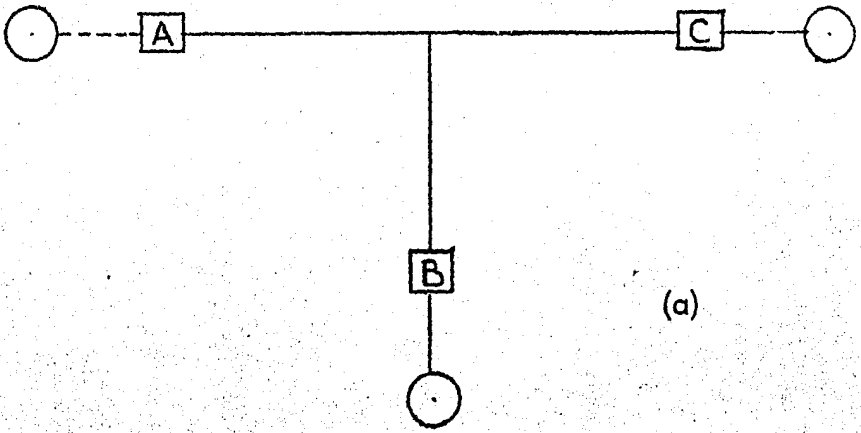
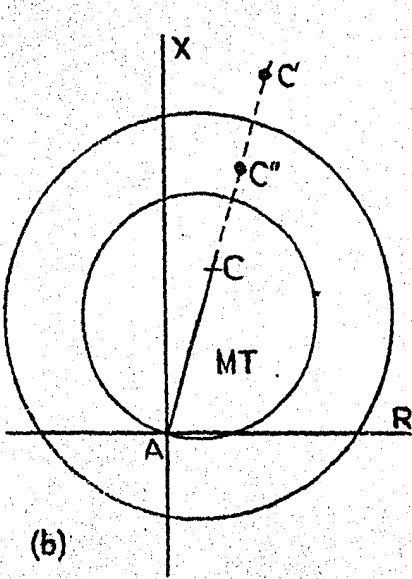


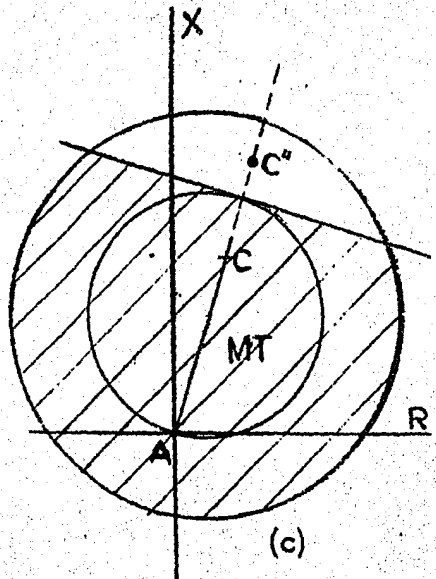
Fig. 3 - 37



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 - 38

## CAPITULO IV

### Semiconductores.

En general los materiales pueden ser catalogados como conductores, semiconductores o aisladores; dependiendo de la habilidad para conducir corriente eléctrica. Para entender la diferencia entre estos tipos de materiales es necesario examinar y comparar sus estructuras atómicas.

En todo átomo, el electrón gira alrededor del núcleo a un cierto nivel de energía debido a su posición y velocidad. Dos electrones del mismo átomo no pueden estar situados en el mismo nivel de energía. Los electrones que están situados en la orbita exterior, son más fácilmente despojados de su trayectoria atómica. Esto puede ser más claramente visualizado en la figura 4-1.

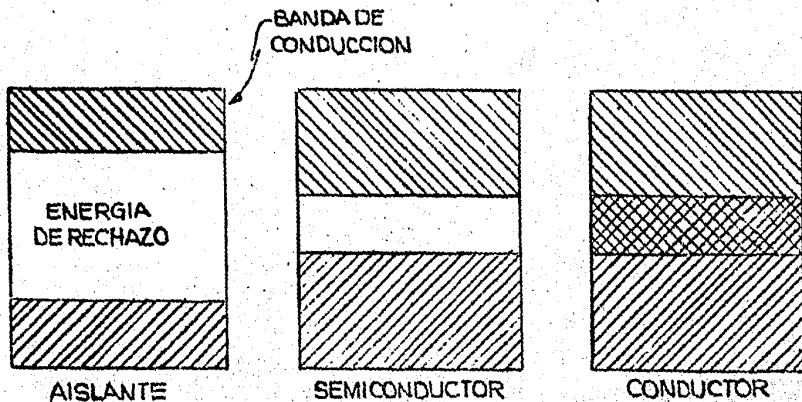


Fig. 4 - 1

En un aislante hay una zona carente de energía - entre el nivel de energía de los electrones fuera de órbita y los electrones en órbita. Esta - zona carente de energía es una región en donde - no existen electrones. Debido a que en los aislantes esta zona es ancha, los electrones no pueden tener suficiente energía para moverse hacia la banda de conducción, que es donde el electrón se mueve libremente debido a la influencia de - campo eléctrico.

En un conductor, la banda de valencia se sobrepone con la de conducción; esto significa que en la banda de conducción hay gran número de electrones libres que permiten el paso de una corriente eléctrica, al aplicarse al material un campo eléctrico externo.

En un semiconductor la zona carente de energía - es relativamente pequeña y es más angosta que en un aislante.

Los dos tipos más comunes de semiconductores son: el germanio y el silicio, con una zona sin energía de un ancho de 0.788 y 1.21 electrón volts, respectivamente. Esta cantidad de energía es necesaria para transferir un electrón de su banda de valencia a su banda de conducción.

A bajas temperaturas, una energía de esta magnitud normalmente no puede ser adquirida de un campo eléctrico, de manera que la banda de valencia permanece llena y la de conducción vacía, por lo que en estas condiciones el semiconductor se com



porta como aislador. Si la temperatura es incrementada, algunos electrones adquieren suficiente energía térmica para moverse dentro de la banda de conducción y por tanto, hay electrones libres, por este comportamiento se les conoce como semiconductores intrínsecos.

Cuando un electrón adquiere suficiente energía para moverse dentro de una banda de conducción, provoca un hueco, es decir, un nivel de energía vacío en la banda de valencia. Esos huecos sirven como conductores de electricidad, tan bien como los electrones.

Otro punto importante en el estudio de semiconductores es su estructura cristalina. El silicio y el germanio son tetravalentes, y tienen una estructura cristalina cúbica, como la muestra en la figura 4-2.

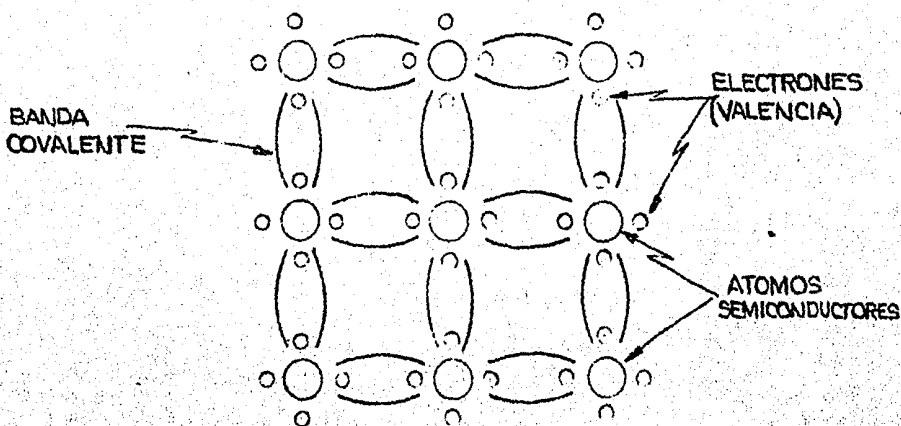


Fig. 4 - 2

Un par de electrones de valencia son compartidos entre cada uno de los átomos adjuntos. Cada átomo tiene sus cuatro electrones compartidos con los otros átomos, así que el total estado de energía que tiene ocho espacios en él, está lleno. Esto es conocido como la liga covalente y el arreglo de los átomos exteriores y pares de electrones ligados se representa como un enrejado.

Si introducimos impurezas en la estructura cristalina, ocurren algunos cambios importantes. Por ejemplo, si un átomo trivalente, como indio o galio, es agregado en lugar de uno de los átomos tetravalentes semiconductores, la liga no es llenada y consecuentemente se provoca un hueco. Este hueco puede ser fácilmente desplazado de átomo en átomo, por el movimiento de un electrón de una órbita a otra. Cuando un electrón deja una órbita para llenar un hueco, provoca otro en la posición que acaba de dejar. Este tipo de semiconductores impuros es conocido como tipo P, porque conduce la corriente a través de los huecos, que son cargas positivas.

Si en un semiconductor cristalino es puro, mezclamos con átomos de valencia 5, resulta la liga mostrada en la figura 4-3. En la que aparece un electrón en exceso, como en la liga covalente este electrón sobra, él es libre de moverse alrededor. La aplicación de un campo eléctrico al cristal, puede causar que este electrón se mueva y dé como resultado una corriente eléctrica. Este semiconductor es conocido como tipo N.

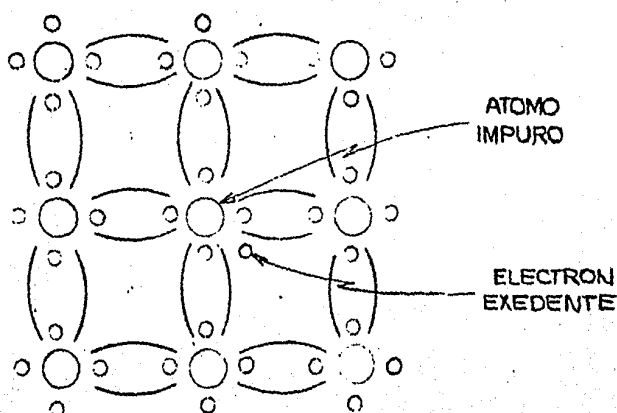


Fig. 4 - 3

En un semiconductor tipo N, los electrones libres son conocidos como principales conductores y los huecos lo son en minoría. En el semiconductor tipo P, ocurre lo contrario y los huecos son los principales conductores y los electrones libres son minoritarios.

### Diodos.

Si por ciertos medios somos capaces de unir un material tipo P con uno tipo N, figura 4-4, tendremos entonces un diodo. Antes de que los materiales fueran unidos eran eléctricamente neutros y al unirse se presenta una redistribución de carga, o sea que algunos huecos del tipo P, han atraído electrones del lado del tipo N. La combinación de huecos y electrones originan una

zona neutra en la unión, quedando las cargas más alejadas, sin unirse, y al cruzar la barrera se crea una tensión de contacto en la unión.

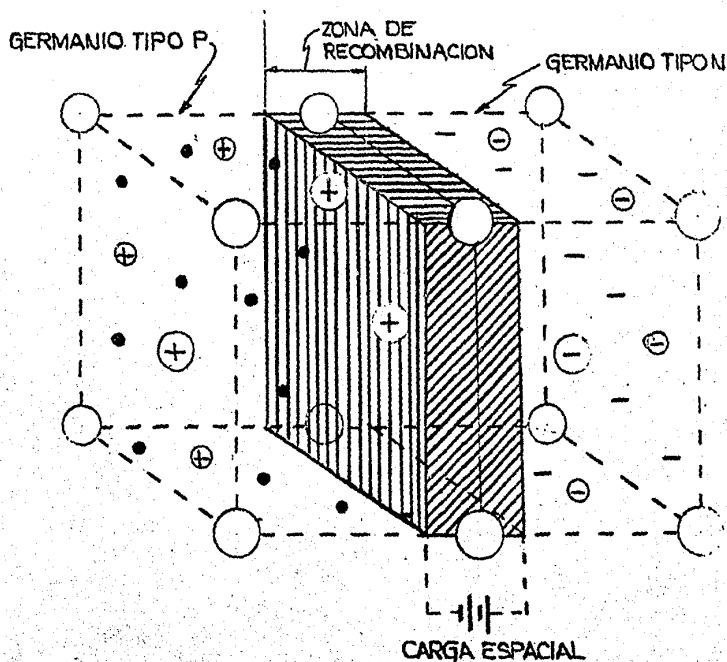


Fig. 4 - 4

Si aplicamos una tensión al diodo como se indica en la figura 4-5 (polarización directa), conectando el lado positivo de la batería al material tipo P y el negativo al material tipo N, podemos ver que las cargas serán rechazadas por la batería y forzadas a acercarse a la unión, y por lo

tanto fluye corriente; o sea, que cuando un agujero es inyectado al material tipo P es atraído fácilmente al material tipo N, cruza la unión - sin gran dificultad y pasando por el material - tipo N, llega hasta la batería.

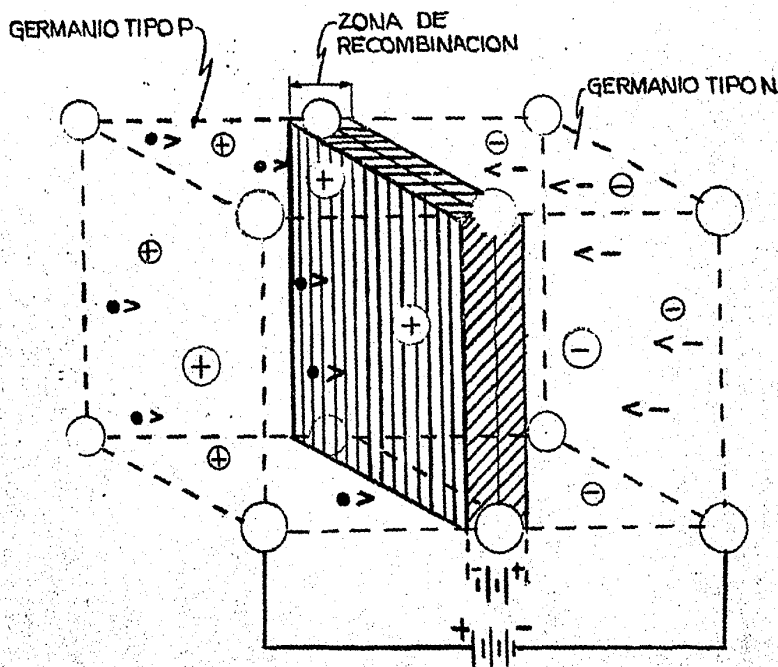


Fig. 4 - 5

Cuando invertimos la polaridad de la batería - (polarización inversa), figura 4-6, encontramos que el lado positivo de la batería atrae el exceso de electrones en el material tipo N. y el

lado negativo de la batería atrae las cargas positivas o huecos. El resultado es una unión efectiva debido a la redistribución de carga, incrementada considerablemente en la unión y por lo que aumenta el valor de la batería equivalente y el diodo no conduce.

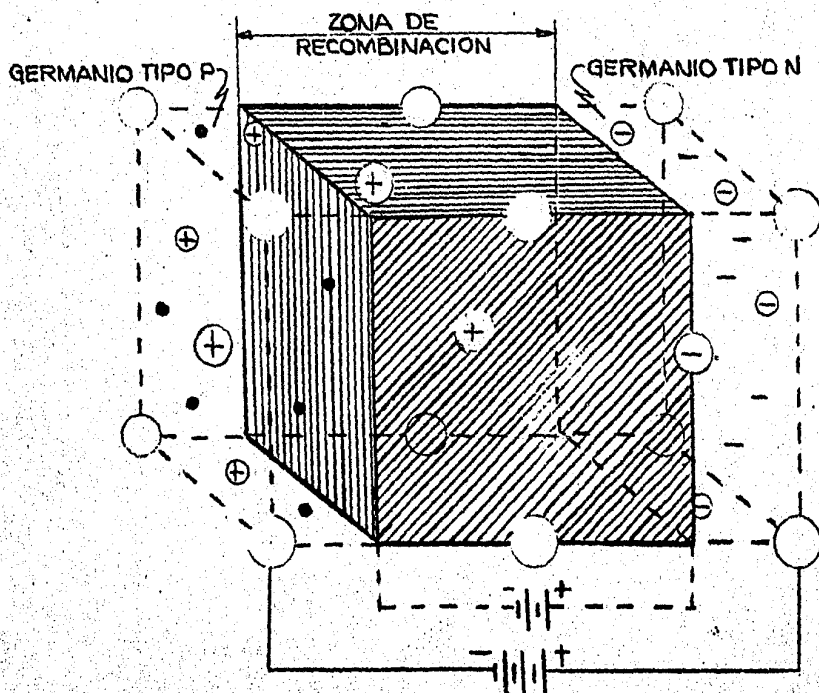


Fig. 4 - 6

En la figura 4-7, se muestra la gráfica de corriente contra tensión.

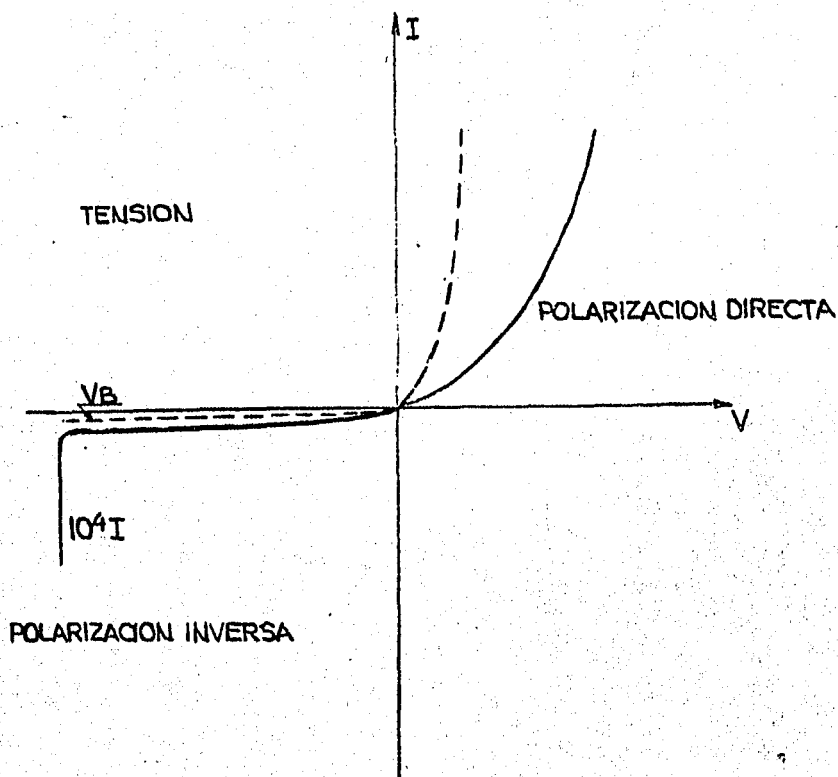


Fig. 4 - 7

La línea sólida representa las características normales del diodo, la línea punteada representa las características teóricas. Existe una tensión de ruptura  $V_B$  en el diodo, o sea que la corriente se incrementará casi sin límite más allá de la tensión negativa como se muestra en dicha figura. Hay dos teorías que tratan de explicar este fenómeno.

El voltaje Zener es la tensión inversa que aplicada al diodo es capaz de romper o atraer de por sí el total de los pares de electrones, y por tanto la corriente fluirá. Otra es la llamada -

teoría de la avalancha, la que se presenta en la siguiente forma: con la tensión inversa a través de la unión, el diodo es esencialmente estable, pero si hay alguna agitación por temperatura en los electrones, quedan fuera de su nivel de valencia y debido al alto potencial en la unión del diodo, se desplazan rápidamente a la unión, obteniendo tal energía cinética, que los hace incapaces de detenerse, desplazándose a través y dentro del material tipo N y ya que el material semiconductor es un sólido, chocan con algunos átomos o algunos otros electrones impulsándolos fuera de sus niveles, recibiendo una gran cantidad de energía cinética, los electrones perturbados se desplazan hacia afuera y chocan con otros átomos y electrones, presentándose el efecto avalancha.

Muchos diodos son diseñados y construidos para operar en la porción avalancha de la curva característica. Estos diodos son conocidos como diodos de referencia o algunas veces diodos Zener. Estos diodos operan desde unos pocos volts 3 ó 4, hasta muchos cientos de volts en distintas estimaciones de potencia. Las limitaciones en la corriente máxima están reguladas por el tamaño del cristal y el tipo de material. La máxima tensión inversa que puede ser aplicada al diodo es limitada por la condición de avalancha, la cual es proporcional a la cantidad de impurezas que haya en el diodo. Así básicamente, aparecen dos factores límites: la máxima corriente en sentido directo que puede ser admitida y la máxima tensión inversa que puede ser aplicada.

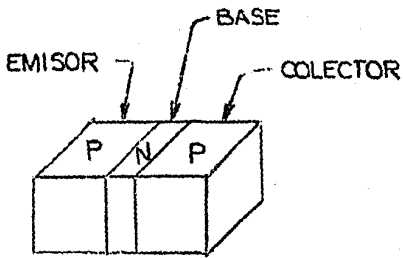


## Transistores.

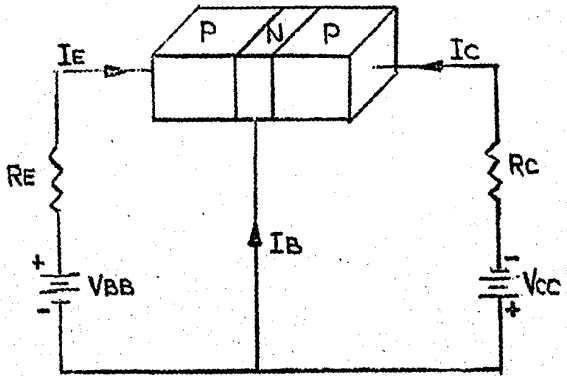
La unión de un material tipo P y uno tipo N, figura 4-8a, es la base para la construcción de un transistor PNP. En la figura 4-8b, se le han asignado al transistor ciertas tensiones que constituyen la red de trabajo. El mecanismo para el flujo de corriente es el que supone que puede ser inyectado un hueco en un material emisor tipo P. Como el hueco se mueve en el emisor, se acerca al material tipo N que funciona como base, cruza la unión entre el emisor y la base y se encuentra en una región en la que hay un alto contenido de electrones libres a causa de la tensión del colector, la cual finalmente lo atrae. La base es una región bastante delgada y habrá oportunidad para que el hueco se recombine con el electrón que va hacia la base, sin embargo, hay muchos huecos que se recombinan con los electrones en la base y esto da ocasión a la corriente de base que fluye desde el material tipo N. Los huecos que no se recombinan en la región de la base son atraídos hacia el colector.

El diodo emisor-base tiene sentido positivo y el colector-base sentido contrario; este arreglo de sentidos es el requerido para una operación normal de un amplificador base común o base a tierra; en la figura 4-9a, se muestra la unión del transistor, con los circuitos del emisor, la base y el colector.

En la figura 4-9b se muestra el esquema para el arreglo del sentido de las corrientes en un transistor.

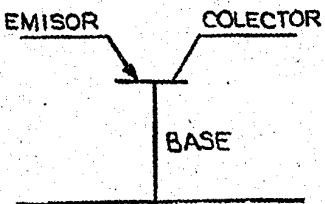


(a)

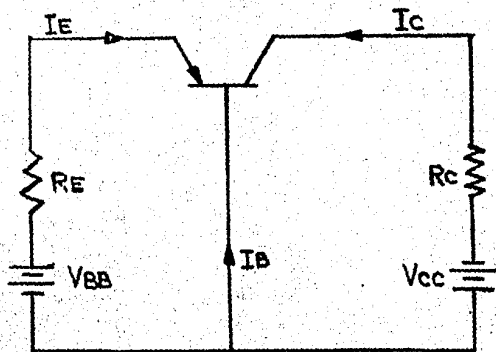


(b)

Fig. 4 - 8



(a)



(b)

Fig. 4 - 9

El transistor  $N_pN$  se representa exactamente igual que el PNP excepto que la flecha del emisor está en sentido contrario. La corriente del colector puede ser esquematizada, contra la tensión de base del colector para un transistor PNP de base común, en función de lo que hemos hablado acerca de la corriente en los diodos, es posible visualizar que cuando la corriente del emisor es cero, probablemente habrá corriente en el colector, y esta será de sentido contrario a la descrita anteriormente a causa del campo eléctrico que hay del colector a la base, la característica anterior está mostrada en la curva  $i_e = 0$ , de las mostradas en la figura 4-10. A medida que la corriente del emisor se incrementa, las curvas toman la forma indicada por  $I_{E1}$ ,  $I_{E2}$ .

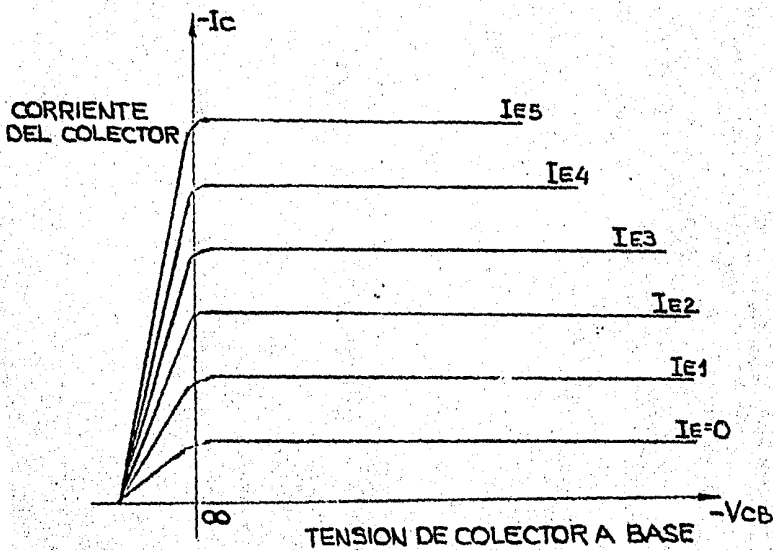


Fig. 4 - 10

Las curvas del transistor son usadas para determinar la respuesta de salida a una excitación - que varía con el tiempo.

La ganancia de corriente del transistor es la relación entre la corriente del colector y el emisor.

### Transistor Unijunction.

El transistor unijunction está constituido por una barra de material semiconductor tipo N, con una conexión eléctrica en cada extremo. Tiene una tercer conexión en un punto entre las dos conexiones extremas donde una sola unión p-n ha sido formada. La salida a esta unión recibe el nombre de salida emisora E. La construcción del transistor unijunction se refleja en su símbolo, el cual se muestra en la figura 4-11a. El circuito equivalente para el transistor está dado en la figura 4-11b.

Bajo condiciones normales, la base  $B_1$  se conecta como terminal común. Entonces, si el emisor conduce, el transistor actuará como una red divisora de tensiones y la tensión del emisor ( $V_{EO}$ ) es una fracción de la tensión de la base  $B_2$ .

Si el emisor se polariza a un potencial menor que  $V_{EO}$ , la unión p-n se polariza en forma inversa y solamente fluye la corriente de saturación del diodo en el circuito emisor. Si la tensión del emisor se incrementa sobre  $V_{EO}$ , la unión será polarizada en forma directa. Bajo estas con-

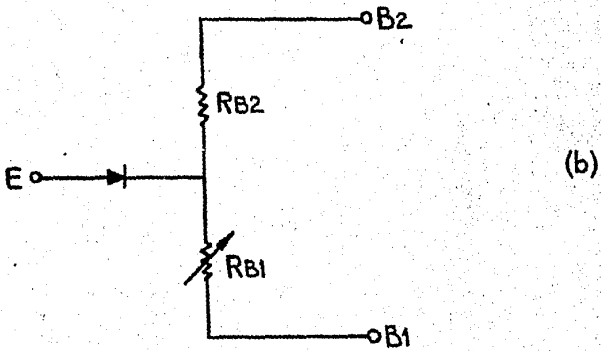
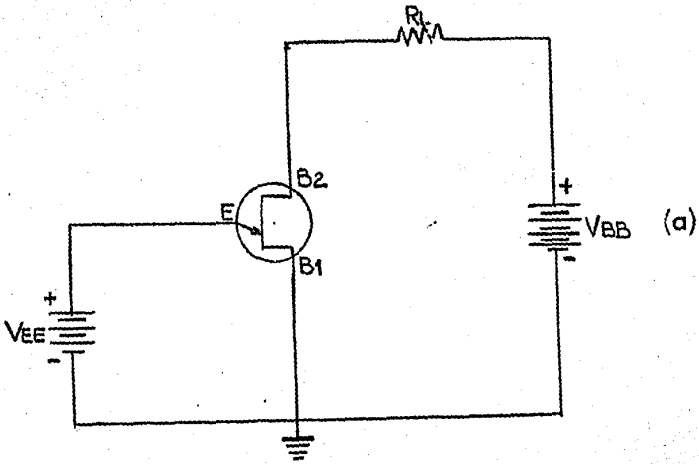


Fig. 4 - 11

diciones, se inyectarán huecos del material p a a la barra del material tipo n. Estos huecos - serán repelidos por la base  $B_2$  y serán dirigidos hacia la base  $B_1$ . Esta acumulación de huecos en la región emisor-base  $B_1$  provoca una disminución de la resistencia  $R_{B1}$  (figura 4-12).

Debido a esto, resulta una aparente resistencia negativa puesto que con una tensión menor del - emisor, resulta un incremento de la corriente - en el mismo. Puesto que se inyectan más huecos, se alcanzará eventualmente una condición de saturación.

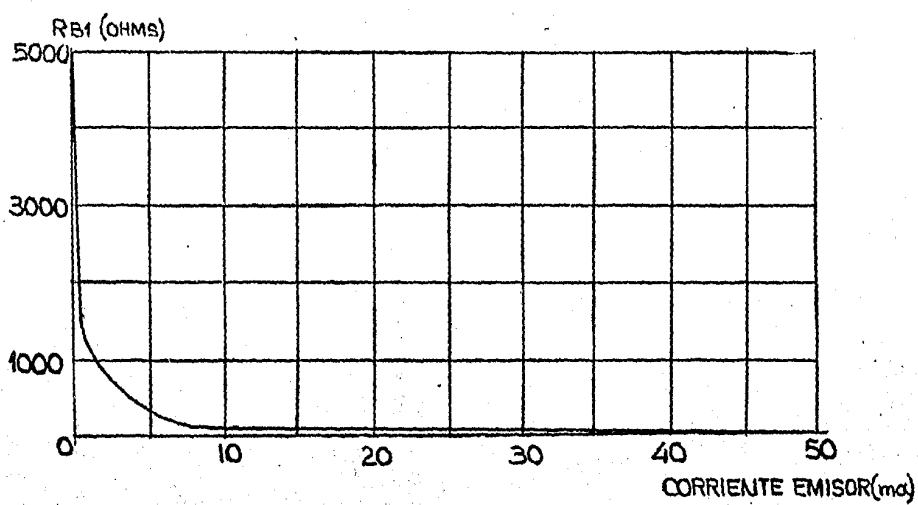


Fig. 4 - 12

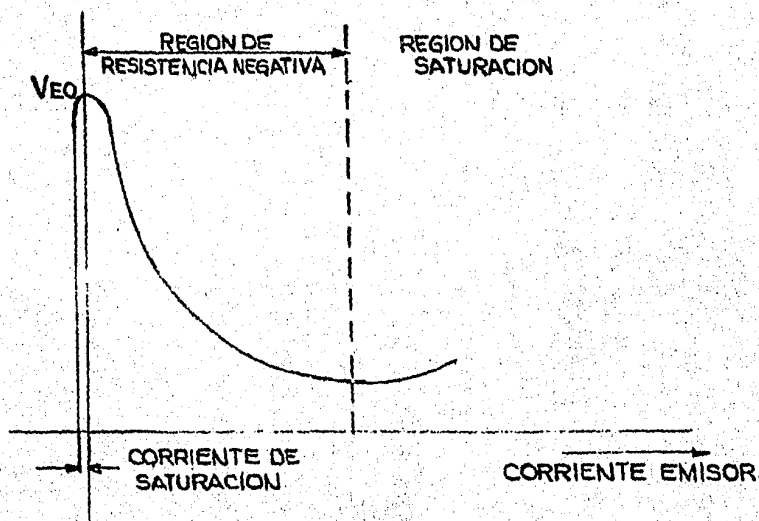


Fig. 4 - 13

Esta acción se muestra en la figura 4-13, y en las características corriente-tensión de la figura 4-14. Por eso, para describir sus características, se requiere de una familia de curvas, como las dadas en la figura (4-14).

### Rectificador de silicio controlado.

Un mecanismo semiconductor conocido como un "Thyrode" o rectificador controlado de silicio (SCR) está construido como se muestra en la figura 4-15a. La acción de este mecanismo puede explicarse por el circuito equivalente mostrado en la figura 4-15b. Este circuito equivalente está compuesto de un transistor npn y otro pnp, conectados como se muestra en dicha figura. Una condición de polarización tal que mantenga al transistor npn fuera de operación será mantener la compuerta (base del npn) negativa. Mientras no fluya corriente en el colector del transistor npn, el transistor pnp estará también fuera de operación; con lo cual la impedancia entre el ánodo y el cátodo será muy alta.

Si la polarización sobre la compuerta se cambia, de tal manera que el npn empiece a conducir, una corriente del colector fluirá hacia el colector del npn desde la base de la unidad pnp. Este flujo de corriente de la base de la unidad pnp causa un flujo de corriente del colector que fluya hacia el transistor pnp. La corriente del colector de la unidad pnp es inyectada a la base -

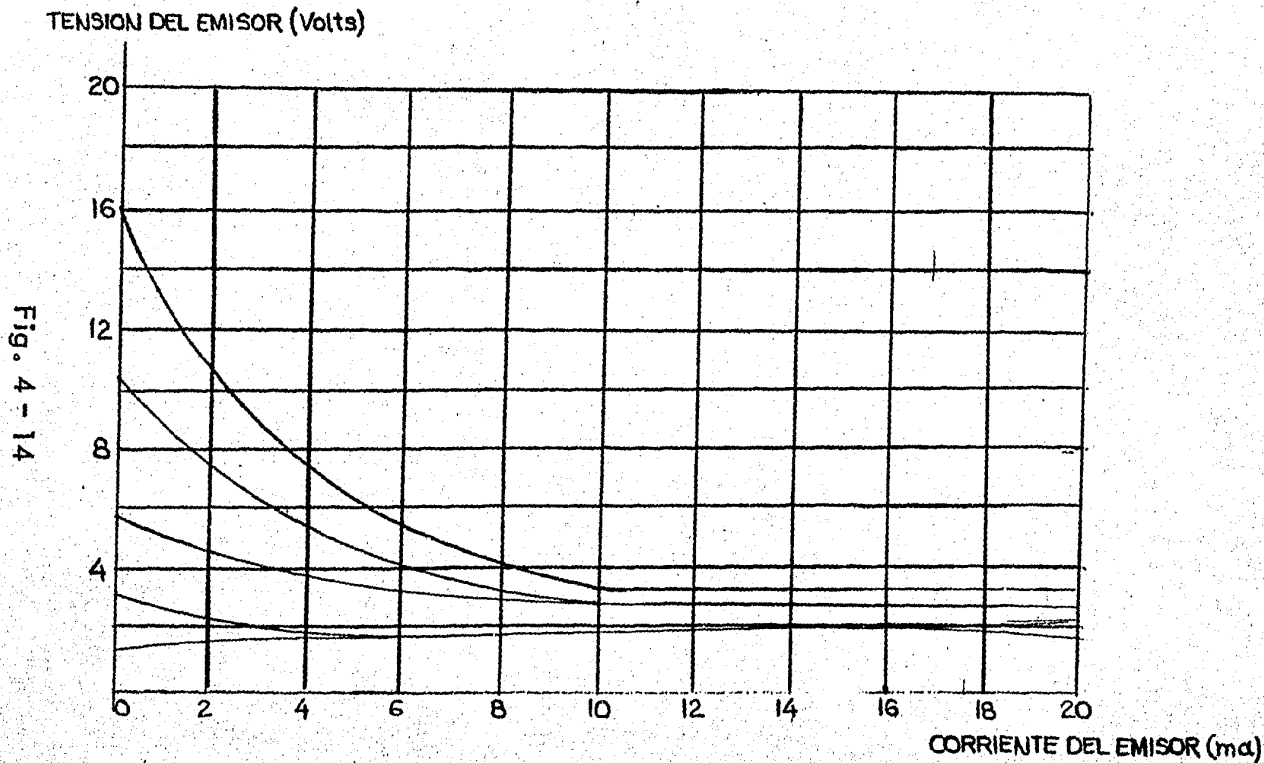


Fig. 4 - 14



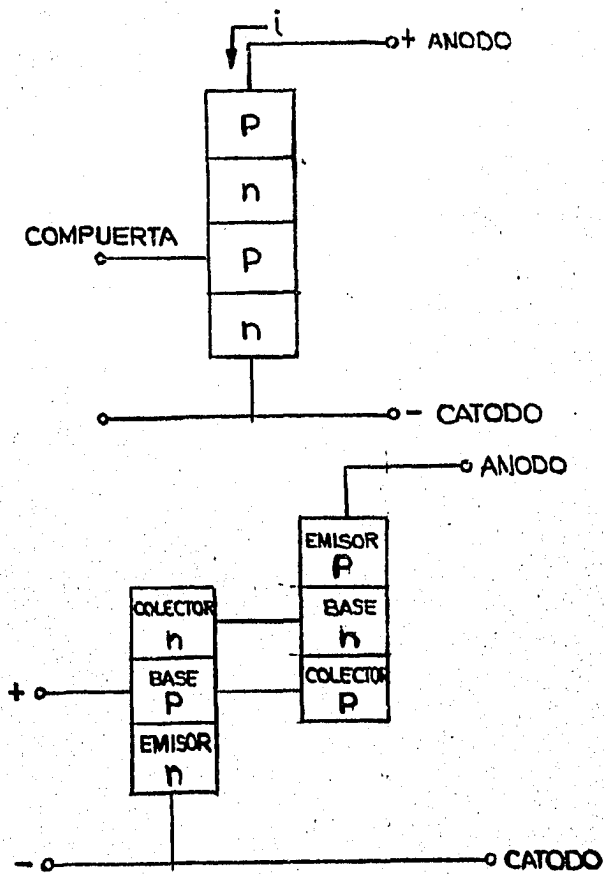


Fig. 4 - 15

del transistor npn. La acción es acumulativa puesto que un incremento de corriente en una unidad causa un incremento de corriente en la otra unidad. Como resultado de esta acción, ambos transistores serán conducidos a operar con la corriente de saturación, consecuentemente, la impedancia entre el ánodo y el cátodo será muy baja.

Tan pronto como comienza la regeneración propia, la compuerta pierde todo control sobre la acción. La corriente del colector de la unidad pnp es mucho mayor que la corriente externa de compuerta.

En consecuencia el circuito externo de la compuerta puede iniciar la operación del SCR, pero no puede sacarlo de operación. Para sacar de operación al SCR la polarización de la compuerta deberá de invertirse y la tensión del ánodo reducirse esencialmente a cero. Bajo estas condiciones no fluirá corriente a través de la unidad pnp y la compuerta recobra el control del circuito.

Si la compuerta se mantiene fuera de operación - (potencial negativo) y la tensión sobre el ánodo se varía, las características son como las indicadas en la figura 4-16.

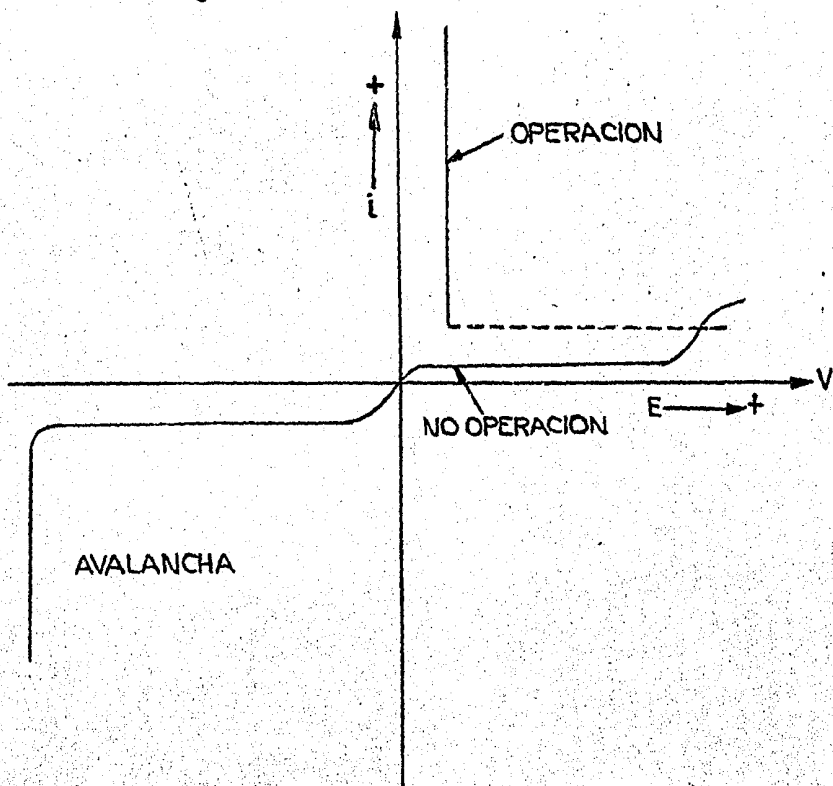


Fig. 4 - 16

A un potencial positivo del ánodo, el cual corresponde al caso de una polarización inversa - (avalancha), el SCR operará por si mismo. Dicho potencial es conocido como tensión de ruptura. En efecto, la corriente a través del transistor empieza a incrementarse como en un avalancha. Sin embargo, este incremento de corriente a través de la sección pnp produce una corriente de base para la sección npn y la acción regenerativa rápidamente hace operar al SCR. Las tensiones máximas de operación del transistor, se seleccionan de tal manera que sean menores a la tensión de avalancha y a la de ruptura. En consecuencia, el SCR puede ser operado como compuerta solamente dentro de las tensiones máximas de operación.

## CAPITULO V

### Circuitos de Protección Transistorizada.

Estos circuitos se utilizan para desarrollar los sistemas de protección transistorizada, estudiaremos los cuatro tipos de circuitos necesarios - en la coordinación y lógica de los esquemas de - protección de un sistema. Estos cuatro circui--tos son: lógicos de tiempo, auxiliares y discrimi--nadores.

Puesto que en tales circuitos los transistores - operan como interruptores, daremos una breve des--cripción de la forma de operación. Generalmente, estos elementos operan entre la región de corte y la de saturación.

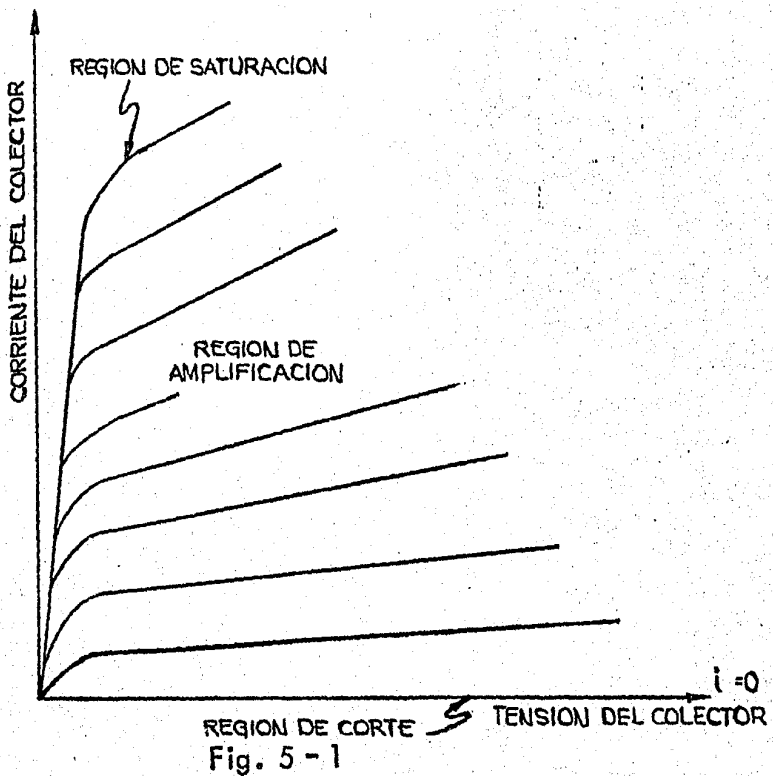
En la región de corte, el electrodo de entrada - se polariza de forma tal que no haya esencial--mente flujo de corriente en la salida. En los - transistores esta condición se alcanza cuando - las dos uniones están polarizadas en forma inver--sa.

En la región de operación lineal, la corriente - en la salida está controlada por la corriente de entrada en el transistor.

La región de saturación se alcanza cuando el ele--mento está operando con tal magnitud de corrien--te en el electrodo de salida, que un incremento de la señal de entrada no puede causar un incre--

mento significativo en la corriente de salida, es decir, la señal de entrada no tiene control sobre la magnitud de la señal en la salida.

Las regiones de operación mencionadas se muestran en la figura 5-1.



Los circuitos que tienen una baja impedancia de entrada y operan con señales de gran amplitud - deben protegerse de la disipación excesiva de potencia. Generalmente una resistencia en serie con la base proporciona esta protección. En

otros circuitos se coloca en paralelo con la entrada del amplificador un diodo de referencia (diodo Zener), para limitar la amplitud de la señal de entrada. Un circuito típico se muestra en la figura 5-2.

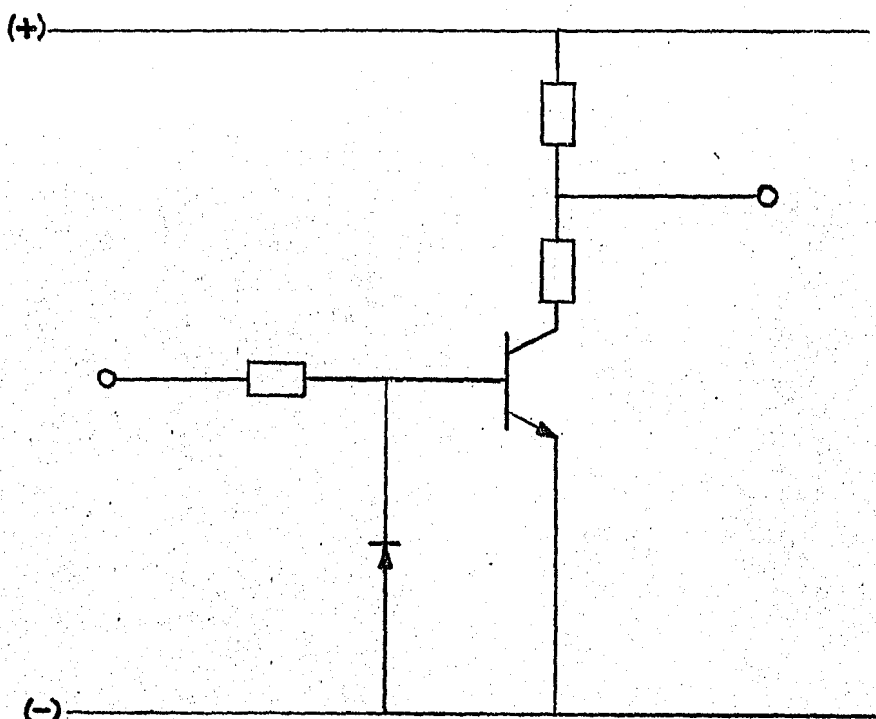


Fig. 5 - 2.

## Circuitos Lógicos.

### Circuito NOT.

Un elemento not, es un circuito que, cuando ha ya una señal en las terminales de entrada de - éste, no habrá señal en la terminal de salida;

cuando no hay señal en la entrada, habrá en cambio señal en la salida. El símbolo que representa a dicho circuito se muestra en la figura (5-3).

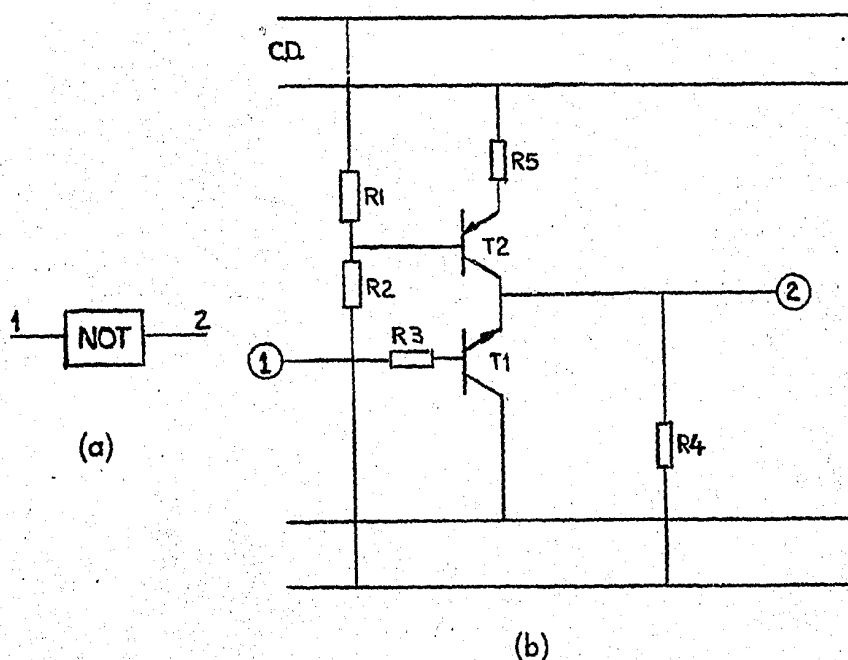


Fig. 5 - 3

El circuito eléctrico de un elemento not se muestra en la figura 53b. La operación de tal circuito es como sigue: cuando hay una señal en la terminal de entrada 1, el transistor  $T_1$ , el cual es tipo npn, recibe una polarización positiva en

la unión base-emisor, por lo que T1 conducirá. Puesto que el transistor T2 está polarizado en forma permanente por R1, habrá una corriente a través de R5, T2 y T1, con lo cual no habrá salida en la terminal 2. Si no hay señal en la terminal 1, el transistor T1 no operará, por lo cual, la corriente fluirá a través de R5, T2 y R4, con lo que se tendrá una señal de salida en la terminal 2.

### Circuitos "And".

Un circuito como el representado en forma esquemática por la figura 5-4a, opera de tal manera que, cuando hay señal en las dos terminales de entrada, hay una señal en la salida. El circuito eléctrico de este elemento se muestra en la figura 5-4b.

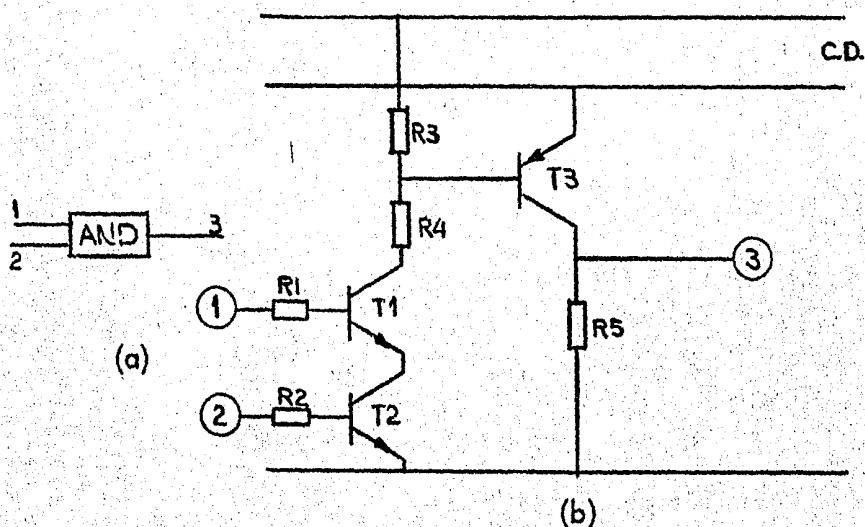


Fig. 5 - 4

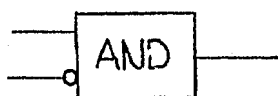


Si en el circuito mostrado en la figura 5-4b se tiene una señal tanto en la terminal 1, como en la 2, la unión base-emisor de los transistores T1 y T2 será polarizada en forma directa, por lo cual habrá una corriente colector-emisor a través de dichos transistores, la caída de potencial producida por dicha corriente en la resistencia R3, producirá a la unión base-emisor de T3 una polarización directa, ya que T3 es un transistor tipo pnp, por tanto T3 conducirá y tendremos una salida en la terminal 3. Puede observarse fácilmente, que si no hay señal en alguna de las entradas, no habrá flujo de corriente a través de R3, con esto no se logrará polarizar adecuadamente a T3 y como consecuencia no habrá señal de salida en la terminal 3.

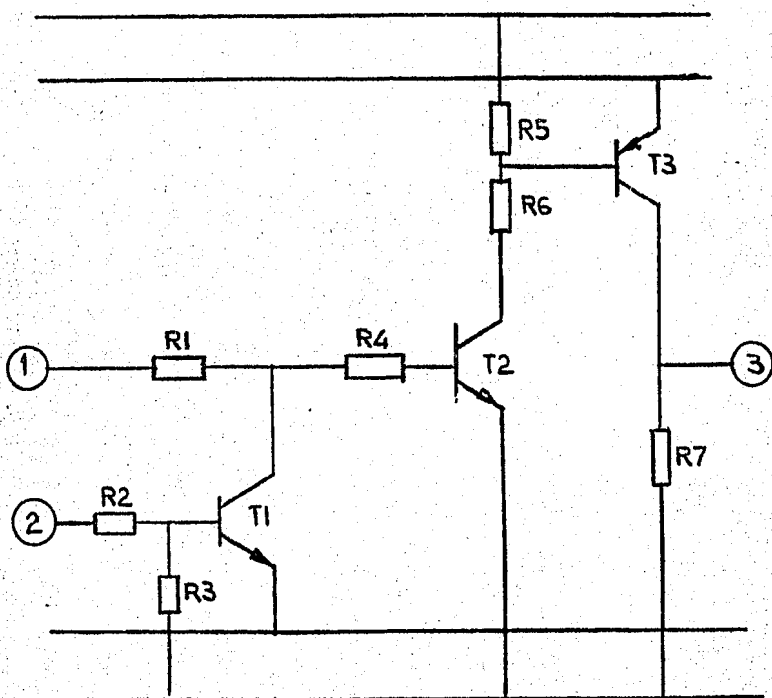
Otro tipo de circuito "and" opera cuando en una entrada determinada hay una señal y en la otra no los hay, el símbolo que representa a dicho circuito se muestra en la figura 5-5a.

El circuito eléctrico mostrado en la figura 5-5b opera como sigue: Cuando en la terminal 1 hay una señal positiva y en la terminal 2 no hay señal, el transistor T1 no será polarizado, pero el transistor T2 si lo estará, por lo que habrá un flujo de corriente a través de R5, R6 y T2, desde la fuente de CD., esta corriente polariza al transistor T3 en forma directa, por lo que éste conducirá; corriente a través de R7 produce una señal en la salida 3. Cuando hay una señal positiva en la terminal 2, esta polariza al transistor T1, con lo que si hay señal en la

terminal 1, ésta será conducida a tierra a través de T1, por lo que no se polariza T2 y por tanto no hay salida en la terminal 3.



(a)



(b)

Fig. 5 - 5

Otro tipo de circuito "and" opera cuando hay una señal positiva en dos de las terminales de entrada pero no hay señal en la tercera. En caso de que esta secuencia no se cumpla, no hay señal en la terminal de salida. El símbolo que representa a dicho circuito se muestra en la figura 5-6a.

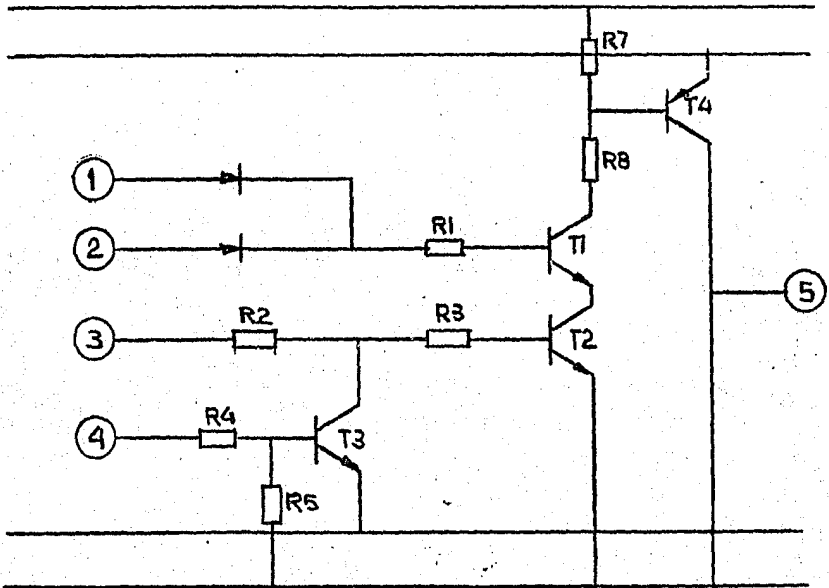
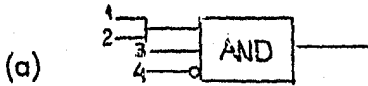


Fig. 5 - 6

El circuito lógico mostrado produce una salida cuando hay una señal positiva en las terminales 1 ó 2 y 3, pero no hay señal en la 4. El comportamiento del circuito cuando se llenan estas condiciones es el siguiente: Fig. 5-6b.

Para que haya una salida en este circuito, el transistor T4 deberá tener una polarización negativa en la unión base-emisor, con lo cual la corriente colector emisor fluirá a través de R6, teniéndose por tanto salida en 5. Para las condiciones mencionadas, T1 será polarizado por la

señal en 1 ó 2, puesto que no hay señal en 4, T3 no operará y la señal de la entrada 3 polarizará al transistor T2, por lo que habrá una corriente desde la fuente de CD. a través de R7, R8, T2 y T1, suponiendo que T1 ya fué polarizado por una señal en 1 ó 2. Esta corriente producirá una caída a través de R7, la cual polarizará en forma directa la unión base emisor del transistor T4, este conduce y hay una señal en la salida.

En caso de que haya una señal en la terminal 4, el transistor T3 será polarizado en forma directa por dicha señal, por lo que conducirá y la señal en la terminal 3 es conducida a tierra a través de T3, con lo cual no se podrá polarizar al transistor T2 y como consecuencia tampoco se polarizará a T4. Por lo que para estas condiciones no habrá señal en la terminal de salida 5.

### Circuitos de tiempo.

Los circuitos de tiempo están diseminados a través de los diferentes relés y desarrollan coordinaciones y/o funciones lógicas. Nuestro propósito al revisar estos circuitos, se debe a que si logramos separar el circuito de tiempo del funcionamiento lógico, podremos incrementar grandemente nuestra capacidad para leer diagramas esquemáticos.

Los circuitos de tiempo tienen una gran importancia en la sincronización de los sistemas de protección sobre todo en la protección contra oscilaciones del sistema, con instrumentos de estado sólido. A continuación analizaremos dos

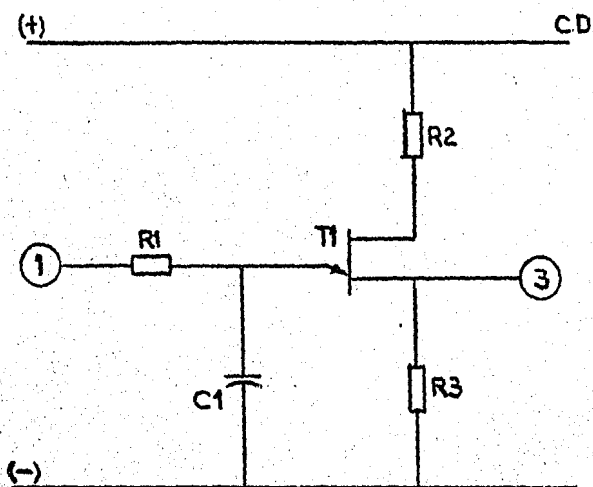
tipos de circuitos de tiempo.

a) Circuito de tiempo con transistor Unijunction. Este circuito se muestra en la figura (5-7) y funciona de la siguiente manera:

Cuando aparece una señal en la terminal 1, el capacitor  $C1$  empieza a cargarse en función de la resistencia  $R1$  y cuando  $C1$  alcanza la tensión  $V_E$  de operación del transistor Unijunction, éste operará, con lo cual habrá una corriente desde la fuente de CD. a través de  $R2$ ,  $T1$  y  $R3$ , y habrá una salida en la terminal 3. El retraso de tiempo que se logra es el que hay desde que aparece la señal en la terminal de salida 3.



(a)



(b)

Fig. 5 - 7

b) Circuito de tiempo con diodo Zener. La operación de este tipo de circuito es muy similar a la anterior.

En la figura 5-8, tenemos un circuito de tiempo fijo, el cual está diseñado para ser compatible con el circuito lógico. Este puede introducirse en dicho circuito si se requiere un retraso de tiempo para proporcionar coordinación de las unidades sensoriales, por ejemplo, coordinación de relés de fase durante transitorios en la línea o para proporcionar un funcionamiento lógico.

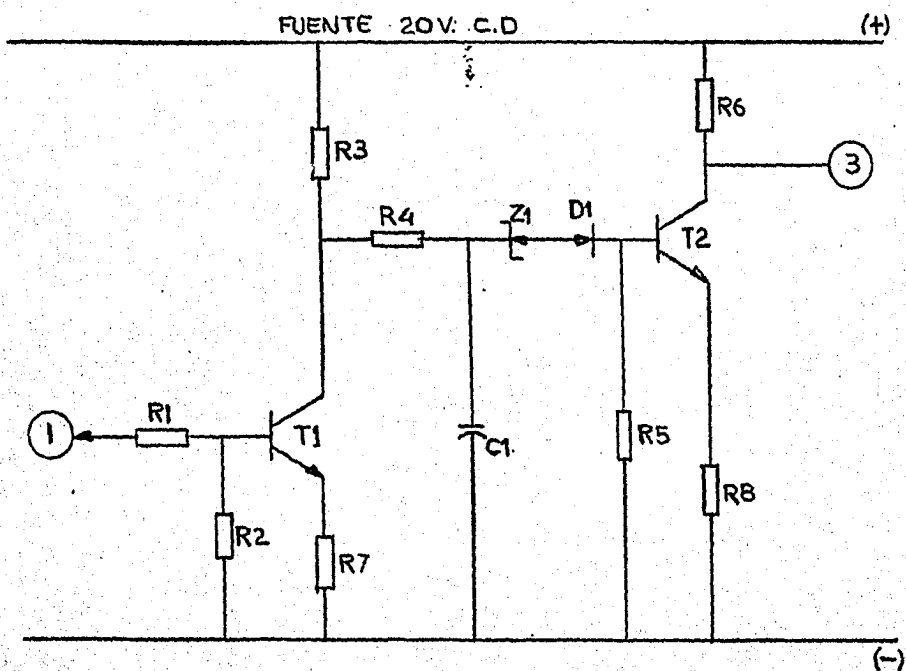


Fig. 5 - 8

Analizando la operación del circuito: T1 es un transistor de operación normal el cual realiza la función de abrir y cerrar alrededor de C1. Sobre el cambio de la corriente en la base de T1, el capacitor C1 carga a una relación definida por R3 y R4. Cuando la tensión sobre C1 alcanza el voltaje de avancha del diodo de referencia Z1, más un volt para el potencial de operación de D1 y T2, la corriente fluirá a través de Z1, D1 y la unión base emisor de T2, operando T2. El intervalo de tiempo es desde que T1 está fuera de operación hasta que T2 opera. Este intervalo es función de los valores de R3, R4, C1 y Z1. El rango del retardo de tiempo requerido para coordinar las diferentes funciones de los relés, se obtiene variando una o más de estas componentes.

### Circuitos auxiliares.

#### Circuito inversor.

Este tipo de circuitos, como su nombre lo indica, son empleados como auxiliares en los esquemas de protección. En la figura 5-9, se presenta un circuito auxiliar típico.

La finalidad principal de este circuito es invertir la polaridad de la señal alimentada en las terminales 4 ó 3, las cuales serán transformadas por el circuito en señales positivas, este cambio puede ser necesario en un punto dado de un

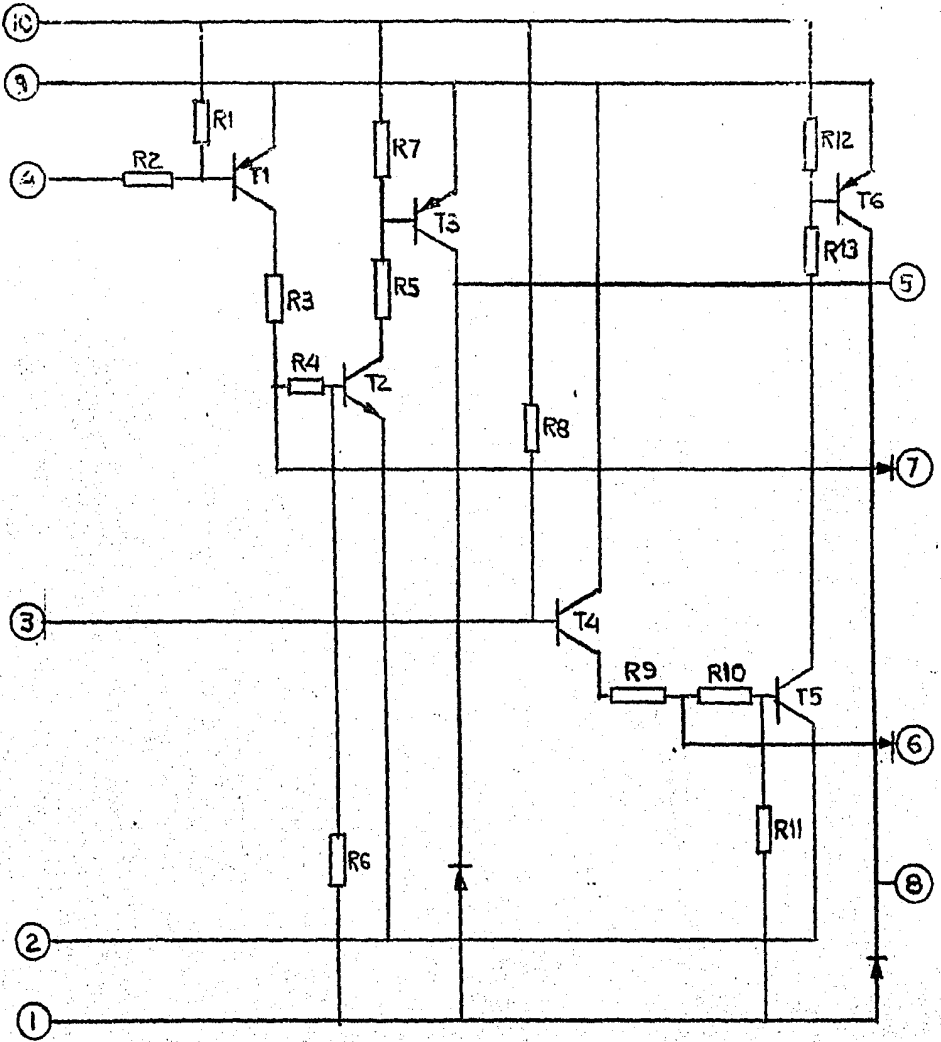


Fig. 5 - 9



esquema de protección.

El comportamiento de este circuito es el siguiente: cuando aparece una señal negativa en la terminal 4, ésta polariza en forma directa al transistor pnp T1, conduciendo a través del emisor - colector, proporcionando una salida positiva en la terminal 7. Adicionalmente puede obtenerse una señal en 5 por medio del circuito interruptor acoplado. Una señal negativa en la terminal 3 producirá en forma análoga una señal positiva en la terminal de salida 6; habrá igualmente una señal en la terminal 8 debido al circuito interruptor acoplado.

### Circuitos discriminadores.

#### Circuito Block - Block (MT).

La función de este circuito es comparar el ángulo de fase, relacionándolo con una cantidad de polarización o referencia (corriente o tensión) y una cantidad de operación (corriente o tensión). Estas funciones se realizan en los relevadores electromecánicos por una unidad de copa de cuatro polos. En los relevadores de estado sólido, los comparadores del ángulo de fase para el relé de distancia, reciben el nombre de esquema "block - block"; con unidad direccional se utiliza un esquema "rectificador puente".

El circuito "block - block" utiliza ondas cuadradas.

das o bloques, así como una combinación de transistores y rectificadores de silicio controlado (SCR). Las figuras 5-10 y 5-11, muestran las condiciones de fase para operación o no operación. El circuito es tal que si el block desarrollado por la unidad de operación adelanta al block de polarización por 0 a 180°, figura 5-10, el circuito produce una salida.

Si el block de polarización adelanta al de operación por 0 a 180°, el circuito no produce salida, figura 5-11.

La figura 5-12 es un esquema simplificado de la mitad de un circuito real. Un circuito descrimina durante el medio ciclo positivo de las cantidades y otro durante el medio ciclo negativo. Veamos primero la operación del circuito con las condiciones de operación aplicadas a los dos sistemas de entrada.

La aplicación de una señal de operación, causa un flujo de corriente a través de Q1 y a través de los dos diodos con polaridad directa en el arreglo Da, los cuales están en paralelo a través del arrollamiento primario de Q1. Los dos diodos limitan la tensión de entrada a 1.5 volts. Q1 tiene una relación de 8/1, por lo que la corriente que circula a través del primario produce aproximadamente 12 volts sobre el secundario. Estos 12 volts polarizan en forma directa la unión base emisor del T1, T1 conduce operando sobre T2. La corriente fluye desde la fuente de 20 volts de CD. a través de T2, pasando por R8; la compuerta del SCR no ha sido polarizada por

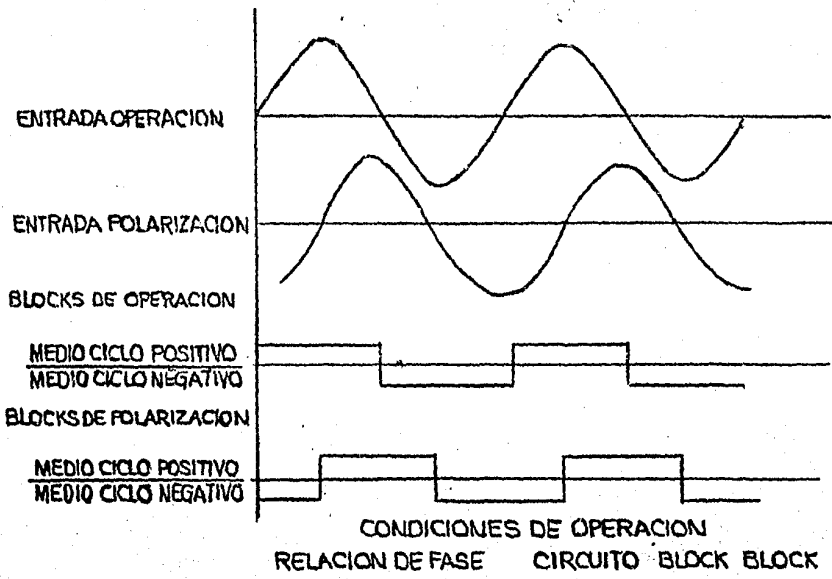


Fig. 5 - 10

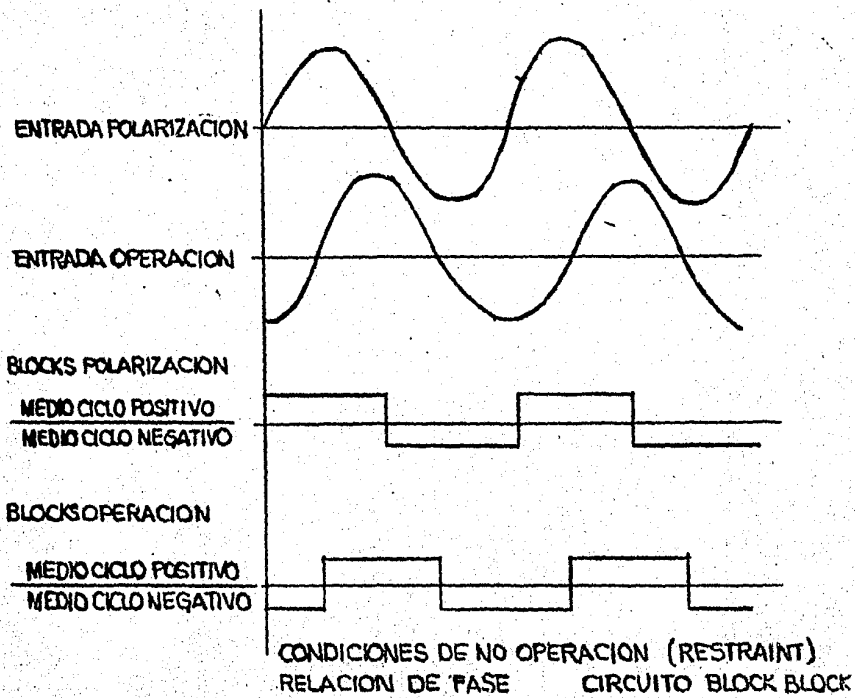


Fig. 5 - 11

lo que T5 permanece en estado de bloqueo y la corriente fluirá por la terminal al siguiente paso. Hemos supuesto que el medio ciclo positivo de la unidad operadora es positivo antes que el medio ciclo positivo de la cantidad polarizada. Nótese que al operar T2 aplica una tensión de 20 volts positivos sobre el cátodo de D3, esto polariza inversamente D3 y evita que la corriente de base de T4 fluya cuando la polarización de entrada hace operar a T3. Previene la acción sobre la compuerta de T4 se evita su operación. Esto permite un medio ciclo de salida para un medio ciclo positivo de entrada. El medio ciclo negativo produce un medio ciclo de salida en la misma forma por la otra mitad del circuito.

Si la situación se invierte, figura 5-11, el medio ciclo polarizante aparece antes que el de operación, los 12 volts de Q2, aplican una polarización directa a T3, éste conduce y hace operar a T4. La corriente fluirá a través de Z1, T4, R6 y R7. Cuando la tensión a través de R7 alcanza el potencial de operación de T5, la unión compuerta-cátodo es polarizada en forma directa y el SCR conduce. Cuando el medio ciclo de operación aparece, hace que operen T1 y T2. La corriente que fluye de la fuente de 20 volts a través de T2 y R8 es conducida al polo negativo a través de T5. Cuando el medio ciclo polarizante termina, no se desea que T5 se recupere durante el restante medio ciclo. Si T3 se recobró mientras T2 estuvo conduciendo, aparecerá una salida en T5. Este no es el caso, puesto -

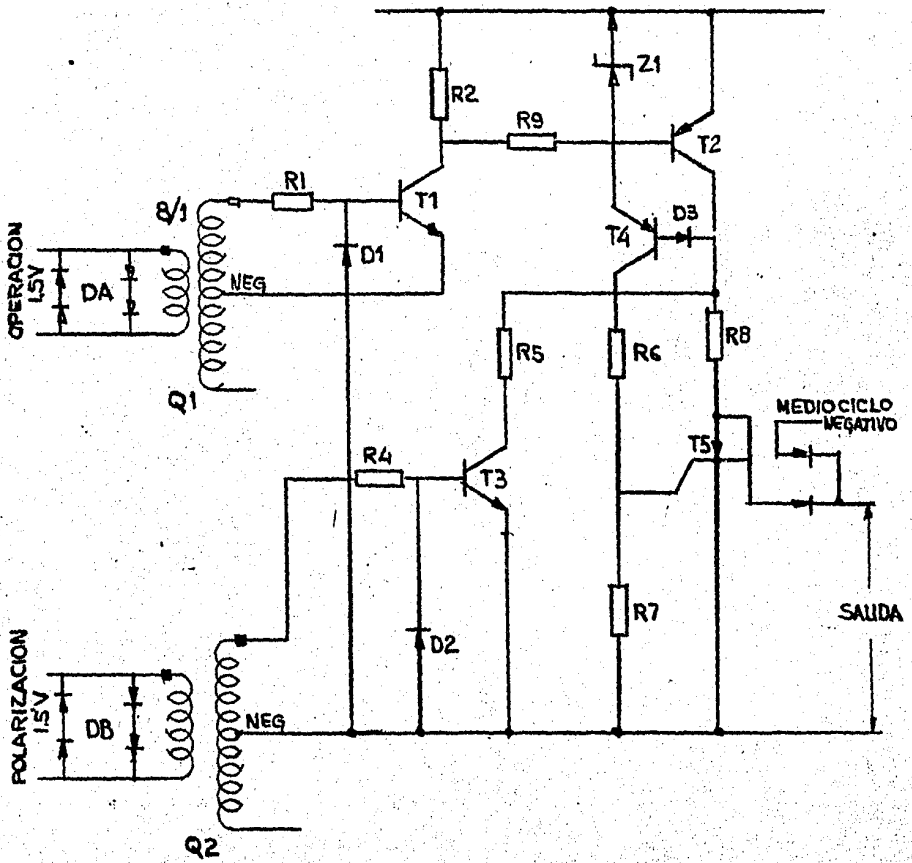


Fig. 5 - 12

que una vez que T3 ha sido polarizado su recuperación esta determinada por la corriente ánodo-cátodo. R8 proporciona la sujeción de la fuente de 20 volts que mantiene a T3 en estado de conducción hasta que la cantidad de operación es practicamente cero.

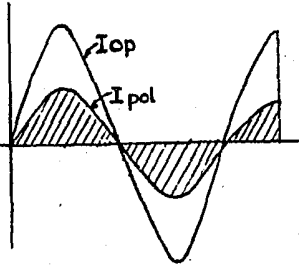
En suma, si la cantidad de operación adelanta a la de polarización por 0 a  $180^\circ$ , el circuito produce una salida estable de 20 volts de CD, si la cantidad de operación atrasa a la de polarización por 0 a  $180^\circ$ , el circuito no produce salida.

### Elemento "Block-Block" como unidad direccional.

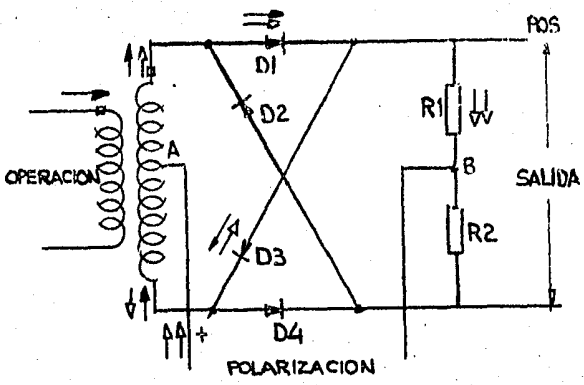
El comparador del ángulo de fase utilizado como una unidad direccional de estado sólido se muestra en la figura 5-15. La operación del rectificador puente será discutida por medio de las figuras 5-13 y 5-14. Discutiremos cinco de las posibilidades: dos en fase, dos fuera de fase y una en el punto de balance.

El circuito producirá una salida cuando la unidad de operación y polarización estén en fase. En fase significa que la cantidad operadora atrasa o adelanta a la cantidad polarizadora por  $90^\circ$  o menos, y consecuentemente las cantidades están fuera de fase cuando la cantidad operadora atrasa o adelanta a la polarizante por más de  $90^\circ$  y el circuito no produce salida.

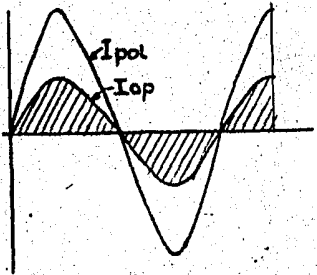
Viendo las condiciones de operación, figura 5-13



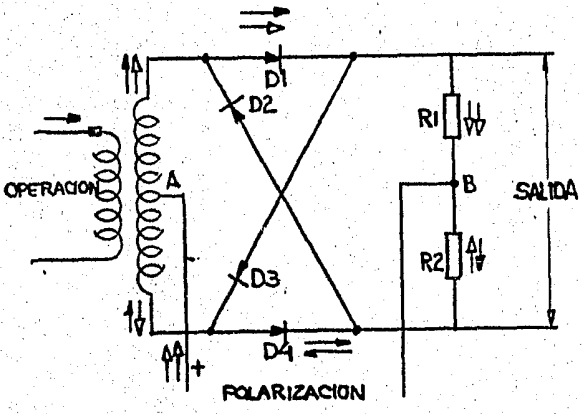
RELACIONES EN FASE  
 $I_{op} > I_{pol}$



(a)



RELACIONES EN FASES  
 $I_{pol} > I_{op}$



(b)

Fig. 5 - 13

la tensión a través de las resistencias R1 y R2, es tal que la terminal superior es positiva. Una condición de No operación aparece cuando la tensión a través de la salida es tal que la terminal inferior es positiva. La primera condición en la figura 5-13, muestra que la corriente de operación en el puente es mayor que la corriente de polarización. Asumamos que la corriente de operación está en fase con la de polarización, por el signo de las relaciones de onda. La naturaleza del puente es tal, que si dos rectificadores son

polarizados en forma directa en la dirección de conducción por la mayor de las dos corrientes, la salida está determinada por la menor de las corrientes. Observando la corriente de operación durante el medio ciclo positivo, la corriente fluye según la polaridad del primario y sale por polaridad en el secundario. Esta corriente entonces, fluirá a través de D1 y no será capaz de retornar a través de R1 y R2 porque D4 bloquea esta dirección. Por eso la corriente fluye a través de D1 y D3 y regresa al lado negativo o de no polaridad del transformador. Las dos unidades de la corriente de polarización saldrán de la terminal marcada con polaridad, y regresarán una a través de la sección superior del transformador y la otra a través de la sección inferior del mismo. La discusión completa se basa en el principio de superposición y por eso consideramos que los valores individuales de las corrientes de operación y polarización están circulando. La corriente actual en una rama será igual a la suma de los dos valores instantáneos de las corrientes. Esto significa que un diodo llevará una corriente igual a  $I_1 + I_2$ . Observando la corriente de polarización que fluye hacia la parte superior del transformador, pasa a través de D1, R1 y regresa a la terminal de no polaridad. La corriente de polarización que va a través de la parte inferior circula a través de D3 y R1, regresando a la terminal de polaridad opuesta. La corriente en D3 es la corriente de operación que es la mayor, menos la corriente de polarización dando una corriente neta a través de D3, lo cual está de acuerdo con la operación del diodo y la salida es la corriente de polarización. Las dos -



unidades que fluyen a través de R1 dan una salida de  $2I_p R_1$ , siendo la cantidad de operación mayor, ésta establece nuevamente sobre los diodos D1 y D3, los cuales controlan el flujo de corriente en el puente, un cambio en la polaridad de la entrada de polarización. Vemos que una unidad de corriente de polarización fluiría a través de R1, pasando por D1 en su dirección inversa a la parte superior del transformador y regresando a la otra terminal. La otra unidad fluiría hacia arriba a través de R1, bajando por D3 y subiendo por la parte inferior del transformador para regresar a la terminal. Esto nos da un flujo de corriente del punto B a la salida positiva, o sea que el valor de salida es  $-2I_p R_1$ , dando una salida negativa o una condición de no operación.

Veamos la condición de que la cantidad operante sea más pequeña, entonces los diodos en el puente sean polarizados en forma directa. Las cantidades polarizantes durante una condición en fase vienen en polaridad, las corrientes circulan, una a través del diodo de uno bajando por R1 y regresando a la terminal de entrada. La otra cantidad fluye hacia abajo a través de Q1 y D4 y subiendo hacia R2, regresa a la terminal.

La tensión de salida debida al flujo de la cantidad polarizante es de más a menos en R1 y de menos a más en R2. Puesto que las corrientes y las resistencias son iguales, la tensión neta a través de la salida es cero. En este caso D1 y D4 son polarizados en forma directa. Aplicando una entrada de operación en fase, se causa una señal de corriente en polaridad sobre el prima-

río y fuera de polaridad sobre el secundario, -  
 fluyendo alrededor del puente a través de D1, -  
 R1, R2 y D4, la salida se debe nuevamente a la  
 cantidad más pequeña de corriente (de operación)  
 y es ahora  $I_o \times R1 + I_o \times R2$ . Y como R1 es  
 igual a R2, la salida es más  $2I_oR1$ .

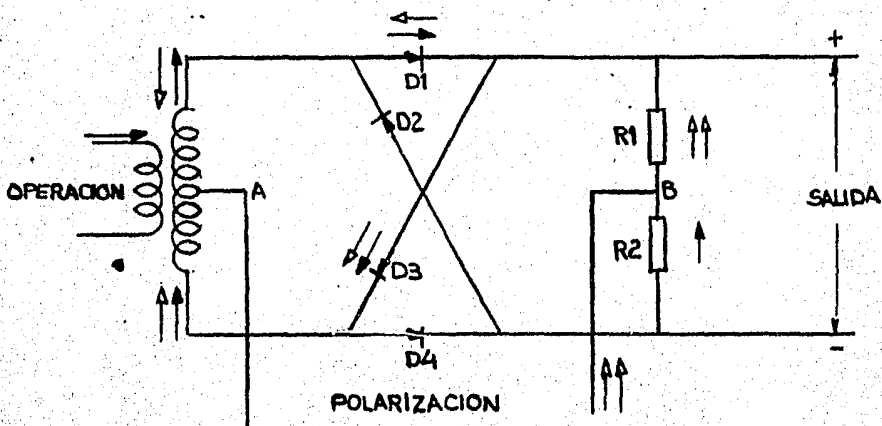
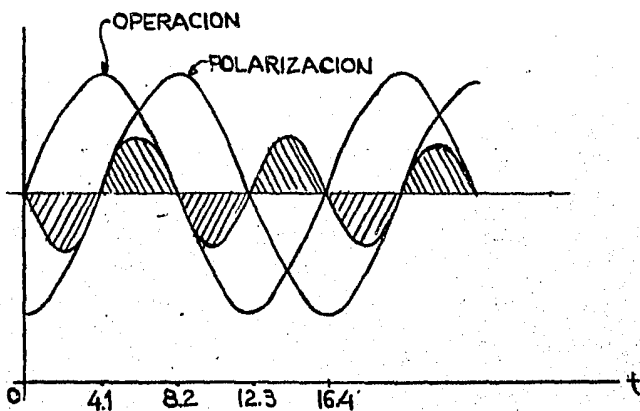


Fig. 5 - 14

Ahora tomemos la condición del punto de balance.  
 Supongamos una cantidad de operación que es me-  
 nor a la de polarización, adelantando la prime-  
 ra a la otra por  $90^\circ$ . En la figura 5-14, obser

o solamente el puente rectificador y partien en un tiempo igual a cero, vemos que se tiene condición de fuera de fase, la condición de ración es positiva mientras que la de polari- ión es negativa. La mayor cantidad de polari ión establece una polarización directa a D2 y

La cantidad de salida será el valor de la ración saliendo de la polaridad de Q1 por D2, y R1, regresando por D3 a la terminal infe--- or de Q1. Esto nos da una salida negativa. - ta condición permanece hasta que la corriente operación es mayor que la de polarización. - el punto A la cantidad de operación determina ales diodos están polarizados directamente. urante el medio ciclo positivo de la operación, os diodos D1 y D3 serán polarizados en forma di acta. La cantidad polarizante se mantiene - egativa y la polarización fluirá a través de - 1, una parte a través de D1 y la mitad superior le Q1 y la otra parte a través de D3 y la mitad inferior de Q1. La cantidad de salida continua rá decreciendo hasta que la de polarización in-- vierta la fase y se ponga en fase con la de ope- ración. En este punto la salida invierte la fa- se y se convierte de más a menos. La salida per manece determinada por la cantidad polarizante, la cual fluye ahora, una parte hacia arriba a - través del devanado superior de Q1 y pasando a través del diodo D1 y la R1, y la otra parte a través de la sección inferior Q1, pasando por D3 y R1, dando la salida positiva  $2I_p R1$ . Esto con-- tinúa hasta que la cantidad polarizante se hace mayor, punto B, en él un sistema de diodos dife rentes son polarizados en forma directa. Enton ces la salida para esta condición en fase es -

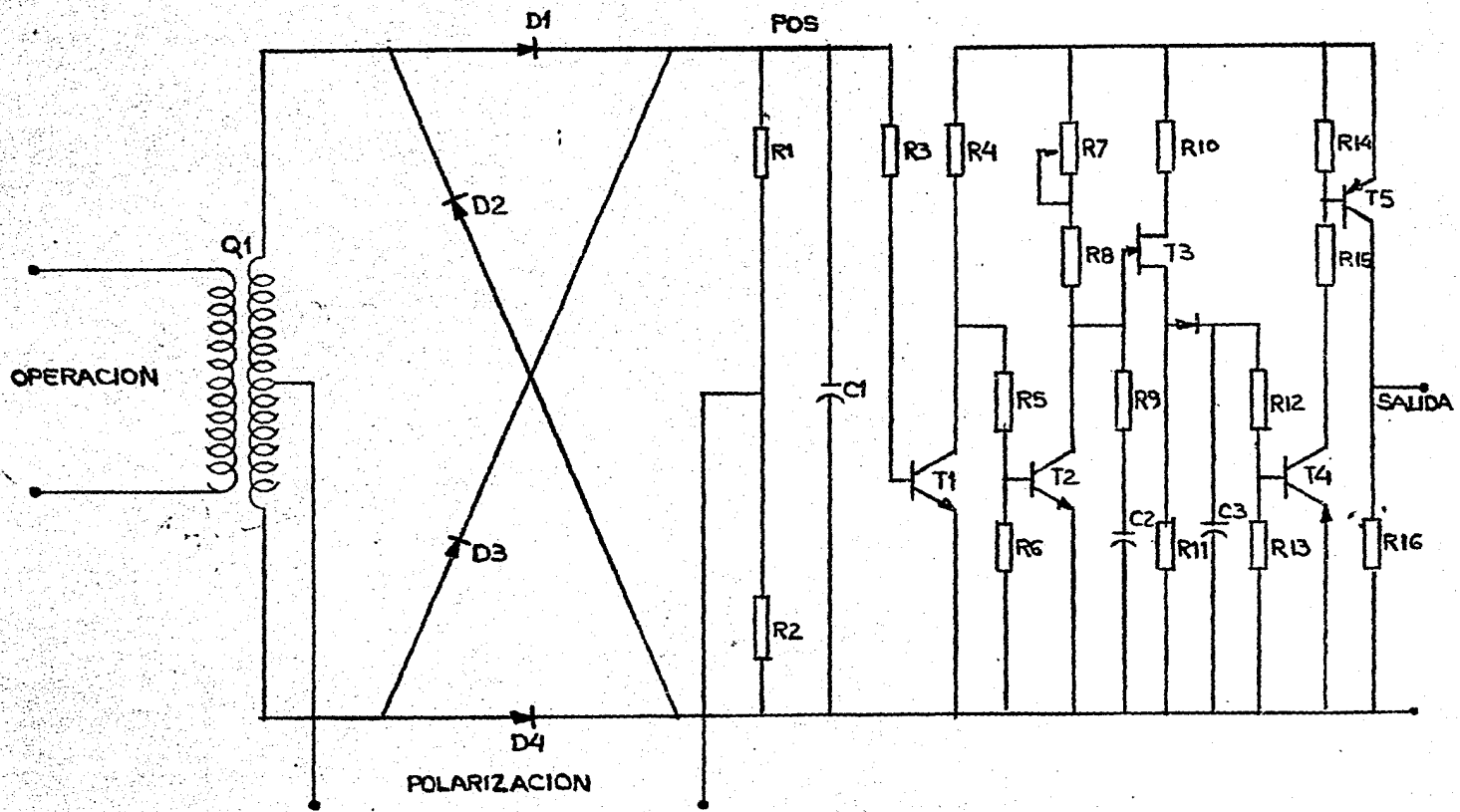
$I_0 (R_1 + R_2)$ , o una salida positiva  $2I_0R_1$ .

Una evaluación continuada muestra que para los  $-90^\circ$  o condición de balance, tendremos 4.17 milisegundos de salida positiva y 4.17 de salida negativa. La discriminación de en fase o fuera de fase se obtiene utilizando un circuito de tiempo, asumiendo que la terminal superior es positiva por 4.17 más, entonces T1 operará, no operando T2 hasta que el circuito de tiempo (R7, R8, R9, C2 y T2, figura 5-15) lo permita. Este se ajusta a 4.17, T3 conduce cargando a C3, operando sobre T4, el cual hace operar a T5, produciendo una salida.

El tiempo de descarga de C3 a través de la R12 y la unión base emisor de T4 se establece para mantenerlo operando por un tiempo mayor de 8.5 milisegundos. El tiempo de operación de T4 permite que el puente sea negativo por 4.17 y después positivo por otros 4.17, tiempo necesario para la recarga de C3. Por eso, en tanto la salida del puente permanezca por 4.17 más, obtendremos una salida continua del circuito.

En la figura 5-14, vemos que si la operación se desplaza hacia la derecha, adelanta por menos de  $90^\circ$  a la porción superior positiva de la salida, la cual es mayor que 4.17 milisegundos. Si esta se mueve hacia la izquierda adelantando a la polarización por más de  $90^\circ$ , la porción superior positiva de la salida será menor que 4.17 y el circuito de tiempo no operará.

Fig. 5 - 15



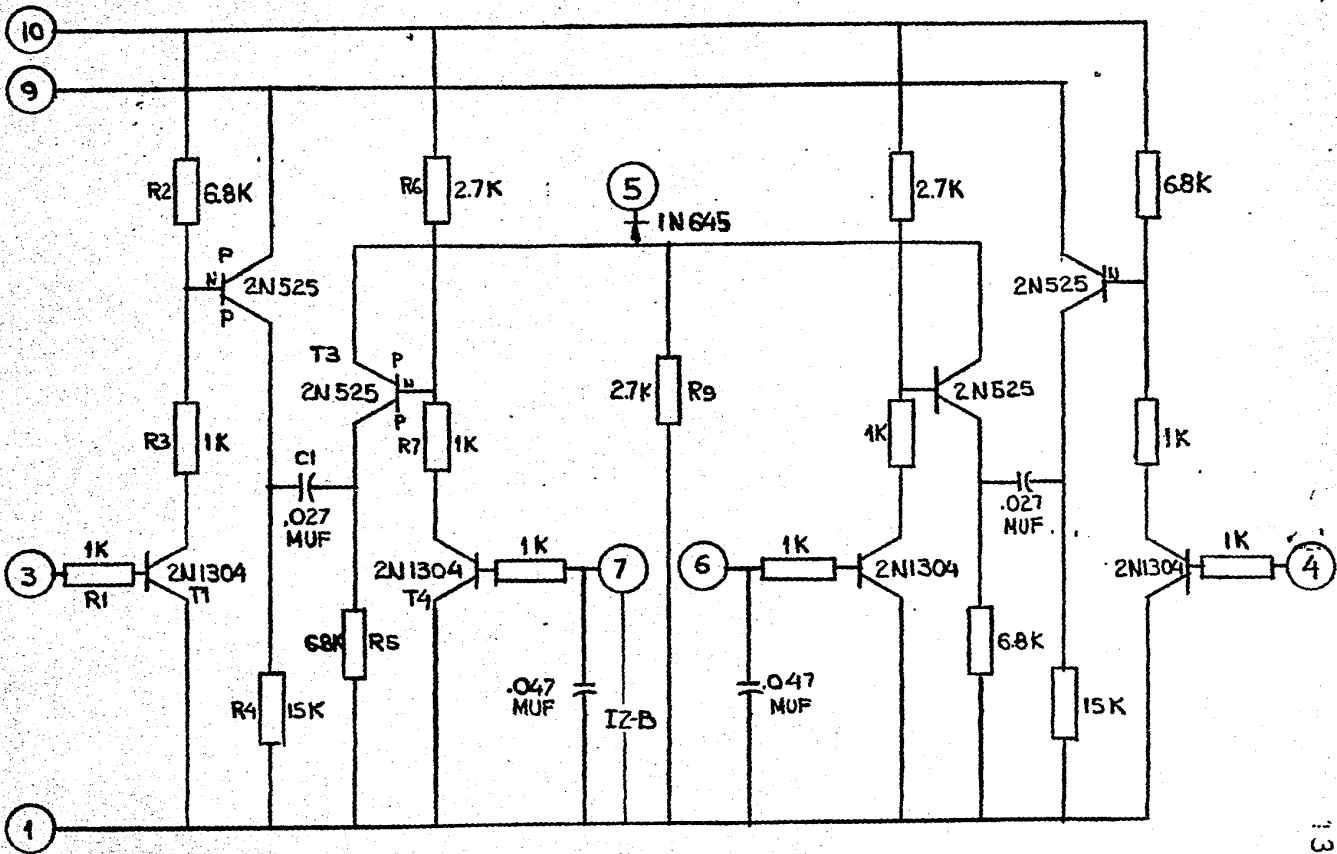
### Circuito MB (Block - Spike).

En el circuito MB que se muestra en la figura 5-16, se aplica a las terminales de entrada una señal de operación y una de polarización. Estas se introducen por las terminales 3 y 7 respectivamente. Para que haya una señal de salida en 5, el defasamiento existente entre las señales de operación y polarización deberá ser menor de  $90^\circ$ , ya que el Spike tiene características que se pueden considerar como instantáneas.

Si la señal en 3 adelanta la señal de polarización en 7 por menos de  $90^\circ$ , la operación del circuito será como sigue: T1 recibe una polarización positiva en la unión base emisor, con lo cual habrá una corriente emisor colector desde la fuente de corriente directa y a través de R2, R3 y T1, esta corriente produce una caída a través de R2, polarizando en forma directa la unión base emisor del transistor T2, por lo que habrá una corriente a través de T2 y R4. Esta corriente cargará al capacitor C1. Si el transistor T4 es polarizado por la señal en 7, habrá un flujo de corriente por R6, R7 y T4; si la caída en R6 es tal que la polarización base emisor del transistor T3 es negativa (polarización directa), T3 conduce y C1 se descarga a través de R9, lo cual producirá una salida por la terminal 5.

Cuando la señal de polarización en 7 atrasa por más de  $90^\circ$  a la señal en 3, T4 y T3 no serán polarizados y C1 descargará a través de R5, con lo cual no habrá señal en la salida.

Fig. 5-16



Durante los semiciclos negativos se utiliza la otra sección del circuito, el comportamiento es igual a la de la anterior. La direccionalidad de este elemento se obtiene en forma análoga a la del elemento MT.

Las características del elemento MB, se utilizan en esquemas de protección en oscilaciones, como se mostrará más adelante.

### Relevadores transistorizados (MITSUBISHI).

Principios de operación. Todas las características de operación de este relevador, excepto la de la polaridad final del mismo, se obtienen a través de la coordinación de la combinación de la característica 1 y la 2, mostradas en la figura 5-17. El relevador opera solamente para fallas que ocurran en el área comprendida entre las dos características. La operación en el circuito "and" es detenida por los pulsos de salida durante el período en que las tensiones  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  sean todas positivas o negativas. Dichos pulsos impedirán también la operación, si la mitad de las ondas de  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  son positivas o negativas.

Ecuaciones fasoriales. Mediante 3 transformadores se producen tensiones en fase y en cuadratura con la corriente, así como proporcionales a las tensiones de entrada cuya finalidad es la de alimentar el circuito del relevador.



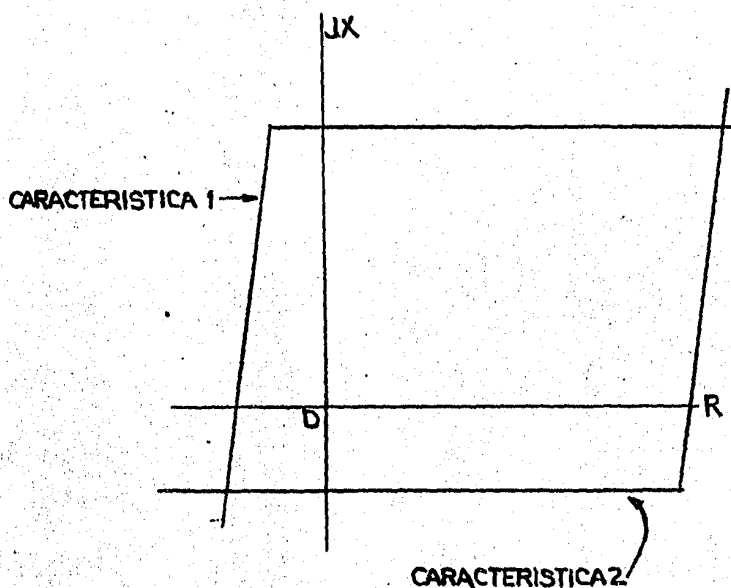


Fig. 5 - 17

Esta alimentación se lleva a cabo mediante la combinación de dichas tensiones, según lo expresan las siguientes ecuaciones:

$$V_1 = (R_1 - j \omega L) I$$

$$V_2 = -jX_1 I$$

$$V_3 = -K_1 E + (-R_2 + jX_2) I$$

$$V_4 = K_2 E - (R_2 - jX_2) I$$

$$I = I_A - I_B$$

Para obtener la característica cuadrada, se utiliza la parte del elemento de reactivancia, a fin de efectuar la discriminación de manera tal que la tensión  $V_3$  esté sobre la línea oblicua mostrada en la figura 5-18a y simultáneamente  $V_4$  también quede sobre la línea oblicua mostrada en la figura 5-18b.

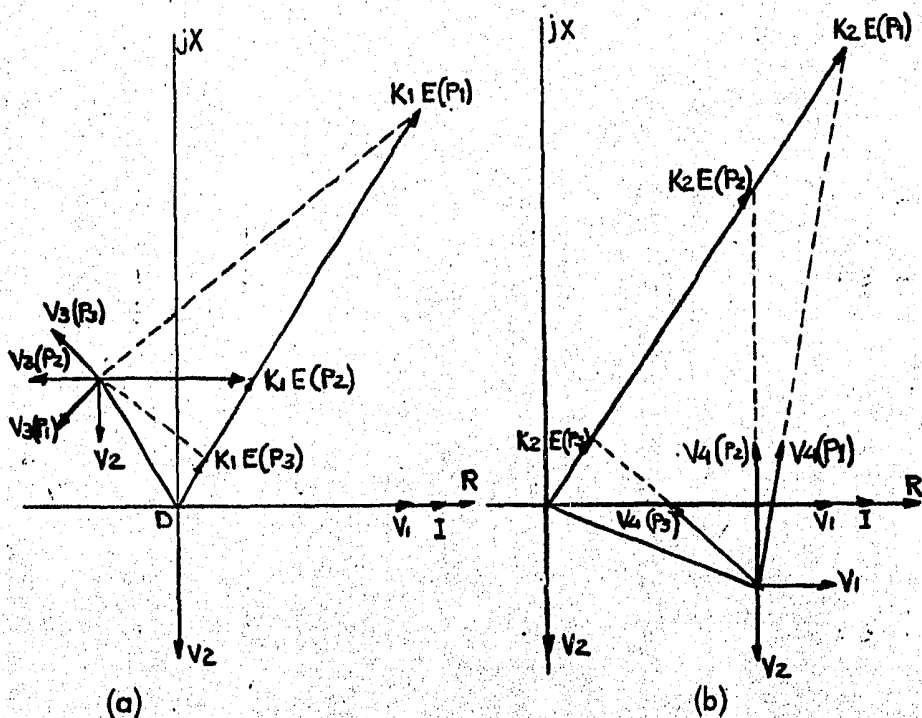


Fig. 5 - 18

Cuando el punto de falla P1 en el que V3 queda fuera de la línea oblicua con tensión secundaria K1E y el punto de falla P3 en el cual la tensión V3 queda en la misma línea, (diferencia entre las dos), se explica por las ondas de tensión de V1 y V3, mostradas en las figuras 5-19 y 5-20.

Operación fasorial del elemento de reactancia.

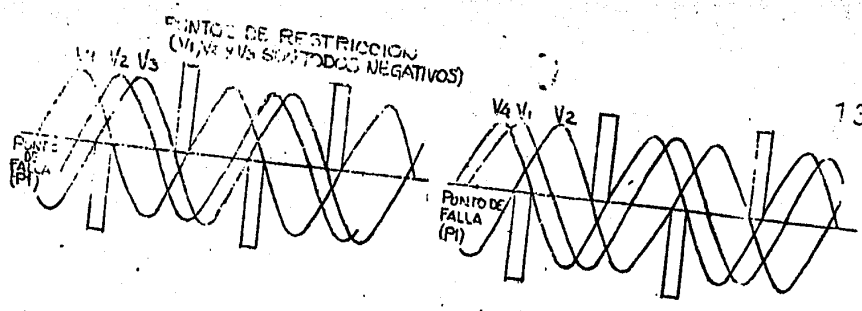
Durante una falla externa (punto P<sub>1</sub>), entre las tensiones V1, V2 y V3, uno de los ángulos de fase relativos al fasor adyacente excede a 180°, por ejemplo: entre V1 y V3.

Cuando las ondas sean como las indicadas en la figura 5-19a, existen períodos en que las tensiones V1, V2 y V3 son positivas o negativas, en tales períodos se generan pulsos tanto positivos como negativos en forma de medias ondas rectangulares.

En el caso de falla interna (punto P3), entre los fasores V1, V2 y V3 no hay ángulo de fase adyacente que exceda 180°. Como lo muestran las ondas de la figura 5-19c, no hay período en que las 3 tensiones sean todas positivas o negativas.

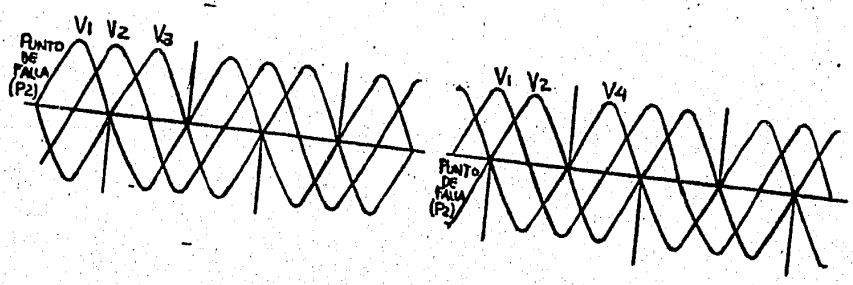
Para el punto de falla P<sub>1</sub>, la operación es determinada a través de los pulsos producidos en el circuito "and" mostrado en las figuras 5-21, 5-22 y 5-23.

En caso de falla en P3, los pulsos de salida son



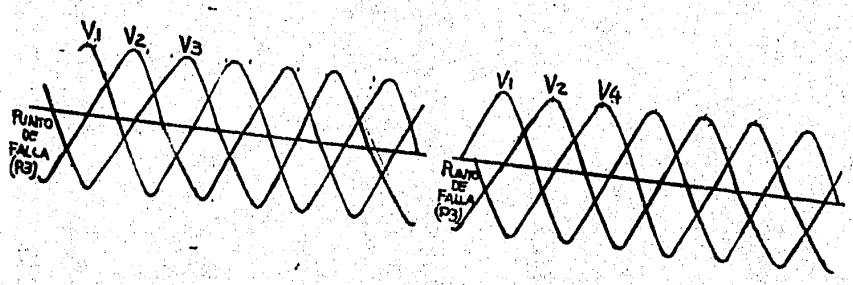
(a)

(a)



(b)

(b)



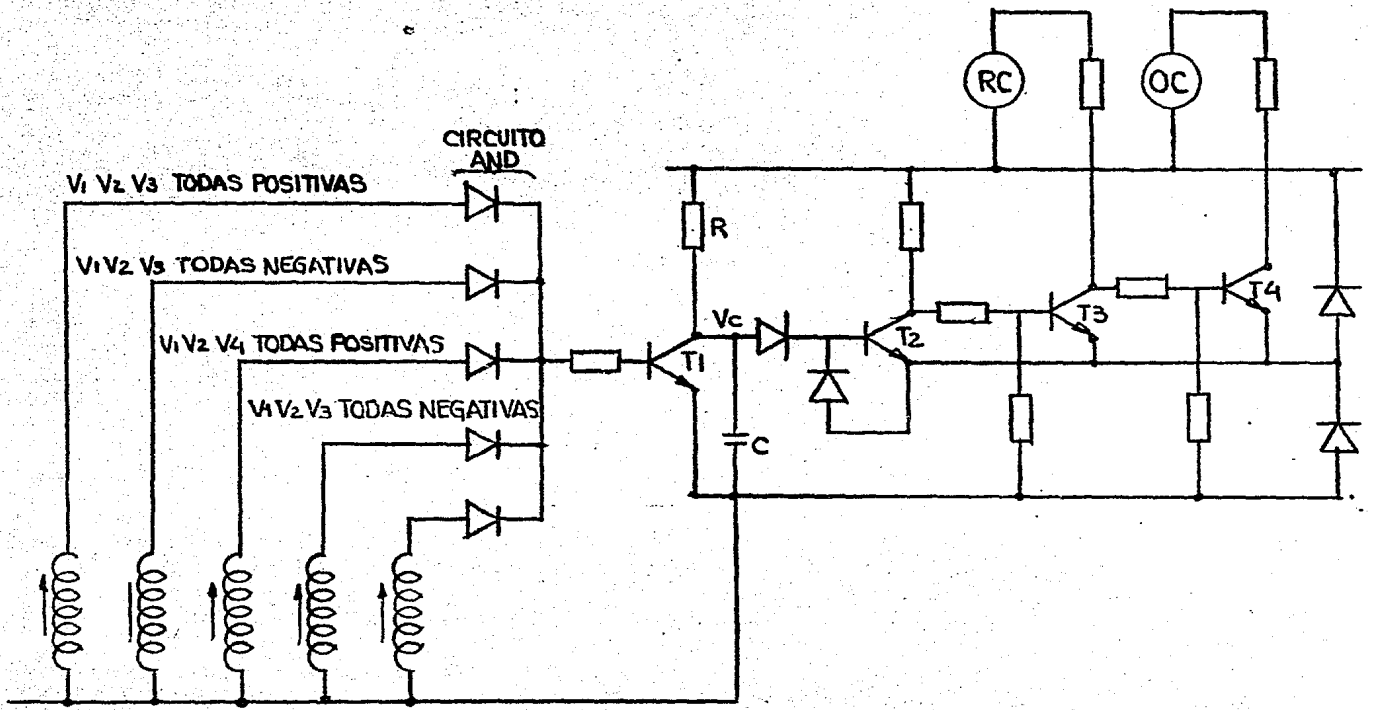
(c)

(c)

Fig. 5 - 19

Fig. 5 - 20

Fig. 5 - 21



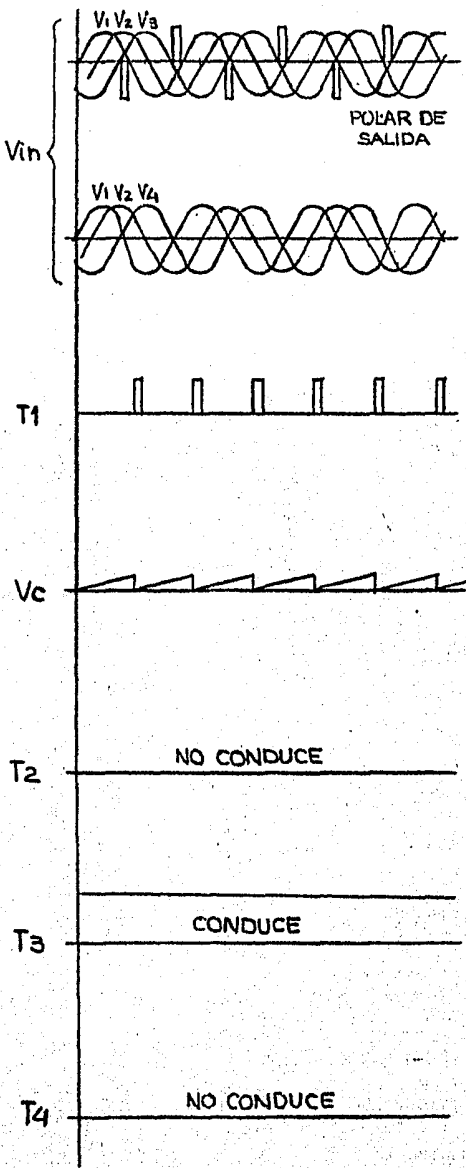


Fig 5-22

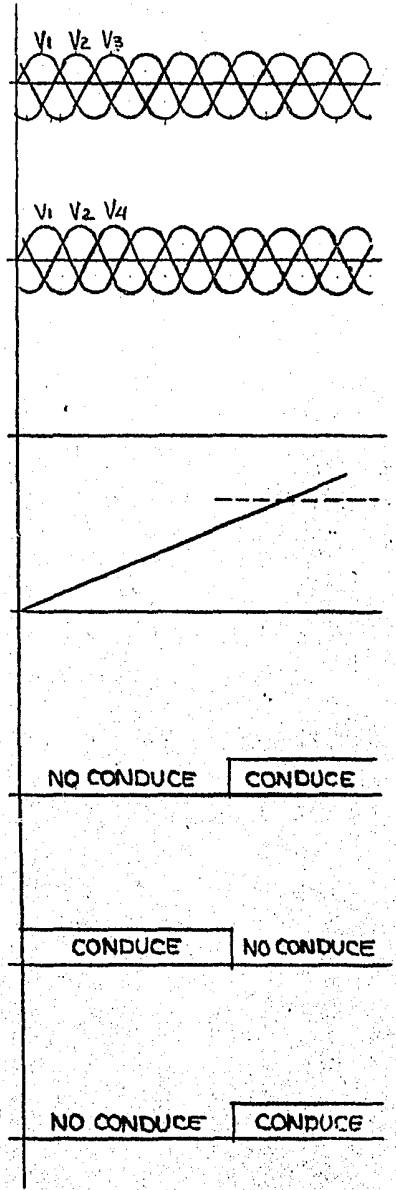


Fig 5-23

también suprimidos y se efectúa la operación, - ya que la sucesión de medias ondas positivas y negativas de tensión es continua.

Si el punto de falla externa  $P_1$  se transporta al punto de falla interna  $P_3$ , el ángulo de fase de la tensión  $V_3$  se atrasa con respecto  $V_1$  y  $V_2$  (se desplaza a la derecha figura 5-18a), de modo que aumenta su magnitud reduciendo así los períodos en que se producen los pulsos de salida, hasta finalmente anularlos, dando lugar a que el relevador de protección opere por falla interna. La figura 5-19b muestra el punto de equilibrio en la operación del relevador.

De manera similar se efectúa una discriminación mediante  $V_1$  y  $V_4$ . En ambos casos el circuito discriminador se alimenta con los pulsos del circuito R-C de la figura 5-21. El elemento final de discriminación opera solamente cuando los pulsos no son producidos simultáneamente por los circuitos "and" y R-C.

#### Análisis del circuito.

En el circuito de la figura 5-21, los transistores  $T_1$  y  $T_3$  conducen, y  $T_2$  y  $T_4$  no conducen cuando la tensión en la entrada relativa de  $V_1$  a  $V_4$  es cero y circula una corriente de menor valor que la requerida para operar. En este caso la corriente energizante fluye solamente en la bobina de restricción (R-C) del elemento final de discriminación y no en la bobina de operación (O-C).

Durante una falla externa (P1), el transistor T1 no conduce dos veces cada ciclo, y T2 no lo hace permanentemente. En estas condiciones T3 conduce en forma continua y T4 no conduce.

Puesto que la constante de tiempo del circuito R-C tiene un valor apropiado, la interrupción se produce tanto durante el período positivo como el negativo de V1, V2 y V3 y V1, V2 y V4, antes de que T2 pueda conducir. Entonces el elemento final de discriminación no alcanza a operar.

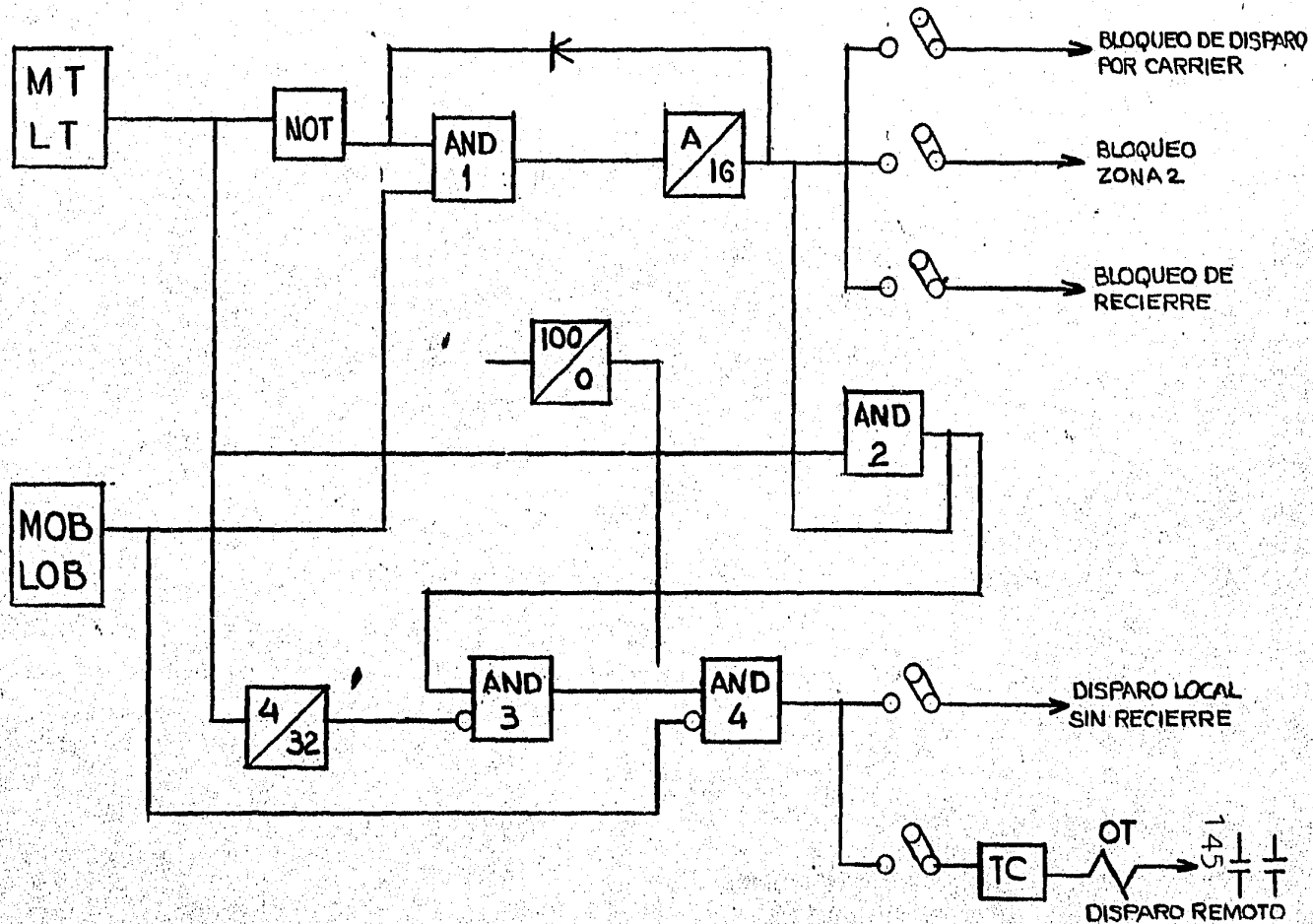
En el caso de falla interna (P3), T1 y T3 no conducen y T2 y T4 conducen. La corriente que fluye en el elemento final de discriminación O-C causa operación. El pulso de tensión, el cual está en corto circuito con el capacitor C, se produce solamente cuando las puntas de los fasores K1E y K2E se localizan fuera del ajuste cuadrangular.

Conforme a lo anterior, es suficiente si la constante de tiempo del circuito R-C, está ajustada a un tiempo más pequeño que el de duración de medio ciclo a la frecuencia del sistema.

A fin de dar un margen de seguridad, el ajuste se hace a 1.5 ciclos (30 mseg. a 50 cps) y la operación se efectúa a una velocidad constante de 35 mseg. más el tiempo de respuesta del elemento final de discriminación que es aproximadamente 5 mseg.



Fig. 5 - 24c



Como ya se describió este tipo de relevador no -  
está energizado mientras las pulsaciones son pro  
ducidas, y es activado solamente cuando una con-  
dición anormal ocurre, es decir aquella en la que  
el pulso de entrada no existe por un período de  
tiempo específico. Por lo tanto, no existe la  
posibilidad de operación indebida causada por -  
tensiones externas o pulsos de entrada.

APENDICE 4.-Relevadores de estado sólido para bloqueo y disparo en oscilaciones.

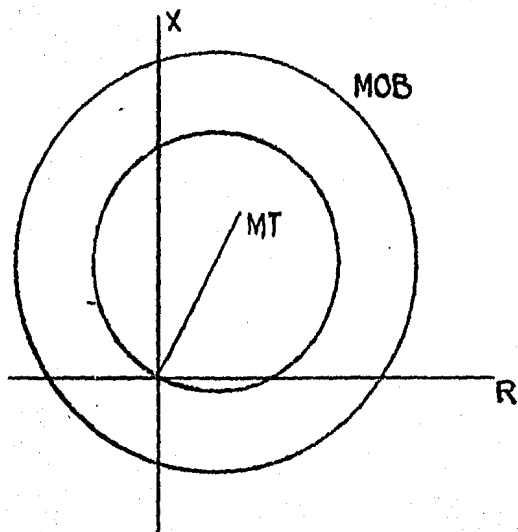
Los relevadores de estado sólido y circuitos lógicos, proporcionan un medio para obtener características de operación adecuadas y una gran flexibilidad en la función de protección durante oscilaciones.

Con los equipos de protección de estado sólido, es posible reunir las siguientes operaciones:

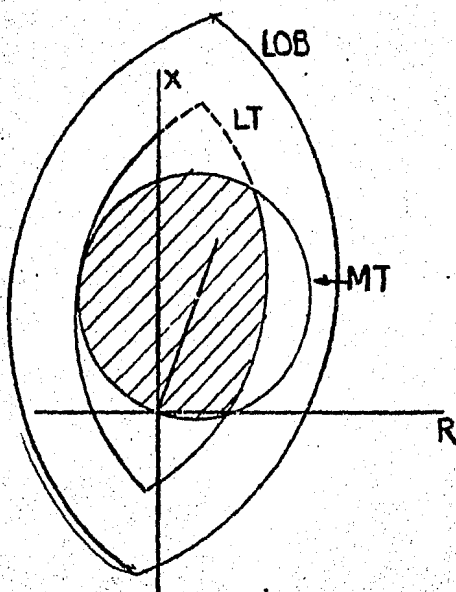
- 1.- Bloqueo de disparo o recierre automático en oscilaciones.
- 2.- Disparo para oscilaciones inestables.

Las características del relevador y los circuitos lógicos para un esquema se muestran en la figura 5-24. Las figuras 5-24a y 5-24b, muestran las características del relevador para la protección en oscilaciones. La figura 5-24b muestra las características lenticulares que son utilizadas donde el área de operación está restringida; una unidad lenticular suple a la unidad MHO (NT), quedando el disparo restringido al área sombreada. La función para detectar una oscilación se obtiene con otra unidad lenticular (LOB) más grande y concéntrica con la LT.

En estos sistemas, la función de bloqueo en oscilaciones se obtiene de manera similar a la de



(a)



(b)

Fig. 5 - 24

los sistemas electromecánicos, dicho bloqueo es ordenado cuando se excede en unos cuantos ciclos el paso de la impedancia aparente de MOB a NT ó de LOB a LT. Este paso aparece en la mitad superior del diagrama 7-1c. Los relevadores de bloqueo operan como sigue:

Cuando aparece una señal en MOB ó LOB y no en NT ó LT, AND 1, producirá una entrada en el circuito de tiempo A/16. "A" milésimos de segundo más tarde, el circuito de tiempo produce una señal que será usada para bloquear el disparo de las zonas 1 ó 2. Dicho circuito se ajusta entre 2 y 4 ciclos (32 a 64 milisegundos).

Esta función del relevador de bloqueo está complementada con un disparo si éste se desea en algún punto del sistema. El circuito lógico para esta función se muestra en la figura 5-24c. El esquema inicia el disparo cuando una oscilación entra a las características de operación del relevador (NT ó LT) y algún tiempo más tarde sale sobre cualquier lado de las características de MOB ó LOB. La secuencia lógica mostrada en la figura 5-24c, reconoce esta oscilación e inicia el disparo cuando la secuencia de los eventos ocurre como sigue:

1.- NT opera más de "A" milisegundos después de MOB ó LOB.

2.- MOB ó LOB deja de operar un ciclo o más después que NT ó LT deja de operar.

Esta secuencia establece que hay un cambio pro--

gresivo en la impedancia vista por los relevados y no un cambio instantáneo como ocurriría durante una falla. La salida de disparo en una oscilación (de AND 4) puede utilizarse para disparo de un interruptor local y bloqueo de recierre, o para permitir bloqueo local e iniciar el disparo de un interruptor lejano por la transferencia de una señal.