

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"ESTUDIO DE CORRIENTES DE FALLAS SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS EN  
SISTEMAS DE DISTRIBUCION PRIMARIOS RADIALES".

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: POTENCIA

PRESENTADA POR:

CARLOS LUIS ALARCON GOMEZ

GUAYAGUIL - ECUADOR

1.986

## AGRADECIMIENTO

Al Ing. JOSE LAYANA CHANCAY, Director de Tesis, por su ayuda y colaboración para que este trabajo se realice.

Al Ing. GUSTAVO BERMUDEZ FLORES, Sub Decano de la Facultad de Ingeniería - Eléctrica, por el impulso brindado pa ra la culminación de este trabajo.

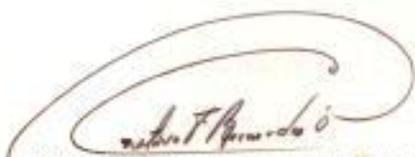
Al Ing. ADOLFO SALCEDO, por su grata ayuda.

D E D I C A T O R I A

- A MI MADRE

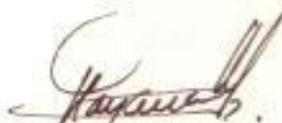
- A MI ESPOSA

- A MIS HIJOS



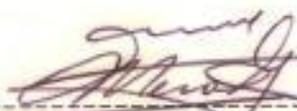
ING. GUSTAVO BERMUDEZ FLORES

SUB-DECANO DE LA FACULTAD DE  
INGENIERIA ELECTRICA.



ING. JOSE LAYANA CHANCAY

DIRECTOR DE TESIS



ING. CRISTOBAL MERA G.

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL



ING. JORGE CHIRIBOGA V.

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE ; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESPOL).

  
CARLOS LUIS ALARCON GOMEZ

## R E S U M E N

El objetivo principal de este trabajo consiste en proporcionar un programa de computación con el cual se obtengan resultados de las corrientes de fallas simétricas y asimétricas que pueden ocurrir en los sistemas de distribución radiales aéreos debido a fallas tales como:

1. Fallas trifásicas
2. Fallas de línea - línea
3. Fallas de línea - tierra
4. Fallas de doble línea - tierra

De esta manera al realizar un estudio de los resultados de las corrientes de fallas simétricas y asimétricas, poder tener una idea clara de cual es o será el comportamiento del sistema ante tales fallas y tomar las soluciones más adecuadas para resolver los problemas que se pueden presentar.

Además este trabajo nos proporciona herramientas necesarias para poder realizar estudios experimentales en nuevos diseños de distribución radiales, ya sean estos con:

- a. Nuevas estructuras de montaje
- b. Diferentes clases de conductores
- c. Diferentes configuraciones de las redes
- d. Diferentes niveles de voltaje de operación

Para ello se incluye en este trabajo diez tipos de circuitos diferentes los cuales pueden ser utilizados para conformar un gran sistema de distribución radial y que deben ser empleados en forma lógica.

En cuanto al estudio de las impedancias de secuencia, es necesario resaltar la distinción que se realiza entre las impedancias de secuencia cero para los diferentes tipos de circuitos y que dependen de la trayectoria de retorno a tierra que seguirá la corriente en la ocurrencia de la falla, de esta manera se consideraran tres clases de impedancia de secuencias cero que son consideradas dependiendo del tipo de circuito utilizado; las cuales pueden ser:

- a. Multiaterrizado

b. Una vez aterrizado

c. Aterrizado en la sub-estación

La flexibilidad del programa de computación permite - al Ingeniero Eléctrico de Potencia optimizar la operación de un sistema de distribución radial aéreo otorgándole al mismo seguridad, confiabilidad y continuidad de servicio.

## INDICE GENERAL

	<u>PAG.</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	IX
INDICE DE FIGURAS -----	XII
INDICE DE TABLAS -----	XV
INTRODUCCION -----	17
CAPITULO I	
GENERALIDADES Y TIPOS DE SISTEMAS DE DISTRIBU- CION	
1.1. DESCRIPCION GENERAL DE SISTEMAS DE DISTRI- BUCION -----	19
1.2. TIPOS DE SISTEMAS A ESTUDIARSE -----	22
a. CIRCUITO TRIFASICO CONEXION ESTRELLA--	24
b. CIRCUITO TRIFASICO CONEXION DELTA-----	26
c. CIRCUITO BIFASICO CONEXION ESTRELLA - ABIERTA -----	27
d. CIRCUITO MONOFASICO -----	27
1.3. DISPOSICION GEOMETRICA DE LA RED DE DIS- TRIBUCION -----	28

## CAPITULO II

IMPEDANCIAS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION  
RADIAL

2.1. IMPEDANCIA DE LOS CONDUCTORES -----	35
2.2. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA-----	42
a. IMPEDANCIA DE SECUENCIA POSITIVA-----	43
b. IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO -----	45

## CAPITULO III

ESTUDIO DE LA COMPONENTE SIMETRICA DE LA CORRIENT  
TE DE FALLA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION RAD  
DIALES

3.1. CORRIENTE DE FALLA TRIFASICA -----	49
3.2. CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - TIERRA ----	51
3.3. CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - LINEA -----	53
3.4. CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA	57
3.5. CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA EN LA OTRA FASE ASOCIADA CON LA FALLA-----	60

## CAPITULO IV

ESTUDIO DE LA COMPONENTE ASIMETRICA DE LA CORRIENT  
TE DE FALLA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCION RAD  
DIAL

4.1. CORRIENTE DE FALLA TRIFASICA -----	73
---	----

4.2.	CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - TIERRA -----	75
4.3.	CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - LINEA -----	75
4.4.	CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA	76
4.5.	CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA EN LA OTRA FASE ASOCIADA CON LA FALLA ----	76

## CAPITULO V

## PROGRAMA DE CALCULO DE LAS CORRIENTES DE FALLA

5.1.	PROGRAMA PRINCIPAL -----	79
	a. CALCULO DE LAS IMPEDANCIAS -----	80
	b. CALCULO DE LAS CORRIENTES DE FALLA ----	83
5.2.	SUB-PROGRAMA DE LECTURA DE DATOS -----	88
5.3.	SUB-PROGRAMA DE INTERPOLACION "INT" -----	93
5.4.	SALIDA DE DATOS -----	94
5.5.	EJEMPLO DE APLICACION -----	96
	a. CARACTERISTICAS DE LA RED -----	96
	b. DATOS DE ENTRADA -----	101
	c. ANALISIS DE LOS RESULTADOS -----	108

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	111
--	--------------------------------------	-----

	ANEXOS -----	114
--	--------------	-----

	BIBLIOGRAFIA -----	206
--	--------------------	-----

## INTRODUCCION

El estudio de las corrientes de fallas simétricas y asimétricas en los sistemas de distribución radial, se fundamentan en la obtención de las corrientes de fallas posibles que puedan ocurrir en el sistema en operación y de esta manera obtener un criterio más sólido que permita garantizar un funcionamiento seguro y confiable de los mismos.

El objetivo principal de este trabajo consiste en proporcionar una metodología que abarque los diferentes tipos de circuitos de distribución radial que existen o que pueden ser construídos; en ello se incluyen criterios de cálculos de impedancias de secuencia siendo las más importantes las de secuencia cero las cuales son aplicables a los diferentes sistemas de distribución dependiendo del tipo de circuito.

La bondad del proyecto abarca diez diferentes tipos de circuitos y tres cálculos de impedancia de secu

cia cero, las cuales son tomadas en cuenta en el estudio de las corrientes de fallas dependiendo del tipo de circuito seleccionado.

# C A P I T U L O I

## GENERALIDADES Y TIPOS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION

### 1.1. DESCRIPCION GENERAL DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION

Los sistemas de distribución pueden ser aéreos y/o subterráneos y a su vez pueden tener un recorrido radial o en anillo, en este desarrollo se tratará sólo los sistemas de distribución radiales aéreos. Los sistemas de distribución están conformados desde su alimentación hasta el punto de conexión de los consumidores de la siguiente manera:

Existe una planta de generación "Fuente de alimentación" en la cual se crea la energía eléctrica a un nivel de voltaje predeterminado; partiendo de los bornes de salida de la fuente llegamos en algunos casos a un sistema de barras de distribución y en otros casos a las borneras de entrada de una subestación, en la cual se eleva el nivel de voltaje generado y luego pasar de la salida de esta subesta-

ción a un sistema de barra de distribución.

De las barras de distribución parten las diferentes alimentadoras, las cuales llevan el fluido eléctrico a las diferentes zonas de carga preestablecidas, estas alimentadoras por lo general son trifásicas y se las denomina alimentadoras principales o troncales; de estas alimentadoras principales parten derivaciones o ramales que a su vez pueden ser trifásicos, bifásicos y monofásicos. Además de estos mismos ramales trifásicos y bifásicos pueden partir sub-ramales bifásicos y monofásicos, respectivamente.

Todos los ramales y subramales llevan la energía eléctrica lo más cerca posible del usuario que lo requiera.

Cabe aquí hacer una pauta y decir que toda alimentadora, ramal o subramal, tienen elementos de protección ya sean estos para sobrecorriente o sobrevoltaje que puedan ocurrir en el sistema. Entre los elementos de protección podemos nombrar a los seccionalizadores, reconectadores, fusibles, los cuales son utilizados para proteger el sistema de posibles sobrecorrientes. Además existen una serie -

de equipos los cuales son intercalados en el sistema de distribución de acuerdo a las necesidades técnicas que se presenten.

A continuación se expone la definición de un Sistema de Distribución, el mismo que ha sido dividido en dos partes:

**Sistema de Distribución:** Es aquel sistema que lleva el fluido eléctrico a los diferentes centros de carga que lo requieran y a un nivel de voltaje que el usuario, ya sea este industrial, comercial o residencial lo necesite.

**Sistema de Distribución Radial:** Se define como aquel sistema que distribuye este fluido eléctrico en forma de abanico, estructura tipo árbol o ramas, tal como se muestra en la figura N° 1.1.

En esta construcción como se observa cada rama une dos nodos, o va de nodo a nodo, además las ramas nunca unen nodos para formar lazos o anillos.

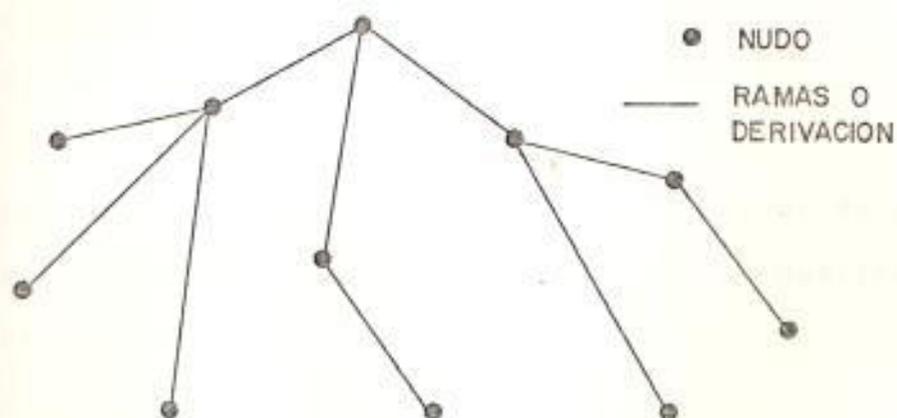


FIGURA N° 1.1. ESQUEMA DE UNA RED DE DISTRIBUCION RADIAL

## 1.2. TIPOS DE SISTEMAS A ESTUDIARSE

Los sistemas o tipos de circuitos que pueden ser analizados en este trabajo son diez, pensando con ellos abarcar la mayor cantidad de tipos de circuitos que existen en nuestro país o que pueden ser construidos.

Los diez tipos de circuitos indicados se los agrupa en cuatro grupos bien definidos, los cuales son:

- a. Circuito trifásico conexión estrella
- b. Circuito trifásico conexión Delta
- c. Circuito Bifásico conexión estrella abierta
- d. Circuitos monofásicos.

Estos cuatro grupos y los diferentes tipos de circuitos que abarcan cada uno de ellos se muestran en la tabla 1.1.

TABLA 1.1.  
TIPOS DE SISTEMA DE DISTRIBUCION

GRUPO	DESCRIPCION	TIPO DE CIRCUITO	ESPECIFICACION
A	Circuito Trifásico conexión estrella	1	Cuatro hilos - neutro multiaterrizado.
		2	Cuatro hilos-neutro una vez aterrizado.
		3	Tres hilos-neutro aterrizado en la subestación
B	Circuito Trifásico conexión Delta	4	Tres hilos-sin neutro.
C	Circuito Bifásico conexión estrella abierta	5	Tres hilos-neutro multiaterrizado.

Viene de la Tabla 1.1.....

D	Circuitos monofásico	7	Dos hilos-neutro aterrizado en la sub-estación.
		8	Dos hilos-sin neutro
		9	Dos hilos-neutro multiaterrizado
		10	Dos hilos-neutro una vez aterrizado.

Los tipos de circuitos indicados en la tabla 1.1. , son seleccionados en forma lógica para de esta manera conformar una gran red de distribución es decir, si la red es multiaterrizada unicamente pueden intervenir los circuitos tipos uno, cinco y nueve ; cada uno de estos tipos de circuitos estarán comprendidos entre dos nodos los cuales deben ser especificados, así como la distancia que existe entre ellos.

a. Circuito Trifásico conexión estrella:

Este tipo de circuito es muy utilizado en nuestro medio y se lo encuentra en toda la red de distribución de nuestro país, para efecto de este trabajo se lo ha subdividido en tres tipos de circuitos, los cuales son:

CIRCUITO TIPO 1: Está conformado por cuatro con ductores de los cuales se consideran tres con ductores iguales en las fases y un conductor de neutro el cual es aterrizado en muchos puntos a través de su recorrido en la red (Ver figura N° 1.2).

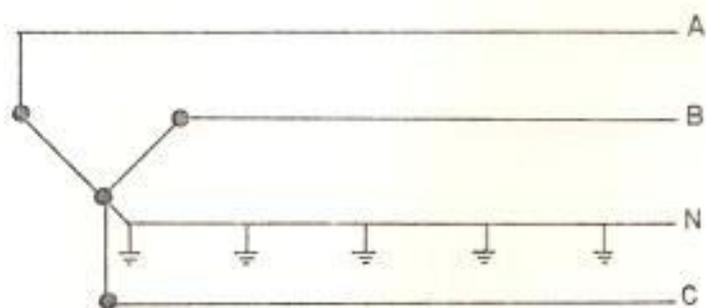


FIGURA N°1.2. CONEXION ESTRELLA MULTIATERRIZADO.

CIRCUITO TIPO 2: Está conformado por cuatro con ductores de los cuales se consideran tres con ductores iguales en las fases y un conductor de neutro, el cual es aterrizado una sola vez. (Ver figura N° 1.3).

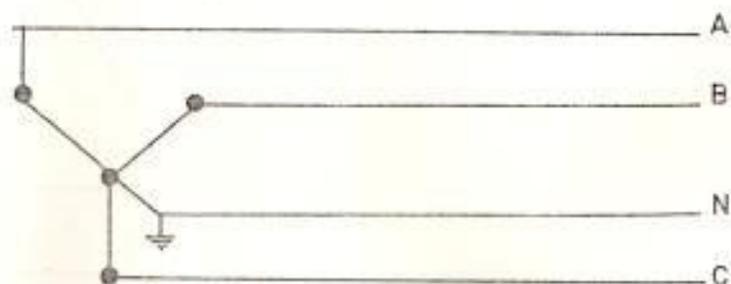


FIGURA N°1.3. CONEXION ESTRELLA NEUTRO UNA VEZ ATERRIZADO

CIRCUITO TIPO 3: Está conformado por tres conductores de fase idénticos y el sistema es aterrizado sólo en la subestación (Ver figura N° 1.4.)

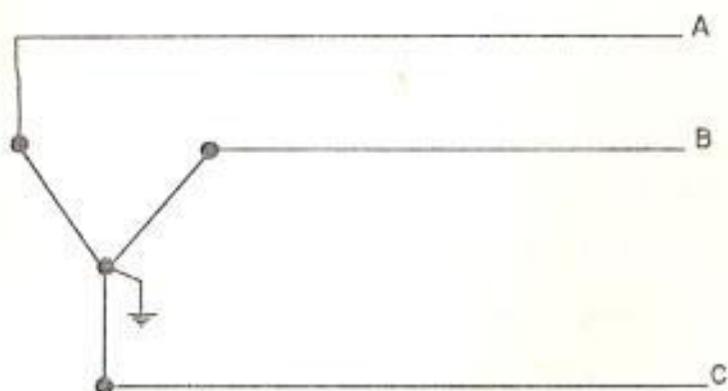


FIGURA N°1.4. CONEXION ESTRELLA NEUTRO ATERRIZADO EN LA SUBESTACION

b. Circuito Trifásico conexión Delta:

En este grupo se considera un solo tipo de circuito al cual se lo identifica como circuito tipo 4, el cual está conformado por tres conductores de fases idénticos (Ver figura 1.5).

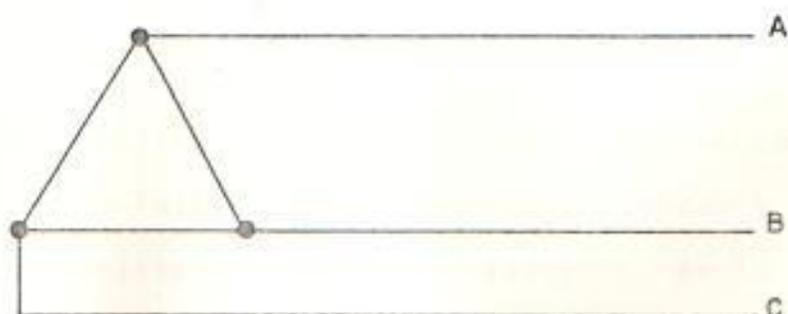


FIGURA N°1.5. CONEXION DELTA - SIN NEUTRO

c. Circuito Bifásico conexión estrella abierta:

En este grupo se considera dos tipos de circuitos, los cuales se los identifica de la siguiente manera:

CIRCUITO TIPO 5: Está conformado por tres conductores de los cuales dos son de fase y uno de neutro, el mismo que estará aterrizado en muchos puntos a través de su recorrido en la red, los conductores de fase son idénticos.

CIRCUITO TIPO 6: Está conformado por tres conductores, siendo dos de ellos de fase los mismos que son idénticos y uno de neutro el cual es una vez aterrizado.

d. Circuito Monofásico:

Este grupo se subdivide en cuatro tipos de circuitos, los cuales son:

CIRCUITO TIPO 7: Está conformado por dos conductores de fase de iguales características y además el sistema será aterrizado solo en la sub

estación.

CIRCUITO TIPO 8: Está conformado por dos conductores de idénticas características, no existiendo neutro en el sistema y además no es aterrizado.

CIRCUITO TIPO 9: Está conformado por un conductor de fase y un conductor de neutro el cual es aterrizado en muchos puntos a través de su recorrido en la red.

CIRCUITO TIPO 10: Está conformado por un conductor de fase y un conductor de neutro el cual es una sola vez aterrizado.

### 1.3. DISPOSICION GEOMETRICA DE LA RED DE DISTRIBUCION

En la actualidad existen muchas formas e ideas de montaje de estructuras para los sistemas de distribución, esto origina una diversidad de disposiciones de los conductores en su recorrido en un sistema de distribución objeto de nuestro estudio.

Las características geométricas de una red de dis

tribución vienen determinadas por los valores de es pacios y alturas de los conductores que la conforman, estos valores son requeridos en lo posterior para el cálculo de las impedancias del sistema.

Una descripción de estos parámetros y la forma de como obtenerlos se expone a continuación:

$h$  = altura de un conductor con respecto al plano de tierra (pies) (Ver figura N° 1.6.)

Dependiendo del tipo de circuito que está siendo analizado puede resultar hasta cuatro valores de  $h$ , así pues tendremos valores de  $h_a$ ,  $h_b$ ,  $h_c$ ,  $h_n$ , que son las alturas de los conductores A, B, C, N, respectivamente, con respecto al plano de tierra (pie) (Ver figura N° 1.7).

Todos estos valores deben ser establecidos y forman parte de los datos de entrada al programa de computación realizado.

$H$  = Espacio horizontal que existe entre dos conductores (pie) (Ver figura N° 1.6).

Dependiendo del tipo de circuito que está siendo analizado puede existir hasta seis valores

de H, así por ejemplo si el circuito analizado tiene tres conductores de fase (A, B,C) y un conductor de neutro (N) los valores de H que deben considerarse son:  $H_{ab}$ ,  $H_{ac}$ ,  $H_{bc}$ ,  $-H_{an}$ ,  $H_{bn}$  y  $H_{cn}$  inclusive. (Ver figura N° 1.7).

$H_{ab}$ ,  $H_{ac}$  y  $H_{an}$ , son valores que deben ser predeterminados y forman parte de los datos de entrada al programa; los valores de  $H_{bc}$ ,  $H_{bn}$  y  $H_{cn}$ , son calculados aplicando las siguientes ecuaciones:

$$H_{bc} = |H_{ac} - H_{ab}| \quad (1.1)$$

$$H_{bn} = |H_{an} - H_{ab}| \quad (1.2)$$

$$H_{cn} = |H_{an} - H_{ac}| \quad (1.3)$$

$S_r$  = Espacio real que existe entre dos conductores (pie), (Ver figura 1.6).

De igual manera dependiendo del tipo de circuito que está siendo analizado se pueden considerar hasta seis valores de  $S_r$ . Si tomamos el mismo ejemplo anterior los valores de  $S_r$  que deben ser considerados son:  $S_{rab}$ ,  $S_{rbc}$ ,  $S_{rac}$ ,  $S_{ran}$ ,  $S_{rbn}$  y  $S_{rcn}$ , los mismos que vienen cal

culados por la siguiente ecuación:

$$S_{rxy} = \left[ (H_{xy})^2 + (h_x - h_y)^2 \right]^{1/2} \quad (1.4)$$

Donde  $xy = (ab, ac, bc, an, bn, cn)$

$S_i$  = Espacio que existe entre un conductor y la imagen de otro conductor (en pie) (Ver figura N° 1.6).

Dependiendo del tipo de circuito que está siendo analizado puede considerarse hasta seis valores de  $S_i$ , tales como  $S_{iab}$ ,  $S_{iac}$ ,  $S_{ibc}$ ,  $S_{ian}$ ,  $S_{ibn}$  y  $S_{icn}$ , inclusive. Estos valores vienen calculados utilizando la siguiente ecuación:

$$S_{ixy} = \left[ (H_{xy})^2 + (h_x + h_y)^2 \right]^{1/2} \quad (1.5)$$

Donde:

$xy = (ab, ac, bc, an, bn, cn)$

$\theta$  = Angulo formado entre la línea que une un conductor con su propia imagen y la línea que une desde este conductor a la imagen de otro conductor (Ver figura N° 1.6).

Este valor se lo obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$\theta = \text{Sen}^{-1}\left(\frac{H}{S_i}\right) \quad (1.6)$$

Todos los valores encontrados para  $h$ ,  $H$ ,  $S_r$ ,  $S_i$ , para facilidad de los cálculos que se realizarán posteriormente son promediados. La forma de obtener el valor promedio de cada uno de ellos depende del tipo de circuito que está siendo analizado, la misma que se muestra en la tabla 1.2.

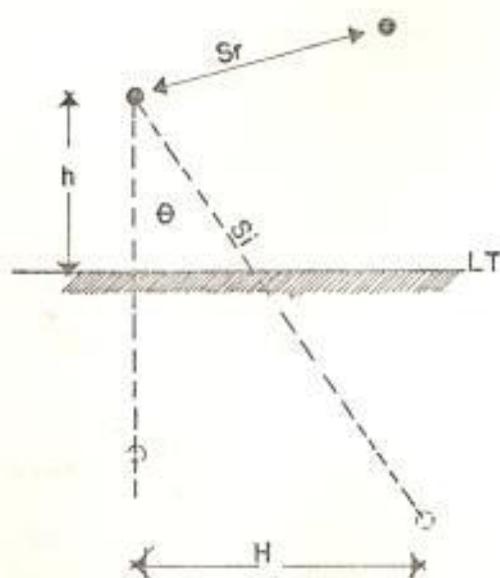


FIGURA N° 1.6. ESPACIO REAL Y ESPACIO IMAGEN ENTRE CONDUCTORES.

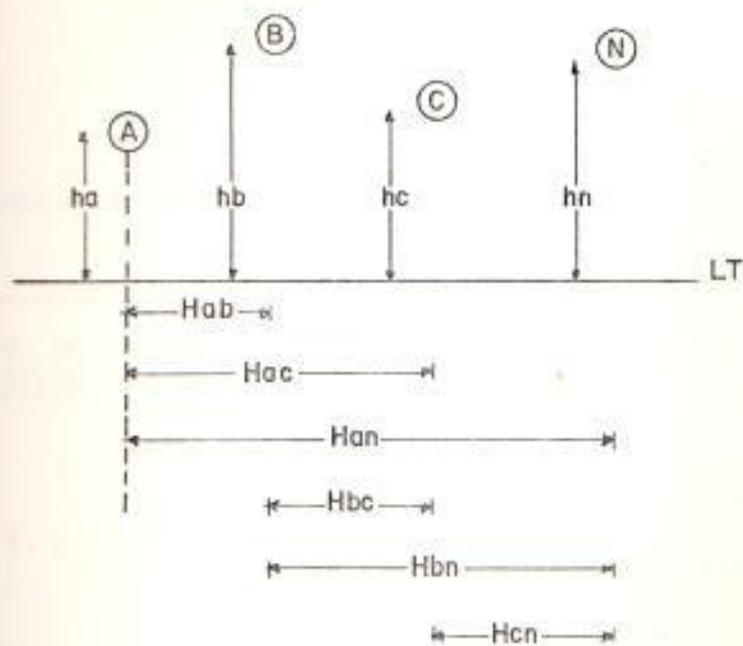


FIGURA N<sup>o</sup> 1.7. ALTURA Y ESPACIO HORIZONTAL ENTRE CONDUCTORES.

Las características geométricas de la red dependen exclusivamente de la estructura sobre la cual van montadas las líneas o conductores que conforman el sistema de distribución. En la actualidad existen diversidad de formas de estructuras de montaje, las cuales en nuestro país se encuentran normalizadas por INECEL y por lo tanto nos da la pauta para una selección de montaje; de esta manera, podremos obtener los datos de altura y los espacios que existen entre conductores.

TABLA 1.2

VALORES PROMEDIOS DE ALTURAS Y ESPACIOS SEGUN EL TIPO DE CIRCUITO

TIPO DE CIRCUITO	CONDUCTORES DE FASE	CONDUCTOR NEUTRO
1-2	$S_r = (S_{rab} \times S_{rac} \times S_{rbc})^{1/3}$ $H = 1/3 (H_{ab} + H_{bc} + H_{ac})$ $S_i = 1/3 (S_{iab} + S_{iac} + S_{ibc})$ $h = 1/3 (h_a + h_b + h_c)$	$S_r = (S_{ran} \times S_{rbn} \times S_{rcn})^{1/3}$ $H = 1/3 (H_{an} + H_{bn} + H_{cn})$ $S_i = 1/3 (S_{ian} + S_{ibn} + S_{icn})$ $h = h_n$
3-4	USAR LAS MISMAS ECUACIONES DE LOS TIPOS (1-2)	NO EXISTE CONDUCTOR NEUTRO
5-6	$S_r = S_{rab}$ $H = H_{ab}$ $S_i = S_{iab}$ $h = 1/2 (h_a + h_b)$	$S_r = (S_{ran} \times S_{rbn})^{1/2}$ $H = 1/2 (H_{an} + H_{bn})$ $S_i = 1/2 (S_{ian} + S_{ibn})$ $h = h_n$
7-8	USAR LAS MISMAS ECUACIONES DE LOS TIPOS (5-6)	NO EXISTE CONDUCTOR NEUTRO
9-10	$h = h_a$	$S_r = S_{ran}$ $H = H_{an}$ $h = h_n$

## C A P I T U L O   I I

### IMPEDANCIAS DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION RADIAL

#### 2.1. IMPEDANCIA DE LOS CONDUCTORES

En las redes de impedancia es aplicable el principio de superposición, en la cual la impedancia propia del circuito y la impedancia mutua entre circuitos a una frecuencia constante son asumidas constantes. Las impedancias de secuencias de un circuito primario aéreo el cual está operando a una frecuencia constante son dependientes de una variedad de factores, los cuales se enumeran a continuación:

- a. Conductor de fase y neutro utilizados
- b. Tipo de circuito
- c. Configuración de la red

El problema de encontrar los valores de impedancia

para un circuito determinado, depende de la especificación de estos factores; así tenemos que conociendo el tipo, número de hilos, material y temperatura del conductor a utilizarse se puede obtener, de tablas de características de los conductores, los valores de:

$R_l$  = resistencia del conductor, Ohm/milla

$G_{mr}$  = radio medio geométrico, pie

$D$  = diámetro exterior del conductor, pulg.

De esta misma manera especificando la configuración de la red, esto es, la estructura de montaje podemos obtener los valores de:

$h$  = altura del conductor, pie

$H$  = espacio horizontal entre conductores, pie

$S_r$  = espacio entre conductores, pie

$S_i$  = espacio entre un conductor y la imagen del otro, pie.

Una vez obtenidos todos estos valores y conociendo el tipo de circuito, se hace uso de la tabla 1.2 y se obtiene los valores promedios adecuados de  $h$ ,  $H$ ,  $S_r$  y  $S_i$ .

La especificación del tipo de circuito nos dá la

pauta para obtener los valores de la impedancia de secuencia necesarios para en lo posterior obtener el valor de corriente de falla requerido.

La impedancia propia de un circuito se la define como la razón de la caída de voltaje en el circuito, en la dirección del flujo de la corriente, a la corriente cuando los demás circuitos están abiertos. La impedancia propia de un conductor "a" se la puede representar como  $Z_{aa}$ .

Al analizar la impedancia propia de un conductor con retorno a tierra se puede ver que existen muchos factores que influyen sobre su valor, aquí se considera una tierra de conductividad uniforme en una extensión semi-infinita, limitada por un plano paralelo al conductor (Ver figura N° 2.1).

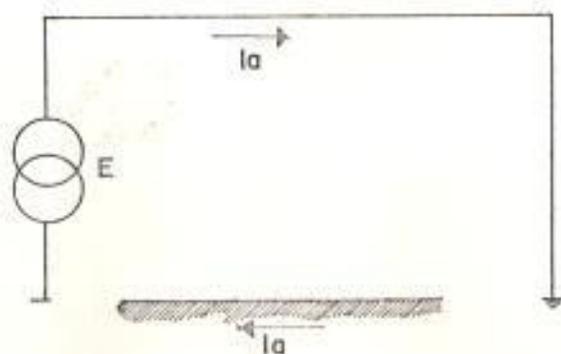


FIGURA N° 2.1. IMPEDANCIA PROPIA DE UN CONDUCTOR CON RETORNO A TIERRA.

La figura N° 2.1., muestra como se obtendría la impedancia de un conductor con retorno a tierra en una prueba. En nuestro caso el conductor "a" tendrá una impedancia con retorno a tierra

$$Z_{aa} = E/I_a$$

Si la expresamos en términos de sus componentes tendremos que:

$$Z_{aa} = (R_i + R_{aa}) + j(X_i + X_{aa}) \quad (2.1)$$

Donde:

$R_i$  = resistencia interna del conductor en ohm/milla

$R_{aa}$  = resistencia propia del conductor "a" en ohm/milla y su valor se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$R_{aa} = W \left\{ 2.528 \times 10^{-4} - 2.599 \times 10^{-7} (f/\rho)^{1/2} + 2.717 \times 10^{-10} h^2 (f/\rho) \times \left[ 3.360 + \log_{10} \left( \frac{\rho/f}{h} \right)^{1/2} \right] + 5.084 \times 10^{-4} h^3 (f/\rho)^{3/2} \right\} \quad (2.2)$$

$X_i$  = es la reactancia interna del conductor y viene calculado por la siguiente fórmula en ohm/milla.

$$X_i = 0.2794 (f/60) \log_{10} \left( \frac{D}{24 G_{mr}} \right) \quad (2.3)$$

X<sub>aa</sub> = reactancia propia del conductor en (ohm/milla), su valor se lo obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$X_{aa} = W \left\{ 3.944 \times 10^{-3} + 7.4113 \times 10^{-4} \log_{10} \left( \frac{(r \rho_0 / f)^{1/2}}{D} \right) + 2.599 \times 10^{-7} h (f / \rho_0) - 9.271 \times 10^{-11} h^2 (f / \rho_0) + 5.084 \times 10^{-14} h^3 (f / \rho_0)^{3/2} \right\} \quad (2.4)$$

W = frecuencia angular del sistema en (Rad/seg)

$$W = 2\pi f \quad (2.5)$$

En cuanto a la impedancia mutua entre dos circuitos se la puede definir como la razón de la caída del voltaje inducida en uno de los circuitos, a la corriente en el otro circuito que la induce. La impedancia mutua entre dos conductores "a" y "b" puede ser representada por Z<sub>ab</sub>; en el caso de que la corriente la flu

ye en el circuito "a" y los demás circuitos están abiertos la impedancia mutua con respecto al circuito "b" será

$$Z_{ab} = V_b / I_a$$

Al analizar la impedancia mutua entre dos conductores con retorno a tierra común procedemos en igual forma que con la impedancia propia, es decir, las mismas condiciones (Ver figura N° 2.2).

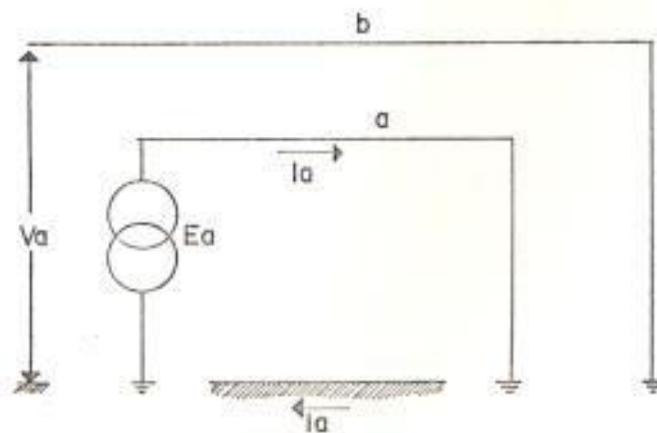


FIGURA N° 2.2. IMPEDANCIA MUTUA ENTRE DOS CONDUCTORES CON RETORNO A TIERRA COMUN

La figura N° 2.2., muestra como obtendríamos la impedancia mutua entre dos conductores con retorno a tierra común, si la expresamos en término de sus

componentes tendríamos que:

$$Z_{ab} = R_{ab} + j X_{ab} \quad (2.6)$$

Donde:

$R_{ab}$  = es la resistencia mutua entre dos conductores, cuyo valor se lo obtiene aplicando la siguiente ecuación, (Ohm/milla):

$$R_{ab} = W \left\{ 2.528 \times 10^{-4} - 1.299 \times 10^{-7} \text{Si} (f/\rho) \right. \\ \left. 6.785 \times 10^{-11} \text{Si}^2 (f/\rho) \cos 2\theta \left[ 3.661 + \log_{10} \left[ \frac{(\rho/f)^{1/2}}{\text{Si}} \right] \right] \right. \\ \left. + 2.951 \times 10^{-11} \text{Si}^2 (f/\rho) \text{Si}^2 \theta \text{Sen} 2\theta + 6.355 \times 10^{-15} \text{Si}^3 (f/\rho)^{3/2} \cos 3\theta \right\} \quad (2.7)$$

$X_{ab}$  = es la reactancia mutua entre conductores en (Ohm/milla), su valor viene dado por la siguiente ecuación:

$$X_{ab} = W \left\{ 2.4715 \times 10^{-3} + 7.4113 \times 10^{-4} \log_{10} \left[ \frac{(\rho/f)^{1/2}}{\text{Sr}} \right] \right. \\ \left. + 1.299 \times 10^{-7} \text{Si} (f/\rho)^{1/2} \cos \theta - \right.$$

$$2.318 \times 10^{-11} \text{ si}^2 (f/\rho) \cos 2\theta \} \quad (2.8)$$

El desarrollo de las ecuaciones (2.3), (2.4), (2.7) y (2.8), se basan en las fórmulas de Carson's.

## 2.2. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA

En un sistema trifásico simétrico con voltaje generado balanceado, la corriente y el voltaje bajo operación normal son balanceados. Durante una o más fallas las componentes simétricas de la corriente que fluye en el circuito simétrico produce una caída de voltaje de secuencia semejante a la corriente. En un circuito trifásico la impedancia ofrecida a la corriente de secuencia dada, son las mismas en las tres fases y por esta razón cada uno de los sistemas de secuencia pueden ser representados por un circuito equivalente, el cual no tiene acoplamiento mutuo con los circuitos equivalentes de las otras dos secuencias.

En un circuito trifásico asimétrico, el voltaje y la corriente son desbalanceados bajo operación normal, si el desbalance es pequeño esto puede ser

relativamente sin importancia, de otra manera si existiera durante una operación normal un desbalance considerable, el efecto podría ser serio.

a. Impedancia de secuencia positiva:

La impedancia que se opone al paso de la corriente de secuencia positiva en las tres fases de un circuito puede definirse como la razón de la caída de voltaje en las tres fases a la correspondiente corriente de la fase, fluyendo en el circuito solo corriente de secuencia positiva.

Con corriente de secuencia positiva fluyendo en los tres conductores, la suma de las corrientes es cero y no puede fluir corriente en el conductor neutro o tierra; puede inducirse voltaje en la tierra, sin embargo en todos los puntos donde la suma del flujo no es cero, corrientes EDDY pueden fluir en la tierra. Si se asume que cada corriente que fluye en los conductores induce una corriente igual y -opuesta en la tierra el efecto de la presencia de la tierra puede tomárselo dentro del cálculo de la impedancia propia y mutua de un conductor con retorno a tierra.

La impedancia de secuencia positiva de un circuito es generalmente una función de las características y configuración de los conductores de fase únicamente; el tipo de aterrizaje y la existencia o ausencia del conductor neutro para la mayor parte de los circuitos aéreos, tiene un efecto despreciable sobre la impedancia de secuencia positiva.

La impedancia de secuencia podemos expresarla - como sigue:

$$Z_{11} = 1/3 (Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) - 1/3 (Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc})$$

Si,  $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}$  y  $Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc}$  tenemos que:

$$Z_{11} = Z_{aa} - Z_{ab} \quad (2.9)$$

En esta ecuación se incluye el efecto de la presencia de la tierra y su diferencia es pequeña - si la comparamos con la ecuación que no considera la presencia de la tierra.

La impedancia de una red estática simétrica con corriente trifásica balanceada es independiente

del orden de fase razón por la cual en nuestro caso consideramos que la impedancia de secuencia positiva es igual a la impedancia de secuencia negativa ( $Z_1 = Z_2$ ).

b. Impedancia de secuencia cero:

Las corrientes de secuencia cero por definición son de igual magnitud y ángulo en las tres fases, luego su suma no es cero y debería existir un camino de retorno por el cual la suma de estas corrientes ( $3I_0$ ) pueda fluir o por lo contrario la impedancia de secuencia cero puede ser infinita. La impedancia por fase que encuentra la corriente de secuencia cero en un circuito trifásico simétrico, es la impedancia equivalente ofrecida para alguna de las tres corrientes iguales que fluye en las fases y su suma retornará directamente a tierra o a través de un conductor al cual el neutro es conectado. En un circuito simétrico la impedancia de secuencia cero por fase es tres veces la razón del voltaje aplicado a la corriente total ( $3I_0$ ).

La impedancia de secuencia cero depende de la naturaleza del camino de retorno a tierra, por

esta razón consideran tres clases de impedancia de secuencia cero. Estas son:

Z<sub>01</sub> Impedancia propia de secuencia cero sin conductor neutro, pero, con la presencia de tierra tomada en consideración en el cálculo, se considera además conductores idénticos en las tres fases cuyas impedancias son función de la frecuencia del sistema, diámetro del conductor, resistividad a tierra y altura del conductor con respecto a tierra, así como también del espacio medio geométrico entre conductores.

$$Z_{01} = Z_{aa} + 2Z_{ab} \quad (2.10)$$

Z<sub>02</sub> Impedancia de secuencia cero de un circuito con neutro aterrizado una sola vez y con presencia de tierra para fallas que involucran solamente el conductor neutro.

$$Z_{02} = Z_{01} + 3Z_{nn} - 6Z_{an} \quad (2.11)$$

Z<sub>03</sub> Impedancia propia de secuencia cero de un

circuito con neutro multiterrizado y con presencia de tierra, considerado en el cálculo para fallas que involucran al conductor neutro y la tierra como caminos de retorno paralelos para la corriente de falla.

$$Z_{003} = Z_{001} - 3 \frac{Z_{an}^2}{Z_{nn}} \quad (2.12)$$

Los valores obtenidos de las ecuaciones de impedancia de secuencia cero vienen dados (ohm/milla).

TABLA 2.1.

IMPEDANCIAS DE SECUENCIAS SEGUN EL TIPO DE CIRCUITO

TIPO DE CIRCUITO	DESCRIPCION DE LINEA	IMPEDANCIA DE SECUENCIA			
		Z11	Z001	Z002	Z003
1	conexión trifásica estrella 4 hilos - tres conductores de fase idénticos, neutro multiaterrizado	X			X
2	conexión trifásica estrella 4 hilos - tres conductores de fase idénticos, neutro una vez aterrizado	X	X	X	X
3	conexión trifásica estrella 3 hilos - tres conductores de fase idénticos, neutro aterrizado en la sub-estación	X	X		
4	conexión trifásica delta 3 hilos - tres conductores de fase idénticos	X			
5	conexión bifásica estrella abierta 3 hilos - dos conductores de fase idénticos, neutro multiaterrizado	X			X
6	conexión bifásica estrella abierta 3 hilos - dos conductores de fase idénticos, neutro una vez aterrizado	X	X	X	X
7	conexión monofásica 2 hilos dos conductores de fase idénticos, neutro aterrizado en la sub-estación	X	X		
8	conexión monofásica 2 hilos dos conductores de fase idénticos no aterrizado	X			
9	conexión monofásica 2 hilos un conductor de fase, neutro multiaterrizado	X			X
10	conexión monofásica 2 hilos un conductor de fase, neutro una vez aterrizado	X	X	X	X

## C A P I T U L O   I I I

### ESTUDIO DE LA COMPONENTE SIMETRICA DE LA CORRIENTE DE FALLA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION RADIALES

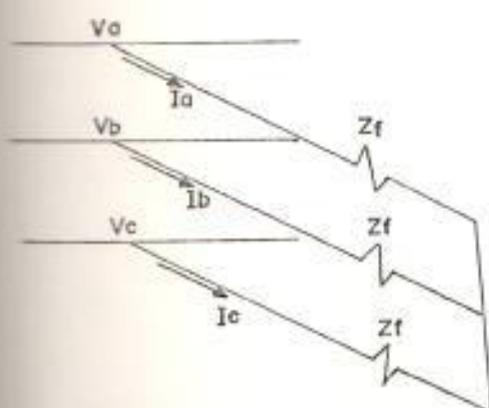
Las fallas en los sistemas de potencia se originan por factores internos y externos, los cuales deben ser considerados por el Ingeniero Planificador de tales sistemas. Entre los agentes externos que ayudan a la presencia de fallas, tenemos: a los seres humanos y a la naturaleza, factores que en muchos casos son impredecibles y que ocasionan serios problemas en la operación normal de un sistema de potencia.

Este tipo de agentes externos juegan un papel importante en el diseño de un sistema de distribución, el cual se encuentra expuesto a la presencia de estos agentes.

#### 3.1. CORRIENTE DE FALLA TRIFASICA

Constituye una de las más severas que puede ocurrir

en un sistema de potencia. Si nos valemos de la ecuación (25) del Anexo sobre ecuación de las componentes simétricas, para un valor de impedancia de falla dado ( $Z_f$ ) tenemos:



$$|I_a| = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

Donde:

$$V_a = |I_a| Z_f$$

Luego sabemos que:

$$I_{a2} = 0$$

$$I_{a0} = 0$$

FIG.3.1. FALLA TRIFÁSICA

reemplazando estos valores en la ecuación (19) del mismo anexo, tendremos que:

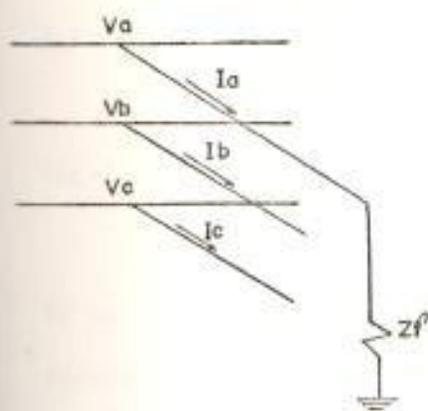
$$I_{f3\phi} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f}$$

El resultado que se obtiene de la ecuación para la corriente de falla trifásica, es un número complejo de la cual sólo se tomará en cuenta para efecto de nuestro estudio su magnitud. Luego tendremos:

$$I_{f3\phi} = \left| \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \right| \quad (3.1)$$

### 3.2. CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - TIERRA

Si consideramos inicialmente una impedancia de falla igual a cero ( $Z_f = 0$ ) en un sistema aterrizado, las componentes de secuencia positiva, negativa y cero de la corriente en la fase fallada, son iguales en magnitud y fase; la componente de secuencia positiva del voltaje a tierra en la falla, es igual en magnitud y opuesto en fase a la suma de las componentes de secuencia negativa y cero.



Las condiciones de falla son:

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

$$V_a = 0$$

Haciendo uso de las ecuaciones (12,20 y 21) de anexo se obtiene:

$$V_{a1} = -(V_{a0} + V_{a2})$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$$

FIGURA N° 3.2.  
FALLA DE LINEA - TIERRA

Reemplazando el valor de  $V_{a2}$  y  $V_{a0}$  dado en las ecua

ciones (26 y 27) del anexo en  $V_{a1}$  obtenido, tendremos que:

$$V_{a1} = I_{a1} (Z_0 + Z_2)$$

Sustituyendo este valor en ecuación (25) del mismo anexo tendremos que:

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Reemplazando este valor de  $(I_{a1})$  en la ecuación (19) del mismo anexo, tendremos:

$$I_{fL-T} = \left| \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right|$$

Si se considera que la impedancia de falla ( $Z_f \neq 0$ ) es diferente de cero utilizando el mismo procedimiento expuesto tendremos que:

$$I_a = 3I_{a1}$$

Luego:

$$V_a = 3I_{a1} Z_f$$

Utilizando las ecuaciones (26 y 27) del anexo y el valor de  $(V_a)$  deducido tendremos que:

$$V_{a1} = I_{a1} (3Z_f + Z_2 + Z_0)$$

sustituyendo en esta ecuación, el valor de  $V_{af}$  da do por la ecuación (25) del anexo, tendremos que:

$$|a| = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f}$$

Reemplazando el valor de  $|a|$  en la ecuación (19), del mismo anexo, y obteniendo la magnitud del va lore de la corriente de falla de línea a tierra - tendremos:

$$I_{FL-T} = \left| \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \right| \quad (3.2)$$

### 3.3. CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - LINEA

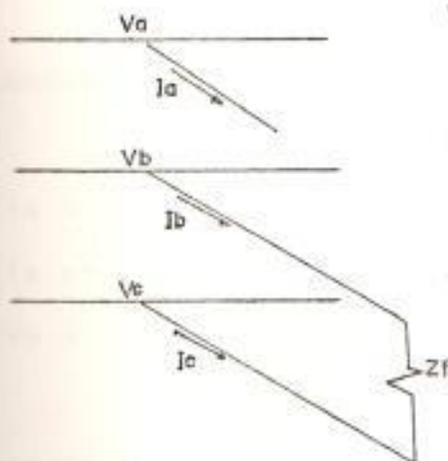
Considerando una impedancia de falla ( $Z_f=0$ ) igual a cero, la componente de secuencia positiva y negativa de la corriente de falla en la fase no fallada, es igual en magnitud pero opuesta en fase, mientras que la componente de secuencia positiva y negativa de voltaje, son iguales en magnitud y fase.

Las condiciones de falla -  
son:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b = V_c$$



utilizando las ecuaciones -  
(19,20 y 21) del anexo, ten-  
dremos que:

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2}$$

$$V_{a1} = V_{a2}$$

FIGURA N° 3.3.

FALLA DE LINEA-LINEA

Luego:

$$V_{a1} = I_{a1} Z_{a2}$$

Esto lo obtenemos de la ecuación (26) del anexo -  
y sustituyendo este resultado en la ecuación (25)  
del anexo tendremos que:

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2}$$

reemplazando este valor en las ecuaciones (20 y 21) del anexo, tendremos:

$$|f1-1| = \left| +j \frac{\sqrt{3} V_f}{Z_1 + Z_2} \right|$$

Ahora consideramos que ( $Z_f \neq 0$ ), tendríamos:

$$I_a = 0$$

$$I_b = -I_c$$

$$V_b - V_c = I_b Z_f$$

reemplazando estas condiciones en las ecuaciones (22 y 23), obtendríamos:

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a2} = -I_{a1}$$

reemplazando el valor de ( $V_b - V_c$ ) en la ecuación (13 y 14) del anexo, tenemos:

$$V_b - V_c = (a^2 - a) V_{a1} - (a^2 - a) V_{a2} = I_b Z_f$$

Sustituyendo el valor de ( $I_b$ ) de la ecuación (20) del anexo, además usando la condición ( $I_{a2} = -I_{a1}$ ) y dividiendo todo para ( $a^2 - a$ ) tenemos:

$$V_{a1} = V_{a2} + |I_{a1}| Z_f$$

reemplazando el valor de  $V_{a2}$  de la ecuación (26) del anexo.

$$V_{a1} = |I_{a1}| (Z_2 + Z_f)$$

reemplazando el valor de  $V_{a1}$  de la ecuación (25) del anexo, tenemos:

$$|I_{a1}| = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

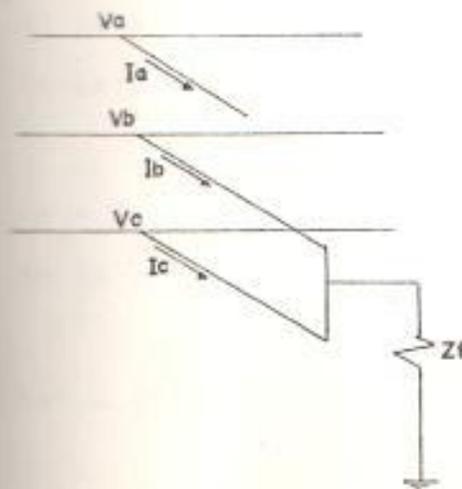
Usando las ecuaciones (20 y 21) del mismo anexo, y sacando el valor absoluto de la corriente de falla de línea a línea tendremos:

$$|I_f| - 1 = \left| \frac{\pm \sqrt{3} V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \right| \quad (3.3)$$

### 3.4. CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA

Considerando una impedancia de falla ( $Z_f = 0$ ) igual a cero, tenemos que la componente del voltaje a tierra de secuencia positiva, negativa y cero de la fase sin falla, son iguales en magnitud y fase; mientras que la componente de secuencia positiva de la corriente en la falla es igual en magnitud y opuesta en fase a la suma de las componentes de secuencia negativa y cero, estas componentes varían inversamente a la impedancia de secuencia vista desde la falla.

Las condiciones de falla son:



$$I_a = 0$$

$$V_b = 0$$

$$V_c = 0$$

De esto se obtiene que:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2}$$

$$I_{a1} = -(I_{a0} + I_{a2})$$

$$I_{a0} = - \frac{I_{a1} Z_2}{Z_0 + Z_2}$$

$$I_{a2} = - \frac{I_{a1} Z_0}{Z_0 + Z_2}$$

FIGURA N° 3.4.  
FALLA DE DOBLE LINEA-TIERRA

reemplazando la ecuación (26) del anexo tendremos:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{(I_{a1} Z_0) Z_2}{Z_0 + Z_2}$$

Sustituyendo la ecuación (25) y despejando el valor de  $(I_{a1})$ , tenemos:

$$I_{a1} = \frac{V_f (Z_0 + Z_2)}{Z_1 (Z_0 + Z_2) + Z_0 Z_2}$$

reemplazando este valor en las ecuaciones (20 y 21) del anexo así como las condiciones anteriores, tenemos:

$$|f|_{1-T} = \left| -j \sqrt{3} \frac{V_f (Z_0 - aZ_2)}{Z_0 (Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2} \right|$$

Si consideramos una impedancia de falla ( $Z_f \neq 0$ ) diferente de cero tenemos:

$$I_a = 0 \quad V_b = V_c = (I_b + I_c) Z_f$$

de la ecuación (19) del anexo tendremos:

$$I_{a1} = -(I_{a2} + I_{a0})$$

Luego:

$$I_b + I_c = 3I_0$$

con  $V_b = V_c$  de la ecuación (4 y 6) del anexo tene

mos:

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + 2V_b)$$

$$V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a - V_b)$$

Restando estas dos últimas ecuaciones y reemplazando el valor de  $V_b$  por  $(3I_0 Z_f)$ , tendremos:

$$V_{a1} = V_{a0} - 3I_0 Z_f$$

Sustituyendo el valor de  $V_{a0}$  de la ecuación (27) del anexo tendremos:

$$V_{a1} = -I_{a0} (Z_0 + 3Z_f)$$

Luego:

$$I_{a0} = - \frac{V_{a1}}{Z_0 + 3Z_f}$$

sabiendo que  $(V_{a1} = V_{a2})$  de la ecuación (26) del mismo anexo, obtenemos:

$$I_{a2} = - \frac{V_{a1}}{Z_2}$$

Reemplazando estas dos últimas ecuaciones en la ecuación de (1 a 1) tendremos:

$$I_{a1} = V_{a1} \left( \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0 + 3Z_f} \right)$$

Luego;

$$V_{a1} = I_{a1} \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}$$

Si sustituimos el valor de  $V_{a1}$  dado en la ecuación (25) del mismo anexo tendremos que:

$$I_{a1} = \frac{V_f(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)}$$

Reemplazando estos resultados de  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ , e  $I_{a0}$  en la ecuación (20) del mismo anexo y obteniendo su magnitud tendremos:

$$I_{fLL-T} = \left| -j\sqrt{3} \frac{V_f(Z_0 + 3Z_f - aZ_2)}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)} \right| \quad (3.4)$$

### 3.5. CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA EN LA OTRA FASE ASOCIADA CON LA FALLA

Aplicando el mismo procedimiento usado en (3.4), pero con la diferencia de que el análisis en lugar de realizarlo para la corriente ( $I_b$ ) se la realiza para la corriente ( $I_c$ ); estas dos en realidad son las corrientes de las dos fases involucradas en la falla en ese

instante, luego:

$$|a_1| = \frac{V_f(Z_2 + Z_0 + 3Z_f)}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)}$$

reemplazando esta ecuación en la ecuación (21) del -  
anexo y teniendo en cuenta las condiciones estableci-  
das, obtendremos:

$$I_{fLL-T} = \left| j\sqrt{3} \frac{V_f(Z_0 + 3Z_f - a^2 Z_2)}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2)(Z_0 + 3Z_f)} \right| \quad (3.5)$$

## C A P I T U L O    I V

### ESTUDIO DE LA COMPONENTE ASIMETRICA DE LA CORRIENTE DE FALLA EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCION REAL

Asimetría en un sistema de potencia, es el fenómeno que se produce cuando la diferencia de fase  $\theta$  que existe entre la fuente de voltaje y la corriente de falla de estado estable, es diferente al ángulo de voltaje o ángulo de cierre  $\beta$ .

Cuando el ángulo de voltaje ( $\beta \neq \theta$ ) es diferente al ángulo de fase del circuito, en el instante ( $t = 0$ ) de la ocurrencia de una falla, origina la presencia de una onda unidireccional transiente que sumada a la onda simétrica de la corriente de falla nos produce una onda resultante asimétrica. Ver figura N° 4.1.

Si el ángulo de voltaje ( $\theta = 0$ ) es igual a cero, en el instante ( $t = 0$ ) de la ocurrencia de una falla, se producirá una onda asimétrica máxima.

Cuando una falla ocurre la corriente total en dirección de la falla está integrada por una componente de corriente alterna o componente de estado estable o simétrica y una componente de corriente directa o componente transiente, la cual decae exponencialmente en el tiempo.

Las ecuaciones de las corrientes de falla que podemos observar claramente en el Capítulo III, nos permiten determinar los valores RMS de la componente de estado estable, la cual permanece en períodos suficientemente largos, de tal forma que

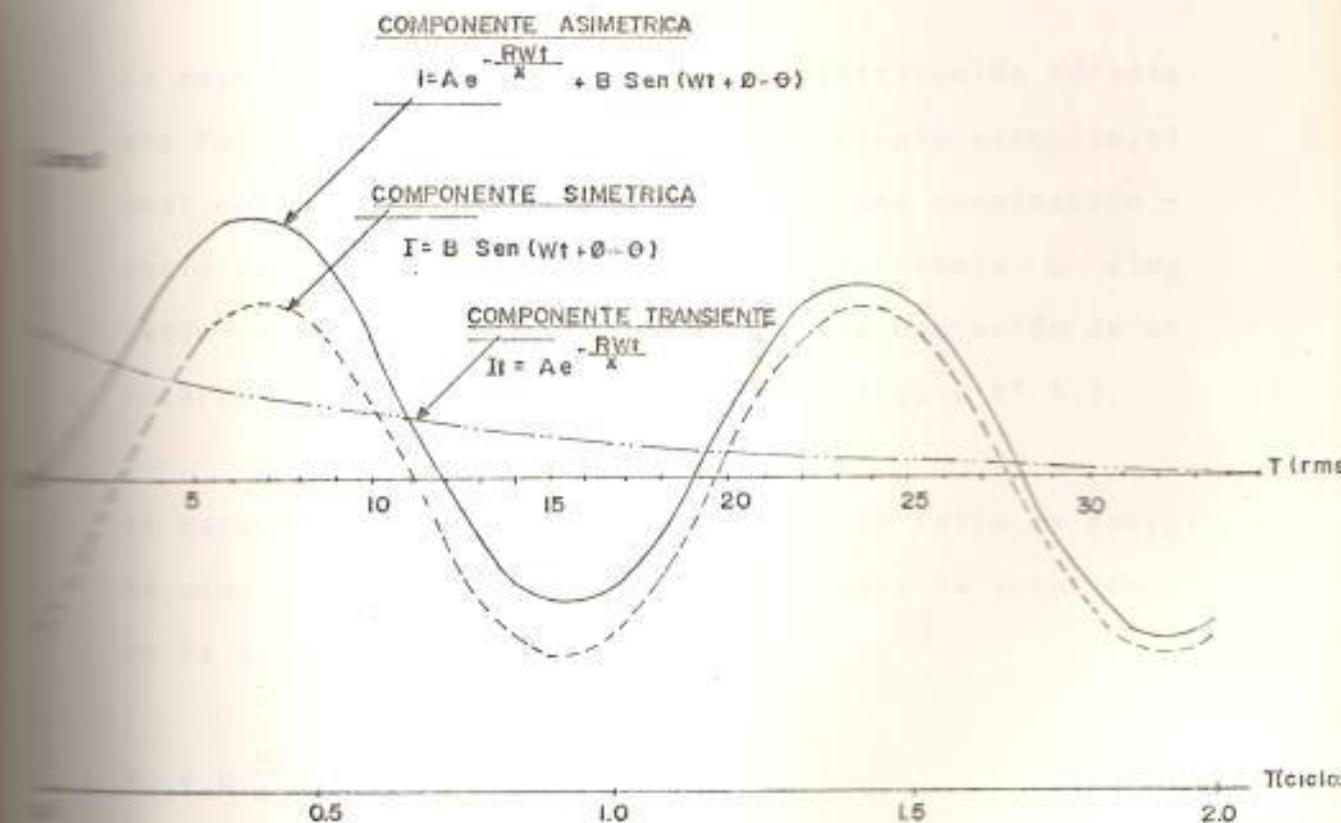


FIGURA N<sup>o</sup> 4.1. ONDA ASIMETRICA COMO RESULTADOS DE UNA ONDA SIMETRICA Y LA PRESENCIA DE UNA LINEA TRANSIENTE.

todos los transientes iniciales que se hubieren presentado han desaparecido y por lo tanto no nos dicen nada acerca de los valores instantáneos RMS de la corriente en un tiempo inmediatamente después de la ocurrencia de una falla ( $t = 0^+$ )

La mayor parte de los circuitos de distribución durante una falla, pueden ser reducidos a un simple circuito, el cual consiste de una fuente alterna y una combinación en serie de una resistencia  $R$  y una inductancia  $L$  simulando la ocurrencia de una falla con la operación de un interruptor tal como se observa en la figura N° 4.2.

La determinación de como la corriente de falla se comporta como una función del tiempo, involucra la solución de la siguiente ecuación diferencial:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E \text{ Sen } (\omega t + \phi) \quad (4.1)$$

Donde:

$R$  = resistencia del circuito

$L$  = inductancia del circuito

$i$  = corriente instantánea del circuito, después de que el interruptor (S) es cerrado.

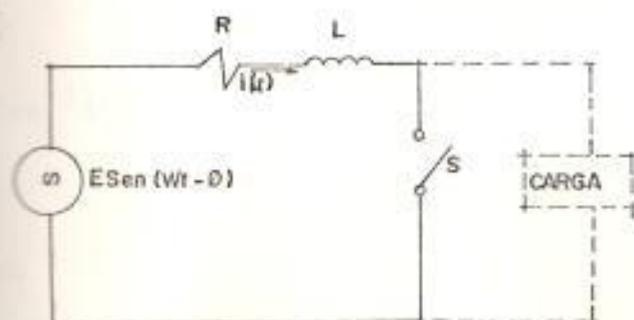


FIGURA N° 4.2. REPRESENTACION DE UN CIRCUITO DE DISTRIBUCION DURANTE UNA FALLA.

- $E$  = valor pico de la fuente de voltaje alterno
- $\omega$  = frecuencia angular de la fuente de generación
- $\phi$  = ángulo de separación entre el voltaje ( $V=0$ ) y el tiempo en el cual la falla ocurre ( $t=0$ ), se lo denomina ángulo de voltaje o ángulo de cierre.

La solución de la ecuación (4.1), asumiendo una corriente de pre-falla igual a cero ( $i_c = 0$ ), viene dado por:

$$i = Ae^{-\frac{R\omega t}{X}} + B \text{ Sen}(\omega t + \phi - \theta) \quad (4.2)$$

Donde:

$$A = \frac{E \text{ Sen}(\phi - \theta)}{(R^2 + X^2)^{1/2}}$$

$$B = \frac{E}{(R^2 + X^2)^{1/2}}$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{X}{R}\right)$$

$$X = \omega L$$

El primer término de la ecuación (4.2), corresponde

a la componente transiente, la cual es un exponencial de creciente, cuyo valor tiende a desaparecer rápidamente, y que depende de la constante de tiempo expresada por la razón de cortocircuito  $X/R$  o el factor de potencia de un circuito como el de la figura N<sup>o</sup> 4.2; el segundo término de esta misma ecuación corresponde a la componente de estado estable, la cual es una función sinuoidal de tiempo cuyo valor de cresta, es simplemente el valor pico del voltaje de la fuente dividido para la magnitud de la impedancia vista desde el punto de falla.

La diferencia de fase ( $\theta$ ) entre la fuente de voltaje y la corriente de falla de estado estable depende sólo de la razón de impedancia del circuito  $X/R$ .

La importancia de la asimetría de la corriente puede ser catalogada por dos características importantes, tales como la fuerza magnética ejercida en alguna parte debida a la corriente y el contenido Joule de la corriente de falla; ambas características son una función del cuadrado de la corriente e influyen en forma directa sobre el diseño y aplicación de dispositivos los cuales estarán expuestos a corrientes de falla, pudiendo tener magnitudes elevadas en el período transiente inicial. El trabajo - mecánico sobre los equipos de protección eléctricos, en

entre otros factores, es determinado por la magnitud de la corriente asimétrica, la cual es función de la razón de impedancia del circuito  $X/R$  y los valores instantáneos de voltaje al cual ocurre el cambio.

La máxima fuerza magnética producida en un equipo, ocurre en el instante en que la corriente es máxima, es decir, haciendo referencia a la forma de la onda de la corriente asimétrica, esto ocurrirá en los valores picos resultantes. La magnitud de estos picos pueden ser obtenidos matemáticamente diferenciando la ecuación (4.2), con respecto a dos variables  $t$  y  $\theta$ , las otras variables tales como  $E$ ,  $R$ ,  $X$ , y  $w$ , son fijas para cualquier circuito dado. Si realizamos la diferenciación de la ecuación (4.2), determinamos que el mayor pico ocurre cuando el ángulo de voltaje ( $\theta=0$ ) es cero; en estas condiciones el mayor pico ocurre en el primer lazo. La condición de ( $\theta = 0$ ) es llamada condición de máxima asimetría.

Un análisis matemático de la corriente bajo condiciones de máxima simetría, puede demostrar que alguno de los efectos de asimetría son dependientes de la relación  $X/R$  del circuito, además muestra que el efecto en el valor pico y el contenido de energía en el primer lazo

Las corrientes son mayores que el efecto en el valor RMS, por lo tanto, en lo que respecta a diseño y aplicación de dispositivos de protección tendría un mejor sentido comparar los picos de corriente y energía, que una comparación de los valores RMS, sin embargo, los equipos actualmente están clasificados de acuerdo a relaciones RMS dadas.

El valor RMS de una corriente arbitraria puede expresarse como

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (4.3)$$

Donde:

$i$  = corriente en función del tiempo

$dt$  = tiempo

$T$  = intervalo de tiempo especificado para la determinación (RMS)

Si  $i = B \text{ Sen}(wt)$ , donde  $B$  es el valor pico de una corriente sinusoidal, la ecuación (4.3), muestra que  $I = \frac{B}{\sqrt{2}}$ , siendo  $T$  un integral múltiple de un medio ciclo. Desde el punto de vista físico, una corriente sinusoidal con un

valor pico  $B$ , tendrá el mismo efecto en pérdidas de potencia en un conductor, como una corriente (D.C), cuyo valor es  $\frac{B}{\sqrt{2}}$ , por esta razón,  $I$  es llamado el valor efectivo de  $(i)$ . El valor RMS del primer lazo de la onda de corriente asimétrica es definido por la ecuación (4.2); si la expresión de  $i(t)$  dada por la ecuación (4.2), es cuadrática y la reemplazamos en la ecuación (4.3) y la resolvemos, obtendremos como resultado el valor (RMS) para el primer lazo de corriente.

Gross y Thaper dan una expresión que es función sólo de  $X$ ,  $R$ , y  $\phi$ ; ellos demuestran que para un valor de  $X/R$  dado la relación de los valores RMS del primer lazo de corriente  $I'$  al valor (RMS) de la componente simétrica de corriente  $I$  es función solamente del ángulo de voltaje  $\phi$ , luego el valor de  $I'/I$  con respecto a  $\phi$  puede ser maximizado y luego graficado como una función de  $X/R$ , ver figura 4.3.

El valor de  $\phi$  necesario para un máximo puede ser encontrado usando técnicas iterativas después de que el valor de  $i(t)$  de la ecuación (4.2), es reemplazado en la ecuación (4.3) y se realizan las operaciones adecuadas (ver Anexo Solución de la relación  $I'/I$ ). Mientras que el intervalo de tiempo de integración es constante

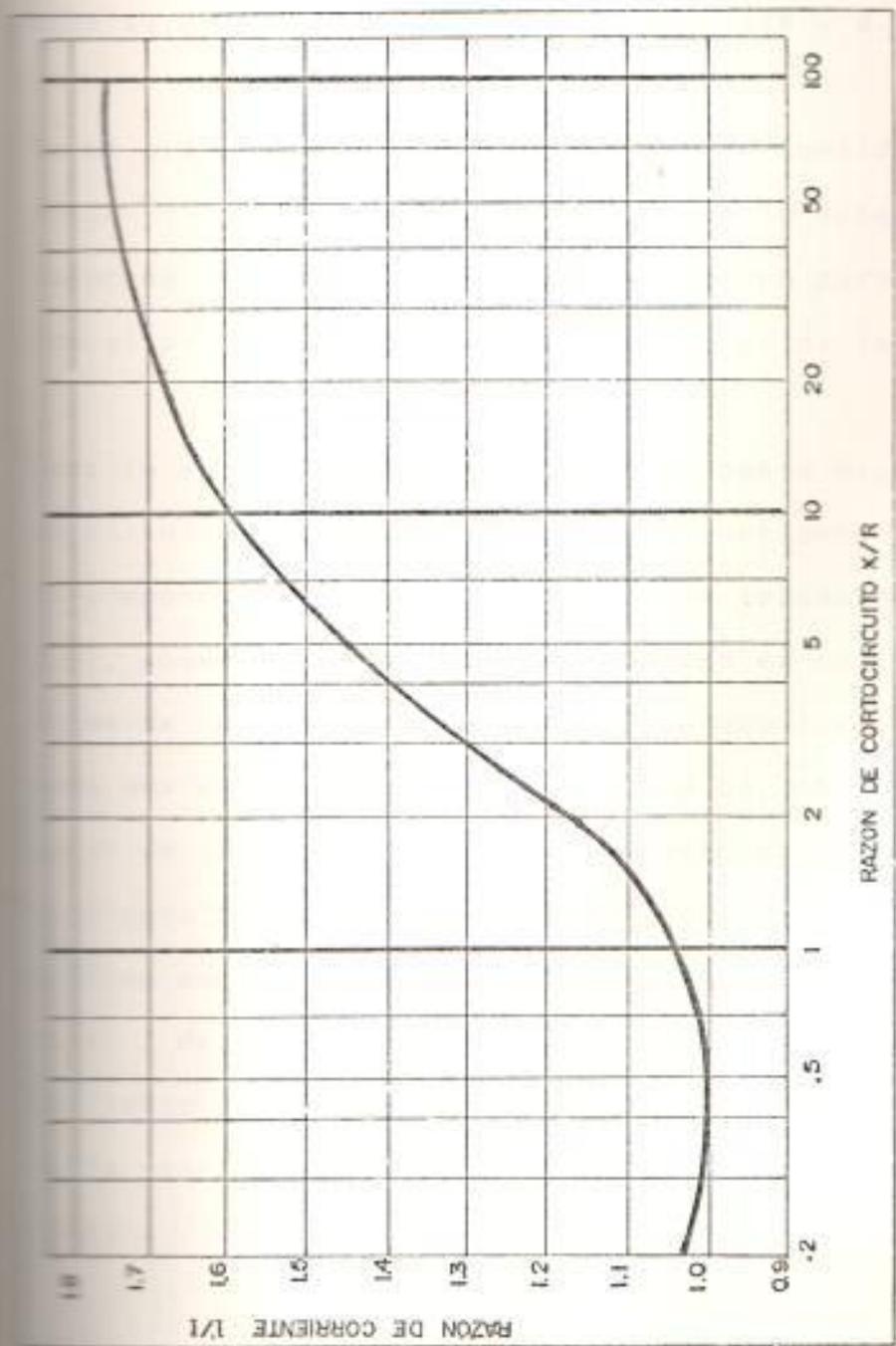


FIGURA N° 4.3. GRAFICO DE VALORES MAXIMOS DE (I'/I) Vs. (X/R)

(\*) para el valor RMS de la forma de onda simétrica, - el intervalo para encontrar el valor RMS de la forma de onda asimétrica varía con respecto a  $X/R$  y  $\theta$ .

En el gráfico de la figura N° 4.3., se considera un período  $T$ , que no es constante durante la búsqueda del valor de  $I'$ , pero siempre es el tiempo para que ocurra el primer cero de la onda simétrica de la corriente.

Para la aplicación de fusible en un punto específico de un circuito, si el valor RMS de la corriente de falla de la componente simétrica es conocido (ecuaciones 3.1 a 3.5), podemos conocer el valor de  $X/R$  el cual se lo obtiene de la impedancia equivalente que interviene en cada una de las ecuaciones (3.1 a 3.5); obtenido este valor de  $X/R$ , procedemos a ubicarlo en el gráfico de la figura N° 4.3., una vez localizado este valor en el gráfico podemos determinar el valor correspondiente de  $I'/I$ , de esta manera podremos conocer el valor de la corriente de falla asimétrica al multiplicar la magnitud de la corriente de falla simétrica por este valor de  $I'/I$ .

Este procedimiento descrito, es el que se aplica para encontrar el valor de la componente asimétrica de la

corriente de falla conociendo el valor de la componente simétrica de la corriente de falla en cada una de las barras especificadas en el sistema de distribución que está siendo analizado. En cada punto del circuito se analizarán los cuatro tipos de fallas consideradas y los mayores valores RMS simétrico y asimétrico pueden ser usados para seleccionar el tipo de fusible con su razón de interrupción adecuada.

Cabe recalcar que el gráfico de la figura N<sup>o</sup> 4.3., está basado en el análisis de un circuito serie R, L como el de la figura N<sup>o</sup> 4.2., por esta razón el procedimiento descrito para encontrar el valor RMS de la corriente asimétrica, no es rigurosamente correcto para encontrar el valor RMS de la corriente asimétrica cuando tenemos una falla de DOBLE LINEA - TIERRA o en cualquier sistema cuyo circuito equivalente de componentes simétricas involucren trayectorias paralelas.

#### 4.3. CORRIENTE DE FALLA TRIFÁSICA

Para encontrar la componente asimétrica de la corriente de falla trifásica, utilizamos el método anteriormente expuesto.

El valor RMS de la componente simétrica de la corriente trifásica de falla, lo encontramos aplicando la ecuación (3.1) del Capítulo III, el equivalente monofásico de la relación X/R, puede ser encontrado de la impedancia total que interviene en el cálculo de la corriente de falla. Para una falla trifásica con una impedancia de falla ( $Z_f \neq 0$ ) diferente de cero, la impedancia equivalente será:

$$Z_{eq3\phi} = Z_1 + Z_f \quad (4.4)$$

Si obtenemos el valor de las componentes (real e imaginario) de la impedancia equivalente de la ecuación (4.4), obtendríamos el valor de X/R deseado, con este valor podemos encontrar el correspondiente valor de  $I'/I$  en el gráfico de la figura N° 4.3., luego tendremos el valor RMS de la componente asimétrica de la corriente de falla trifásica al multiplicar este valor de  $I'/I$  encontrado por el valor RMS de la componente simétrica de la corriente de falla trifásica, son realizados por el programa de computación que incluye este trabajo.

## 4.2. CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - TIERRA

El valor RMS de la componente simétrica de la corriente de falla de línea - tierra, es dado por la ecuación (3.2), del capítulo III, utilizando el mismo procedimiento expuesto en el numeral (4.1) obtenemos que la impedancia equivalente será:

$$Z_{eqL-t} = \frac{1}{3} (Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f) \quad (4.5)$$

El equivalente monofásico de la relación X/R puede ser encontrado de la impedancia total del sistema usada en el cálculo de falla, luego encontramos el valor correspondiente de  $I'/I$  del gráfico de la figura N° 4.3., para luego calcular el valor RMS de la corriente de falla asimétrica de línea a tierra.

## 4.3. CORRIENTE DE FALLA DE LINEA - LINEA

El método anteriormente expuesto es aplicable para este caso; el valor de la impedancia equivalente será:

$$Z_{eqL-L} = \frac{1}{\sqrt{3}} (Z_1 + Z_2 + Z_f) \quad (4.6)$$

El valor RMS de la componente simétrica de la corriente de falla para este caso, viene dado por la ecuación (3.3) del Capítulo III.

#### 4.4. CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA

En este caso, el procedimiento que se aplica en (4.1), (4.2), y (4.3), no es rigurosamente valedero, ya que el equivalente monofásico de la componente simétrica involucra trayectorias paralelas.

La impedancia equivalente viene dado por:

$$Z_{eqLL-T} = \frac{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2) (Z_0 + 3Z_f)}{\sqrt{3} (Z_0 + 3Z_f - aZ_2)} \quad (4.7)$$

El valor RMS de la componente simétrica de la corriente de falla en este caso viene dado por la ecuación (3.4) del Capítulo III.

#### 4.5. CORRIENTE DE FALLA DE DOBLE LINEA - TIERRA EN LA OTRA FASE ASOCIADA CON LA FALLA

Lo indicado en (4.4) es valedero para este tópico, -

luego la impedancia equivalente viene dado por:

$$Z_{eqLL-T} = \frac{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2) (Z_0 + 3Z_f)}{\sqrt{3} (Z_0 + 3Z_f - a^2 Z_2)} \quad (4.8)$$

El valor RMS de la componente simétrica de la corriente de falla para este caso, viene dada por la ecuación (3.5) del Capítulo III.

## CAPITULO V

### PROGRAMA DE CALCULO DE LAS CORRIENTES DE FALLA

Todas las ecuaciones y condiciones expuestas en Ca  
pítulos anteriores se agrupan en un programa de computación  
que permite obtener las componentes simétrica y  
asimétrica de las corrientes de fallas posibles en los  
diferentes puntos de una red de distribución radial.

El programa de computación está compuesto por un progra  
ma principal y dos sub-programas.

En el programa principal se agrupan los cálculos requeredos  
para la obtención de: Impedancias propias, mutuas  
y de secuencia; corrientes de fallas simétricas y asimétr  
icas.

Uno de los sub-programas nos suministra toda la información  
referente a: clase de conductor, configuración de  
la red, circuitos tipos que la componen, voltaje de ope

ración de la red, impedancia de la fuente e impedancias de fallas.

El otro sub-programa sirve para buscar un valor aproximado de la relación de la componente asimétrica a la componente simétrica de la corriente de falla ( $I'/I$ ) conociendo el valor de la razón de cortocircuito ( $X/R$ ), utilizando un método de interpolación.

## 5.1. PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal se lo identifica con el nombre de "IMP"; en su ejecución primeramente se calculan los valores de  $h$ ,  $H$ ,  $S_r$  y  $S_i$ , de la forma señalada por la tabla N° 1.2, luego se manda a imprimir una gran tabla que tiene por nombre "Valores usados en diseño de la red radial", que agrupa a todos estos valores calculados y las características de los conductores de fase y neutro utilizados por sección entre barras en la red.

Luego se obtienen los resultados de las impedancias propias, mutuas y de secuencias de las líneas por sección y en lo posterior se calcula las impedancias de secuencia de la línea vista desde el punto de falla.

Una vez obtenidos estos valores, se procede a obtener la impedancia de secuencia total (fuente + línea) vista desde el punto de falla, luego con las ecuaciones dadas en el Capítulo III, se calcula las corrientes de falla simétrica y en lo posterior con las ecuaciones de las impedancias equivalentes dadas en el Capítulo IV, se encontrará un valor de la relación  $I'/I$ ; finalmente se calcula el valor de la componente asimétrica de la corriente de falla correspondiente.

El programa ejecuta realmente lo siguiente:

- a. Cálculo de las impedancias
- b. Cálculo de las corrientes de falla
- a. Cálculo de las impedancias:

Se inicia el proceso ingresando toda la información dada, con ella se procede a calcular los valores de los espacios horizontales (H) de los conductores aplicando las ecuaciones (1.1) a (1.3), que se indican en el Capítulo I, además se calculan los valores del espacio real que existe entre conductores ( $S_r$ ) y el espacio

que existe entre un conductor y la imagen del otro ( $S_i$ ), esto se realiza aplicando las ecuaciones (1.4) y (1.5), respectivamente indicadas en el Capítulo I. Una vez que se obtienen estos valores, se procede a aplicar la tabla 1.2 y obtener los valores promedios correspondientes de  $h$ ,  $H$ ,  $S_r$ , y  $S_i$ . Todos estos valores aparecerán en una tabla que tiene por título "TABLA DE VALORES USADOS EN EL DISEÑO DE LA RED".

Establecido estos valores promedios se procede a calcular el valor de la reactancia interna del conductor que conforman la red, utilizando la ecuación (2.2) del Capítulo II, luego se calcula el ángulo definido en el Capítulo I, por la ecuación (1.6). Estos cálculos se realizan para cada uno de las clases de conductores utilizados y para cada una de las secciones de líneas que conforman la gran red de distribución; posteriormente se procede a calcular los valores de resistencia y reactancia de las impedancias propias y mutuas de los conductores usando para ello las ecuaciones (2.3, 2.4, 2.7, 2.8, inclusive), y lue

go aplicar las ecuaciones (2.1) y (2.6), todas estas definidas en el Capítulo II. Con ello se procede primero a calcular las impedancias de secuencia de la línea por sección, esta se realiza primero en secciones de mil pies y luego por el tramo real que existe, utilizando el criterio de la tabla 2.1 y las ecuaciones (2.10, 2.11, y 2.12, inclusive).

Obtenido los valores de las impedancias de secuencia de la línea se realiza un sumatorio de estas impedancias desde el punto de falla hasta la primera barra, con ello obtenemos la impedancia total de la línea vista desde el punto de falla, esto se realiza para cada una de las barras definidas en la red. En lo posterior se realiza la suma de cada una de estas impedancias de secuencia de la línea vista desde el punto de falla con la impedancia de secuencia correspondiente de la fuente, este cálculo se efectúa para máxima y mínima generación.

Los valores que se obtienen de las impedancias de secuencia por sección de 1000 pie, la imper-

dancia total por sección y la impedancia de secuencia de la línea vista desde la barra fallada aparecen agrupadas en tablas, cuyos títulos son "IMPEDANCIAS PROPIAS - MUTUAS - SECUENCIA EN OHM - VANO DE MIL PIE", "IMPEDANCIA DE SECUENCIAS COMPRENDIDAS ENTRE BARRAS EN OHM" e "IMPEDANCIA DE SECUENCIA DE LA LINEA VISTA - DESDE LA BARRA DE FALLA", respectivamente. A continuación se muestra en la figura - N° 5.1., un diagrama de flujo en el que se resume lo expuesto.

Cada uno de los bloques que se muestran en la figura N°5.1., está integrado por una serie de lazos de cálculos que dependen del número de líneas (NT) que conforman la red de distribución; un detalle más explícito de este diagrama de flujo se expone en los anexos.

b. Cálculo de las corrientes de falla:

Obtenidos los valores de las impedancias secuencia vista desde la barra fallada hasta la fuente, se procede a calcular los valores de la

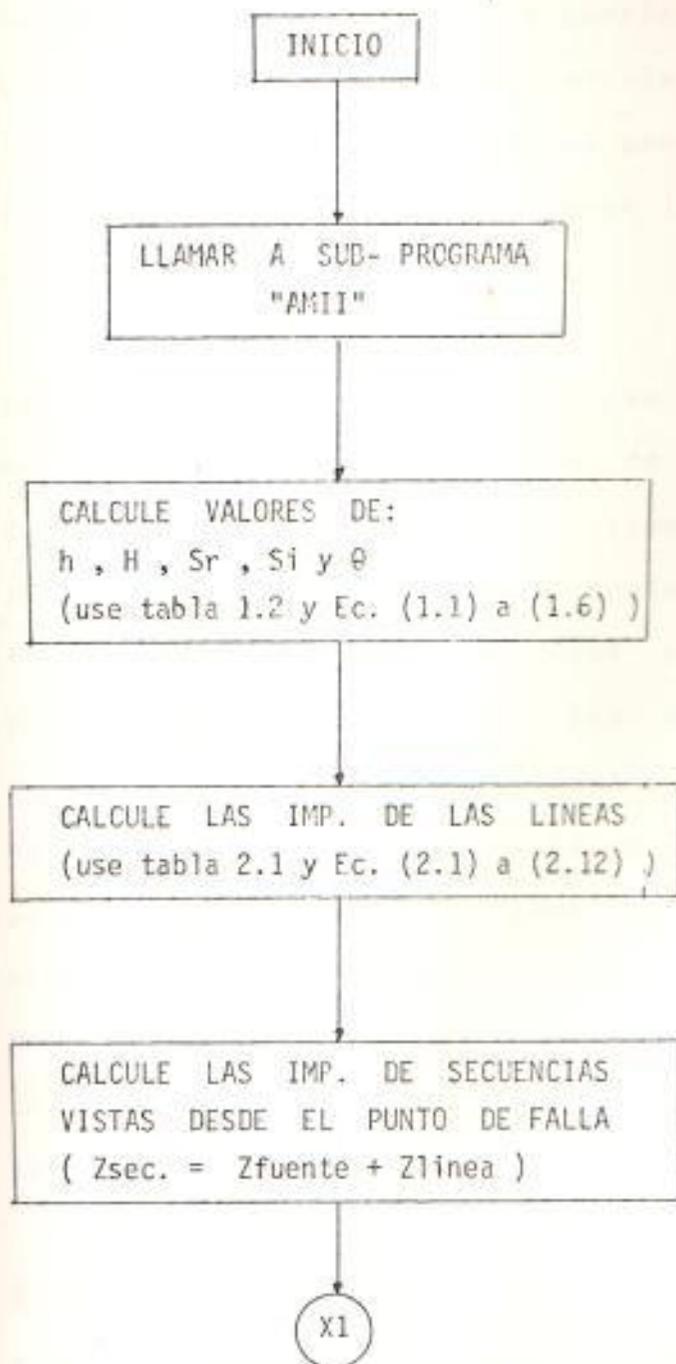


FIGURA N° 5.1. DIAGRAMA DE FLUJO

CALCULO DE LAS IMPEDANCIAS

componente simétrica de la corriente de falla para cada barra que conforma el sistema y se lo realiza para máxima y mínima generación, para ello se utiliza las ecuaciones (3.1) a (3.5) del Capítulo III.

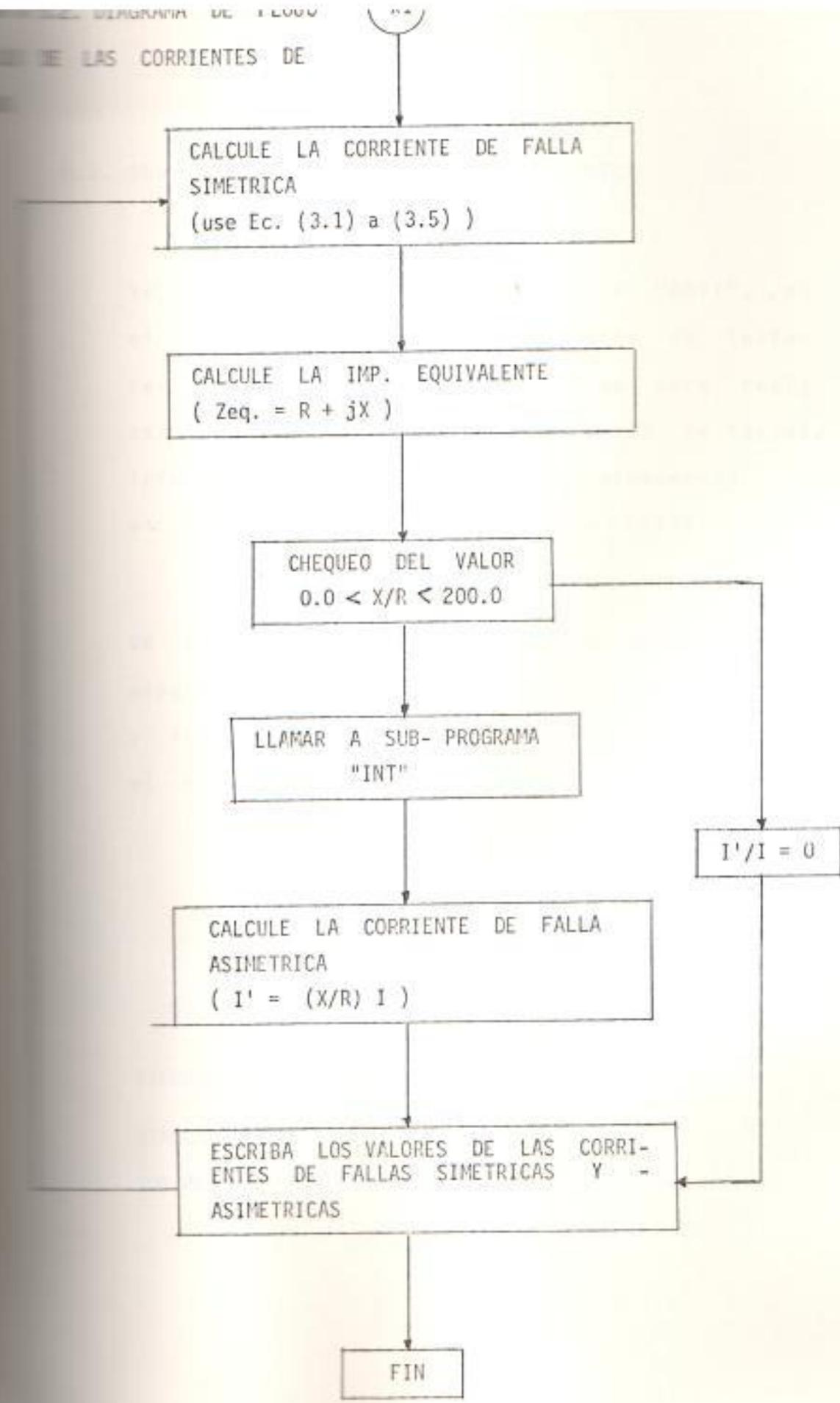
En este proceso de cálculo se incluye un nuevo chequeo sobre el tipo de circuito, de tal forma que, para cada tipo de circuito se calcule todas las corrientes de fallas simétricas posibles, así por ejemplo, para un tipo de circuito que sea monofásico, sólo se calcule una falla de línea a tierra, la misma que puede ser de tres clases, dependiendo por supuesto del tipo de circuito. Este criterio de cálculo lo obtenemos observando la tabla N° 2.1, en la cual se da la clase de impedancia de secuencia que debe tomarse en cuenta para cada tipo de circuito.

Obtenido el valor de la corriente de falla simétrica se procede a obtener el valor de la corriente de falla asimétrica y para ello utilizamos el valor de la impedancia total del sistema el cual es obtenido aplicando las ecua

ciones (4.4) a (4.8) y que se denominan impedancias equivalentes, dadas en el capítulo IV. Estas ecuaciones son complejas y por lo tanto podemos obtener por separado el valor real (R) y el valor imaginario (X), luego se divide X para R obteniéndose un valor que es ingresado a un Subprograma, no sin antes hacer se un chequeo referente al valor de X/R para determinar si este valor está dentro del rango de valores almacenados en este sub-programa.

Con el valor de X/R se obtiene de respuesta un valor de  $I'/I$  que es la relación de la corriente de falla asimétrica a la corriente de falla simétrica expuesta en el Capítulo IV, luego se procede a calcular el valor de la magnitud de la corriente de falla asimétrica, multiplicando esta relación por la magnitud de la corriente de falla simétrica.

La impresión de estos valores se agrupan en una tabla bajo el título de "RESULTADOS DE  $I - (X/R) - (I'X/I) - Z_{equi}(R,X) - SIMETRICAS Y ASIMETRICAS$ ". En la figura N<sup>o</sup> 5.2., se expone un Diagrama de Flujo compacto que ilustra lo explicado.



CALCULE LA CORRIENTE DE FALLA SIMETRICA  
(use Ec. (3.1) a (3.5) )

CALCULE LA IMP. EQUIVALENTE  
( Zeq. = R + jX )

CHEQUEO DEL VALOR  
 $0.0 < X/R < 200.0$

LLAMAR A SUB-PROGRAMA  
"INT"

CALCULE LA CORRIENTE DE FALLA ASINETRICA  
(  $I' = (X/R) I$  )

ESCRIBA LOS VALORES DE LAS CORRIENTES DE FALLAS SIMETRICAS Y ASINETRICAS

$I'/I = 0$

FIN

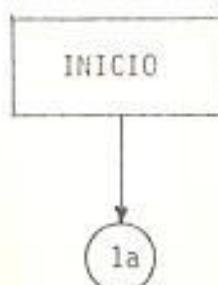
## 5.2. SUB-PROGRAMA DE LECTURA DE DATOS

Se lo identifica con el nombre "AMII", en el se agrupa todos los formatos de lecturas de la información requerida para realizar el estudio de las corrientes de fallas, información que se encuentra almacenada en el disco 1 bajo el nombre de "DATO LEA".

Un diagrama de flujo compacto de este Sub-programa se muestra en la figura N° 5.3.; y los detalles de este diagrama se dan en el Anexo adjunto a este trabajo.

FIGURA N° 5.3.

DIAGRAMA DE FLUJO  
SUB-PROGRAMA "AMII"



1a

LEA Y ESCRIBA VALORES :  
FRECUENCIA DEL SISTEMA ( HZ )  
VOLTAJE BASE ( KV )  
POTENCIA BASE ( KVA )  
CALCULE: FREC. ANG. EC. (2.5 )

LEA Y ESCRIBA CARACTERISTICAS DE LOS  
CONDUCTORES  
( Use tablas de los conductores de  
bibliografia 2,4,6 )

LEA Y ESCRIBA CARACTERISTICAS DE  
CONSTRUCCION DE LA RED  
( Ver capitulo I , II inclusive )

LEA Y ESCRIBA: LAS IMPEDANCIAS DE LA  
FUENTE Y DE FALLAS PARA MAXIMA Y  
MINIMA GENERACION - VOLTAJE DE OPERACION  
DEL SISTEMA

FIN

Como se puede observar en la figura N<sup>o</sup> 5.3., se de  
finen cuatro bloques de lectura.

En el primer bloque se agrupan los valores de la frecuencia del sistema, la cual debe ser especificada en (Hz) y los valores bases tales como voltaje base en (Kv), potencia base en (Kva) valores - que son incluidos en este trabajo pensando en que en un futuro puedan ser utilizados para cálculos de la red en por unidad.

Luego se procede a determinar el número de conductores que intervienen en la red y el número de líneas que la conforman los cuales son números enteros, estos valores son aquellos que nos indican el número de lazos de lecturas que existirán en el programa para las características de los conductores ( $N_c$ ) y las características de construcción ( $N_l$ ).

En el segundo bloque se procede a leer las caracteterísticas de los conductores que intervienen en la red, en esta parte ingresarán al programa los datos de:

- Resistencia del conductor  $R_1$  en ohm/milla ' .
- Diámetro exterior del conductor (D) en pulgadas y
- Radio medio geométrico del conductor ( $G_{mr}$ ) en pie .

En esta parte se especifica un número clave para cada conductor para facilitar la búsqueda de las características del mismo, en caso de que sea empleado en otra sección de la red analizada.

Estos datos aparecen agrupados en una tabla designada con el nombre de "Características de los conductores del Sistema".

Luego se procede a leer los datos de configuración de la red, estos corresponden a los datos de altura y espacio entre conductores. Estos valores son usados en el programa principal para calcular los valores promedios de  $h$ ,  $H$ ,  $S_r$ ,  $S_i$ , de la forma en que se detalla en la tabla 1.2 , además aquí se define el tipo de circuito, la longitud del tramo comprendido entre barras, el cual es dado en pie, el número específico de la barra inicial y final entre los cuales se encuentra comprendida dicha sección de línea, y

la resistividad del suelo ( $\rho$ ) en  $\text{ohm/mt}^3$ . Todos estos datos aparecen agrupados en la tabla de título "CARACTERISTICAS DE CONSTRUCCION DE LA RED!"

En el cuarto bloque se ingresa los datos correspondientes a las características de la fuente, los valores de impedancias de falla del sistema y el voltaje de operación. En cuanto a las características de la fuente, se debe especificar las impedancias de secuencia en forma rectangular, tanto para la secuencia positiva, negativa y las tres clases de impedancias de secuencia cero; esto debe realizarse para máxima y mínima generación, respectivamente. Estos valores son dados en ohm y se agrupan en la tabla "CARACTERISTICAS DE LA FUENTE".

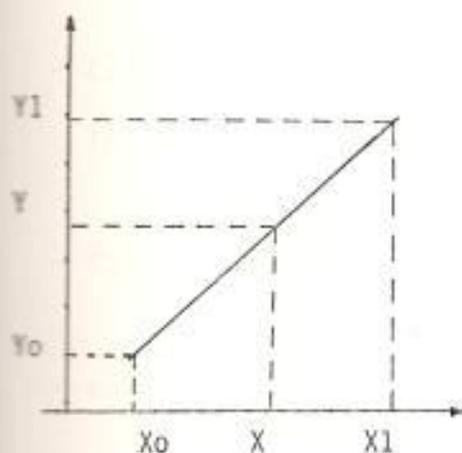
Las cuatro impedancias de fallas que comprende este estudio, son ingresadas en ohm en forma rectangular y especificadas para máxima y mínima generación, estos valores aparecerán en la tabla "IMPEDANCIAS DE FALLAS". El nivel de voltaje de operación del sistema se lo da en voltios e ingresa al programa en forma rectangular.

Todos los valores de impedancia de la fuente , impedancias de talias se los ingresa a la cinta - de datos en forma rectangular. Detalle de la forma en que se ingresan estos datos para ser leídos son dados en el manual del usuario. (ver Anexo).

### 5.3. SUB-PROGRAMA DE INTERPOLACION "INT"

Este sub-programa incluye un cálculo matemático - sencillo que consiste en encontrar todos los puntos intermedios de una recta cualquiera definida entre dos puntos y conociendo del punto buscado - solo el valor que tiene en uno de los ejes coordenados. Este método, se denomina de interpolación y para su aplicación se dividió la curva expuesta en la figura N° 4.2., del capítulo IV en porciones pequeñas, de tal forma que, se asemejen a una recta. Todos estos puntos que definen las porciones de rectas fueron almacenados en un disco de tal forma que una vez definido el valor del punto en uno de los ejes coordenados , se inicia la búsqueda del valor correspondiente a este punto en el otro eje coordenado, no antes de chequear si el valor insertado para la búsqueda está dentro del rango de valores preestablecido.

El programa de entrada de datos para este propósito se denomina "LEA CURVA" una ilustración de este método se muestra en la figura N° 5.4., y la ecuación (5.1), es utilizada para el método de interpolación.



$$Y = Y_0 + \frac{(X - X_0)(Y_1 - Y_0)}{(X_1 - X_0)} \quad (5.1)$$

FIGURA N° 5.4. METODO DE INTERPOLACION

#### 5.4. SALIDA DE DATOS

En general el programa realizado tiene dos salidas de datos, las cuales están definidas como SALIDA 1 Y SALIDA 2, respectivamente.

En la salida 1, aparecen todos los datos que son leídos en el subprograma "AMI" tales como:

- Valores base del sistema
- Datos generales de la frecuencia del sistema en (Hz), la frecuencia angular en (rad/seg).
- Valores del fasor "a"
- Características de los conductores que conforman la red.
- Características de construcción de la red.
- Características de la fuente (Ohm)
- Impedancias de fallas (ohm)
- Voltaje de operación del sistema (Volt)

En cuanto a la salida 2 contiene los resultados calculados en el programa principal "IMP" tales como:

- valores usados en el diseño de la red.
- impedancias propias, mutua y de secuencia por sección, la cual primero se da en ohm/1000

pie y luego multiplicada por la longitud que tiene en cada sección, en ohm.

- Impedancias de secuencia de la línea vista desde el punto de falla a la primera barra, en ohm.
- Valores de las corrientes de fallas posibles simétricas y asimétricas.

Los últimos resultados nos servirán para analizar el comportamiento de la red en cada una de sus barras pre-establecidas y poder realizar una selección y coordinación de equipos de protección adecuados para conseguir que la red opere con seguridad, confiabilidad y continuidad de servicio de fluido eléctrico.

### 5.5. EJEMPLO DE APLICACION

#### a. Características de la red:

Para propósito de ilustrar la bondad y manejo del programa de computación, se ha tomado un ejemplo del Folleto Informativo de la AIEE (Ver Bibliografía 1), en el cual se analiza un sistema de distribución radial aéreo que

tiene de fuente una sub-estación de la cual parten cinco alimentadoras principales y se selecciona una de ellas para realizar el estudio.

Esta red está conformada por una alimentadora trifásica y derivaciones o ramales trifásicos, bifásicos y monofásicos, siendo el sistema de conexión estrella multiterrizado, es decir, estaremos analizando circuitos tipo 1; circuito tipo 5 y circuitos tipo 9.

Los conductores empleados son desnudos de cobre de 97.8 % de conductividad (Bibliografía 6, página 49), cuyos calibres van desde el N° 6 hasta el N° 4/0.

Los tipos de estructuras utilizadas para el montaje de la línea se muestran en las figuras N° 5.5 a 5.7.

La red considerada tiene las siguientes longitudes por circuito:

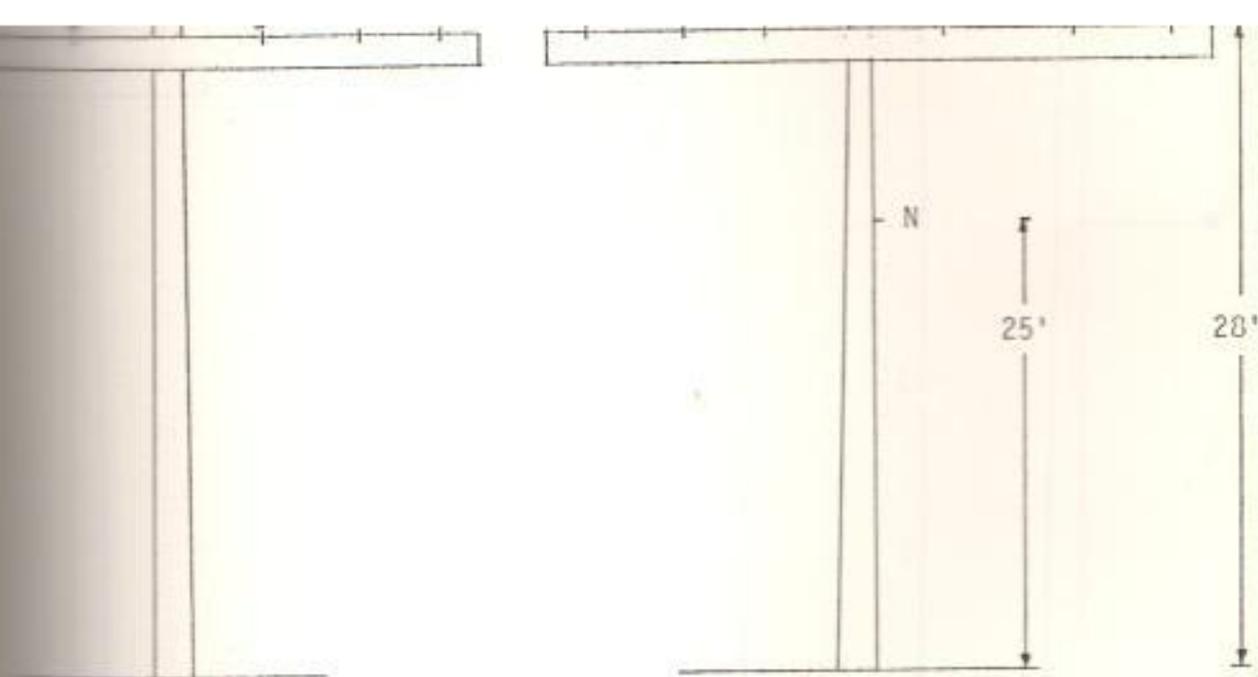


FIGURA Nº 5.5. ESTRUCTURA DE MONTAJE-CIRCUITO

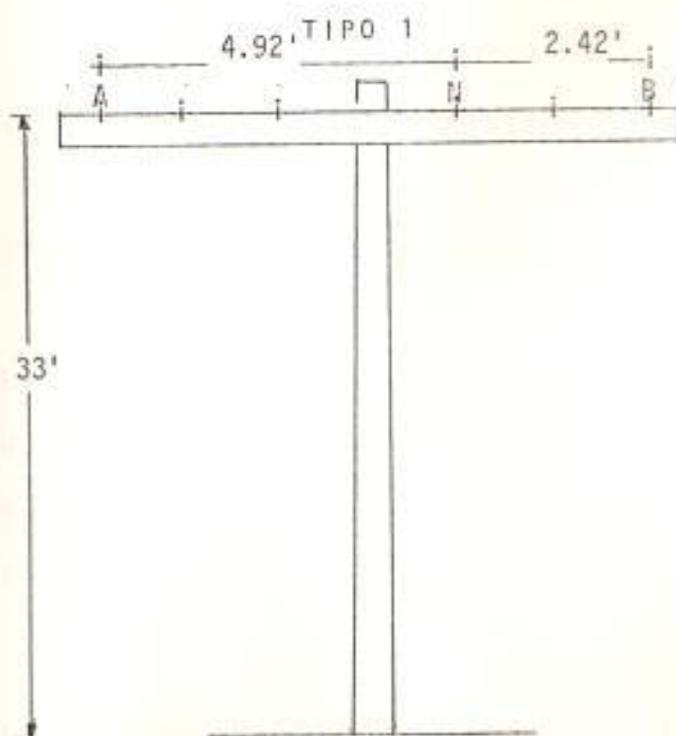


FIGURA Nº 5.6. ESTRUCTURA DE MONTAJE-CIRCUITO  
TIPO 5

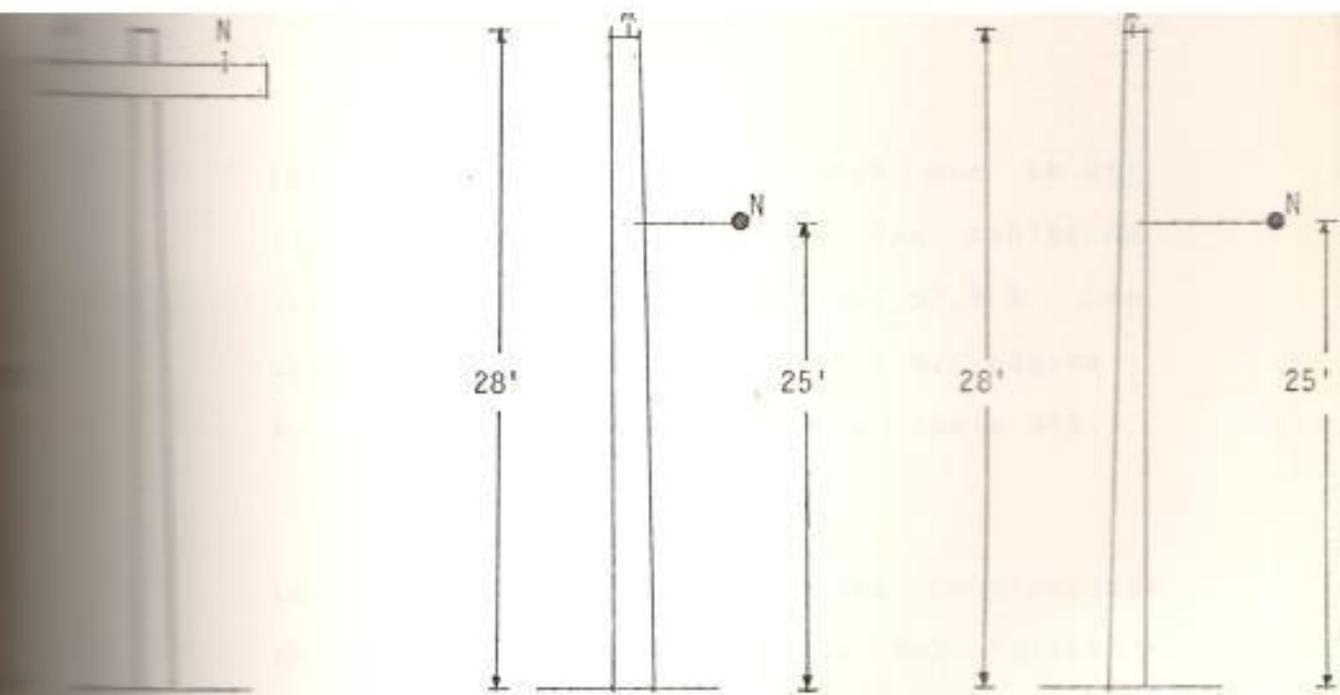


FIGURA N° 5.7. ESTRUCTURA DE MONTAJE-CIRCUITO  
TIPO 9

1100 pie de circuito trifásico tipo 1

709 pie de circuito bifásico tipo 5

1705 pie de circuito monofásico tipo 9

El nivel de voltaje de operación de la red es de 4160/2400 (V) a una frecuencia de 60 Hz y en su recorrido se considera una resistividad de tierra uniforme de 100 ohm/mt<sup>3</sup>.

La configuración de la red se muestra en la figura N° 5.8.

Los datos de los conductores que se utilizan, fueron obtenidos de las tablas de los conductores, hilo sólido, 97.8 % de conductividad (ver Bibliografía b, página - 49) y se los muestra en la tabla N°5.1.

La longitud de las secciones comprendidas entre barras fueron tomadas del folleto informativo de la AIEE (Ver Bibliografía I, página 128y). Además de esta misma referencia se obtuvieron los datos de las impedancias de fallas del sistema y las características de la fuente. Ambos expuestos en la página 1272 y resumidas en las tablas N° 5.2, 5.3 y 5.4.

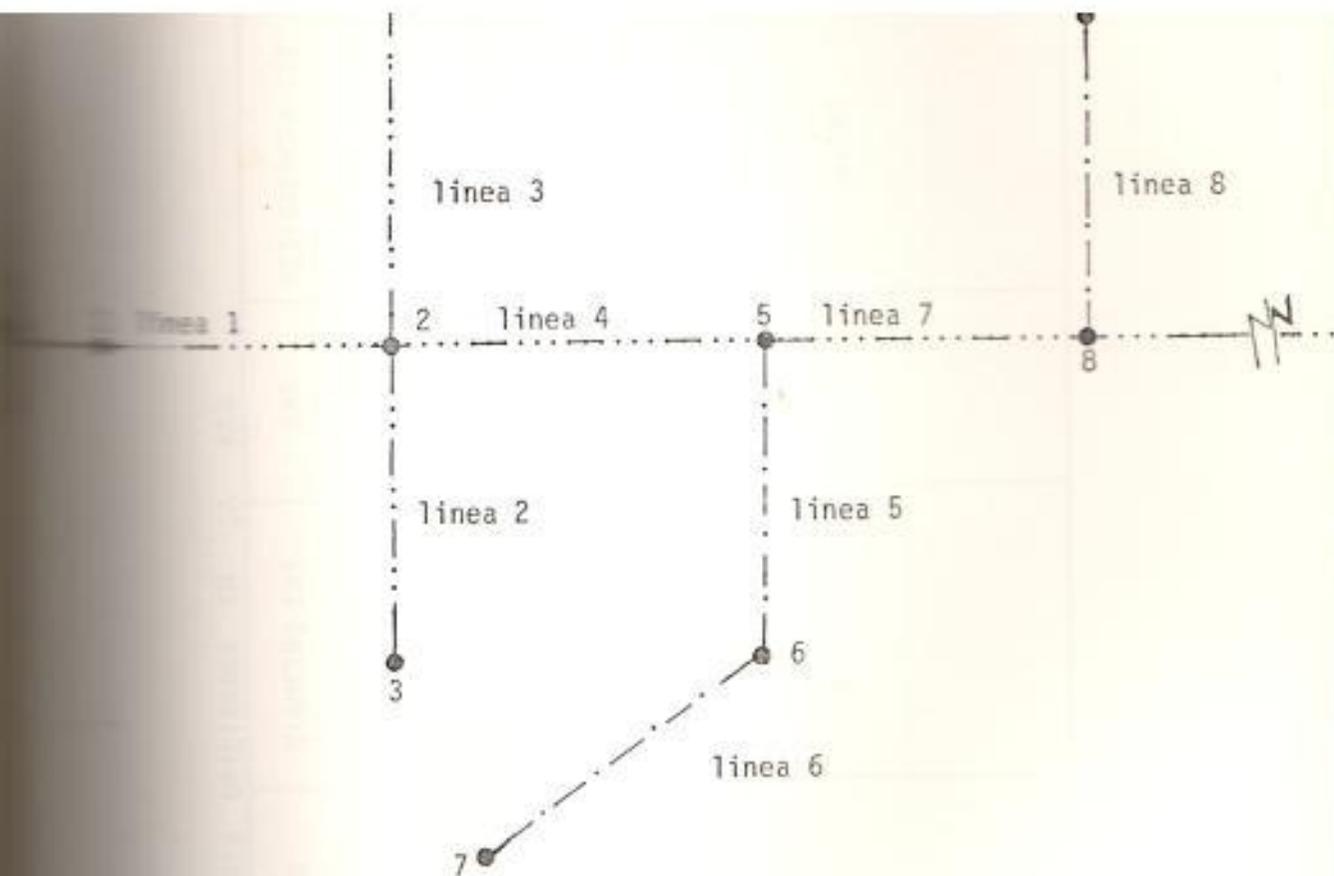


FIGURA N° 5.8. DIAGRAMA UNIFILAR DE LA RED  
EJEMPLO

b. Datos de entrada:

La preparación de los datos de entrada, debe realizarse en forma coordinada y ordenada, tal como se indica en el "Manual del Usuario" en el Anexo. La mejor forma de hacerlo es confeccionando una tabla de datos, como se muestra en la tabla 5.5.

TABLA 8.1.1

CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES UTILIZADOS EN LA RED

NUMERO CLAVE	CLASE DE CONDUCTOR	TAMARO DEL CONDUCTOR	NUMERO DE HILO	DIAMETRO EXT. (PULGADAS)	GMR (PIE)	RESISTENCIA (25° 60 Hz OHM/ MILLA
1	CUMHD	4/0	7	0.522	0.01579	0.278
2	CUMHD	2/0	7	0.414	0.01252	0.440
3	CUHD	4	1	0.204	0.00663	1.374
4	CUHD	6	1	0.162	0.00526	2.180

TABLA Nº 5.2.

IMPEDANCIAS DE FALLAS EN OHM

DESCRIPCION	MAXIMA GENERACION		MINIMA GENERACION	
	R	X	R	X
Zf3Ø	0.0	0.0	0.33	0.0
ZfL-L	0.0	0.0	1.0	0.0
ZfL-T	0.0	0.0	0.5	0.0
ZfLL-T	0.0	0.0	0.5	0.0

TABLA 5.3

IMPEDANCIAS DE LA FUENTE EN OHM	MAXIMA GENERACION		MINIMA GENERACION	
	R	X	R	X
Z1	0.03437	0.18162	0.03437	0.18162
Z2	0.03437	0.18162	0.03437	0.18162
Z001	-	-	-	-
Z002	-	-	-	-
Z003	0.04778	0.18078	0.04778	0.18078

TABLA 5.4

LONGITUD DE LA SECCION ENTRE BARRAS EN OHM

LONGITUD INICIAL	BARRA		SECCION NUMERO	LONGITUD PIE	TIPO DE CIRCUITO
	INICIAL	FINAL			
1	2	3	1	386	1
2	3	4	2	397	1
2	4	5	3	709	5
2	5	6	4	188	1
5	6	7	5	403	9
6	7	8	6	739	9
5	8	9	7	129	1
8	9		8	563	9

TABLA 9.6

DATOS DE ENTRADA A " DATO LEA "

DESCRIPCION	LINEA	1	10	20	30	40	50	60	70
CARACTERISTICAS DE FREC.- KV - KVA - NC/L	1	60.0							
	2	13.8	1000.0						
	3	4	8						
CARACTERISTICAS DE LOS CONDUCTORES	4	1	7	4/0	CUMHD	0.278	0.0158	0.522	
	5	2	7	2/0	CUMHD	0.440	0.0125	0.414	
	6	3	1	4	CUHD	1.374	0.0066	0.204	
	7	4	1	6	CUHD	2.180	0.0053	0.162	
CARACTERISTICAS DE CONSTRUCCION	8	1	1	2	1	33.0	3.71	4.92	33.0
	9	2	33.0	1.21	1	33.0	1 386.00		100.0
	10	2	2	3	3	28.0	2.42	4.92	28.0
	11	4	25.0	4.17	1	28.0	1 397.00		100.0
	12	3	2	4	4	33.0	7.34	0.00	33.0
	13	4	33.0	4.92	1	0.0	5 709.00		100.0
	14	4	2	5	1	33.0	3.71	4.92	33.0
	15	2	33.0	1.21	3	33.0	1 188.00		100.0
	16	5	5	6	3	28.0	0.00	0.00	0.0
	17	3	25.0	1.96	4	0.0	9 403.00		100.0
	18	6	6	7	4	28.0	0.00	0.00	0.0
	19	3	25.0	2.96	1	0.0	9 739.00		100.0
LA RED	20	7	5	8	1	33.0	3.71	4.92	33.0
	21	2	33.0	1.21	4	33.0	1 129.00		100.0
	22	8	8	9	4	33.0	0.00	0.00	0.0
	23	4	33.0	3.71	1	0.0	9 563.00		100.0

Viene de la tabla 5.5

DESCRIPCION	LINEA	1	10	20	30	40	50	60	70
CARACTERISTICAS DE LA FUENTE	24	0.03437	0.18162	0.03437	0.18162				
	25	0.03437	0.18162	0.03437	0.18162				
	26	0.0	0.0	0.0	0.0				
	27	0.0	0.0	0.0	0.0				
	28	0.04778	0.18078	0.04778	0.18078				
CARACTERISTICAS DE IMPEDANCIAS DE FALLA	29	0.00	0.00	0.50	0.00				
	30	0.00	0.00	1.00	0.00				
	31	0.00	0.00	0.33	0.00				
	32	0.00	0.00	0.50	0.00				
VOLTAJE DE OPERACION	33	2400.0	0.00						

c. Análisis de los resultados:

De los resultados obtenidos de los cálculos de las corrientes de fallas, seleccionamos para cada nodo el valor máximo y mínimo para la corriente de falla simétrica y el valor máximo de la corriente de falla asimétrica. Estos valores se los expone en cuadros para cada nodo de la red de distribución analizada y se muestra en la figura N° 5.9.

Estos valores son sacados de la tabla "RESULTADOS DE I-(X/R) - (I\*/1) - Zequiv. (R,X) - SIMET Y ASIMENT" de la salida 2 del programa de computación. De la inspección de estos valores vemos que la mayor magnitud de corriente de falla se obtiene que la corriente asimétrica, cuando en la primera barra se produce una falla trifásica, operando el sistema con máxima generación, este valor es de 18798,77 amperios. El valor de corriente de falla asimétrica, nos dá la pauta para seleccionar la capacidad de interrupción de los equipos de protección, medición y servicio que se deben utilizar en esta red.

Los mayores valores de corrientes de fallas si-

métricas también se producen en la primera barra y especialmente cuando en esta ocurre una falla de doble línea - tierra en máxima generación.

En la tabla expuesta en la salida 2, hay valores de corrientes de fallas asimétricas iguales a ce ro ( $I_f = 0$ ), esto se produce cuando el valor de  $X/R$  obtenido del equivalente monofásico del circuito, no está dentro del rango prefijado para la búsqueda de este valor y además en algunos ca sos donde se produce una falla de doble lí nea - tierra, esto último fue explicado en el Ca pítulo IV.

Para cada barra se dan los valores de las co rrientes de fallas que pueden ocurrir, así para - una barra en la cual existe un circuito monofásico, sólo se podrá producir una falla de línea - tierra.

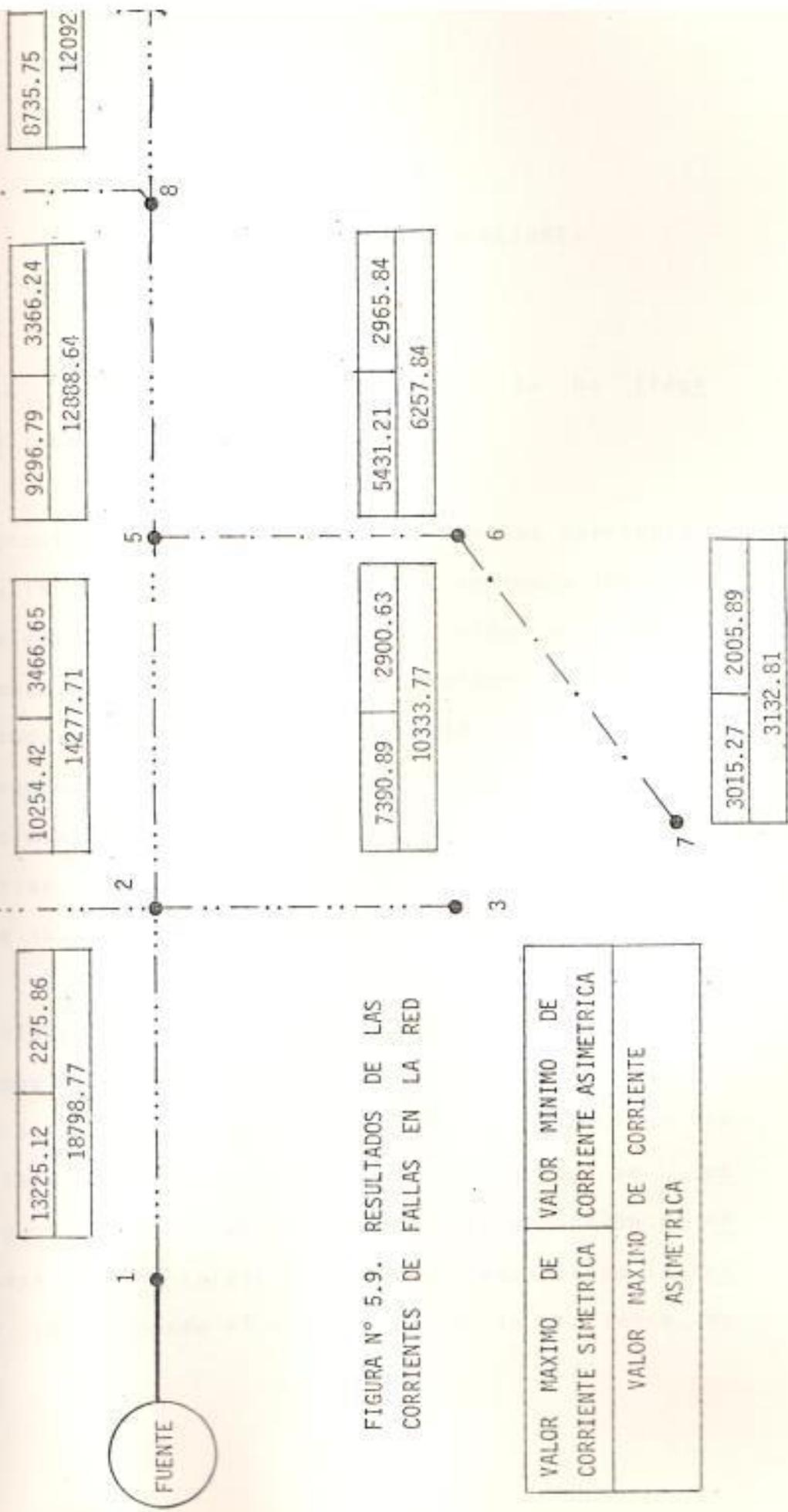


FIGURA N° 5.9. RESULTADOS DE LAS CORRIENTES DE FALLAS EN LA RED

VALOR MAXIMO DE CORRIENTE SIMETRICA	VALOR MINIMO DE CORRIENTE ASIMETRICA
13225.12	2275.86
18798.77	
7390.89	2900.63
10333.77	
10254.42	3466.65
14277.71	
5431.21	2965.84
6257.84	
3015.27	2005.89
3132.81	
9296.79	3366.24
12888.64	
6735.75	12092

## CUNCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la realización de este trabajo se ha llega  
do a las siguientes conclusiones:

El conocimiento de los valores RMS de las corrientes de fallas simétricas y asimétricas en todos los nodos definidos en un sistema de distribución radial aéreo, nos permite en primera instancia seleccionar en forma acertada la capacidad de interrupción que deben tener los equipos de protección, medición y servicio que conforman la red, y además nos dá las herramientas ne  
cesarias para poder realizar una coordinación efectiva de las protecciones de sobrecorrientes del sistema.

La selección de la capacidad de interrupción de los equi  
pos a instalarse en los diferentes puntos de la red, se la efectúa considerando el mayor valor de la corriente de falla asimétrica que se obtenga en es  
tos puntos, aunque en la práctica la selección de es  
ta capacidad de interrupción de los equipos se la rea  
liza considerando el mayor valor de la corriente de

falla asimétrica que resulta de la comparación de en  
tre todos estos valores.

Conociendo los valores de las corrientes de fallas si  
métricas, nos permite fijar los tiempos de operación  
e intervalos de coordinación de las protecciones de  
sobrecorriente y si conocemos las corrientes de carga  
normal del sistema, se puede efectuar un estudio de  
coordinación de fusibles.

La utilidad del trabajo realizado se lo demuestra con  
lo anteriormente dicho y vale la pena mencionar aquí  
que estos estudios se pueden efectuar para sistemas -  
de distribución radiales existentes y por construirse,  
además se pueden analizar sistemas de distribución -  
que tengan otras características que no sea sólo sis  
temas multiaterrizado.

#### RECOMENDACIONES

Este trabajo puede ser recomendado a las personas res  
ponsables de efectuar estudios, planificaciones y -  
construcción de sistemas de distribución, ya que le  
permite:

- Conformar la red con diferentes clases de conducto-

res, estructuras de montajes y configuraciones.

- Obtener resultados de todas las corrientes de fallas simétricas y asimétricas en todos los puntos seleccionados de la red, pudiendo con ellos realizar una coordinación efectiva de las protecciones de sobrecorriente que se utilicen y además poder elegir en forma correcta la capacidad de interrupción de los equipos, considerando la mayor parte económica.
- Efectuar estudios en nuevos sistemas de distribución, experimentando con nuevas estructuras de montaje, clases de conductores, voltajes de operación, impedancias de fallas y fuentes.

Se recomienda incluir en el programa realizado los datos de voltajes reales que se obtienen en los puntos seleccionados de la red, esto para los sistemas de distribución radiales existentes, de esta manera obtener valores reales de las corrientes de fallas - simétricas y asimétricas posibles. Además se recomienda incluir en el programa la información dada en el Anexo acerca de la solución de la relación  $(I'/I)$ , con el propósito de mejorar la precisión del cálculo del valor de las corrientes de fallas asimétricas.

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

1. AIEE TRANSACTIONS, folleto informativo (Power Apparatus and Systems) volumen N°79 , parte III de 1960 ,pp.1264-1277.
2. Clarke Edith , "Análisis de Circuitos de Sistemas de Potencia de Corriente Alterna " , ( New York,General Electric Company , volumen I , 1943 ) .
3. Escuela Superior Politecnica del Litoral , " Seminario de Protecciones de Sistemas de Distribución " , ( Departamento de Ingeniería Eléctrica , 1981 ) , pp. 1-21 .
4. Mc. Graw - Edison Company , " Manual de Protecciones de Sistemas de Distribución , revista de la División de sistemas de Potencia, pp. 1-112 .
5. Wagner C. F. y Evans R. D. , " Componentes Simétricas " (New York, Mc. Graw-Hill Book Company , 1933 ) , pp 1-73 .
6. Westinghouse Electric Company , " Transmision y Distribución Eléctrica " ,(Pennsylvania , Westinghouse Electric Corporation , 1950 ) , pp. 1-95 .

7. Westinghouse Electric Company , " Sistemas de Distribución " volumen 3 ( Pennsylvania , Westinghouse Electric Corporation, 1959 ) , pp 1-18, pp. 109-148, pp.365-426 .
  
8. Zoppeti G. , " Redes Electricas " , ( Barcelona-España ,1948) pp. 1-62 .