

**COMPORTAMIENTO DE LAS PROTECCIONES DE DISTANCIA DE LAS LINEAS
DE 230 KV DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO**

ERAZO PAEZ, MAURO
DOSNI - INECEL

RESUMEN

Considerando el comportamiento de las protecciones de distancia en "condiciones normales de cortocircuito" (sin resistencia de falla, impedancia mutua, ni alimentaciones intermedias) efectivamente se tiene un equivalente longitud física-impedancia, que dentro de la operación del sistema eléctrico se asumen aceptables para los fines que se persigue. Cuando tenemos fallas en "condiciones no normales" ya no se cumple la equivalencia, y en ciertos casos se cambia notablemente el comportamiento esperado de las protecciones.

En este trabajo presento un análisis de lo que "verían" las protecciones de distancia de las líneas de 230KV del Sistema Nacional Interconectado para fallas fase-fase y fase-tierra, planteando sugerencias que se considerarían en sus calibraciones para las condiciones actuales de operación.

INTRODUCCION

En las líneas de transmisión la equivalencia de longitud-impedancia de secuencia positiva, el uno medido físicamente y el otro definido eléctricamente hace posible que el uso de los relés de distancia (reactancia, impedancia, mho sean electromecánicos, estáticos o digitales) uno de los métodos más idóneos para identificar cortocircuitos en líneas de transmisión.

Existen varios criterios para calibrar las protecciones de distancia, que se podría resumir en:

- La primera zona se recomienda poner un alcance que sea entre el 80 y 90% de la distancia desde el relé al terminal remoto, con el objeto de evitar que sobrealcance la siguiente línea realizando desconexiones no necesarias.
- La segunda zona, el alcance sería entre el 120 y 150% de la longitud de la línea protegida y un retardo de tiempo de 0.2 a 2 seg.
- La tercera zona, con un alcance del 200% o más de la línea y un retardo de tiempo variable de 0.4 a 3 seg.

El hecho de que se recomienden márgenes amplios de calibración, nos llevó a realizar un análisis más real de la "impedancia que ven los relés" para las líneas de 230 KV del Sistema Nacional Interconectado, y de esta manera nos ayudará a tener una idea más objetiva de la filosofía que debería seguirse en la calibración de las protecciones de distancia.

Actualmente, en el Sistema Nacional Interconectado tenemos operando lo siguiente en líneas de transmisión:

Líneas	138 KV	230 KV
Circuito Simple	354 Km	---
Circuito Doble	273 Km	626 Km
Total	900 Km	1252 Km

El sistema de protecciones de las líneas de 230 KV consta de dos esquemas de distancia con alimentaciones de tensión y corriente independientes.

El primero denominado "Protección Primaria", es un esquema con relés con sobrealcance y transferencia de apertura. Además de proteger, tiene por objeto iniciar el recierre trifásico de alta velocidad para mantener condiciones de estabilidad y/o confiabilidad en operación. El alcance calibrado para los relés es 150% de la impedancia de secuencia positiva (Z1) de la línea.

El segundo esquema de protección, "Protección Secundaria" es a base de relés tipo mho con tres zonas para fallas entre fases y otro para fase-tierra. Las dos primeras zonas se consideran protección propia de la línea y la tercera es un respaldo remoto para fallas externas al circuito protegido. Se han calibrado para que la primera y segunda zonas alcancen el 80 y 120% de Z1 de la línea respectivamente; la tercera zona tiene un alcance variable dependiendo de la zona (eléctricamente hablando) que se encuentra y de lo que exista más adelante del circuito protegido. La primera zona es una protección instantánea, la segunda y tercera zonas operan con un retardo de 0.25 y 1 seg. respectivamente.

Ninguna de las protecciones tiene compensación para efectos de impedancia mutua (Zm).

Por diseño y construcción de los sistemas de protección en líneas de 230 KV del S.N.I., tenemos que la protección primaria se pierde cuando el interruptor propio de la línea es reemplazado por el acoplamiento de barras, considerándose este eventualidad como una operación normal de este trabajo.

PROTECCIONES DE DISTANCIA

La medición de la distancia a la falla se hace de manera que en el relé se refleje el valor de la impedancia de secuencia positiva de la línea al punto de falla.

En fallas fase-fase para que un relé identifique correctamente el punto de cortocircuito en la línea de transmisión se requiere que los transformadores de corriente y potencial sean conectados de manera que en la protección se pueda tener:

$$\bar{Z}_{ab} = (V_a - V_b) / (I_a - I_b)$$

$$\bar{Z}_{bc} = (V_b - V_c) / (I_b - I_c)$$

$$\bar{Z}_{ca} = (V_c - V_a) / (I_c - I_a)$$

siendo \bar{Z}_{ab} , \bar{Z}_{bc} y \bar{Z}_{ca} las impedancias vistas por los relés de distancia.

En el caso de fallas fase-tierra, para que el relé mida la distancia correcta se tiene que alimentarle con señales de corriente y tensiones de línea tal

que:

$$\bar{Z}_a = V_a / (I_a + 3I_o \times K_c)$$

$$\bar{Z}_b = V_b / (I_b + 3I_o \times K_c)$$

$$\bar{Z}_c = V_c / (I_c + 3I_o \times K_c)$$

en donde \bar{Z}_a , \bar{Z}_b y \bar{Z}_c son las impedancias vistas por los relés; K_c se denomina "coeficiente de impedancia de tierra" y es:

$$K_c = (Z_0 - Z_1) / 3 Z_1$$

siendo Z_1 y Z_0 las impedancias de secuencias positiva y cero propias de la línea.

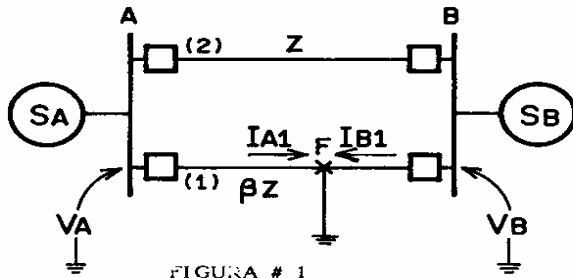
Impedancias Aparentes

No siempre la impedancia vista por el relé es la misma que el de la línea, desde donde está la protección a la falla. Esto se debe a que la impedancia medida por la protección es una comparación de la caída de tensión entre su localización y la falla con la corriente de la línea que protege. Así tendremos que cualquier corriente que llega a la falla sin pasar por el relé o cualquier inducción en la línea producirá una variación en la impedancia medida por el relé. El efecto neto sobre el relé será acortar o aumentar el valor real de impedancia, por lo que conviene hablar de "impedancia aparente" vista por el relé.

Analizaremos varios casos de impedancias aparentes en líneas de doble circuito iguales. Adoptaremos la siguiente nomenclatura:

- A1 Interruptor del circuito 1 en la barra A
- β Distancia desde A hasta la falla en p.u.
- R_f Resistencia del arco de falla
- Z, Z_m Impedancia propia y mutua de cada circuito
- I_A, I_B Aportes de corrientes de las fuentes a la falla
- I_{A1} Aportes de corrientes por el circuito 1 en la barra A
- V_A, V_B Tensiones en barras durante la falla
- \bar{Z}_{A1} Impedancia aparente del relé de distancia Z_{A1} que controla A1.

Caso 1.- Asumimos : $R_f = 0$ y $Z_m = 0$



$$V_A = \beta Z \times I_{A1}$$

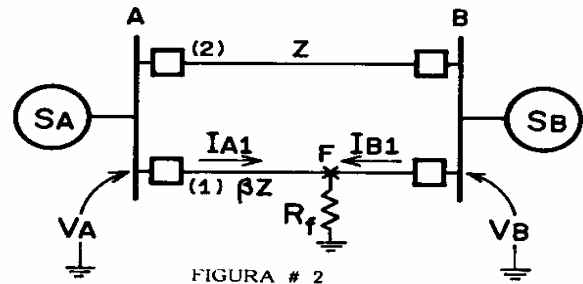
$$\bar{Z}_{A1} = V_A / I_{A1} = \beta Z$$

y de igual manera:

$$\bar{Z}_{B1} = V_B / I_{B1} = (1 - \beta) Z$$

siendo correctas las mediciones de los relés.

Caso 2.- Pondremos : $R_f \neq 0$ y $Z_m = 0$



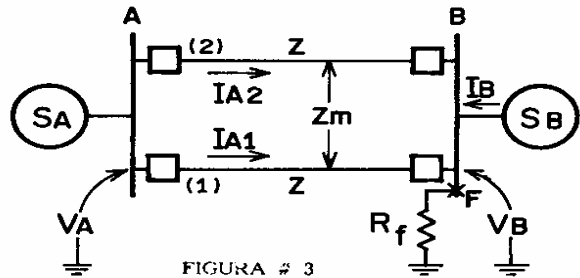
$$V_A = \beta Z \times I_{A1} + (I_{A1} + I_{B1}) R_f$$

$$\bar{Z}_{A1} = V_A / I_{A1} = \beta Z + R_f + (I_{B1} / I_{A1}) R_f$$

$$\bar{Z}_{B1} = V_B / I_{B1} = (1 - \beta) Z + R_f + (I_{A1} / I_{B1}) R_f$$

las impedancias aparentes se incrementan en los términos $(I_{B1} / I_{A1}) R_f$ y $(I_{A1} / I_{B1}) R_f$ respectivamente. En general estos son números complejos que representan una impedancia de falla para la protección de distancia.

Caso 3.- Si $R_f \neq 0$ y $Z_m \neq 0$



$$V_A = (Z + Z_m) I_{A1} + (2I_{A1} + I_B) R_f$$

$$\bar{Z}_{A1} = \bar{Z}_{A2} = V_A / I_{A1} = Z + R_f + Z_m + (1 + I_B / I_{A1}) R_f$$

que es mayor que la real.

Caso 4.- Igual al segundo caso pero abierto B1

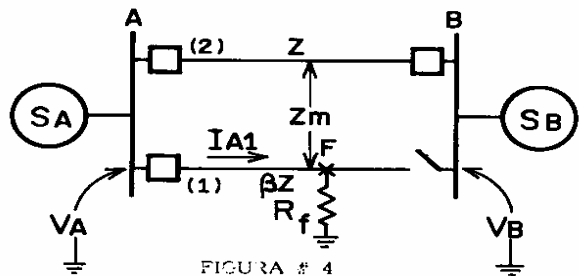
$$V_A = (\beta Z_1 + R_f) I_{A1}$$

$$\bar{Z}_{A1} = V_A / I_{A1} = \beta Z_1 + R_f$$

$$\bar{Z}_{B2} = V_B / I_{B2} = Z + \beta Z + R_f + (I_A / I_{B2}) (\beta Z + R_f)$$

\bar{Z}_{A1} mide lo correcto pero no así \bar{Z}_{B2}

Caso 5.- Si $R_f \neq 0$, $Z_m \neq 0$, abierto B1



$$V_A = \beta Z_m \times I_{A1} + (\beta (Z - Z_m) + R_f) I_{A1}$$

$$\bar{Z}_{A1} = \beta Z + R_f - (\beta Z_m / I_{A1}) \beta Z_m$$

$$V_B = (Z - \beta Z_m) I_{B1} + (\beta (Z - Z_m) + R_f) I_{A1}$$

$$\bar{Z}_{B2} = (1 + \beta) Z + R_f - 2\beta Z_m + (I_{A1} / I_{B1}) (\beta (Z - Z_m) + R_f)$$

En \bar{Z}_{A1} el efecto es sobrealcantar la impedancia real; y lo mismo sucede con \bar{Z}_{B2} como se puede ver cuando $\beta = 1$.

Caso 6.- Si $R_f = 0$, $Z_m \neq 0$ y $\beta = 1$

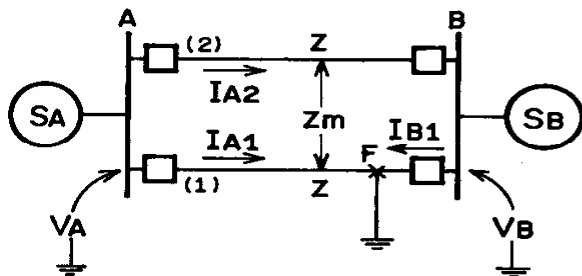


FIGURA # 5

las impedancias aparentes serán: $\bar{Z}_{A1} = \bar{Z}_{A2} = Z + Z_m$, $\bar{Z}_{B1} = 0$ y \bar{Z}_{B2} no lo verá. Los sentidos de las corrientes de falla son los indicados.

Caso 7.- Si $R_f = 0$, $Z_m \neq 0$ y $\beta = 0$

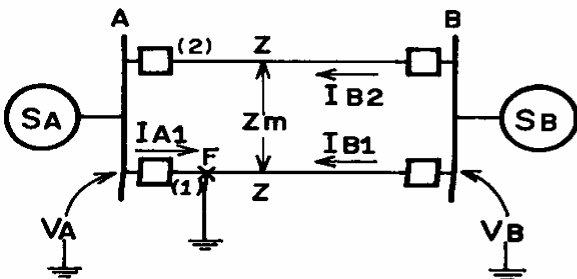


FIGURA # 6

tenemos $\bar{Z}_{B1} = \bar{Z}_{B2} = Z + Z_m$, $\bar{Z}_{A1} = 0$ y \bar{Z}_{A2} no opera, y los sentidos de los aportes de corriente a la falla están indicados.

De los casos analizados vemos que las "impedancias aparentes" en cortocircuitos con resistencias, impedancias mutuas y alimentaciones intermedias, cambian apreciablemente; en ciertos casos se incrementan, pudiéndose presentar problemas de bajo alcance para el relé y en otros casos Z disminuye, entonces éste sobre-alcanta.

En los casos 6 y 7 vemos que en el circuito 2, existe un relé que opera y otro no, debido a que el sentido de las corrientes de disparo cambian. Es evidente que habrá un punto $\beta 1$ tal que $I_{A2} = I_{B2} = 0, Z_{A2}$

y Z_{B2} no verán la falla, $\bar{Z}_{A1} = \beta 1 \times Z$, $\bar{Z}_{B1} = (1 - \beta 1) \times Z$. También existirá un punto $\beta 2$ tal que una falla allí $\bar{Z}_{A1} = \beta 2 \times Z + R_f$ aparecerá como si el interruptor $\beta 2$ estuviese abierto y fuera nula la impedancia mutua entre los dos circuitos. La localización en el circuito 1 de $\beta 1$ y $\beta 2$ o cualquier otro punto dependerá del tipo de cortocircuito, impedancia de las líneas, resistencia de falla y aportes de corrientes por los circuitos. Aunque no tienen mayor importancia estos puntos desde el punto de vista práctico, es necesario conocerlos para comprender la problemática de los alcances de los relés de distancia y, en cierto momento, ayudarán a definir la filosofía más conveniente a seguirse en la calibración de las protecciones.

PROTECCIONES DE DISTANCIA EN LINEAS DE 230 KV

Analizaremos las impedancias aparentes que los relés de distancia ven en caso de fallas fase-fase y fase-tierra. Para el estudio seleccionamos los tramos de línea Paute-Milagro-Pascuales que tienen las características siguientes:

Línea	Paute-Milagro	Milagro-Pascuales
Conductor	1133MCM-ACSR	1133MCM-ACSR
Tensión	230 KV	230 KV
Longitud	140 Km	40 Km
Z1	1.57 + j 12.81 %	0.45 + j 3.58 %
Z0	8.38 + j 41.47 %	2.13 + j 11.93%
Zm	6.82 + j 26.70 %	1.69 + j 7.74 %

las impedancias están en % en bases 100 MVA y 230 KV.

El sistema puede reducirse a un equivalente como el de la figura 7 en donde adoptaremos una simbología similar al capítulo anterior. Asumiremos que las corrientes de carga no tienen mayor efecto sobre la operación de las protecciones y por tanto no las consideraremos.

Las fallas se simularán en el circuito 1 de la línea Milagro-Paute a no ser que se diga lo contrario. La línea ha sido dividida en cinco partes iguales, realizando en cada una un análisis de cortocircuitos fase-fase y fase-tierra determinando las impedancias aparentes como lo verían cada uno de los relés del sistema, poniendo interés particular en las protecciones que sean capaces de operar en condiciones aceptables para casos reales. Las divisiones en el circuito se han enumerado en orden ascendente a partir de la subestación Milagro. Para cada falla se ha asumido resistencias de arco de 0, 5, 10 y 20 ohms.

Las condiciones de operación del sistema son para máxima generación, en donde la principal fuente de aportes de corrientes de falla será la Central Paute que ha sido simulada con su capacidad máxima.

Las impedancias equivalentes del sistema en barras están indicadas en la figura No. 7.

Los análisis los hemos dividido en dos partes; en el primero se detalla el comportamiento de las protecciones propias de la línea y, en el otro, el comportamiento de las protecciones de respaldo del circuito paralelo no falloso y los de los circuitos de la línea adyacente.

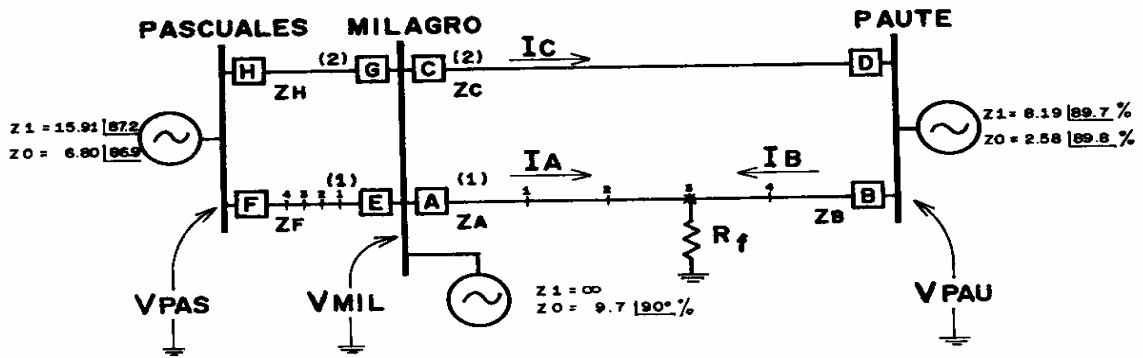


FIGURA # 7.- Circuito equivalente utilizado para los análisis

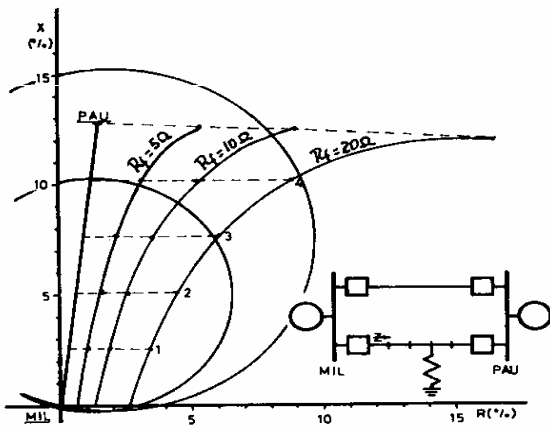


FIGURA # 8.- \bar{Z}_A para fallas fase-fase en la línea Milagro-Paute

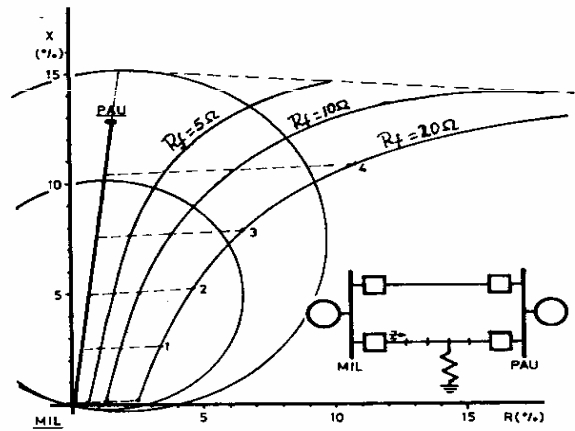


FIGURA # 10.- \bar{Z}_A para fallas fase-tierra en la línea Milagro-Paute

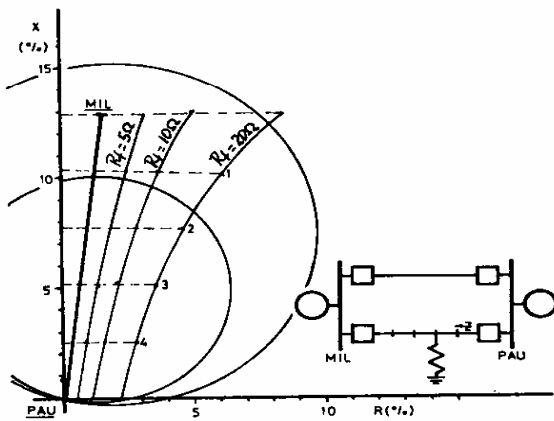


FIGURA # 9.- \bar{Z}_B para fallas fase-fase en la línea Milagro - Paute

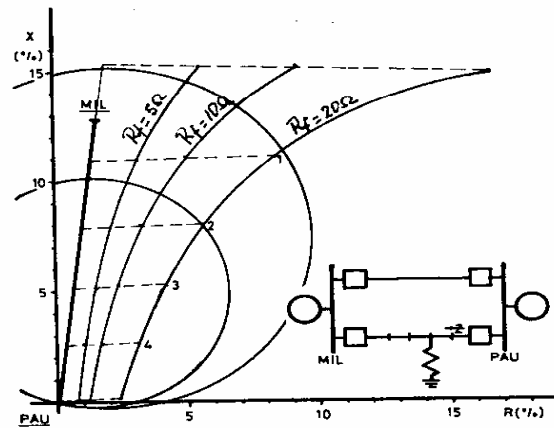


FIGURA # 11.- \bar{Z}_B para fallas fase-tierra en la línea Milagro-Paute.

Protecciones Propias

Las impedancias \bar{Z}_A y \bar{Z}_B para fallas en la línea Paute-Milagro con diferentes valores de resistencia de falla están indicados en las figuras 8 a la 11. En la figura 12 representamos para fallas entre fases a tierra las variaciones de $|\bar{Z}_A|$ y $|\bar{Z}_B|$ con $R_f = 0$ en donde se ve que la medición de distancia para fallas entre fases es correcta. Pero no así para la protección fase-tierra en donde el efecto de impedancia mutua hasta unos 104 Km desde Milagro es producir en \bar{Z}_A un sobrealcance y en adelante el efecto será un bajo-alcance en el relé; mientras que para \bar{Z}_B se produce un sobrealcance para fallas hasta un 50% de la línea desde Paute y en adelante un bajo alcance, efectos que tienen que ver con la magnitud de corriente en el circuito paralelo.

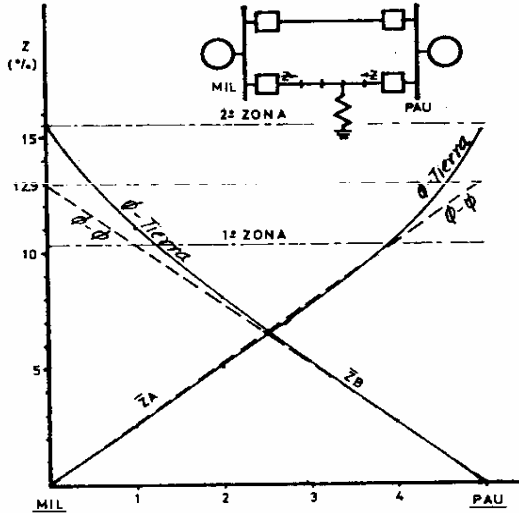


FIGURA # 12.- $|\bar{Z}_A|$ y $|\bar{Z}_B|$ para fallas fase-fase y fase-tierra con $R_f = 0$ en la línea Milagro-Paute.

En los gráficos presentados vemos que las corrientes intermedias tienen un efecto muy importante en las impedancias aparentes que es producir un bajo alcance en los relés de distancia.

Una observación más detenida tenemos que, tanto en los relés de fase como en los de tierra existe una zona de sobrealcance y otra de bajo-alcance. Para el primero de ellos la razón del sobrealcance se debe a que la medición de resistencia en el relé es por fase, por tanto la representación de R_f debería

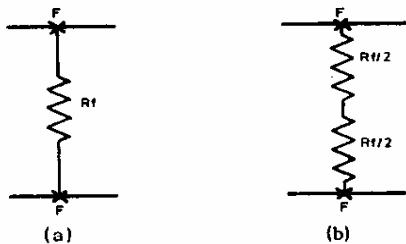


FIGURA # 13.- Resistencia de fallas para cortocircuitos fase-fase.

- a) representado en los estudios
- b) representación por fase

ser realmente como en la figura 13 (b) pero en los estudios hemos considerado la resistencia total como en la figura 13 (a), lo que es una ventaja en el comportamiento de la protección. Para las protecciones a tierra, la zona de sobrealcance se debería a un dominio del efecto de impedancia mutua sobre el de corriente intermedia; mientras que el efecto de bajo-alcance (que es más pronunciado que en el caso fase-fase) es debido al efecto acumulativo de impedancia mutua y de corrientes intermedias en esta zona. Además, tenemos que en la medición de distancia en fallas fase-tierra el coeficiente de impedancia de tierra K_c no considera la R_f , por lo que la medición será siempre aproximada.

La figura 14 , es la impedancia \bar{Z}_E para fallas fase-fase en la línea Milagro-Pascuales vistos desde Milagro. Las curvas son similares a las anteriores, pero se tiene que, conforme aumenta la resistencia de falla el efecto sobre las protecciones es producir un bajo alcance, que es muy perjudicial para la operación del relé, considerando que se trata de una línea relativamente corta. Las impedancias aparentes \bar{Z}_F para diferentes valores de R_f prácticamente son iguales a \bar{Z}_E Para fallas fase-tierra las curvas son parecidas a las de la línea Paute-Milagro.

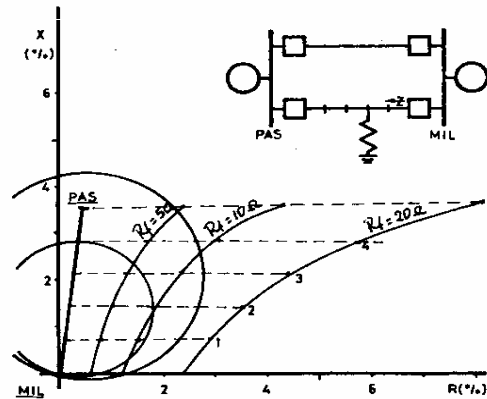


FIGURA # 14.- \bar{Z}_E para fallas fase-fase en la línea Milagro-Pascuales

Protecciones de Respaldo Remotas

Las protecciones de distancia tienen una tercera zona de operación que se considera como un respaldo para fallas externas. Analizaremos las impedancias características de los relés que no son del circuito falloso.

En la figura 15, representamos $|\bar{Z}_C|$ y $|\bar{Z}_D|$ con $R_f = 0$. Dependiendo del lugar de la falla, la impedancia aparente de uno de los relés se encuentra en la dirección de operación y la del otro, no. La impedancia aparente del relé que puede operar aumenta conforme la falla se acerca a la subestación donde se encuentra, pero en cierto punto \bar{Z} tiende a ser infinito. A partir de este punto comenzaría a actuar el relé del otro extremo de manera similar al indicado; el cambio se produce precisamente donde la corriente debido a la falla por este circuito es cero, para posteriormente cambiar el sentido inicial del flujo de corriente.

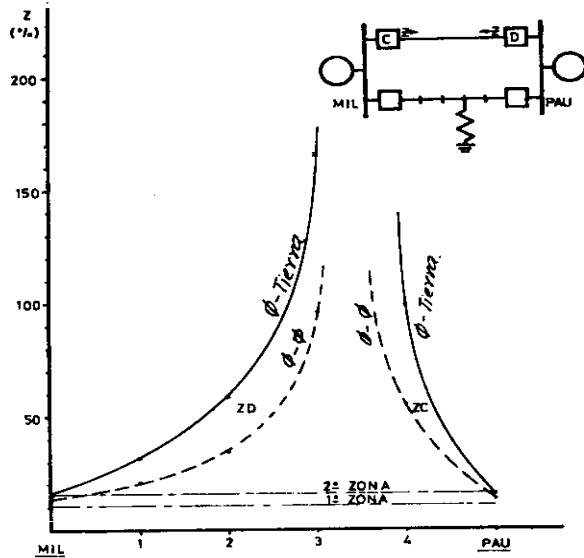


FIGURA # 15.- $|Z_D|$ y $|Z_C|$ para fallas con $R_f = 0$ en el circuito I de la línea Milagro-Paute.

Otros relés de distancia que tienden a operar para fallas en la línea Milagro-Paute son los de Pascuales que, para fallas fase-fase en la línea Milagro-Paute tienen características de impedancias aparentes como las indicadas en la figura 16. Las curvas de la figura 18 son las impedancias características Z_H y Z_F para fallas con $R_f = 0$ en la línea Milagro-Paute; si los alcances lo permitieran sería más fácil que vean una falla cerca de Paute que en la mitad de la línea.

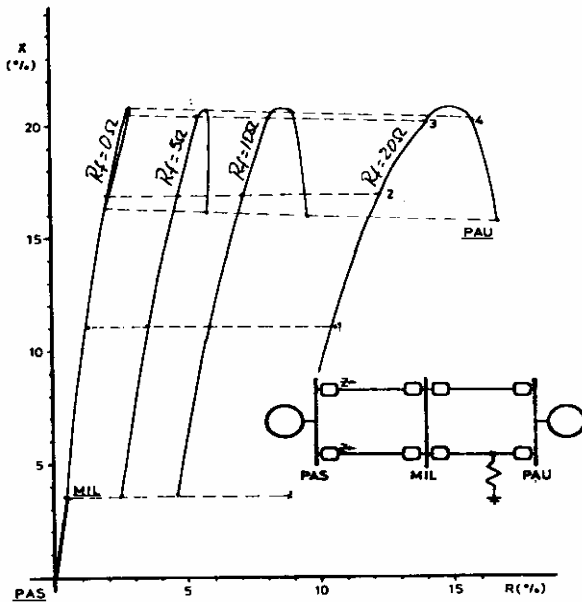


FIGURA # 16.- \bar{Z}_F y \bar{Z}_H para fallas entre fases en la línea Milagro-Paute.

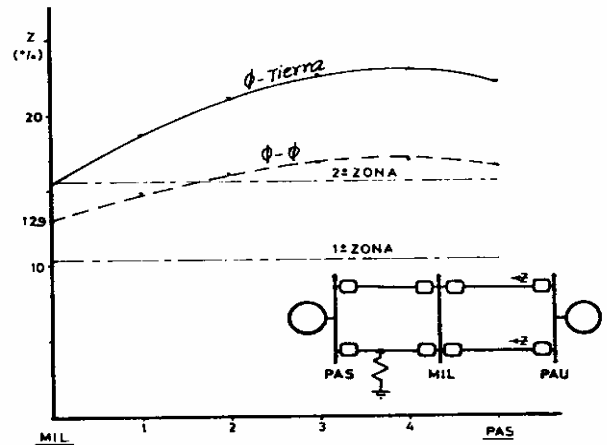


FIGURA # 17.- $|Z_B|$ y $|Z_D|$ para fallas con $R_f = 0$ en la línea Milagro-Paute.

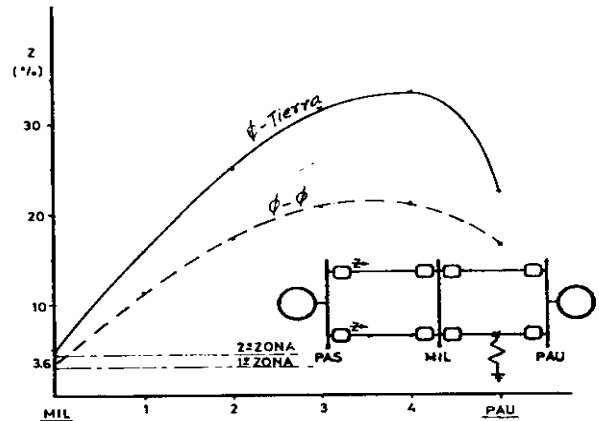


FIGURA # 18.- $|Z_F|$ y $|Z_H|$ para fallas con $R_f = 0$ en la línea Milagro-Paute.

En la figura 17 están graficadas las impedancias aparentes $|Z_B|$ y $|Z_D|$ para fallas con $R_f = 0$ en uno de los circuitos de la línea Milagro-Pasuales, viéndose que la penetración de la segunda zona de protección de fases casi alcanza a ver fallas en barras de Pasuales, y aún podría sobrepasar si uno de los circuitos de la Paute-Milagro estuviese desconectado. La mayor variación (aumento) de la impedancia aparente (figuras 17 y 18) tiene lugar en el primer tramo cercano a Milagro, y de igual forma, la mayor disminución se da lugar en el último; estos efectos tienen que ver principalmente con los cambios en los aportes de corrientes de falla por el circuito paralelo al fallado; además influye mucho la cercanía o no al cortocircuito, de fuentes de generación relativamente grandes.

APERTURA DE INTERRUPTORES DURANTE LA FALLA

La operación de las protecciones de distancia dependerá del valor de impedancia aparente que el relé vea durante la falla y si se encuentra dentro del alcance de una de las zonas de protección.

Por ejemplo, si en la línea Milagro-Paute se produce un cortocircuito fase-tierra con $R_f = 20$ ohms en el 60% de la línea desde Milagro (figuras 10 y 11 tramo 3), el relé ZA lo verá dentro de la segunda zona, mientras que ZB en Paute lo verá en primera zona. Lo que a continuación sucederá es que ZA comenzará a contar los 0.25 segundos de retardo de tiempo antes de abrir el interruptor A, mientras que ZB ordenará la inmediata apertura de B despejando la falla desde Paute pero no en Milagro. Este cambio en la topología hará que las corrientes, tensiones y, por tanto, las impedancias aparentes de los otros relés cambien.

Simulando que se pueden abrir cualquiera de los dos interruptores de la línea tenemos los siguientes resultados.

Protecciones Propias

Tanto para falla fase-fase como para fase-tierra desaparece el efecto de alimentación intermedia, lo que haría que en fallas entre fases la impedancia aparente medida sea correcta con la excepción anotada anteriormente que la resistencia de falla es realmente visto como $R_f/2$.

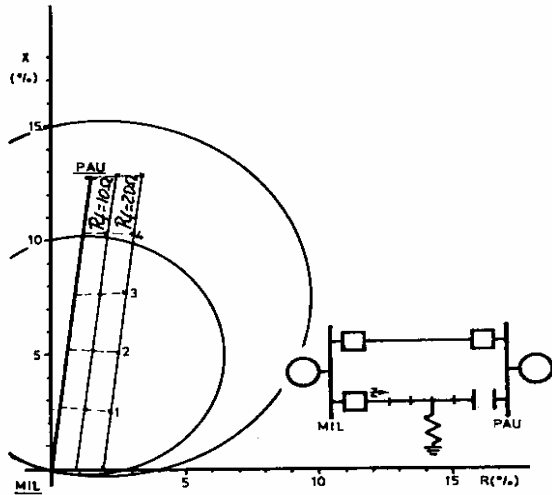


FIGURA # 19.- \bar{Z}_A para fallas fase-fase en la línea Milagro-Paute, abierto el interruptor de Paute.

Para el caso de fallas a tierra subsiste el efecto de impedancia mutua. En el **Caso 5** (figura 4) tenemos que:

$$\bar{Z}_{A1} = \beta Z + R_f - (I_{B2} / I_{A1}) \beta Z_m$$

en donde el efecto de la impedancia mutua sobre la impedancia aparente \bar{Z}_{A1} es el de disminuir la impedancia real a la falla en la relación $(I_{B2}/I_{A1})\beta Z_m$, con lo cual el relé sobrealcanzará, siendo este incremento directamente proporcional a la corriente I_{B2} . Para fallas en la línea Milagro-Paute, la impedancia aparente \bar{Z}_A cuando está abierto el interruptor B así como \bar{Z}_B estando abierto A, tenemos graficados en las figuras 20 y 21 apreciándose claramente los sobrealcances para estas condiciones de cortocircuito. Cuando fallas del tipo fase-tierra tienen lugar en líneas relativamente cortas, como por ejemplo en

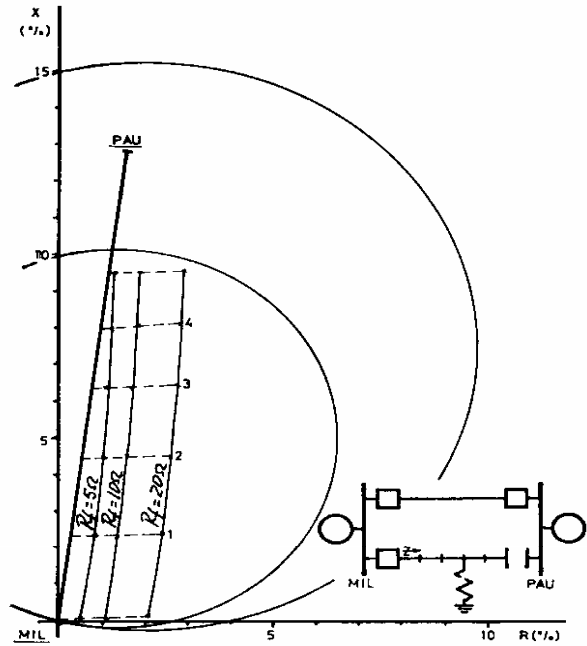


FIGURA # 20.- \bar{Z}_A para fallas fase-tierra en la línea Milagro-Paute, abierto el interruptor de Paute.

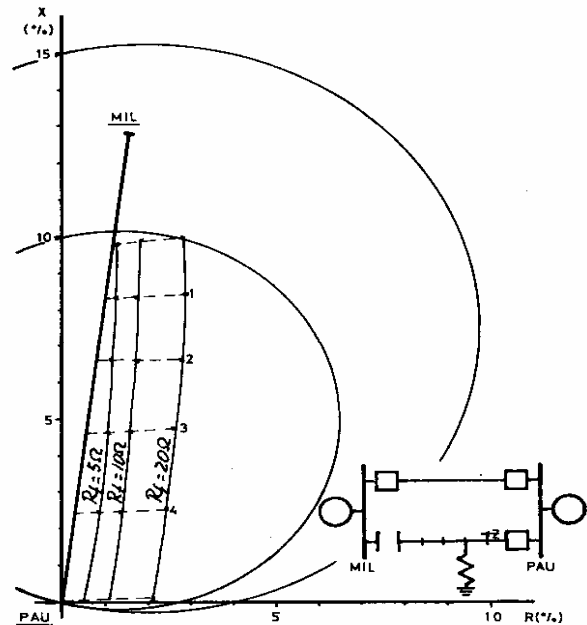


FIGURA # 21.- \bar{Z}_B para fallas fase-tierra en la línea Milagro-Paute, abierto el interruptor de Milagro.

la Milagro-Pascuales y si la resistencia de falla es relativamente grande, el sobrealcance que se da en la protección de distancia será beneficioso (figura 22). En general, para cualquier línea, para las condiciones de falla analizada, el sobrealcance es ventajoso para la operación del sistema de protecciones de fase-tierra.

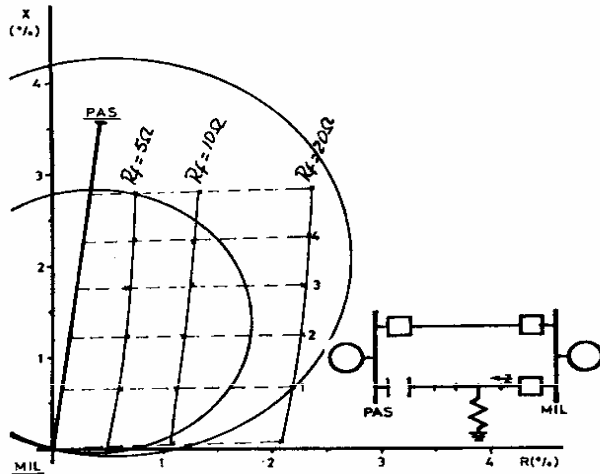


FIGURA # 22.- \bar{X} para fallas fase-tierra en la línea Milagro-Pascuales abierto en Pascuales.

Protecciones de Respaldo Remotas

La apertura de cualquiera de los interruptores modificará corrientes y tensiones tanto en el circuito paralelo al fallado como en los de la línea adyacente, pudiendo cambiar completamente las impedancias aparentes de algunas de las protecciones. Por ejemplo, asumamos que se da una falla en el circuito 1 de la Milagro-Paute en un punto cercano a Paute, en estas condiciones los relés que tenderían a operar serían ZA, ZB, ZC, ZF y ZH; la apertura del interruptor B hará que las protecciones que podrían ver la falla serían ZA, ZD, ZF y ZH, reponiéndose el relé ZC.

Para fallas fase-fase, el comportamiento de las protecciones del circuito paralelo al fallado tiene las características como las de la figura 23. Estas curvas incrementan de valor conforme se aleja la falla del relé, teniendo mucha influencia los aportes de corrientes intermedias a la falla.

Para fallas fase-tierra, además de las corrientes intermedias tenemos la influencia de la impedancia mutua. De la figura 4 tenemos:

$$\bar{Z}B2 = (1+\beta) Z + R_f - 2\beta Z_m + (I_A/I_{B1}) (\beta (Z - Z_m) + R_f)$$

de donde se ve que el efecto de la impedancia mutua es disminuir la $\bar{Z}B2$, pero existe el efecto de $(I_A/I_{B1}) (\beta (Z - Z_m) + R_f)$ que incrementa la impedancia aparente. Las impedancias $\bar{Z}C$ abierto A y $\bar{Z}B$ abierto el interruptor D son los indicados en las figuras 24 y 25 para varios valores de resistencia de falla. El efecto de impedancia mutua como

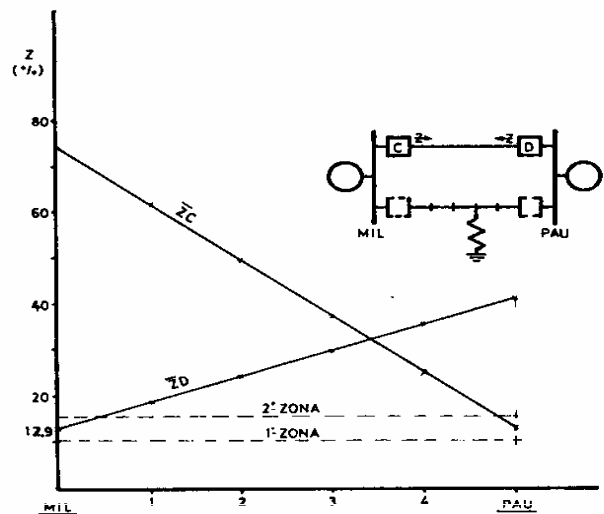


FIGURA # 23.- $|\bar{Z}C|$ y $|\bar{Z}D|$ vistos por los relés del circuito 2, para fallas entre fases en el circuito 1 de la línea Milagro - Paute.

en el caso anterior, es beneficioso para el alcance y operación de la tercera zona de protección.

En las líneas adyacentes, los relés que se encuentran en la subestación más alejada a la falla, también podrán operar. En las figuras 28 y 29 tenemos las características $|\bar{Z}|$ de estas protecciones para fallas con $R_f = 0$ en las líneas Milagro - Paute y Milagro-Pascuales.

Para fallas entre fases, los alcances que deberían tener las terceras zonas de una línea para cubrir el circuito paralelo son muy variables (figura 23). Estando abierto el interruptor de Paute, el alcance de ZD, para cubrir toda la línea debería ser del orden de 41%, y de igual forma si se trata de cubrir con ZC, abierto en Milagro, el alcance tendrá que ser de 74%, casi el doble. Esto se debe a que en el primer caso el aporte de corriente intermedia del Sistema Nacional es de 524 amp., mientras que en el segundo desde la Central Paute vienen 886 amp., y las variaciones de las impedancias aparentes (Caso 2) están en relación directa a los flujos de corrientes intermedias a la falla.

Si se trata de dar protección remota con la tercera zona, para un caso similar al indicado en el párrafo anterior, pero para fallas fase-tierra, tenemos que, las variaciones de impedancias aparentes entre las protecciones de los dos extremos no resultan ser tan grandes como para fallas entre fases. Efectivamente se da casos en que con un alcance equivalente a 1.7 veces (con resistencia de falla cero, figura 25), se puede dar protección a todo el circuito paralelo, o sea cubrir una longitud 2 veces la real. En cualquier caso la protección total que se desearía proporcionar, se lo puede obtener con un alcance menor a dos veces la longitud total del circuito donde está el relé. Aún con resistencias de fallas relativamente grandes, no habría problemas en alcanzar los objetivos indicados (figuras 24 a la 27).

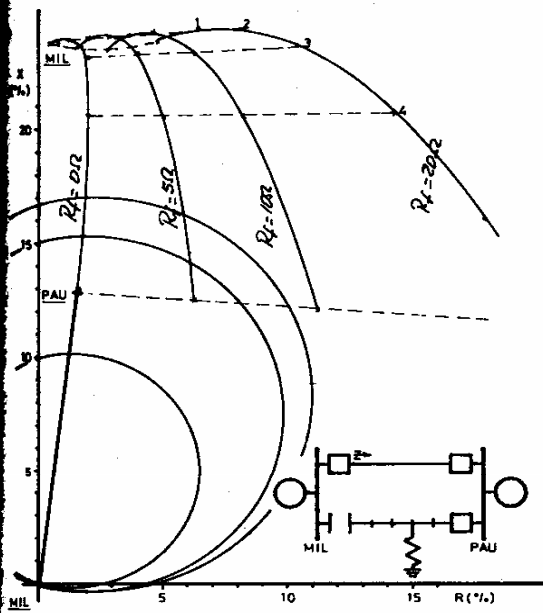


FIGURA # 24.- \bar{Z}_C para fallas fase-tierra en el circuito 1 de Milagro-Paute abierto en Milagro.

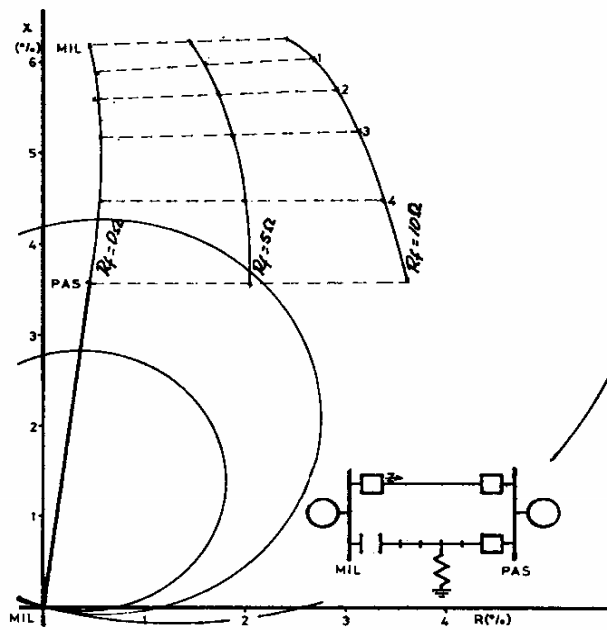


FIGURA # 26.- \bar{Z}_H para fallas fase-tierra en el circuito 1 de Milagro-Pascuales abierto en Milagro.

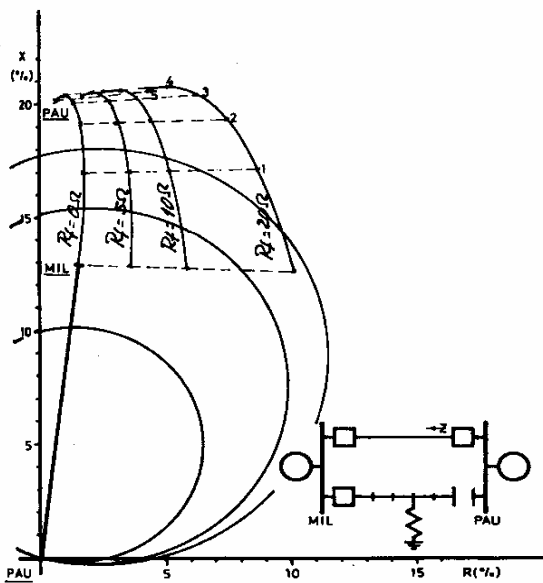


FIGURA # 25.- \bar{Z}_D para fallas fase-tierra en el circuito 1 de la Milagro-Paute abierto en Paute.

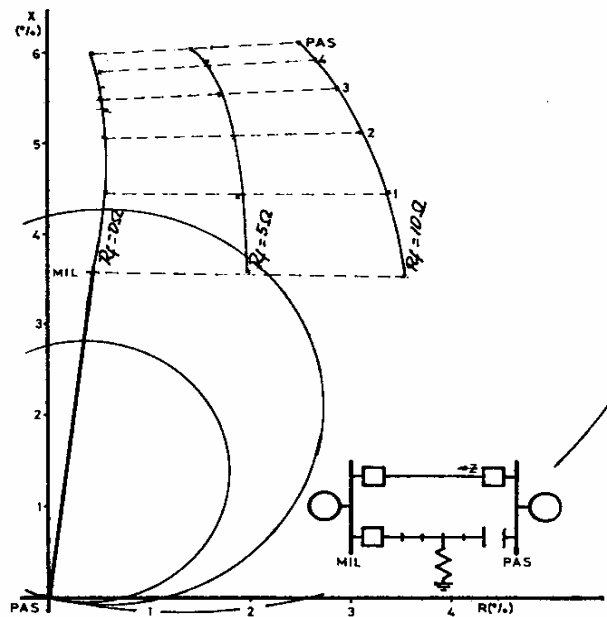


FIGURA # 27.- \bar{Z}_G para fallas fase-tierra en el circuito 1 de Milagro-Pascuales abierto en Pascuales.

CAMBIOS EN LA GENERACION

La entrada o salida de servicio de generadores en un sistema eléctrico hace que los niveles de las corrientes de cortocircuito cambien, y las variaciones serán apreciables en las zonas eléctricamente más cercanas al lugar donde se realizaron los cambios.

En el Sistema Nacional Interconectado, en condiciones normales de operación las mayores variaciones de generación se dan entre demandas máximas y mínimas de carga que son regulados principalmente con la salida o entrada de generadores en la Central Paute. Estos cambios influyen mucho en los niveles de fallas de las líneas Milagro-Paute. Puesto que las impedancias aparentes de las protecciones son influenciadas por las corrientes intermedias a la falla, es de esperar se que Z varíen en ciertos casos de forma apreciable.

De los análisis realizados anteriormente y que responden a condiciones de generación máxima, las varias impedancias aparentes que los relés ven relativamente cambian como función de la longitud propia, de la impedancia de los circuitos adyacentes, de las impedancias equivalentes de las fuentes de generación de manera que protecciones que tienen objetivos similares no siempre pueden dar el mismo grado de protección. No es recomendado agrandar el alcance de una zona de protección con el objeto de conseguir iguales niveles de protección porque los relés podrían llegar a ser un limitante para la transmisión de potencia en condiciones de emergencia, en otros casos se harían más susceptibles de operar en condiciones de oscilaciones de potencia en el sistema o, simplemente no convendría aumentar la zona por motivos de coordinación del mismo sistema de protecciones. Estas consideraciones deben tomarse en cuenta al definir la filosofía a seguirse en la determinación de alcances y tiempos de operación de los relevadores.

En condiciones de generación mínima se ha analizado con dos generadores en el Paute. Aunque esto no es cierto, en la realidad generalmente son tres los que están en línea; se lo hace así con el objeto de realizar un análisis más severo del comportamiento de los relés; es el único cambio con relación a generación que se ha efectuado, considerando que es el que más influencia puede tener.

Para condiciones de mínima las impedancias equivalentes del sistema visto desde Paute son $Z_1 = 17.42 \angle 89.2^\circ \%$ y $Z_0 = 3.71 \angle 89.7^\circ \%$. En condiciones de máxima generación las corrientes de circuito en el punto de falla se incrementan, por lo que ciertas impedancias aparentes serán mayores que en generación mínima.

La resistencia de falla o de arco por lo general no es un valor cualquiera, al contrario tiene un valor esperado que de acuerdo a varios autores depende del espaciamiento físico entre las fases, fase-tierra y la corriente de falla, y que para nuestras líneas de 230 KV podría variar entre 1 y 10 ohmios probablemente. De manera que el valor de 20 ohmios que se ha considerado en los análisis nos brindará un cierto grado de confiabilidad en la operación de las protecciones.

Consideradas la primera y segunda zona como protecciones propias de la línea y con los alcances del 80% y 120% asumidos, se puede ver de los análisis realizados que, el despeje de las fallas que se der en la línea Milagro-Paute aún con $R_f = 20 \text{ Ohm}$ se lo hará desde ambos extremos en primera o segunda zona. Supongamos una falla fase-fase en Paute con $R_f = 20 \text{ Ohms}$; Paute lo ve en primera zona (fig. 8) pero en Milagro se sale de segunda zona (fig. 8) esto hará que Paute ordene abrir su interruptor pasando el sistema a las condiciones dadas por la figura 19, en donde se ve que la falla es vista posteriormen

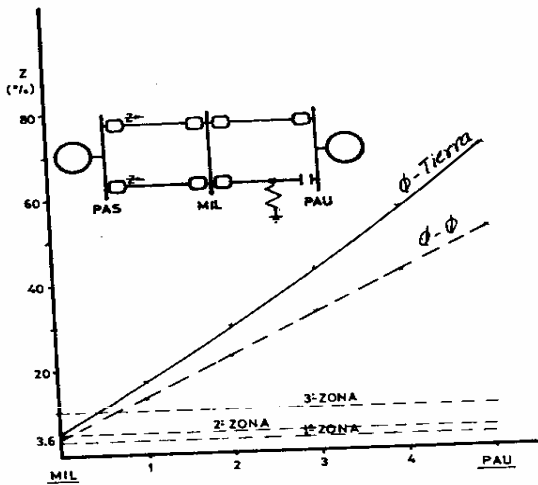


FIGURA # 28.- $|\bar{Z}_H|$ y $|\bar{Z}_F|$ para fallas con $R_f = 0$ en la línea Milagro-Paute (1) abierto interruptor B.

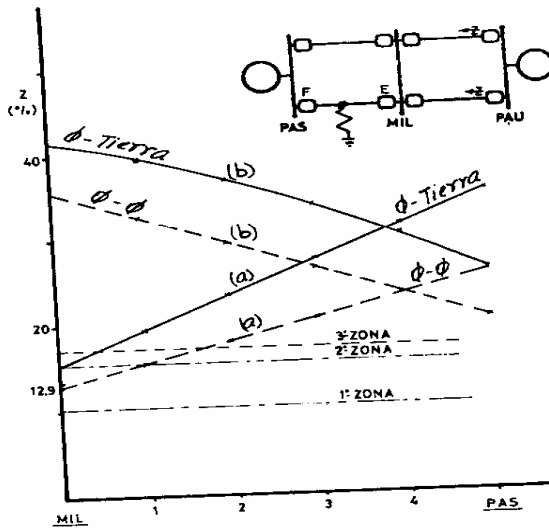


FIGURA # 29.- $|\bar{Z}_B|$ y $|\bar{Z}_D|$ para fallas con $R_f = 0$ en la línea Milagro-Pasuales (1) (a) abierto interruptor F (b) abierto interruptor E.

te por Milagro en segunda zona, despejándose la falla en un tiempo total algo mas que 0.25 seg., tal vez en 0.32 seg., considerando el tiempo que demora en despejar la falla desde Paute. Pero en la línea Milagro-Pascuales, considerada una línea corta, resistencias de fallas altas como 20Ω pueden ocasionar problemas de operación al sistema de protecciones, que podrían ser superados en parte si el ángulo de torque máximo que está en 75° se reduce, además se verá la conveniencia de agrandar la segunda zona de la protección de fase. La disminución de las corrientes de falla para estos casos facilitará la operación correcta de las protecciones.

La tercera zona de protección la consideramos como una protección de respaldo remota a elementos (líneas, transformadores, generadores) que se encuentran mas allá del otro extremo del circuito. Para analizar la operación de esta protección, en lo que tiene que ver alcances y tiempo de operación, debemos asumir que en el circuito donde se produce el cortocircuito uno de los interruptores no puede despejar la falla por motivos desconocidos, teniendo que hacerlo las protecciones de las subestaciones remotas que se encuentran aportando corrientes a la falla, pero se deberá operar coordinadamente evitando en lo posible desconexiones innecesarias y midiendo las consecuencias sobre la operación del total del sistema. Asumamos una falla en el circuito 1 de la línea Milagro-Paute, en su punto cercano a Paute, abre el interruptor (B) de esta central pero no lo puede hacer el de Milagro (A), entonces podríamos calibrar el relé ZD para que en condiciones de generación máxima alcance a ver esta falla y anule el flujo de corriente de cortocircuito desde Paute; esta calibración nos puede causar problemas para casos de fallas más allá de Pascuales, por ejemplo en la línea Pascuales-Quevedo porque posiblemente vea en ciertas condiciones de generación mínima y no sería deseable que una falla de este tipo sea despejada desde la Central Paute. Para la calibración de la tercera zona de protección se requerirá realizar un análisis de las diversas condiciones de operación del sistema, ver la influencia sobre las impedancias aparentes que verían los relés y decidir el papel que debería hacer determinada protección en ese lugar.

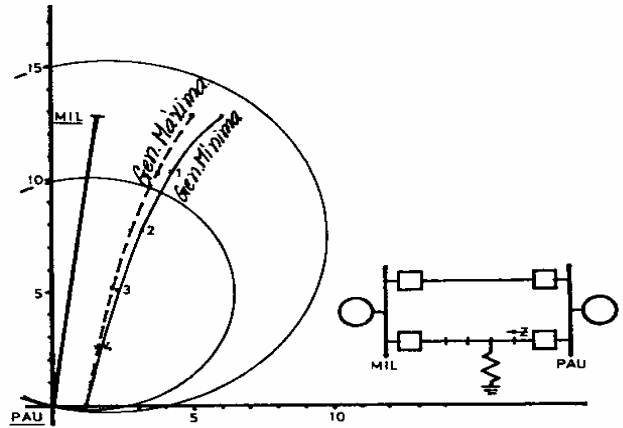


FIGURA # 31.- \bar{Z}_B para falla fase-fase con $R_f = 10$ ohms en la línea Milagro-Paute.

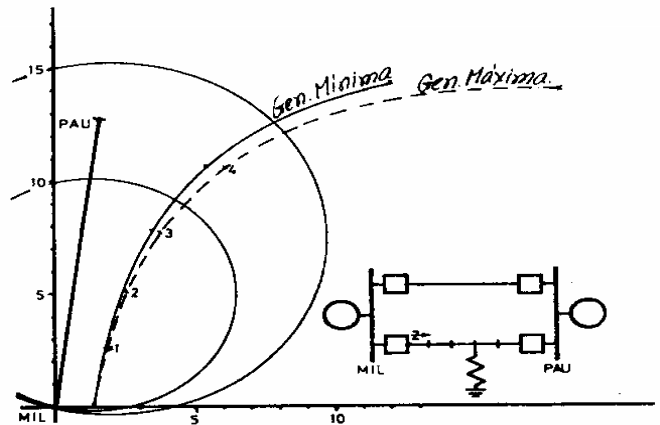


FIGURA # 32.- \bar{Z}_A para falla fase-tierra con $R_f = 10$ ohms en la línea Milagro-Paute.

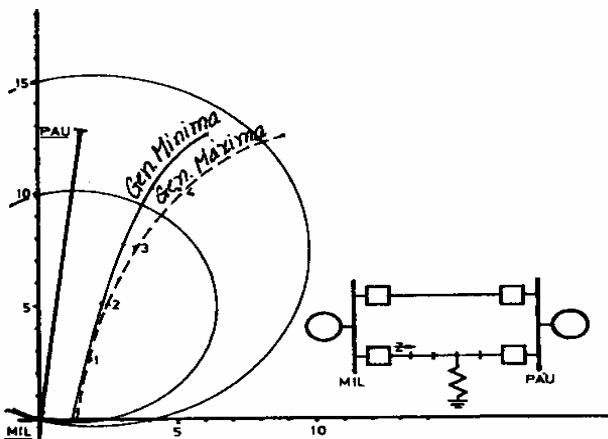


FIGURA # 30.- \bar{Z}_A para falla fase-tierra con $R_f = 10$ ohms en la línea Milagro-Paute.

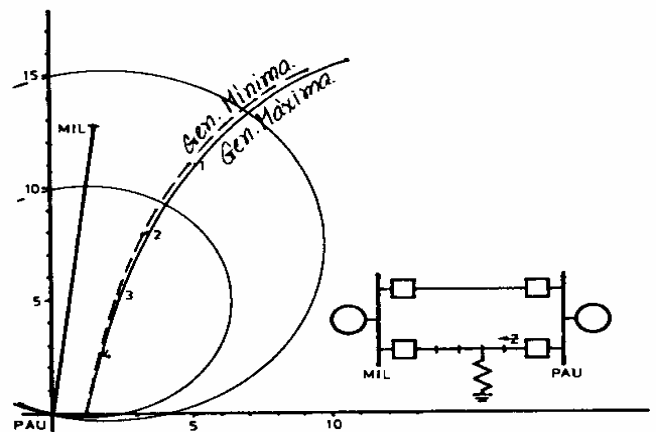


FIGURA # 33.- \bar{Z}_B para falla fase-tierra con $R_f = 10$ ohms en la línea Milagro-Paute.

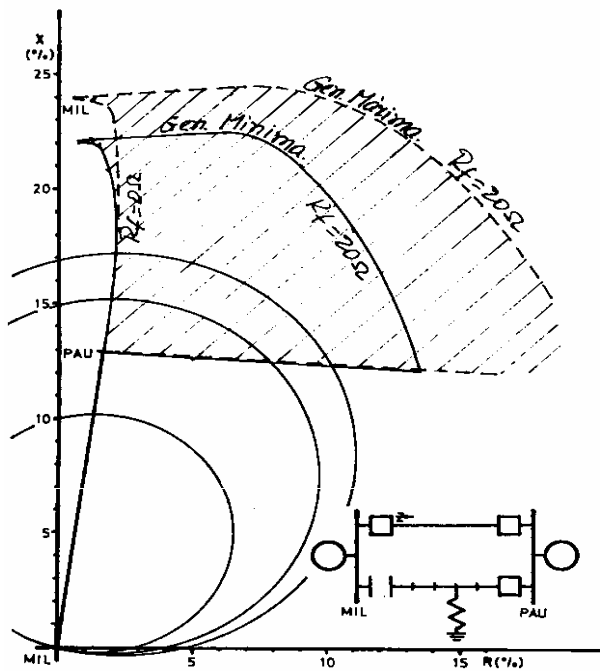


FIGURA # 34.- Zonas de variación de \bar{Z}_C (con $R_f = 0$ a 20 ohms) para fallas fase-tierra en la línea Paute-Milagro abierto en Milagro.

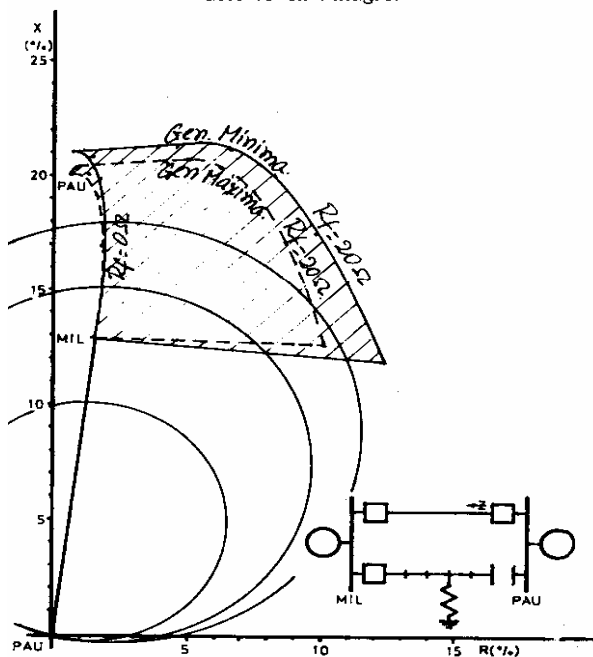


FIGURA # 35.- Zonas de variación de \bar{Z}_D (con $R_f = 0$ a 20 ohms) para fallas fase-tierra en la línea Paute-Milagro abierto en Paute.

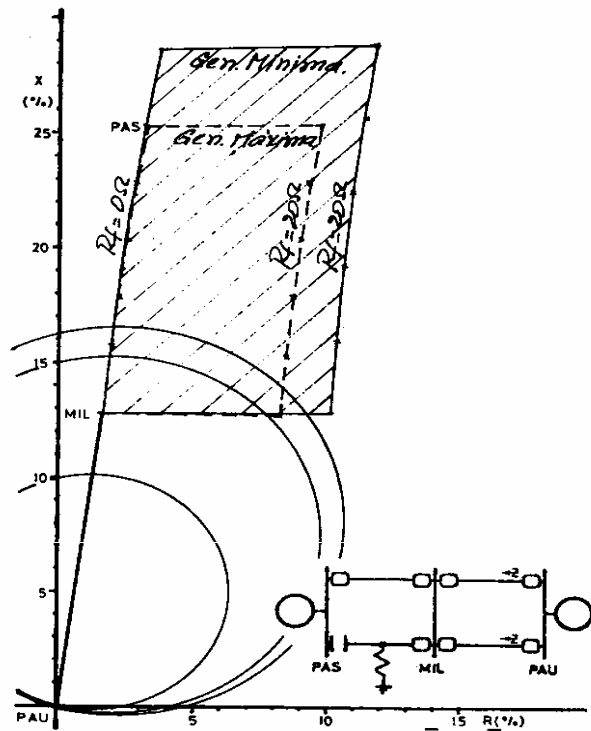


FIGURA # 36.- Zonas de variación de \bar{Z}_B y \bar{Z}_D (con $R_f = 0$ a 20 ohms) para fallas fase-fase en la línea Milagro-Pascuales abierto en Pascuales.

En condiciones de generación mínima la corriente total de falla es menor que en máxima. Esto no significará que todos los aportes de corrientes por los diferentes elementos del sistema tendrán que ser menores; por ejemplo analicemos el caso de una falla fase-fase en la Central Paute, en condiciones de generación máxima cada uno de los generadores aportan 8833 amp. (a nivel de 13.8 KV) mientras que en mínima la corriente es de 10400 amp. De igual manera en ciertos elementos del sistema se puede dar casos similares, por lo que las impedancias aparentes de los relés del sistema pueden incrementar o disminuir debido al incremento o disminución de las corrientes intermedias entre el sitio que está la protección y la falla.

CONCLUSIONES

Hemos analizado el comportamiento de las protecciones de distancia secundaria de las líneas de 230KV del S.N.I. Aparte de esta protección no se ha considerado la de distancia primaria ni el de falla de interruptor que en todo caso ayudan en la confiabilidad de la operación de los sistemas de protecciones. Conjuntamente con los relés de distancia operan una protección de bloqueo en caso de oscilaciones de potencia.

Los tipos de fallas para los que se ha realizado los estudios son fase-fase y fase-tierra considerando que son los más comúnmente se producen en el sistema. Las corrientes de carga las hemos asumido que no tienen mayor influencia en la operación en fallas de las protecciones.

La operación de las protecciones de distancia están influenciadas para efectos de alimentaciones interme-

das a la falla, resistencias de arco e impedancias mutuas. Estos factores deberán considerarse en la calibración y coordinación de las protecciones con el objeto de definir los alcances, ángulos de torque máximo y tiempo de operación convenientes para cada zona. Haciendo un análisis de las impedancias aparentes que ven los relés, permitirá definir una filosofía a seguirse en la coordinación de operación de relés de las líneas de circuito doble de 230 KV, en donde, además deberá tomarse en cuenta la longitud relativa de la línea respecto a las adyacentes. No siempre será conveniente ampliar más de cierto valor los alcances de una protección con el fin de alcanzar a ver el máximo de fallas posibles, porque nos limitaría la posibilidad de transferencia de potencia en condiciones de emergencia y volviéndose sencibles a operar en oscilaciones de potencia en el sistema.

Para una falla determinada, la impedancia aparente que verán las protecciones propias de la línea pueden estar en un lado en primera zona mientras que en el otro en segunda zona. Esta situación dará origen a que uno de los interruptores abra antes que el otro cambiando la topología de la red y cambiando las impedancias aparentes en los demás relés; la apertura del interruptor puede dar origen, especialmente en fallas a tierra, a que la falla sea vista por el otro extremo en primera zona despejando el cortocircuito. Tenemos el caso de la apertura de una falla por operación de los relés de primera zona pero no en forma instantánea en los dos extremos. La condición inmediata luego de la falla, como la que hemos indicado, es importante que sea considerada especialmente para la calibración de la tercera zona, que asumiendo que es una protección de respaldo entraría a operar en una situación similar. El tiempo total de despeje de una falla en una línea de transmisión de 230 KV del S.N.I., podrá ser en el periodo comprendido entre "instantáneo" al doble de tiempo de retardo para la tercera zona o sea 2 seg.

Siendo las corrientes de falla para un sistema dado una función del tipo de cortocircuito y de las condiciones de generación, será conveniente que durante la coordinación de las protecciones se considere las variaciones de las impedancias aparentes por cambios en la generación, puesto que Z son muy influenciados por las corrientes intermedias existentes entre el relé y la falla.

Con respecto a los diversos criterios recomendados para calibrar las protecciones y que están expuestos en varios artículos técnicos y libros, no serán válidos en la generalidad de los casos a no ser que un análisis previo de ese caso determinado confirmen estas recomendaciones. En las líneas de 230 KV del S.N.I., las sugerencias dadas para calibrar no resultarían válidas en lo que tiene que ver para la tercera zona de las protecciones de fase y tierra, considerando que, existirán otros criterios que resultarán mejores para este caso en especial.

Los alcances para la primera y segunda zona, 80% y 120% de la impedancia de secuencia positiva de la línea, resultan ser aceptables porque, seguramente cualquier falla que esperamos que se den en nuestro sistema, podrán ser despejados por las protecciones principales de la línea (primera y segunda zona) dentro de tiempos razonables y prácticamente de manera coordinada con el resto de protecciones. En el caso de fallas a tierra no existiría inconveniente alguno en incrementar el alcance de la primera zona de la protección al 85%, porque en el inicio de la falla el efecto de la impedancia mutua hará que el relé bajo-alcance la falla, no existiendo la posibilidad de una operación para fallas fuera de la línea. En casos de líneas cortas junto a líneas largas y, dependiendo de las fuentes de generación en las

cercanías, es posible que la segunda zona pueda ampliarse más del 120% considerando que el efecto de penetración de la protección para falla en los circuitos adyacentes es relativamente pequeña, adicionalmente, se recomendaría reducir el ángulo de torque máximo con el fin de cubrir la línea ante fallas que tengan resistencias de falla grandes. Existiría, en general, una zona crítica en donde una falla podría dar lugar a desconexiones de interruptores no deseadas en el sistema, debido a falla en el funcionamiento de la primera zona, estos son, las cercanías de la línea a las subestaciones; efectivamente una falla, cercana a una subestación, podría producir el disparo de la segunda zona en los terminales remotos de las líneas que llegan a la subestación, no pudiendo evitarse esta remota eventualidad en el S.N.I. Por esta razón, sería recomendable que las cercanías de las líneas a la subestación tengan un buen mantenimiento (como efectivamente por lo general resulta ser así) con el fin de evitar problemas de fallas debidos a vegetación.

Los alcances de la tercera zona dependerán más de las características del sistema eléctrico. Como se considera que es una protección de respaldo remota para fallas fuera de la línea, la calibración deberá hacerse considerando que uno de los interruptores de la línea fallada no abre. Para fallas fase-tierra es factible que la protección de distancia pueda considerarse como un respaldo para fallas en el circuito paralelo, pero resulta más comprometido que cubra fallas en los circuitos de la línea adyacente; la protección de la línea paralelo es posible hacerlo debido a que la impedancia mutua actúa de forma favorable para que opere de esta manera. Para fallas entre fases, la calibración del alcance de la tercera zona deberá ser analizada en cada una de las líneas. La coordinación de la operación de los relés de tercera zona se puede realizar haciendo una combinación de los alcances con los tiempos de retardo.

En la operación de sistemas eléctricos, se considera como una ayuda para poder determinar la zona física de la falla, la indicación de la zona de operación de los relés. Pero de los análisis realizados hemos visto que no siempre es posible hacerlo de esta manera, porque se puede tener el caso de que un cortocircuito con un determinado valor de resistencia de falla puede darse en un sitio que esté más cercano al relé que ha indicado una zona de operación mayor que el del extremo opuesto.

Las características de las impedancias aparentes para diferentes valores de resistencia de falla nos ayudaría a opinar sobre las características de operación de las protecciones de distancia que son usadas en el S.N.I. Para la primera y segunda zonas la forma circular no resulta ser la mejor y menos cuando se trata de una línea corta, como por ejemplo la Milagro-Pascuales (figuras 14 y 22), posiblemente una característica trapezoidal sea la más apropiada para estos casos. Con respecto a la tercera zona, la característica circular se acomodaría bien a la de la impedancia aparente en caso de fallas a tierra operando como respaldo.

REFERENCIAS

- (1) Erazo Páez Mauro.- Trabajos de coordinación de protecciones para las fases A y B del S.N.I., y Centrales Paute y Agoyán. DOSNI-INECEL.
- (2) A.R. van C. Warrington.- Application of the Ohm and Mho Principles to Protective Relays. AIEE Trans, vol 65 pp 378-386, June 1946.
- (3) G.D. Rockefeller.- Zone - Packaged Ground

Distance Relay: I - Principles of Operation. IEEE Trans. Power App. Syst., vol PAS-85 pp 1021 - 1044, Oct. 1966.

- (4) Erazo Páez Mauro, Hidalgo Nieto Carlos.- Curso de Protecciones. DOSNI - INECEL. Feb. 1984
- (5) Erazo Páez Mauro.- Cálculo Digital de Cortocircuitos en Sistemas Eléctricos de Potencia. Tesis de Grado Escuela Politécnica Nacional. Marzo 1976.
- (6) AIEE Committee Report.- Protection of Multiterminal and Tapped Lines. AIEE Trans. Part. III, vol 80, pp 55-65, Apr. 1961.
- (7) Report Sponsored by The Power Systems Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society.- Protection Aspects of Multiterminal Lines. Special Publication of the IEEE, 79 TH0056-2-PWR, pp 1-18 , 1979.
- (8) G.D. Rockefeller, G.B. Gilcrest, E.A. Udrem.- High - Speed Distance Relaying Using a Digital Computer. I - System Description. IEEE Trans. Power App. Syst. vol PAS-91, pp. 1235 - 1243, May/June 1972.
- (9) C.R. Mason.- The Art and Science of Protective Relaying. John Wiley & Sons, Inc. 1956.

(10) Edith Clarke.- Circuit Analysis of A - C Power Systems. Volume I. General Electric Co. 1943.

BIOGRAFIA

MAURO ERAZO PAEZ

Nació en Quito en junio de 1950. Bachiller en Humanidades Modernas en el Colegio Montúfar (1968). Estudios Superiores en la Escuela Politécnica Nacional (1968-1974) donde obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico con el temario de Tesis "Cálculo Digital de Cortocircuitos en Sistemas Eléctricos de Potencia" (1976). Estudios de post-grado en la General Electric Co. (1981).

Conjuntamente con el Ingeniero Carlos Hidalgo Nieto elaboró una publicación "Curso de Protecciones" (1984) que sirvió de guía para charlas dictadas a Ingenieros de Mantenimiento de la DOSNI. Actualmente trabaja en la DOSNI - INECEL en el Departamento de Protecciones donde realiza análisis de la operación y coordinación de protecciones eléctricas para el Sistema Nacional Interconectado además de, colaborar con el mantenimiento de relés.