



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESQUEMAS DE PROTECCION ELECTRICA UTILIZADOS EN  
LINEAS DE TRANSMISION DE EXTRA ALTO VOLTAJE.

T E S I S

Que para obtener el Título de  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
( Area Eléctrica y Electrónica )

LUIS GUILLERMO ALMONTES ESTRADA  
LEOPOLDO AGUADO HERRERA



Director de Tesis:

ING. FRANCISCO LOPEZ RIVAS

México, D. F.

1 9 9 3

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

## INDICE

I.-INTRODUCCION	1
II.- ESQUEMAS DE PROTECCION ELECTROMECHANICOS	3
1.- PRINCIPIOS DE OPERACION	3
2.- ESQUEMAS DE DISTANCIA GENERAL ELECTRIC	15
3.- ESQUEMAS DE DISTANCIA WESTINGHOUSE	33
4.- CRITERIOS DE AJUSTE	51
A.- RANGOS	
B.- ZONAS DE PROTECCION	
5.- OSCILACIONES DE POTENCIA	58
III.- ESQUEMAS DE PROTECCION ESTATICOS	61
1.- ESQUEMAS GENERAL ELECTRIC TIPO SLDY	61
A.- DESCRIPCION	
B.- PRINCIPIOS DE MEDICION	
C.- OPERACION	
D.- CRITERIOS DE AJUSTE	
2.- ESQUEMAS GENERAL ELECTRIC TIPO SLYP-SLCN	87
A.- DESCRIPCION	
B.- PRINCIPIOS DE MEDICION	
C.- OPERACION	
D.- CRITERIOS DE AJUSTE	
IV.- CALCULO DE AJUSTES	114
1.- ESQUEMAS ELECTROMECHANICOS	114
A.- GENERAL ELECTRIC	
B.- WESTINGHOUSE	
2.- ESQUEMAS ESTATICOS	121
A.- SLDY	
B.- SLYP-SLCN	
V.- COMPARACION ENTRE LOS ESQUEMAS Y CONCLUSIONES	129
APENDICE	

## INTRODUCCION

La construcción de grandes centrales generadoras y la explotación de fuentes de energía lejanas a los centros de consumo, ha dado como resultado tener que transmitir enormes cantidades de energía eléctrica a grandes distancias. Por consiguiente uno de los principales puntos en la planeación de un sistema de transmisión es encontrar soluciones técnicas y económicamente aceptables para asegurar la continuidad en el abastecimiento requerido.

Un sistema como el que nos ocupa, básicamente consiste de líneas de transmisión que interconectan los centros de generación con los de consumo pasando por distintas estaciones. Estas líneas tienen que atravesar físicamente por diversas regiones, quedando expuestas a condiciones climatológicas, ambientales y geográficas tales como: *descargas atmosféricas, humedad, lluvias, contaminación, maleza, quema de caña, bandallismo, etc.*

Los fenómenos anteriores pueden provocar anomalías en el sistema que en mayor o menor grado afectan la continuidad en el suministro deseado.

El grado de afectación, dependerá de la habilidad para poder desconectar y aislar del resto del sistema la línea sujeta a una contingencia. Para esto son utilizados equipos de protección adecuados que actúan sobre interruptores que hacen dicha desconexión. Es objeto del presente estudio describir y analizar lo referente a las protecciones.

Tomaremos como base para el desarrollo del presente trabajo las instalaciones de la *Región de Transmisión Sureste de la Comisión Federal de Electricidad*, debido a la gran importancia que tienen estas instalaciones dentro del *Sistema Interconectado Nacional*.

Antes de entrar de lleno al estudio de las protecciones eléctricas, definiremos algunos conceptos fundamentales que son comunes a cualquier tipo de protección.

Todo esquema de protección debe reunir las siguientes características:

- a) **Velocidad**
- b) **Sensibilidad**
- c) **Selectividad**
- d) **Confiablez**

**Velocidad.** - La desconexión rápida de los elementos fallados es esencial principalmente por dos razones: Siendo la estabilidad del sistema un factor de suma importancia, los esquemas de protección rápidos junto con interruptores modernos, darán mayores márgenes de estabilidad.

La otra razón es que la desconexión rápida de un elemento fallado, minimiza el daño al equipo reduciendo el tiempo necesario para su reparación.

**Sensibilidad.-** Es la habilidad de los relevadores y esquemas de protección para detectar todas las fallas dentro de los límites y las condiciones de falla esperadas en el sistema a proteger.

**Selectividad.-** Es la habilidad de los relevadores y esquemas de protección para discriminar entre las fallas externas, u otras condiciones anormales del sistema. Esta característica es importante, ya que los esquemas que no son selectivos pueden causar disparos innecesarios de los elementos del sistema, reduciendo así la confiabilidad general del mismo.

**Confiabilidad.-** Es una medida del grado de certeza de que el relevador o el esquema de protección se va a comportar correctamente. En protección la confiabilidad consiste de dos elementos:

**Dependabilidad.-** Es la habilidad de un esquema de protección para operar cuando se requiere. Este es uno de los requerimientos más importantes, ya que la no operación puede causar una destrucción completa de un elemento o el colapso total del sistema de potencia.

**Seguridad.-** Es la habilidad de los esquemas de protección para nunca operar en forma incorrecta. Este factor es tan importante como la dependabilidad, ya que una operación incorrecta reduce la confiabilidad del sistema de potencia.

Para satisfacer las características anteriormente mencionadas y mantenerse dentro de la filosofía de protección moderna en los sistemas de extra alto voltaje, se recomienda que dos grupos o juegos de equipo de protección de alta velocidad sean usados para proteger un elemento del sistema de transmisión.

En nuestro sistema se cumplen estas exigencias teniendo para las líneas de transmisión una protección estática como protección primaria y una electromecánica como protección de respaldo para líneas sin compensación serie; para el caso de las líneas compensadas se tiene doble protección estática con principios de operación diferente. Aunque la política actual dentro de la Comisión Federal de Electricidad es en un futuro inmediato tener doble protección estática en todas las líneas de 400 KV con o sin compensación.

Los esquemas estáticos utilizados actualmente en el sistema descrito son del tipo SLDY-51 y SLYP-SLCN de la marca General Electric y los electromecánicos lo componen relevadores de distancia tipo GCX, GCY, GCXG de la marca General Electric y del tipo KD-10, KD-11, KD-4, KD-41 y KDXG de la marca Westinghouse.

Estos esquemas son descritos en las siguientes secciones de este trabajo.

## II.- DESCRIPCION DE LOS ESQUEMAS DE PROTECCION ELECTROMECANICOS

### 1.-PRINCIPIOS DE OPERACION.

Aunque por construcción los relevadores de disco y los de copa son muy diferentes, el principio que rige su funcionamiento es el mismo y se puede aplicar el mismo criterio de análisis con el fin de obtener la ecuación de la fuerza desarrollada.

Sean dos flujos magnéticos  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  atravesando un disco o una copa de material conductor, defasados entre sí un ángulo  $\alpha$ .

Donde:

$$\varphi_1 = \Phi_1 \text{ sen } \omega t$$

$$\varphi_2 = \Phi_2 \text{ sen } (\omega t + \alpha)$$

Como se muestra claramente en la figura 1, el flujo  $\varphi_2$  produce una circulación de corriente parasita  $i_{\varphi_2}$  en la superficie conductora, la cual a su vez induce líneas de flujo que interaccionan con las líneas del flujo  $\varphi_1$  dando como resultado que ambos flujos se sumen de un lado y se cancelen del otro produciendo una fuerza resultante  $F_1$ . La misma situación ocurre en la parte complementaria para producir la fuerza  $F_2$ ; produciendo finalmente este par de fuerzas el movimiento.

Deducción matemática de la fuerza:

De la ley de Faraday  $i = k \frac{d\varphi}{dt}$

$$i_1 = k \frac{d}{dt} [\Phi_1 \text{ sen } \omega t] = k \omega \Phi_1 \text{ cos } \omega t$$

$$i_2 = k \frac{d}{dt} [\Phi_2 \text{ sen } (\omega t + \alpha)] = k \omega \Phi_2 \text{ cos}(\omega t + \alpha)$$

Sabemos además que:

$$F_1 = k i_2 \varphi_1$$

$$F_2 = k i_1 \varphi_2$$

Sustituyendo  $i_1$  e  $i_2$

$$F_1 = k \omega \Phi_2 \text{ cos}(\omega t + \alpha) \Phi_1 \text{ sen } \omega t$$

$$F_2 = k \omega \Phi_1 \text{ cos } \omega t \Phi_2 \text{ sen } (\omega t + \alpha)$$

Haciendo el balance de las fuerzas

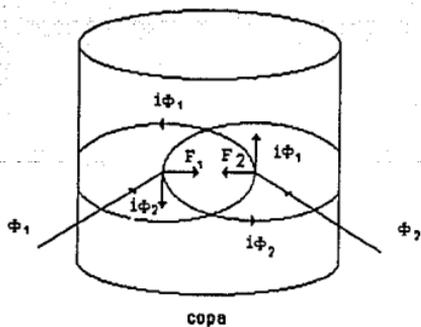
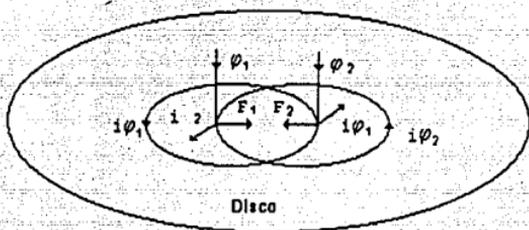


Figura 1. Unidades de inducción de disco y copa

$$F_n = F_1 - F_2$$

$$F_n = k \omega \Phi_2 \cos(\omega t + \alpha) \Phi_1 \sin \omega t - k \omega \Phi_1 \cos \omega t \Phi_2 \sin(\omega t + \alpha)$$

usando la identidad

$$\sin(A - B) = \sin A \cos B - \sin B \cos A$$

y simplificando, y haciendo  $k_1 = k \omega$  encontramos la ecuación de la fuerza neta

$$F_n = k_1 \Phi_1 \Phi_2 \sin \alpha \quad (\text{Ec. 1})$$

### Relevadores de Inducción de una Sola Entrada.

En el relevador de disco (figura 2a) hemos intercalado un anillo de sombra con el objeto de descomponer el flujo original  $\varphi$ , en dos flujos  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  defasados entre sí un ángulo  $\theta$ , como se muestra en la figura 2, los cuales son capaces de producir una fuerza dada por la expresión encontrada anteriormente.

$$F_n = k_1 \Phi_1 \Phi_2 \sin \theta$$

Pero sabemos que  $\theta$  tiene en este caso un valor fijo dado por el anillo de sombra, cuyos límites prácticos son entre  $60^\circ$  y  $90^\circ$

$$F_n = k_2 \Phi_1 \Phi_2$$

Además los flujos  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  son proporcionales a la corriente  $I$

$$\Phi_1 = k_3 I$$

$$\Phi_2 = k_4 I$$

$$F_n = k_2 (k_3 I)(k_4 I)$$

$$F_n = k_5 I^2$$

Pero

$$T = k_6 F_n$$

Por lo tanto

$$T = K I^2$$

(Ec. 2)

Es la ecuación del torque para un relevador de corriente de una sola entrada.

En el caso del relevador de copa (figura 2b) haciendo un análisis similar vemos que por los polos 1 y 2 solo pasa el flujo debido a  $I$ ; por el polo 3 pasa además del flujo producido por  $I$ , un flujo producido por el devanado flotante, el cual tiene el efecto de atrasar el flujo del polo

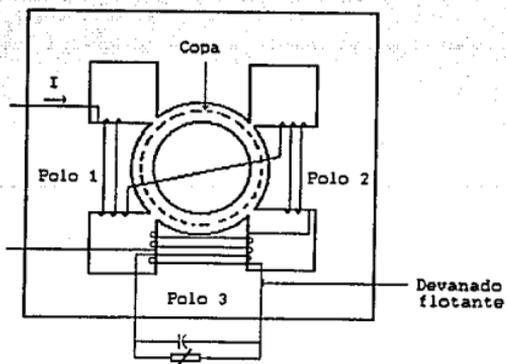
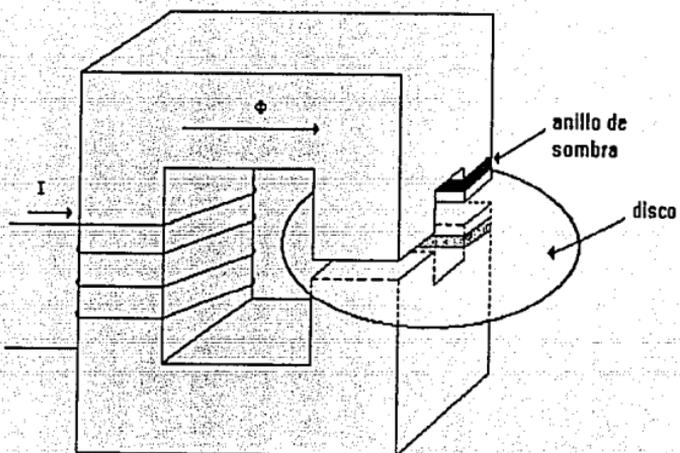


Figura 2. Principio de operación del relevador de inducción de una entrada

3 con respecto al flujo de los otros polos, produciendo un torque de operación que como hemos visto anteriormente está dado por la expresión:

$$T = K I^2$$

Ahora bien, en el caso de relevadores de una sola entrada puede ser que dicha señal sea una corriente, en cuyo caso el torque estará dado por la expresión anteriormente encontrada. En el caso que la señal de entrada sea un voltaje, éste producirá una circulación de corriente y ésta a su vez un flujo magnético, y la expresión del torque estará dada por la expresión:

$$T = K V^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

### Relevadores de Dos Entradas.

Este tipo de relevadores son llamados comunmente relevadores direccionales, ya que responden al ángulo de fase entre 2 entradas, y normalmente son del tipo de copa de inducción. Las 2 entradas al relé aunque matemáticamente son indistinguibles entre sí, por su origen se llaman:

- a) Operación: generalmente es la corriente.
- b) Polarización: Puede ser corriente o voltaje y cualquiera es usual.

En la figura 3 se muestra este tipo de elemento que es el más común, y es utilizado como parte fundamental de Relevadores Direccionales de sobrecorriente y de Distancia.

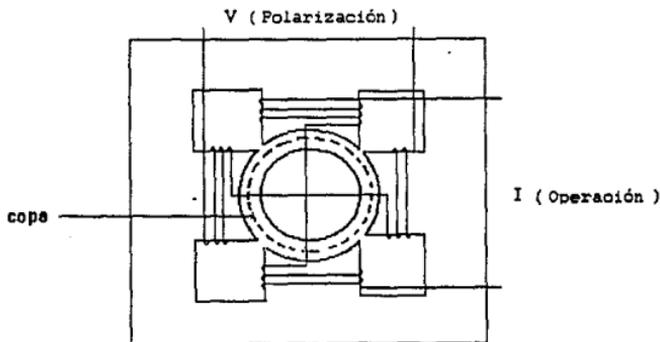


Figura 3. Principio de operación del relevador de inducción de dos entradas

Refiriéndonos a la ecuación (1), fácilmente podemos ver que la expresión del torque está dada por:

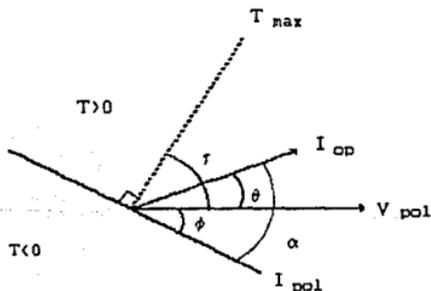
$$T = K I_{op} V_{pol} \sin \alpha \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $\alpha$  es positivo cuando  $I_{op}$  adelanta a  $V_{pol}$

De la expresión anterior se puede ver que el valor máximo se presenta cuando  $\alpha = 90^\circ$ ; por lo que podemos afirmar que la línea de par máximo (positivo) se encuentra siempre  $\frac{\pi}{2}$  adelante del voltaje de polarización.

Desafortunadamente en muchos tipo de fallas no se cumplen estas condiciones o no es conveniente alimentar a los relevadores con cantidades que cumplan estas condiciones de defasamiento entre sí, por lo que será necesario en algunos casos un circuito adicional para producir un defasamiento intencional entre las magnitudes de entrada, de tal manera que obtengamos el ángulo de par máximo que nosotros deseemos.

A continuación se ilustra el procedimiento para obtener la expresión del torque desarrollado por un elemento direccional, al cual se le ha intercalado un circuito RC con objeto de retrasar el flujo de polarización. (Ver figura 4).



Donde

$\theta$  = ángulo entre las cantidades originales de entrada al relevador

$\phi$  = defasamiento producido por el circuito RC intercalado

$r$  = ángulo entre la cantidad original de polarización y la línea de par máximo

$I_{pol}$  = corriente defasada producida por el voltaje de polarización y el circuito RC

Figura 4. Obtención del par desarrollado por un elemento direccional

De la ecuación (4) sabemos que la expresión del par está dada por:

$$T = k I_{op} I_{pol} \text{sen } \alpha$$

Pero

$$\alpha = (90 - \tau) + \theta$$

Sustituyendo

$$T = k I_{op} I_{pol} \text{sen } [90 + (\theta - \tau)]$$

Usando la identidad  $\text{Sen}(A+B) = \text{sen}A\text{cos}B + \text{sen}B\text{cos}A$  y considerando que

$$I_{pol} = kV_{pol}$$

Finalmente tenemos

$$T = k I_{op} V_{pol} \text{COS}(\theta - \tau) \quad (\text{Ec. 5})$$

Que es la ecuación del par para un relevador direccional.

#### **Ecuación General del Relevador.**

Si juntásemos todos los elementos mencionados anteriormente en uno solo, podemos obtener una ecuación generalizada que nos represente cualquier tipo de Relevador con solo cancelar términos de dicha ecuación según el caso. De tal suerte que si sumamos las expresiones (2) a la (5) tenemos:

$$T = \pm K_1 I^2 \pm K_2 V^2 \pm K_3 I V \text{sen } \theta \pm K_4 I V \text{cos}(\theta - \tau) - K_5 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$  son constantes de diseño, particularmente  $K_5$  representa la acción del resorte. Los signos pueden ser escogidos de acuerdo a nuestra conveniencia.

#### **RELEVADORES DE DISTANCIA.**

Generalmente los relevadores de distancia son del tipo de copa de inducción ya que para su aplicación se requiere que sean lo más rápidos posible, lo cual se logra disminuyendo su momento de inercia el cual es mucho menor que en los relevadores de disco para un mismo par de operación. Lo anterior se logra haciendo que la parte móvil sea una copa hueca muy ligera de material conductor, a la cual se le introduce un núcleo fijo de hierro con el objeto de reducir el entrehierro sin tener que aumentar el peso de la copa.

Existen distintos tipos de relevadores de distancia según la aplicación requerida, y su estudio será objeto de este tema.

## Relevadores de Distancia Tipo Impedancia.

En la actualidad el uso de estos relevadores ha decaído en gran manera a tal grado que se han vuelto obsoletos y solo los mencionaremos como un antecedente para los siguientes tipos.

Si en la ecuación general del relevador ( Ec. 6 ) tomamos los dos primeros términos y el último, tenemos:

$$T = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_5 \quad (\text{Ec. 7})$$

Esta ecuación corresponde a un relevador de sobrecorriente con restricción de voltaje.

Si despreciamos la acción del resorte y consideramos el punto de balance

$$K_1 I^2 - K_2 V^2 = 0$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V^2}{I^2} = Z^2$$

$$|Z| = \frac{V}{I} = \frac{K_1}{K_2} = K$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{Ec. 8})$$

Representando esto en un diagrama R-X, la ecuación anterior es el lugar geométrico de un círculo con centro en el origen que representa la característica de operación del relevador. Ver figura 5.

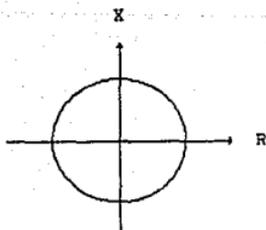


Figura 5. Característica del relevador tipo impedancia

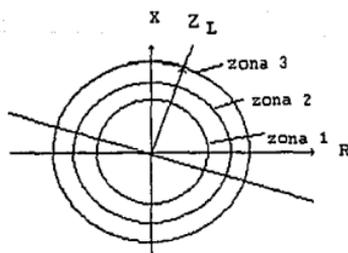


Figura 6. Característica del relevador tipo impedancia con unidad direccional

Observando la característica le encontramos varios inconvenientes para ser aplicado tal y como está, dado que cualquier falla que calga dentro del círculo causará operación del relevador, inclusive en la dirección inversa. Lo anterior se evita adicionando un elemento direccional que controle o bloquee el circuito de disparo del elemento de impedancia, lo cual equivale a limitar la característica de operación a ciertos ángulos.

Un esquema completo consta de 3 elementos con diferentes alcances protegiendo 3 zonas de operación previamente definidas. Ver figura 6.

### Relevadores de Distancia Tipo Mho o de Admitancia.

Si en la ecuación general (6) tomamos el  $2^o$ ,  $3^o$  y el último término, tenemos:

$$T = K_1 I V \cos(\theta - \tau) - K_2 V^2 - K_3 \quad (\text{Ec. 9})$$

Esta ecuación corresponde a un relevador direccional con restricción de voltaje.

En el punto de balance y haciendo  $K_3 = 0$

$$K_1 I V \cos(\theta - \tau) = K_2 V^2$$

$$\frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - \tau) = \frac{V}{I} = Z \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde

$\tau$  = ángulo de par máximo del relevador

$\theta$  = ángulo entre las cantidades de entrada al relé ( $V$  e  $I$ ).

Debido a que la característica de este relevador pasa por el origen es inherentemente direccional y tiene su alcance máximo en la dirección del ángulo de par máximo del relé, lo cual lo hace más selectivo y aplicable.

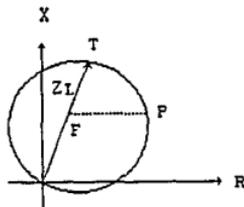


Figura 7. característica del relevador tipo mho

Refiriéndonos a la fig. 7, sea una falla en F. Evidentemente dicho punto cae dentro de la característica del relé y éste operará siempre y cuando la resistencia del arco no exceda el valor F-P, sin embargo conforme la falla se va acercando al punto T, el rango permisible de resistencia es menor y puede ser que la falla salga de la característica de operación; por lo que se recomienda el uso de estos relevadores en Líneas de Transmisión relativamente largas donde la resistencia de arco sea pequeña comparada con la impedancia de la Línea.

### Relevador de Distancia Tipo Mho Desplazado (con offset).

Como su nombre lo indica es un relevador de admitancia con su característica desplazada, ni tiene centro en el origen ni pasa por él. Esto se logra introduciendo dentro del voltaje suministrado al relé, un voltaje proporcional a la corriente de operación por medio de un transformador de acoplamiento como lo muestra la fig. 9.

Por la analogía con la ecuación (9)

$$T = K_1 I (E + I Z_t) \cos(\theta - \tau) - K_2 (E + I Z_t)^2 - K_3$$

Despreciando  $K_3$  y en el punto de balance.

$$K_1 I (E + I Z_t) \cos(\theta - \tau) = K_2 (E + I Z_t)^2$$

$$\frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - \tau) = \frac{E + I Z_t}{I} = \frac{E}{I} + Z_t$$

$$\frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - \tau) = Z + Z_t \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde

$Z_t$  = impedancia del transformador de acoplamiento

$K_2$  = tap del ajuste del relevador (T en %)

$K_1$  = constante de diseño

$\theta$  = ángulo entre  $I$  y  $(E + I Z_t)$

$\tau$  = ángulo de par máximo

Observando la ecuación (11) vemos que corresponde a una característica circular de diámetro  $K$  desplazada del origen una cantidad  $Z_t / \tau$  en la dirección del ángulo de la impedancia  $Z_t$  (Fig.8).

La ventaja de este tipo de relevador es evidente: Hemos visto que el voltaje está compuesto de dos partes; el voltaje  $E$  del sistema y el voltaje  $I Z_t$  debido al transformador de acoplamiento. En el caso de una falla muy cercana al bus, el voltaje prácticamente se abatirá a cero, pero seguirá existiendo un voltaje  $I Z_t$  para polarizar al relevador.

Evidentemente el relé opera para fallas muy cercanas en la dirección inversa, por tal motivo tiene que dársele un retraso de tiempo para permitir la operación de las protecciones que ven en esa dirección, por esta razón el offset o desplazamiento sólo se utiliza en la característica de zona 3 con su retraso de tiempo correspondiente.

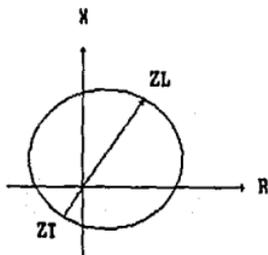


Figura 8. Característica del relevador tipo mho desplazado

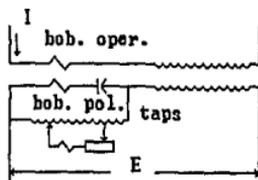


Figura 9. Construcción básica del relevador tipo mho desplazado

#### Relevador de Distancia Tipo Reactancia.

De la ecuación general del relevador (6)

$$T = K_1 I^2 - K_2 IV \sin \theta - K_3$$

Despreciando el resorte y en el punto de balance.

$$K_1 I^2 = K_2 IV \sin \theta = K_2 Z I^2 \sin \theta$$

$$\frac{K_1}{K_2} = Z \sin \theta$$

$$Z \sin \theta = x$$

$$\frac{K_1}{K_2} = x$$

( Ec. 12 )

Refiriéndonos al diagrama R-X, la ecuación anterior representa una recta paralela al eje R. Ver Figura 10.

Si llamamos

$K_1 = K =$  alcance mínimo básico del relevador

$K_2 = T =$  Tap de ajuste del relevador

Entonces

$$\frac{K}{T} = X$$

( Ec. 12 a )

Representa el ajuste del alcance del relevador.

De la fig. 10 podemos observar que dada la característica de operación del relevador, su funcionamiento es prácticamente independiente de la resistencia de arco producida durante las fallas; por lo que su aplicación es básicamente en Líneas de transmisión cortas.

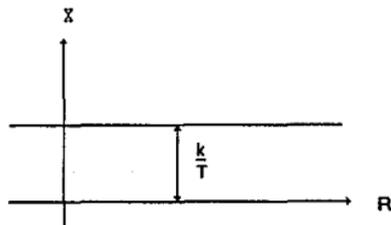


Figura 10. Característica del relevador tipo reactancia

## 2.- ESQUEMAS DE DISTANCIA GENERAL ELECTRIC.

La Compañía General Electric fabrica una extensa gama de relevadores de distancia, pero solamente tres de ellos nos interesarán, ya que son la base de los esquemas utilizados por la Comisión Federal de Electricidad en los sistemas de 400 KV.

Estos tres tipos son:

Relevadores tipo GCY  
Relevadores tipo GCX  
Relevadores tipo GCXG

### Relevador Tipo GCY

El más común es el GCY51A, el cual es un relé monofásico que consta de 3 unidades tipo MHO que protegen a la(s) línea(s) en 3 zonas de operación contra fallas trifásicas, entre 2 fases, y 2 fases a tierra.

Dichas unidades se denominan M1, M2 y OM3 para las 3 zonas respectivas; en el caso de la unidad OM3 se tiene la facilidad de utilizar o no el desplazamiento u Offset, con sólo mover la posición un eslabón en la parte posterior del relé.

En la figura 11 se presenta una unidad básica tipo MHO donde los polos 1 y 2 reciben el potencial completo; el capacitor es con el fin de poner el circuito a factor de potencia unitario, es decir que  $I_{pol}$  y  $\Phi_{pol}$  estén en fase con  $E$ . El polo 4 es alimentado sólo con una fracción (TE) del mismo voltaje que alimenta a los polos 1 y 2. Aquí sin embargo, debido a la resistencia y al embobinado, el factor de potencia es muy atrasado de tal modo que la corriente de restricción  $I_r$  y el flujo  $\Phi_r$  están atrás del voltaje por un ángulo  $\theta$  considerable.

De acuerdo con la ecuación (1) El torque eléctrico de restricción producido es:

$$T_r = K_1 \Phi_p \Phi_r \sin \theta$$

$$\Phi_p = K_2 E$$

$$\Phi_r = K_3 E$$

$$T_r = K_1 K_2 K_3 T E^2 \sin \theta$$

Pero como  $\theta$  esta fijo

$$T_r = K_0 T E^2$$

(Ec. 13)

Donde  $K_0 = K_1 K_2 K_3 \sin \theta$  son constantes de diseño

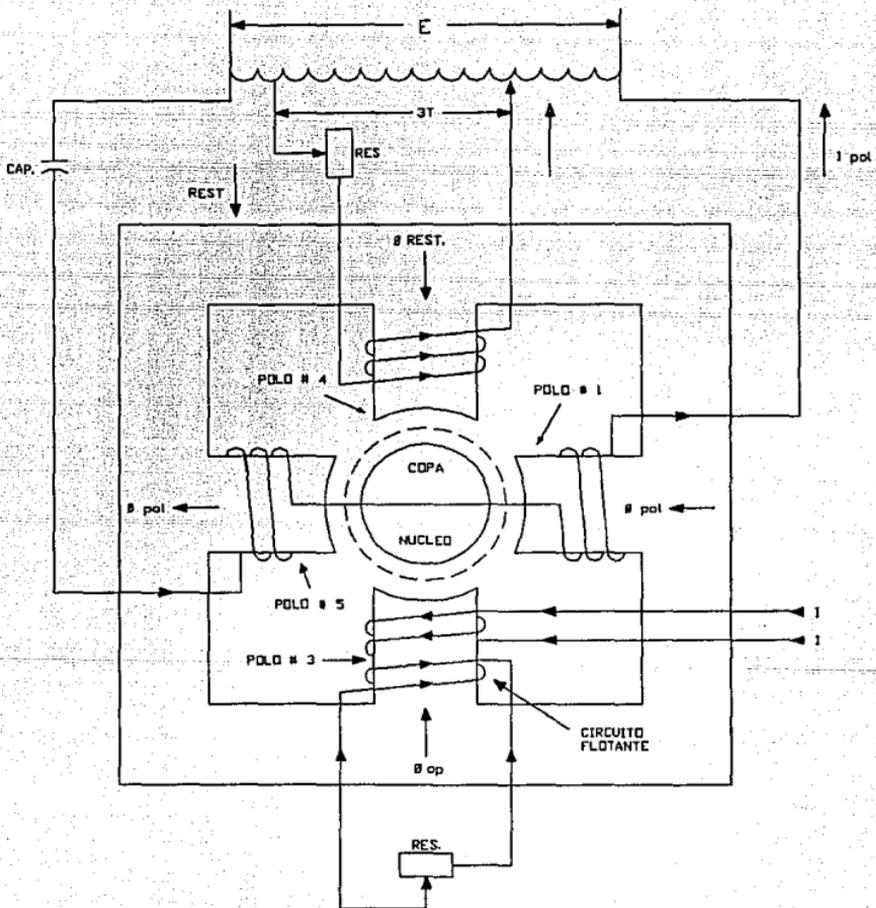


Figura 11. Unidad Mho Básica

Haciendo un análisis similar para el polo 3; aquí el flujo de operación  $\Phi_{op}$  está atrás de la corriente  $I$  por un ángulo  $\beta$  debido al embobinado flotante y la resistencia.

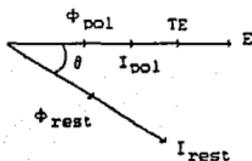


Figura 12.

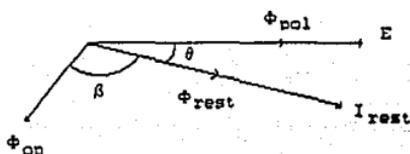


Figura 13.

Igualmente la expresión del torque de operación está dada por:

$$T_o = K_4 \Phi_o \Phi_p \text{sen}(\beta + \theta)$$

Pero

$$\Phi_o = K_5 I$$

$$\Phi_p = K_6 E$$

$$T_o = K_4 K_5 K_6 E I \text{sen}(\beta + \theta) = K_7 E I \text{sen}(\beta + \theta)$$

$$\text{sen}(\beta + \theta) = \cos(90 - \beta + \theta)$$

$$\text{Haciendo } \tau = 90 - \beta$$

$$T_o = K_7 E I \cos(\theta - \tau)$$

(Ec. 14)

$$T = T_o - T_r$$

(Ec. 15)

Podemos observar que  $T$  es positivo cuando  $T_o > T_r$  o sea:

$$K_7 E I \cos(\theta - \tau) > K_8 T E^2$$

$$\text{Si llamamos } K = \frac{K_7}{K_8}$$

$$\frac{K}{T} > \frac{E}{I \cos(\theta - \tau)}$$

$$\frac{K}{T} > \frac{Z}{\cos(\theta - \tau)}$$

En el punto de balance :

$$Z = \frac{K}{T} \cos(\theta - \tau) \quad (\text{Ec. 16})$$

Compárese con la ecuación (10) y nótese que son idénticos

Donde

K = alcance básico del relevador

T = Tap de ajuste

$\tau$  = ángulo de par máximo de diseño del relevador

$\theta$  = ángulo entre las cantidades de entrada al relé

Las figuras (12) y (13) representan vectorialmente lo anterior.

Refiriéndonos a la figura 14 donde se muestran los elementos internos del relevador, nótese que la unidad M1 recibe un potencial inducido por la corriente a través del transformador de acoplamiento o transactor TRI, dicho potencial se combina con el voltaje de restricción que viene del autotransformador, el cual contiene los taps de ajuste; una vez combinados forman un sólo voltaje que va a dar a la bobina de operación. Como se observa el elemento TRI tiene 3 posiciones; ellas dan el valor del alcance básico del relevador, es decir con el tap ajustado al 100%.

Lo anterior quiere decir que de acuerdo a la ecuación (16), el alcance del relevador puede ser aumentado o extendido con sólo bajar el tap de ajuste. Por ejemplo si tenemos un relevador que a ángulo de par máximo tenga un alcance básico de 3 ohms secundarios, si ponemos el tap en 10% el alcance será aumentado a 30 ohms secundarios. Por recomendación directa del fabricante no es conveniente bajar el valor del tap a valores menores de 10% pues se vería afectada la confiabilidad del relevador.

Nótese también en la misma figura el elemento TR3 que está en serie con la bobina de corrientes de la unidad OM3, y cuyo devanado secundario está en serie con la bobina de voltaje de la unidad OM3 en el circuito de polarización. Esto es con el fin de poder utilizar o no el desplazamiento u offset que como hemos dicho antes se logra introduciendo dentro del voltaje suministrado al relé, un voltaje proporcional a la corriente de operación.

Otros elementos que tienen funciones específicas son los siguientes: R11, R12, R13, sirven para dar un ajuste fino al alcance del relé X11, R22, R23, sirven para ajustar el ángulo de par máximo del relé.

En la fig. 15 se muestran las características de operación de las 3 zonas, donde se ve que las unidades M1 y M2 tienen el mismo ángulo de Par máximo, que es normalmente  $60^\circ$ , el cual puede ser ajustado si se desea a un valor superior, sin embargo se recomienda  $60^\circ$  debido a

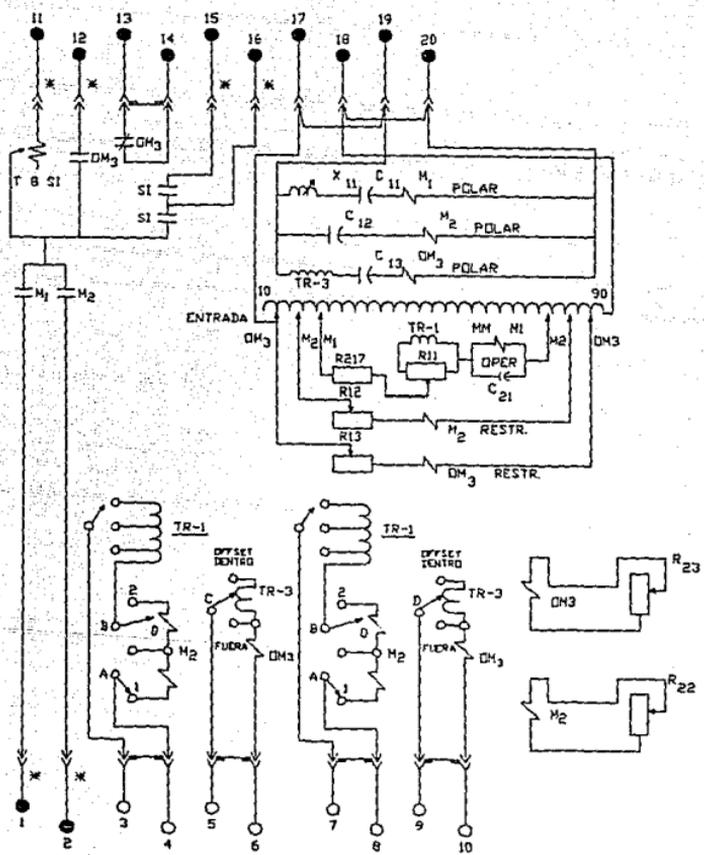


Figura 14. Conexiones Internas del Relé Tipo GCY 51A

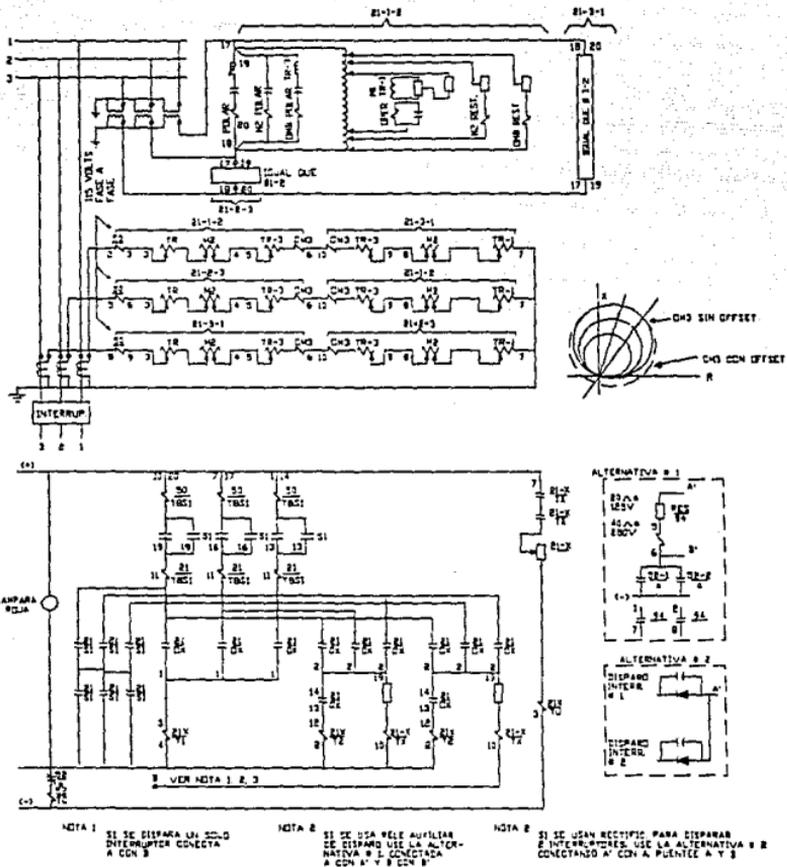


Figura 15. Protección de Distancia de 3 zonas para una línea usando reles de distancia tipo GCS1A y un rete de tiempo tipo RPM

la resistencia de arco; la unidad OM3 tiene asimismo un valor que por lo general es  $75^\circ$ . En la misma figura se muestra también el diagrama trifilar del voltajes y corrientes, así como el de control, los cuales se explican por sí solos.

### Relevador Tipo GCX

Existen varias versiones de este tipo de relevadores, pero el más común y que es de uso general en C.F.E. es el GCX51A. Este es un relé monofásico con 3 zonas de operación que al igual que el GCY, protege a la línea de transmisión contra fallas trifásicas, entre 2 fases, y 2 fases a tierra. Este relevador cuenta con una unidad conmutable del tipo Reactancia que protege las zonas 1 y 2, y una tercera unidad tipo MHO que sirve para proteger la zona 3.

En el inciso anterior se ha explicado física y matemáticamente la construcción y el análisis para una unidad MHO básica; en este inciso trataremos de hacer lo mismo para una unidad básica de reactancia para lo cual nos referimos a la fig. 16 donde se observa lo siguiente.

Los polos 1 y 2 sólo reciben la corriente, el polo 3 recibe esta misma corriente pero además contiene un devanado flotante, el cual tiene el efecto de atrasar el ángulo de fase del flujo del polo 3 respecto al flujo de los polos 1 y 2. Este ángulo de atraso ( $\delta$ ) depende de la cantidad de vueltas de la bobina, y la magnitud del flujo depende de los valores de R y C. El flujo en los polos 1 y 2 interactúan con el flujo del polo 3 produciendo torque de operación, asimismo el flujo de los polos 1 y 2 interactúan con el flujo del polo 4 para producir torque de restricción.

Nuevamente refiriéndonos a la ecuación (1) y de manera similar que para el rele GCY :

$$T_n = K_1 \Phi_o \Phi_p \text{sen } \delta - K_2 \Phi_r \Phi_p \text{sen } \theta$$

$$\Phi_o = K_3 I$$

$$\Phi_p = K_4 I$$

$$\Phi_r = K_5 T E$$

Sustituyendo.

$$T_n = K_1 K_3 K_4 I^2 \text{sen } \delta - K_2 K_4 K_5 T E I \text{sen } \theta$$

Como  $\delta$  es constante

$$T_n = K_6 I^2 - K_7 T E I \text{sen } \theta$$

( Ec. 17 )

En el punto de balance

$$\frac{K}{T} = \frac{E}{I} \text{sen } \theta = Z \text{sen } \theta$$

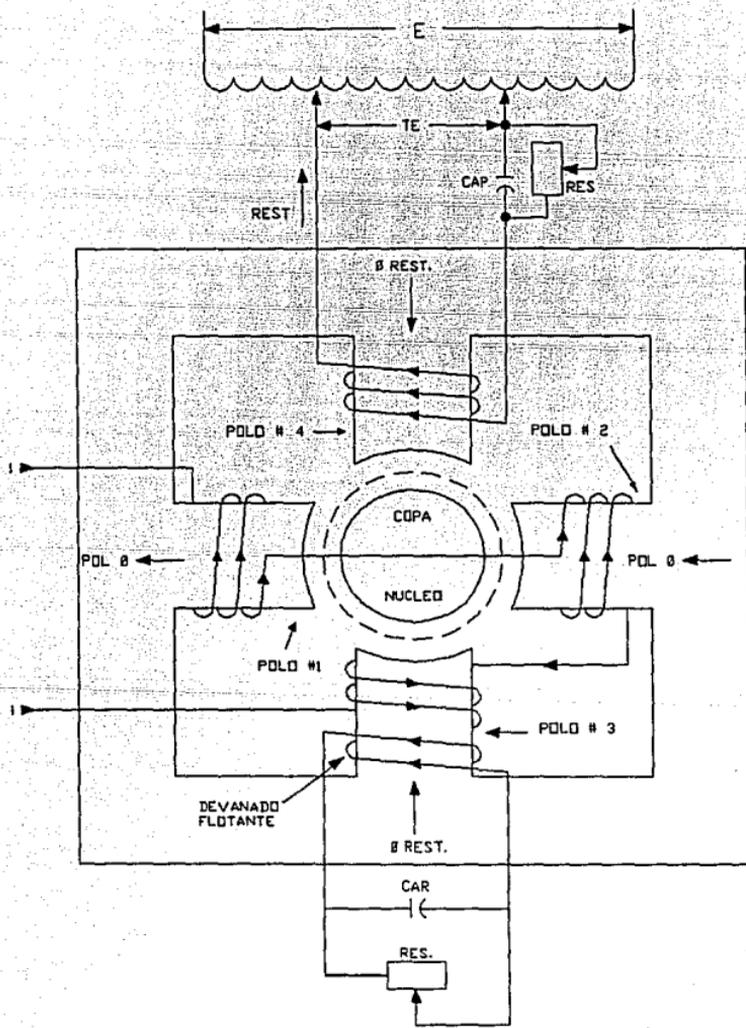


Figura 16. Unidad Basica de Reactancia

Pero  $Z \text{ sen } \theta = X$

$$\frac{K}{T} = X$$

( Ec. 18 )

Ecuación que es igual a la (12) obtenida a partir de la ecuación general del relevador.

Donde K es una constante de diseño igual al alcance mínimo básico del Relevador; y T representa el tap de ajuste. Por lo que evidentemente el término  $\frac{K}{T}$  representa el ajuste del alcance del relevador.

En la figura 17 destaca lo siguiente:

El elemento TM provee al relevador de una acción de memoria para mantener el voltaje de polarización por unos cuantos ciclos para detectar correctamente la falla en los casos en que el voltaje se abata tanto que no sea suficiente para polarizar al relevador. Esto es debido a que por razones conveniente al relé se le polariza precisamente con el voltaje de las fases a las cuales protege.

Los cuatro contactos del relevador auxiliar OX que se encuentran en el circuito de voltaje sirven para cambiar súbitamente el alcance de la unidad de Reactancia representado en el diagrama como "O", que como dijimos anteriormente protege las zonas 1 y 2. Estos contactos ejercen la acción de conmutar el voltaje de entrada (restricción) a la unidad de Reactancia, lo cual equivale a aumentar el valor de impedancia vista por el relevador y por lo tanto su alcance.

La bobina del relevador OX es operada por un circuito de tiempo ajustado aproximadamente en 0.2 segundos que es el correspondiente al tiempo de la zona 2; los demás elementos funcionan de manera similar a los del relevador GCY.

En la figura 18 se muestra el esquema de protección completo con las características del relevador de zona 1, zona 2 y zona 3, el diagrama trifilar de voltajes y corrientes, y el diagrama de control. Dichos diagramas se explican por sí solos, pero nótese que los contactos de las unidades MHO y de reactancia están en serie para disparos de zona 1 (21X-T1) y zona 2 (21X-T2), esto se debe a lo siguiente:

Dada la característica de operación de la unidad de reactancia existe un inconveniente para aplicarla separadamente, pues durante condiciones normales de carga cuando la potencia está siendo transmitida por la línea, la impedancia de carga cae dentro de la zona de operación de la unidad de reactancia y ésta normalmente está operada, por lo que en el caso de aplicarla separadamente siempre habría señal de disparo hacia el interruptor, pero al tener como permisivo de disparo el contacto de la unidad MHO, el disparo no se efectúa hasta que opera dicha unidad. Por esta razón a la unidad MHO se le ha dado el nombre de unidad de arranque, y en algunos casos se le identifica como SU y a la unidad de reactancia u OHM como OU.

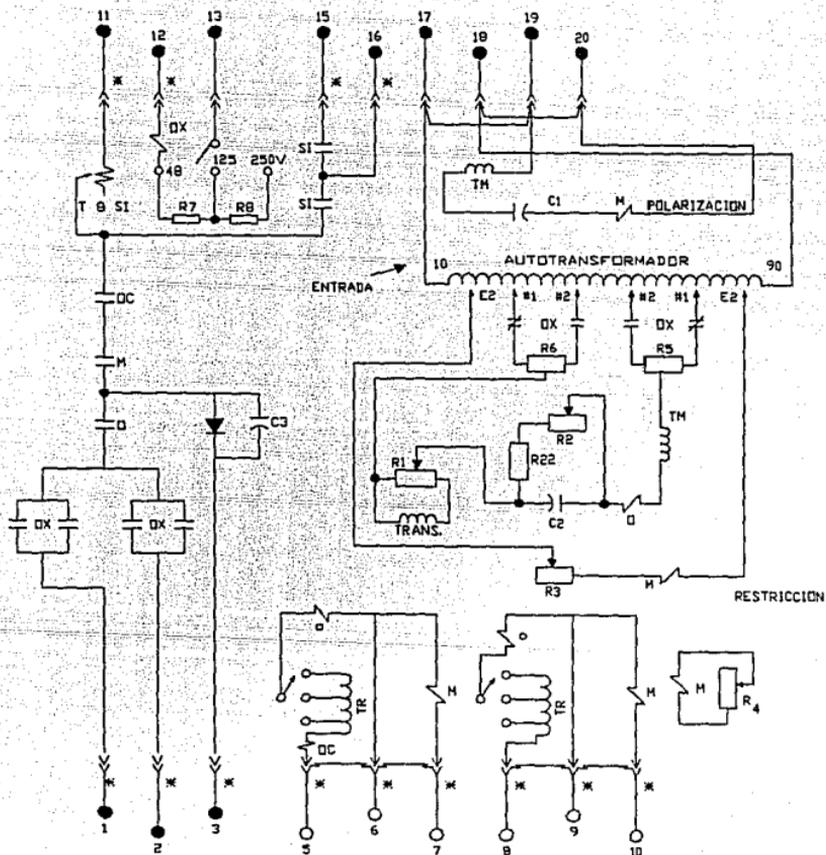


Figura 17. Conexiones Internas de los Relés tipo GCX 51A y B

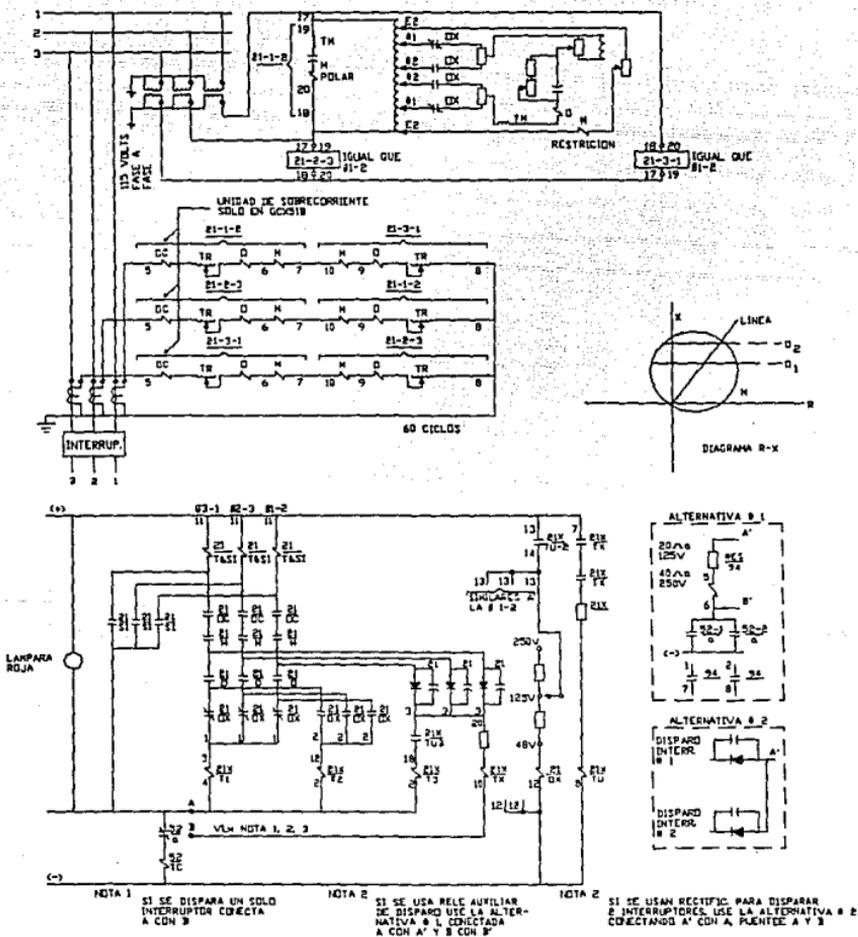


Figura 18. Diagrama Trifilar y de Control del relevador GCX51A o B

### Impedancia Vista por los Relevadores en Condiciones de Falla.

En las figuras 15 y 18 se muestran los diagramas trifilares de voltajes y corrientes para los relevadores GCX y GCY, nótese que en ambos casos se alimenta al relevador con las corrientes  $I_a - I_b$  y el voltaje  $V_{ab}$  para el relé 21(1-2) que protege a la línea para fallas entre las fases A y B; el relé 21(2-3) se alimenta con  $I_b - I_c$  y  $V_{bc}$ ; y el relé 21(3-1) se alimenta con  $I_c - I_a$  y  $V_{ca}$ .

Supóngase una falla entre las fases b y c.

Si alimentásemos al relevador con  $V_{bc}$  e  $I_b$  la impedancia que vería es:

$$Z = \frac{V_{bc}}{I_b} = \frac{V_b - V_c}{I_b} = \frac{(V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}) - (V_{c1} + V_{c2} + V_{c0})}{I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}}$$

$$Z = \frac{(a^2 I_1 Z_1 + a I_2 Z_2 + I_0 Z_0) - (a I_1 Z_1 + a^2 I_2 Z_2 + I_0 Z_0)}{a^2 I_1 + a I_2 + I_0}$$

Reduciendo y considerando que  $Z_1 = Z_2$

$$Z = \frac{Z_1(a^2 - a)(I_1 - I_2)}{a^2 I_1 + a I_2 + I_0} \quad (\text{Ec. 19})$$

De las ecuaciones (4. B) del apéndice y considerando que para este tipo de falla :

$$I_a = 0 \quad I_b = -I_c$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(aI_b - a^2I_c)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(a^2I_b - aI_c)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_b - I_c)$$

$$I_1 = -I_2 \quad I_0 = 0$$

Sustituyendo en (19)

$$Z = \frac{Z_1(a^2 - a)2I_1}{I_1(a^2 - a)}$$

$$Z = 2Z_1$$

(Ec. 20)

Sea ahora una falla trifásica:

sabemos que para este tipo de falla se cumple que:

$$I_1 = I_a ; I_2 = I_0 = 0$$

Sustituyendo en la ecuación (19)

$$Z = \frac{Z_1(a^2 - a)I_1}{a^2 I_1} = Z_1(1 - a^2) = \sqrt{3}Z_1 \angle 30^\circ \quad (\text{Ec. 21})$$

Comparando las ecuaciones (20) y (21) notamos que la impedancia vista por el relevador es distinta para estos dos tipos de fallas contra las cuales protege.

En el caso de una falla de 2 fases a tierra; de las ecuaciones (4.B) del apéndice , sustituyendo en (19) y simplificando

$$Z = \frac{Z_1 Z_2(a^2 - a)}{Z_2(a^2 - 1) + Z_0(a^2 - a)}$$

Si el relevador lo alimentamos con  $I_B - I_C$

$$Z = \frac{V_B - V_C}{I_B - I_C} \quad (\text{Ec. 22})$$

De la ecuación (4.B) del apéndice

$$I_B - I_C = a^2 I_1 + a I_2 - a I_1 - a^2 I_2$$

$$I_B - I_C = I_1(a^2 - a) + I_2(a - a^2)$$

$$I_B - I_C = (a^2 - a)(I_1 - I_2)$$

Sustituyendo en (22)

$$Z = \frac{Z_1(a^2 - a)(I_1 - I_2)}{(a^2 - a)(I_1 - I_2)} = Z_1 \quad (\text{Ec. 23})$$

La ecuación anterior representa la impedancia vista por el relevador, la cual es independiente de las componentes de secuencia estando así compensando totalmente, incluso en el caso

de que cualquiera de las fallas involucren tierra. Esta compensación para los relevadores de fase se conoce como corriente delta.

### Relevador Tipo GCXG

Este es un relevador monofásico que protege contra fallas de una fase a tierra. Está formado al igual que el GCX por una unidad de reactancia conmutable que provee protección a las zonas 1 y 2, mientras que para la zona 3 cuenta con una unidad tipo MHO. Aunque por construcción este relé es similar al GCX. Existen algunas diferencias, básicamente en lo que se refiere a la toma de señales de voltaje y corriente.

Nótese en la fig. (19) que en este caso el voltaje de polarización entra por las terminales 19 y 20 y corresponde al voltaje de las fases no falladas, mientras que el voltaje de restricción corresponde a la fase fallada y se alimenta por las terminales 17 y 18. Los relés auxiliares A1, A2, A3, sirven para asegurar que sólo una fase ha operado en las zonas 1 y 2, de lo contrario el disparo no se lleva a cabo; la zona 3 no tiene esta restricción, sin embargo los contactos del relevador 21GY bloquean la operación de todo el esquema a menos que haya circulación de corriente por el neutro, según puede apreciarse en las figuras 20.a y 20.b. Impedancia vista por el relevador en condiciones de falla:

Sea una falla de fase A a tierra

$$Z = \frac{V_A}{I_A} = \frac{I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0}{I_1 + I_2 + I_0}$$

De las ecuaciones (4.B) del apéndice se cumple que en el punto de falla

$$I_1 = I_2 = I_0$$

$$Z_1 = \frac{I_1(Z_1 + Z_2 + Z_0)}{3I_1} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_0}{3} \quad (\text{Ec. 24})$$

La ecuación anterior representa la impedancia que vería el relevador en estas condiciones.

Pero sabemos que en el punto de localización del relevador no se cumple que  $I_1 = I_2 = I_0$ , a menos que la corriente de falla sólo tenga una aportación; por lo tanto la impedancia que ve el relevador es distinta, por lo que es necesario suministrarle una compensación para que la impedancia vista por él, sea la de secuencia positiva, ya que ésta es igual en cualquier punto y sólo depende de la longitud de la línea.

El voltaje de falla en cualquier punto de la línea es

$$V_A = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0$$

$$V_A = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_1 - I_0 Z_1 + I_0 Z_0$$

Como  $Z_1 = Z_2$  tenemos:

$$V_A = Z_1(I_1 + I_2 + I_0) + I_0(Z_0 - Z_1)$$

Tomando en cuenta las ecuaciones (4.B) del apéndice y reagrupando tenemos:

$$V_A = Z_1 I_A + \frac{I_A + I_B + I_C}{3} (Z_0 - Z_1)$$

$$V_A = Z_1 I_A + (I_A + I_B + I_C) \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} Z_1$$

$$V_A = Z_1 \left[ I_A + (I_A + I_B + I_C) \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \right]$$

$$Z_1 = \frac{V_A}{I_A + 3I_0 \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}} = Z_R \quad (\text{Ec. 25})$$

Es la impedancia vista por el relevador.

De donde podemos ver que la compensación consiste en reducir una fracción  $\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$  de la corriente residual  $3I_0$ .

Esto se logra por medio del devanado primario del transformador auxiliar, que también tiene el propósito de compensar la corriente de secuencia cero inducida por alguna línea paralela que vaya sobre la misma torre, por medio del devanado secundario de dicho transformador. Dicha compensación se ve claramente en el diagrama trifilar de la fig. 20.a; dado por la siguiente expresión:

$$K'' = \frac{2X_{0m} S_2}{3X_1 S_1} \frac{RTCP}{RTC} 100 \quad (\text{Ec. 25.a})$$

donde:

- $K''$  = porcentaje de compensación por línea paralela
- $X_{0m}$  = reactancia mutua de secuencia cero
- $S_2$  = porcentaje de la longitud de la línea en que van paralelas
- $S_1$  = 100 % de la longitud de la línea protegida
- $RTCP$  = relación de transformación de los TC's de la línea paralela
- $RTC$  = relación de transformación de los TC's de la línea protegida

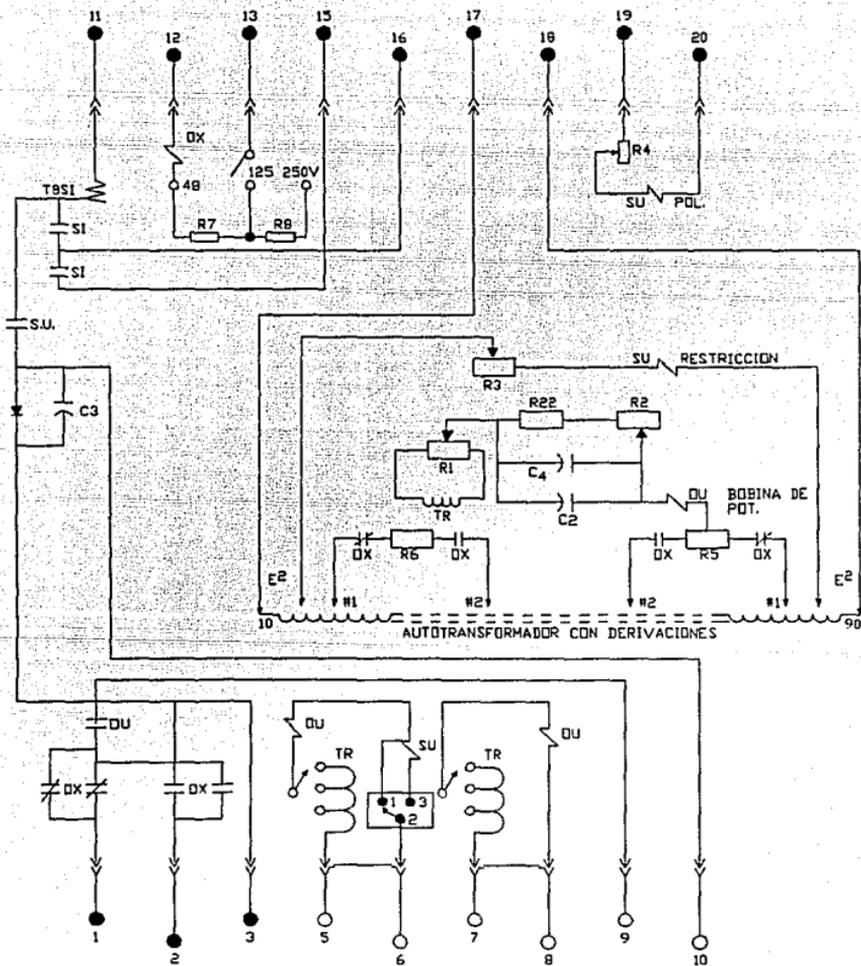


Figura 19. Conexiones Internas del rele GCGS1A

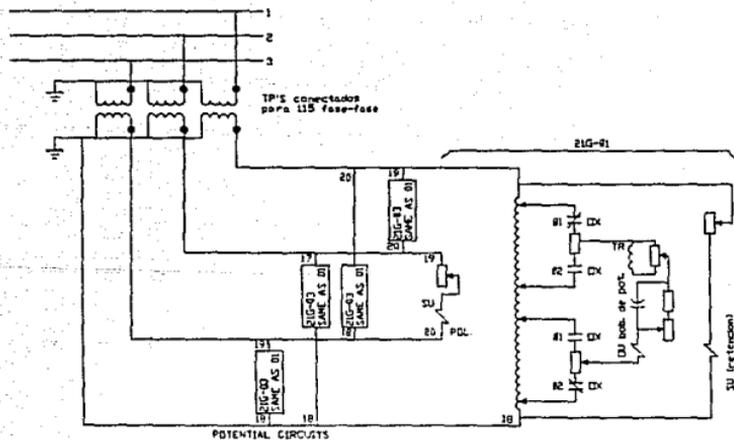
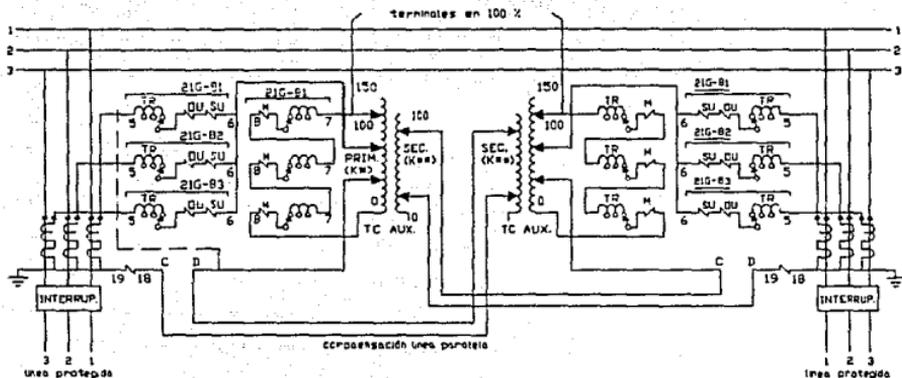
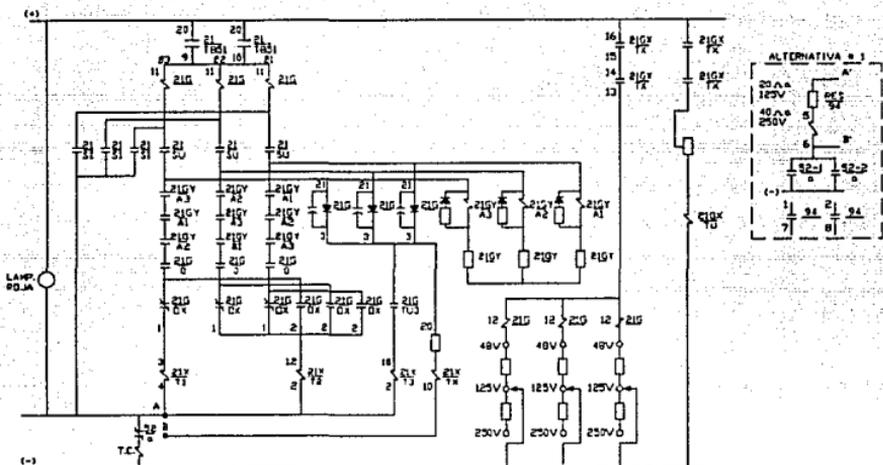


Figura 20. Diagrama de conexión típica para protección de distancia por zonas utilizando relés GCX51A, con relés de tiempo RPM.



DISPOSITIVOS		
T I P O	DIAGRAMA	INSTRUCTIVO
GCGS1A	0178A7093	K-6209275
	0178A7092	K-6209272
RPW11D	0178A8168	K-6209272
NAA15E	36740267	36740267
AUX. CT.		

ANCI	TIPO	ELEMEN TO	DESCRIPCION
21G	GCGS1A		RELE DE DISTANCIA A TIERRA
		SU	UNIDAD DE ARRANQUE
		DU	UNIDAD DE REACTANCIA
		DX	AUXILIAR DE ZONAS
		1A5I	BANDERA Y SELLO
		TR	TRANSACTOR
21GX	RPM11D	T1	BANDERA ZONA 1
		T2	BANDERA ZONA 2
		T3	BANDERA ZONA 3
		TU	ELEMENTO TEMPORIZADO
		TU-2	CONTACTO ZONA 2
		TU-3	CONTACTO ZONA 3
		TX	AUXILIAR DE TU
21GY	NAA15E		AUXILIAR DE 21G
		A1	AUXILIAR FASE 1
		A2	AUXILIAR FASE 2
		A3	AUXILIAR FASE 3
		10C	DETECTOR DE FALLA A TIERRA
52	TC		INTERRUPTOR DE POTENCIA
			BOBINA DE DISPARO
94	HGA		AUXILIAR DE DISPARO

Figura 20a. Diagrama de control del rele GCGX.

### 3.- ESQUEMAS DE DISTANCIA WESTINGHOUSE

#### Relevadores de Fase Tipo KD4, KD41, KD10 y KD11

Son relevadores trifásicos que proveen protección en una sola zona contra fallas trifásicas, entre 2 fases, y 2 fases a tierra.

Todos estos tipos son similares y sólo existen diferencias en cuanto al alcance que tienen y a la inclusión del origen dentro de su característica, ya que el KD41 y el KD11 cuentan con desplazamiento u offset, todos ellos utilizan lo que se llama compensadores de caída de línea, los cuales producen 2 fasores de voltaje que según la relación de fase que tengan, van a determinar si hay operación o no.

Por construcción básicamente constan de lo siguiente:

3 Transformadores compensadores T,  $T_{AB}$ ,  $T_{BC}$

3 Transformadores con derivaciones o taps

2 Unidades de operación del tipo copa de inducción.

- a) una para fallas trifásicas
- b) otra para fallas que involucren 2 fases

Descripción de los elementos (véase figs. 21 y 24).

Los compensadores  $T_{AB}$  y  $T_{BC}$  son transformadores con 3 devanados; 2 primarios y un secundario, mientras que el compensador T sólo tiene 2 devanados; primario y secundario respectivamente.

Los devanados primarios tienen cada uno 7 taps o derivaciones y por ellos circulan las corrientes de fase las cuales inducen en el secundario un voltaje proporcional, tanto a la magnitud de la corriente como a la posición del tap.

Esta proporcionalidad es establecida por el área de la sección transversal del núcleo de acero laminado.

El devanado secundario tiene un solo tap que lo divide en 2 secciones: una que va conectada sustractivamente en serie con el voltaje terminal del relevador, para así poder restar de dicho voltaje, otro que es proporcional a la corriente. La otra sección va conectada a un resistor de carga ajustable para proveer ajuste de la relación de ángulo de fase entre la corriente primaria y el voltaje secundario inducido (dicho valor fluctúa entre  $60^\circ$  y  $80^\circ$ ).

Los autotransformadores tienen 3 taps en su devanado principal S, el devanado M tiene 4 taps y puede ser conectado aditiva o sustractivamente para modificar el ajuste de S en un rango de -18% a 18%; el valor de M es determinado por la suma de los valores entre las terminales R y L.

Así pues el ajuste total del autotransformador está dado por

$$\frac{S}{1 \pm M}$$

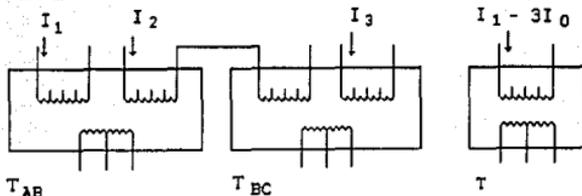


Figura 21. Transformadores TAB, TBC, T

Las unidades de operación son 2 unidades cilíndricas del tipo copa de inducción de cuatro polos conectadas en delta abierta, cuyo principio de operación es el del motor de inducción, donde el torque de operación es producido cuando los voltajes aplicados en sus terminales tienen secuencia de fases negativa; en caso contrario el torque desarrollado es de restricción.

### Unidad trifásica (Z3Φ)

Esta unidad tiene asociado el compensador T por cuyo devanado primario circula una corriente  $I_1 - 3I_0$ , habiendo dos opciones para suministrar la corriente  $3I_0$ , ver fig. 3; la primera es por medio de un TC auxiliar alimentado de la corriente residual del neutro. La otra opción es suministrar  $-I_2 - I_3$  ya que  $I_1 - 3I_0 = -I_2 - I_3$

El voltaje inducido en el secundario se usa para modificar el voltaje de la fase 1 de la siguiente manera:

Sea  $Z_c$  la impedancia del compensador T, y X, Y, Z las terminales de entrada de la unidad trifásica.

Supóngase que ocurre una falla trifásica; en general el voltaje inducido en el secundario de T es  $(I_1 - 3I_0) Z_c$ , pero en una falla trifásica balanceada  $I_0 = 0$  por lo que dicho voltaje solo es  $I_1 Z_c$ , pero como éste es restado al voltaje de la fase 1, el voltaje  $V_x$  en la entrada de la unidad es:

$$V_x = V_1 - I_1 Z_c$$

Los otros dos voltajes quedan igual

$$V_y = V_2$$

$$V_z = V_3$$

Para efectos de explicación asumiremos que los ángulos de impedancia del sistema y del compensador ( $Z_c$ ) son  $90^\circ$

-Para una falla en el punto A:

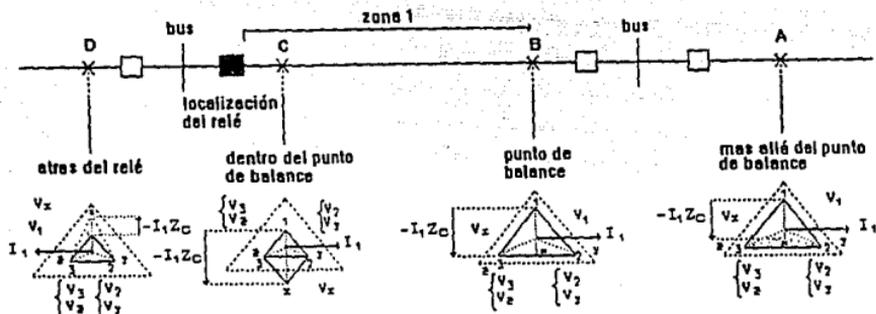


Figura 22. Comportamiento del relevador en diferentes puntos de falla

La cantidad  $-I_1 Z_c$  modifica el voltaje  $V_1$  reduciendo el triángulo, pero la secuencia sigue siendo X-Y-Z por lo que el torque es de restricción.

-Para una falla en el punto B:

La corriente  $I_1$  es mayor que en el caso anterior, pero de un valor tal que  $V_x = 0.5V_2$ . Entonces el área del triángulo XYZ es cero y el relevador está en el punto límite de operación.

-Para una falla en el punto C:

En este caso  $I_1 Z_c$  ha crecido tanto que el punto x está debajo de la línea ZY dando como resultado un triángulo de voltajes con secuencia XZY, siendo una condición favorable para la operación del relevador.

-Para una falla en el punto D:

La corriente  $I_1$  tiene polaridad invertida por lo que  $V_x = V_1 + I_1 Z_c$  aumentará y seguirá la secuencia XY Z y no habrá torque de operación.

En el caso de una falla trifásica muy cercana en que los voltajes se abatan tanto que tienden a cero, se cuenta en el relevador tipo KD4 con un circuito resonante de memoria dado por  $X_L$  y  $C_c$  que permite que el voltaje Y-Z vaya bajando gradualmente; en el relevador tipo

KD41 se cuenta para esto con la bobina Z en el circuito de corriente para proporcionar el desplazamiento u offset que como se vió oportunamente se logra introduciendo dentro del voltaje suministrado al releador, un voltaje proporcional a la corriente de operación.

Los elementos  $R_{3A}$ ,  $R_{3F}$ ,  $C_{3A}$  sirven para compensar el defasamiento entre los voltajes X y Z de la unidad, debido a  $C_{3C}$ ; Además de proporcionar un control de transitorios en la bobina de la unidad.

### Unidad fase a fase ( $\phi - \phi$ )

Esta unidad tiene asociados los compensadores  $T_{AB}$  y  $T_{BC}$  en donde los devanados primarios se usan para modificar los voltajes respectivos de fases, o sea que  $T_{AB}$  modifica el voltaje  $V_{12}$  y  $T_{BC}$  a  $V_{23}$ .

Haciendo un análisis similar al anterior.

$$V_{xy} = V_{12} - (I_1 - I_2)Z_C$$

$$V_{yz} = V_{23} - (I_2 - I_3)Z_C$$

Supóngase una falla entre las fases 2 y 3, se cumple que  $I_1 = 0$   $I_2 = -I_3$

por lo tanto  $I_2 - I_3 = 2I_2$

Para una falla en el punto A: (véase fig. 23)

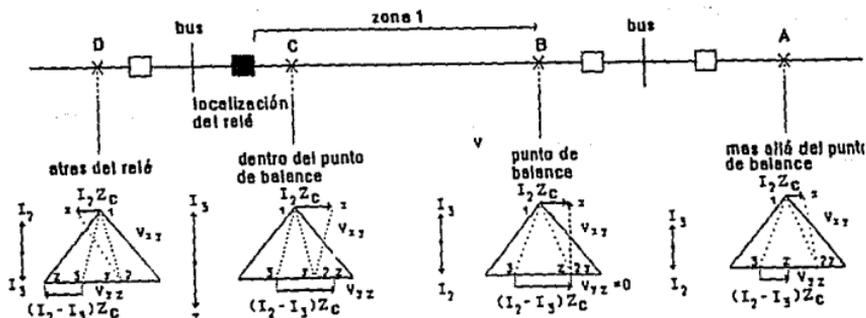


Figura 23. Comportamiento del releador en diferentes puntos de falla

$$V_{23} > (I_2 - I_3)Z_C$$

Por lo que el triángulo tendrá secuencia X Y Z y no hay torque de operación.

-Para una falla en B:

$$V_{23} = (I_2 - I_3)Z_C$$

El área del triángulo es cero y el relevador está en su límite de operación.

-Para una falla en C:

$$V_{23} < (I_2 - I_3)Z_C$$

La secuencia de fases es X Z Y siendo condición de operación para el relevador.

-Para una falla en D:

La corriente tiene polaridad invertida, aumentando el área del triángulo con la misma secuencia X Y Z desarrollando torque de restricción.

Las fallas de 2 fases a tierra son libradas en su mayoría por la unidad fase a fase ( $\Phi - \Phi$ ) aunque también pueden ser libradas por la unidad trifásica ( $3\Phi$ ).

En la descripción de los elementos que componen al relevador mencionamos que las corrientes de las fases inducen un voltaje proporcional a dichas corrientes según el tap de ajuste del transformador compensador; por lo que el valor T nos representa la proporcionalidad de la corriente.

Además vimos que el ajuste del autotransformador está dado por la expresión  $\frac{S}{1 \pm M}$  que nos representa la fracción del voltaje de entrada al relé que aparecerá en las terminales de la unidad de medición respectiva.

Es evidente en base a lo anterior que el ajuste del alcance del relevador está dado por la expresión:

$$Z = \frac{ST}{1 \pm M} \quad (\text{Ec. 26})$$

donde:

Z = alcance deseado en ohms secundarios  
S = valor del tap del primario del autotransformador

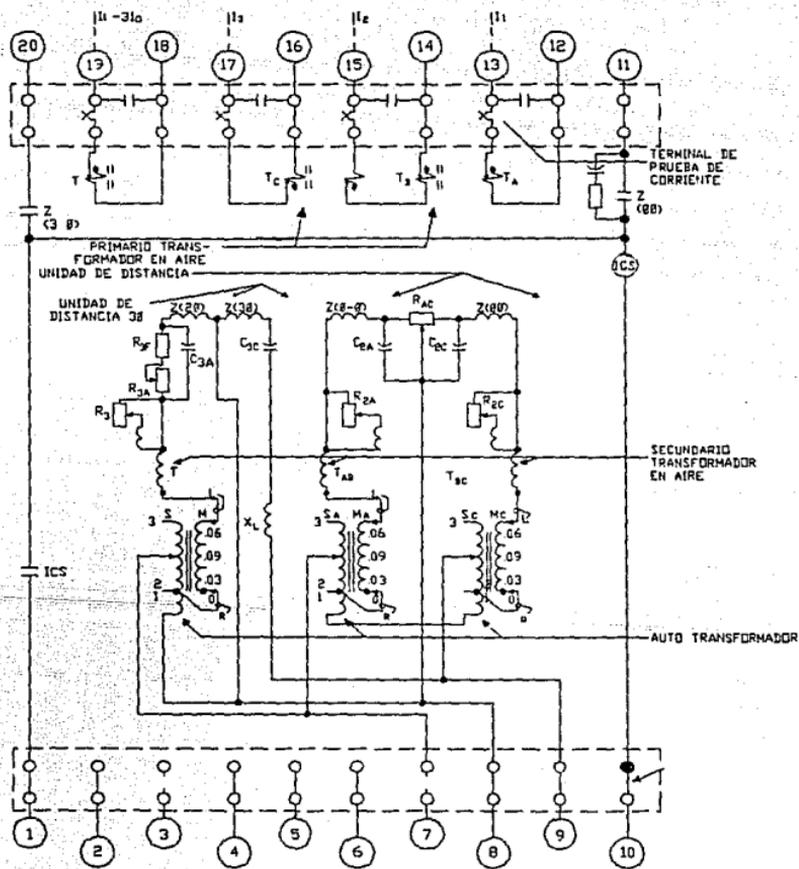


Figura 24a. Diagrama de conexiones internas del rele KD 4.

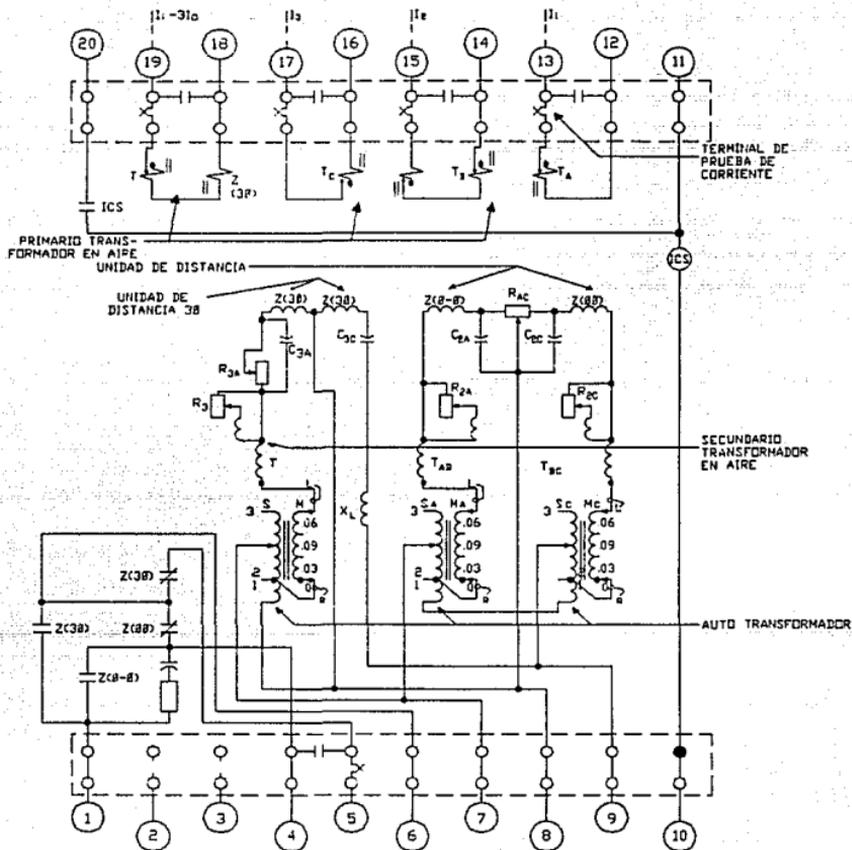


Figura 24b. Conexiones internas del rele KD41.

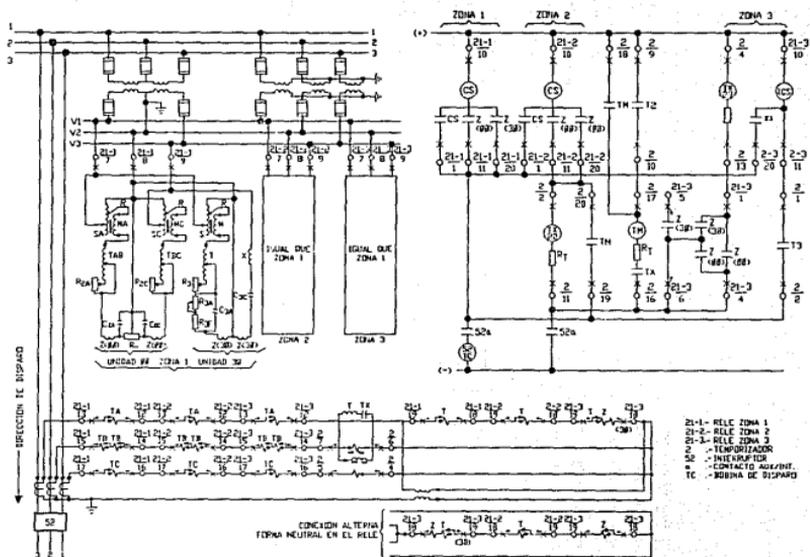


Figura 25. Diagrama trifilar y de control de los relés KD 4 y Kd 41.

T = valor del tap del compensador

M = valor del tap del secundario del autotransformador.

Estos valores están dados para un ángulo igual al ángulo de par máximo de la unidad respectiva. Si queremos obtener los ajustes a otro ángulo diferente, usamos la ecuación:

$$Z = \frac{Z_L}{\cos(\theta_m - \alpha)} \quad (\text{Ec. 27})$$

donde:

$Z_L$  = impedancia de la línea

$\theta_m$  = ángulo de par máximo

$\alpha$  = ángulo de la línea

### Relevador Tipo KDXG

Es un relé monofásico del tipo Reactancia que trabaja conjuntamente con un relevador direccional tipo KRT para proveer protección contra fallas de una fase a tierra en 3 zonas de operación previamente establecidas.

Consiste básicamente de 2 transformadores que actúan como compensador y discriminador respectivamente, un autotransformador con taps o derivaciones, una unidad tipo reactancia, y una unidad polar.

#### Compensador.

Es un transformador con 3 devanados; Dos primarios  $T_0$  y  $T_L$  y un secundario. Por  $T_0$  circula la corriente de fase y por  $T_L$  la residual.

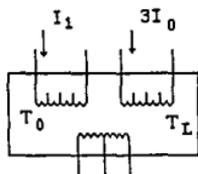


Figura 26. Transformador compensador del relevador KDXG

Una sección del secundario es conectada siempre sustractivamente en serie con el voltaje terminal; de esta manera un voltaje proporcional a la corriente de línea es restado vectorialmente del voltaje terminal.

La otra sección del devanado se conecta en serie con la primera sección cuando la unidad de reactancia es conmutada a zona 3; en caso contrario solo trabaja una sección del devanado (ver fig. 26 y 27).

#### **Transformador del Discriminador.**

Este transformador denominado  $D_T$  sólo tiene 2 devanados. Por el primario circula la corriente de fase, y en el secundario es inducido un voltaje proporcional a dicha corriente, para alimentar el discriminador a través de un rectificador de onda completa.

#### **Autotransformador.**

Está alimentado con el voltaje de fase y consta de 10 taps llamados  $M_F$  numerados 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 que representan cada uno el 10% del autotransformador. Tiene también 10 taps llamados  $M_C$  numerados .1, .2, .3, .4, .5, .6, .7, .8, .9, 1.0 que representan cada uno el 1%.

#### **Discriminador.**

Como su nombre lo indica su labor consiste en discriminar el tipo de falla que ha ocurrido, dando salida de disparo sólo para fallas de una fase a tierra.

Consta básicamente de un relevador tipo polar llamado  $R_D$  que opera con un voltaje derivado de la corriente de línea, a través del transformador  $D_T$ . Este voltaje antes de ser aplicado a la unidad polar, es rectificado, filtrado, y a través de una resistencia  $R_S$  se toma alrededor del 70% de este para operar la bobina del relé  $R_D$ .

Puesto que ha habido una rectificación, no importa el ángulo de fase que tengan las corrientes, sólo interesa su magnitud.

Para hacer la discriminación es necesario interconectar las unidades de los 3 relevadores que protegen cada una de las fases.

-Sea una falla de la fase A a tierra.

Puesto que esta corriente es muy grande comparada con la corriente de carga normal que circula por la Línea, los voltajes  $V_{I2}$  y  $V_{I3}$  debidas a las corrientes de las fases no falladas B y C respectivamente, son mínimos comparados con  $V_{I1}$ . De tal modo que los diodos  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , de la unidad correspondiente a la fase A, están polarizados directamente y por lo tanto en estado de conducción dando como resultado que opere el relevador  $R_D$  permitiendo la salida del disparo.

-Sea una falla de fases A y B a tierra.

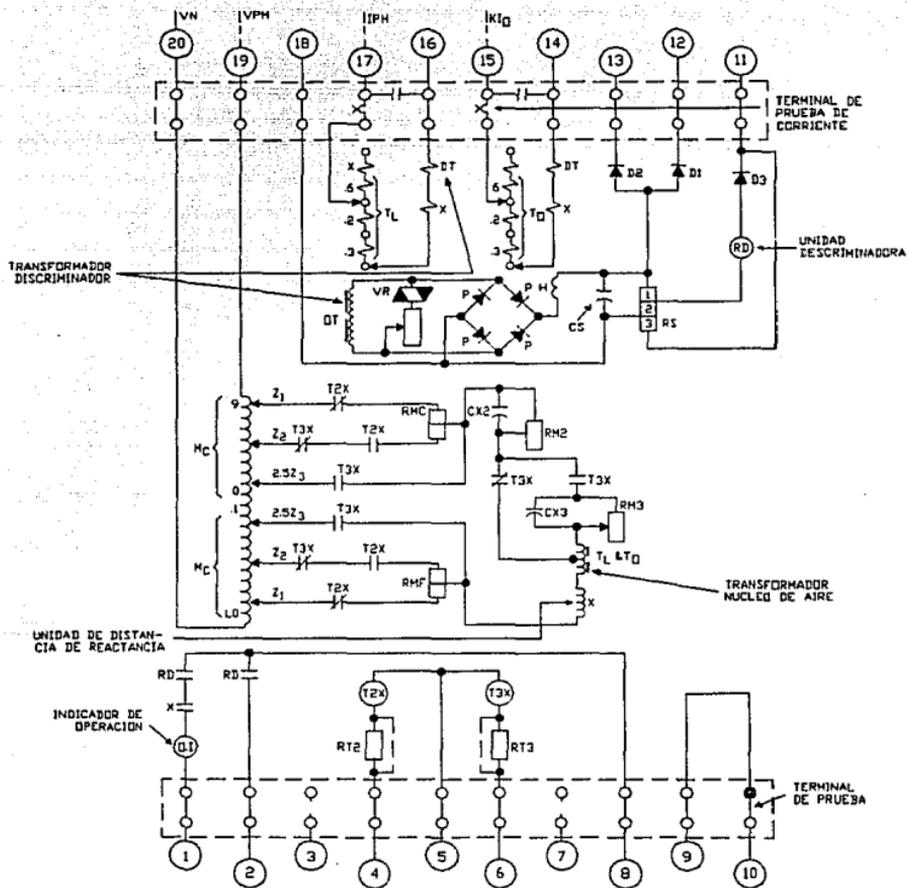


Figura 27. Diagrama de conexiones internas del rele KDXG.

En este caso  $V I_1 = V I_2$  son mucho mayores que  $V I_3$ ; por lo pronto el relevador  $R D$  de la fase C no opera puesto que  $D_3$  está polarizado en inversa. Sabemos que  $V I_1 = V I_2$ , entonces el voltaje a través de  $D_2$  es:

$$V I_1 = V I_2$$

fase A polariza en inversa a  $D_3$  fase B puesto que el primero es mayor por ser el voltaje total desarrollado a través de  $R S$  y el segundo sólo es el 70% de dicho voltaje; por lo tanto  $R O$  fase B no opera.

Por la misma razón anterior  $R O$  fase A tampoco opera.

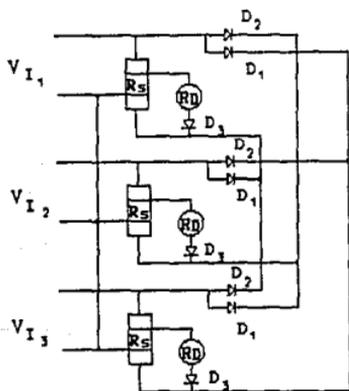


Figura 28. Conexión del discriminador del relevador KDXG

-Si se trata de una falla trifásica:  $V I_1 = V I_2 = V I_3$

$D_2 \varphi A$  y  $D_1 \varphi C$  polarizan en inversa a  $D_3 \varphi B$

$D_1 \varphi A$  y  $D_2 \varphi B$  polarizan en inversa a  $D_3 \varphi C$

$D_1 \varphi B$  y  $D_2 \varphi C$  polarizan en inversa a  $D_3 \varphi A$

Por lo que ningún relevador  $R_0$  opera.

En el caso de fallas entre fases la condición es similar al caso de 2 fases a tierra y no hay operación del relé  $R_0$ .

La condición para que opere una unidad es que la corriente en la línea debe ser  $100/70 = 1.43$  veces la mayor de las corrientes de las fases adyacentes y viceversa; la corriente de fase adyacente requerida para bloquear la operación debe ser 0.7 veces la corriente de la fase fallada. En la práctica este valor nominal varía desde 0.5 hasta 0.75 dependiendo de las corrientes de falla.

#### Unidad de Reactancia.

Consta de 2 series de polos; una serie es energizada por dos pares de devanados de corriente, un par recibe la corriente de línea, y el segundo par la corriente residual (véase fig. 27). La segunda serie de polos es energizada por el voltaje de línea a neutro, el cual es modificado por el voltaje del compensador cuyos devanados primarios son  $T_0$  y  $T_L$  por los cuales circulan la corriente de fase y residual respectivamente.

La unidad está conectada de tal forma que opera siempre y cuando el flujo en los polos de voltaje atrase al flujo en los polos de corriente. Por medio del capacitor  $C_{x2}$  se ajusta para que el flujo esté en fase con el voltaje resultante  $V$ .

Sean:

$V_{LG}$  = voltaje de fase a tierra

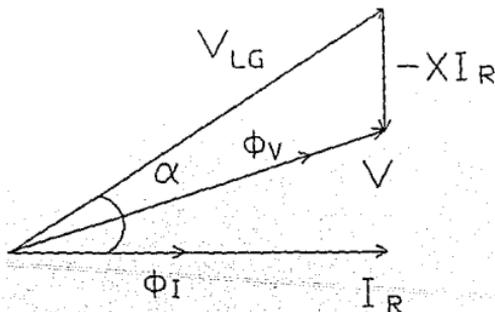
$-jX I_R$  = voltaje del compensador

$V$  = voltaje resultante aplicado a la unidad de reactancia

$\Phi_V$  = flujo debido al voltaje  $V$

$\Phi_I$  = flujo debido a la corriente del relé

Resulta evidente que  $V = V_{LG} - jX I_R$ , como lo muestra la siguiente figura.



Supóngase una falla en el punto D ( fig. 29 )

En este caso la corriente de falla no es tan grande, por lo tanto  $-j X I_R = V_{LG} \text{ sen } \alpha$  es relativamente pequeño y V está adelante de  $I_R$  existiendo un torque de restricción.

-Sea la falla en el punto B

Aquí la corriente de falla ha adquirido mayor valor, de tal modo que  $-j X I_R = V_{LG} \text{ sen } \alpha$ , y V está en fase con  $I_R$  lo que quiere decir que el relé está en la frontera de operación.

Para falla en el punto C, dada la cercanía al relé, la corriente de falla ha crecido tanto que  $-j X I_R > V_{LG} \text{ sen } \alpha$  ocasionando que V esté atrás de  $I_R$ , siendo esta condición para que exista torque de operación.

Para falla en el punto E, la corriente tiene polaridad invertida y por lo tanto siempre estará adelante de V independientemente del valor de  $-j X I_R$ , y la unidad siempre tendrá torque de operación cerrando su contacto. Sin embargo, el disparo del interruptor no será efectuado, pues como dijimos al principio, este relevador trabaja conjuntamente con un relé direccional tipo KRT que actúa como permisivo para completar el disparo. Este último se alimenta con las señales 3V<sub>o</sub> y 3I<sub>o</sub> para dar la correcta direccionalidad.

Impedancia vista por el relevador ( fig. 30 )

$$Z = \frac{V_{AG}}{I_R}$$

$$V_{AG} = I_A Z_L$$

$$I_{AR} = K_1 I_{A1} + K_2 I_{A2} + K_0 I_0$$

$$V_{AG} = K_1 I_{A1} n Z_1 + K_2 I_{A2} n Z_1 + K_0 I_0 n Z_0 + I_{OE} n Z_{OM} + 3 I_{oR} R_G$$

$$V_{AG} = n Z_1 [I_{AR} - K_0 I_0] + K_0 I_0 n Z_0 + I_{OE} n Z_{OM} + 3 I_{oR} R_G$$

$$V_{AG} = n Z_1 [I_{AR} + K_0 I_0 \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} + I_{OE} \frac{Z_{OM}}{Z_1}] + 3 I_{oR} R_G \quad (\text{Ec. 28})$$

$$Z = \frac{V_{AG}}{I_R}$$

$$Z = \frac{n Z_1}{I_R} [I_A + K_0 I_0 \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} + I_{OE} \frac{Z_{OM}}{Z_1}] + 3 \frac{I_{oR}}{I_R} R_G$$

Pero nosotros necesitamos que el relevador vea una impedancia que sólo dependa de la longitud de la línea, de la corriente de falla, de la corriente que pasa por el relé y no de otras aportaciones o sea

$$Z_R = n Z_1 + R_G + 3 \frac{I_{oR}}{I_R}$$

Lo cual se logra haciendo que en la ecuación ( 28 ) :

$$I_R = I_{AR} + K_0 I_0 \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} + I_{OE} \frac{Z_{OM}}{Z_1}$$

que es lo mismo que

$$I_R = I_{AR} + K_0 3I_0 \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} + 3I_{OE} \frac{Z_{OM}}{3Z_1} \quad (\text{Ec. 28.a})$$

El primer término  $I_{AR}$  se logra con la corriente de la propia fase.

El término  $K_0 3I_0 \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$  se logra tomando sólo una fracción de la corriente de falla  $3I_0$ ; esta fracción se da utilizando el devanado primario de un transformador auxiliar  $IK$  alimentado por la corriente residual.

El término  $3I_{OE} \frac{Z_{OM}}{3Z_1}$  se toma de la corriente residual de la línea paralela y se alimenta el secundario del mismo transformador.

Haciendo un razonamiento similar al de los relevadores KD10-11, el alcance del relevador está dado por las siguientes expresiones:

$$X = \frac{10T}{M_C + M_F} \quad \text{para las zonas 1 y 2} \quad (\text{Ec. 29})$$

$$X = \frac{25T}{M_C + M_F} \quad \text{para la zona 3} \quad (\text{Ec. 29.a})$$

Donde:

$T = T_L = T_0 =$  taps del transformador compensador

$M_C =$  taps enteros del autotransformador

$M_F =$  taps decimales del autotransformador

Donde la conmutación para las zonas de operación se efectúa por los contactos  $T_{2x}$  y  $T_{3x}$  del Relé de tiempo que a su vez es arrancado por el relé  $T_1$  después que la unidad direccional y el discriminador cierran sus contactos.

De la fig. (31) nótese lo siguiente:

Inicialmente sólo están cerrados los contactos tipo "b"; una vez transcurrido el tiempo de zona 2, opera el relé  $T_{2x}$  cerrando todos sus contactos tipo "a", con lo cual se conmuta la posición de los taps de voltaje, disminuyendo el voltaje de retención aplicado a la unidad e incrementando el alcance.

Si sigue transcurriendo el tiempo, opera el relé  $T_{3x}$  disminuyendo aún más el voltaje, cayendo en la zona 3 de operación. Además en este caso entra a funcionar todo el devanado secundario del transformador compensador, cambiando el ajuste de la zona 3 por esta razón hay un ajuste para las zonas 1 y 2 y otro para la zona 3.

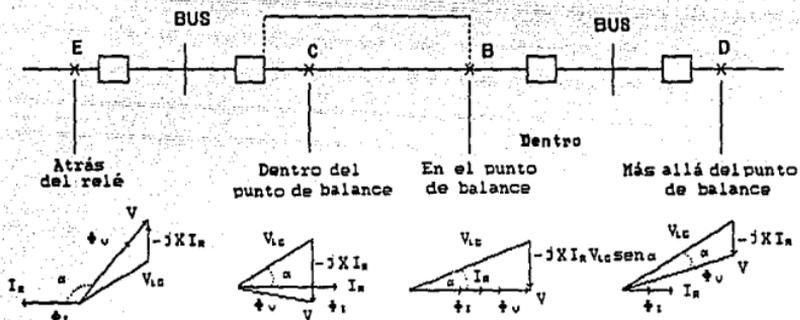


Figura 29. Impedancia vista por el relé KDXG en distintas localizaciones de falla

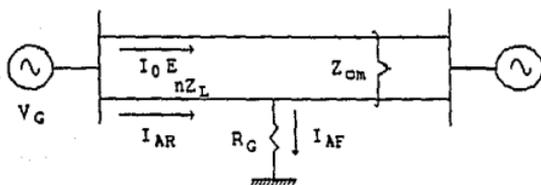


Figura 30. Impedancia vista por el relé KDXG

05

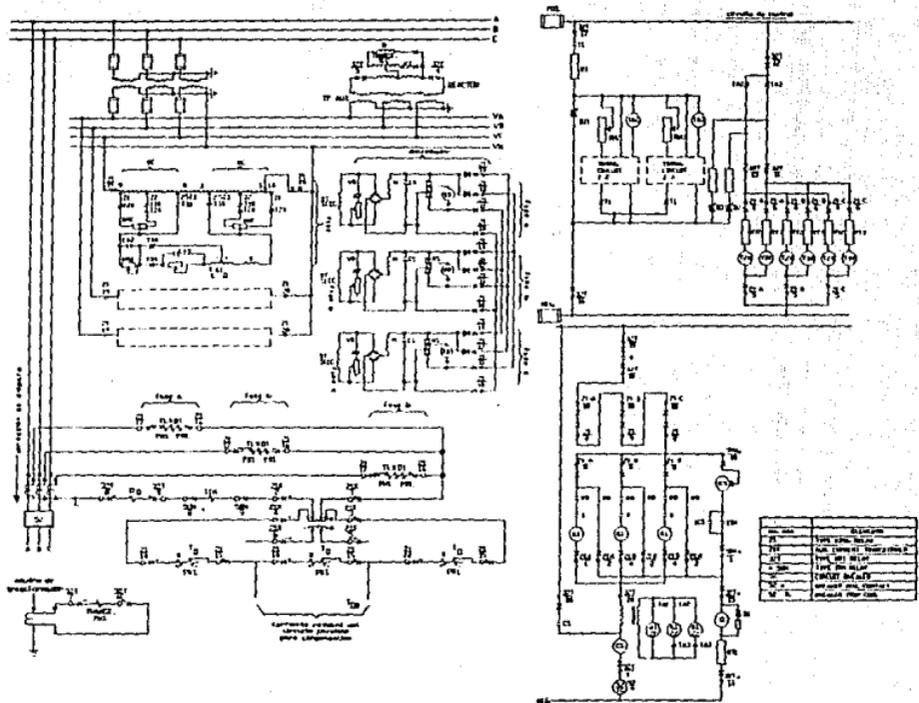


Figura 31. Diagrama de control rele KDXG

#### 4.- CRITERIOS DE AJUSTES

##### A.- RANGOS

###### Relevadores GCY

Recordando que éste relevador consta de tres unidades del tipo mho para sus tres zonas de operación, y refiriéndonos a la ecuación (16), tenemos que:

$$T = \frac{Z_{\min} \cos(\theta - \tau) T_E}{Z_L} \quad (\text{Ec. 30})$$

Es la fórmula para calcular el tap de ajuste de las tres zonas de operación

Donde:

$T$  = Ajuste del tap de restricción en %

$Z_{\min}$  = Alcance mínimo básico

$Z_L$  = Alcance deseado en ohms secundarios

$\theta$  = Angulo de la impedancia  $Z_L$

$\tau$  = Angulo de par máximo del relevador

$T_E$  = Ajuste del tap de entrada en % (generalmente 100%)

Las unidades M1 y M2 tienen un ángulo de par máximo de 60° que si se requiere puede ser ajustado en el campo a 75°, sin embargo se recomienda 60° debido a la resistencia de arco. Los parámetros completos se muestran en la siguiente tabla:

Unidad	Alcance min. básico ohms	Ang. de par máximo grados	Rango ohms	Offset ohms
M1	0.75 corto	60	0.75 a 7.5	no
	1.50 std.	60	1.50 a 15.0	no
	3.00 largo	60	3.00 a 30.0	no
M2	1 corto	60	1.0 a 10.0	no
	2 std.	60	2.0 a 20.0	no
	3 largo	60	3.0 a 30.0	no
OM3	3	75	3.0 a 30.0	0 a 0.5

Tabla I

###### Relevadores GCX

Refiriéndonos a la ecuación (18), para las unidades de reactancia tenemos que:

$$T = \frac{X_{\min}}{X_L} T_E \quad (\text{Ec. 31})$$

Es la fórmula para el cálculo del ajuste de las zonas 1 y 2, donde:

$T$  = Ajuste del tap de restricción en %

$X_{\min}$  = Alcance mínimo básico en  $\Omega$  s

$X_L$  = Alcance deseado en  $\Omega$  s

$T_E$  = Ajuste del tap de entrada en % ( generalmente 100 )

Para el ajuste de la zona 3 se utiliza la misma fórmula que se usa para los relevadores tipo GCY vistos anteriormente.

Al igual que para los relés GCY, mostramos una tabla con los valores disponibles para ajuste.

Unidad	Alcance mínimo corto	básico en $\Omega$ s standard	Ang. par máximo grados	Offset en $\Omega$ s
OHM 1	0.1	0.25	90	no
	0.2	0.50	90	no
	0.4	1.0	90	no
OHM2	0.1	0.25	90	no
	0.2	0.50	90	no
	0.4	1.0	90	no
MHO	1.0	3.0	60	no

Tabla II

### Relevadores GCXG

Siendo este relevador similar en su construcción al relevador GCX, se aplican exactamente las mismas formulas variando únicamente los valores utilizados para el cálculo, las cuales repetiremos para reafirmarlas.

Para las zonas 1 y 2:

$$T = \frac{X_{\min}}{X_L} T_E \quad (\text{Ec. 32})$$

Para la zona 3:

$$T = \frac{Z_{\min} \cos(\theta - \tau) T_E}{Z_L} \quad (\text{Ec. 33})$$

A continuación presentamos su tabla correspondiente a sus parámetros de ajuste:

Relevador	Unidad $Z_{min}$ en $\Omega$ s	OHM Rango en $\Omega$ s	Unidad $Z_{min}$ en $\Omega$ s	Arranque Rango en $\Omega$ s	Ang. par. Max. Grados
Alcance corto	0.1/0.2/0.4	0.1 a 4.0	1/3	1.0 a 30.0	60
Alcance std.	0.25/0.5/1.0	0.25 a 10.0	1/3	1.0 a 30.0	60
Alcance largo	0.5/1.0/2.0	0.5 a 20.0	2/6	2.0 a 60.0	60

Tabla III

### Relevadores KD4 y KD41

Refiriéndonos a la ecuación ( 26 ) recordamos que el alcance del relevador está dado por:

$$Z = \frac{ST}{1 \pm M} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde

Z = Alcance deseado en ohms secundarios

S = Valor del tap del primario del transformador

T = Valor del tap del compensador

M = Valor del tap del secundario del autotransformador

Los valores disponibles de los taps son:

$T = T_{AB} = T_{BC} : 0.87, 1.16, 1.45, 2.02, 2.9, 4.06, 5.8$

$S = S_A = S_C : 1, 2, 3$

$M = M_A = M_C : 0.03, 0.09, 0.06$

Nota: Para obtener los valores positivos de "M", la terminal "L" deberá situarse sobre la terminal "R"; asimismo para obtener valores negativos de "M", la terminal "R" se ubicará sobre la "L".

Recordemos que estos valores están referidos al ángulo de par máximo de la unidad respectiva y que si deseamos calcular el alcance del relevador a otro ángulo diferente debemos usar la ecuación:

$$Z_R = \frac{Z \theta}{\cos(\theta_m - \alpha)} \quad (\text{Ec. 35})$$

Donde:

$Z_R$  = Alcance del relevador

$Z \theta$  = Alcance calculado

$\theta_m$  = Angulo de par máximo del relevador

$\alpha$  = Angulo de la línea

En la siguiente tabla aparecen relacionados los valores de T,S,M respecto de Z

T															
S=1				S=2				S=3				"M"		Terminal	
0.87	1.16	1.45	2.03	2.9	4.06	5.80	4.06	5.80	4.06	5.80	+	-	"L"	"R"	
0.73	0.98	1.23	1.72	2.46	3.44	4.92	-	9.83	-	14.7	0.18		0.06	0	
0.75	1.01	1.26	1.76	2.52	3.53	5.04	-	10.1	-	15.1	0.15		0.06	0.03	
0.77	1.04	1.29	1.81	2.59	3.63	5.18	7.26	10.4	-	15.5	0.12		0.09	0	
0.79	1.06	1.33	1.86	2.66	3.72	5.32	7.45	10.6	-	16.0	0.09		0.09	0.03	
0.82	1.09	1.37	1.91	2.74	3.83	5.47	7.66	10.9	-	16.4	0.06		0.06	0.09	
0.84	1.13	1.41	1.97	2.82	3.94	5.63	7.88	11.3	-	16.9	0.03		0.03	0	
0.87	1.16	1.45	2.03	2.90	4.06	5.80	8.12	11.6	-	17.4	0	0	0	0	
0.89	1.20	1.49	2.09	2.99	4.19	5.98	8.37	12.0	-	17.9		0.03	0	0.03	
0.92	-	1.54	2.16	3.09	4.32	6.17	8.64	12.3	-	18.5		0.06	0.09	0.06	
0.95	-	1.59	2.23	3.19	4.46	6.37	8.92	12.7	-	19.1		0.09	0.03	0.09	
-	-	1.65	2.31	3.30	4.61	6.59	9.23	13.2	-	19.8		0.12	0	0.09	
-	-	1.71	2.39	3.41	4.78	6.82	9.55	13.6	-	20.5		0.15	0.03	0.06	
-	-	-	-	-	-	7.07	-	14.1	14.8	21.2		0.18	0	0.06	

Tabla IV

### Relevador KDXG

Recordando las ecuaciones ( 29 ) y ( 29.a )

$$X_1 = \frac{10T}{M_C + M_F} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$X_1 = \frac{25T}{M_C + M_F} \quad (\text{Ec. 37})$$

Los valores disponibles de los taps son:

$$T = T_L = T_0:$$

$M_C$  : 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9

$M_F$  : 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0

## B.- ZONAS DE PROTECCION

Tradicionalmente se usan 3 zonas para proveer protección a una línea de transmisión y respaldar al mismo tiempo a las estaciones remotas adyacentes a la línea considerada.

La zona 1 es ajustada normalmente al 80% de la impedancia total de secuencia positiva de la línea considerada y es de operación instantánea con el objeto de librar la falla en el menor tiempo posible para evitar daños innecesarios al equipo primario. Este ajuste puede ser movable en la práctica desde el 80 al 90% y su propósito es proveer un factor de seguridad por diferencias e inexactitudes en relevadores, transformadores de corriente y potencial, impedancia de la línea, etc.

La zona 2 en cambio tiene un retardo de tiempo intencional en su operación, y es alrededor de 0.2 seg. en sistemas de 400 kilovolts. Este tiempo hasta cierto punto es un valor convencional que la experiencia nos dice que es el más recomendable. En el caso de sistemas de menor voltaje, el valor de este tiempo dependerá en gran medida de la coordinación con otras protecciones tales como 51s y 67s. El alcance de la zona 2 deberá ser ajustado al 100% de la línea más el 50% de la línea adyacente más corta.

La zona 3 deberá tener un ajuste igual al 100% de la línea protegida; más 100% de la línea adyacente más larga, más un 10% de la siguiente línea adyacente, principalmente donde existe el efecto de la línea paralela en donde se ven reducidos los ajustes.

También la zona 3 tiene un retardo de tiempo intencional de alrededor de 1 segundo. Este último valor también empírico.

### El Efecto Infeed en Relevadores de Distancia.

Este efecto se encuentra ilustrado en la fig. 32, donde puede verse que cuando existen otras líneas o fuentes de corriente de alimentación a la falla, el alcance del relevador es reducido en proporción a la magnitud de dicha corriente.

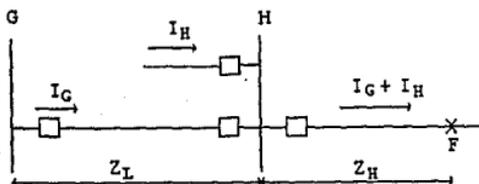


Figura 32. Efecto infeed en relevadores de distancia

Sea una falla en el punto F y el relevador localizado en el bus G, entonces:

$$V_G = I_G Z_L + (I_G + I_H) Z_H$$

Puesto que el relevador sólo recibe la corriente  $I_G$ , la impedancia aparente será:

$$Z_{Ga} = \frac{V_G}{I_G} = Z_L + Z_H + \frac{I_H}{I_G} Z_H \quad (\text{Ec. 38})$$

$$Z_{Ga} = Z_L + \frac{Z_H}{K}$$

donde:

$$K = \frac{I_G}{I_G + I_H} \quad \text{es el factor de distribución de corrientes.}$$

$Z_{Ga}$  = Impedancia medida por el relevador

Por otra parte, la impedancia real al punto de falla F es:

$$Z_{Gr} = Z_L + Z_H$$

Donde vemos que si  $I_H = 0$  (sin infeed), la Z aparente es igual a la Z real; de la ecuación (38) se ve que la Z aparente está incrementada por un factor  $\frac{I_H}{I_G} Z_H$ , esto quiere decir que el alcance del relevador decrece en esta proporción. Lo cual se debe tomar en cuenta en el cálculo de ajustes de las zonas 2 y 3.

En la figura 33 se ilustra gráficamente la aplicación de las zonas de operación.

Nótese que en el caso de líneas paralelas con igual longitud, tanto el ajuste del alcance como el de tiempo deben ser los mismos en todos los relevadores de cada estación, mientras que en el caso de líneas paralelas con diferente longitud habrá que hacer alguna consideración tanto de alcances como de tiempos.

Por ejemplo, en la figura 33, debido a la reducción de alcances por efecto de línea paralela, se puede incrementar el ajuste del alcance de las zonas 2 y 3 de los relevadores del bus G y aumentar los ajustes de tiempo correspondientes para coordinación con los tiempos de las líneas HV, HW y WX.

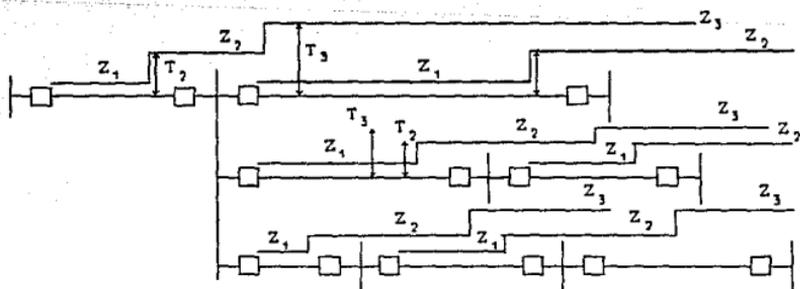
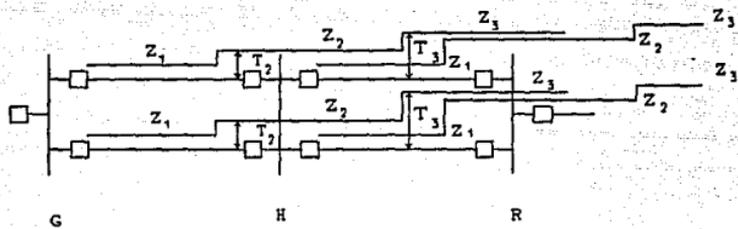


Figura 33. Aplicación de las zonas de protección

## 5.- OSCILACIONES DE POTENCIA.

Si en un sistema de potencia hacemos las siguientes consideraciones: se desprecia la resistencia de las líneas, se excluye la impedancia de carga, se desprecia la saliencia de las máquinas. La potencia transmitida a través de un circuito que conecta 2 porciones de un sistema es:

$$P = \frac{V_s V_R}{X} \operatorname{sen} \delta \quad (\text{Ec. 39})$$

donde:

- $V_s$  = voltaje en el extremo emisor
- $V_R$  = voltaje en el extremo receptor
- $\delta$  = ángulo entre los dos voltajes
- $X$  = reactancia del circuito

Al ocurrir un incremento de carga en el extremo receptor, esto provoca un frenado de las máquinas síncronas, lo cual resulta en un cambio momentáneo de frecuencia hasta que hay un aumento de potencia mecánica a través del regulador de velocidad, el cual toma cierto tiempo para accionar.

Resumiendo, cualquier cambio en la carga da como resultado un penduleo u oscilación del sistema. A la habilidad de dicho sistema para ajustar ese cambio se le conoce como estabilidad en estado estable.

Por el contrario la estabilidad transitoria es la habilidad del sistema para soportar cambios bruscos tales como rechazos de carga, fallas, maniobras, etc.

En este caso la potencia está dada por la expresión

$$P = \frac{V'_s V'_R}{X'} \operatorname{sen} \eta \quad (\text{Ec. 39.a})$$

donde:

- $V'_s$  = voltaje detrás de la reactancia transitoria en el emisor.
- $V'_R$  = voltaje detrás de la reactancia transitoria en el receptor.
- $X'$  = reactancia entre  $V'_s$  y  $V'_R$  incluyendo la reactancia transitoria de las máquinas.
- $\eta$  = ángulo entre los voltajes.

Para efectos de explicación si asumimos que  $|V'_s| = |V'_R|$  y que la frecuencia de  $V'_s$  es fija y la que varía es  $V'_R$ . Entonces podemos considerar a  $V'_R$  como un vector que gira y a  $V'_s$  como estático. (Fig. 34).

Si el sistema es inestable  $V'_{R}$  continuará desplazándose hasta alcanzar el valor máximo de 180. En este momento la diferencia de potencial es máxima y por lo tanto también la corriente que circula por la línea; el punto de voltaje cero definido en estas condiciones se le conoce como el centro eléctrico del sistema.

Obviamente, cuando los voltajes están en fase no hay ninguna circulación de corriente por la línea; estas variaciones de voltaje y corriente implican un cambio en la impedancia vista por el relevador, según se muestra gráficamente en el diagrama R - X de la fig. 35.

Supóngase que en el punto J el ángulo entre los voltajes es  $60^{\circ}$ , la impedancia vista desde el bus S' se movería a través de la línea de oscilación  $|V'_{S}| = |V'_{R}|$  en dirección al centro eléctrico. Si la oscilación es contrarrestada, la impedancia vista se regresará sobre la misma línea; pero si ésta no es amortiguada y/o eliminada, continuará moviéndose, pasando por el centro eléctrico hasta ponerse del lado izquierdo hasta que el ángulo sea  $360^{\circ}$  y empieza otra vez el ciclo oscilatorio.

En cualquiera de los dos casos resulta evidente que estas oscilaciones penetran o pueden penetrar en la característica de operación de los relevadores de distancia, produciendo operaciones indeseadas.

Por esta razón resulta necesario contar con un dispositivo que bloquee la señal de disparo en estas condiciones. Tal es el relevador de bloqueo por oscilaciones, cuyo número ASA correspondientes es el 68 que es por lo general un relevador de característica MHO desplazada que envuelve a la característica de zona 2 del relé de distancia, más un cierto margen que es alrededor de 2 ohms y que la mayoría de las veces es ajustado por recomendación directa del fabricante.

El relevador más comunmente usado es el tipo CEB51A de la General Electric. Como ya dijimos anteriormente, este relevador utiliza una característica MHO desplazada y para lograrlo se alimenta con el voltaje  $V$  y con la corriente delta correspondiente a dichas fases; de esta manera el alcance ohmico de la unidad MOB es el mismo para fallas trifásicas, fase a fase, y dos fases a tierra.

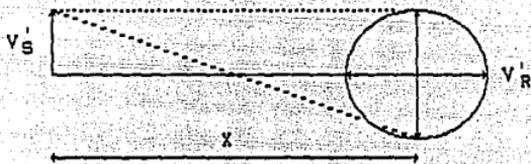


Figura 34.

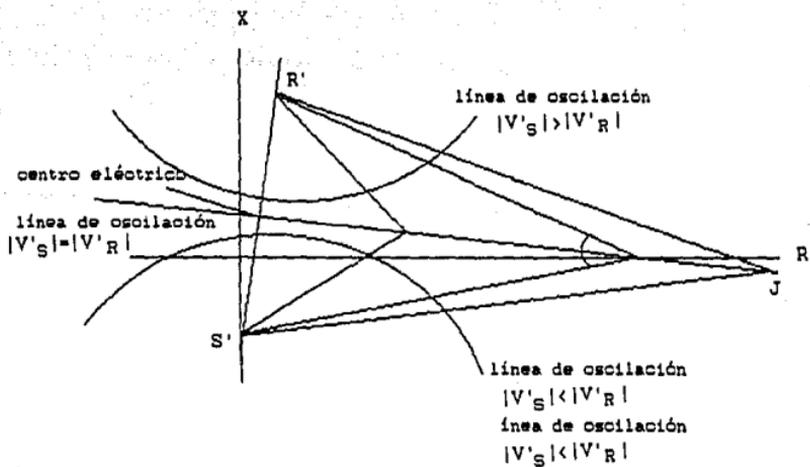


Figura 35

### III.-ESQUEMAS DE PROTECCION ESTATICOS

#### 1.- ESQUEMA DE PROTECCION SLDY-51

##### A.- DESCRIPCION.

Este esquema basa su operación en los principios de comparación de fase y de comparación direccional.

El esquema completo está constituido por los siguientes módulos:

SLDY51  
SLA55  
SLAT  
SSA

El módulo SLDY51 es un relevador que procesa las señales de corriente y voltaje que provienen de los TC s y los TP s, y nos proporciona las funciones de secuencia positiva, negativa y cero para cualquier tipo de falla.

El módulo SLA55 es una unidad completamente de componentes lógicos, y es donde se procesa toda la información obtenida en el módulo anterior, así como también la que proviene del extremo remoto.

El módulo SLAT es la unidad de salida, la cual nos proporciona los circuitos de disparo, señalización y otras señales para registro.

El módulo SSA es el que proporciona la alimentación de c.d. para todos y cada uno de los módulos anteriores.

##### Módulo SLDY51

El SLDY51 es un relé que contiene funciones de distancia de secuencia positiva de característica mho, y de sobrecorriente de secuencia positiva, negativa y cero.

Las funciones de secuencia positiva son:

- MT.- Función de disparo de característica mho de sobrealeance.
- MB.- Función de bloqueo de característica mho.
- MOB.- Función de bloqueo para oscilaciones.
- J1T.- Detector de sobrecorriente para supervisión de disparo.
- J1B.- Detector de sobrecorriente para supervisión de bloqueo.
- V1.- Detector de voltaje.

Las funciones de corriente de secuencia negativa son:

FDL.- Función de sobrecorriente de ajuste bajo para excitación o bloqueo del transmisor.

FDHL.- Función de sobrecorriente de disparo de ajuste medlo.

FDHH.- Función de sobrecorriente de disparo de ajuste alto.

SQ.AMP.- Convertidor de onda cuadrada.

Función de corriente de secuencia cero:

G 4.- Función de sobrecorriente de disparo directo.

## B.- PRINCIPIOS DE MEDICION.

### Comparación de Fase.

La comparación de fase consiste básicamente en comparar el defasamiento entre las señales de corriente de los dos extremos de la línea protegida, utilizando para ésto un enlace de comunicación para decidir si la falla es interna o externa a la línea, y enviar señal de disparo o bloqueo respectivamente.

Antes de comenzar con la manera de como se efectúa la comparación, vamos a decir como se conectan las señales de corriente a la protección, para ver en que sentido circula por ésta con respecto al flujo primario.

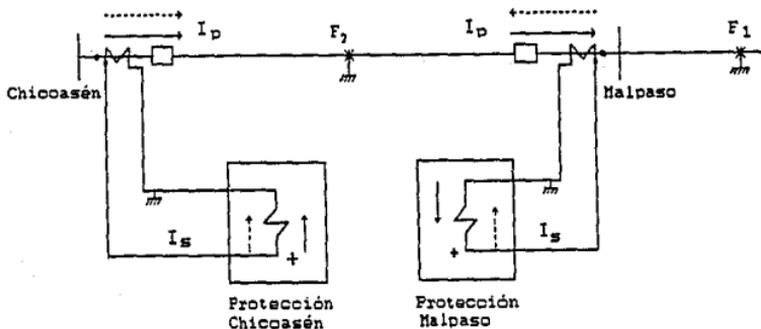


Figura 36. Conexiones de corriente en las protecciones de comparación de fase

La conexión es como lo muestra la figura 36. Si analizamos una falla externa en  $F_1$  donde el flujo de corriente se indica con trazo continuo, y teniendo en cuenta la polaridad de los TC s, vemos que para esta condición la corriente secundaria que circula por la protección de Chicoasén (CHI) lo hace de polaridad (+) a no polaridad, mientras que en la protección de Malpaso (MPS) lo hace de no polaridad a polaridad, con esto vemos pues, que mientras que la corriente primaria de CHI está en fase con la corriente primaria de MPS, en las protecciones se encuentran  $180^\circ$  defasadas.

Ahora bien, para una falla interna en  $F_2$  las corrientes primarias (indicadas con trazo punteado), en CHI y MPS están  $180^\circ$  defasadas, pero para esta condición tanto en la protección de CHI como en la de MPS, las corrientes secundarias circulan de polaridad (+) a no polaridad, se dice entonces que las corrientes están en fase.

Para efectuar la comparación de fase, el esquema cuenta con :

- Un canal de comunicación que lleva la señal de corriente de un extremo a otro.
- Un circuito amplificador de onda cuadrada que convierte la señal senoidal a una de onda cuadrada.
- Un circuito receptor de la señal de extremo opuesto.
- Un circuito transmisor de la señal local.
- Un circuito comparador de las dos señales (local y remota).
- Un circuito temporizador.

La comparación de fase se explicará suponiendo primero una falla externa y después una interna, en el primer caso no deberá de existir señal de disparo, mientras que en el segundo sí, pues se trata de una falla sobre la línea protegida. Aunque nos vamos a referir únicamente a lo que pasa en la protección del extremo CHI, en la protección del extremo MPD estará ocurriendo lo mismo, pues la comparación se efectúa simultáneamente en ambas protecciones.

Refiriéndonos a las figuras 37 y 38; para una falla externa en  $F_1$  como se vió anteriormente, la señal local y la recibida, esto es, las corrientes secundarias que circulan por ambas protecciones CHI y MDP están  $180^\circ$  fuera de fase.

Bajo esta condición podemos ver que en las entradas del comparador AND, no estarán presentes simultáneamente los dos semiciclos positivos, por lo tanto no habrá señal de disparo en su salida.

Para el caso de falla interna en  $F_2$  y de acuerdo con las figuras 39 y 40 tenemos lo siguiente: Dado que la señal que se recibe de la protección de MPD está en fase con la señal local (CHI),

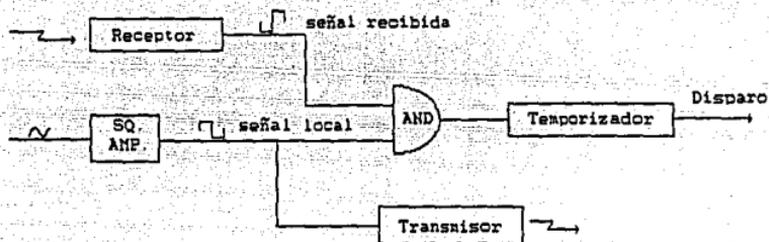


Figure 37. Diagrama esquemático para la comparación de fase

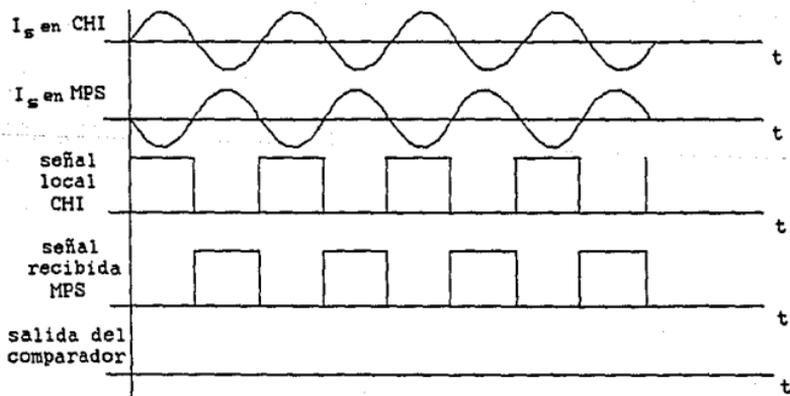


Figure 38. Señales para falla externa

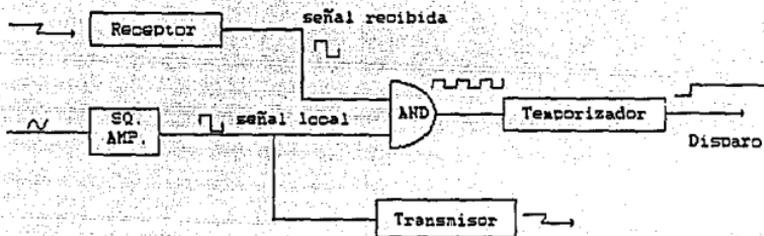


Figura 39. Diagrama esquemático para la comparación de fase

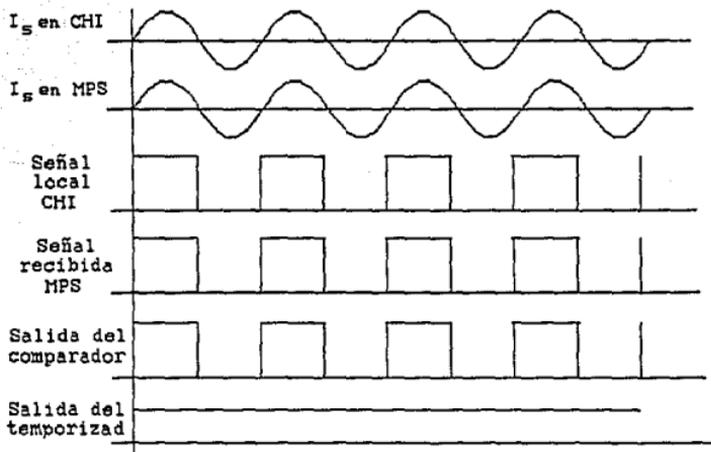


Figura 40. Señales para falla interna

y siendo los semiciclos positivos los que se comparan, entonces podemos ver que las dos señales estarán presentes simultánea y continuamente durante 8.33 m seg. en la entrada del comparador con lo cual tendremos en su salida una señal como la que se muestra, la misma que es aplicada a la entrada del temporizador, cuya salida en este caso será una señal de voltaje de + 15 Vc.d. continua por efecto del tiempo de reposición (drop-out) del mismo, y sostenida hasta que la falla sea eliminada.

### Comparación Direccional.

La comparación direccional se realiza con las funciones de secuencia positiva de característica mho.

Para explicar la forma en que se realiza la comparación direccional, tomemos como ejemplo una de las líneas Chicoasén-Malpasso (CHI-MPS), tanto en Chicoasén como en Malpasso existe una protección SLDY51, enlazadas ambas por un canal de comunicación por Onda Portadora en Línea de Alta Tensión (OPLAT). Ambas protecciones tienen como ya dijimos dos funciones de características mho, una de disparo (MT) que "vé hacia la línea protegida, y una de bloqueo (MB) que "vé" hacia atrás de la línea, tal como aparece en la figura 41.

Supongamos una falla externa atrás de Chicoasén en  $F_1$ , entonces la protección de Chicoasén operará con su función de bloqueo (MB), por lo tanto no habrá disparo, y al mismo tiempo por medio del canal de comunicación envía una señal a la protección de Malpasso para bloquearla, aún cuando en esta protección haya operado su función de disparo (MT), de esta manera, ninguno de los dos interruptores abrirá.

Ahora supongamos la falla dentro de la línea en  $F_2$ , en ambas protecciones operará la función de disparo (MT), y como ninguna de las dos recibe señal de bloqueo de la otra, entonces ambas mandan señal de disparo a su interruptor correspondiente.

### Obtención de las Funciones de Secuencia Positiva.

Para la obtención de las diferentes funciones de secuencia positiva el módulo SLDY51 contiene dos filtros de secuencia positiva, uno de voltaje y otro de corriente.

#### Filtro de Secuencia Positiva de Voltaje.

Este filtro está ilustrado en la figura 42, de acuerdo con este circuito, y si llamamos a la derivación de salida como  $V_x$ , tenemos entonces que:

$$V_x = V_{BC} \left[ \frac{KP_1 + R_2}{R_1 + R_2 + P_1} \right] + V_{CA} \left[ \frac{mP_2}{mP_2 + \frac{1}{j\omega c}} \right]$$

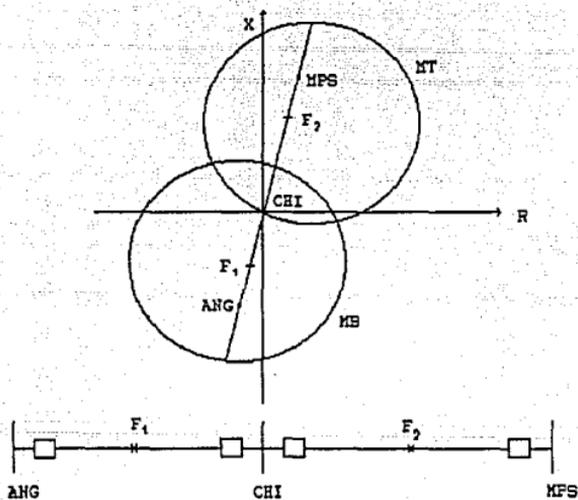


Figure 41

donde K y m son los porcentajes usados de los potenciómetros P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>.  
 Por diseño:

$$\left[ \frac{KP_1 + R_2}{R_1 + R_2 + P_1} \right] = \frac{1}{2}$$

$$\left[ \frac{mP_2}{mP_2 + \frac{1}{\omega c}} \right] = \frac{1}{2} [60^\circ]$$

por lo tanto

$$V_x = \frac{1}{2} V_{BC} + \frac{1}{2} V_{CA} [60^\circ] \quad (\text{Ec. 40})$$

De las ecuaciones (4.B) del apéndice y sustituyendo los valores de V<sub>A</sub>, V<sub>B</sub> y V<sub>C</sub> en ecuación (40) tenemos:

$$V_x = \frac{1}{2} [(V_{A0} + a^2 V_{A1} + a V_{A2}) - (V_{A0} + a V_{A1} + a^2 V_{A2})] + \frac{1}{2} [60^\circ [(V_{A0} + a V_{A1} + a^2 V_{A2}) - (V_{A0} + V_{A1} + V_{A2})]$$

$$V_x = \frac{1}{2} [(a^2 - a)V_{A1} + (a - a^2)V_{A2}] + \frac{1}{2} [60^\circ [(a - 1)V_{A1} + (a^2 - 1)V_{A2}]$$

$$V_x = 0.866(V_{A1} [-90^\circ] + V_{A1} [210^\circ] + V_{A2} [90^\circ] + V_{A2} [-90^\circ])$$

Finalmente

$$V_x = 1.5 V_{A1} [240^\circ] \quad (\text{Ec. 41})$$

Para una entrada de pura secuencia positiva tenemos:

$$V_x = 0.866 V_{CA} [90^\circ]$$

Esta señal V<sub>x</sub> es aplicada al devanado primario del transformador de voltaje T<sub>A</sub> (fig. 45), el cual tiene en su devanado secundario derivaciones que proporcionan la restricción de voltaje del 10% al 100% para el ajuste de las funciones de distancia.

Por otro lado la salida total del transformador T<sub>A</sub> nos proporciona la señal V<sub>1</sub> cuya aplicación se tratará posteriormente.

#### *Filtro de Secuencia Positiva de Corriente.*

Este filtro está ilustrado en la figura 43. Consiste de dos transformadores (TB y TC), cada uno con dos devanados primarios y una carga resistiva ajustable en el devanado secundario.

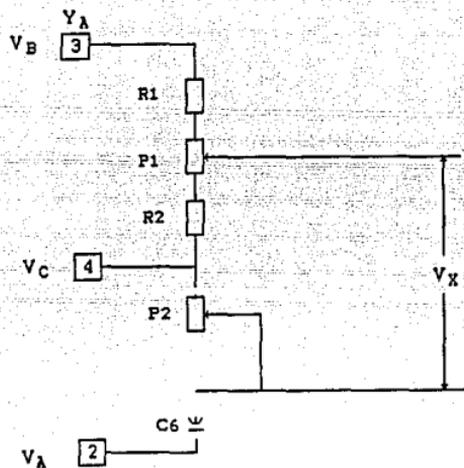


Figura 42. Filtro de secuencia positiva de voltaje

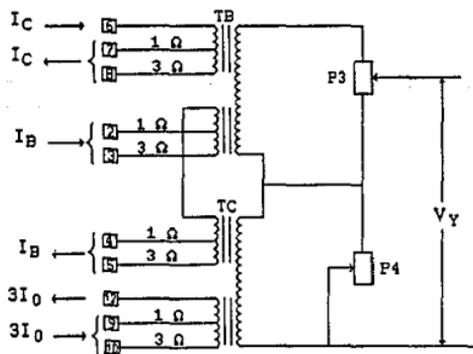


Figura 43. Filtro de secuencia positiva de corriente

Por diseño del relé:

$$Z_{TC} = 0.85\sqrt{3} Z_{TB} \quad (\text{Ec. 42})$$

$$\theta_{TB} = 75^\circ$$

$$\theta_{TC} = 45^\circ$$

Llamando  $V_Y$  al voltaje de salida, tenemos:

$$V_Y = K Z_{TB} (I_C - I_B) \angle 75^\circ + Z_{TC} (I_B - \frac{1}{3} I_N) \angle 45^\circ \quad (\text{Ec. 43})$$

donde:

$K$  = porcentaje del potenciómetro  $P_3$

$I_N$  = corriente de neutro ( $3I_0$ )

si  $K = 0.85$  y sustituyendo (42) en (43)

$$V_Y = 0.85 Z_{TB} (I_C - I_B) \angle 75^\circ + 0.85\sqrt{3} Z_{TB} (I_B - \frac{1}{3} I_N) \angle 45^\circ$$

sustituyendo las ecuaciones (4.B) del apéndice en la ecuación anterior, y simplificando tenemos:

$$V_Y = 0.85\sqrt{3} Z_{TB} (I_{A1} \angle 165^\circ + I_{A1} \angle 285^\circ + I_{A2} \angle -15^\circ + I_{A2} \angle 165^\circ)$$

finalmente

$$V_Y = 0.85\sqrt{3} Z_{TB} I_{A1} \angle 225^\circ \quad (\text{Ec. 44})$$

De manera similar al desarrollo anterior se puede mostrar que el filtro de secuencia positiva no produce salida cuando es aplicada a la entrada cantidades de pura secuencia negativa.

La salida  $V_Y$  es aplicada a un circuito defasador R-C, como puede verse en la figura 44. La salida de este circuito se encuentra entre la unión del capacitor  $C7$  y el potenciómetro  $P6$  y la unión de la resistencia  $R3$  con la resistencia  $R4$ . El ángulo de fase de la salida de este circuito puente con respecto a la entrada lo podemos ajustar por medio del potenciómetro  $P6$ , este circuito puente es el que nos proporciona el ángulo ajustable para el Alcance Base del Relé.

La salida de este circuito defasador es aplicado a las tarjetas através de un divisor de voltaje que consiste del potenciómetro  $P5$  y la resistencia  $R5$ . Por medio del potenciómetro  $P5$  se puede proporcionar la magnitud apropiada del alcance base del relé al ángulo deseado.

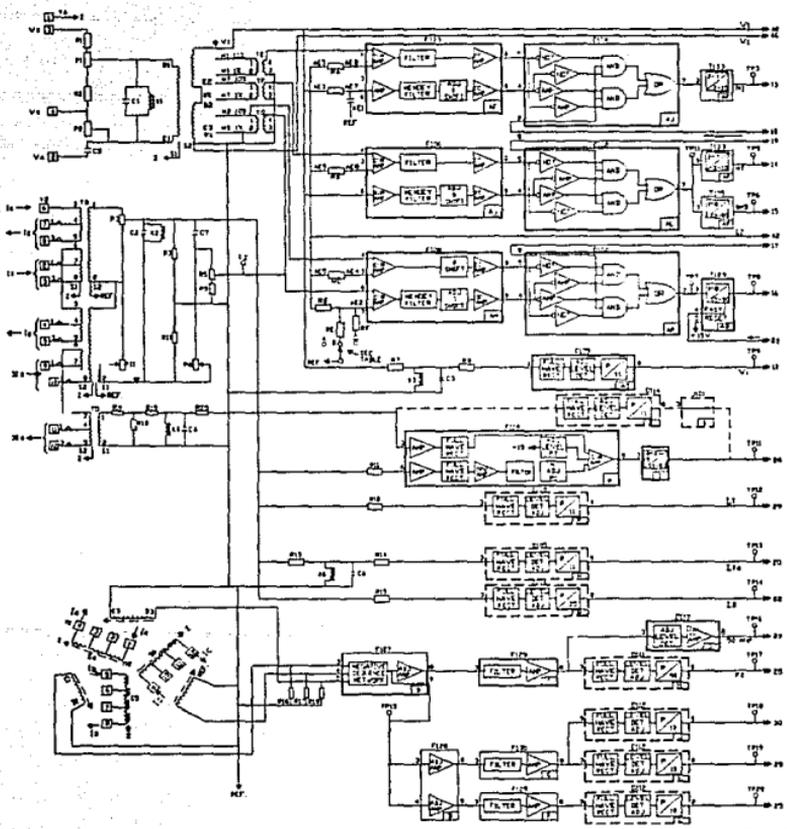


Figura 44. Conexiones internas del rele SLDY 51.

## Obtención de las Características Mho.

En la figura 45 se ilustra la forma en que es obtenida la característica mho. La cantidad  $I_1 Z$  es un voltaje proporcional a la corriente de secuencia positiva que circula por la línea de transmisión, la cual es obtenida del filtro de secuencia positiva de corriente, la cantidad  $V_1$  es proporcional al voltaje de secuencia positiva en la localidad del relé, y es obtenida del filtro de secuencia positiva de voltaje.

La cantidad  $I_1 Z - V_1$  es el vector diferencia entre esas dos cantidades;  $I_1 Z'$  es, como lo muestra la figura 45 el alcance hacia atrás del relé.

Si el ángulo entre  $(I_1 Z - V_1)$  e  $(I_1 Z' + V_1)$  es mayor de  $90^\circ$ , la impedancia vista por el relé queda fuera de su alcance, si este ángulo es igual a  $90^\circ$  la impedancia se encuentra en el punto de balance del alcance del relé, si por el contrario el ángulo es menor de  $90^\circ$  la impedancia se encuentra dentro del alcance del relé.

Las magnitudes  $I_1 Z$  y  $V_1$  son combinadas en amplificadores operacionales y convertidas de ondas senoidales a ondas cuadradas, y es en estas ondas donde se efectúa la medición del defasamiento entre ellas para determinar en que punto de la característica del relé se encuentra la impedancia que se está midiendo. Podemos ver entonces que la característica mho está determinada por la acción de un amplificador operacional, una tarjeta de coincidencia y un temporizador.

### Función MT.

Haciendo referencia a la figura 44 se observa que la tarjeta F106 (AG) se suministran tres señales,  $I_1 Z$ ,  $V_1$  y  $-V_1$ , las salidas de esta tarjeta son ondas cuadradas de +15 Vcd y -15 Vcd, la que se obtiene en la terminal 9 es la magnitud de polarización derivada de  $V_1$ , y la que se obtiene en la terminal 8 es la magnitud de operación y se deriva de  $I_1 Z - V_1$ , también en esta tarjeta se ajusta el defasamiento de las señales de operación y de polarización.

La coincidencia de las señales anteriores es determinada en la tarjeta de coincidencia C102 (AL), la cual compara los medios ciclos positivos y negativos de cada onda y cuando ambas coinciden se produce una salida que excita al temporizador T133 (AN) dando una salida si el tiempo de coincidencia (ancho de la onda que entra a T133) es igual o mayor al tiempo de su ajuste.

El efecto de adelantar o atrazar el voltaje de polarización con respecto al de operación se manifiesta en la dirección de la característica mho, como se muestra en la figura 46, donde los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  están determinados por el ajuste de tiempo de la tarjeta T133 (AN).

$$\alpha_1 = 7S - \Phi$$

$$\alpha_2 = 7S + \Phi$$

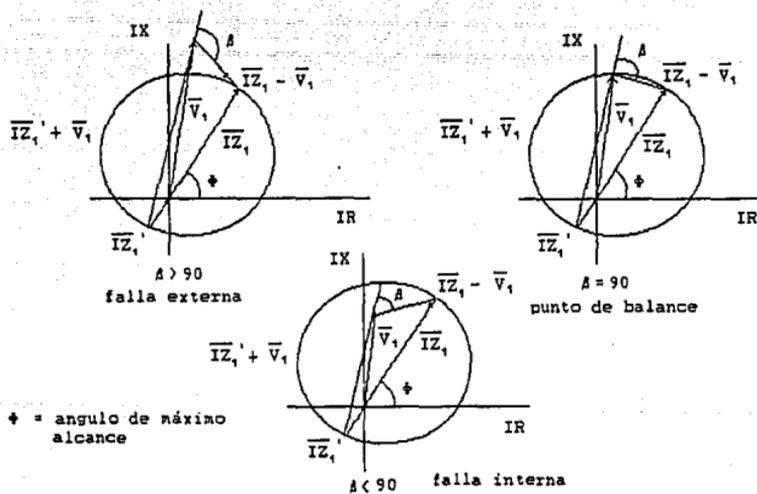
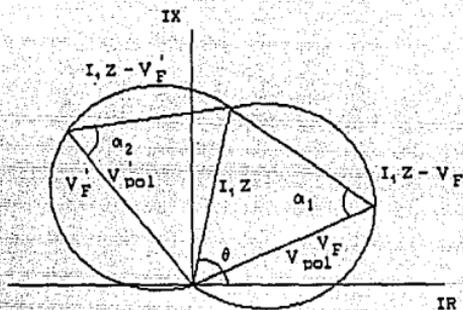
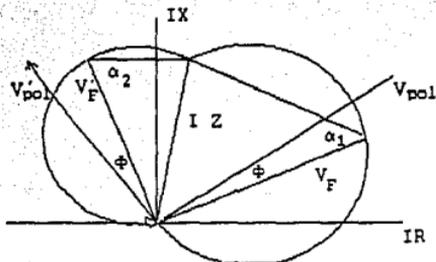


Figure 45. Obtención de las características mho de SLDY-51

$V_{pol}$  y  $V_F$  en fase  
 $\alpha_1 = 60$  ajuste del tiner  
 $\alpha_2 = 60$  ajuste del tiner  
 $\phi = 0$



$V_{pol}$  adelante de  $V_F$   $15^\circ$   
 $\phi = 15^\circ$   
 $\alpha_1 = 60 - 15 = 45^\circ$   
 $\alpha_2 = 60 + 15 = 75^\circ$



$V_{pol}$  atrás de  $V_F$   $15^\circ$   
 $\phi = -15^\circ$   
 $\alpha_1 = 60 - (-15) = 75^\circ$   
 $\alpha_2 = 60 - 15 = 45^\circ$

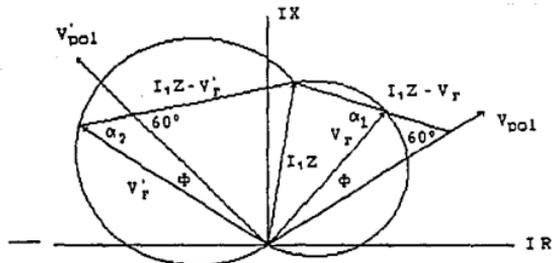


Figura 46. Efecto sobre la característica mho del desfaseamiento entre los voltajes

Donde:

TS = tiempo de ajuste del temporizador (en grados)

$\Phi$  = ángulo de defasamiento entre las cantidades de polarización y operación.

Las otras funciones mho como son MOB y MB se obtienen en forma similar a la descrita anteriormente, aunque con ligeras variaciones como son:

Para MOB es la misma señal de MT solo que el temporizador es independiente.

Para MB el principio de operación es el mismo, aunque sólo que la coincidencia se mide comparando el medio ciclo positivo de una señal con el medio ciclo negativo de la otra (señales de salida de filtro F10B, tarjeta (AH), además es adicionada en el filtro una entrada más que es  $I_{1Z}'$  para proporcionar un alcance inverso.

La gráfica de la característica mho puede construirse de la siguiente manera:

- 1.- Determine el alcance al ángulo base del relé de la función mho.
- 2.- Determine el tiempo de ajuste del temporizador característico, dado en grados.

$$\beta = (21.6)TS$$

Donde:

$\beta$  = ajuste del temporizador en grados

TS = ajuste del temporizador en milisegundos

- 3.- Determine el ángulo del diámetro de los lóbulos.

$$D_1 = \theta - \Phi + (90^\circ - \beta)$$

$$D_2 = \theta - \Phi - (90^\circ - \beta)$$

$D_1$  y  $D_2$  ángulos del diámetro en grados

$\theta$  = ángulo base del relé

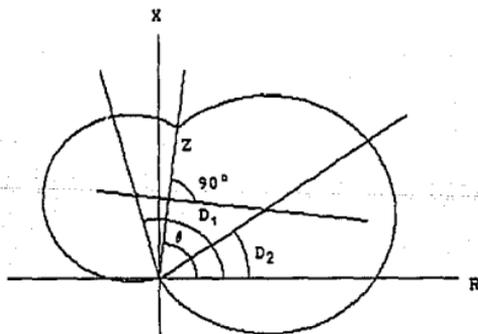
$\Phi$  = defasamiento de polarización

$\beta$  = ajuste del temporizador en grados.

El centro de cada lóbulo es el punto de diámetro ( $D_1, D_2$ ) que es equidistante a los extremos del alcance de la función, y puede encontrarse trazando una perpendicular bisectriz al alcance. Si la función tiene alcance únicamente en una dirección, un extremo del alcance está en el origen, si tiene en ambas direcciones, el alcance total será la suma de los alcances en cada dirección. La secuencia anterior se puede ver en la figura 47.

El detector de voltaje de secuencia positiva  $V_1$ , se deriva del mismo filtro de secuencia que las funciones  $mho$  y es un detector que opera con la magnitud de  $V_1$ , independientemente del ángulo de fase, y tiene un retardo de tiempo al decrecer  $V_1$  de su valor de ajuste, las componentes para detectar  $V_1$  son una tarjeta rectificadora que incluye el ajuste de nivel y el de retardo, como se muestra en la figura 44.

Las funciones  $I_1T$  e  $I_1B$  se derivan ambas del filtro de secuencia positiva de corriente, cuya salida como ya se dijo es un voltaje proporcional a la corriente de secuencia positiva. Esta señal se aplica a las tarjetas rectificadoras  $P$  y  $M$ , en donde también es ajustado el nivel de operación deseado, la salida de estas tarjetas constituye pues las funciones  $I_1T$  e  $I_1B$  respectivamente, ver figura 44, la operación de estas funciones es independiente del sentido del flujo de corriente.



$\theta$  = ángulo de alcance base del relé  
 $D_1$  } ángulos de los diámetros de las  
 $D_2$  } características de los 2 lóbulos

Figura 47

## Obtención de las Funciones de Secuencia Negativa

Para la obtención de las funciones de secuencia negativa el módulo SLDY51 tiene también un filtro de secuencia negativa de corriente, el cual está constituido por un transformador de corriente auxiliar trifásico (T3), y una tarjeta filtro (F127) que mezcla las señales de las tres fases, y su salida es un voltaje monofásico proporcional a la corriente de secuencia negativa. Ver figura 44.

### Filtro de Secuencia Negativa de Corriente.

El transformador auxiliar convierte la corriente recibida por el relé en señales de bajo nivel para poder ser operados por la tarjeta F127 (B), que es la malla de secuencia negativa, la cual se ilustra en la figura 48. El transformado auxiliar está conectado en estrella-delta, la conexión del secundario en delta elimina la corriente de secuencia cero. La carga en el secundario son tres resistencias de 5.0 ohms (R16, R17 y R18) conectadas en estrella con el común a la referencia lógica. La combinación de la relación de vueltas y la carga resistiva hacen que la salida del transformador aparezca como una fuente de voltaje para la tarjeta filtro. Las expresiones correspondientes a estos voltajes son:

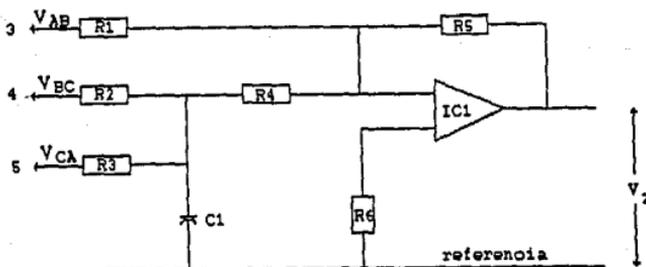


Figura 48. Malla de secuencia negativa

$$V_{AB} = 0.0625 (I_A - I_B)$$

$$V_{BC} = 0.0625 (I_B - I_C)$$

$$V_{CA} = 0.0625 (I_C - I_A)$$

El multiplicador constante 0.0625 está determinado de diseño por la relación de vueltas y las resistencias de 5.0 ohms

Refiriendonos a la figura 48, las senales de entrada son  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ , y  $V_{CA}$ , llamemos  $V_2$  a la senal de salida de esta malla, entonces tenemos que :

$$V_2 = 2.55V_{AB} \angle 180^\circ + 2.42V_{BC} \angle 150^\circ + 1.49V_{CA} \angle 150^\circ \quad (\text{Ec. 45})$$

Las senales de entrada al transformador auxiliar son :

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2}$$

$$I_B = I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2}$$

$$I_C = I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2}$$

Entonces las entradas a la malla de secuencia negativa son :

$$V_{AB} = 0.0625 [(I_{A0} + I_{A1} + I_{A2}) - (I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2})]$$

$$V_{AB} = 0.0625 [(1 - a^2) I_{A1} + (1 - a) I_{A2}] = 0.108 (I_{A1} \angle 30^\circ + I_{A2} \angle -30^\circ) \quad (\text{Ec. 46})$$

$$V_{BC} = 0.0625 [(I_{A0} + a^2 I_{A1} + a I_{A2}) - (I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2})]$$

$$V_{BC} = 0.0625 [(a^2 - a) I_{A1} + (a - a^2) I_{A2}] = 0.108 (I_{A1} \angle -90^\circ + I_{A2} \angle 90^\circ) \quad (\text{Ec. 47})$$

$$V_{CA} = 0.0625 [(I_{A0} + a I_{A1} + a^2 I_{A2}) - (I_{A0} + I_{A1} + I_{A2})]$$

$$V_{CA} = 0.0625 [(a - 1) I_{A1} + (a^2 - 1) I_{A2}] = 0.108 (I_{A1} \angle 150^\circ + I_{A2} \angle -150^\circ) \quad (\text{Ec. 48})$$

Sustituyendo (46), (47) y (48) en (45) y reduciendo, tenemos :

$$V_2 = 0.276(I_{A1} \angle 210^\circ + I_{A2} \angle 150^\circ) + 0.316(I_{A1} \angle 60^\circ + I_{A2} \angle 240^\circ) + 0.161(I_{A1} \angle 300^\circ + I_{A2} \angle 0^\circ)$$

$$V_2 = (-0.239 - j 0.138) I_{A1} + (-0.239 + j 0.138) I_{A2} + (0.158 + j 0.274) I_{A1} +$$

$$+ (-0.158 - j 0.274) I_{A2} + (0.081 - j 0.139) I_{A1} + 0.161 I_{A2}$$

$$V_2 = (0.236 - j 0.136) I_{A2}$$

Finalmente tenemos:

$$V_2 = 0.273 I_{A2} \angle 210^\circ$$

Como podemos observar de la expresión anterior la salida de la malla de secuencia negativa, es un voltaje directamente proporcional a la componente de secuencia negativa de las corrientes de entrada

## **Función FDL**

Esta función se obtiene tomando la salida de la red de secuencia negativa de corriente (Tarjeta F 127), la cual es aplicada a la tarjeta F129 que consiste de un filtro y un amplificador. La salida ya ampliada es alimentada a la tarjeta D111 donde es rectificadora y comparada con un valor previamente determinado que es el que constituye el ajuste de esta función. Cuando la señal rebasa este ajuste, tendremos una señal de salida lógica, la cual es mantenida por 50 milisegundos por efecto del temporizador. La operación de esta función controla la conmutación del Transmisor conjuntamente con el amplificador de onda cuadrada (SQ.AMP.); y puede monitorearse en el TP17.

### **Amplificador de Onda Cuadrada (SQ.AMP.)**

El SQ.AMP. convierte la señal senoidal proveniente de la malla de secuencia negativa en una onda cuadrada de la misma frecuencia y proporciona la señal local y la envía al extremo remoto para efectuar la comparación de fase, esta función está comprendida en la tarjeta D113 (G), la cual cuenta con un ajuste para el ancho de las crestas de la señal de onda cuadrada para que quede simétrica.

Como se puede observar el SQ.AMP. y FDL se alimentan con la misma señal de la salida de la tarjeta F129 para asegurar que ambas funciones operen simultáneamente.

### **Funciones FDHL y FDHH.**

Estas funciones son obtenidas de manera similar a FDL, utilizando las siguientes tarjetas: F130 (E) como filtro, D112 (J) para el ajuste del nivel de operación correspondiente a FDHH, y la D112 (K) para el ajuste de FDHL.

### **Obtención de la Función de Sobrecorriente de Secuencia Cero.**

La función G4 opera con un voltaje que es proporcional a la corriente 3 $\phi$ . que entra al relevador, y su operación es independiente de la dirección del flujo de la corriente. Como se puede observar en la figura 44 el transformador auxiliar TD y las resistencias R9 y R10 suministran la señal proporcional a 3 $\phi$ , la cual es procesada en la tarjeta D114 (R) que además permite el ajuste del nivel de operación.

### **C.- OPERACION.**

Una vez que se ha visto cómo son obtenidas las diferentes funciones del módulo SLDY51 a partir de las señales de corriente y voltaje que entran al relevador, vamos a ver la operación completa del esquema, es decir, la operación conjunta de todos los módulos que lo integran, desde que es detectada una falla hasta que sale la señal de disparo al interruptor si es falla interna, o bien, la forma en que es bloqueado el disparo si la falla es externa.

Para explicar la operación completa del esquema nos vamos a referir al diagrama Lógico General de la figura 50, y analizaremos una de las líneas de Chicoasén a Malpaso, ver figura 49. Primero con falla trifásica y después con falla desbalanceada, ésto es, cualquier falla que involucre corriente de secuencia negativa y/o secuencia cero.

### Falla Trifásica Interna en F1.

Para una falla trifásica el relevador operará en su modo de comparación direccional, ésto es, con sus funciones de secuencia positiva de característica mho.

Como la falla es interna, operará la función MT tanto en Chicoasén como en Malpaso, la salida MT inhibe a MB a través de NOT 1 (Fig. 50) y al mismo tiempo es aplicada a la compuesta AND6, la cual nos entrega una salida "1" lógica debido a que el detector I+T supervisor de sobrecorriente de secuencia positiva está operado, y la entrada negada correspondiente a la función MOB de bloqueo de oscilaciones esta en un "0" lógico. La salida de AND6, se aplica a dos de las entradas del comparador AND9, una a través de OR7 y otra a través de OR8 y TL2; también llavea al transmisor a la frecuencia del disparo Vía OR9, AND8 y OR10, ocurriendo todo lo anterior en ambas protecciones (Chicoasén y Malpaso).

Regresando al comparador AND9 la entrada faltante para obtener salida "1" de él, se presenta al recibir la señal de disparo del extremo opuesto Vía OR5, proveniente del receptor. A través de OR11 producirá el encendido de los SCR s después de 4 milisegundos (tiempo de retardo de TL-3 Vía AND11, OR12, OR15, AND32 y OR31).

El bus de disparo ( salida de OR31 ) permanecerá energizado hasta que los detectores de la falla se restablezcan. Observamos también que a través de TL-6, OR12, AND12 y OR18 el transmisor permanecerá excitado durante 100 milisegundos después de que los detectores se han restablecido ( tiempo de restablecimiento de TL-6 ), ésto es para asegurar que el extremo opuesto complete satisfactoriamente su disparo.

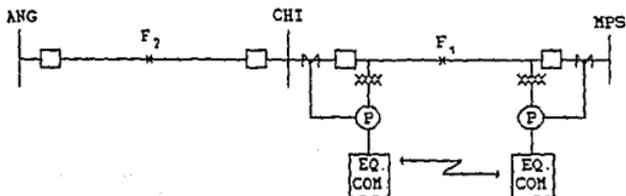


Figura 49

Para indicar el modo en que operó el esquema éste contiene tres lámparas, y como se puede observar para esta falla encenderá la lámpara DC ( comparación direccional ) al cerrarse los contactos del relé LAR1, el cual es energizado vía AND36.

La indicación de que se envió señal de disparo al interruptor de la línea es proporcionada por una tarjeta electromecánica ( T1, T2 ) que está en serie con el SCR, y con la bobina de disparo del interruptor, la cual operará cuando circule por ella la corriente de disparo.

#### **Falla Trifásica Externa en F2.**

Para este tipo de falla, en la protección de Chicoasén operará la función MB, la cual vía OR5 inhibe al comparador AND9, bloqueando así cualquier intento local de disparo. Al mismo tiempo bloquea al transmisor vía AND8, con lo que en la terminal de Malpaso no se actuará el receptor ( ausencia de señal en TP18 ) ocasionando el bloqueo de su comparador a través de NOT3 y OR5, por lo tanto la terminal de Malpaso tampoco dispara aún cuando haya operado su función MT.

La terminal de Chicoasén mantendrá el bloqueo durante 50 milisegundos después de que MB se haya restablecido, esto es debido al tiempo de reposición del temporizador característico de MB ( temporizador 3.5/50 ).

#### **Falla Desbalanceada Interna en F1.**

Para cualquier tipo de falla desbalanceada la protección operará en su modo de comparación de fase. Entonces para una falla interna en F1, como se mencionó antes, las corrientes que circulan por cada protección están en fase. ( ver figura 39 y 40 ) y tanto en Chicoasén como en Malpaso operarán los detectores de secuencia negativa.

Refiriéndonos a la figura 50 se puede observar que en ambos extremos ( CHI y MP ) FDHL aplica una señal continua a una de las entradas del comparador AND9 vía OR4, OR7. Durante el medio ciclo positivo cuando el SQ AMP. ( amplificador de onda cuadrada ) produce una salida, FDHL y el propio SQ. AMP. aplicarán la segunda entrada del comparador ( AND9 ) vía AND3, OR8 y TL2. Dado que en ambos extremos de la línea la salida de cada SQ. AMP. estará en fase, ocasiona que ambos transmisores estén al mismo tiempo llaveados, y al ser recibida esta señal permitirá la operación del comparador. Como ambas señales local y recibida están en fase y coinciden por más de 4 milisegundos ( pick-up de TL-3 ) entonces habrá salida del temporizador TL-3, la cual es aplicada a la segunda entrada de AND10 lo que desencadena el disparo de los interruptores en ambos extremos de la línea vía TL-6, OR12, AND12, OR15, AND32 y OR31, cuya salida es el bus de disparo.

Cabe hacer notar que si la falla se presenta muy severa para algún extremo, operará además de su detector FDHL, el FDHH, cuya salida es aplicada a AND11, vía OR6. Efectuándose el disparo a través de OR12 sin ser necesario el paso por TL-6, haciendo que el disparo sea más rápido que cuando únicamente operaba FDHL.

Las indicaciones que tendremos en este caso será la tarjeta electromecánica de disparo T1 o T2 y la lámpara PC ( comparación de fase ), la cual es encendida a través de los contactos del relé LAR2 que es energizado vía AND37.

### **Falla Desbalanceada Externa en F2.**

Para una falla localizada en el punto F2 de la figura 49 las condiciones serán las siguientes:

La corriente de secuencia negativa que circula por la protección de Malpaso, como se mencionó anteriormente, estará  $180^{\circ}$  fuera de fase de la corriente que circula por la protección de Chicoasén, todos los detectores de corriente de secuencia negativa, en ambas protecciones pudieran estar operados ( no son direccionales ). Bajo estas condiciones analicemos el comportamiento de la protección en Malpaso durante el medio ciclo en el que el SQ. AMP. está produciendo salida ( medio ciclo positivo de la corriente ).

Como se puede ver en la figura 50 el transmisor será excitado a través de AND4, por otro lado, el comparador AND9 tendrá presente dos de sus entradas, una que viene de OR7 y otra de TL-2, pero como el SQ. AMP. de Chicoasén en este medio ciclo no estará dando salida (por el defasamiento de  $180^{\circ}$ ) y su transmisor no operará, por lo tanto en Malpaso no se recibe señal en TP18, ocasionando el bloqueo del comparador, evitando así la salida de disparo en Malpaso.

En la protección de Chicoasén el SQ. AMP. como ya se dijo no estará dando salida en este medio ciclo, por lo tanto no habrá salida de AND3 y entonces el comparador estará bloqueando también el disparo en esta terminal, aún cuando se está recibiendo señal de disparo de Malpaso en TP18 y los detectores FDHH y/o FDHL producen señal a la salida de OR7 vía OR4.

Para el siguiente medio ciclo de la corriente la condición se invierte en cada una de las protecciones, de tal manera que haciendo el mismo razonamiento se ve que el disparo quedará bloqueado, tanto en Malpaso como en Chicoasén.

### **Disparo Directo.**

En el caso en que ocurra una falla desbalanceada muy cercana al bus en el cual está situada la protección, operará la función G4, la cual energiza el bus de disparo a través de OR2, OR14 y AND32. Como se observa en la figura 50 el disparo por medio de esta función no depende del canal de comunicación. La señalización para este modo de disparo la tenemos al encenderse la lámpara G4 a través de AND38, además de las tarjetas electromecánicas T1 y T2.

En cualquiera de los modos en que el disparo se realice se energizan dos relés: Uno es el R1, el cual es energizado a través de AND34, y nos proporciona dos contactos para iniciar el esquema de recierre para los casos en que exista (en nuestro sistema no hay recierre).

El otro relé es el BFI el cual es energizado a través de OR31, sus contactos son utilizados para iniciar el esquema de respaldo por falla de interruptor.

#### **D.- CRITERIOS DE AJUSTE.**

##### **Funciones de Secuencia Positiva de Características Mho.**

Las funciones MT, MB, y MOB siendo funciones de distancia requieren de ser ajustadas tanto en alcance (ohms secundarios) como en ángulo (ángulo de máximo alcance), así como también el temporizador que da su característica.

Existe un Alcance Básico común para estas funciones, el cual puede ser 1 ohm ó 3 ohms, y la selección de uno u otro valor depende del alcance requerido para la función MT ( en ohms secundarios ), escogiéndose el más cercano pero inferior. El ajuste físico del Alcance Básico se realiza por medio de las conexiones de la tablilla YB localizada en la parte posterior del módulo.

Una vez seleccionado el Alcance Básico y su ángulo, podemos ajustar independientemente los alcances requeridos para cada función, esto se logra seleccionando el porcentaje de retención para cada función, de acuerdo con la siguiente relación.

$$T = \frac{TB \times 100}{Z_R}$$

donde:

T = por ciento de retención.

TB = Tap básico (Alcance Básico)

Z<sub>R</sub> = Alcance requerido (en ohms secundarios)

El ajuste físico del porcentaje de retención se realiza en la parte frontal del módulo, el método se ilustra en la figura 51.

La función MT como es la función de disparo, deberá ser ajustada para detectar cualquier falla trifásica que ocurra dentro de la línea protegida. Para asegurar ésto, debe ser ajustada para una longitud mayor que la de la línea. En general los ajustes requeridos para una línea de transmisión van del 125% al 200% de su longitud. En algunas ocasiones el flujo de carga o pequeñas oscilaciones causan que sea vista por el relé una impedancia aparente entrando a su característica de operación, en estos casos la característica puede hacerse de forma lenticular para evitar el problema, esto se logra aumentando el tiempo de operación del temporizador que da su característica, a un poco más de 4.16 mseg.

La función MB como ya se mencionó antes, actúa como bloqueo para fallas externas, siendo ésta su función deberá coordinarse con la función MT del extremo remoto, es decir, MB deberá operar para cualquier falla externa que la MT remota pueda "ver". Los ajustes para el alcance en la dirección de bloqueo son del orden del 75% al 175% de la longitud de la línea de transmisión. Para facilitar la coordinación y para asegurar la operación en fallas trifásicas de cero voltaje, la función MB es ajustada con un poco de alcance hacia atrás (en dirección de la línea protegida), con esto la característica de MB contiene al origen. El ajuste para este alcance puede seleccionarse como el 10, 20, o 30 por ciento del alcance en la dirección de bloqueo, este ajuste físicamente se realiza por medio de unos puentes en la tarjeta N109.

La función MOB se deriva de la MT por lo que tiene el mismo alcance y ángulo que ésta, pero con un temporizador diferente para su característica, misma que puede ser expandida respecto a MT, y el ajuste exacto que se emplea dependerá de la aplicación particular en cada caso.

La figura 52 nos muestra como quedarían representadas estas tres funciones en un diagrama R-X, aquí se muestra como ejemplo las tres funciones de la protección de Chicoasén y la función MT de la protección de Malpaso.

### **Funciones de Secuencia Negativa**

El detector FDL controla la conmutación del transmisor y actúa como una función de bloqueo, por consiguiente debe ser ajustado tan sensible como se posible, pero que no detecte corrientes de secuencia negativa provocadas por desbalances naturales en el sistema, tales como líneas sin transposiciones, desbalances de carga, etc. En la mayoría de las aplicaciones un ajuste de 0.2 a 0.25 amperes secundarios de secuencia negativa será suficiente, aún cuando pudieran existir aplicaciones que requieran ajuste más alto.

FDHL y FDHH se consideran detectores con función de disparo, debiéndose ajustar tan sensibles que detecten fallas desbalanceadas mínimas con un amplio margen, sin embargo sus ajustes deben de ser mayores que el de FDL, ya que si detectan cualquier falla externa aseguramos que también lo haga FDL. Y a su vez el ajuste de FDHH debe ser mayor que el de FDHL, ya que con esto obtenemos un disparo más rápido en fallas severas.

### **Función de Secuencia Cero**

La función G4 como es de disparo directo no direccional, debe ajustarse arriba del valor de la aportación para una falla máxima en el extremo remoto.

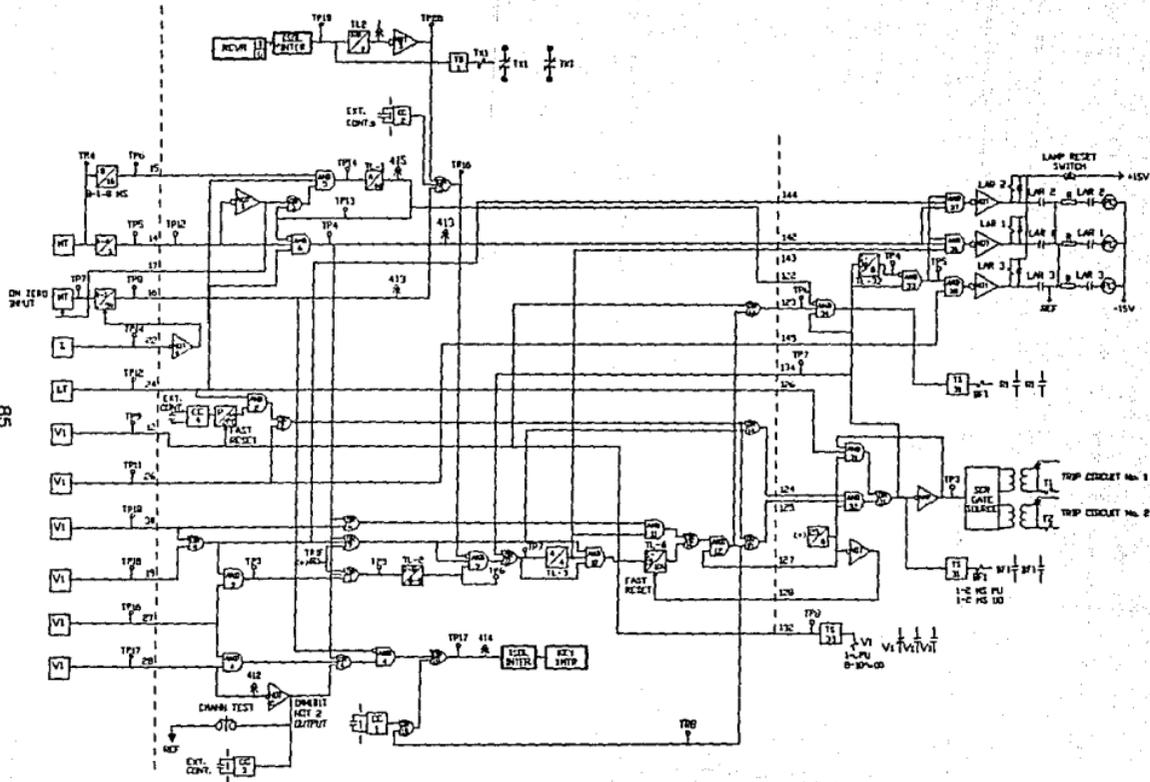


Figura 50. Diagrama lógico general del esquema SLDY 51.

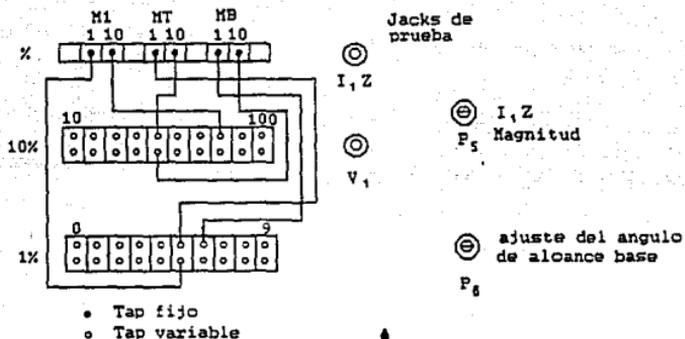


Figura 51. Ajuste del porcentaje de restricción de las funciones mho

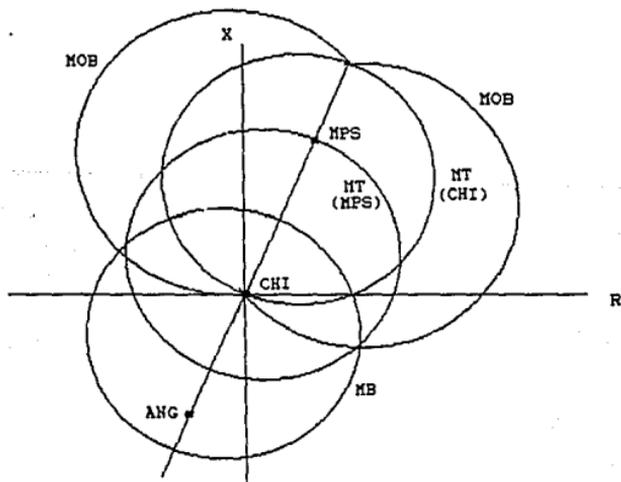


Figura 52

## 2.- ESQUEMA DE PROTECCION SLYP-SLCN

### A.- DESCRIPCION

SLYP-SLCN es un esquema de comparación direccional estático para protección de líneas de transmisión con y sin compensación serie, que utiliza detectores de secuencia positiva y de secuencia negativa para accionar sus funciones de medición.

El esquema completo lo componen los siguientes módulos:

SLYP51	Relé de secuencia positiva
SLCN51	Relé de secuencia negativa
SLA52	Unidad auxiliar lógica
SLAT51	Unidad de salida
SSA50	Fuente de poder

El módulo SLYP contiene las funciones de secuencia positiva que son:

(M1)1	Función de disparo de bajo alcance con característica mho.
M1T	Función de disparo de sobrealcance con característica mho.
M1B	Función de bloqueo con característica mho.
MOB	Función de bloqueo para oscilaciones.
V1	Detector de voltaje de secuencia positiva.

El módulo SLCN contiene las funciones de secuencia negativa y supervisión de secuencia positiva, que son:

$I_1(T)$	Detector de sobrecorriente de secuencia positiva para supervisión de disparo.
$I_1(B)$	Detector de sobrecorriente de secuencia positiva para supervisión de bloqueo.
$(I_2 - KI_1)(T)$	Detector de sobrecorriente de secuencia negativa con retención de secuencia positiva para supervisión de disparo.
$I_2TOC$	Función de disparo por sobrecorriente de secuencia negativa con retardo.
$I_2(B)$	Detector de sobrecorriente de secuencia negativa para supervisión de bloqueo.
$(I_0 - KI_1)(T)$	Función de disparo directo por sobrecorriente de secuencia cero y retención de secuencia positiva.
$I_0(T)$	Función de sobrecorriente de secuencia cero para supervisión de disparo por baja aportación.

El módulo SLA52 es una unidad completamente de componentes lógicos y es donde se procesa toda la información obtenida en los dos módulos anteriores y la proveniente del extremo remoto.

El módulo SLAT51 es la unidad de salida que proporciona el modo de disparo, los circuitos de disparo y señales varias.

SLYP-SLCN proporciona distintos modos de disparo para obtener una protección completa, estos modos son:

Por comparación Direccional:

- a) De secuencia positiva.
- b) De secuencia negativa.

Disparos Directos:

- a) Por función de distancia de bajo alcance (M1)1
- b) Por sobrecorrientes
- c) Por función de secuencia cero con retención de secuencia positiva
- d) Por bajo voltaje con supervisión de sobrecorriente de secuencia positiva o negativa.

Los tres primeros se presentan al ocurrir fallas cercanas de aportación grande, la última, cuando se energiza una línea bajo falla.

La comparación la realiza utilizando un canal de comunicación de Onda Portadora en Líneas de Alta Tensión (OPLAT), con característica de disparo y cambio de frecuencia.

## **B.- PRINCIPIOS DE MEDICION.**

Como se menciona en la descripción del esquema, la detección de una falla puede realizarse en el módulo correspondiente al tipo de falla, es decir, las fallas trifásicas serán detectadas en el módulo SLYP y las fallas desbalanceadas en el módulo SLCN, de lo anterior se deriva que el módulo SLYP utiliza filtros de secuencia positiva, y el módulo SLCN filtros de secuencia negativa.

Las funciones de medición del módulo SLYP son de característica mho que se derivan de señales de voltaje y corriente de secuencia positiva. La señal de voltaje de secuencia positiva se obtiene como se describió en la sección correspondiente en SLDY51.

La señal de corriente de secuencia positiva, es en realidad una señal de voltaje proporcional a ésta, que se obtiene como se describió también en SLDY51.

La característica mho de SLYP es igual a la característica de SLDY51, por lo que nos referimos a esa descripción para analizar las funciones de distancia propias de SLYP.

### **Obtención de la Función M1T.**

Referiéndose a la figura 53, se observa que a la tarjeta F147 se suministran tres señales  $I_1Z$ ,  $V_1$  y  $-V_1$ , la salida de esta tarjeta son ondas cuadradas de +15 VCD y -15 VCD, la que se obtiene en la terminal 9 es la magnitud de polarización derivada de  $V_1$ , y la que se obtiene en la terminal 8 es la magnitud de operación y se deriva de  $(I_1Z - V_1)$ , también aquí se ajusta el defasamiento de las señales de polarización y operación.

La coincidencia de las señales anteriores es determinada en la tarjeta de coincidencia C104, la cual compara los medios ciclos positivos de cada onda y cuando ambas coinciden se produce una salida que excita el temporizador T133, dando una salida si el tiempo de coincidencia es igual al tiempo de su ajuste, esta secuencia la podemos ver en la figura 54. El efecto de adelantar o atrasar el voltaje de polarización con respecto al voltaje de operación, se manifiesta en la dirección de la característica mho, como se muestra en la figura 55, donde los ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  están determinados por el ajuste de tiempo de la tarjeta T133.

$$\alpha_1 = TS - \varphi$$

$$\alpha_2 = TS + \varphi$$

Donde:

TS = Tiempo de ajuste del temporizador (en grados)

$\varphi$  = Angulo de defasamiento.

Las funciones mho como son: MOB, (M1)1 y M1B se obtienen en forma similar a la descrita anteriormente aunque con ligeras variaciones como son:

Para MOB, es la misma señal de M1T sólo que el temporizador es independiente.

Para (M1)1, aunque utiliza filtro, tarjeta de coincidencia y temporizador propio, son similares, la diferencia está en que se tiene una resistencia variable en la entrada del filtro para proporcionar un ajuste independiente, y la opción de tener supervisión de voltaje de secuencia positiva.

Para M1B, el principio de operación es el mismo, sólo que la coincidencia se puede medir para el medio ciclo positivo o negativo, y que incorpora en el filtro una entrada más que es  $I_{1Z}$  para proporcionar un alcance inverso.

El detector de voltaje de secuencia positiva del relé SLYP se deriva del mismo filtro de secuencia de las funciones mho. Es un detector que opera con la magnitud de  $V_1$  independientemente del ángulo de fase, y tiene un retardo de tiempo al decrecer  $V_1$  de su valor de ajuste, las componentes para detectar  $V_1$  son una tarjeta rectificadora que incluye el ajuste de nivel y el de retardo como lo muestra la figura 53.

Las funciones de medición del módulo SLCN se basan en filtros de voltaje y corriente de secuencia negativa propios de este módulo, y la supervisión de secuencia positiva proviene del módulo SLYP. Así también en el módulo SLCN se tiene el filtro de secuencia cero.

La red de voltaje de secuencia negativa se muestra en la figura 56, que consiste de tres transformadores, TA, TB y TC y una red activa contenida en la tarjeta F148. El voltaje  $V_2$  está dado por la siguiente relación.

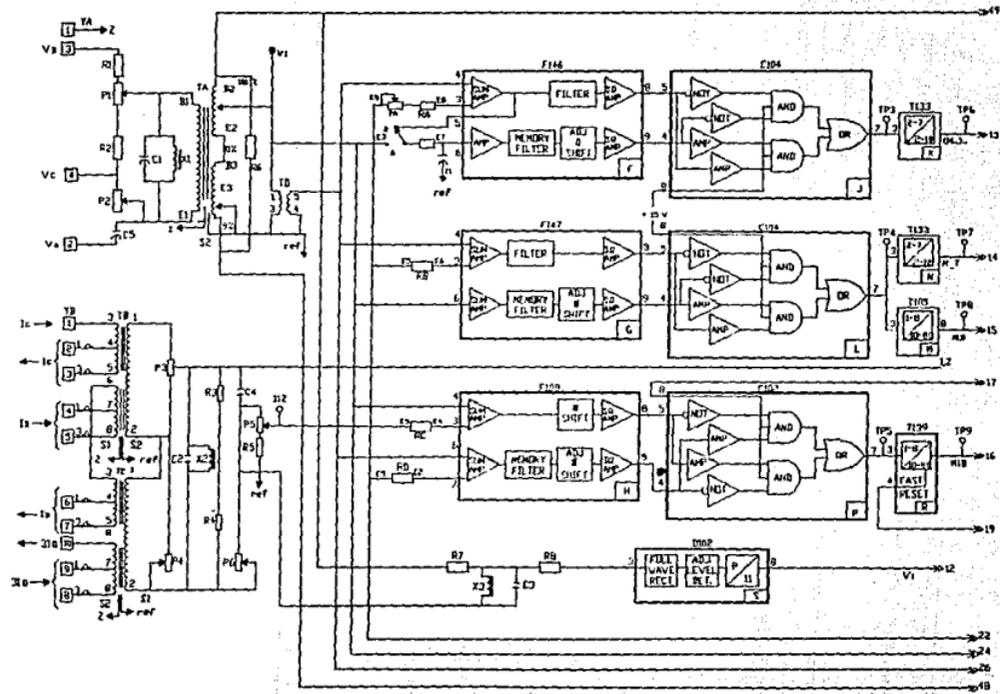


Figura 53. Conexiones internas del rele SLYP

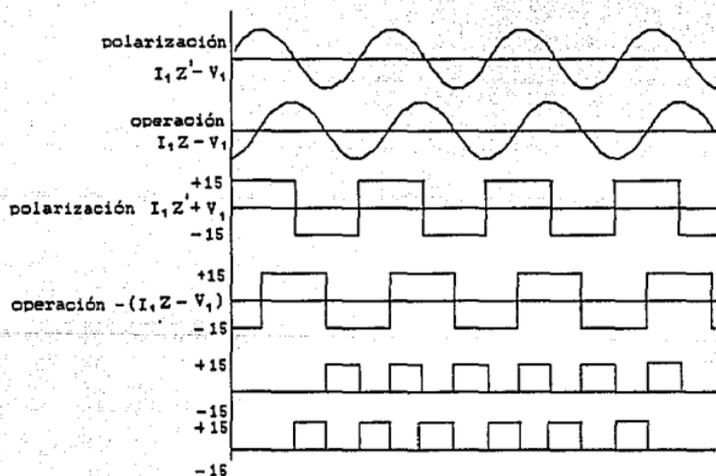


Figura 54

$$V_2 = 0.21V_2 A \angle 270^\circ$$

Donde  $V_2 A$  es la componente de voltaje de secuencia negativa del voltaje de entrada, referida a la fase A, los potenciómetros  $P_1$  y  $P_2$  se utilizan para compensar errores en los transformadores de potencial.

La red de corriente de secuencia negativa se muestra en la figura 56, y consiste de los transformadores TO, TE, TF, tres reactores de carga X3, X4, X5 y una red activa contenida en la tarjeta filtro F150, una segunda red activa está contenida en la tarjeta filtro F149, estas dos redes se utilizan para tener mayor capacidad. El voltaje proporcional a  $I_2$  en el punto de prueba está dado por:

$$I_2 = 0.131I_2 A \angle 0^\circ$$

Donde  $I_2 A$  es la corriente de secuencia negativa de la corriente de entrada de la fase A.

El voltaje en la terminal 9 de la tarjeta F150 está dado por:

$$V = 0.42I_2 A \angle 0^\circ$$

Las funciones direccionales de secuencia negativa  $D_2(T), D_2(B)$  se determinan de las magnitudes  $V_2$  e  $I_2 Z$  y la direccionalidad está determinada por la coincidencia de  $V_2 - I_2 Z'$  y  $-I_2 Z$  en los temporizadores correspondiente. El ángulo por el que  $V_2$  adelanta a  $-I_2 Z$  se puede ajustar con valores de  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$  y  $30^\circ$ .

La función  $D_2(T)$  operará para una falla que genere secuencia negativa en la dirección de disparo, aunque solamente exista corriente de secuencia negativa y no voltaje.

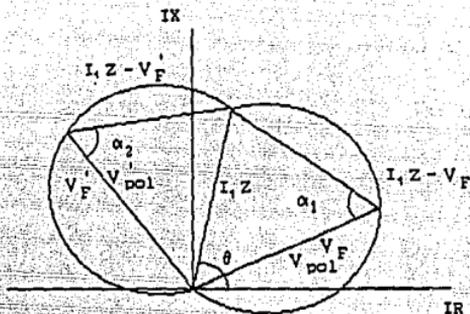
La función  $D_2(B)$  operará para fallas en la dirección de bloqueo que generen secuencia negativa.

Las funciones de sobrecorriente de secuencia negativa, como mencionamos en la descripción general, son sin retención y con retención, las que no tienen retención son:  $I_2(B), I_2(T), I_1(B), I_1(T)$ , e  $I_0(T)$ , las cuales consisten de un filtro y un detector de nivel. Las funciones con retención son:  $(I_2 - k_1 I_1)(T)$ ,  $(I_0 - k_1 I_1)(T)$ , las cuales dan señal de salida en la terminal 8 de F134 y F114 respectivamente cuando la diferencia es positiva y mayor que su ajuste.

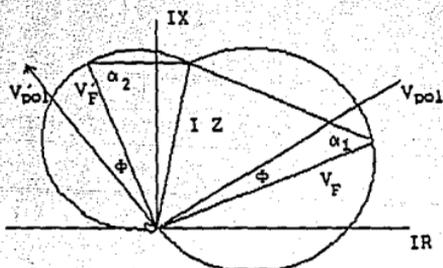
### C.- OPERACION

La descripción de la operación de SLYP-SLCN, por facilidad se hará por modos de disparo con el auxilio de diagramas lógicos simplificados, también se hace notar que el canal de comunicación es con característica de disparo y cambio de frecuencia por medio de OPLAT.

$V_{pol}$  y  $V_F$  en fase  
 $\alpha_1 = 60$  ajuste del tiner  
 $\alpha_2 = 60$  ajuste del tiner  
 $\phi = 0$



$V_{pol}$  adelante de  $V_F$   $15^\circ$   
 $\phi = 15^\circ$   
 $\alpha_1 = 60 - 15 = 45^\circ$   
 $\alpha_2 = 60 + 15 = 75^\circ$



$V_{pol}$  atrás de  $V_r$   $15^\circ$   
 $\phi = -15^\circ$   
 $\alpha_1 = 60 - (-15) = 75^\circ$   
 $\alpha_2 = 60 - 15 = 45^\circ$

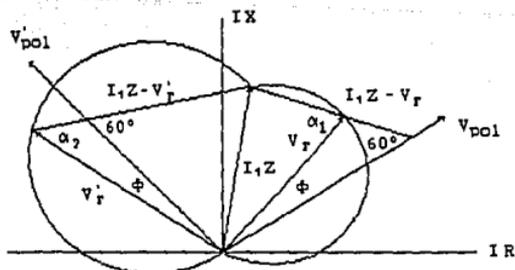


Figura 55. Efecto sobre la característica mho del desfaseamiento entre los voltajes

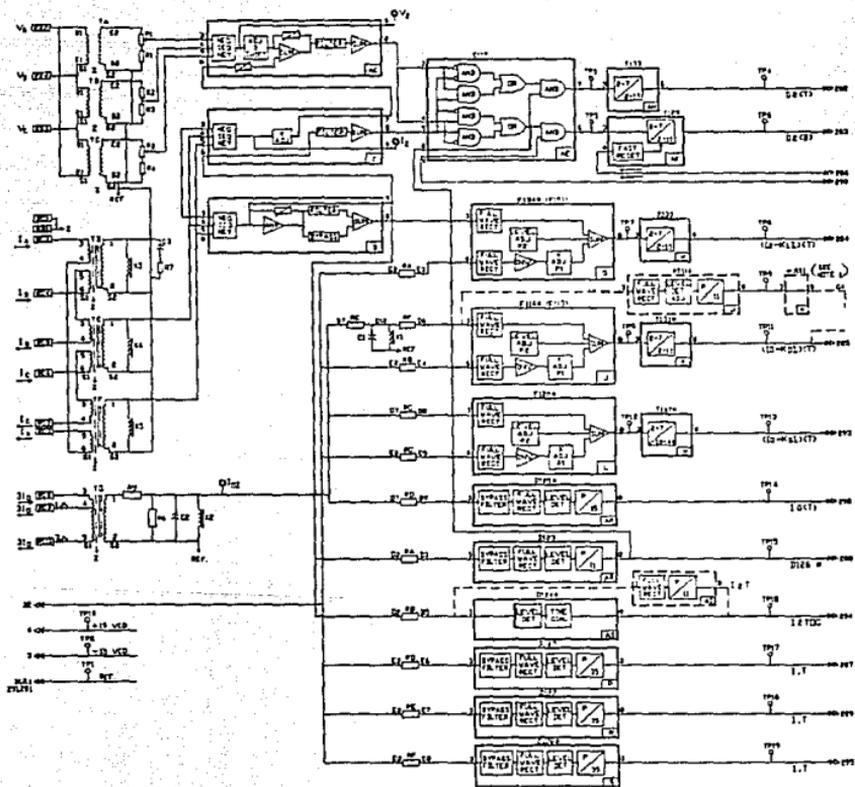


Figura 56. Diagrama de conexiones internas SLCN

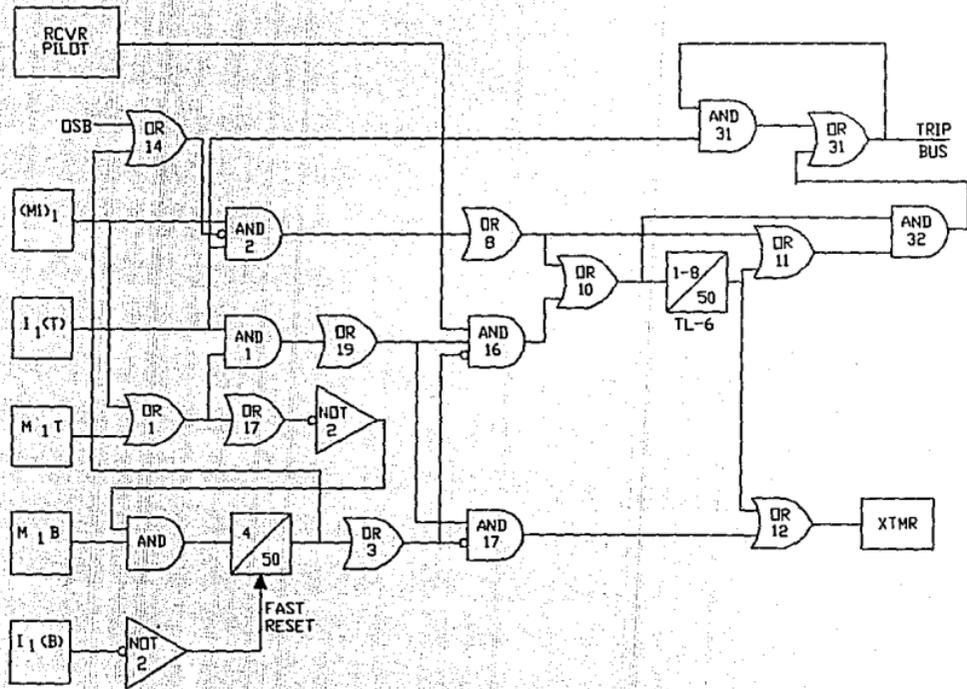


Figura 57. Comparación direccional de secuencia positiva

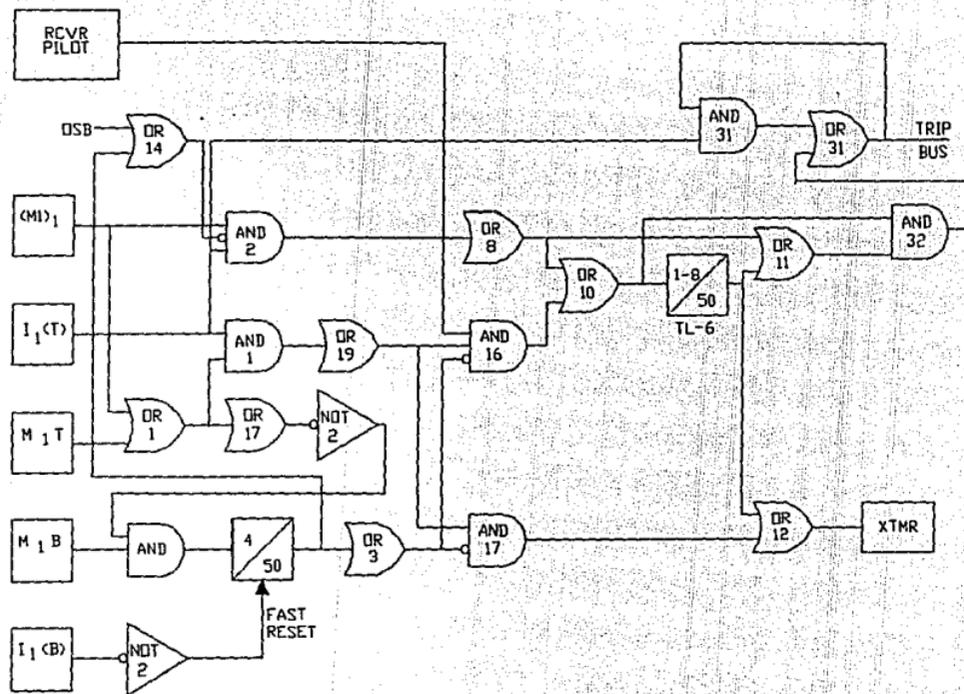


Figura 57. Comparacion direccional de secuencia positiva

En el presente trabajo no se considerará la opción de disparo monopolar, dado que es una opción que nuestro sistema no utiliza.

### Comparación Direccional de Secuencia Positiva.

El circuito de comparación direccional de secuencia positiva puede efectuar disparo por la unidad de sobrealcance  $M_{1T}$ , como puede apreciarse en la figura 57 cuando exista una falla trifásica.

Estas funciones están supervisadas por un detector de sobrecorriente de secuencia positiva  $I_{1(T)}$  en la compuerta AND1, antes de entrar al comparador AND 16, y al circuito de "llaveo" del transmisor vía AND17 y OR12.

La función  $I_{1(T)}$  también actúa como un sello en la señal de disparo en AND31, una vez que se ha obtenido salida en OR31, este sello es con la finalidad de asegurar que el circuito de disparo restablezca hasta que el interruptor de línea haya abierto, proporcionando de esa manera un arranque confiable para protección de respaldo por falla de interruptor.

La función de bloqueo  $M_{1B}$  también se supervisa con una función de sobrecorriente de secuencia positiva  $I_{1(B)}$  con la finalidad de evitar salidas erráticas de  $M_{1B}$  al ocurrir transitorios por maniobra.

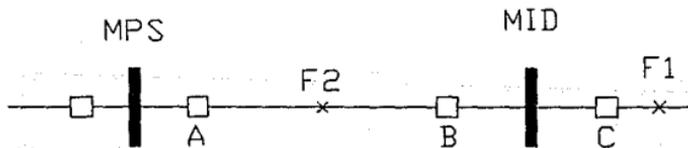


Figura 58

Considérese ahora una línea de transmisión como en la figura 58 para una falla trifásica en F2 las funciones de disparo de secuencia positiva de ambos extremos operarán teniendo entonces una entrada al comparador AND16, otra se obtiene de las funciones de bloqueo que no operan, ya que se considera una falla interna, por lo que para tener una salida de disparo falta la señal de disparo del extremo remoto, al no haber operación de las funciones de bloqueo, se permite la conmutación del canal de comunicación a la frecuencia de disparo con lo que los receptores de ambas terminales tendrán recepción de la frecuencia de disparo,

completando así las entradas del comparador originándose entonces la señal de disparo, con la apertura consecuente de los interruptores en ambos extremos. De lo anterior, se aprecia también que el canal de comunicación se controla directamente por las funciones de disparo.

Para una falla trifásica en F1, las funciones de secuencia positiva de la terminal MPU operan si la falla está en su alcance, siendo así estarían en condición de efectuar disparo y el canal de comunicación en esa terminal es conmutado a la frecuencia de disparo. Por otra parte, la terminal MID detecta la falla en la dirección de bloqueo, operando las funciones de bloqueo e inhibiendo la operación de comparador (AND16) y el circuito de conmutación del canal de comunicación en AND17, con ello no hay salida de disparo en la terminal MID y el transmisor permanece en la frecuencia de guarda, por tanto, la terminal MPD no completa las entradas del comparador, siendo entonces bloqueada la salida de disparo.

### **Comparación Direccional de Secuencia Negativa.**

Las funciones de secuencia negativa proporcionan protección para fallas desbalanceadas, la función de disparo  $D_2(T)$  está supervisada por un detector de sobrecorriente de secuencia negativa con retención de secuencia positiva, este detector es  $(I_2 - k_1 I_1)(T)$ , la finalidad de la retención por secuencia positiva es dar confiabilidad cuando existan corrientes asimétricas por condición de carga o cuando se tienen potenciales lado Bus (que no es nuestro caso), ya que  $D_2(T)$  podría "ver" la disparidad de polos como una falla interna.

La función de bloqueo  $D_2(B)$  también es supervisada por un detector de sobrecorriente que es  $I_2(B)$  que a su vez supervisa a  $D_2(T)$  con la finalidad de lograr un margen de coordinación entre las funciones de disparo y bloqueo cuando hay fallas desbalanceadas.

Considerando la figura 59 para una falla de fase a tierra en F1, la función direccional de disparo  $D_2(T)$  de ambos extremos, opera supervisada por  $I_2(B)$  en el AND antes del temporizador 615 y por  $(I_2 - k_1 I_1)(T)$  el AND3 de cuya salida excitan una entrada del comparador AND16 y simultáneamente conmutan el transmisor a la frecuencia de disparo a través de AND17 y OR12, como es una falla interna, las funciones direccionales de bloqueo no operan, por tanto, el comparador únicamente espera la señal de disparo del extremo remoto.

Suponiendo una falla en F1, las funciones de disparo del extremo MP se accionarán, esperando el comparador, únicamente la recepción de la señal de disparo del extremo MD, en donde las funciones que se accionan son las de bloqueo, ya que la falla es externa y con ello el transmisor permanece en la frecuencia de guarda, bloqueando entonces el extremo MP, sin existir salida de disparo en ambos extremos.

### **Disparos Directos.**

Con este nombre se denomina a las funciones que para dar una orden de disparo, no necesitan efectuar comparación con el extremo remoto y tienen la característica de proporcionar un tipo de protección más rápida cuando existan fallas cercanas de gran aportación.

En la figura 60 se muestra el diagrama lógico esquemático. La función de secuencia positiva de bajo alcance ( $M 1$ ), actúa con fallas cercanas, teniendo una supervisión por un detector de sobrecorriente de secuencia positiva  $I_1(T)$ .

Para fallas desbalanceadas, se cuenta con la función ( $I_0-kI_1$ )( $T$ ) para función de disparo directo de sobrecorriente de secuencia cero.

Cuando se tienen potenciales de lado línea, energizar una línea de transmisión con falla trifásica, puede darse el caso, dependiendo de la distancia al punto de falla, que las funciones de distancia no operen, por ello, se utiliza un circuito que da protección para estos casos, que actúa de la forma siguiente:

Al enviar una señal de cierre al interruptor, se proporciona también un contacto auxiliar al convertidor de contacto CC1, el cual aplica una señal vía un circuito de tiempo TL1 a la compuerta AND7, de la cual existirá una salida si y sólo si existe corriente de falla que haga operar el detector de secuencia positiva  $I_1(T)$  o el de secuencia negativa ( $I_2-k I_1$ )( $T$ ).

Además de esos detectores se cuenta un detector de voltaje de secuencia positiva  $V_1$ , que supervisa el voltaje de línea y que inhibe la acción del convertidor de contacto CC1 en el circuito TL-1, cuando el voltaje alcanza su valor nominal. Al cerrar el interruptor con la línea bajo falla, el detector de voltaje no alcanzaba su valor de operación y se tendrá la operación de  $I_1(T)$  o de ( $I_2-k I_1$ )( $T$ ) provocando que opere el AND7 y desencadenándose así la señal de disparo al interruptor vía OR8, OR10 y OR11.

### **Disparo por Baja Aportación**

En algunas ocasiones nuestro sistema se ve en condiciones de operación con baja generación y varias líneas de transmisión conectadas, teniendo con ello la posibilidad de baja aportación para alguna falla que pudiera presentarse en líneas de transmisión. Para asegurar el aislamiento de este tipo de falla, se tiene con la protección SLYP-SLCN un circuito de protección de respaldo que nos permite efectuar un disparo por baja aportación y comparación direccional, cuya operación se basa en detectores de corriente de secuencia cero, de voltaje con secuencia positiva y un circuito de repetición de la señal de comparación recibida del extremo remoto.

La operación de esta opción se describirá utilizando la figura 61 para las condiciones de operación del sistema mencionadas anteriormente, cabe señalar que para una falla en la línea A3060 ver figura 58 el extremo Mina Dos tendrá aportación grande, no así el extremo Malpaso.

Considerando la falla en el punto F2 como una falla de  $\varphi$ -N, los detectores de secuencia negativa del extremo Mina Dos se accionarán permitiendo el envío de la señal de disparo al extremo Malpaso, esperando la señal de éste para efectuar su disparo por comparación direccional.

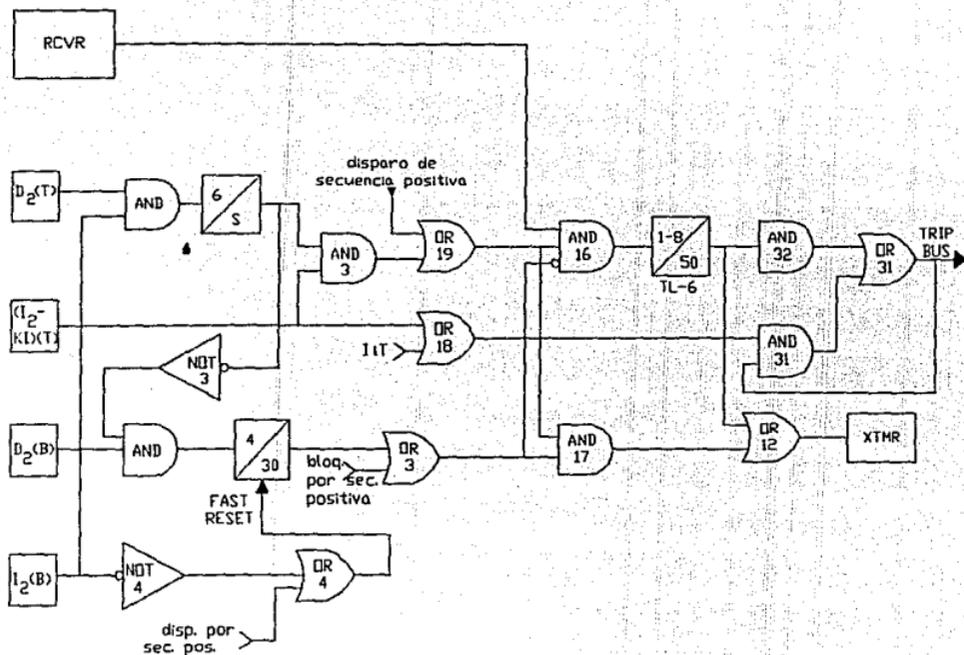


Figura 59. Comparación direccional de secuencia negativa

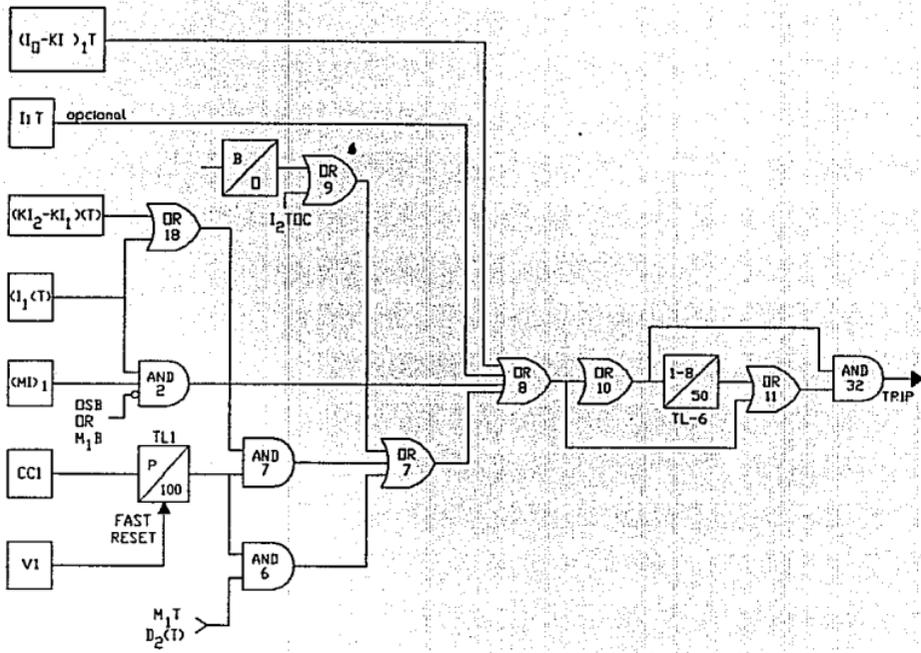


Figura 60. Disparo directo y verificación de línea

Al recibir el extremo Malpaso la señal de disparo de Mina Dos, se actúa el circuito de repetición Vía AND 11, OR15, AND17 y OR12 para enviar la señal de disparo al extremo Mina Dos, donde al recibirla se completa la secuencia de disparo.

En el extremo Malpaso, a causa de la baja aportación los detectores de disparo no operan, pero lo hacen ya sea el detector de voltaje  $V_1$ , dado que al ocurrir una falla el voltaje de línea de abate, o bien la función  $I_0(T)$  de corriente de secuencia cero con ajuste sensible completando con ello las entradas de AND16 Vía AND5 y OR5. El circuito de repetición tiene una función de tiempo TL-7 que actúa a los 80 milisegundos parando hasta entonces la operación del circuito de repetición e inhibiendo la señal de  $V_1$  e  $I_0(T)$ , en AND5. Al completarse las entradas de AND16 se produce la señal de disparo al interruptor de Malpaso.

### **Disparo por Respaldo.**

Para una protección de respaldo, se cuenta con la función de sobrecorriente de secuencia negativa, que actúa como un relé de sobrecorriente de tiempo muy inverso,  $I_2TOC$  efectúa disparo Vía AND8, donde tiene una supervisión de direccionalidad proveniente de la función de bloqueo  $D_2(B)$  Vía OR3, TL-2 donde se efectúa el retraso de la operación, llegando finalmente al circuito de disparo en OR8. Ver figura 62.

Que produce una salida de 200 ms. después que repone CC1 o hasta que V opera, una salida de TL1 es una entrada de AND7 la segunda es una salida de OR18. Al tener las dos entradas, AND7 da una salida hacia OR8 que inicia el disparo directo vía OR10 y OR11. La segunda salida de TL1 energiza una entrada de AND7, cuya segunda entrada la proporciona  $I(T)$  o  $(I-KI)(T)$  vía OR18, la salida de AND7 energiza el disparo directo a través de OR8.

$I(T)$ ,  $(I-KI)(T)$  vía AND7 durante 200 ms. después de que cierra el CC1 que es un contacto auxiliar del interruptor de línea, este circuito tiene una supervisión por un detector de voltaje de secuencia positiva (V), que inhibe la operación de TL1 si el voltaje es normal al cerrar el interruptor.

El disparo directo se efectúa entonces al tener sobrecorriente, interruptor cerrado y ausencia de voltaje, la salida de disparo es por AND7, OR8, OR10, OR11.

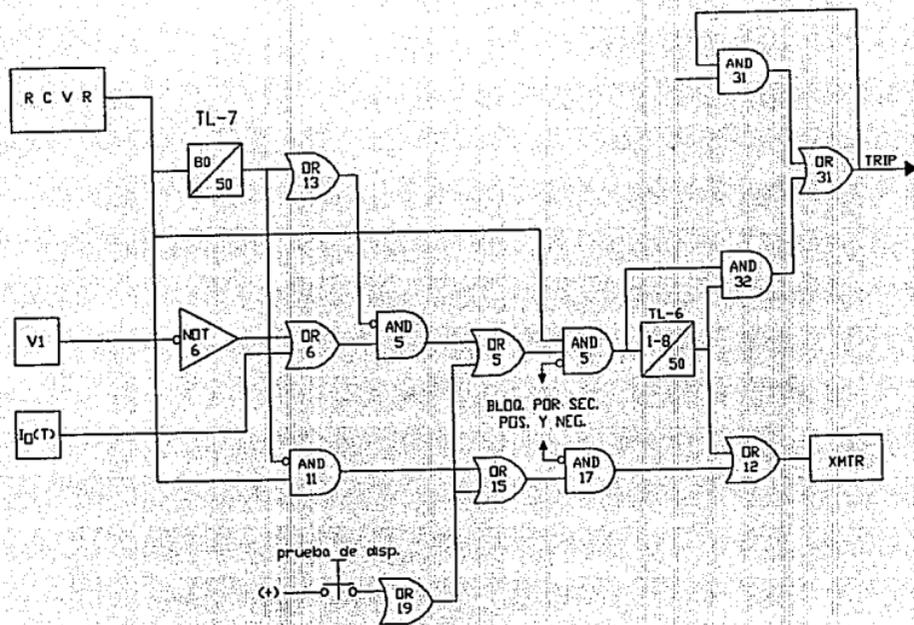


Figura 61. Circuitos de disparo por baja aportación y eco

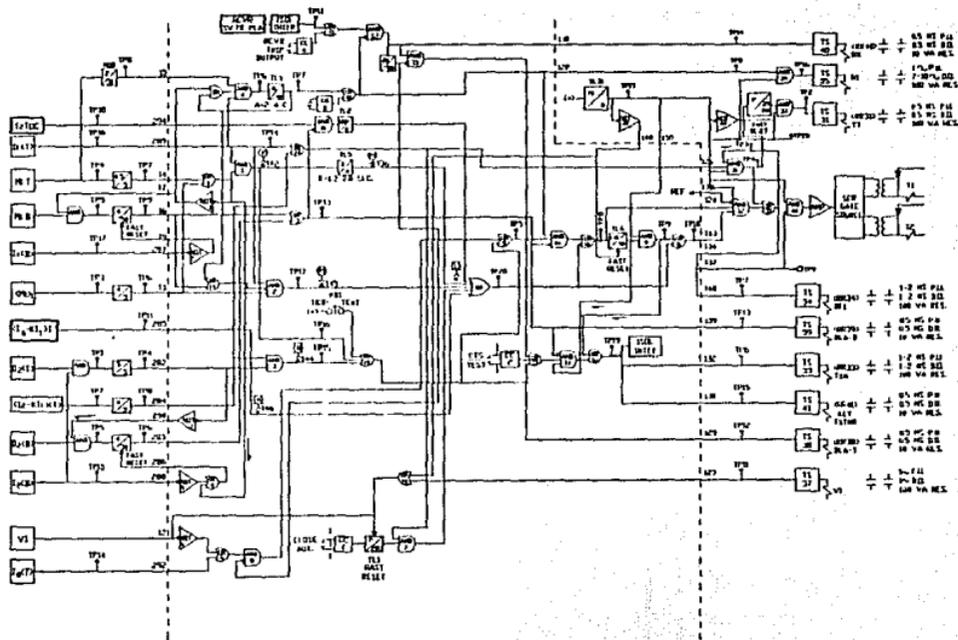


Figura 62. Diagrama logico general de SLYP-SLCN

## D.- CRITERIOS DE AJUSTES.

### MODULO SLYP.

#### a) Ajustes de $M_{1T}$ y $M_{1B}$

Aunque los alcances del esquema pueden extenderse o acortarse efectuando ajustes en el campo, los alcances relativos están fijos por diseño, de tal forma que la razón entre las funciones de disparo y de bloqueo siempre se mantiene para tener una buena coordinación entre las mismas. Existe un ajuste común para estas funciones y es llamado "Alcance de ajuste del sistema de protección".

El alcance deseado para el sistema de protección en OHMS secundarios es igual a los ohms secundarios de la línea más un margen, este margen no es fijo, pero sí depende de la longitud de la línea. La figura 64 es una curva que indica la razón del alcance requerido del sistema de protección a la impedancia de secuencia positiva de la línea protegida, como una función de la longitud (dada como la razón de la impedancia de secuencia positiva primaria a la impedancia transitoria de la línea  $Z_p/Z_u$ ).

Por ejemplo considere una línea de 75 Kms. con una impedancia transitoria  $Z_u = 290$  ohms y una impedancia de secuencia positiva de 0.6 ohms por Km.

$$\frac{Z_p}{Z_u} = \frac{75 \times 0.6}{290} = 0.155$$

De la curva de la figura 64 con 0.155 obtenemos 1.45, así el alcance del sistema de protección será 1.45 veces la impedancia de secuencia positiva. Ahora si tenemos que la línea es de 420 Kv con  $RTC = 1600/5$  y  $RTP = 3500/1$ , obtenemos una impedancia secundaria

$$Z_{sec} = \frac{75 \times 0.6 \times 320}{3500} = 4.11 \text{ ohms}$$

Multiplicando este valor por  $R = 1.45$ , el alcance deseado será de 5.96 OHMS. Este ajuste se realiza en el módulo SLYP utilizando el tap básico mas alto ( $T_b$ ) cercano al valor de ajuste deseado, para el caso del ejemplo se utilizaría el tap básico de 3 ohms. El porcentaje de retención para obtener el alcance deseado se obtiene de la siguiente ecuación.

$$T = \frac{T_b \times 100}{Z_{max}}$$

donde

$T$  = porcentaje de retención

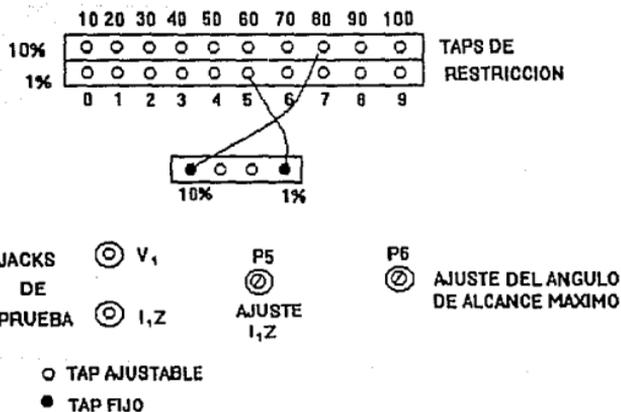


Figura 63. Ajuste de taps de restricción de voltaje del relé SLYP.

$T_B$  = tap básico

$Z_{max}$  = ohms máximos de ajuste

para el ejemplo tendremos

$$T = \frac{3 \times 100}{5.96} = 50.33$$

Seleccionando el tap más cercano disponible en el módulo SLYP, en este caso será 50% por lo que el alcance de ajuste será:

$$Z_{max} = \frac{3 \times 100}{50} = 6 \text{ ohms}$$

Físicamente, el ajuste del tap básico se realiza en el bloque de terminales  $Y_b$  de la parte posterior del módulo, de acuerdo a la tabla ( V ):

TAP BASICO	$I_c$		$I_B$		$3f_0$	
	Entra	Sal	Entra	Sal	Entra	Sal
Alcance base 1 $\Omega$	$Y_{B1}$	$Y_{B2}$	$Y_{B4}$	$Y_{B6}$	$Y_{B9}$	$Y_{B10}$
Alcance base 3 $\Omega$	$Y_{B1}$	$Y_{B3}$	$Y_{B5}$	$Y_{B7}$	$Y_{B8}$	$Y_{B10}$

Tabla V

El ajuste físico del porcentaje de retención se realiza en la parte frontal del módulo SLYP como se ilustra en la figura 65.

El ángulo de alcance máximo del sistema de protección es ajustado en fábrica a 85°, esto debido a que el ángulo de la impedancia de líneas de transmisión de alto voltaje, es cercano a ese valor, para nuestro caso el ángulo se dejará a 85°.

Los alcances efectivos de cada función, como porcentaje del ajuste del sistema de protección, se dan en la tabla ( VI ):

FUNCION	Alcance efectivo en % del ajuste del sistema de protección	
	Línea corta ( < 100 millas )	Línea larga ( > 100 millas )
$M_1 T$	125 %	125 %
$M_1 B$ (Dirección Bloqueo)	175 %	125 %
$M_1 B$ (Dirección Disparo)	25 %	25 %

Tabla VI

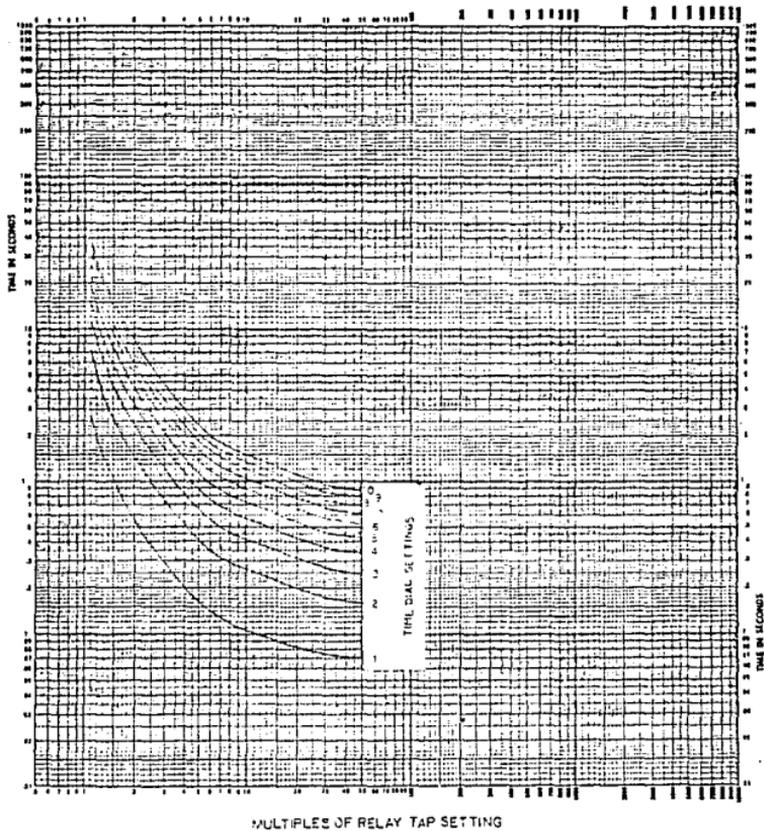


Figura 64. Curvas de operación de la función I2TOC

Para el ejemplo donde el alcance del sistema de protección es ajustado para 6 ohms, el alcance efectivo de  $M_{1T}$  al ángulo de máximo alcance, será  $1.25 \times 6 = 7.50$  ohms.

Para  $M_{1B}$  en la dirección de bloqueo será

$$1.75 \times 6 = 10.50 \text{ ohms.}$$

Para  $M_{1B}$  en la dirección de disparo será

$$0.25 \times 6 = 1.50 \text{ ohms.}$$

Además de los ajustes de alcance y ángulo, se ajustan los temporizadores de cada función de acuerdo a la curva característica apropiada. También se cuenta con ajuste independiente para el desplazamiento de la señal de polarización en relación al voltaje de operación ( $I_{Z-V}$ ). Para las líneas sin compensación serie el desplazamiento de  $M_{1B}$  es preferible que sea  $0^\circ$ , si la línea tiene capacitor serie, el desplazamiento de  $M_{1T}$  debe ser  $0^\circ$  y para  $M_{1B}$   $30^\circ$  adelante.

La función ( $M_{11}$ ), puede utilizarse como ya mencionamos como un relé de distancia convencional o en combinación con sobrecorriente para prevenir la operación debido a corrientes de carga al ocurrir una pérdida completa de potencial.

El ajuste de esta función depende de la línea por proteger, así:

a) Para líneas sin compensación serie.

Si ( $M_{11}$ ), se utiliza como relé de distancia se debe ajustar al 90% de la impedancia de la línea y al ángulo de la misma. Si se desea que no opere con la pérdida completa de potencial, de utilizarse la característica de detector de nivel, con lo que se requiere que ( $I_{Z-V}$ ) tenga un valor que inhiba la operación de ( $M_{11}$ ), al ocurrir la pérdida de potencial.

Si esta función se utiliza como detector de nivel, su ajuste será del 100% de la impedancia de la línea.

b) Líneas con capacitor serie atrás del relé.

Su aplicación es la misma que para líneas sin capacitor serie, solo que debe tener bloqueo de  $M_{1B}$ , además cuando no se utiliza la función de detector de nivel, ( $M_{11}$ ), debe ajustarse al 80% de la línea 0 al 100% cuando se utiliza como detector de nivel.

c) Líneas con capacitor serie en frente al relé.

El uso de ( $M_{11}$ ), con líneas con capacitor serie tiene serios inconvenientes, ya que si la función se ajusta para la impedancia mínima de estado estable para una falla externa, tiempo de

operación debe ser cargo para prevenir el alcance transitorio en transitorios de frecuencia natural que ocurren en líneas con compensación serie, ya que este transitorio tiene una constante de tiempo larga.

De aquí se deduce que con un tiempo largo de operación, la función  $(M1)_1$ , ya no satisface la condición de disparo directo, por ello el detector de nivel se utiliza para prevenir el sobrealcance de  $(M1)_1$ , debido a la caída de voltaje en el capacitor, entonces el ajuste del detector de nivel debe ser mayor que el voltaje máximo del capacitor, el cual lo define el nivel a que operan los gaps del capacitor, con este ajuste la función  $(M1)_1$  no operará para fallas externa.

Así, el alcance debe ajustarse al 100% de la línea y el detector de nivel igual al 110% del nivel del gap.

### MODULO SLCN.

#### Funciones $D_2(T)$ y $D_2(B)$

Líneas sin compensación serie.

Las funciones direccionales  $D_2T$  y  $D_2B$  utilizan un voltaje de operación proporcional a  $I_2Z$  y un voltaje de polarización  $V_2 - I_2Z$ . Para fallas externas o internas remotas, el voltaje de polarización es compensado para hacerlo equivalente al voltaje de secuencia negativa en la falla y tener una señal de polarización más confiable al ocurrir fallas lejanas donde el voltaje de secuencia negativa en la fuente es pequeño, se recomienda un ajuste del 25% de la impedancia de la línea.

El voltaje de secuencia negativa puede desplazarse dependiendo del ángulo de la impedancia de la línea, así para líneas con  $80^\circ$  a  $90^\circ$  el desplazamiento de  $V_2$  debe ser  $0^\circ$

ANGULO DE $Z_2$	DESPLAZAMIENTO
$80^\circ - 90^\circ$	$0^\circ$
$70^\circ - 80^\circ$	$10^\circ$
$60^\circ - 70^\circ$	$20^\circ$
$50^\circ - 60^\circ$	$30^\circ$

Tabla VII

Líneas con capacitor serie.

Cuando el capacitor está localizado atrás de la fuente de potencial, la compensación del voltaje de polarización  $I_2Z$  debe ser mayor que la reactancia capacitiva entre la fuente de potencial del relé y el bus atrás del mismo. El ajuste de  $Z$  debe ser mayor que la reactancia capacitiva en un 5%. Cuando toda la compensación esté en un extremo de la línea,  $Z$  será diferente en

las dos terminales, pero la suma de las dos de ser 80% y nunca más del 100% de la impedancia de la línea sin compensación.

Cuando el capacitor está entre la fuente de potencial y los transformadores de corriente, la suma de los ajustes de Z en cada terminal de la línea debe ser igual o menos que el 80% de la impedancia de la línea compensada  $Z_{2L} - X_c$ , pero no mayor del 100%.

Para el ángulo de desplazamiento de  $V_2$  debe considerarse:

Si la suma de los ajustes de Z es el 80% o menos de la impedancia neta entre las fuentes de potencial en cada extremo de la línea se recomienda utilizar  $20^\circ$ .

Si la suma es mayor del 80% se recomienda  $10^\circ$ .

### **Función $(I_2 - KI_1T)(T)$**

Esta función es esencialmente una función de sobrecorriente de secuencia negativa, con una retención por corriente de secuencia positiva para darle más seguridad. Esta retención es efectiva cuando existen corrientes de secuencia negativa debidas a asimetrías en la impedancia del sistema o errores en los transformadores de instrumento, asimismo previene la operación cuando existe disparidad de polos del interruptor aunque esto no es importante, ya que para potenciales del lado línea, esta condición sería una falla externa.

Debe tenerse muy en cuenta el valor de la retención (K) ya que puede existir retención en fallas internas, con resistencias de falla grandes, dado que el flujo de carga produciría secuencia positiva que puede actuar la retención si ésta tiene un valor bajo.

Para fallas Fase-Fase-Tierra la razón de  $Z_0$  a  $Z_1$  en la falla, determina el valor de la corriente de secuencia positiva y negativa, para valores bajos de  $Z_0$  a  $Z_1$ , se producen corrientes de secuencia positiva que pueden alcanzar valores altos de K, produciendo así retención indeseable.

El valor de K y de  $I_2$  sin retención se recomienda determinarse de la aplicación particular del relé así:

Líneas sin Compensación Serie.

Potenciales lado Línea.

Si la razón de  $Z_0/Z_1$  para fallas en la terminal remota es mayor que 0.75, K debe ser 0.15 y el nivel de  $I_2$  (sin retención) igual o menor que la mitad de la mínima  $I_2$  para una falla interna.

Si la razón de  $Z_0/Z_1$  es menor que 0.75 para fallas en la terminal remota,  $K=0.1$  y el valor de  $I_2$  igual o menor que la  $I_2$  mínima para una falla interna.

Cuando se tienen problemas de alta resistencia de falla se recomienda  $K=0.05$ .

Potencial lado Bus.

Un valor de  $K=0.15$  para prevenir operación al tomar carga la línea.

Si la razón de  $z \approx z_1$ , para fallas en la terminal remota, es mayor que 0.75, el nivel de  $I_2$  (sin retención) debe ser igual o menor que la mitad de la  $I_2$  mínima para fallas internas.

Si  $z \approx z_1$ , es menor que 0.5,  $I_2$  (sin retención) debe ser igual o menor que 1/3 de la  $I_2$  mínima, si  $z \approx z_1$ , es menor que 0.35,  $I_2$  (sin retención) debe ser igual o menor que 0.25 de la  $I_2$  Mínima.

Líneas con compensación Serie.

Potenciales en el lado Línea del Capacitor.

La aplicación es la misma que para líneas sin compensación, solo que la asimetría debido a líneas sin transposición es mayor al ser mayor la compensación.

Potenciales lado Bus del Capacitor.

A las consideraciones de las líneas sin capacitor serie, debe agregarse la asimetría de la operación de los gaps del capacitor si operan éstos en una o dos fases como respuesta a condiciones de sobrecarga sin que exista falla en el sistema, la función de sobrecorriente de secuencia negativa ve la asimetría como una falla interna, para prevenir esta situación, el factor  $K$  debe seleccionarse igual o mayor que la razón de  $z \approx z_1$  en el relé, basadas estas corrientes en la impedancia de la fuente, la línea y el capacitor.

**Función  $I_2 (B)$**

Esta función debe ajustarse mayor que la corriente normal de secuencia negativa de la línea o al ajuste mínimo que sea obtenido.

**Función  $I_1 (T)$**

Esta función proporciona una supervisión para  $M_1 T$  y  $(M_1)_1$  y sella el disparo en combinación con  $(I_2 - KI_1 T)(T)$  y debe ajustarse menor que  $2/3$  de la corriente mínima de falla. Si se prefiere, puede ajustarse arriba de la corriente de carga máxima para prevenir la operación de la función de distancia al ocurrir pérdida de potencial.

### **Función $I_1(B)$**

Esta función supervisa la operación de M1B para prevenirla de operaciones al ocurrir transitorios, debe ajustarse al 50% del valor de  $I_1(T)$  en la terminal remota.

### **Función $(I_0 - KI_1)T$**

Es una función para disparo directo al ocurrir fallas internas severas que involucran tierra, ya que opera con corriente de secuencia cero, con retención por corriente de secuencia positiva, debe ajustarse con 25% más de la corriente máxima de secuencia cero si no hay capacitor serie en la línea y 50% más de la corriente máxima de secuencia cero si la línea tiene capacitor serie para K se sugiere un valor de 0.3.

### **Función $I_0(T)$**

Esta función se utiliza para el disparo por baja aportación por lo que debe ajustarse a un 150% de la máxima corriente de secuencia negativa que puede ocurrir por condiciones de desbalance de carga, o bien a un valor ligeramente mayor que la corriente mínima de secuencia negativa por falla.

### **Función $I_1T$**

Para líneas compensadas se ajusta mayor de 125% de la corriente de operación del Gap del capacitor, o bien al 150% de la corriente de falla con los Gaps operados.

Para líneas sin compensación serie, se ajusta para el 125% de la corriente de falla máxima.

### **Función $I_2TOC$**

Esta función tiene característica de tiempo muy inverso y es un respaldo para fallas desbalanceadas para su ajuste, se debe considerar:

- a) Coordinación con funciones similares en líneas adyacentes.
- b) Coordinación con protección de respaldo de líneas adyacentes.

En las tablas VIII y IX se muestran los criterios de ajustes y valores recomendados por el fabricante, para las diferentes funciones y temporizadores de los módulos SLYP y SLCN, para diferentes líneas, en función de la impedancia primaria.

Imped. sec. posit. de línea ohms prim.	0-30	30-60	60-90	90-120	120-1 80	180-2 40
Alcance del relé en % imped. línea	200%	140%	120%	110%	100%	100%
M1T alcance real	250%	175%	150%	137.5%	125%	125%
M1T temporizador ( f.p.u.) en miliseg.	4.5	5.5	6	6	6.5	6.8
M1T temporizador ( s.s.p.u.)	4.5	4.5	4.8	5.3	5.8	6.2
M1T temporizador ( d.o.)	5	5	5	5	5	5
M1B alcance real bloqueo (1.75xZcalc)	350%	245%				
M1B alcance real bloqueo (1.25xZcalc)			150%	137.5%	125%	125%
M1B alcance real disparo (0.25xZcalc)	50%	35%	30%	27.5%	25%	25%
M1B temporizador (f.p.u.)	4	4	4	4.3	4.8	5.2
M1B temporizador (d.o.)						
a).- Línea normal	50	50	50	50	50	50
b).- Línea compensada o adyacente	120	120	120	120	120	120
(M1)1 Alcance real	90%	90%	90%	90%	90%	90%
(M1)1 temporizador (f.p.u.tripolar)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
(M1)1 temporizador (f.p.u. monopolar)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
(M1)1 temporizador (s.s.p.u.)	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
(M1)1 temporizador (d.o.)	5	5	5	5	5	5
V1	0.75 pu	0.75 pu				

TABLA VIII

Imped. sec. negat. de línea ohms prim.	0-30	30-60	60-90	90-120	120-1 80	180-2 40
D2T temporizador (f.p.u.) milisegundos	5.5	5.5	6	6	6.5	6.5
D2T temporizador (s.s.p.u.)	5	5	5	5	5	5
D2T temporizador (d.o.)	5	5	5	5	5	5
D2B temporizador (f.p.u.)	4	4	4	4	4	4
D2B temporizador (d.o. línea normal )	50	50	50	50	50	50
D2B temporizador (d.o. línea compens)	120	120	120	120	120	120

Tabla IX

- f.p.u. = first pick-up es la duración de un solo pulso en la entrada del temporizador que le puede producir un cambio de estado de bajo a alto.
- s.s.p.u. = steady state pick-up se refiere a la duración de cada pulso de una sucesión de ellos en la entrada del temporizador que le produce una salida continua.
- d.o. = drop out es el tiempo que tarda el temporizador en cambiar de estado de alto a bajo después que ha desaparecido la señal de entrada que lo mantenía operado.

#### IV.- CALCULO DE AJUSTES

El propósito del presente capítulo es mostrar los métodos de cálculo de los diferentes esquemas de protección mencionados en el desarrollo de éste trabajo, basados en los respectivos instructivos que proporciona el fabricante de dichos equipos.

Así pues haremos un cálculo por cada esquema, seleccionando las protecciones de acuerdo a como están instaladas en las líneas de transmisión del sistema que hemos tomado como base.

En el apéndice se muestra un diagrama unifilar y una tabla con los valores de impedancias de dichas líneas.

#### 1.- ESQUEMAS ELECTROMECANICOS

##### A.- RELEVADORES GENERAL ELECTRIC

Línea Chicoasén-Juile A3040 ( en Chicoasén )

Relevadores utilizados:

GCY para fallas entre fases

GCXG para fallas de fase a tierra

Datos de línea y relaciones de transformación de corriente y voltaje:

LT A3040 ( Chicoasén-Juile )

Refiriéndonos a la tabla ( A1 ) del apéndice y recordando que:

$$\Omega_s = \Omega_P \frac{RTC}{RTP}$$

Longitud 243 km

$$Z_1 = 0.8443 + j 10.2985 = 10.333 \angle 85.31^\circ \Omega$$

$$Z_0 = 7.4386 + j 35.9131 = 36.675 \angle 78.29^\circ \Omega$$

$$Z_{0m} = 6.496 + j 20.9554 = 21.939 \angle 72.77^\circ \Omega$$

$$RTC = 2000/5 = 400/1$$

$$RTP = 400000/120 = 3500/1$$

LT A3240 ( Juile-Temascal )

Longitud 155 km

$$Z_1 = 0.5386 + j 6.57 = 6.592 \angle 85.31^\circ \Omega$$

## Relevadores GCY

Refiriéndonos a la ecuación (30) el cálculo de ajuste de las tres zonas se realiza con la fórmula:

$$T = \frac{Z_{\min} \cos(\theta - r)}{Z_L} T_E$$

Ajuste de zona 1

$$Z_L = 0.85 Z_1 = 0.85 (10.33 [85.31]) = 8.78 [85.31] \Omega s$$

Donde  $Z_1$  es la impedancia de secuencia positiva de la L.T. A3040

De la tabla (1) seleccionamos el alcance mínimo básico para la unidad M1  $Z_{\min} = 3$

Aplicando la fórmula tenemos:

$$T = \frac{3 \cos(85.31 - 60)}{8.78} (100) = 30.88\%$$

El tap de restricción para la zona 1 se ajustará a 31 %

Ajuste de zona 2

$$Z_L = Z_1 LT A3040 + 0.5 Z_1 LT A3240$$

$$Z_L = 0.8443 + j 10.2985 + 0.5 (0.5386 + j 6.57) = 13.629 [85.31] \Omega s$$

Seleccionando  $Z_{\min} = 3$  y aplicando la fórmula tenemos:

$$T = \frac{3 \cos(85.31 - 60)}{13.629} (100) = 19.89\%$$

El tap de restricción para zona 2 se ajustará a 20 %

Ajuste de zona 3

$$Z_L = Z_1 LT A3040 + Z_1 LT A3240$$

$$Z_L = (0.8443 + j 10.2985) + (0.5386 + j 6.57) = 16.925 [85.31]$$

Seleccionando  $Z_{\min} = 3$  y aplicando la fórmula tenemos:

$$T = \frac{3 \cos(85.31 - 60)}{16.925} (100) = 17.43\%$$

El tap de restricción para zona 3 se ajustará a 17 %

## Relevadores GCXG

Refiriéndonos a la ecuación (32), el cálculo de ajuste para zonas 1 y 2 se hará con la fórmula:

$$T = \frac{X_{\min}}{X_{1L}} 100$$

Ajuste de zona 1

$$X_{1L} = 0.85X_{1LT A3040}$$

$$X_{1L} = 0.85(10.2981) = 8.753 \text{ } \Omega \text{ s}$$

De la tabla ( III ) , seleccionando  $X_{\min} = 2.0$  y aplicando la fórmula tenemos:

$$T = \frac{2.0}{8.753} 100 = 22.84 \%$$

El tap de restricción para zona 1 se ajustará a 23 %

Ajuste de zona 2

$$X_{1L} = X_{1LT A3040} + 0.5X_{1LT A3240}$$

$$X_{1L} = 10.2985 + 0.5(6.57) = 13.583 \text{ } \Omega \text{ s}$$

$$T = \frac{2.0}{13.583} 100 = 14.72\%$$

El tap de restricción para zona 2 se ajustará a 15 %

Ajuste de zona 3

Refiriéndonos a la ecuación ( 33 ), la fórmula para el ajuste de zona 3 es:

$$T = \frac{Z_{\min}}{Z_L} \cos(\theta - \tau)$$

$$Z_L = Z_{1LT A3040} + Z_{1LT A3240}$$

$$Z_L = (0.8443 + j 10.2985) + (0.5383 + j 6.57) = 16.925 \text{ } \angle 85.31$$

De la tabla ( III ) , seleccionando  $Z_{\min} = 6$ , y sustituyendo en la fórmula tenemos:

$$T = \frac{6.0}{16.925} 100 = 35.46 \%$$

El tap de restricción para zona 3 se ajustará a 35 %

**Ajuste del transformador de corriente compensador por línea paralela**

Refiriéndonos a la ecuación ( 25 ), la fórmula para el ajuste del primario del transformador es:

$$K' = \frac{X_0 - X_1}{3X_1} 100$$

$$K' = \frac{35.9131 - 10.2985}{3(10.2985)} 100 = 82.9 \%$$

El tap se ajustará a 83 %

Refiriéndonos a la ecuación ( 25.a ), la fórmula para el ajuste del secundario del transformador es:

$$K'' = \frac{2X_{omS_2} RTCP}{3X_{1S_1} RTC} 100$$

$$K'' = \frac{2(20.9554)(0.85)(400)}{3(10.2985)(0.85)(400)} 100 = 135\%$$

El tap se ajustará al 100%

## B.- RELEVADORES WESTINGHOUSE

KD-4 y KD41 para fallas entre fases  
KDXG para fallas de fase a tierra

Línea A3050 Malpaso-Chicoasen ( En malpaso )

Datos de líneas y relaciones de transformación

LT A3050 Malpaso Chicoasen

Longitud 80 km

$$Z_1 = 0.2217 + j 2.8072 = 2.8159 \angle 85.48 \Omega \text{ s}$$

$$Z_0 = 2.1123 + j 9.0931 = 9.3352 \angle 76.92 \Omega \text{ s}$$

$$RTC = 1600/5 = 320/1$$

$$RTP = 3500/1$$

LT A3030 Chicoasen Angostura

Longitud 88 KM

$$Z_1 = 0.2448 + j 3.088 = 3.0976 \angle 85.46 \Omega \text{ s}$$

LT A3040 Chicoasen Juile

Longitud 243 km

$$Z_1 = 0.8443 + j 10.2985 = 10.333 \angle 85.31^\circ \Omega \text{ s}$$

## Relevadores KD-4 y KD-41

Ajuste de zona 1

$$Z_{\theta} = 0.85 Z_{IL} = 0.85(0.2217 + j 2.8072) = 2.3935 \angle 85.48 \text{ } \Omega \text{ s}$$

Refiriéndonos a la ecuación ( 35 ) tenemos:

$$Z_R = \frac{Z_{\theta}}{\cos(\theta - \alpha)} = \frac{2.3935}{\cos(75 - 85.48)} = 2.4341 \text{ } \Omega \text{ s}$$

Con el valor encontrado recurrimos a la tabla ( IV ), encontramos que el valor mas próximo es 2.46 ; para éste valor corresponden los siguientes valores de T,S,M:

$$T = 2.9$$

$$S = 1$$

$$M = +0.18$$

Utilizando la ecuación ( 34 ) y los valores encontrados anteriormente, checamos el alcance real al que quedará ajustado finalmente el relevador

$$Z = \frac{ST}{1+M} = \frac{1(2.9)}{1+0.18} = 2.45 \text{ } \Omega \text{ s a } 75^{\circ}$$

$$Z_{\theta} = 2.45 \cos(75 - 85.48) = 2.4091 \text{ } \Omega \text{ s a } 85.48^{\circ}$$

Ajuste de zona 2

$$Z_{\theta} = Z_1 + 0.5 Z_2 \text{ LTA3030}$$

$$Z_{\theta} = 0.2217 + j 2.8072 + 0.5 ( 0.2448 + j 3.088 ) = 4.3647 \angle 85.47^{\circ} \text{ } \Omega \text{ s}$$

$$Z_R = \frac{Z_{\theta}}{\cos(\theta - \alpha)} = \frac{4.3647}{\cos(75 - 85.47)} = 4.4386 \text{ } \Omega \text{ s a } 75^{\circ}$$

De la tabla ( )

$$T = 4.06$$

$$S = 1$$

$$M = -.09$$

$$Z = \frac{ST}{1+M} = \frac{1(4.06)}{1-.09} = 4.46 \text{ } \Omega \text{ s a } 75^{\circ}$$

$$Z_{\theta} = 4.46 \cos(75 - 85.47) = 4.3855 \text{ } \Omega \text{ s a } 85.47^{\circ}$$

### Ajuste de zona 3

$$Z_{\theta} = Z_1 LT A3050 + Z_1 LT A3040$$

$$Z_{\theta} = 0.2217 + j 2.8072 + 0.6754 + j 8.2388 = 11.082 \angle 85.35^{\circ} \Omega s$$

$$Z_R = \frac{Z_{\theta}}{\cos(\theta - \alpha)} = \frac{11.082}{\cos(75 - 85.35)} = 11.2653 \Omega s \text{ a } 75^{\circ}$$

De la tabla ( IV )

$$T = 5.8$$

$$S = 2$$

$$M = +.03$$

Verificando con la fórmula tenemos:

$$Z_R = 11.26 \Omega s \text{ a } 75^{\circ}$$

$$Z_R = 11.076 \Omega s \text{ a } 85.35^{\circ}$$

### Relevadores KDXG

Unidad de reactancia

Refiriéndonos a las ecuaciones ( 36 ) y ( 37 )

$$X_1 = \frac{10T}{M_C + M_F} \quad \text{para zonas 1 y 2}$$

$$X_1 = \frac{25T}{M_C + M_F} \quad \text{para zona 3}$$

### Ajuste de zona 1

$$X_1 = 0.85X_1 LT A3050$$

$$X_1 = 0.85(2.8072) = 2.3861 \Omega s$$

Escogiendo el valor de  $T = T_L = T_0$  más cercano al valor encontrado, encontramos que el valor máximo es 1.1, y aplicando la fórmula tenemos:

$$M_C + M_F = \frac{10T}{X_1} = \frac{10(1.1)}{2.3861} = 4.61 = 4 + 0.61$$

Los ajustes para zona 1 serán:

$$T = T_L = T_0 = 1.1$$

$$M_C = 4.0$$

$$M_F = 0.6$$

Ajuste de zona 2

$$X_1 = X_1 \text{ LT A3050} + 0.5 X_1 \text{ LT A3030}$$

$$X_1 = 2.8072 + 0.5(3.088) = 4.3512 \Omega s$$

Escogiendo el valor de  $T = T_L = T_o$  más cercano al valor encontrado, encontramos que el valor máximo es 1.1, y aplicando la fórmula tenemos:

$$M_C + M_F = \frac{10T}{X_1} = \frac{10(1.1)}{4.3512} = 2.52 = 2 + 0.52$$

Los ajustes para zona 2 serán:

$$T = T_L = T_o = 1.1$$

$$M_C = 2.0$$

$$M_F = 0.5$$

Ajustes de zona 3

$$X_1 = X_1 \text{ LT A3050} + X_1 \text{ LT A3040}$$

$$X_1 = 2.8072 + 8.2388 = 11.046 \Omega s$$

$$T = T_L = T_o = 1.1$$

$$M_C + M_F = \frac{25T}{X_1} = \frac{25(1.1)}{11.046} = 2.49 = 2 + 0.49$$

Los ajustes para zona 3 serán:

$$T = T_L = T_o = 1.1$$

$$M_C = 2.0$$

$$M_F = 0.5$$

**Ajuste del transformador de corriente compensador**

Refiriéndonos al tercer término de la ecuación ( 28.a ), el devanado primario de dicho transformador se ajusta de acuerdo a la fórmula:

$$C = \frac{Z_{OL} - Z_{1L}}{3Z_{1L}}$$

$$C = \frac{(2.1123 + j 9.0931) - (0.2217 + j 2.8072)}{3(0.2217 + j 2.8072)} = 0.777 \angle -12.22^\circ$$

El ajuste del primario será :

$$C = 0.8$$

El devanado secundario se deja abierto por no existir impedancia mutua con otra línea.

## 2.- ESQUEMAS ESTATICOS

### A.- PROTECCION ESTATICA SLDY

Cálculo de ajustes de la LT A3050 Malpaso-Chicoasen ( en la S.E. Malpaso Dos )

Datos de la línea

Longitud 80 km.

$$Z_1 = 0.2773 + j 3.5080 = 3.519 \angle 85.48^\circ \Omega \text{ s}$$

$$RTC = 2000/5 = 400/1 \text{ en ambas estaciones}$$

$$RTP = 3500/1 \text{ en ambas estaciones}$$

#### Ajuste de la función MT

El alcance de ésta función se ajustará al 150 % de la impedancia de secuencia positiva de la línea  $Z_{MT} = 1.5(3.519) = 5.27 \Omega \text{ s}$

Seleccionando un alcance básico de  $3 \Omega \text{ s}$  y aplicando la fórmula ( ) tenemos:

$$\%TAP = \frac{Z_{bas} (100)}{Z_{MT}} = \frac{3(100)}{5.27} = 56.83\%$$

El tap se ajustará a 57% con  $3 \Omega \text{ s}$  básicos

#### Ajuste de la función MB

El alcance de ésta función en la dirección de bloqueo será del 150% de  $Z_{1L}$

$$Z_{MB} = 1.5(3.519) = 5.27 \Omega \text{ s}$$

$$\%TAP = \frac{Z_{bas} (100)}{Z_{MT}} = \frac{3(100)}{5.27} = 56.83\%$$

El tap se ajustará a 57% con  $3 \Omega \text{ s}$  básicos

El alcance hacia atrás (dirección de disparo) será del 20% del alcance en la dirección de bloqueo; ésto se logra colocando el puente correspondiente a éste valor en la tarjeta AE del módulo SLDY51

## Ajuste de los detectores de secuencia negativa

### Ajuste de FDL

Directamente lo ajustaremos a 0.2 amperes secundarios

### Ajuste de FDHL

$$FDHL = \frac{4}{3} FDL + 0.375 I_{cap}$$

Los factores 4/3 y 0.375 son recomendaciones del fabricante

$$I_{cap} = 0.099 \text{ amp sec}$$

$$FDHL = \frac{4}{3} (0.2) + 0.375(0.099) = 0.3037 \text{ amp sec}$$

FDHL se ajustará a 0.3 amp sec.

### Ajuste de FDHH

$$FDHH = \frac{2}{3} I_{a2}$$

$$I_{a2} = 0.6761 \text{ amp sec} \quad (\text{ver apéndice})$$

$$FDHH = \frac{2}{3} (0.6761) = 0.45 \text{ amp sec}$$

$$FDHH = \frac{4}{3} (FDL) + \frac{1}{2} I_{cap}$$

Los factores 4/3 y 1/2 son recomendaciones del fabricante

$$FDHH = \frac{4}{3} (0.2) + \frac{1}{2} (0.099) = 0.3161 \text{ amp sec}$$

$$0.3161 < FDHH < 0.45$$

FDHH se ajustará a 0.45 amp sec.

## Ajuste de los detectores de secuencia positiva

### Función $I_{1T}$

$$I_{1T} = \frac{2}{3} I_{3\phi, \min} \text{ para falla en Chiccoasén}$$

$$I_{3\phi, \min} = 649.96 \text{ amp prim.} = 1.6249 \text{ amp sec} \quad (\text{ver apéndice})$$

$$I_{1T} = \frac{2}{3} (1.6249) = 1.083 \text{ amp sec}$$

### Función $I_{1B}$

Su ajuste será el 50% del ajuste de  $I_{1T}$  en la terminal de Chiccoasén

Procediendo de la misma manera que para el cálculo de Malpaso, encontramos que:

$$I_{IT} \text{ en Chi} = 1.56 \text{ amp sec}$$

$$I_{IB} = 0.5(1.56) = 0.78 \text{ amp sec}$$

#### Ajuste de la función de secuencia cero (G4)

Del apéndice observamos que de todas las corridas de corto circuito realizadas, la máxima corriente  $I_{f0}$  que pasa por el relevador es para una falla de 2 fases a tierra en el bus de Malpaso con un valor de 2.38 amp secundarios.

Aplicando un margen de seguridad de 25% tenemos:

$$G4 = 1.25(2.38) = 2.975 \text{ amp secundarios.}$$

#### B.- PROTECCION ESTATICA SLYP-SLCN

Línea utilizada A3040 Chicoasén - Juile

Datos de la línea:

$$Z_1 = 7.388 + j 90.112 \Omega_p = 0.8448 + j 10.2985 \Omega_s$$

$$Z_0 = 65.088 + j 314.24 \Omega_p = 7.4386 + j 35.9131 \Omega_s$$

Relaciones de transformación:

$$RTC = 2000/5 = 400/1$$

$$RTP = 420000/120 = 3500/1$$

#### MODULO SLYP

Alcance de los elementos  $M_{IT}$ ,  $M_{IB}$  y  $MOB$

$$Z_1 = 90.41 [85.31^0 \Omega_p = 10.3325 [85.31^0 \Omega_s$$

De la tabla ( ) se obtiene un alcance de 110% de  $Z_1$

$$Z_R = 1.1(10.3325) = 11.3658 \Omega_s$$

Escogiendo un alcance básico de 3  $\Omega$

$$\%TAP = \frac{T_B}{Z_R} (100)$$

$$\%TAP = \frac{3(100)}{11.3658} = 26.395$$

Por lo tanto los ajustes serán:

$$T_B = 3 \Omega$$

$$TAP = 26\%$$

$$r = 85^\circ = \text{angulo de alcance máximo}$$

De la tabla ( VII ) los alcances reales son:

$$M_{\text{1T}} = M_{\text{1B}} = MOB = 1.375(11.3658) = 15.62 \Omega$$

En la dirección de disparo:

$$M_{\text{1B}} = 0.275(11.3658) = 3.12 \Omega$$

*Defasaje de polarización de M<sub>1T</sub> y MOB*

Por recomendación del fabricante se ajusta a cero grados

*Elementos de tiempo segun la tabla ( VIII )*

FUNCION	FPU	SSPU	DO
M <sub>1T</sub>	6	5.3	5
M <sub>1B</sub>	4.3	-	120
MOB		-	33
(M <sub>1</sub> )1	4.5	4.2	5

Nota: Todos los tiempos están en milisegundos.

*Pick-Up de la función MOB ( característica tomate )*

Dar una separación del orden de 1 a 2 ohms entre la característica MOB y la M<sub>1T</sub> en su parte más ancha.

*Defasaje de polarización de M<sub>1B</sub>*

Por recomendación del fabricante se ajusta a cero grados

*Alcance de la función (M<sub>1</sub>)1*

$$Z_1 = 0.9(Z_B) = 0.9(11.3658) = 10.22 \Omega$$

*Detector de nivel V1*

De la tabla ( ) tenemos :

$$V_1 = 0.75(120) = 90 \text{ volts } \Phi - \Phi$$

Drop-out = 11 milisegundos

## MODULO SLCN

### Alcance básico de $I_0 Z$

Conectar al mismo valor de alcance básico determinado para los elementos de distancia del módulo SLYP.

Por lo tanto el ajuste será 3 ohms.

### Desplazamiento (offset) de $D_2 T$ y $D_2 B$

$$\text{offset} = 0.25 Z_R = 0.25 (11.3658) = 2.84 \Omega$$

### Defasaje de polarización con $V_2$

Por recomendación del fabricante se ajusta a cero grados.

Ajuste de los elementos de tiempo según tabla ( IX )

FUNCION	FPU	SSPU	DO
$D_2 T$	6	5	5
$D_2 B$	4	-	5

Nota: tiempos en milisegundos.

### Detector de nivel de $I_1 (T)$

$$I_1 (T) < \frac{2}{3} I_1 \text{ para falla trifásica con generación mínima en el extremo remoto}$$

$$I_1 (T) < \frac{2}{3} (2.897) = 1.93 \text{ amps secundarios}$$

Ajuste de  $I_1 (T) = 1.8 \text{ amps}$

Ajuste del Drop-Out del temporizador = 11 milisegundos

### Detector de nivel de $I_1 (B)$

$$I_1 (B) = 0.5 I_1 (T) \text{ del extremo remoto (Juile)}$$

$$I_1 (T) \text{ juile} < \frac{2}{3} (1.959) = 1.30 \text{ amps secundarios}$$

$$I_1 (B) = 0.5(1.2) = 0.6 \text{ amps sec}$$

Ajuste del Drop-Out del temporizador = 65 milisegundos

### Detector de nivel de $I_2 (B)$

$$I_2 (B) = \frac{2}{3} I_{\min}$$

$I_{2 \text{ maj}} = 341.41 \text{ amps primarios} = \text{mínima aportación para falla en Juile}$

$I_{2 \text{ mach}} = 174.48 \text{ amps primarios} = \text{mínima aportación para falla en chicoasén}$

$$I_2(B) = \frac{2}{3} \frac{174.78}{400} = 0.29 \text{ ampssec} \quad \text{RTC} = 400$$

Ajuste de  $I_2(B) = 0.3$  amps secundarios

Ajuste del Drop-Out del temporizador = 50 milisegundos

*Detector de nivel de  $I_0(T)$*

$$I_0(T) = \frac{2}{3} I_{0\text{maj}}$$

$I_{0\text{maj}} = 253.51$  amps prim = mínima aportación para falla en extremo remoto (jule)

$$I_0(T) = \frac{2}{3} \frac{253.51}{400} = 0.42 \text{ amps sec} \quad \text{RTC} = 400$$

Ajuste de  $I_0(T) = 0.4$  amps sec

Ajuste del Drop-Out del temporizador = 11 milisegundos

*Detector  $I_2$  TOC*

Pick-Up

$$TAP = 0.5 I_{2\text{mcj}}$$

$I_{2\text{mcj}} = 579.5$  amps prim. = mínima contribución para falla en jule

$$TAP = 0.5 \frac{579.5}{400} = 0.72 \text{ amps sec.} \quad \text{RTC} = 400$$

Ajuste del Pick-Up = 0.7 amps sec.

Palanca o tiempo

$I_2 = 829.6$  amps sec. para falla  $\phi-\phi$  en jule con generación máxima.

$$I_2 = \frac{829.6}{400} = 2.07 \text{ amps sec.}$$

Multiplo de tap

$$MT = \frac{2.07}{0.7} = 2.96$$

Recurriendo a la curva tiempo - corriente de la figura 66, obtenemos el valor del tiempo requerido

$t = 0.55$  segundos

Los ajustes serán

Pick-Up = 0.7 amps sec.

palanca = 2

*Ajuste del detector ( $I_2 - K_1 I_1$ )(T)*

Cálculo de  $K_1$

$$\text{Generación Máxima } \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{0.00476 [86.5^0]}{0.00928 [88.14^0]} = 0.5129$$

$$\text{Generación Mínima } \frac{Z_0}{Z_1} = \frac{0.00708 | 88.2^0}{0.01752 | 87.21^0} = 0.404$$

La recomendación del fabricante es:

$$\text{si } \frac{Z_0}{Z_1} > 0.75 \text{ usar } K_1 = 0.15$$

$$\text{si } \frac{Z_0}{Z_1} < 0.75 \text{ usar } K_1 = 0.1$$

Por lo tanto  $K_1 = 0.1$

*Ajuste de  $I_2$*

Se obtuvo con el valor de corriente de secuencia negativa para falla de fase a tierra en Juile con generación mínima

$$I_{2\min} = 341.41 \text{ amps prim} = \frac{341.41}{400} = 0.853 \text{ amps sec}$$

$$I_2 = 0.5(0.853) = 0.4265 \text{ amps sec sin retención}$$

$$I_2 = \frac{0.426}{1-0.1} = 0.473 \text{ amps sec con retención}$$

Elementos de tiempo con restricción.

ELEMENTO	FPU	SSPU	DO
$(I_2 - K_1 I_1)(T)$	5.5	4.2	5.0
$(I_0 - K_D I_1)(T)$	4.5	4.2	5.0
$(I_0 - K_S I_1)(T)$	4.5	4.2	20

*Detector  $(I_0 - K I_1)(T)$*

Ajustes recomendados por el fabricante:

$$K = 0.6$$

$$I_0 = 0.33 \text{ amp sin restricción}$$

$$I_0 = \frac{0.33}{1-0.6} = 0.826 \text{ amp con restricción}$$

*Detector  $(I_0 - K I_1)T$*

$K = 0.3$  invariablemente

Para el ajuste del nivel del detector, se calculan  $I_1$  e  $I_0$  para falla de fase a tierra en Chicoasén y en Juile con generación máxima y con generación mínima y se selecciona el valor más alto. Dicho valor se obtuvo de la tabla (A 2) del apéndice y fue 341.41 amp.

## Modulo SLA52

En este módulo únicamente se requiere ajustar los elementos de tiempo con los valores recomendados por el fabricante de acuerdo a la siguiente tabla.

ELEMENTO	PU	DO
TL-1	-	200
TL-2	100	-
TL-3	33	40
TL-5	300	-
TL-6	3	10
TL-7	80	80

## Módulo SLAT51

Solo se requiere ajustar 2 elementos de tiempo

ELEMENTO	PU	DO
TL-31	75	-
TL-32	-	100

## V.- COMPARACION ENTRE LOS ESQUEMAS Y CONCLUSIONES

Las ventajas y desventajas de los esquemas electromecánicos y estáticos se describen para cada uno de ellos a continuación.

### Esquemas Electromecánicos.

#### Ventajas:

- \* No requieren de una fuente auxiliar de alimentación.
- \* Son inmunes a la mayoría de las interferencias electromagnéticas.

#### Desventajas:

- \* Su fabricación es más elaborada en cuanto a partes mecánicas por lo que su costo es alto.
- \* El hecho de que tengan partes móviles, implica mayor mantenimiento.
- \* Para integrar un esquema de protección, se requieren varios reles, ocupando mucho espacio.
- \* Susceptibles a descalibración de sus elementos móviles.

### Esquemas Estáticos.

#### Ventajas:

- \* Precisión en la medición de fallas.
- \* Rapidez en la detección de fallas.
- \* Reles compactos, ocupando poco espacio.
- \* Requieren poco mantenimiento por no tener partes móviles.
- \* Calibración prácticamente permanente.
- \* Precios relativamente bajos con relación a un esquema electromecánico.

#### Desventajas.

- \* Susceptibles a interferencias electromagnéticas.
- \* Requieren de personal más capacitado para su atención.
- \* Todo el esquema depende de una fuente auxiliar de alimentación.

## CONCLUSIONES

Con el pronóstico de una alta demanda de energía eléctrica para un país en desarrollo como lo es México, se establecieron proyectos de generación y transmisión de electricidad. Uno de ellos lo fué el Sistema Grijalva en el sureste de la República, aprovechando las aguas del río Grijalva y sus afluentes.

Este proyecto consistió en la construcción de las centrales hidroeléctricas "Malpaso", "Angostura", "Chicoasén" y por último "Peñitas". El proyecto se inicio en los años 60's y se concluyó a finales de los 80's.

Al inicio, la operación de la red de transmisión era sencilla por la generación que estaba operando. La tecnología existente tenía como relevadores de protección para líneas de transmisión, relevadores electromecánicos los cuales satisfacían las necesidades de protección de la red.

Con el incremento paulatino de la generación desde 1080 , 2040, 5540 y por último 5870 MVA con la entrada en operación de la central Peñitas, la complejidad en la red de transmisión se hizo mayor al aumentar las líneas de transmisión, de manera que las protecciones originales no pudieron satisfacer las necesidades de protección en la red de transmisión, junto a esto la tecnología tuvo avances notables estando disponibles relevadores de protección con tecnología electrónica, que ofrecen mejores condiciones de operación y son más efectivas en algunos tipos de fallas, que las protecciones electromecánicas no son capaces de detectar.

Estando el proyecto inicial concluido, y siendo la demanda de energía para casi la totalidad de la generación disponible se tiene la necesidad de tener esquemas de protección redundantes para una sola línea de transmisión, con el propósito de tener una mejor confiabilidad, seguridad, rapidez y selectividad.

Para cumplir lo anterior se aplicaron esquemas de protección estáticas con principios de operación diferentes, siendo el objetivo de esta característica determinar de mejor manera cualquier falla en el sistema. Las protecciones seleccionadas fueron SLYP-SLCN con una característica de comparación direccional y como segunda protección SLDY con una característica de comparación de fase, teniendo ambas, funciones de protección de emergencia. Los dos esquemas de la marca General Electric.

Finalmente podemos decir que con el crecimiento de la red, los avances tecnológicos y las mayores exigencias en cuanto a protección eléctrica, los esquemas electromecánicos cumplieron su función y a la fecha prácticamente han sido reemplazados por las protecciones estáticas de acuerdo a las necesidades de protección en la red, con el propósito de tener mayor continuidad en el servicio.

## APENDICE

### 1.- Valores en por unidad (Pu)

$$V_{PU} = \frac{V_{VOLTS}}{V_{BASE}} = \frac{V}{V_B}$$

$$I_{PU} = \frac{I_{AMP}}{I_{BASE}} = \frac{I}{I_B}$$

$$Z_{PU} = \frac{Z_{OHMS}}{Z_{BASE}} = \frac{Z}{Z_B}$$

$$Z_B = \frac{KV^2}{MVA_B}$$

$$I_B = \frac{MVA_B \times 10^3}{\sqrt{3} KV_B}$$

Invariablemente en un sistema de 400 Kv las bases más convenientes son:

$$KV_B = 400$$

$$MVA_B = 100$$

Por lo tanto:

$$Z_B = \frac{400^2}{100} = 1600 \text{ ohms}$$

$$I_B = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} (400)} = 144.5 \text{ amps}$$

### 2.- Valores secundarios

$$V_S = \frac{V_P}{RTP}$$

$$I_S = \frac{I_P}{RTC}$$

$$Z_S = Z_P \frac{RTC}{RTP}$$

RTC = Relación de los transformadores de corriente

RTP = Relación de los transformadores de potencial

$V_S$  = Voltaje en el lado secundario

$V_P$  = Voltaje en el lado primario

$I_S$  = Corriente en el lado secundario

$I_P$  = Corriente en el lado primario

$Z_S$  = Impedancia vista desde el secundario

$Z_p$  = Impedancia vista desde el primario

### 3.- Parametros de las Líneas de transmisión.

LÍNEA	LONG	$Z_1$	$Z_1$	$Z_0$	$Z_0$
Numero	Kilomet.	Ohms		Ohms	
A3030	88.0	2.6784 + j33.776	33.88   85.5°	25.424 + j109.392	112.3   76.9°
A3130	91.0	2.7696 + j34.928	35.03   85.5°	26.288 + j113.120	116.1   76.9°
A3050	80.0	2.4252 + j30.704	30.79   85.5°	23.104 + j99.4560	102.1   76.9°
A3150	67.0	2.0384 + j25.712	25.79   85.5°	19.360 + j83.2960	85.5   76.9°
A3060	144.3	4.3920 + j55.376	55.54   85.5°	41.680 + j179.360	184.1   76.9°
A3160	144.3	4.3920 + j55.376	55.54   85.5°	41.680 + j179.360	184.1   76.9°
A3250	138.0	4.2000 + j52.960	53.12   85.5°	39.872 + j171.520	176.1   76.9°
A3350	7.0	0.0000 + j38.700	38.7   89.0°	00.000 + j26.1920	26.26   85.6°
A3260	227.0	6.9760 + j90.912	91.17   85.6°	65.056 + j275.360	282.9   76.7°
A3360	225.0	6.9152 + j90.112	90.37   85.6°	64.480 + j272.960	280.5   76.7°
A3040	243.0	7.3880 + j90.112	90.41   85.3°	65.088 + j314.240	320.9   78.3°
A3140	243.0	7.3880 + j90.112	90.41   85.3°	65.088 + j314.240	320.9   78.3°
MUTUA				56.784 + j183.360	191.9   72.8°
A3240	155.0	4.7136 + j57.488	57.68   85.3°	41.520 + j200.480	204.7   78.3°
A3340	155.0	4.7136 + j57.488	57.68   85.3°	41.520 + j200.480	204.7   78.3°
MUTUA				36.224 + j116.960	122.5   72.8°

Tabla A1

### 4.- Componentes simétricas.

A).- Propiedades del vector "a"

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j240}$$

$$a^3 = 1 = e^{j0}$$

$$a + a^2 + a^3 = 0$$

$$a + a^2 = -1 = e^{j180}$$

$$a - a^2 = j\sqrt{3} = \sqrt{3} e^{j90}$$

$$a^2 - a = -j\sqrt{3} = \sqrt{3} e^{j270}$$

$$1 - a = \frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} e^{j330}$$

$$1 - a^2 = \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} e^{j30}$$

$$a - 1 = -\frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} e^{j150}$$

$$a^2 - 1 = -\frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} e^{j210}$$

$$1 + a = -a^2 = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j60}$$

$$1 + a^2 = -a = \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j300}$$

### B.- Resolución de componentes vectoriales

$$E_A = E_{A0} + E_{A1} + E_{A2} = E_0 + E_1 + E_2$$

$$E_B = E_{B0} + E_{B1} + E_{B2} = E_0 + a^2 E_1 + a E_2$$

$$E_C = E_{C0} + E_{C1} + E_{C2} = E_0 + a E_1 + a^2 E_2$$

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2} = I_0 + I_1 + I_2$$

$$I_B = I_{B0} + I_{B1} + I_{B2} = E_0 + a^2 I_1 + a I_2$$

$$I_C = I_{C0} + I_{C1} + I_{C2} = I_0 + a I_1 + a^2 I_2$$

$$E_0 = \frac{1}{3}(E_A + E_B + E_C)$$

$$E_1 = \frac{1}{3}(E_A + a E_B + a^2 E_C)$$

$$E_2 = \frac{1}{3}(E_A + a^2 E_B + a E_C)$$

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_A + a I_B + a^2 I_C)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_A + a^2 I_B + a I_C)$$

5.- Valores de corto circuito utilizados en los cálculos de ajustes.

FALLA	UBICACION	GENERACION	APORTACION	LINEA	$I_1$ (amp)	$I_2$ (amp)	$I_0$ (amp)
1 $\Phi$ -T	CHICOASE	Mínima	MPD-CHI	A3050		270.44	
3 $\Phi$	CHICOASE	Mínima	MPD-CHI	A3050	649.96		
3 $\Phi$	MALPASO	Mínima	CHI-MPD	A3050	940.18		
2 $\Phi$ -T	MALPASO	Máxima	CHI-MPD	A3050			952.0
3 $\Phi$	CHICOASE	Mínima	JUI-CHI	A3040	783.63		
3 $\Phi$	JUILE	Mínima	CHI-JUI	A3040	1159.11		
1 $\Phi$ -T	JUILE	Mínima	CHI-JUI	A3040	341.41	341.41	283.17
2 $\Phi$ -T	CHICOASE	Mínima	JUI-CHI	A3040		174.78	
2 $\Phi$ -T	JUILE	Mínima	CHI-JUI	A3040			253.51
$\Phi$ - $\Phi$	JUILE	Mínima	CHI-JUI	A3040		579.55	
$\Phi$ - $\Phi$	JUILE	Máxima	CHI-JUI	A3040		829.6	

Tabla A2