

01126  
10



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTO PARA EL  
CALCULO DE CORTO CIRCUITO Y DISEÑO DE REDES  
DE TIERRAS

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
(AREA ELECTRICO - ELECTRONICA)

P R E S E N T A N :

CANSECO	PEREZ	ARIOSTO
GOMEZ	ADAME	EDSSON
GONZALEZ	RODRIGUEZ	EDUARDO
ROSAS	AGUILAR	OSCAR

DIRECTOR DE TESIS: ING. ARTURO MORALES COLLANTES

CIUDAD DE MEXICO,

2003



A



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# **PAGINACIÓN DISCONTINUA**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo con mucho cariño a la memoria de mis padres: **Rosa Pérez Hernández** y **Maurilio Canseco Ramírez**, que me apoyaron sinceramente, moralmente y en ocasiones económicamente en mi esfuerzo universitario, que aunque lejos de mí, siempre estuvieron a mi lado, lo cual fue para mí un motivo de compromiso y satisfacción que me impulso día a día en el camino de mi carrera y no me dejo decaer antes de llegar a la meta. Es por eso que quiero agradecerles dejando como constancia este trabajo, el cual se los dedico con todo mi corazón.

Le doy gracias a **Dios** por la fortaleza que puso en mí, que a pesar de mis dificultades económicas me probello siempre de la energía física y mental que me acosaron continuamente. Que en la tragedia sucedida en el trayecto de mis estudios, él se puso siempre al frente de mis problemas, los hizo suyos, no me dejo decaer en los momentos más difíciles de mi vida y a cambio me devolvió la fuerza que sólo él me pudo dar.

A mis hermanos **Roel**, **Dolifeth**, **Omar**, y **Orlando Canseco Pérez** que me apoyaron en los momentos más difíciles y que nunca dudaron en que yo alcanzaría este objetivo.

A mis abuelos, **Enrique Pérez Santos** y **Susana Hernández Cruz** que creyeron siempre en mí.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Ariosto Canseco

Pérez

FECHA: 12-Feb-93

FIRMA: 

ARIOSTO CANSECO PEREZ

3

## DEDICATORIA

A mi padre, **Noel Gómez**, por ser un ejemplo de rectitud, constancia y honradez , por inspirarme a seguir adelante , por ser un padre ejemplar en todos los sentidos.

A mi madre, **Estela Adame**, por ser mi apoyo en todo momento, por enseñarme a amar, a caminar en la vida, por ser la mejor mamá del mundo.

A mis hermanas **Mitzi y Lizbeth** por ser mis cómplices, mis mejores amigas, por todo lo que hemos pasado juntos , por todo el amor que les tengo.

A Valeria por traer alegría e ilusión a muchas vidas.

A mi Adrianita por que al llegar a mi vida la cambiaste completamente, por ser mi compañera en la vida , por todo lo que podemos lograr juntos ...te amo.

A mis compañeros de andanzas y casi hermanos : German, Jorge, Paris, Rene, Víctor T. y V. Parra.

EDSSON GOMEZ ADAME

9

## DEDICATORIA

A dios: gracias por permitirme estar aquí.

A mis padres, porque solo la superación de mis ideales, me han permitido comprender cada día la difícil posición de ser padres, mis conceptos, mis valores morales y mi superación se la debo a ustedes, esto será la mejor de las herencias; lo reconozco y lo agradeceré eternamente.

A mi madre, gracias por todo el tiempo que te robe pensando en mí. El logro obtenido es por todo tu amor, que dios te bendiga.

A mi padre gracias por los consejos y palabras de aliento en todo momento y que permanecen siempre en mi pensamiento y mi corazón.

A mi esposa con todo mi amor, por todo el cariño, confianza y comprensión que depositas día con día para ser posible este sueño.

A mi hijo con todo mi cariño y amor, porque en adelante serás el motor de mi vida, que dios te proteja hoy y siempre.

A mis hermanos, gracias por todo el apoyo brindado durante mi carrera y por los momentos de felicidad que pasamos juntos aun en los difíciles.

A mis tíos y primos, gracias por la unión estrecha que realizan siempre para con mi familia y para mí.

A mis amigos gracias por la compañía que me brindan día con día.

A mis profesores, gracias por todos los conocimientos y valores transmitidos

A mi universidad, gracias por crear en mí, el afán de servir.

**OSCAR ROSAS AGUILAR**



## AGRADECIMIENTOS

Al ing. **Arturo Morales Collantes** por su apoyo y paciencia en la dirección de este trabajo.

A los ingenieros **Jacinto Viqueira Landa**, **David Vasquez Ortiz**, **Juan M. Hernandez Osnaya** y **José Coronado Campi** por la revisión y recomendaciones hechas para enriquecer esta tesis.

Al **PAT** por presentar una excelente opción para la titulación.

A la M.I. **Adriana Barcenás Salgado** por todo su apoyo en la realización, revisión y demás tramites en el presente trabajo.

E

## INDICE

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Objetivo</b>	<b>3</b>
<b>CAPITULO 1 ANTECEDENTES DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA</b>	<b>4</b>
1.1 Elementos de un sistema eléctrico	4
1.2 Principales elementos en la energía eléctrica	7
1.2.1 Generadores	7
1.2.2 Transformadores	9
1.3 Generación en el sistema eléctrico nacional	15
1.3.1 Centrales generadoras de energía eléctrica	16
1.4 Sistema de transformación	22
1.5 Sistema de transmisión	22
1.6 Sistema de distribución	23
1.6.1 Estructuras de mediana tensión	25
1.6.2 Estructuras de baja Tensión	26
1.7 Seguridad en los sistemas eléctricos de potencia	27
1.7.1 Aspectos generales en la confiabilidad de los sistemas eléctricos	27
1.7.2 Requisitos de confiabilidad en el diseño de sistemas eléctricos de potencia	28
1.7.3 La automatización en la seguridad de los sistemas eléctricos	30
1.8 Estados de operación de los sistemas eléctricos	31
1.8.1 Descripción de los estados de operación de los sistemas eléctricos	32
1.8.2 Disturbios	34
<b>CAPITULO 2 ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO</b>	<b>37</b>
2.1 Conceptos utilizados para el estudio de corto circuito	37
2.1.1 Naturaleza de las corrientes de corto circuito	37
2.1.2 Fuentes de corriente de corto circuito	38
2.1.3 Dispositivos limitadores de la corriente de corto circuito	40
2.1.4 Diagrama unifilar	40
2.1.5 Impedancia de secuencia	40
2.1.6 Impedancia de los elementos	42
2.1.7 Sistemas en por unidad	42
2.1.8 Componentes simétricas	44
2.1.9 Diagrama de secuencias	45



2.2	Análisis de fallas	47
2.2.1	Falla monofásica (1 línea a tierra)	50
2.2.2	Falla de línea a línea (falla bifásica)	52
2.2.3	Falla de 2 líneas a tierra (bifásica a tierra)	54
2.2.4	Falla trifásica	57
2.3	Métodos de solución de corto circuito	59
2.3.1	Método directo (ohmico)	59
2.3.2	Método de MVA	60
2.3.3	Método del bus infinito	64
2.3.4	Método de mallas y nodos	65
2.3.5	Método de computo	69
<b>CAPITULO 3 DISEÑO DE SISTEMAS DE TIERRAS</b>		<b>71</b>
3.1	Descripción de la red de tierras	71
3.1.1	Disposiciones básicas de las redes de tierras	73
3.2	Resistividad del terreno	75
3.2.1	Factores que afectan la resistividad del terreno	75
3.2.2	Medición de la resistividad	77
3.3	El electrodo de puesta a tierra	79
3.3.1	Electrodos múltiples	80
3.3.2	Electrodos horizontales	81
3.3.3	Cable en ángulo recto	82
3.3.4	Electrodos profundos	82
3.3.5	Electrodos químicos	84
3.4	Potenciales peligrosos	85
3.4.1	Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica	85
3.4.2	Potencial de paso y de contacto	87
3.5	Diseño de sistemas de tierra	90
3.5.1	Parámetros necesarios para el calculo de una red de tierras	90
3.5.2	Procedimiento de diseño	99
<b>CAPITULO 4 DESARROLLO DEL SOFTWARE</b>		<b>101</b>
4.1	Introducción al lenguaje de programación Visual Basic 6.0	101
4.2	Modulo del programa para análisis de corto circuito	107
4.2.1	Diagrama de flujo	108
4.2.2	Código de programación	109
4.3	Modulo del programa para diseño de redes de tierras	121
4.3.1	Diagrama de flujo	122
4.3.2	Código de programación	123

G

<b>CAPITULO 5 EJEMPLO DE APLICACIÓN</b>	<b>129</b>
5.1 Ejemplo de calculo para estudio de corto circuito	129
5.1.1 Ejemplo de calculo manual para estudio de corto circuito	129
5.1.2 Ejemplo de calculo utilizando el programa de estudio de corto circuito	140
5.2 Ejemplo de aplicación para el calculo de diseño de sistemas de tierra	144
5.2.1 Ejemplo de calculo manual para diseño de sistemas de tierra	144
5.2.2 Ejemplo de calculo utilizando el programa para diseño de sistemas de tierra	150
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>153</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>154</b>
<b>APENDICE</b>	
A1 Indice de figuras	
A2 Indice de tablas	
A3 Manual de usuario para el modulo de calculo para estudio de corto circuito	
A4 Manual de usuario para el modulo de diseño de sistemas de tierras	

+

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo esta enfocado al análisis de fallas de corto circuito y diseño de sistemas de tierra utilizando un programa de computo para su solución.

El estudio del cálculo de la corriente de corto circuito es necesario en los sistemas eléctricos de potencia y distribución en todas sus etapas desde la generación hasta la utilización de la energía eléctrica.

Una corriente de corto circuito es una gran magnitud exponencial y por lo tanto dañina para los sistemas que tengan aislamiento por lo que debe ser liberada en un muy corto periodo de tiempo por los equipos de protección y que sus efectos térmicos y dinámicos sean imperceptibles en el sistema.

Las fuentes que contribuyen a las fallas de corriente de corto circuito son las máquinas rotatorias (generadores, motores y condensadores sincronos y los motores de inducción), estas corrientes tienen diversos orígenes como envejecimiento prematuro del sistema, alguna maniobra errónea, entre otros.

La importancia del cálculo de la corriente de corto circuito es que sus valores se pueden utilizar para la selección de interruptores de potencia, fusibles, restauradores, seccionadores, y coordinación de protecciones.

Por otra parte en el caso de que las corrientes de falla a tierra sean de gran valor tal que su efecto sea dañino para las máquinas y peligrosos para el personal, se utilizan las técnicas de aterrizamiento por medio de una red de tierras para drenar la corriente de falla. Este problema existe en todos los campos de la energía eléctrica, desde las bajas corrientes a tierra de los equipos de estado sólido, hasta las altas corrientes a tierra de las grandes subestaciones de extra alta tensión.

La importancia de un sistema de tierras es la seguridad que brinda a todo el personal y a los equipos destinados a proporcionar el suministro de energía para que todo el que pueda estar en contacto con estructuras metálicas de los mismos equipos eléctricos, así como los que no conduzcan energía no sufra descargas eléctricas que pongan en peligro la integridad física que en ocasiones lleva hasta la muerte, por lo que la seguridad para el ser humano en el manejo de la energía eléctrica esta por encima de los demás conceptos de seguridad para máquinas y equipos.

El cálculo a mano en el análisis de la corriente de corto circuito y diseño de sistemas de tierra tiene sus limitaciones, la obtención de los resultados puede complicarse y presentarse errores en el procedimiento, además la rapidez de solución disminuye considerablemente. Por lo que aplicar la técnica computacional para el análisis y solución de problemas de ingeniería es una solución práctica.

Dado lo anterior la presente tesis se refiere a un programa computacional para el cálculo de corriente de corto circuito y diseño de sistemas de tierra, para lo cual se utiliza VISUAL BASIC 6.0 como lenguaje de programación, debido a la facilidad con la que se desarrollan aplicaciones en corto tiempo, ya que tiene un lenguaje de programación visual (4.ª Generación) con el que un gran número de tareas se realizan con operaciones gráficas con el ratón sobre la pantalla e introducción de datos a través del teclado de algunas sentencias para disponer de aplicaciones con características de WINDOWS.

El programa realizado se dirige principalmente a estudiantes de las universidades y escuelas de ingeniería como un apoyo en las materias comunes a los sistemas eléctricos de potencia.

El presente trabajo está dividido en cinco capítulos, en el primero se presenta una introducción a los sistemas eléctricos, desde su generación hasta los sistemas de distribución, su seguridad, confiabilidad y los estados de operación.

En el segundo capítulo se presentan antecedentes del estudio de la corriente de corto circuito en los sistemas eléctricos de potencia, su análisis y métodos de solución.

El capítulo tres se trata los fundamentos teóricos básicos del diseño de sistemas de tierra en subestaciones de alta tensión aplicando las normas de diseño para su solución.

El capítulo cuatro presenta el desarrollo de los programas de cómputo de corriente de corto circuito y diseño de sistemas de tierra en VISUAL BASIC 6.0.

El capítulo 5 presenta un ejemplo de aplicación para cada caso (cálculo manual y cálculo con el programa de cómputo).

Por último se presentan las conclusiones a partir de los resultados generados en este trabajo.

## **OBJETIVO**

**Desarrollar un programa de computo para el cálculo de los diferentes tipos de fallas de corto circuito y diseño de sistemas de tierra mediante Visual Basic 6.0 como lenguaje de programación.**

## CAPITULO 1

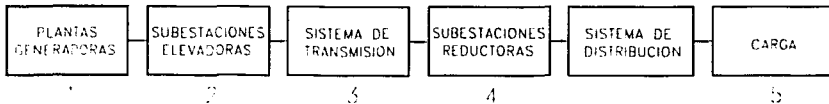
### ANTECEDENTES DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Los sistemas eléctricos de potencia han tenido una evolución desde los orígenes de la electricidad, tal que en el estado actual de la tecnología prácticamente no es posible encontrar sistemas eléctricos que operen en forma aislada y mucho menos generar la electricidad en el lugar de su uso ya que esto resultaría inaceptable por razones de tipo económico, ambientales y de confiabilidad en la operación.

#### 1.1 Elementos de un sistema eléctrico

Un sistema eléctrico se encuentra formado por varios elementos interconectados entre sí de tal forma que permiten conseguir el objetivo deseado. En su forma más elemental las etapas principales que intervienen en el proceso de la generación a utilización de la energía eléctrica pueden ser representados por diagramas de bloques como se ilustra en la figura 1.1.1.

**Figura 1.1.1** Representación esquemática de un sistema de energía eléctrica

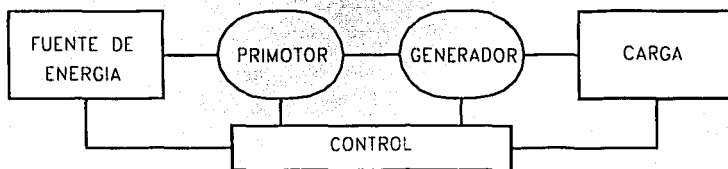


**1. Plantas generadoras.** Estas se encuentran alejadas de los centros de consumo y se conectan a éstos a través de una red de alta tensión. En esta etapa se presenta un sistema elemental de suministro de energía que consta de una fuente de energía, un primotor, un generador, una carga y un control. Prácticamente toda la energía eléctrica se obtiene por medio de máquinas rotatorias movidas por primotores a una velocidad determinada. El sistema de control mantiene la velocidad de las máquinas sensiblemente constante, así como la tensión entre los límites especificados a pesar de las variaciones de la carga. De esta forma se asegura el balance generación-carga de manera que la frecuencia del sistema permanezca tan próxima como sea posible, al valor nominal de la operación (en México 60 Hz.). El generador por lo general trifásico se constituye para generar energía con tensiones de 5 a 25 KV. En la figura 1.1.2, se presenta un diagrama de generación.

2. **Subestaciones elevadoras.** Una subestación eléctrica es un conjunto de máquinas, aparatos y circuitos que tienen la función de modificar los parámetros de la potencia eléctrica (tensión y corriente) y de proveer un medio de interconexión y despacho entre las diferentes líneas de un sistema.

Estas se encuentran adyacentes a las centrales eléctricas o plantas generadoras de electricidad para elevar la tensión de la salida de los generadores y permitir la transmisión en alta tensión mediante las líneas de transmisión.

Figura 1.1.2. Sistema de energía elemental



3. **Sistema de transmisión.** Por razones funcionales y de operación los sistemas eléctricos de potencia se pueden subdividir en varios subsistemas operados en diferentes niveles de tensión de operación, donde el mayor corresponde a la transmisión que es la que interconecta a la mayor parte de los elementos de un sistema eléctrico de potencia desde un punto de vista territorial. La línea de transmisión es el eslabón que lleva la energía eléctrica, desde la estación generadora hasta la carga, a través de cientos de kilómetros. Las líneas de transmisión, en México, operan en los niveles de tensión de 400, 230, 161, y 150 kilovolts (KV).

4. **Subestaciones reductoras primarias y secundarias**

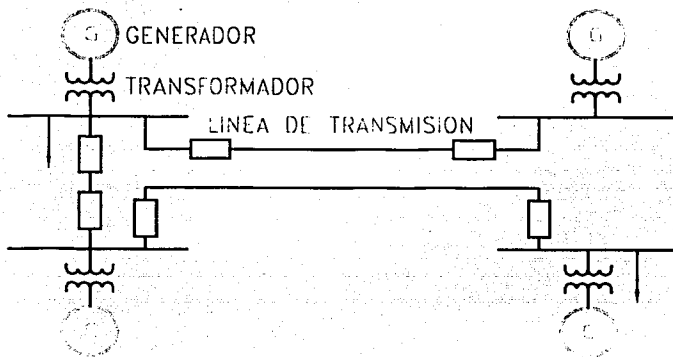
- *Subestaciones Reductoras Primarias.* Estas son alimentadas directamente por líneas de transmisión y reducen la tensión a valores menores para la alimentación de los sistemas de *subtransmisión* o las redes de *distribución*, de manera que dependiendo de la tensión de *transmisión* pueden tener en su secundario tensiones del orden de 138, 115, 85 y 69 kilovolts (KV); así como, las de *distribución* en niveles de 34.5, 23, 13.8, 6.6, 4.16 y 2.4 kilovolts (KV).
- *Subestaciones Reductoras Secundarias.* Estas son por lo general alimentadas de las redes de subtransmisión y suministran la energía eléctrica a las redes de distribución a tensiones comprendidas entre 34.5, 23 y 6.6 kilovolts<sup>(3)</sup>.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

5. **Sistemas de distribución y carga.** Los sistemas de distribución pueden adoptar diversas disposiciones, ya sea que la distribución se haga con líneas aéreas o subterráneas y diversos arreglos de la topología del sistema: *radial*, *mall* o *lazo*. Esto depende en gran parte de la densidad de carga en un área determinada y del tipo de carga<sup>(21)</sup>.

En la figura 1.1.3 se observa un sistema de malla o lazo mostrando los elementos que la caracterizan. En el diagrama, las flechas que salen de alguna barra son terminación de una línea de transmisión ó simbolizan las cargas.

Figura 1.1.3 Diagrama esquemático de un sistema eléctrico en lazo o malla



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## 1.2 Principales elementos en la energía eléctrica

Los elementos fundamentales que forman parte de un sistema de energía eléctrica son los *generadores* y los *transformadores de potencia*, de los cuales se describen sus principales características a continuación:

### 1.2.1 Generadores

Un generador es una máquina síncrona utilizada principalmente para la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica de c.a. La máquina síncrona está constituida esencialmente de dos partes que son estructuras ferromagnéticas. La parte estacionaria, que es esencialmente un cilindro hueco, donde se alojan los devanados del *estator* o *armadura*. El *rotor* es la parte de la máquina que se monta sobre una flecha y rota dentro del estator hueco. El devanado sobre el rotor, llamado *devanado de campo*, se alimenta con corriente de cc, para producir un flujo en el entrehierro, o espacio de aire que hay entre estator y rotor y así generar un sistema trifásico de tensiones en las bobinas de los devanados de la armadura y del par electromagnético entre el estator y el rotor.

El sistema inductor que gira dentro del estator aloja los polos magnéticos de excitación con corriente continua destinado a crear el flujo inductor. El circuito de excitación de los polos del rotor se alimenta mediante un sistema de dos anillos colectores, que giran naturalmente con el rotor y a los cuales llega la alimentación de corriente continua proporcionada por la excitatriz de la máquina.

Como el flujo de cc debe alimentar al circuito de campo del rotor y debido a que éste está girando, se necesita un arreglo especial para llevar la corriente al embobinado de campo. Existen dos métodos para suministrar esta corriente:

- Suministrarle al rotor la potencia de cc desde una fuente externa de cc, por medio de anillos de rozamiento y escobillas.
- Suministro de potencia de cc desde una fuente especial, montada directamente en el eje del generador síncrono.

El rotor de la máquina síncrona puede ser de *polos salientes* o *liso*, en el primer caso se emplean para máquinas lentas, es decir en *centrales hidroeléctricas* y en el segundo en las centrales *termoeléctricas* que operan a mayor velocidad.

### Corriente de corto circuito en generadores

Con frecuencia las corrientes que fluyen cuando ocurre un corto circuito, provienen generalmente de máquinas rotatorias eléctricas ( los capacitores cargados pueden también producir descargas de corrientes transitorias de corto circuito extremadamente elevadas, pero de frecuencia natural mucho más grande que la frecuencia de la fuente y normalmente la duración de la frecuencia del corto circuito de la fuente no se incrementa con la adición de la descarga del capacitor).

En el estudio de corto circuito los elementos de una red eléctrica se pueden clasificar como activos y pasivos. Se denominan activos a los que alimentan corriente de corto circuito; y en orden de aportación de ésta corriente se tienen:

- a) Generadores
- b) Motores síncronos y condensadores
- c) Convertidores síncronos
- d) Motores de inducción

Los elementos pasivos son aquellos que se oponen al paso de la corriente como: *Impedancias de máquinas rotatorias e Impedancias de reactores.*

a) **Generadores.** Si un corto circuito ocurre en un circuito al cual está conectado un generador, este continúa produciendo tensión ya que la excitación de campo se mantiene y el primotor sigue moviéndolo a velocidad normal. La tensión generada produce una corriente de corto circuito de gran magnitud la cual fluye del generador (o generadores) al punto de falla.

Este flujo de corriente se limita únicamente por la impedancia del generador y las impedancias del corto circuito entre el generador y el punto donde ocurre la falla. Si el corto circuito ocurre en las terminales del generador, la corriente queda limitada solamente por la impedancia de la máquina<sup>(11)</sup>.

Para propósitos de cálculos de corrientes de corto circuito, los estándares industriales tienen establecidos tres nombres específicos para valores de estas reactancias, llamadas reactancias subtransitorias, reactancias transitorias, y reactancias síncronas.

$X''d$  = reactancia subtransitoria; determina una constante de tiempo  $T''d$  de corto circuito subtransitoria con un rango de 0.03 s y típicamente dura entre 3 y 4 ciclos de la frecuencia del sistema después de la aparición de la falla.

$X'd$  = reactancia transitoria; la corriente de la máquina decae más lentamente con la constante de tiempo  $T'd$  de corto circuito transitoria y es incrementada en el rango de 0.5 a 2 s.

$Xd$  = reactancia síncrona; este es el valor que determina el flujo de corriente después de que la condición de estado estable es alcanzada.

b) **Motores síncronos.** Estos son substancialmente igual que los generadores, durante un corto circuito en el sistema, el motor síncrono actúa como un generador y entrega corriente de corto circuito. Cuando se establece el corto circuito, la tensión al sistema se reduce a un valor mucho muy bajo; así el motor deja de entregar energía a la carga mecánica y empieza a detenerse. Sin embargo, la inercia de la carga y el rotor impiden al motor que se detenga, es decir, la energía rotatoria de la carga y el rotor mueven al motor síncrono como un primotor que mueve al generador.

La magnitud de la corriente de corto circuito depende de la potencia, tensión nominal y reactancia del motor síncrono y de la impedancia del sistema hasta el punto de falla.

c) **Convertidores síncronos.** El concepto de conversión síncrona se utiliza en sentido restringido para indicar cambio de c.c. en c.a. o viceversa. Como convertidor de c.a. en c.c., se introduce a través de los anillos rozantes corriente alterna a los conductores del inducido en el rotor y la máquina funciona (suponiendo que se halla efectuado su arranque por algún medio) como motor síncrono. El colector convierte la tensión alterna generada en tensión de corriente continua. Similarmente, como convertidor de c.c. en c.a., la corriente continua del circuito externo se convierte en alterna en el devanado del inducido para producir rotación y la tensión alterna generada se toma entre los anillos rozantes.

El convertidor síncrono no se utiliza nunca en la práctica, pero sin embargo se estudian debido a que su análisis simplifica el de los convertidores rotatorios síncronos polifásicos<sup>(12)</sup>.

d) **Motores de inducción.** Al igual que el motor síncrono se tiene exactamente el mismo efecto sobre el motor de inducción, es decir que se sigue moviendo el motor después de que ocurra un corto circuito en el sistema. Solo existe una diferencia: el motor de inducción no tiene un campo excitado por corriente directa, pero existe un flujo en el motor durante la operación normal. Si la fuente de tensión se elimina súbitamente, esto es, cuando ocurre el corto circuito en el sistema, el flujo en el rotor no puede cambiar instantáneamente. Así se genera una tensión en el devanado del estator causando una corriente de corto circuito que fluye hasta el punto de falla.

La magnitud de esta corriente depende de su potencia, tensión nominal, reactancia del motor y la reactancia del sistema hasta el punto de falla.

En las tablas 1.2.1 y 1.2.2 se resumen los parámetros típicos para las máquinas síncronas de importancia práctica.

## 1.2.2 TRANSFORMADORES

Un *transformador* es un dispositivo eléctrico de c.a. sin partes en movimiento, que se basa en el principio de la inducción electromagnética, para transferir la energía eléctrica de un circuito a otro sin que exista contacto físico entre ambos, ni variación en la frecuencia. La transferencia de energía va acompañada de cambios en los valores de tensión y corriente. Para transportar la energía desde las plantas generadoras hasta los centros de consumo, es necesario elevar la tensión en los centros de generación para poder llevar a cabo la transmisión de la energía y reducirla al llegar a los centros de consumo (centros de carga).

El *transformador* es el dispositivo ideal para llevar a cabo esta función ya que es capaz de elevar la tensión hasta cientos de kilovolts disminuyendo de este modo gran parte de pérdidas en las líneas de transmisión.

**Tabla 1.2.1 Reactancias típicas de máquinas síncronas trifásicas**

	Turbogeneradores				Generadores de polos salientes	
	2 polos		4 polos		Con devanados amortiguadores	Sin devanados amortiguadores
	Enfriamiento convencional	Enfriamiento de conductores	Enfriamiento convencional	Enfriamiento de conductores		
Xd	1.76 1.7-1.82	1.95 1.72-2.17	1.38 1.21-1.55	1.87 1.6-2.13	1 0.6-1.5	1 0.6-1.5
Xq	1.66 1.63-1.69	1.93 1.7-2.14	1.35 1.17-1.52	1.82 1.56-2.07	0.6 0.4-0.8	0.6 0.4-0.8
X'd	0.21 0.18-0.23	0.33 0.26-0.38	0.26 0.25-0.27	0.41 0.35-0.46	0.32 0.25-0.5	0.3 0.2-0.5
X''d	0.13 0.11-0.14	0.28 0.23-0.32	0.19 0.18-0.19	0.29 0.26-0.32	0.2 0.13-0.32	0.3 0.2-0.5
X2	=X''d	=X''d	=X''d	=X''d	0.2 0.13-0.32	0.40 0.30-0.45
X0*						

\* X0 varía críticamente con el devanado de la armadura que difícilmente se puede dar. La variación esta entre 0.1 y 0.7 de X''d.

Los valores esta en por unidad.

**Tabla 1.2.2 Valores de reactancias típicas para máquinas síncronas y de inducción, en por unidad para máquinas a razón de KVA's**

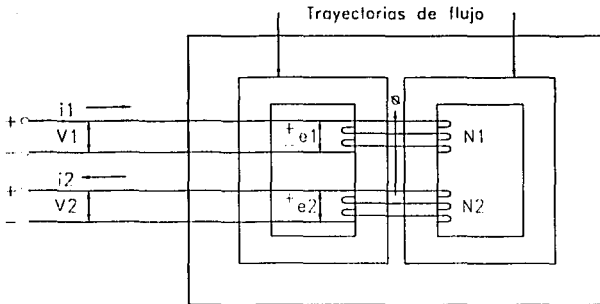
	X'd	X''d
Generadores de turbina		
2 polos	0.09	0.15
4 polos	0.15	0.23
Generadores de polos salientes y devanados amortiguados		
12 polos o menos	0.16	0.33
14 polos o menos	0.21	0.33
Motores síncronos		
6 polos	0.15	0.23
8-14 polos	0.20	0.30
16 polos o más	0.28	0.40
Condensadores síncronos	0.24	0.37
Convertidores síncronos		
600 Volts de c.d.	0.20	
250 Volts de c.d.	0.33	
Motores de inducción grandes mayores a 600 Volts	0.17	

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

La parte eléctrica esta integrada por dos devanados o bobinas, una que recibe la energía, denominado primario y otro que entrega la energía denominado secundario, no existiendo conexión eléctrica entre ambos.

La parte magnética esta formada por un núcleo de acero laminado que enlaza a los dos devanados como se observa en la figura 1.2.1.

Figura 1.2.1 Transformador de dos devanados



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Al aplicar una tensión alterna  $V_1$  al devanado primario, circula por este una corriente  $I_1$  que produce un flujo magnético alterno. Este flujo, viaja a través del núcleo, enlaza al devanado secundario induciendo en este una tensión  $V_2$  que puede ser aprovechado conectándole una carga que demandará una corriente  $I_2$ .

La tensión inducida guarda una relación directa con el número de vueltas del devanado, esto es, si en el secundario se tienen más vueltas que el primario se estará elevando la tensión y si por el contrario se tienen menos vueltas en el secundario que el primario, se estará reduciendo la tensión. Esta relación de transformación para un transformador ideal se define mediante las ecuaciones 1.1<sup>(25)</sup>.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad \text{Y} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (1.1)$$

De las que se deduce:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{V_2}{I_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \quad (1.2)$$

Donde la relación de transformación para un transformador ideal en (1.2) esta dada por:

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.3)$$

$Z_2$  = impedancia de la carga

$Z_2$  en un circuito secundario puede substituirse por una impedancia equivalente  $Z_1$  en el primario teniendo en cuenta que:

$$Z_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \quad (1.4)$$

Para cálculos en por unidad (p. u) en transformadores de circuitos trifásicos, se requiere que los voltajes base en los dos lados del transformador tengan la misma relación que la de los voltajes línea a línea nominales en ambos lados. La base de potencia es la misma en ambos lados<sup>(6)</sup>.

En un circuito equivalente trifásico, la resistencia R y la reactancia X estan conectadas en cada línea a un transformador trifásico ideal. Al tener R y X el mismo valor en p.u., no importando si están referidos al lado de alto o de bajo voltaje del transformador, el circuito equivalente monofásico tomará para representar al transformador la impedancia en p.u.,  $R + jX$  sin el transformador ideal.

En la tabla 1.2.3 se dan los valores típicos de impedancias de transformadores que son prácticamente iguales a la reactancia de dispersión ya que, por lo general la resistencia es menor a 0.01 por unidad.

### Clasificación de transformadores

Los *transformadores* se clasifican tomando en cuenta diferentes factores, como los descritos a continuación:

- a) **Operación** . Se refieren a la energía que manejan dentro del sistema eléctrico, se clasifican en:
  - *Transformador de distribución*: Los que tienen capacidades desde 5 hasta 500 kva.
  - *Transformadores de potencia*: Con capacidades mayores de 500 kva.
- b) **Utilización**. De acuerdo a su posición dentro del sistema se clasifican como:
  - *Transformador para generador*: Son transformadores de potencia que se conectan en la subestación elevadora a la salida del generador. Proporcionan la energía a la línea de transmisión.
  - *Transformador de subestación*: Son los que se conectan al final de la línea de transmisión para reducir la tensión a nivel de sub-transmisión.

- **Transformadores de distribución:** Reducen la tensión de sub-transmisión a tensiones de consumo.
  - **Transformadores especiales:** Son transformadores de potencia diseñados para aplicaciones no incluidas en las anteriores y que pueden ser: reguladores de tensión, transformadores para rectificador, transformadores, defasadores, autotransformadores, etc.
- c) **Número de fases.** De acuerdo a las características del sistema al que se conectará se clasifican en:
- **Monofásico.** Transformadores de potencia o de distribución conectados a una línea o fase y un neutro o tierra. Tienen un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión. Se simboliza como ---1
  - **Trifásico.** Transformadores de potencia o distribución que son conectados a 3 fases y pueden ser o no conectados a un neutro común o tierra. Tienen tres devanados de alta tensión y tres de baja tensión<sup>(4)</sup>.
- d) **Por la construcción de su núcleo.** De acuerdo a la relación de colocación de las bobinas y el núcleo se conocen dos tipos.
- **Núcleo acorazado:** denominado tipo "shell", el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de alta y baja tensión.
  - **Núcleo no acorazado:** Conocido como tipo columna o "core," en éste las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.
- e) **De acuerdo al medio refrigerante.** Existen los sumergidos en aceite y los tipo seco.

Entre los sumergidos en aceite se tiene:

- Tipo OA (enfriado por aire natural)
- Tipo OA / FA (enfriado por aire natural y por aire forzado)
- Tipo OA / FA / FAO (autoenfriado y con dos pasos de enfriamiento por aire y liquido aislante forzado)
- Tipo FAO (enfriado por aire y liquido aislante forzado)
- Tipo OW (enfriado por agua)
- Tipo FOW (enfriado por agua forzada)

Entre los tipo seco se tiene:

- Tipo AA (con enfriamiento propio)
- Tipo AFA (con enfriamiento por aire forzado)
- Tipo AA / FA (con enfriamiento propio y enfriamiento por aire forzado)

**Tabla 1.2.3 Rango típico de reactancias de transformadores de potencia**

Tensión nominal del sistema, KV	Enfriamiento en aire forzado, %	Enfriamiento con aceite forzado, enfriamiento
34.5	5-8	9-14
69	6-10	10-17
115	6-11	10-20
138	6-13	10-23
161	6-14	11-25
230	7-16	12-27
345	8-17	13-28
500	10-20	16-34
700	11-21	19-35

\*Los transformadores típicos se diseñan en la actualidad para el valor mínimo de reactancia mostrado.

\*Los transformadores de distribución tienen una reactancia considerablemente menor. Generalmente las reactancias de los transformadores son menores del 1%.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



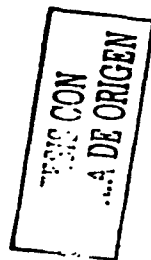
### 1.3 Generación en el sistema eléctrico nacional

La generación de la energía eléctrica en la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se realiza por medio de las tecnologías disponibles en la actualidad, y es obtenida en grandes cantidades en las denominadas *plantas generadoras*, como las centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, eólicas y nuclear.

Un sistema de generación está integrado por un conjunto de centrales generadoras de diferentes tipos, que utilizan distintos tipos de combustibles o fuentes de energía primaria para producir electricidad. En la tabla 1.3.1, se muestran los tipos de generación y fuentes de energía que se emplean básicamente en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Tabla 1.2.3 Rango típico de reactancias de transformadores de potencia el sistema eléctrico nacional

Tipo de central	Combustible o Fuente de Energía primaria
Hidroeléctrica	Agua
Vapor convencional	Combustóleo y / o gas
Turbina de gas	Gas o diesel
Ciclo combinado	Gas
Combustión interna	Diesel o mezcla
Carboeléctrica	Carbón
Geotérmica	Vapor extraído del subsuelo
Nuclear	Uranio enriquecido
Eólicas	Aire



Dos parámetros importantes que caracterizan el sistema de generación son la capacidad instalada de generación (medida en unidades de potencia, usualmente en MW) y la energía eléctrica generada o generación (medida en unidades de energía usualmente en (GWh)).

En la figura 1.3.1 se observan los porcentajes de la capacidad instalada de generación del SEN, según tipos de generación. Al cierre del mes de septiembre del año 2001 la CFE, incluyendo productores externos de energía, cuenta con una capacidad efectiva instalada para generar energía eléctrica de 36,659.34 megawatts (MW), de los cuales 9,389.8 MW son de hidroeléctricas, 22,464.56 MW corresponden a las termoeléctricas que consumen hidrocarburos; 2,600 MW a carboeléctricas; 837.90 MW a geotermoeléctricas; 1,364.88 MW a la nucleoelectrica; y 2.18 MW a la eolelectrica<sup>(24)</sup>.

Figura 1.3.1a Porcentaje de capacidad efectiva instalada de generación

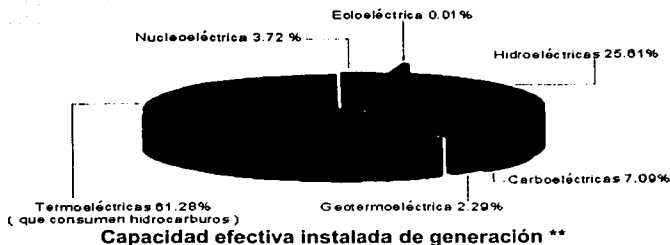
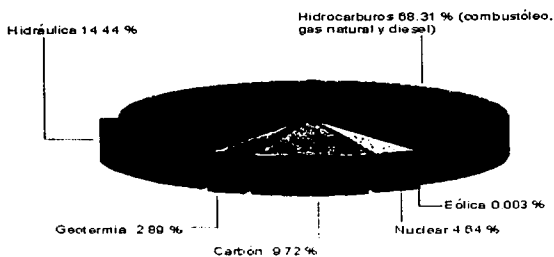


Figura 1.3.1b Porcentaje de generación por fuente



**Generación por fuente\*\***

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### Desarrollo de la capacidad instalada y de la generación

A lo largo de los años, la generación ha aumentado para cumplir el objetivo fundamental de la CFE, que es avanzar para atender todas las necesidades de la energía eléctrica de la población, de la industria, la agricultura, el comercio y los servicios en México. Estas cifras son las que se muestran en la tabla 1.3.2<sup>(24)</sup>.

#### 1.3.1 Centrales generadoras de energía eléctrica

- **Centrales hidroeléctricas.** Las centrales hidroeléctricas utilizan la energía potencial del agua de los ríos o caídas que se almacenan en presas como fuente primaria para generar electricidad.

**Tabla 1.3.2 Capacidad instalada y de la generación**

	1995	1996	1997	1998	1999	2000*	2000**	Sept 2000*	Sept 2000**
Capacidad (MW)	32,160	33,920	33,940	34,340	34,890	35,350	35,80	36,170	36,650
Generación (TWh)	140.8	149,9	159,8	168,9	179,1	189,9	191,2	145,7	148,0

\* No incluye Productor Externo de Energía

\*\* Incluye Productor Externo de Energía (central ciclo combinado Mérida III con 484 MW) información actualizada al 30 de septiembre del 2001

Las centrales hidroeléctricas utilizan la energía potencial del agua de los ríos o caídas que se almacenan en presas como fuente primaria para generar electricidad.

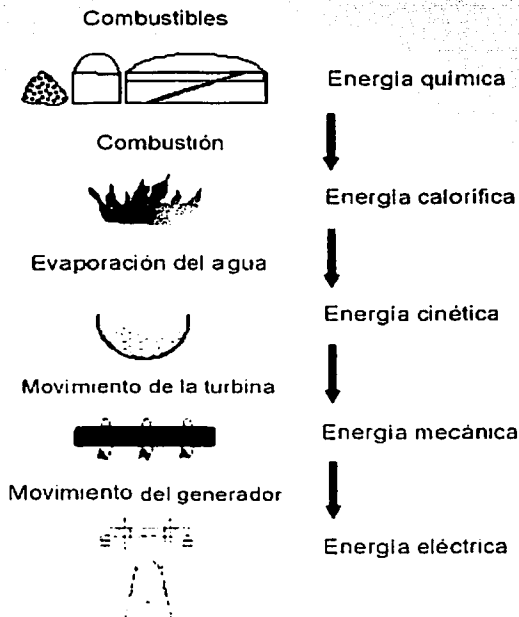
De esta forma la energía potencial del agua se convierte en energía cinética que es utilizada para impulsar el rodete de la turbina y hacerla girar para producir la energía mecánica. Acoplada a la flecha de la turbina se encuentra el generador que finalmente convierte la energía mecánica en eléctrica.

- **Centrales termoeléctricas.** Una central termoeléctrica tipo vapor es una instalación industrial que utiliza el poder calorífico de los combustibles derivados del petróleo (combustóleo, diesel y gas natural), en donde la energía química del combustible se transforma en energía calorífica para producir vapor de alta temperatura y presión (temperaturas del orden de los 520°C y presiones entre 120 y 170 Kg / cm<sup>2</sup>) por medio de un sistema complejo de cambiadores de calor, el vapor se conduce a la turbina donde su energía cinética se convierte en energía mecánica para impulsar las turbinas que giran a 3600 r.p.m. la que se transmite al generador, para producir energía eléctrica.

En las figuras 1.3.2 y 1.3.3 se observa la secuencia de transformación de energía y un esquema de una central termoeléctrica tipo vapor.

- **Centrales de turbogas.** La generación de la energía eléctrica en las unidades turbogás se logra aprovechando directamente, en los alabes de la turbina, la energía cinética que resulta de la expansión del aire y gases de combustión comprimidos y a elevadas temperaturas. La turbina está acoplada al rotor del generador dando lugar a la producción de energía eléctrica. Los gases de combustión, después de trabajar en la turbina, se descargan directamente a la atmósfera.

Figura 1.3.2 Secuencia de transformación de energía en centrales termoeléctricas

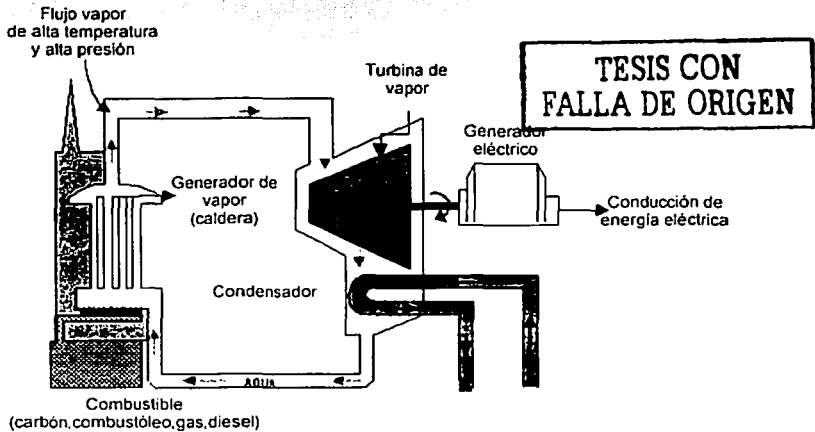


Estas unidades emplean como combustibles gas natural o diesel, en los modelos avanzados, se puede quemar combustóleo o petróleo crudo. Desde el punto de vista de operación, el breve tiempo de arranque y la versatilidad para seguir a la demanda hacen a las turbinas de gas ventajosas para satisfacer cargas de pico<sup>(25)</sup>.

- **Centrales de ciclo combinado.** Las centrales de ciclo combinado están integradas por diferentes tipos de unidades generadoras: turbogás y vapor. Una vez terminado el ciclo de generación en las unidades turbogás, los gases desechados poseen un importante contenido energético, el cual se manifiesta por su alta temperatura. Esta energía se utiliza para calentar agua y obtener vapor, que se aprovecha para generar energía eléctrica, al seguir un proceso semejante al de las plantas termoeléctricas (ver figura 1.3.3).

El arreglo general de una planta de ciclo combinado se puede esquematizar de acuerdo con diversas posibilidades. El número unidades turbogás por unidad de vapor varía desde uno a uno hasta cuatro por uno.

Figura 1.3.3 Esquema de una central termoeléctrica tipo vapor



Una ventaja de este tipo de plantas es la posibilidad de erigirlas en dos etapas. La primera, turbogás, puede ser terminada en plazo breve e iniciar su operación; posteriormente, se puede terminar la construcción de la unidad de vapor, y terminar así el ciclo combinado.

- **Unidad diesel (Combustión Interna).** Sigue el principio de los motores de combustión interna : aprovecha la expansión de los gases de combustión para obtener la energía mecánica, que se transforma en energía eléctrica en el generador. Generalmente se encuentran dentro del rango de 500 a 10,000 KVA y normalmente cuando se quiere tener cierta independencia de las fuentes externas de energía en los casos de emergencias en cierto tipo de instalaciones, entran en servicio en tiempos relativamente cortos.

Con motores de este tipo se puede obtener una alta operación y consumo de combustible relativamente bajo comparativamente con otros motores. Para potencias hasta de 500 KVA se usan motores Diesel de cuatro tiempos y para potencias mayores se adopta el ciclo de dos tiempos con doble efecto. Por lo general son de 150 a 250 r.p.m. aunque para algunas aplicaciones se encuentran hasta de 750 r.p.m.

- **Centrales carboeléctricas.** Las centrales carboeléctricas no difieren en cuanto a su concepción básica de las termoeléctricas convencionales; el único cambio importante es el uso del carbón como energético primario. En la práctica el carbón y sus residuos de la combustión requieren de un manejo más complejo que los combustibles líquidos o gaseosos utilizados en termoeléctricas convencionales<sup>(25)</sup>.

- **Centrales geotermoeléctricas.** Estas plantas son básicamente plantas termoeléctricas que usan la energía geotérmica de los vapores naturales del subsuelo. La mezcla de agua-vapor que se extrae del subsuelo de perforaciones profundas se envía a un separador obteniéndose vapor seco a temperaturas comprendidas entre 150 y 250 °c y con presiones comprendidas entre 5 y 25 Kg / Cm<sup>2</sup>. Esté se dirige a la turbina donde se transforma su energía cinética en mecánica y , a su vez se convierte dentro del generador, en la electricidad.

- **Centrales núcleo eléctricas.** Las centrales núcleo eléctricas tienen cierta semejanza con las termoeléctricas convencionales ya que también utilizan vapor a presión para mover los turbogeneradores. Esta es la aplicación más importante hasta el momento de la energía nuclear para la producción de la energía eléctrica. De los procesos de fisión y fusión nuclear se obtiene el calor, y para usos de tipo civil e industrial se aplica la llamada fisión nuclear, es decir, la ruptura del núcleo del átomo del elemento pesado, en particular los átomos del isótopo del *uranio 235* por medio de un bombardeo con neutrones en el interior del reactor. Estas plantas funcionan con el mismo principio de las denominadas termoeléctricas convencionales a excepción de la fuente de calor que no esta constituida del combustible tradicional, es una reacción nuclear.

Tabla 1.3.3 Capacidad efectiva instalada y la generación termoeléctrica

Tipo	Capacidad en MW	Generación GWh
Vapor	14,058.50	68,291
Dual	2,100.00	10,433
Carboeléctrica	2,600.00	14,385
Ciclo Combinado *	4,216.92	17,982
Geotermoeléctrica	837.90	4,284
Turbogas	1,982.68	4,046
Combustión interna	106.46	349
Nucleoeléctrica	1,364.88	6,864
<b>Total</b>	<b>27,267.34</b>	<b>126,634</b>

\* Incluye productor externo de energía (central ciclo combinado Mérida III)<sup>(24)</sup>

El empleo de la energía nuclear ha abierto nuevas perspectivas en el campo de la producción de la energía eléctrica especialmente para países con pocos recursos hidrológicos y / o de combustibles derivados del petróleo.

Para el año 2001, la capacidad efectiva instalada y de la generación de cada una de estos tipos de generación termoeléctrica, se muestra en la tabla 1.3.3<sup>(24)</sup>.

- **Fuentes alternas de energía**

Debido a la crisis de energéticos que se vislumbra a futuro relativamente cercano, y las alteraciones económicas sustanciales entre los países productores y los países consumidores de petróleo, ha traído como consecuencia desde hace algunos años una verdadera explosión de ideas relacionadas con fuentes alternativas de energía (con respecto al petróleo) destacando las siguientes:

- a) Energía geotérmica
- b) Energía solar
- c) Energía del aire y mareas
- d) Energía de corrientes marinas y gradientes térmicos
- e) Quema de basura y desperdicios de animales
- f) Fusión nuclear controlada.

Algunas de estas fuentes alternativas de energía como la geotérmica y la debida a las mareas ofrecen posibilidades regionales limitadas, otras como las corrientes marinas y los esquemas de gradientes térmicos requieren de procesos complicados y una gran variedad de equipos que hacen que el costo de producción de la energía eléctrica resulte excesivo, lo que provoca la reducción de su uso solo a condiciones extremas de carencia de otros medios primarios para la producción de energía eléctrica.

Los métodos de obtención de energía por quema de basura y desperdicios animales así como la disponibilidad de energía solar en lugares de baja intensidad asociados con colectores y almacenamiento de calor (agua o rocas) representan una fuente de energía calorífica para usos domésticos, comerciales, industria pequeña y rural.

En zonas de alta insolación (regiones con elevado número de días con sol), la energía solar se puede emplear más allá del área limitada por el uso doméstico y comercial ya que es posible transformarla en energía eléctrica y hacer más versátil su uso. Un primer requerimiento sería el uso de colectores de alta intensidad solar (a base de espejos) a manera de obtener vapor de alta presión y alta temperatura como el requerido por las turbinas y a partir de esto el proceso sería el convencional para la obtención de la energía eléctrica.

## 1.4 Sistema de transformación

La transformación es el proceso que permite, utilizando subestaciones eléctricas, cambiar las características de la electricidad (tensión y corriente) para facilitar su transmisión y distribución. Esta ha crecido en paralelo al desarrollo de la red de transmisión y distribución, contando a finales del año 2001 con 143,642 MVA, de los cuales el 77.32% corresponde a subestaciones de transmisión y el restante 22.68% a subestaciones de distribución (tabla 1.4.1)<sup>(24)</sup>.

Tabla 1.4.1 Capacidad en subestaciones en (MVA)

Tipo Subestación	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001*
Transmisión	88,072	89,006	90,953	94,519	98,462	104,543	107,846	111,070
Distribución	25,165	25,695	26,220	27,117	28,241	29,866	31,673	32,572
<b>Total</b>	<b>113,237</b>	<b>114,701</b>	<b>117,173</b>	<b>121,636</b>	<b>126,703</b>	<b>134,409</b>	<b>139,519</b>	<b>143,642</b>

\*Cifras al 30 de septiembre del 2001

\*MVA = millones de volt-amperes

## 1.5 Sistema de transmisión

Un sistema de transmisión está compuesto principalmente por líneas y subestaciones que conducen la energía eléctrica desde las plantas de generación hasta los centros de consumo finales. La *Comisión Federal de Electricidad* (CFE) cuenta con las redes de transmisión y de distribución, integradas por las líneas de conducción de alta, media y baja tensión para la distribución a los usuarios finales.

El sistema de transmisión en nuestro país se encuentra interconectado a excepción de sistemas aislados en la península de Baja California debido a su ubicación geográfica, a la distancia con el sistema interconectado nacional, y al alto costo que representarían las obras necesarias. La red de transmisión considera los niveles de tensión de 400, 230, 161 y 150 kilovolts (kv). Al finalizar el año 2001 esta red alcanzó una longitud de 36,305 km. La información completa de estos datos se da en la tabla 1.5.1<sup>(24)</sup>.

Tabla 1.5.1 Longitud de las líneas de transmisión del sistema eléctrico nacional (Km), 1994-2001

Nivel de tensión	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001*
400	10,623	10,979	11,337	11,908	12,249	12,399	13,165	13,325
230	18,217	18,532	18,878	19,374	20,292	21,224	21,598	22,472
161	427	456	456	456	456	456	508	508
150	766	445	445	66	66	0	0	0
<b>Total</b>	<b>30,033</b>	<b>30,412</b>	<b>31,116</b>	<b>31,804</b>	<b>33,063</b>	<b>34,079</b>	<b>35,271</b>	<b>36,305</b>

\*Así se denomina a la parte del sistema de transmisión que se encuentra en México



## 1.6 Sistema de distribución

Un sistema de distribución eléctrica es el conjunto de elementos encargados de suministrar la energía desde una subestación de potencia hasta a los usuarios en los niveles de tensión normalizados y en las condiciones de seguridad exigidas por los reglamentos.

Actualmente y sobretodo en los países desarrollados se ha hecho necesario la aplicación de la tecnología en el área eléctrica destacándose últimamente el uso de las computadoras tanto analógicas como digitales para solucionar los problemas, cada vez más complejos, de la ingeniería de distribución.

La red de distribución debe proyectarse de tal manera que pueda ser ampliada progresivamente, con escasos cambios en las construcciones existentes tomando en cuenta ciertos principios económicos con la finalidad de asegurar un servicio adecuado y continuo para la carga presente y futura, al mínimo costo de operación<sup>(6)</sup>.

El sistema de distribución, que se inicia después de generada, transformada y transmitida la energía eléctrica y que distribuye la electricidad a los usuarios finales, la constituyen en México las líneas de *subtransmisión* con niveles de tensión de 138,115, 85 y 69 kilovolts (kv); así como las de distribución en niveles de 34.5, 23, 13.8, 6.6, 14.16 y 2.4 kv. Al 30 de septiembre del año 2001, la longitud de estas líneas fue de 40,148 km y 548,340 km, respectivamente. Como se observa en la tabla 1.6.1.

Mediante este sistema de distribución es posible la utilización de la energía eléctrica en los centros urbanos, agrícolas y comerciales en sus diversas formas, para satisfacer las necesidades de alumbrado, fuerza motriz, calor, refrigeración, etc.

### Clasificación

Por su construcción se pueden clasificar en:

- Sistemas aéreos
- Sistemas subterráneos
- Sistemas mixtos

Los principales elementos componentes que forman parte de un sistema de distribución son:

1. Líneas primarias
2. Transformadores de distribución
3. Líneas secundarias
4. Acometidas
5. Equipos de medición

**Tabla 1.6.1** Longitud de las líneas de distribución en el sistema eléctrico nacional en (km) 1994 – 2001

Nivel de tensión (kV)	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001*
<b>Subtransmisión</b>								
138	1,156	1,215	1,171	1,171	1,176	1,018	1,029	1,051
115	30,910	31,336	30,344	30,920	32,308	34,151	34,972	35,562
85	234	215	220	185	185	185	186	186
69	3,567	3,496	3,566	3,487	3,459	3,490	3,441	3,349
<b>Subtotal</b>	<b>35,867</b>	<b>36,262</b>	<b>35,301</b>	<b>35,763</b>	<b>37,128</b>	<b>38,844</b>	<b>39,627</b>	<b>40,148</b>
<b>Distribución</b>								
34.5	52,508	55,600	54,897	55,638	57,135	58,996	60,300	61,128
23	19,510	19,928	20,505	22,056	22,765	23,323	23,756	24,579
13.8	198,609	200,988	211,533	219,253	226,922	233,232	239,748	244,567
6.6*	771	716	683	688	600	587	582	578
Baja tensión	190,507	194,317	196,960	205,902	208,765	211,969	215,369	217,278
<b>Subtotal</b>	<b>461,905</b>	<b>471,549</b>	<b>484,578</b>	<b>503,537</b>	<b>516,187</b>	<b>528,107</b>	<b>539,755</b>	<b>548,340</b>
<b>Total de líneas de Distribución</b>	<b>497,772</b>	<b>507,811</b>	<b>519,879</b>	<b>539,300</b>	<b>553,315</b>	<b>566,951</b>	<b>579,382</b>	<b>588,488</b>
<b>Total</b>	<b>527,805</b>	<b>538,223</b>	<b>550,995</b>	<b>571,104</b>	<b>586,378</b>	<b>601,030</b>	<b>614,653</b>	<b>624,793</b>

\*cifras al 30 de septiembre del 2001

\*Incluye tensiones de 4.16 y 2.4 kv.

1. **Líneas primarias.** Son las encargadas de llevar la energía desde las subestaciones de potencia hasta los transformadores de distribución. Los conductores van apoyados en postes cuando se trata de instalaciones aéreas, y en ductos o directamente enterrados cuando se trata de instalaciones subterráneas<sup>(6)</sup>.
2. **Transformadores de distribución.** Son los equipos encargados de cambiar la tensión primaria a un valor menor, de tal manera que el usuario puede utilizarla sin necesidad de equipos e instalaciones costosas y peligrosas.
3. **Líneas secundarias.** Las líneas secundarias distribuyen la energía desde los transformadores de distribución hasta las acometidas a los usuarios.
4. **Acometidas y equipos medición.** Las acometidas, y el equipo de medición, son las partes que ligan al sistema eléctrico de la empresa suministradora con el usuario.

5. Las acometidas se pueden proporcionar a la tensión primaria o a la tensión secundaria; dependiendo de la magnitud de la carga del cliente. La medición se puede hacer igualmente en baja tensión dependiendo del tipo de acometida.

Entre los *elementos componentes secundarios* de una red de distribución se tienen las *Cuchillas, reactores, interruptores, capacitores, fusibles, restauradores y seccionadores* entre otros<sup>(6)</sup>.

### 1.6.1 Estructuras de mediana tensión (M. T.)

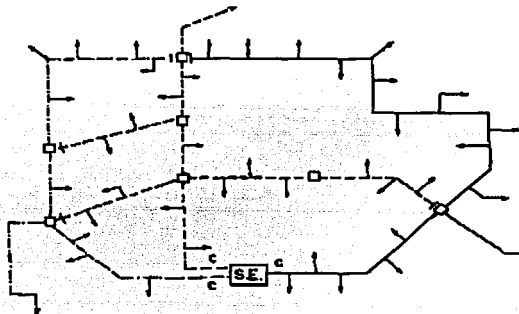
En forma general se pueden enumerar las estructuras de M.T. empleadas en nuestro país como sigue:

1. Radial
2. Anillo
3. Doble alimentación
4. Alimentadores selectivos

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1. **Radial.** Esta estructura se constituye con cables troncales que salen en forma radial de la Subestación Eléctrica (S.E.), y con cables transversales que ligan estas troncales. Esta estructura se muestra en la figura 1.6.1.

Figura 1.6.1 Seccionamiento de una estructura radial subterránea de un sistema de distribución



2. **Anillo.** Esta estructura se constituye a base de bucles de igual sección, derivados de una o más fuentes de alimentación, siendo estas generalmente circuitos de líneas aéreas.

La aplicación de este tipo de estructuras es recomendable en zonas de densidad de carga entre 5 a 15 MVA/ Km<sup>2</sup> y en donde el aumento y tasa de población es pequeño.

3. **Doble alimentación.** Esta aplicación de estructuras se lleva a cabo preferentemente en zonas con grandes cargas puntuales, tales como cargas industriales, turísticas o comerciales las cuales generalmente presentan un área de expansión alargada.
4. **Alimentadores selectivos.** Este tipo de estructuras es recomendable para zonas de rápido crecimiento y densidades mayores de 15MVA/Km<sup>2</sup> y cuya expansión o área servida es considerable. Se aplica en zonas cuyo crecimiento de carga es marcadamente vertical, es decir, zonas de edificios altos y por tanto, grandes concentraciones de carga.

### 1.6.2 Estructuras de baja tensión

Las estructuras de baja tensión se pueden dividir en tres grandes tipos:

1. Radial simple
2. Radial interconectada
3. Malla o red automática en baja tensión (B.T.)

Al igual que los sistemas de mediana tensión (M.T.), estas redes mantienen los mismos principios de operación; sin embargo, en estos circuitos es posible trabajar con potencial energizado, y con las debidas precauciones, dota al sistema de una mayor flexibilidad.

1. **Radial simple.** En esta red cada subestación alimenta zonas por separado, debiendo ser los cables secundarios de un calibre adecuado a la carga por alimentar. Una falla en el secundario, o en una subestación afectará a todos los consumidores conectados a ésta rama. Sin embargo debido al grado de seccionalización, es posible trabajar con potencial y el tramo de cable dañado puede ser reparado sin afectar a los consumidores. Este tipo de estructuras se implementa en zonas habitacionales o comerciales de poca importancia.
2. **Radial interconectada.** Esta red es similar a la anterior, pero en este caso se puede transferir por medio de equipos de seccionamiento parte o toda la carga alimentada por una subestación eléctrica (S.E) , ya sea por falla, desbalance o simplemente por mantenimiento.
3. **Malla o red automática en B.T.** Este sistema de distribución es la solución adoptada en las principales ciudades del mundo, ya que ofrecen una confiabilidad muy alta comparada con otras estructuras y garantiza un servicio prácticamente continuo a los usuarios, aún en el caso de presentarse fallas en M.T. o B.T. del sistema.

## 1.7 Seguridad en los sistemas eléctricos de potencia

La seguridad en los sistemas eléctricos de potencia es fundamental para la confiabilidad y la continuidad del suministro de energía. Las características de una instalación eléctrica deben ser tales que cumplan con las exigencias fundamentales como:

1. **Eficiencia en el funcionamiento.** Los principales requisitos a cumplir dentro de la "eficiencia en el funcionamiento" son los siguientes:

- Garantizar una suficiente continuidad en el suministro de la energía, ya que deben tomarse las disposiciones necesarias para hacer frente a una falla en algún elemento o sistema.
- Mantener dentro de los límites tolerables algunos parámetros característicos de la instalación ( regulación de la tensión y frecuencia dentro de los límites aceptables).
- Mantener una protección selectiva en caso de falla de manera que solo quede fuera de servicio la parte en falla.
- Garantizar una protección suficiente contra los peligros de la electricidad (contactos accidentales de las personas con partes normalmente a tensión o con partes normalmente aisladas pero que puedan quedar con tensión por fallas en el aislamiento o por otras causas, peligro de incendio, etc.)<sup>(3)</sup>.

2. **Una suficiente duración en su vida útil.** La *duración en la vida de un equipo* o de una instalación, es el tiempo por el cual está en condiciones de ofrecer un funcionamiento adecuado y eficiente de manera que opere correctamente desde un punto de vista técnico, que el número de fallas que se presenten sea el menor posible o que las reparaciones que sean necesarias hacer no resulten costosas comparativamente con el costo del equipo o de la instalación etc.<sup>(3)</sup>.

### 1.7.1 Aspectos generales en la confiabilidad de los sistemas eléctricos

Los aspectos fundamentales relacionados con la operación de los sistemas eléctricos esta íntimamente ligado con:

- El sistema está operando normalmente, lo que implica que no hay interrupciones de servicio y no existe corto circuito o circuitos abiertos en el sistema.
- Prevención de fallas; consiste en que en el diseño se debe encontrar una solución óptima entre la confiabilidad y la economía en los circuitos usados para la prevención de fallas, ya que en teoría es posible diseñar sistemas libres de fallas, pero su costo puede ser muchas veces mayor que aquel que pueda ser económicamente realizable, esto no significa tampoco que el diseño más económico resulte el mejor ya que la confiabilidad del suministro a las cargas se debe lograr con la mejor técnica posible y al menor costo.

- La operación de los sistemas eléctricos está relacionado con la reducción de los efectos de las fallas, es decir que si la ocurrencia de fallas es posible, se debe buscar la forma de que sus efectos se minimicen y que su efecto se transmita a la menor cantidad posible de partes o elementos del sistema.

### 1.7.2 Requisitos de confiabilidad en el diseño de sistemas eléctricos de potencia

Algunos requisitos de diseño para suministrar la demanda en un sistema de potencia son:

- Disponer de una red convenientemente diseñada para interconectar los puntos de suministro y confiable en su operación para establecer un mínimo de interrupciones en el servicio.
- Conocer las características de la carga con cierto detalle, es decir la cantidad de corriente demandada durante los arranques y en condiciones normales de operación.
- Planear para el futuro, es decir prever espacios extras suficientes para ampliaciones adicionales en las subestaciones, capacidad de reserva en los transformadores y de más elementos en los circuitos, espacio necesario para circuitos de control adicionales.
- Cualquier sistema eléctrico requiere de cierto mantenimiento, con períodos de tiempo previamente establecidos, los relevadores deben ser probados, los interruptores verificados en su funcionamiento, los contactos de los interruptores y cuchillas limpias y los conductores y aisladores inspeccionados de posibles fallas estructurales y/o daños por calentamiento o contaminación.
- El aislamiento adecuado es uno de los factores importantes en el diseño de la confiabilidad, de los sistemas eléctricos, el nivel básico de aislamiento debe ser suficientemente alto como para soportar las sobretensiones que se presentan durante su operación sin que ocurran flameos y que los materiales usados como aisladores no deben ser afectados, hasta donde sea posible, por el calentamiento o contaminación<sup>(3)</sup>.
- El diseño debe soportar físicamente los esfuerzos producidos por fuerzas producidas debidas las corrientes de corto circuito, y otras fuerzas aplicadas externamente como aquellas que se aplican durante el montaje de conductores y aisladores en las subestaciones o las fuerzas que se presentan en las líneas de transmisión debidas a la presión del viento.
- Si es necesario, se considera como aspecto de diseño el blindaje o protección física que debe ser instalada para prevenir el acceso a los conductores energizados de pájaros, otros animales, insectos.

- La topología global del sistema es un elemento que puede afectar la confiabilidad del mismo y en este sentido se tiene que:
  - a) Los sistemas radiales son en forma inherente los menos confiables ya que en una falla sobre el alimentador principal puede afectar a la mayoría de las cargas.
  - b) Los circuitos en malla o en lazo son más confiables ya que cada carga en teoría se puede alimentar por dos trayectorias.
  - c) Las redes son las más confiables (pero también más caras) ya que cada carga puede ser alimentada por diferentes trayectorias.
- Un siguiente nivel en las consideraciones de diseño, es la minimización de daños por fallas, ya que un sistema de potencia que prácticamente se destruye o que sufre interrupciones frecuentes y prolongadas por ocurrencia de un corto circuito o alguna otra falla externa o problema local, es un sistema débil que prestará una pobre calidad de servicio.

Algunas consideraciones que se pueden hacer para tratar de minimizar los daños por fallas en el diseño son:

- Limitar en lo posible el valor de las corrientes de corto circuito para lo que se puede dispersar el sistema de manera que una corriente de corto circuito en cualquier punto sea minimizada.
- Usando limitadores de corriente, que son dispositivos (resistencias o reactancias inductivas) que sin afectar las condiciones de la carga ofrecen una alta impedancia a las corrientes de corto circuito.
- Usando transformadores de potencia que tengan una alta impedancia, aunque esto pueda afectar en forma adversa a la regulación de voltaje por lo que requiere de un estudio cuidadoso.
- Considerar los efectos mecánicos y de calentamiento producidos por las corrientes de corto circuito en los sistemas, de manera que los buses (Barras) y conductores deben soportar perfectamente las fuerzas debidas a las corrientes de corto circuito.

En adición a las precauciones que se deben tomar en consideración para reducir los daños causados por las corrientes de corto circuito se deben prever medios para minimizar los tiempos "fuera de servicio" cuando ocurre alguna falla.

Algunos aspectos que pueden complementar a los métodos de diseño en varias formas son:

- Alternar circuitos o formar mallas en los sistemas de distribución de tal forma que se establezca la posibilidad de transmitir la corriente por trayectorias alternativas a las cargas esenciales cuando alguna parte del sistema normal sea removida.

Se debe instalar capacidad de reserva en la transformación

- Los recierres automáticos en aquellos casos que son aplicables frecuentemente restablecen el servicio en forma rápida después de una falla transitoria.
- Algunos medios para distinguir cuando las variaciones de voltaje se deben a arranque de motores, por ejemplo, y no a corto circuitos previniendo de esta forma falsos disparos en la protección e interrupciones innecesarias.
- Considerar el uso adecuado de relevadores de protección para detectar rápidamente las fallas e iniciar las acciones apropiadas mucho más rápidamente que un operador humano<sup>(3)</sup>.

### 1.7.3 La automatización en la seguridad de los sistemas eléctricos

Actualmente la automatización juega un papel muy importante en el aspecto de la seguridad en los sistemas eléctricos de potencia. Existen dos funciones estrechamente ligadas con la seguridad dentro de la automatización y son las siguientes: el *Control Automático de Generación CAG* y el *Control de Supervisión y Adaptación de Datos CSAD*.

En el CAG normalmente se controla la frecuencia y también tiene el propósito de controlar la generación real del sistema, así como mantener la frecuencia y el intercambio neto de potencia (suma de potencias de enlace) a los niveles deseados por métodos computacionales. También el CAG abarca el despacho económico que trata con el costo mínimo de producción de potencia, cálculos de reserva de generación y otras funciones necesarias asociadas a la interfase con el despachador del sistema.

En lo que se refiere al CSAD, este se encarga de la recopilación de información de todo el sistema, muestra esta información al centro de control y tiene la habilidad para operar dispositivos en lugares remotos desde su mismo centro de control.



## 1.8 Estados de operación de los sistemas eléctricos

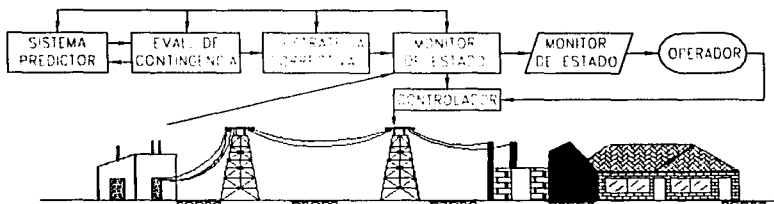
La evaluación de la seguridad en los sistemas eléctricos de potencia es manejada a través de la automatización, por medio de procedimientos computacionales, y así la supervisión de este por medio del monitoreo y el control automático en las siguientes etapas, denominadas estados de operación de los sistemas eléctricos:

- a) Estado de Operación Normal
- b) Estado de Operación de Alerta
- c) Estado de Operación de Emergencia
- d) Estado de Operación de Emergencia Extrema
- e) Estado de Recuperación o Restauración

En la figura 1.8.1, pueden observarse las etapas fundamentales que forman parte de las estrategias correctivas que se encuentran dentro del CAG y el CSAD. Se describe la telemedición y muestra el nivel de automatización del CSAD. Si en el CAG se mantiene la frecuencia y el intercambio neto de potencia a niveles aceptables, en ese nivel de automatización, un operador no tiene la capacidad de predecir cómo se comportaría un sistema para alguna carga adicional, ya que sólo conoce la condición actual. El predictor que se observa en la figura 1.8.1, representa un nivel de seguridad y es el que intercambia información con un evaluador de contingencias.

En el SEP, el predictor es un programa de computadora el cual modela al sistema. El modelado en estado estable es un programa digital de flujo de carga. El operador, mediante uso del programa, tiene la capacidad de estudiar cargas futuras del sistema a un tiempo determinado: una hora, un día, etc.

Figura 1.8.1 Diagrama esquemático de la seguridad y el control automático en los sistemas eléctricos de potencia



El evaluador de contingencias prueba si pueden tolerarse la salida de un generador y/o la interrupción de una línea. La función, como se observa en la figura 1.8.1, se ejecuta en ciertos intervalos (generalmente pocos minutos) en el sistema, así como en la condición futura representada por un flujo de carga.

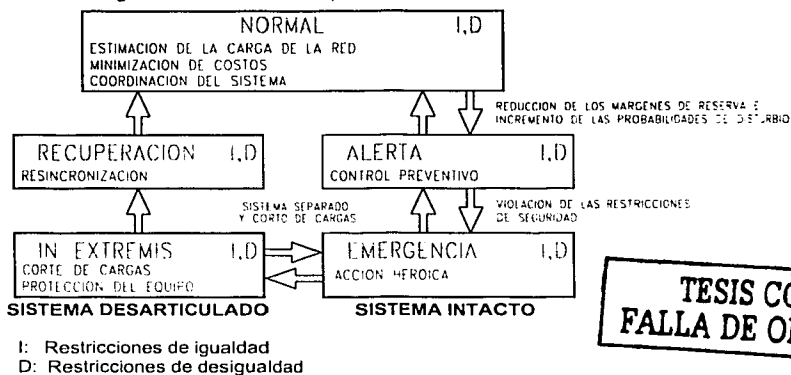
En el siguiente bloque denominado "Estrategia correctiva" se abarca funciones y algoritmos para ayudar al despachador a superar un problema que se ha presentado o que se espera.

La línea del diagrama de bloques que se observa entre el monitor de estado y el controlador, es un enlace que evita la función del operador y de esa manera se permite que entre en función el control automático.

### 1.8.1 Descripción de los estados de operación de los sistemas eléctricos

Con las funciones de seguridad ya mencionadas anteriormente, se pueden describir las cinco etapas en las cuales la seguridad ha sido clasificada. Esta clasificación se muestra en la figura 1.8.2<sup>(6)</sup>.

Figura 1.8.2 Estados de Operación de los Sistemas de Potencia



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

a) **Estado de operación normal.** Es el estado donde todas las cargas son conocidas. La generación es la adecuada para alimentar la demanda total existente y que ningún elemento del sistema está sobrecargado. Se tiene la frecuencia apropiada y, los niveles de voltaje son los deseados. En este estado los márgenes – tanto de generación como de transmisión—son suficientes y proveen de un nivel adecuado de seguridad con respecto al esfuerzo al cual el sistema puede ser sometido. Así ninguna emergencia inminente es detectada por el evaluador de contingencias. El objetivo es operar al sistema y permanecer en ese estado en términos de calidad y seguridad. También asigna la generación para minimizar el costo total o el consumo de combustible dentro de los márgenes de seguridad.

Si el nivel de seguridad cae por debajo de cierto valor de una escala, indicando que dejó de ser adecuado, o la probabilidad de que ocurra algún disturbio aumenta, entonces el sistema ha entrado en un *estado de operación alerta*.

b) **Estado de operación de alerta.** Todas las restricciones aún se satisfacen, pero los márgenes o la reserva existente es tal, que algún disturbio bien pudiera resultar en una violación de algunas "restricciones de seguridad", o sea que algún elemento del sistema se verá sobrecargado en forma más o menos severa pero en el cual todas las cargas son conocidas y los dispositivos no tienen sobre carga. El objetivo del operador debe ser retornar al estado normal tan rápido como se pueda, ya sea por una redistribución de generación real o reactiva o por alguna otra forma posible. Las flechas en la figura 1.8.2, corresponden al punto de estado de alerta al estado normal y viceversa. Si antes de concluir con la acción correctiva, ocurre un disturbio suficientemente severo, el sistema entra en un *estado de operación de emergencia*.

c) **Estado de operación de emergencia.** Las "condiciones de seguridad" se han violado y la seguridad del sistema se a fracturado, la calidad del servicio en términos de frecuencia o voltaje se ha demeritado (el nivel de seguridad es cero o es prácticamente inexistente). El sistema, sin embargo, todavía está intacto por lo que deberán ser tomadas medidas de emergencia (medidas heroicas) cuya finalidad será recuperar, cuando menos, el estado de alerta. La función del operador aquí es detener la emergencia y evitar una posible expansión del problema, y obtener un balance en la generación debido a la variación de las cargas o enlaces. Las flechas en la figura 1.8.2, muestran que el estado de emergencia puede resultar de alguno de los otros estados.

Si estas medidas no se toman a tiempo o son inefectivas y si el disturbio inicial o uno subsecuente son de gran severidad, entonces el sistema empieza a desintegrarse y entra en un estado llamado *en emergencia extrema*.

d) **En emergencia extrema.** Las "condiciones de igualdad" y las "condiciones de desigualdad" han sido violadas; el sistema no permanecerá intacto y se perderá un gran porcentaje de la carga total del sistema. La estrategia o las acciones de control de emergencia deben tener como finalidad salvar tantas partes del sistema como sea posible, de un colapso total. Una vez que el colapso se ha detenido se puede emprender el *estado de recuperación*<sup>(31)</sup>.

e) **Estado de recuperación o restauración.** Este consiste en tratar de reconectar el sistema y recuperar la carga. Esta condición de restauración denota que el deterioro del sistema ha sido superado, aunque las condiciones de operación están lejos de la normalidad, en que no todas las cargas se conocen y la calidad del servicio puede no ser normal. El objetivo del operador es restaurar el servicio tan rápido como sea posible, y retornar al estado normal. Las flechas del estado de restauración indican que el sistema posiblemente regresa al estado de alerta o al normal, dependiendo de las circunstancias.

## 1.8.2 Disturbios

La ocurrencia de algún disturbio en algunas o todas las cargas puede ser causa de que los voltajes y frecuencia se encuentran fuera de los rangos establecidos, pudiendo existir sobrecargas en líneas y / o equipo eléctrico.

Este fenómeno también está ligado con las primeras tres etapas de los estados de operación antes mencionados que son los estados, *normal*, *alerta* y *de emergencia*, que a su vez contiene los siguientes criterios para finalmente concluir en un estado deseado que es el estado de restauración:

- **Eventos iniciales.**- Son aquellas fallas en el estado de transmisión, generación, disparos accidentales, falsas operaciones en las protecciones, etc. que inician el disturbio.
- **Eventos consecuenciales.**- Son aquellos eventos que suceden como consecuencia de los iniciales.
- **Estado final del sistema.**- son las condiciones en que queda el sistema eléctrico después de los eventos iniciales y consecuenciales.
- **Prueba del sistema de transmisión.**- Son las pruebas que se efectúan para armar el sistema.
- **Ajuste en las condiciones del sistema.**- Son los cortes de carga manuales, la sincronización de las máquinas disponibles, petición de flujos mayores en enlace, etc. Que se efectúan con objeto de llevar al sistema en estado restaurativo.
- **Formación de islas.**- Esto se efectúa en el caso de que se encuentren con falla permanente los enlaces internos.
- **Resincronización.**- Es la integración de las islas a la totalidad del sistema<sup>(12)</sup>.

Las etapas de estos criterios se resumen en la figura 1.8.3.

### Actuación del operador de un sistema en disturbio

Debido a las alteraciones provocadas por las etapas mencionadas anteriormente es necesario tener en cuenta las siguientes exigencias:

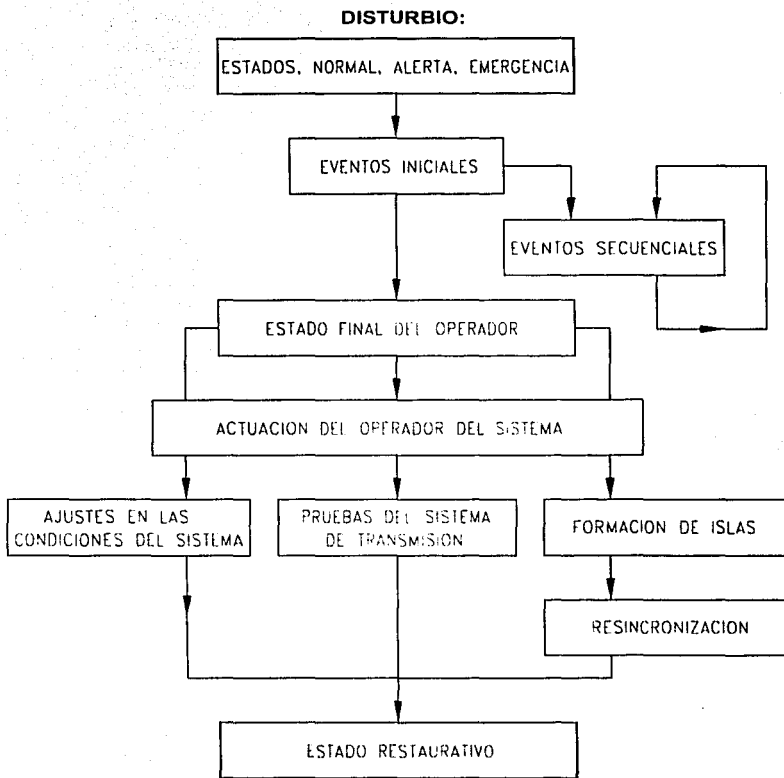
- Que las maniobras que ordena sean las correctas
- Que sean rápidas

Los mecanismos de actuación del operador son los que se muestran en la figura 1.8.4.

Las precauciones a tomar para evitar una situación de esta naturaleza podrían ser las siguientes:

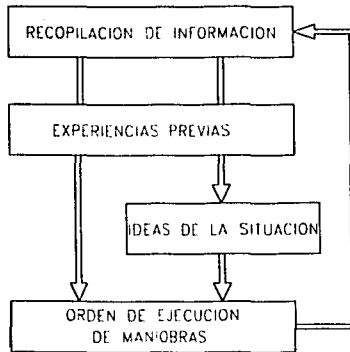
- La recopilación de información pueden ser reportes espontáneos y/o investigación propia del estado del equipo y líneas, condiciones físicas de las estaciones y *protecciones operadas*.

Figura 1.8.3 Etapas de disturbio en un sistema eléctrico de potencia



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura 1.8.4 Mecanismo de actuación del operador en un sistema eléctrico de potencia



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

- La idea de la situación es el establecimiento mental de las condiciones generales de la red, el o los eventos iniciales y consecuenciales.
- El orden de ejecución de maniobras es el conjunto de órdenes destinadas al restablecimiento de la normalidad del sistema.
- Cualquier error en los pasos anteriores puede tener graves consecuencias.
- La operación de protecciones es el principal indicativo para la toma de decisiones en el orden de ejecución de maniobras.
- El operador del sistema, se basa en que los esquemas de protecciones en operación son *confiables* y *selectivos*.
- Las experiencias previas y conocimientos del estado del equipo son fundamentales para la normalización de los estados del disturbio.
- La operación de los esquemas de los relevadores son los principales índices en que se basa el operador para ordenar maniobras.
- Las interconexiones y aumento de complejidad de la red y del tamaño de las unidades generadoras han aumentado los problemas de la estabilidad dinámica.

## CAPITULO 2

### ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

#### 2.1 Conceptos utilizados para el estudio de corto circuito

El análisis de sistemas eléctricos, trifásicos, equilibrados se reduce al análisis de un sistema monofásico. Ahora bien, cuando se produce un desequilibrio o falla en sistemas monofásicos o trifásicos es necesario un estudio que proporcione información sobre corrientes y voltajes del sistema en condiciones de falla ya que, como se sabe por estudios anteriores, cada fase tiene un valor de voltaje y corriente diferente, además de las contribuciones de corriente y voltaje que existan entre ellas.

##### 2.1.1 Naturaleza de las corrientes de corto circuito

Una corriente de corto circuito es aquella que circula en un circuito eléctrico cuando existe el contacto entre dos o más conductores al perderse el aislamiento entre ellos o entre ellos y tierra.

La magnitud de la corriente de corto circuito es mucho mayor que la corriente nominal o de carga que circula por el circuito.

En condiciones normales de operación, la carga consume una corriente proporcional al voltaje aplicado y a la impedancia de la propia carga. Si se presenta un corto circuito en las terminales de la carga, el voltaje queda aplicado únicamente a la baja impedancia de los conductores de alimentación y a la impedancia de la fuente hasta el punto de corto circuito, ya no oponiéndose la impedancia normal de la carga y generándose una corriente mucho mayor.

El estudio de corto circuito, además de proporcionar información sobre corrientes y voltajes de un sistema eléctrico durante condiciones de falla, se requiere también para:

- Determinar las características de capacidad interruptiva y momentánea de interruptores y otros dispositivos de protección localizados en el sistema.
- Calcular los esfuerzos dinámicos en barras de subestaciones y tableros.
- Seleccionar conductores y diseñar un adecuado sistema de relevadores de protección, el cual deberá reconocer la existencia de la falla e iniciar la operación

de los dispositivos de protección, asegurando así la mínima interrupción y evitando daños a los equipos.

### 2.1.2 Fuentes de corriente de corto circuito

Cuando se determinan las magnitudes de las corrientes de corto circuito, es extremadamente importante que se consideren todas las fuentes de corriente de corto circuito y que las reactancias características de estas fuentes sean conocidas.

Existen 4 fuentes básicas de corriente:

1. Generadores
2. Motores síncronos
3. Motores de inducción
4. Sistema de la Cia. suministradora

Todas ellas alimentan con corriente de corto circuito a la falla.

1. **Generadores.** Los generadores son movidos por turbinas, motores diesel, u otro tipo de primotores. Cuando ocurre un corto circuito en el circuito al cual está conectado el generador, éste continúa produciendo voltaje porque la excitación de campo se mantiene y el primotor sigue moviéndolo a velocidad normal. El voltaje generado produce una corriente de corto circuito de gran magnitud, la cual fluye del generador al punto de falla.

Este flujo de corriente se limita únicamente por la impedancia del generador y las impedancias del circuito entre el generador y el punto donde ocurre la falla. Si el corto circuito ocurre en las terminales del generador, la corriente queda limitada solamente por la impedancia de la máquina.

2. **Motores Síncronos.** Los motores síncronos están construidos substancialmente igual que los generadores; tienen un campo excitado por corriente directa y un devanado en el estator por el cual fluye la corriente alterna. Normalmente el motor toma la potencia de la línea y convierte la energía eléctrica en energía mecánica.

Durante un corto circuito en el sistema, el motor síncrono actúa como un generador y entrega corriente de corto circuito. Tan pronto como el corto circuito se establece, el voltaje en el sistema se reduce a un valor muy bajo. Consecuentemente el motor deja de entregar energía a la carga mecánica y empieza a detenerse.

Sin embargo, la inercia de la carga y el rotor impiden al motor que se detenga; en otras palabras, la energía rotatoria de la carga y el rotor mueven al motor síncrono como un primotor mueve a un generador.

La magnitud de la corriente de corto circuito depende de la potencia, voltaje nominal y reactancia del motor síncrono y de la reactancia del sistema hasta el punto de falla.



**3. Motores de inducción.** La inercia de la carga y el rotor de un motor de inducción tiene exactamente el mismo efecto sobre el motor de inducción como en el motor síncrono; siguen moviendo al motor después de que ocurre un corto circuito en el sistema.

Sólo existe una diferencia: El motor de inducción no tiene un campo excitado por corriente directa, pero existe un flujo en el motor durante la operación normal. Este flujo actúa en forma similar al flujo producido por el campo de corriente directa en el motor síncrono.

El campo del motor de inducción se produce por inducción desde el estator en lugar del devanado de corriente directa.

El flujo del rotor permanece normal mientras se aplica voltaje al estator desde una fuente externa, sin embargo, si la fuente externa de tensión se elimina súbitamente, esto es, cuando ocurre el corto circuito en el sistema, el flujo en el rotor no puede cambiar instantáneamente.

Debido a que el flujo del rotor no puede decaer instantáneamente y la inercia sigue moviendo al motor, se genera un voltaje en el devanado del estator causando una corriente de corto circuito que fluye hasta el punto de falla hasta que el flujo del rotor decae a cero.

La magnitud de la corriente de corto circuito producida por el motor de inducción depende de su potencia, voltaje nominal, reactancia del motor y la reactancia del sistema hasta el punto de falla. Consecuentemente, el valor inicial simétrico de la corriente de corto circuito es aproximadamente igual a la corriente de arranque a tensión plena del motor.

**4. Sistema de la compañía suministradora.** Los modernos sistemas eléctricos de las compañías suministradoras, representan una grande y compleja red de plantas generadoras interconectadas.

En un sistema típico, los generadores no se ven afectados por las altas corrientes de corto circuito que se producen en una planta industrial, únicamente aparece en ellos un incremento en su corriente de carga que tiende a permanecer constante.

Las líneas de transmisión y distribución, así como los transformadores, introducen impedancias entre las plantas generadoras y los consumidores industriales; de no ser así, las compañías suministradoras serían una fuente infinita de corriente de falla.

La representación de la compañía suministradora para el estudio de corto circuito, será una impedancia equivalente referida al punto de conexión (punto de acometida).

### **2.1.3 Dispositivos limitadores de la corriente de corto circuito**

Los componentes que limitan los valores de la corriente de corto circuito son:

- Impedancias de transformadores
- Reactores limitadores
- Impedancia de cables
- Impedancia de barras conductoras
- Fusibles limitadores de corriente

Debido a su impedancia, los transformadores reducen la magnitud de las corrientes de corto circuito producidas por las fuentes a las que están conectados.

Los reactores limitan los valores de corriente de corto circuito mediante la inserción intencional de una reactancia en el circuito. Sin embargo, los reactores tienen algunas desventajas muy notables. Producen una caída de tensión que puede ocasionar disminuciones de tensión en el sistema al ocurrir la falla o durante el arranque de motores de gran capacidad. Pueden afectar la regulación de tensión en forma adversa y aún activar los dispositivos de baja tensión, además de ser elementos que consumen energía.

### **2.1.4 Diagrama unifilar**

Un diagrama unifilar es la representación de un sistema eléctrico balanceado (una, dos, tres fases) mediante una sola fase o hilo. Esta representación ayuda a la simplificación de los cálculos de voltajes, corrientes y potencias de los sistemas eléctricos balanceados, en los que cada fase tiene el mismo valor de voltaje (V), corriente (I) y potencia (S).

En este diagrama deben indicarse todos los elementos que integran el sistema, tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión y alimentadores, reactores, motores, etc., con sus voltajes y potencias nominales, así como sus impedancias o reactancias referidas a sus características eléctricas nominales.

En el diagrama unifilar también se deben señalar las diferentes fallas que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia, la mayoría de éstas son asimétricas y pueden consistir en corto circuitos asimétricos.

Como consecuencia de dichas fallas, circulan corrientes desequilibradas, por lo cual es necesario estudiar estos casos de desequilibrio causados por corto circuito.

### 2.1.5 Impedancia de secuencia

Se designan como:

- Z1 = Impedancia de secuencia positiva
- Z2 = Impedancia de secuencia negativa
- Z0 = Impedancia de secuencia cero

Estos valores representan las impedancias del sistema al flujo de corrientes positivas, negativas y de secuencia cero.

Las máquinas síncronas tienen valores típicos de reactancias:

$X_d'$  = Reactancia subtransitoria

$X_d''$  = Reactancia transitoria

$X_s$  = Reactancia síncrona

Todas ellas de secuencia positiva.

La reactancia de secuencia negativa ( $X_2$ ) generalmente es igual a la subtransitoria, excepto en los casos de generadores hidráulicos sin devanados amortiguadores. La reactancia de secuencia cero ( $X_0$ ) generalmente es menor que las otras.

Los transformadores tienen reactancias de secuencia positiva y negativa iguales ( $X_1 = X_2$ ). La reactancia de secuencia cero ( $X_0$ ) también tiene el mismo valor excepto en los transformadores tipo a acorazado.

Las corrientes de secuencia cero no fluyen si el neutro del transformador no está conectado a tierra. Cuando dichas corrientes no fluyen,  $X_0$  se considera infinita.

En los transformadores conectados en estrella-delta, la corriente de secuencia cero puede fluir a través del neutro de la estrella si el neutro se conecta a tierra. No hay corrientes de secuencia cero que fluyan en el lado de la conexión delta.

En un transformador conectado en estrella-estrella con neutros puestos a tierra, las corrientes fluyen tanto en el primario como en el secundario. La resistencia de los devanados del transformador normalmente no se toma en cuenta en los cálculos de corto circuito, excepto cuando se aplican algunas normas para la selección de interruptores.

En los cables y líneas de transmisión las reactancias de secuencia positiva y negativa se consideran iguales. En las líneas de transmisión, la reactancia de secuencia cero dependerá de si el retorno de la corriente se hace a través del hilo de guarda o no. En los cables la reactancia de secuencia cero dependerá de las vías de retorno para la corriente de esta secuencia.

## 2.1.6 Impedancia de los elementos

Estas impedancias o reactancias generalmente expresadas en por ciento o en valores por unidad, la proporcionan los fabricantes del equipo o se obtienen de normas, así por ejemplo, la Tabla 2.1.1 (Norma CCONNIE 2.1-2) nos proporciona un rango de valores de impedancias para transformadores de potencia y la Tabla 2.1.2 (Norma 141-1976 IEEE), valores típicos para reactancias de máquinas rotatorias.

## 2.1.7 Sistemas en por unidad

Para el estudio y solución de este tipo de fallas se utiliza el método estándar de *en por unidad* (en p.u.), debido a que el cálculo de los parámetros de los sistemas eléctricos se simplifica si todas las cantidades eléctricas ( impedancias, tensiones, corrientes, potencias, etc. ) , se expresan como el cociente de la cantidad eléctrica y una magnitud de referencia (llamada base) de las mismas unidades.

$$\text{valor en p.u.} = \text{valor real} / \text{valor base}$$

Tabla 2.1.1 Impedancia referida a 60 Hz

CLASE (Kv)	NBAI (Kv)	KV		Z%		
		AT	BT	OA	FA,FOA, 1er.PASO	FA,FOA 2do.PASO
15	110	15	1.2-15	4.0-6.0	4.0-6.5	
25	150	25	1.2-15	4.0-6.0	4.0-6.5	
34.5	200	34.5	1.2-15	4.5-7.0	4.5-7.5	
46	250	46	1.2-25	5.0-7.5	5.0-10.0	
69	350	69	1.2-34.5	5.0-9.0	6.0-12.0	7.0-15.0
92	450	92	15-34.5	5.0-9.0	7.0-12.0	8.0-15.0
115	550	115	15-34.5	6.0-9.5	7.0-14.0	8.0-16.0
138	650	138	15-34.5	6.0-10.0	7.0-14.0	8.0-16.0
161	750	161	15-69	6.0-10.0	8.0-15.0	9.0-17.0
196	900	196-230	15-69	7.0-11.0	9.0-15.0	10.0-18.0
230	1050	230	15-69	7.0-12.0	9.0-16.0	10.0-19.0
315	1425	34.5-161	15-25	8.0-12.0	10.0-16.0	10.0-20.0
			34.5-161	9.0-13.0	10.0-17.0	10.0-21.0

**Tabla 2.1.2** Valores de reactancia típicos de maquinas síncronas e inducción, estimación de maquinas KVA en por unidad

	$X_d''$	$X_d'$
<b>Generadores</b>		
2 polos	0.09	0.15
4 polos	0.15	0.23
<b>Generadores de polos característicos</b>		
12 polos o menos	0.16	0.33
14 polos o más	0.21	0.33
<b>Motores síncronos</b>		
6 polos	0.15	0.23
8-14 polos	0.20	0.30
16 polos o más	0.28	0.40
<b>Motores de inducción arriba de 600V</b>	0.17	
<b>Motores de inducción menores a 50HP</b>	0.25	

Con este método se tienen las siguientes **ventajas**:

- Los parámetros de los elementos del sistema tienden a caer en un intervalo relativamente angosto, lo que hace resaltar estos valores y permite detectar errores.
- Se eliminan los transformadores ideales que aparecen en la red. La tensión en las diferentes secciones de la red es normalmente cercano a la unidad.
- Los fabricantes de equipo eléctrico expresan normalmente la impedancia de sus aparatos en por ciento o en por unidad de los valores nominales que figuran en la placa de características.

Sin embargo, también el método presenta las siguientes **desventajas**:

- El sistema modifica los componentes de los circuitos equivalentes, haciéndolos más abstractos.
- Algunas veces los desplazamientos de fase que están claramente presentes en un circuito normal, desaparecen en el circuito en por unidad.

En el *sistema en por unidad* existen cuatro cantidades base:

- Potencia base
- Tensión base
- Corriente base
- Impedancia base

Usualmente se selecciona un valor conveniente para la potencia base en volt-ampere y una tensión base en determinado nivel, quedando establecidas las tensiones base en otros niveles por la relación de transformación de los transformadores.

Cabe aclarar que el sistema en por unidad es simplemente un método de normalización.

En las fórmulas siguientes, las tensiones base son voltajes de fase a fase en KV y la potencia base es la trifásica en KVA o MVA.

La corriente base y la impedancia base en cada nivel se obtienen a partir de las relaciones:

$$S = VI \quad \text{y} \quad V = IZ$$

De donde, para un sistema trifásico se obtienen las siguientes relaciones:

$$I_{base} = \frac{KVA_{base}}{\sqrt{3}KV_{base}} = \frac{MVA_{base} \cdot 1000}{\sqrt{3}KV_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{(KV_{base})^2}{MVA_{base}}$$

Cuando las impedancias de los elementos del sistema se expresan en ohms, se convierten en valores en por unidad mediante la siguiente relación:

$$Z_{p.u.} = \frac{\text{impedancia en ohms} \times MVA_{base}}{(KV_{base})^2}$$

La reactancia de los motores y generadores expresada en por unidad y referida a su potencia en KVA, se convierte en la nueva base con la relación:

$$X_{p.u.} = X_{p.u. \text{ Motor}} \frac{KVA_{base}}{KVA_{Motor}}$$

Las reactancias para representar las máquinas rotatorias de la compañía suministradora, se determinan suponiendo que los MVA disponibles toman el valor de 1.0 en por unidad referida a una base unitaria en MVA, o que una potencia de 1.0 en por unidad corresponde a una reactancia de 1.0 en p.u. a una tensión de 1.0 en p.u.

## 2.1.8 Componentes simétricas

Al ocurrir una falla en un sistema trifásico balanceado y dependiendo del tipo de ésta, las magnitudes y posiciones de las tensiones y corrientes varían, convirtiéndose en un sistema desbalanceado, cuyo análisis para la determinación de estas magnitudes y ángulos requiere del método denominado *componentes simétricas*.

Las componentes simétricas son una herramienta matemática, que se aplican comúnmente en el cálculo de fallas en un sistema eléctrico de potencia.

El método consiste en que cualquier sistema desbalanceado de  $N$  fasores, puede ser resuelto como la suma de  $N$  sistemas de fasores balanceados, llamados componentes simétricas de los fasores originales.

Por lo tanto, los fasores desequilibrados de un sistema trifásico pueden descomponerse en tres sistemas equilibrados de fasores que son: un sistema de secuencia positiva (1), un sistema de secuencia negativa (2) y otro de secuencia cero (0), que sumados vectorialmente dan como resultado el sistema de fasores desbalanceado original.

Este conjunto de componentes balanceados son:

- De secuencia positiva, que consiste de tres fasores de igual magnitud, separados cada uno por  $120^\circ$  y con la misma secuencia de fases que los fasores originales (abc).
- De secuencia negativa, que consiste de tres fasores de igual magnitud, separados cada uno por  $120^\circ$  y con la secuencia de fases (acb).
- De secuencia cero, que consiste de tres fasores de igual magnitud y con cero grados de espaciamiento entre ellos (están en fase).

### 2.1.9 Diagrama de secuencias

Una condición para un sistema balanceado o simétrico es que las tres componentes de secuencia positiva, negativa y cero sean independientes entre sí, por lo tanto, al analizar una falla es necesario formar tres diagramas de secuencias.

En el *diagrama de secuencia positiva* se deberán conocer todas las tensiones en por unidad de los nodos del sistema; en caso contrario, se asignará el valor de 1.0 p.u., a cada nodo, debido a que la tensión real siempre es cercano a la unidad. En este diagrama deberán mostrarse las impedancias de los generadores, transformadores y líneas de transmisión.

El *diagrama de secuencia negativa*, generalmente, es idéntico al diagrama de secuencia positiva, excepto que los voltajes de los generadores no deben aparecer y que la reactancia de secuencia negativa de las máquinas síncronas ocasionalmente puede ser diferente al valor de secuencia positiva.

El *diagrama de secuencia cero* depende del tipo de conexiones de los transformadores, por lo que es necesario hacer consideraciones especiales y las impedancias a tierra, tales como reactores o resistencias conectadas entre los neutros de generadores o transformadores y tierra, únicamente se deben mostrar en los diagramas de secuencia cero y con tres veces su valor nominal.

En general, los transformadores conectados en estrella aterrizada permiten el flujo de las corrientes de secuencia cero, desde el sistema que está conectado a un lado del banco al sistema que está conectado al otro lado del banco, de modo que en este caso, la conexión para el banco de transformadores es una conexión en serie en cada uno de los tres diagramas de secuencia.

Los bancos de transformadores conectados en estrella aterrizada-delta, permiten el flujo de corriente a través del neutro aterrizado, pero bloquean el paso de esta corriente de secuencia cero de un lado a otro del banco; por lo tanto, la impedancia representativa del banco de transformadores se deben conectar en serie con el neutro y la conexión en delta en circuito abierto.

En un sistema balanceado, las corrientes de secuencia negativa y cero no pueden circular, debido a que las máquinas síncronas o de inducción generan solamente tensiones de secuencia positiva. Cuando ocurre una falla y dependiendo del tipo de ésta, se puede considerar como una conversión, en la cual se cambia la tensión de secuencia negativa y cero en el punto de falla. Así la distribución de las componentes de secuencia negativa y cero pueden ser determinadas, suponiendo que se tiene en los diagramas de secuencia negativa y cero, una sola fuente de tensión en la falla.

Resumiendo, se puede decir que:

- a) Tensiones de secuencia positiva, negativa y cero inducen únicamente corrientes de secuencia positiva, negativa o cero, respectivamente.
- b) Corrientes de determinada secuencia sólo podrán producir tensiones de esa misma secuencia.
- c) Por lo tanto, no existe interconexión entre secuencias distintas.
- d) Los elementos activos de la red sólo generan voltaje de secuencia positiva; lo anterior es obvio, para que una máquina genere tensiones de secuencia negativa, tendría que girar en sentido contrario. Sería asimismo imposible que  $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$  fueran iguales en magnitud y estuvieran en fase, como es la característica de las cantidades de secuencia cero.
- e) Las tensiones de secuencia negativa y cero se consideran en el punto de falla y disminuyen en magnitud conforme se alejan de éste.
- f) La tensión de secuencia positiva es cero en el punto de falla y máximo en los puntos de generación.
- g) Como las corrientes de secuencia cero están en fase y son de la misma magnitud, necesitan el neutro o la conexión a tierra para poder circular.



## 2.2 Análisis de fallas

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Comúnmente los tipos de fallas estudiados son trifásicos y monofásicos.

De acuerdo con el tipo de análisis, se deben seleccionar del diagrama unificar las reactancias o impedancias apropiadas para la realización del estudio; así por ejemplo, para una falla trifásica se seleccionan únicamente reactancias o impedancias de secuencia positiva (+), mientras que para el cálculo de una falla de línea a tierra se seleccionan reactancias o impedancias de secuencia positiva (+), negativa (-) y cero (0).

La impedancia o reactancia de los elementos pasivos (transformadores, líneas de transmisión, cables) se considera constante a través del tiempo.

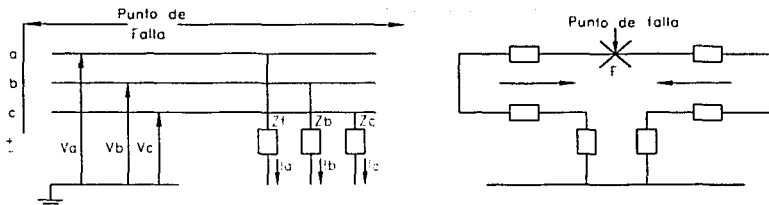
La impedancia o reactancia de los elementos activos (máquinas rotatorias) se representa en estos estudios como una fuente de voltaje constante en serie con su impedancia, la cual varía a través del tiempo, después de ocurrida la falla.

### • Procedimiento:

1. Dibujar un diagrama correspondiente al punto de falla mostrando todas las conexiones de las fases en dicho punto. Se indicaran todas las corrientes, voltajes, impedancias considerando, polaridades y dirección.

La figura 2.2.1 se empleará en el siguiente análisis.

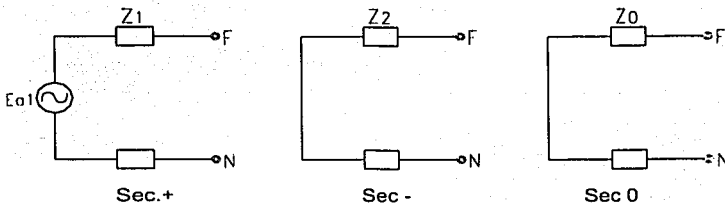
Figura 2.2.1 Diagrama de punto de falla



- a) El sistema consiste de impedancias balanceadas conectadas a la izquierda y a la derecha del punto de falla
- b) Se conoce el equivalente de Thevenin de este punto
- c) Las tensiones en el punto de falla los consideramos de fase a neutro
- d) Las corrientes de falla fluyen del sistema hacia el punto F

2. Escribir las condiciones de frontera relacionando las tensiones y corrientes conocidos para el tipo de falla en estudio (estados de tensiones y corrientes).
3. Transformar las corrientes y/o voltajes del punto anterior, de fase abc a secuencias 0,1,2, usando las transformaciones A, A<sup>-1</sup>.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}}_{A^{-1}} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$



4. Examinar las corrientes de secuencias para determinar la conexión apropiada de las terminales F y N de las redes de secuencia para satisfacer las condiciones que se indiquen en el punto 3.
5. Examinar las tensiones de secuencia para determinar la conexión apropiada de las terminales F y N de las redes de secuencia agregando impedancias (si se requieren) para satisfacer las condiciones de los puntos 3 y 4. Al quedar interconectadas las redes deberán cumplirse simultáneamente las condiciones de los puntos 4 y 5.

En el sistema eléctrico pueden ocurrir los tipos de Falla mostrados en la figura 2.2.2.

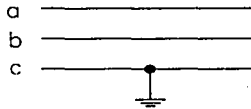
**Fallas asimétricas :** Falla monofásica, Bifásica, Bifásica a Tierra, son las que producen asimetría en el sistema eléctrico. (las impedancias están desbalanceadas por lo tanto las corrientes son diferentes).

**Falla simétrica :** Falla Trifásica (las impedancias están balanceadas por lo tanto las corrientes son iguales).

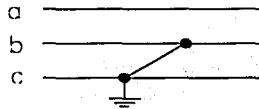
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura 2.2.2 Tipos de fallas

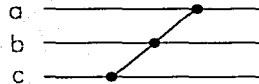
- Falla monofásica (Fase a Tierra)



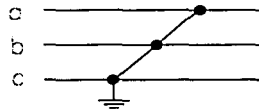
- Falla Bifásica a tierra  
(Falla entre dos fases y tierra)



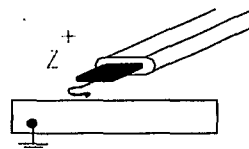
- Falla Trifásica  
(Falla entre tres fases)



- Falla Trifásica a tierra



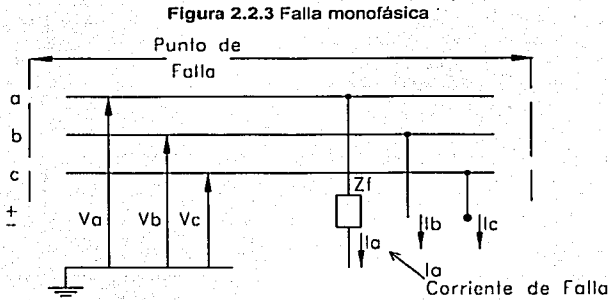
- Falla Sólida
- Falla a través de impedancia



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.2.1 Falla monofásica (1 fase a tierra)

### 1. Diagrama.



### 2. Condiciones de frontera.

$$I_b = I_c = 0 \quad (2.5)$$

$$V_a = I_a Z_f \quad (2.6)$$

### 3. Transformación de fases a secuencia.

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} I_a \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad (2.8)$$

De las ecuaciones 2.6 y 2.8 :

$$V_a = I_a Z_f \quad I_a = 3I_{a1}$$

$$\begin{aligned} V_a &= 3I_{a1} Z_f \\ V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} &= 3I_{a1} Z_f \end{aligned} \quad (2.9)$$

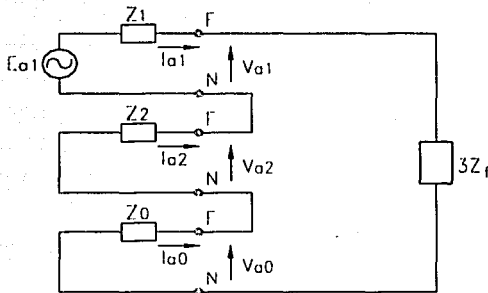
### 4.- Examinar las corrientes de secuencias.

$$E_{a1} - I_{a1} Z_1 = V_{a1}$$

$$-I_{a2} Z_2 = V_{a2}$$

$$-I_{a0} Z_0 = V_{a0}$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



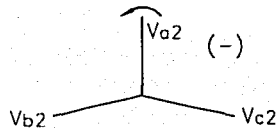
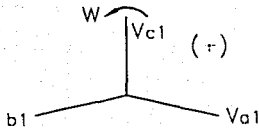
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

$$V_h = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$

Secuencia cero

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}$$

(2.10)



5.- Examinar las tensiones de secuencia

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + 3Z_f}$$

Corriente de neutro [ p.u ]

$$I_n = 3I_{a0}$$

Para obtener la  $I_n$  en [Amp] hay que multiplicar por la  $I_{base}$  en ese punto

Para la falla con impedancia

$$I_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_n + 3Z_f}$$

Para falla s3lida

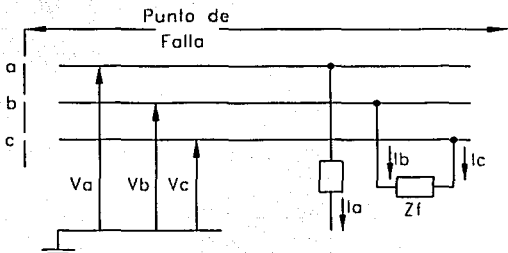
$$I_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.2.2 Falla de fase a fase (falla bif3sica)

### 1. Diagrama.

Figura 2.2.4 Falla bif3sica



### 2. Condiciones de Frontera

$$I_{a0} = 0 \quad (2.11)$$

$$I_b = -I_c \quad (2.12)$$

$$V_b - V_c = I_b Z_f \quad (2.13)$$

### 3. Transformaci3n de fases a secuencias

de (2.11)  $I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (2.14)$

de (2.12)  $I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} = -(I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}) \quad (2.15)$

Agrupando:

$$2I_{a0} + (a^2 + a)(I_{a1} + I_{a2}) = 0$$

De la ecuaci3n (2.14):

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

Sustituyendo y tomando en cuenta que  $(a^2 + a) = -1$

$$2I_{a0} + (-1)(-I_{a0}) = 0$$

$$3I_{a0} = 0 \quad (2.16)$$

$$I_{a0} = 0 \quad (2.17)$$

La ecuación (2.14) se simplifica a

$$I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (2.18)$$

De la ecuación (2.13)

$$V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} - (V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}) = (I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2})Z_f$$

4. Examinar las corrientes de secuencias.

De la ecuación (2.13)

$$V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} - (V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}) = (I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2})Z_f$$

$$V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} = (I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2})Z_f + (V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2})$$

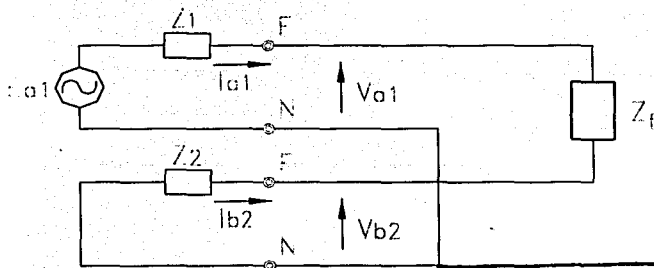
5. Examinar las tensiones de secuencia.

6.

Agrupando y considerando

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad \text{y} \quad I_{a0} = 0$$

$$V_{a1} = I_{a1}Z_f + V_{a2} \quad (2.19)$$



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_f}$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad \text{como } I_{a1} = -I_{a2}$$

$$I_b = a^2 I_{a1} - a I_{a1} = (a^2 - a) I_{a1}$$

$$(a^2 - a) = \sqrt{3} \angle -90^\circ = -j\sqrt{3}$$

$$I_b = -I_c = -j\sqrt{3} I_{a1}$$

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

Para falla sólida:

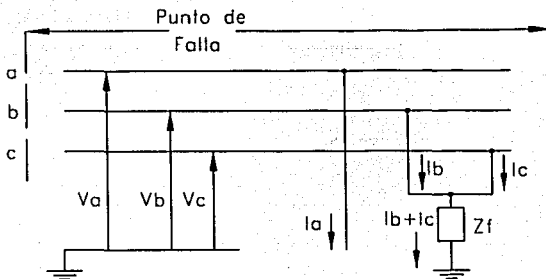
$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.2.3 Falla de 2 fases a tierra (bifásica a tierra)

#### 1. Diagrama.

Figura 2.2.5 Falla bifásica a tierra



#### 2. Condiciones de frontera.

$$I_{a0} = 0 \quad (2.20)$$

$$V_b = V_c \quad (2.21)$$

$$V_b = (I_c + I_b) Z_f \quad (2.22)$$



### 3. Transformación de fases a secuencias

$$I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (2.23)$$

De la ecuación (2.21)

$$V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} a^2 V_{a1} + a V_{a2} &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} \\ (a^2 - a) V_{a1} &= (a^2 - a) V_{a2} \\ \underline{V_{a1} = V_{a2}} \end{aligned} \quad (2.25)$$

De la ecuación (2.22)

$$V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} = (I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}) Z_f \quad (2.26)$$

$$V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} = [2I_{a0} + (a^2 + a)I_{a1} + (a^2 + a)I_{a2}] Z_f$$

### 4. Examinando las corrientes de secuencias.

De la ecuación (2.23)

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

De la ecuación (2.25)

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

$$V_{a0} + (a^2 + a)V_{a1} = [2I_{a0} + (a^2 + a)(-I_{a0})] Z_f$$

Considerando que  $(a^2 + a) = -1$

$$V_{a0} - V_{a1} = [2I_{a0} + (-1)(-I_{a0})] Z_f$$

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

$$V_{a0} = 3I_{a0} Z_f + V_{a1} \quad (2.27)$$

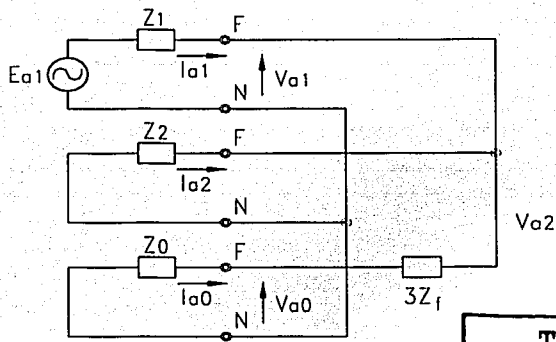
### 5. Análisis de corrientes

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Zeq}$$

$$Zeq = \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_f}$$

$$V_{a0} = 3I_{a0} Z_f + V_{a1}$$





TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)}$$

$$I_{a0} = -I_{a1} \frac{Z_2}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)}$$

(2.28)

Sustituyendo el valor de  $I_{a1}$  en la ecuación (2.28)

$$I_{a0} = \frac{E_{a1} Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1 + 3Z_f Z_1 + 3Z_f Z_2}$$

Para una falla sólida:

$$I_{a0} = \frac{E_{a1} Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1}$$

$$I_b + I_c = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

$$I_b + I_c = 2I_{a0} + (a^2 + a)I_{a1} + (a^2 + a)I_{a2}$$

$$I_b + I_c = 2I_{a0} + (a^2 + a)(I_{a1} + I_{a2})$$

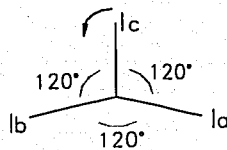
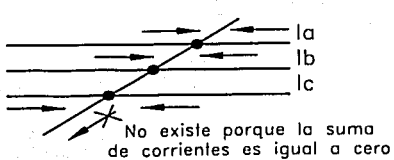
$$a^2 + a = -1$$

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

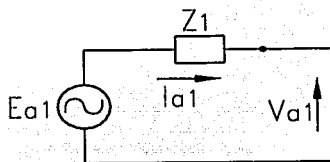
$$I_b + I_c = 3I_{a0}$$

## 2.2.4 Falla trifásica

Figura 2.2.6 Falla trifásica



## Falla Simétrica y equilibrada



$$I_a = I_b = I_c$$

$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = 0$$

$$I_{a1} = ?$$

$$I_{b1} = a^2 I_{c1}$$

$$I_{c1} = a I_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1}$$

$$I_a = I_{a1}$$

$$I_a = I_b = I_c = I_{a1}$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La tabla 2.2.1 nos muestra las formulas para calcular las corrientes de corto circuito para los diferentes tipos falla.

Tipo de Falla	Corriente de Secuencia	Corriente de Falla
LT	$I_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$	$I_a = 3I_{a0}$
LL	$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2}$	$I_b = -I_c = -j\sqrt{3}I_{a1}$
LLT	$I_{a0} = \frac{E_{a1}Z_2}{Z_1Z_2 + Z_2Z_0 + Z_0Z_1}$	$I_b + I_c = 3I_{a0}$
LLL	$I_{a1} = \frac{E_{a1}}{Z_1}$	$I_a = I_{a1}$

Tabla 2.2.1 Formulas para calculo de corrientes de corto circuito para diferentes tipos de fallas

Para diseño de redes de tierras se presentan los siguientes casos.

Si:

Caso 1. ( $Z_1 = Z_2$ )  $Z_0 Z_1 > Z_2^2$  por lo tanto; la falla LT es mas crítica.

Caso 2. ( $Z_1 = Z_2$ )  $Z_0 Z_1 < Z_2^2$  por lo tanto; la falla LLT es mas crítica.

Caso 3. ( $Z_1 = Z_2$ )  $Z_0 Z_1 > Z_1 Z_1, Z_0 > Z_1$  por lo tanto; la falla LT es más crítica.

Caso 4. ( $Z_1 = Z_2$ )  $Z_0 Z_1 > Z_1 Z_1, Z_0 < Z_1$  por lo tanto; la falla LLT es más crítica.

$$Z_0 < Z_1 \quad LT > LLL$$

$$Z_0 > Z_1 \quad LT < LLL$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 2.3 Métodos de solución de corto circuito

Los estudios de corto circuito tienen varios objetivos, y el método empleado para una solución en particular depende de varios factores como son el tamaño del sistema bajo estudio, los resultados esperados y la aplicación de estos. En particular para las instalaciones industriales y los sistemas de distribución se pueden emplear métodos relativamente simples, fáciles de aprender y rápidos en su concepción que permitan al Ingeniero o al diseñador resolver un problema con un cierto grado de aproximación sin emplear mucho tiempo y esfuerzo.

### 2.3.1 Método directo (ohmico)

(Ohms sobre una base común en KV)

Se trata de obtener una falla en la cual todas las impedancias están referidas a una misma base con el fin de poder efectuar todas las combinaciones y reducciones necesarias para llegar a representar todo el sistema por medio de una impedancia única equivalente entre la fuente y la falla.

Esto requiere determinar una impedancia  $Z_2$  que pueda ser usada con un voltaje arbitrariamente seleccionado  $V_2$  tal, que tome la misma potencia en KVA que cuando la impedancia real  $Z_1$  se use con el voltaje real  $V_1$ .

Lo anterior se puede representar algebraicamente en la siguiente forma:

- La condición fundamental es:

$$V_2 I_2 = V_1 I_1 \quad (2.29)$$

Como

$$V_1 = Z_1 I_1 \quad \text{y} \quad V_2 = Z_2 I_2$$

Entonces:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2}; I_1 = \frac{V_1}{Z_1}$$

Substituyendo en (2.29)

$$V_2 \frac{V_2}{Z_2} = V_1 \frac{V_1}{Z_1}$$

$$Z_2 = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 Z_1 \quad (2.30)$$

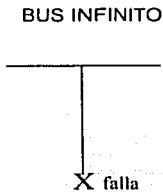
Por otra parte, para determinar la corriente sobre la base real se tiene, también de la ecuación 2.29 :

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

$$I_1 = \frac{V_2}{V_1} I_2 \quad (2.31)$$

### 2.3.2 Método de los MVA

Un método que se puede considerar de un cierto modo novedoso y relativamente nuevo es el conocido como *método de los MVA*, que básicamente es una modificación del *método ohmico*, en el cual la impedancia de un circuito es la suma de las impedancias de sus componentes, y en virtud de que por definición, la admitancia es el recíproco de la impedancia se tiene que el recíproco de la admitancia del sistema es la suma de los recíprocos de las admitancias de sus componentes. También por definición, la admitancia de un circuito o componente es la máxima corriente o KVA, a tensión unitaria que circula a través del circuito o componente a un corto circuito o falla cuando es alimentada de una fuente de capacidad infinita. Para comprender mejor esto considérese la siguiente figura:



Se sabe además que:

La corriente de corto circuito  
 $I_{cc} = V/Z$

La potencia de corto circuito  
 $VA_{cc} = E^2 / Z$

$$KVA_{cc} = (1000 \text{ KV})^2 / Z$$

$$MVA_{cc} = KV^2 / Z$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

$$Y = 1 / Z_{ohms}$$

$$KVA_{cc} = 1000 \times (KV)^2 \times Y$$

$$MVA_{cc} = (KV)^2 \times Y$$

$$MVA_{cc} = MVA / Z_{p.u.}$$

Donde:

Y= admitancia del circuito

$Z_{ohms}$ = impedancia en ohms

$Z_{p.u.}$ = impedancia en por unidad

KV = voltaje de línea a línea

$KVA_{cc}$ = KVA de corto circuito

$MVA_{cc}$ = MVA de corto circuito

Prácticamente el método de los MVA se usa separando el circuito en sus componentes y calculando cada componente con su propio bus infinito, para lo cual se pasa del diagrama unifilar del sistema en estudio a un diagrama de impedancias y al diagrama de MVA, la conversión del diagrama unifilar a el diagrama de MVA resulta muy simple ya que solo es aritmética.

La primer componente del sistema normalmente es la capacidad interruptiva del sistema bajo estudio en MVA y el resto de componentes del diagrama en MVA se obtiene, como se indicó antes, dividiendo la potencia del elemento expresada en MVA entre su impedancia expresada en por unidad.

Para ilustrar esto considérese el sistema elemental siguiente:

Figura 2.3.1 Diagrama unifilar y de impedancias de los MVA

DIAGRAMA UNIFILAR

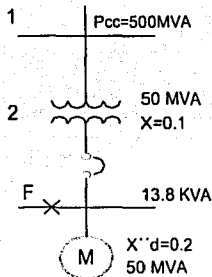
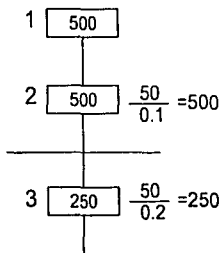
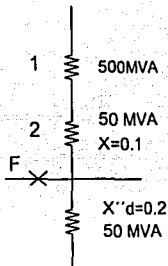


DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Es decir que los MVA de corto circuito de cada componente se obtienen de dividir su propia potencia entre sus impedancias expresadas en por unidad.

Si en el diagrama de impedancias anterior se supone ocurre una falla en el punto F entonces fluirá la corriente de las componentes 1 y 2 (en serie) y de la componente 3 que estará en paralelo así que para combinar las MVA en serie y en paralelo es bastante simple partiendo de la base que los elementos se pueden representar como admitancias como se indicó antes, de manera que para combinar en serie dos elementos,

$$MVA_{12} = [(MVA_1) \times (MVA_2)] / (MVA_1 + MVA_2)$$

Y en paralelo:

$$MVA_{1+2} = MVA_1 + MVA_2$$

Es decir que la combinación en serie de los MVA es como combinar en paralelo resistencias y combinar en paralelo es como combinar resistencias en serie.

Para el sistema que sé esta usando como ejemplo la combinación de los elementos 1 y 2 que se encuentran en serie es:

$$MVA_{12} = \frac{MVA_1 \times MVA_2}{MVA_1 + MVA_2} = \frac{500 \times 500}{500 + 500} = 250$$

Y los MVA de corto circuito equivalente se obtienen como la combinación en paralelo de  $MVA_{12}$  y  $MVA_3$  es decir:

$$MVA_{cc} = MVA_{12} + MVA_3 = 250 + 250 = 500$$

Si se desea conocer la corriente de corto circuito simétrica en el punto de falla a partir de la potencia del corto circuito se tiene que para el bus de 13.8 KV,

$$I_{cc} = \frac{MVA_{cc} \times 1000}{3 \times KV} = \frac{500 \times 1000}{3 \times 13.8} = 20918.48A$$

Del sistema elemental analizado antes se puede resumir que el método de los MVA consiste en lo siguiente:

1. Partir de un diagrama unifilar del sistema por estudiar en donde se indiquen en cada elemento (numerado) su potencia en MVA y su impedancia en por unidad.
2. Se convierten todos los componentes del diagrama unifilar del sistema a sus MVA de corto circuito, para lo cual se divide para cada componente sus MVA entre su reactancia en por unidad.



$$MVA_{cc} = \frac{MVA}{X(pu)}$$

3. Obsérvese que a diferencia de otros métodos hasta este punto, el método de los MVA no requiere de una base común en MVA o KVA y tampoco es necesario cambiar las impedancias de base.
4. Para combinar los MVA que aparecen en lo que se ha llamado el diagrama de los MVA se siguen las reglas siguientes:

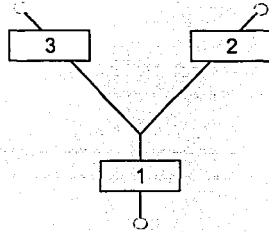
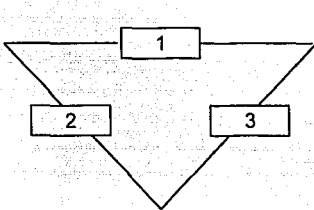
- Elementos en serie se combinan como si fueran resistencias en paralelo, es decir si se trata de dos elementos en paralelo, por ejemplo:

$$MVA_{12} = \frac{MVA_1 \times MVA_2}{MVA_1 + MVA_2}$$

- Elementos en paralelo se combinan como si se tratara de resistencias en serie es decir, si se trata por ejemplo de dos elementos en paralelo

$$MVA_{1+2} = MVA_1 + MVA_2$$

Cuando los elementos se encuentran en una combinación delta y se desea convertir a una estrella se aplica la regla siguiente:



Si se designan como Y los MVA en la conexión estrella y D los MVA en la conexión delta la conversión se obtiene con las relaciones que se indican a continuación:

$$\begin{aligned} y_1 &= S/D_1 \\ y_2 &= S/D_2 \\ y_3 &= S/D_3 \end{aligned}$$

Siendo:

$$S = (D_1 \times D_2) + (D_2 \times D_3) + (D_3 \times D_1)$$

5. Si se desea calcular la corriente de corto circuito en el punto de falla se aplica la expresión:

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

$$I_{cc} = \frac{MVA \times 1000}{\sqrt{3} \times KV}$$

Donde MVA representa los MVA equivalentes en el punto de la falla y KV es la tensión en el mismo punto.

### 2.3.3 Método del bus infinito

Este método constituye un caso particular del método general de estudios de corto circuito por el método de las componentes simétricas en el que se considera solo la falla trifásica o sea que solo interviene en el estudio el diagrama de secuencia positiva.

En principio se supone que el corto circuito en la instalación es alimentado por una fuente infinita que incluye a la red y a las distintas plantas generadoras del sistema, constituyendo esto a la parte activa siendo la parte pasiva las impedancias de los distintos elementos.

El procedimiento de cálculo es:

- B1) Se parte de un diagrama unifilar en donde se representan a los elementos del sistema con sus datos de potencia, tensión e impedancia.
- B2) Se refieren las impedancias a valores base de potencia y tensión.
- B3) Se hace la reducción de impedancias por combinaciones serie-paralelo y transformaciones delta-estrella o estrella-delta cuando sea necesario, hasta obtener una impedancia equivalente entre la fuente y el punto de falla seleccionado.
- B4) Las corrientes y potencia de corto circuito en el punto de falla se calculan como:

$$I_{cc} = \frac{KVA_{base}}{3KV_{base} \times Z_{eq}} (pu)$$

siendo:  $I_{cc}$  = Corriente de corto circuito simétrica en amperes o KA.

$KVA_{base}$  = Potencia base seleccionada para el estudio

$KV_{base}$  = Tensión base en el punto de falla seleccionado

$Z_{eq}$  (p.u.) = Impedancia equivalente entre la fuente y el punto de falla expresada en por unidad (p.u.)

La corriente de corto circuito asimétrica se puede calcular como:

$$I_{ccA} = KI_{cc}$$

Siendo K un factor de asimetría que depende de la relación R/X para el sistema en estudio

Al respecto se pueden hacer los siguientes comentarios:

- a) Se puede emplear el factor K para el menor de relación R/X.
- b) El factor se forma con la relación R/X de la red resultante o equivalente  $ZK = RK + JXK$  en el punto de falla en cuyo caso la corriente de corto circuito asimétrica se puede calcular como  $1.5K$  o sea que el mínimo valor sería 1.15 y normalmente el máximo no excede de 1.8.
- c) El valor máximo de  $K = 2.0$  se obtiene solo cuando  $R = 0$  que equivaldría a una falla en las terminales del generador, pero aún en estos casos se ha demostrado que en generadores con potencias inferiores a 100 MVA el factor de asimetría máximo es 1.8 y lo mismo ocurre en grupos generador-transformador conectados en bloque cuando ocurre un corto circuito en el lado de alta tensión del generador (en este caso se puede considerar exactamente  $K = 1.9$ )

La potencia de corto circuito en el punto de falla se puede calcular como:

$$P_{CC} = \frac{KVA_{base}}{Z_{eq} (p.u.)}$$

### 2.3.4 Método de nodos y mallas

#### a) Método de mallas

La solución de circuitos de c.a., por el método de mallas, parte de la aplicación de la ley de voltajes de Kirchhoff, la cual nos dice que: en un instante cualquiera, la suma algebraica de las diferencias de potencial (voltajes) de cada una de las ramas que forman una malla, es cero.

Para aplicar esta ley en una malla cualquiera se deben asignar polaridades a las diferencias de potencial de cada rama del circuito. Al emplear sentidos asociados de corriente y voltaje, la asignación de uno de ellos es suficiente para la aplicación de ambas leyes.

Al seleccionar un sentido supuesto para la corriente, se está asignando simultáneamente polaridades a las diferencias de potencial que aparecen en los resistores, de tal manera que se planteen circuitos linealmente independientes.

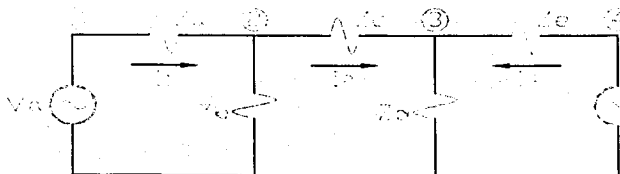
Considérese el siguiente circuito que se muestra en la figura 2.3.2 que constituye una red eléctrica. Está red esta constituida por una serie de elementos, que pueden dividirse en dos grupos principales, elementos activos y elementos pasivos.

1. **Elementos activos:** son los representados por fuentes de fuerza electromotriz o fuentes de corriente, que contribuyen con una cierta cantidad de energía.
2. **Elementos pasivos:** son impedancias que no contribuyen con ninguna cantidad de energía como por ejemplo, resistencias, inductancias y capacitancias (para este caso solo se analizarán circuitos resistivos).

A continuación se definen algunos términos útiles para el análisis del comportamiento de los circuitos eléctricos.

- **Rama de una red:** se llama rama de una red a un elemento o varios elementos conectados en serie.
- **Nodo de una red:** es el punto final de un elemento o el punto de conexión de dos o más elementos.
- **Punto de unión o nodo mayor:** es el punto en el que se unen tres o más ramas. Por ejemplo en la figura 2.3.2 los nodos 2 y 3 son puntos de unión o nodos mayores y los nodos 1 y 4, son simplemente nodos. El neutro desprovisto de impedancia también es un punto de unión.
- **Circuito:** es cualquier circuito cerrado en una red.
- **Malla:** es un circuito que no puede dividirse en circuitos más simples. Por ejemplo en la figura 2.3.2, los nodos 1, 2, 3, 4 y 5 forman un circuito y los nodos 1, 2 y 5 forman una malla.

Figura 2.3.2. Circuito para la obtención de las ecuaciones de malla



### Formulación de las ecuaciones de red.

Las ecuaciones de una red, consisten simplemente en la aplicación de las dos leyes de Kirchhoff.

La *primera ley* de Kirchhoff nos dice que en cualquier instante la suma vectorial de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma vectorial de las corrientes que salen del nodo.

$$\sum I_{ent} = \sum I_{sal} \quad (2.32)$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

La *segunda ley* de Kirchhoff establece que en un circuito cerrado, la sumatoria de las fuerzas electromotrices es igual a la sumatoria de las caídas de voltaje en dicho circuito

$$\sum E_{emf} = \sum ZI \quad (2.33)$$

Aplicando la segunda ley de Kirchhoff a las mallas 1, 2 y 3 se tiene:

$$I_1 Z_a + (I_1 - I_2) Z_b = V_a \quad (2.34)$$

$$I_2 Z_c + (I_2 + I_3) Z_d + (I_2 - I_1) Z_b = 0 \quad (2.35)$$

$$I_3 Z_e + (I_3 + I_2) Z_d = V_b \quad (2.36)$$

Agrupando términos y re-arreglando

$$(Z_a + Z_b) I_1 - Z_b I_2 = V_a \quad (2.37)$$

$$-Z_b I_1 + (Z_b + Z_c + Z_d) I_2 + Z_d I_3 = 0 \quad (2.38)$$

$$Z_d I_2 + (Z_d + Z_e) I_3 = V_b \quad (2.39)$$

El sistema anterior de ecuaciones se puede escribir en la forma general usando la técnica de inspección de la red en la siguiente forma matricial:

$$\begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{vmatrix} \quad (2.40)$$

Los elementos  $Z_{ji}$  se conocen como la impedancia propia para la malla  $j$  y se obtienen como la suma algebraica de las impedancias alrededor de esa malla.

Los elementos  $Z_{ji}$  se conocen como la impedancia mutua entre las mallas  $ji$  y es la impedancia que se encuentra entre estas mallas tomada con el signo apropiado. En el caso de acoplamiento magnético entre inductancias de distintas mallas se deben considerar como elementos mutuos de acuerdo con el signo dado por su polaridad.

Las incógnitas en la ecuación (2.40) son las corrientes de malla  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  que se obtienen al resolver este sistema de ecuaciones por medio de las técnicas de solución de ecuaciones simultáneas.

## b) Método de nodos

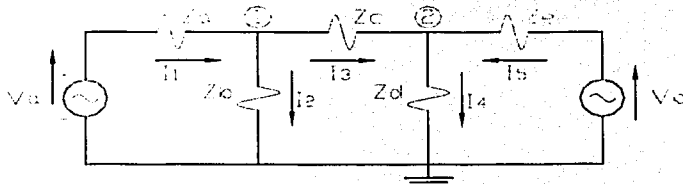
La solución de circuitos por el método de nodos está basada en la aplicación de corrientes de Kirchhoff, para lo cual se establecen las ecuaciones planteando los voltajes como incógnitas. Normalmente se selecciona en forma arbitraria un nodo de referencia con respecto al cual se miden los voltajes de los otros nodos.

Como uno de los nodos principales es considerado como referencia (asignándole arbitrariamente potencial cero), habrá tantos voltajes desconocidos como nodos independientes.

Conviene suponer, al plantear las ecuaciones que el potencial del nodo analizado es el mayor del circuito, por lo que todas las corrientes saldrán de dicho nodo.

El planteamiento de las ecuaciones por este método se ilustra con la figura 2.3.3 en donde los nodos 1 y 2 establecen los voltajes por resolver.

Figura 2.3.3 Circuito para la obtención de las ecuaciones de nodos



Aplicando la ley de Kirchoff de corrientes a los nodos 1 y 2 se tienen las siguientes ecuaciones

En el nodo 1

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

En el nodo 2

$$i_3 + i_4 + i_5 = 0$$

Expresando en términos de los voltajes se puede escribir como:

$$\frac{V_1 - V_a}{Z_a} + \frac{V_1}{Z_b} + \frac{V_1 - V_2}{Z_c} = 0 \quad (2.41)$$

$$\frac{V_2 - V_1}{Z_c} + \frac{V_2}{Z_d} + \frac{V_2 - V_b}{Z_e} = 0 \quad (2.42)$$

Re-arreglando términos en las ecuaciones (2.41) y (2.42) se tiene

$$\left( \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} \right) V_1 - \left( \frac{1}{Z_c} \right) V_2 = \left( \frac{1}{Z_a} \right) V_a \quad (2.43)$$

$$\left( \frac{1}{Z_c} \right) V_1 + \left( \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_e} \right) V_2 = \left( \frac{1}{Z_e} \right) V_b$$

Como la inversa de la impedancia es la admitancia, el sistema de ecuaciones (2.43) se puede escribir como :

$$\begin{aligned} (Y_a + Y_b + Y_c) V_1 - Y_c V_2 &= Y_a V_a \\ -Y_c V_1 + (Y_c + Y_d + Y_e) V_2 &= Y_e V_b \\ -Y_c V_1 + (Y_c + Y_d + Y_e) V_2 &= Y_e V_b \end{aligned} \quad (2.44)$$

El sistema de ecuaciones (2.44) se puede generalizar escribiendo las ecuaciones por inspección de la red en forma matricial como sigue:

$$\begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{vmatrix} \quad (2.45)$$

En donde los elementos  $Y_{jj}$  se denominan admitancias propias y su valor es igual a la suma de las admitancias conectadas al nodo  $j$  y los elementos  $Y_{ij}$  son las admitancias mutuas entre los nodos  $ij$ .

### 2.3.5 Método de computo

Cuando se realizan estudios de corto circuito en una línea o red de un sistema, estos se llevan a cabo con el propósito de cumplir con una serie de requisitos que se establecen en los estudios de la red, como puede ser, la determinación de las corrientes de corto circuito o capacidades interruptivas en determinados puntos, las distribuciones de corrientes a través de las diferentes barras de la red, los voltajes de las barras, los cálculos con propósitos de protección, etc.

Dependiendo del tamaño del sistema y del grado de complejidad existente, de acuerdo al número de elementos que intervienen en toda su conectividad, el estudio de corto circuito se puede hacer muy complejo en su planteamiento y desarrollo, de tal forma que su solución por métodos manuales es sumamente difícil y en ocasiones prácticamente imposible de resolver. Esto no significa que los métodos de solución manuales para este tipo de problemas no sea valido, sino que es a partir de éstos como se pueden elaborar formulaciones que permitan la aplicación de las computadoras digitales para la solución de este tipo de problemas.

La intervención de las computadoras digitales en los sistemas eléctricos de potencia ha venido a contribuir de manera significativa y eficaz en el funcionamiento de éstos; evitándose gastos de recursos tanto humanos, como económicos y brindando muchas ventajas en los diferentes aspectos de la administración de la energía eléctrica y solución de problemas.

En particular, para el análisis de corto circuito en los sistemas eléctricos de potencia en alta tensión, en donde normalmente el tamaño y características de los mismos hacen necesario el uso de la computadora digital, es conveniente estudiar aunque sea en una forma muy simplificada los métodos computacionales para estos casos.

## ANALISIS DE FALLAS

La base de los métodos computacionales para el estudio de corto circuito es que los elementos que constituyen al sistema eléctrico de potencia como son los:

- Generadores
- Transformadores y
- Líneas de transmisión

(que son los que más interesan para los estudios de corto circuito), se pueden modelar en forma matricial, mediante la matriz Zbus; y tratándose de elementos balanceados, se pueden desacoplar mediante transformaciones modales como es el caso de las transformaciones de las componentes simétricas, lo cual lo extiende a las fallas asimétricas como sucede en el caso de línea a tierra, o en el caso de la falla trifásica que sólo se considera excitada la red de secuencia positiva.

La aplicación de las computadoras digitales, no se limita solamente a los cálculos de corto circuito, sino que puede tener una amplia cobertura sobre un sistema eléctrico. Cuando hay conexiones o desconexiones de una línea del sistema por medio de interruptores, las corrientes de línea se distribuyen através de la red y los voltajes de las barras cambian, así estos voltajes de barra y corrientes de línea se pueden predecir através de un programa de análisis de contingencias y de este modo es posible saber si hay niveles de sobrecarga de corrientes y de voltajes fuera de los valores exactos de esas cantidades.

Los métodos de análisis de fallas que utilizan la Zbus y la Ybus del sistema, son bastante atractivos desde el punto de vista computacional para este tipo de situaciones.

En lo que se refiere al control automático, la participación de los sistemas de computo toma un papel muy importante dentro de lo que es la seguridad de los sistemas eléctricos de potencia, ya que de esta forma es posible mantener bajo su control la generación real del sistema, la frecuencia de operación y el intercambio neto de la potencia en los niveles deseados, etc.



## CAPITULO 3

### DISEÑO DE SISTEMAS DE TIERRAS

#### 3.1 Descripción de la red de tierras

La función de la puesta a tierra de una instalación eléctrica es la de forzar el drenado de las corrientes de las instalaciones el terreno, de cualquier naturaleza que se puedan originar, ya se trate de corrientes de falla, o debidas a descargas atmosféricas, de carácter impulsional.

Se sabe que es absolutamente imposible, a menos que se abandone totalmente la distribución de energía eléctrica, prevenir en todo momento y bajo cualquier circunstancia evitar la presencia de tensiones peligrosas. Sin embargo, este hecho no releva al ingeniero de la responsabilidad de intentar disminuir esa probabilidad tanto como sea posible, afortunadamente, en la mayoría de los casos, mediante un diseño cuidadoso e inteligente esa probabilidad puede reducirse a un valor muy bajo.

La necesidad de contar con una red de tierras en las instalaciones eléctricas es la de cumplir con las funciones siguientes:

- Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de corrientes de falla a tierra, producidas por la operación de un apartarrayos o el deterioro en los aislamientos de los equipos y materiales.
- Evitar que durante la circulación de estas corrientes a tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre diferentes puntos de la instalación, que pueden ser peligrosos para el personal.
- Facilitar mediante sistemas de relevadores o microcomputadoras la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.
- Dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.
- Limitar las sobretensiones por descargas atmosféricas o por operación de interruptores.

#### Componentes de la red de tierras

Para la construcción de los sistemas de tierra, se debe considerar la clase y materiales de cada uno de sus componentes, los cuales son combinados para ser enterrados en un área determinada para formar el sistema de tierras.

- **Conductores.** Los conductores sirven para formar el sistema de tierras y para la conexión a tierra de los equipos, los cuales son generalmente cables concéntricos formados por varios hilos y los materiales empleados en su fabricación son el cobre, cobre-estaño Copperweld, acero, acero inoxidable, acero galvanizado o aluminio.

El factor principal en la selección del material es la característica de corrosión que presenta al estar enterrado. El cobre es la selección más adecuada, ya que es económico y tiene buena conductividad, además de ser resistente a la corrosión y a la fusión.

- **Varillas o electrodos a tierra.** Estos elementos se clavan en el terreno y sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto menor resistividad eléctrica en el subsuelo.

Los materiales empleados son generalmente el acero, acero galvanizado, acero inoxidable y copperweld, en forma de varillas, cables, chapas, perfiles, que presenten una resistencia elevada a la corrosión.

El diámetro y longitud se determinará por resistencia mecánica y por las características de resistencia eléctrica, su selección depende de las características de corrosión que presentan al estar enterrados.

Se acostumbra a enterrar los electrodos en las esquinas de la red sobre el perímetro de la malla y en especial en la zona próxima que rodea la instalación del equipo principal, en donde conviene aumentar el número de electrodos <sup>(10)</sup>.

- **Conectores o juntas.** Son los elementos que nos sirven para unir los conductores del sistema, para conectar las varillas a los conductores y para la conexión de los equipos, existen generalmente de 2 tipos:

1. **Conectores a presión:** Son todos aquellos que mediante presión mantienen en contacto a los conductores. En este tipo están comprendidos los conectores atornillados y los de compresión. Los conectores a presión deberán diseñarse para una temperatura máxima de 250 a 350 °C.
2. **Conectores soldables:** Son aquellos que mediante una reacción química exotérmica, los conductores y el conector se sueldan en la conexión molecular.

Los conectores deberán seleccionarse con el mismo criterio con que se seleccionan los conductores, además tendrán las siguientes propiedades:

- i. Tener dimensiones adecuadas para absorber el calentamiento que se produce al circular las corrientes elevadas (resistente a la fusión).

- ii. Tener suficientemente asegurado a los conductores para soportar los esfuerzos electrodinámicos originados por las fallas, además de no permitir que el conductor se mueva dentro de él.

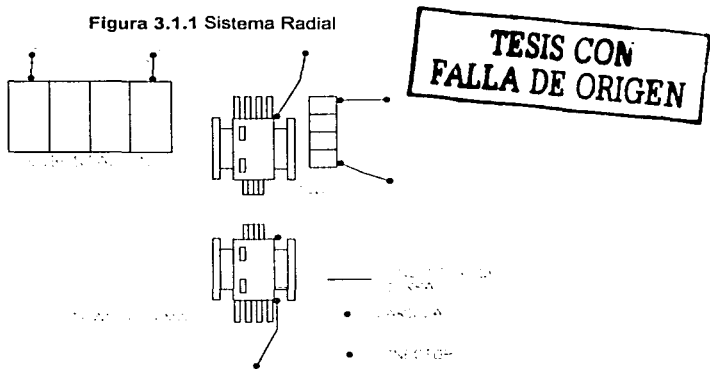
### 3.1.1 Disposiciones básicas de las redes de tierra

Aunque un conductor tiene menor efectividad como electrodo cuando se producen cruces con otros, estos son necesarios para proveer varios caminos de paso de la corriente de puesta a tierra, evitando caídas de potencial excesivamente altas en el electrodo asegurando la continuidad del mismo, aún en el caso de una rotura fortuita de alguno de los cables.

Existen tres tipos de sistemas básicos para una red de tierras el sistema radial, el sistema de anillo y el de malla.

- **Sistema radial.** Este sistema consiste en uno o varios electrodos de tierra a los cuales se conecta la derivación de cada uno de los equipos. El sistema radial es el más económico, pero el menos seguro, ya que al producirse una falla en el equipo, se producen elevados gradientes de potencial. Se utiliza para corrientes de tierra bajas, el sistema consiste en uno o varios electrodos, de los cuales se conectan las derivaciones a cada aparato, la disposición se muestra en la figura 3.1.1.

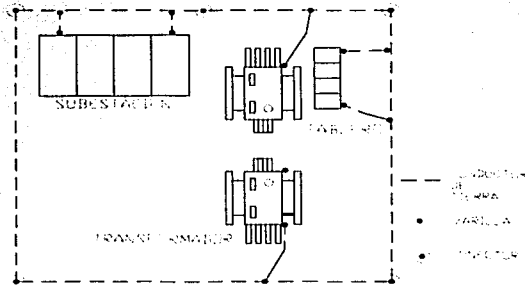
Figura 3.1.1 Sistema Radial



- **Sistema en anillo.** El sistema de anillo se obtiene en formando un anillo, un conductor de suficiente calibre (aproximadamente 1000MCM) alrededor de la superficie ocupada por los equipos de la subestación conectando derivaciones a cada aparato mediante un cable más delgado (500MCM o 4/0 AWG).

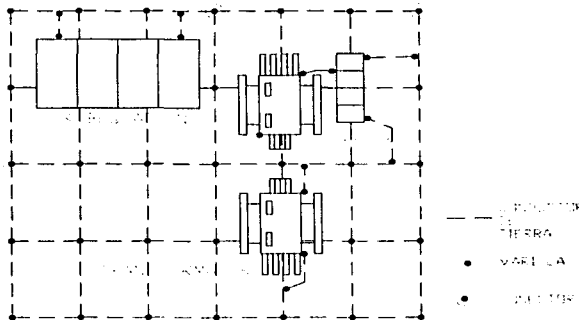
En los vértices de los anillos se instalan varillas o electrodos a tierra, este sistema es más eficiente que el sistema radial ya que los potenciales disminuyen al circular las corrientes de falla por varias trayectorias en paralelo. Se utiliza para corrientes de corto circuito intermedias, el arreglo se muestra en la figura 3.1.2.

Figura 3.1.2 Sistema en anillo



- Sistema de malla** El sistema de malla es el más usado actualmente en las subestaciones eléctricas. Consiste en un arreglo de conductores perpendiculares formando una malla o retícula (aproximadamente 4/0 AWG), donde se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos. En la periferia generalmente se colocan varillas o electrodos a tierra. Este sistema es el más eficiente ya que se limitan los potenciales originados por la circulación de la corriente de falla. El arreglo se muestra en la figura 3.1.3.

Figura 3.1.3 Sistema de malla



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 3.2 Resistividad del terreno

La resistividad también conocida como resistencia específica, es la propiedad que tiene el suelo para conducir electricidad, la cual es determinada por el tipo de suelo, contenido de humedad, composición química y la temperatura entre otros factores.

En general, la resistencia total que presenta una instalación de puesta a tierra está constituida por la suma de las siguientes partes:

- La resistencia del conductor (línea a tierra y línea de enlace con el electrodo) que conecta al electrodo a tierra y al sistema que debe ponerse a tierra
- La resistencia de contacto entre la superficie del electrodo a tierra y al sistema que debe ponerse a tierra
- La resistencia del suelo en que está enterrado el electrodo, que es la parte más significativa

#### 3.2.1. Factores que afectan la resistividad del terreno

La resistividad del suelo es uno de los parámetros más críticos que el diseñador tiene que determinar, debido a la influencia que tiene sobre los electrodos y los gradientes de voltaje sobre la superficie, por lo que deben tomarse en cuenta varios factores descritos a continuación.

- **Composición del terreno.** La resistividad según la composición del terreno es muy variada teniendo la dificultad de que las diferentes clases de terreno no están delimitadas, como para saber de antemano, el valor de la resistividad en el punto elegido para efectuar la toma de tierra. Una clasificación general de resistividad se muestra en la tabla 3.2.1.
- **Contenido de sales y humedades.** Este es el aspecto más importante para que un suelo sea conductor de electricidad, el contenido de sales, ácidos o alcalinos que afecta en forma muy apreciable la reducción de la resistividad. Cuando la humedad se reduce abajo del 22% de su peso, la resistividad crece bruscamente.

Al ser aislantes los principales componentes del terreno, la conductividad del suelo es, esencialmente de naturaleza electrolítica, esto es, la conducción de corriente tiene lugar, principalmente, a través de electrólito formado por las sales y el agua contenida en el terreno <sup>(7)</sup>.

Es conveniente tratar los terrenos con sal común, la cual actúa sobre el agua haciéndola mejor conductora, además de retener la humedad en el terreno gracias a que es una buena sustancia hidróscópica <sup>(7)</sup>.

- **Granulometría.** El tamaño del grano y su distribución es importante en la conducción eléctrica ya que si se tienen granos con grandes espacios se reduce el área de contacto, mientras que si se tienen granos con diferentes tamaños los

espacios son pequeños y aumenta el área de contacto llenando con agua el resto. Esta es la razón de que el valor de la resistividad de la grava sea superior al correspondiente de la arena y que el de esta supere al de la arcilla.

Tabla 3.2.1 Clasificación general de resistividad

CLASE DE TERRENO	RESISTIVIDAD ( $\Omega$ -m)
Terrenos pantanosos	5 a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 100
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silícea	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos procedentes de alteración	1500a10000
Granitos muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000a 3000
Grava	3000a 5000

- **Compactación del terreno.** La resistividad se ve también afectada por el grado de compactación del terreno, disminuyendo al aumentar éste, por lo que se procurará utilizar las capas de tierra más conductoras, haciéndose la colocación de electrodos con el mayor cuidado posible en cuanto a la compactación del terreno.
- **Temperatura.** La resistividad del terreno aumenta a medida que desciende la temperatura y ese aumento se realiza al alcanzarse los 0 °c, y a mayores temperaturas ésta decrece, excepto al llegar al punto de ebullición del agua que rodea al electrodo por el cual pasa una corriente muy intensa, resultando entonces resistividades elevadas debido a la evaporación de la humedad.
- **Otros factores.** Existen otros factores que pueden modificar la resistividad del terreno, pero que por su naturaleza eléctrica, solo pueden surgir posteriormente al establecimiento de la red de tierras, tales como:

*El efecto de gradientes de potencial elevados.* Cuando el contacto entre el electrodo y el terreno es pobre, puede haber pequeñas descargas que contribuyan a igualar los potenciales de ambos. La resistencia del sistema de puesta a tierra arrojaría valores inferiores a los que se hubiera obtenido cuando no se producía el efecto teniendo principalmente esta reducción en sistemas de tierra de pequeñas dimensiones <sup>(20)</sup>.

*Calentamiento del suelo por la circulación de corrientes elevadas.* El calentamiento del suelo tiende a aumentar su conductividad mientras no vaya acompañado de desecación. El efecto inicial de la circulación prolongada de corriente en un sistema de tierras es disminuir su resistencia, pero solo es apreciable para las tomas de tierra de pequeñas dimensiones, debido a las corrientes son de corta duración, prácticamente son despreciables y solo el calor específico determina la energía que pueda disiparse, siendo la elevación de la temperatura proporcional al tiempo.

La temperatura es máxima en la proximidad inmediata a la del electrodo, convirtiéndose las condiciones en críticas cuando se acercan a 100° C, al provocarse la evaporación rápida del agua y dejar al electrodo en contacto con una capa deshidratada muy resistente e, incluso llegar a producir la calcinación del terreno a su alrededor. La toma pierde entonces su poder de evacuación y tiende a subir su potencial hasta la tensión simple de la red, situación evidentemente peligrosa <sup>(7)</sup>.

### 3.2.2. Medición de la resistividad

La resistividad de un terreno se obtiene a partir de la formula que calcula la resistencia de un cubo de tierra de volumen unitario, o sea tiene un metro en cada uno de sus tres ejes, sabiendo que:

$$R_T = \rho \frac{L}{A}$$

Y despejando  $\rho$  obtenemos:  $\rho = R_T \frac{A}{L} \text{ ohms} - m$  (3.1)

La resistividad del terreno puede conocerse de dos maneras, ya sea conociendo el tipo de suelo en donde se va a construir la red de tierras o midiendo directamente el suelo mediante pruebas de campo <sup>(14)</sup>.

En el caso de medición directa del terreno se pueden aplicar varios métodos pero los mas comúnmente usados son el Método de Wenner o de los cuatro electrodos, Método de Lee y Método del electrodo central.

Debido a que existen variaciones en el sentido horizontal y vertical de la composición del suelo, es conveniente realizar las pruebas de campo en varios lugares del terreno. La mayor cantidad de pruebas nos permitirá seleccionar con más precisión el modelo a usar en el diseño.

La resistividad del terreno se obtiene con el promedio de varias mediciones efectuadas a lo largo de los cuatro ejes indicados en la siguiente figura que representa la superficie del terreno.

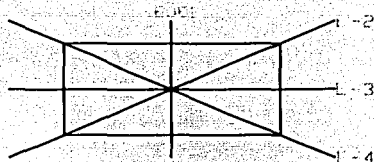
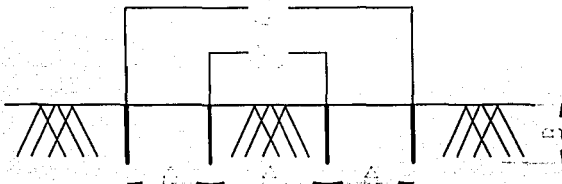


Figura 3.2.1 Superficie del terreno

Si en los valores obtenidos, las dos lecturas más separadas varían menos de un 50%, decimos que la resistividad es uniforme y usamos el método de una capa, que es más sencillo, si sucede lo contrario, entonces se consideran dos resistividades diferentes, por lo que se lleva un cálculo más complicado de la resistencia de la red de tierras<sup>(20)</sup>.

El **método de 4 puntos o método de Wenner** es el más empleado, Se entierran pequeños electrodos a una profundidad "B" y espaciados sobre una línea de intervalos "A", se hace circular una corriente de prueba "I" entre los dos electrodos exteriores y se mide con un voltmetro de alta impedancia, la tensión entre los electrodos internos.

Figura 3.2.2 Método de Wenner



La relación  $V/I$  nos dará el valor de la resistencia "R" en Ohms. Donde  $B=0.1 A$  y por lo tanto  $A=10B$

La resistividad será:

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{A^2 + 4B^2} - \frac{A}{A^2 + B^2}} \quad (3.2)$$

Si la longitud "B" es mucho menor que la longitud "A", puede suponerse  $B=0$  y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2\pi AR \quad (3.3)$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



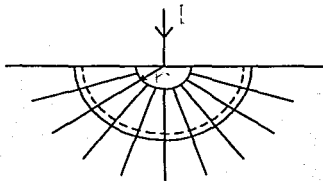
### 3.3 El electrodo de puesta a tierra

Los electrodos son las varillas que se clavan en terrenos mas o menos blandos y que sirven para aumentar la longitud del conductor de la red de tierra en terrenos pequeños o en terrenos secos para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica.

Un electrodo puede consistir en un conductor enterrado en forma vertical u horizontal una placa enterrada, una varilla de relleno químico, varias varillas en paralelo, mallas de cables enterrados, etc. Los electrodos deben estar formados por materiales metálicos como cobre y aluminio, los cuales deben ser resistentes a la corrosión que se pueda producir en la instalación.

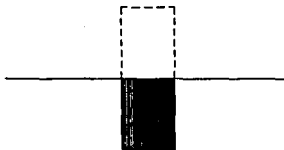
Para entender la naturaleza de un electrodo de tierra y su resistencia se debe considerar un electrodo hemisférico como lo muestra la figura 3.3.1.

Figura 3.3.1 Electrodo Hemisférico



Una buena aproximación del electrodo es, considerándolo como la mitad de un elipsoide de revolución, en el cual el eje mayor es muy largo comparándolo con el eje menor<sup>(14)</sup>.

Figura 3.3.2 Electrodo con su imagen



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con los valores que tenemos en la figura 3.3.2 y sustituyendo en la fórmula general para resistencia de electrodos podemos emplear la siguiente fórmula para el cálculo de la resistencia:









$$R = \frac{\rho}{2\pi L} L_n \left( \frac{4L}{d} \right) \quad (3.4)$$

### 3.3.1 Electrodo Múltiples

Un electrodo común, es un medio económico de instalar un sistema de tierras, sin embargo por lo general su valor de resistencia a tierra es alto y frecuentemente se deben de colocar electrodos en paralelo para lograr un valor aceptable, aunque este valor presentará un margen de error, ya que los cálculos son considerados para un suelo homogéneo, que en la realidad sería un caso ideal.

La tabla 3.3.1 muestra los valores esperados en diferentes arreglos de electrodos múltiples.

Tabla 3.3.1 Valores esperados en electrodos múltiples

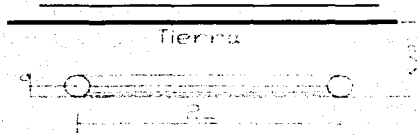
ELECTRODOS MÚLTIPLES	
VALORES ESPERADOS	ARREGLO
DOS ELECTRODOS EN PARALELO REDUCEN AL 55% LA RESISTENCIA DE UNO	
TRES ELECTRODOS EN LINEA RECTA REDUCEN AL 35%	
TRES ELECTRODOS EN DELTA REDUCEN AL 38%	
CUATRO ELECTRODOS EN CUADRO REDUCEN AL 28%	
OCHO ELECTRODOS EN CUADRO REDUCEN AL 17%	
OCHO ELECTRODOS EN CIRCULO REDUCEN AL 16%	
NUEVE ELECTRODOS EN CUADRO SOLIDO REDUCEN AL 16%	
12 ELECTRODOS EN CUADRO REDUCEN AL 12%	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.3.2 Electrodo horizontales

Consideremos el caso de un cable sencillo enterrado horizontalmente con una longitud  $2L$ , y radio "a" y a una profundidad  $s/2$ .

Figura 3.3.3 Cable sencillo enterrado horizontalmente



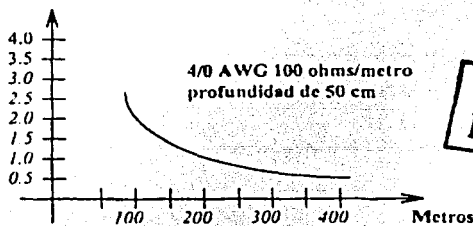
La capacidad puede ser calculada asumiendo una distribución de carga uniforme, teniendo una formula aproximada que para fines prácticos es suficiente <sup>(14)</sup>.

Una carga uniforme "q" por cm. de longitud en el cable y en su imagen. El potencial del conductor dada su propia carga es:

$$V=2q$$

Siendo el potencial promedio: para facilitar las operaciones y evitar cálculos se presenta la grafica en la figura 3.3.4 determinada para una profundidad de 50 cm. Cu (cobre desnudo) 4/0 y una resistividad de 100 Ohms-metro.

Figura 3.3.4 Longitud del conductor enterrado contra la resistencia a tierra



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Para resistividades diferentes de 100 Ohms-metro los valores de la curva se multiplican por el radio <sup>(14)</sup>.

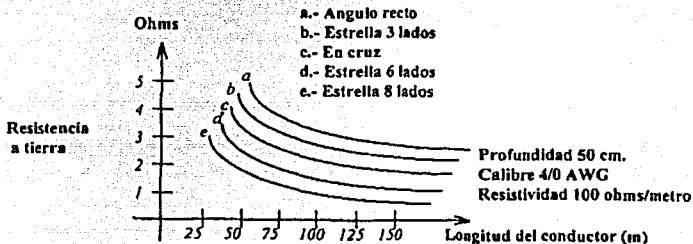
### 3.3.3 Cable en ángulo recto

Cuando el espacio disponible no es suficiente para colocar el cable en línea recta, se pueden tener varios arreglos, entre ellos el cable en ángulo recto; al igual que el cálculo para un cable en línea recta en los siguientes cálculos también se considera la imagen sobre la superficie.

En la tabla 3.3.2 se muestran diferentes formulas y arreglos para el cálculo de resistencias a tierra.

Grificando la variación de la resistencia a tierra para diferentes configuraciones:

Figura 3.3.5 Variación de la resistencia para diferentes configuraciones




### 3.3.4 Electrodo profundo

Consisten en una barra circular de hierro forrada con una delgada capa de cobre de 0.25 mm, con una longitud aproximada de 3 m, el hierro le da dureza y el cobre le da conductividad y resistencia a la corrosión, se introducen en el suelo por medio de golpes ya que tiene la suficiente consistencia, algunas varillas se pueden unir por medio de conectores por lo que se pueden tener longitudes mayores.

En suelos duros como Tepetate y roca no es fácil introducir electrodos comunes por lo que se recurre a otros medios para lograr una tierra efectiva, además de su dureza, tiene alta resistividad, lo cual dificulta su aterrizaje ya que requiere de instalaciones especiales, lo que quiere decir que con uno o más electrodos no basta.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.3.2 Formulas y arreglos para el cálculo de resistencias a tierra.

	Semiesfera radio a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
•	Varilla de tierra long. L, radio a	
• •	Dos varillas s > L, separacion s	$R = \frac{\rho}{2\pi a} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^3}{5s^3} \right)$
• •	Dos varillas s < L, distancio s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^3}{512L^3} \right)$
—	Alambre enterrado horizontalmente Long. 2L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^3}{512L^3} \right)$
L	Alambre en angulo recto Longitud del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.237 + 0.0214 \frac{s}{L} + 0.103 \frac{s^2}{L^2} - 0.042 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
Y	Estrella de tres puntos Longitud del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.054 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
+	Estrella de cuatro puntos Longitud del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
*	Estrella de seis puntos Longitud del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.490 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
*	Estrella de ocho puntos Longitud del brazo L, profundidad s/2	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^2}{L^2} - 1.17 \frac{s^3}{L^3} \dots \right)$
○	Aro de alambre diam. aro D, diam. del alambre d, prof. s/2	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left( \ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
—	Pielina enterrada hztl. longitud 2L, seccion a x b prof. s/2, b > a/8	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^3}{512L^3} \dots \right)$
○	Disco enterrado hztl. Radio a, prof. s/a	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^3}{s^3} \dots \right)$
	Disco enterrado verticalmente Radio a, prof. s/a	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left( 1 - \frac{7}{24} \frac{a^2}{s^2} + \frac{99}{320} \frac{a^3}{s^3} \dots \right)$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.3.5 Electrodo químicos

Consisten en modificar el medio que rodea al electrodo, bajando la resistividad del suelo los más usuales son:

- **Carbón mineral (COKE).**-Ha venido a sustituir al carbón vegetal por tener mejores cualidades aunque requieren en cierta medida de la humedad.
- **Sulfatos.**- Han caído en desuso debido a sus cualidades corrosivas sobre los metales en particular del cobre.
- **Sales.**- Al igual que los sulfatos ya no son usadas, ya que además de ser corrosivas se diluyen fácilmente en el agua.
- **Bentonita.**-La bentonita en si es una arcilla de la familia de la montmorillonitas y su principal propiedad es la capacidad de absorber y retener agua.

Básicamente consiste en ocupar las grietas, aberturas y huecos que existen en el terreno, mediante una masa que envuelve las partículas del mismo y los une eléctricamente, formando una superficie de contacto, haciendo un buen camino para las corrientes eléctricas que se drenan a tierra.

La bentonita es de difícil manejo debido a que el contacto con el agua forma una película impermeable, su mezclado con agua no es fácil necesitándose dos meses para absorber el agua al 100%.

- **Método SANIK**  
Inventado por el sueco Sanik, consiste en dos soluciones salinas que reaccionan entre sí, formando una mezcla gelatinosa estable, la cual es conductora de electricidad e insoluble en agua, tiene cualidades higroscópicas excelentes, es decir, absorbe agua fácilmente, la eficiencia de un electrodo tratado con este procedimiento varía del 25 al 80 %.
- **Resinas sintéticas**  
Son resinas de bajo peso molecular del tipo electrolítico con un elemento endurecedor, dando un elemento de baja resistividad que se mantiene por largo tiempo, su eficiencia va del 80 al 90%.

### 3.4 Potenciales peligrosos

Las personas creen que un objeto aterrizado puede ser tocado con seguridad, cuando la resistencia a tierra del sistema es baja, tal vez esto ha ocasionado accidentes. No es fácil determinar la resistencia del sistema de tierras y la corriente máxima, en la cual una persona puede resultar dañada, incluso una subestación con una resistencia a tierra muy baja puede ser peligrosa bajo ciertas circunstancias.

Las principales condiciones que pueden provocar accidentes son:

- Corriente de falla a tierra muy elevada en relación con el área que ocupa el sistema de tierras y su resistencia a una tierra remota.
- La resistividad del suelo y la distribución de la corriente puede generar gradientes de potencial elevados en la superficie.
- La posición de un individuo entre dos puntos con una alta diferencia de potencial.
- Duración de la falla, el flujo de corriente a través del cuerpo humano por un tiempo suficiente puede causar quemaduras y hasta la muerte.

#### 3.4.1 Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones debidas a disturbios atmosféricos o fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezca peligro al personal que labora en el área. Los efectos más comunes de la corriente que circula a través del cuerpo humano dependen de la magnitud, duración y frecuencia.

- **Umbral de sensibilidad.** Es definido como el valor de la intensidad mínima que percibe una persona al hacer circular una corriente de mano a mano, el valor de la intensidad de la corriente mínima que percibe una persona cuando el circuito se establece a través de las dos manos, es muy variable depende según los individuos (de 0.5 a 2mA).
- **Umbral de no soltar.** En este fenómeno se presenta la contracción muscular, tiene lugar por la excitación de nervios y músculos flexores bajo la acción de corriente eléctrica, de forma que al quedar contraidos inhabilitan al individuo a dejar al conductor <sup>(7)</sup>.
- **Muerte aparente.** Cuando la intensidad que atraviesa el organismo se eleva por encima de el umbral de no soltar, se afecta a la respiración y a la circulación, además el paso de la corriente acarrea una detención respiratoria o circulatoria que viene acompañada, rápidamente de un estado de muerte aparente.

- **Fibrilación ventricular.** La corriente de fibrilación es aquella que se produce al existir una diferencia de potencial entre dos partes del organismo. El potencial tolerable del cuerpo humano esta en función de la corriente, que al circular por el corazón, primeramente le produce arritmia cardiaca, procediendo a detenerlo por completo causándole la muerte.

La ecuación para calcular la corriente de fibrilación es la siguiente:

para 50 Kg. 
$$I = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

para 70 Kg. 
$$I = \frac{0.157}{\sqrt{t}}$$

### Parámetros

Pueden variar dependiendo de las características del cuerpo humano, como estatura, peso, complexión, sudoración, callosidades, estado de animo, etc. Además del tipo de tensión y tipo de contacto, pero fundamentalmente con la trayectoria seguida por la corriente, el valor de la resistencia del organismo (100 Ohms aproximadamente), el tiempo de paso y amplitud de la corriente.

La tabla 3.4.1 muestra los factores por los que hay que multiplicar la corriente que atraviesa el corazón en función del trayecto.

**Tabla 3.4.1** Factores de corriente del corazón

Trayectoria de la corriente	Factor de corriente del corazón (mA)
Mano izquierda -pie o pies	1
Dos manos-dos pies	1
Mano derecha -mano izquierda	0.4
Mano derecha -pie o pies	0.8
Mano derecha-espalda	0.3
Mano izquierda-espalda	0.7
Mano derecha-pecho	1.3
Mano izquierda-pecho	1.5
Dos o una mano-gluteos	0.7
Pie derecho-pie izquierdo	0

En la tabla 3.4.2 se muestran los efectos fisiológicos que produce una descarga eléctrica al cuerpo humano.

Es muy importante reducir el tiempo de la falla, los casos de muerte por electrocución, en general, son por exposición a fallas de larga duración.



**Tabla 3.4.2 Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano**

<b>CORRIENTE (mA)</b>	<b>EFFECTOS FISIOLÓGICOS</b>
1 o menos	No produce ninguna sensación ni mal efecto
1 a 8	Produce un choque indoloro
8 a 15	Produce un choque doloroso pero sin perdida de contracción muscular
15 a 20	Produce un choque doloroso con pérdida de control de los músculos afectados
20 a 50	Produce un choque doloroso y contracciones musculares muy fuertes
50 a 100	Puede causar fibrilación ventricular
100 a 200	Mata siempre a la víctima por fibrilación ventricular
200 o más	Produce quemaduras y fuertes contracciones musculares que oprimen el corazón y mata instantáneamente

### 3.4.2. Potencial de paso y de contacto

Es necesario tomar en cuenta los diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto un cuerpo con superficies a diferentes potenciales; las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo a los conceptos de tensiones de paso, de contacto y de transferencia.

- **Potencial de paso**

La tensión de paso es la diferencia de potencial entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso, que se asimila a un metro, en la dirección del gradiente de potencial máximo. <sup>(26)</sup>

Si se rebasa este potencial, se produce una contracción muscular en las piernas, es decir, no responden a los impulsos del cerebro y el individuo cae al piso, donde queda expuesto a las corrientes que circulan por el corazón.

Las siguientes ecuaciones nos ayudan a calcular este potencial para diferentes pesos, en el caso de una sola resistividad en el suelo.

$$\text{Para 50kg} \quad E_{PASO} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (3.5)$$

$$\text{Para 70Kg.} \quad E_{PASO} = \frac{157 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (3.6)$$

Para cuando tengamos dos resistividades diferentes se usan las siguientes ecuaciones, con los valores tolerados por el cuerpo humano:

$$\text{Para 50kg} \quad E_{PASO} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) \cdot 0.116}{\sqrt{l}} \quad (3.7)$$

$$\text{Para 70Kg.} \quad E_{PASO} = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s) \cdot 0.157}{\sqrt{l}} \quad (3.8)$$

Para  $C_s$  se toma en cuenta un factor K

- **Potencial de contacto**

La tensión de contacto es la diferencia de potencial entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia igual a la distancia máxima que se puede alcanzar, ósea, aproximadamente, 1 metro. <sup>(26)</sup>

Este potencial es más peligroso que el potencial de paso ya que en este caso se presenta un doble contacto con el cuerpo, por una parte con una estructura unida a los electrododos de tierra por sus superficies de apoyo y por otra la del terreno a una distancia del orden de un metro.

Las siguientes ecuaciones nos ayudan a calcular este potencial para diferentes pesos.

$$\text{Para 50kg.} \quad E_{PASO} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{l}} \quad (3.9)$$

$$\text{Para 70Kg.} \quad E_{PASO} = \frac{157 + 0.24 \rho_s}{\sqrt{l}} \quad (3.10)$$

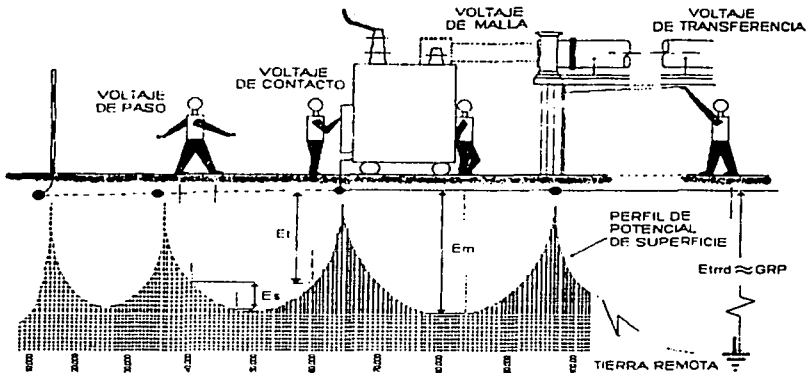
Para cuando tengamos dos resistividades diferentes se usan las siguientes ecuaciones, con los valores tolerados por el cuerpo humano:

$$\text{Para 50kg} \quad E_{PASO} = \frac{(1000 + 1.5C_s \rho_s) \cdot 0.116}{\sqrt{l}} \quad (3.11)$$

$$\text{Para 70Kg.} \quad E_{PASO} = \frac{(1000 + 1.5C_s \rho_s) \cdot 0.157}{\sqrt{l}} \quad (3.12)$$

En la siguiente figura se ha dispuesto una persona para insistir en que los términos de potencial de paso y contacto están asociados a la presencia humana que, a los efectos eléctricos queda simulada por una resistencia de 1000 Ohms.

Figura 3.4.1 Potenciales de paso y contacto



#### • POTENCIALES TRANSFERIDOS

Los potenciales de transferencia se generan entre la red de tierra y cualquier punto exterior a la misma, llegando a su valor máximo cuando la red de tierra se encuentra bajo los efectos de un corto circuito que alcanza su tensión mas alta, estos potenciales se producen cuando existen elementos metálicos que salen del lugar de la falla, como son rieles, hilo de guarda, tuberías, etc.

Bajo condiciones normales el equipo eléctrico que esta puesto a tierra opera al nivel de voltaje cero y este potencial es idéntico al de una red remota, existiendo una diferencia de potencial, que es proporcional a la magnitud de la corriente y a su resistencia. No es práctico e incluso casi imposible diseñar un sistema de tierras en base a los potenciales transferidos, es más práctico aislar las tuberías o elementos metálicos que salen de las subestaciones.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.5 Diseño de sistemas de tierras

El diseño de un sistema de tierras puede ser simple, desde una varilla de tierra hasta algo muy complicado, como una malla de tierras para una planta nucleoelectrica, por decir algo, pero cumpliendo con varios requisitos de diseño.

En el diseño intervienen factores diversos como son: resistividad del terreno, tensión de servicio, potencia de corto circuito, corriente de corto circuito, espacio disponible, equipo y personal a proteger, etc.

Se usará como caso general el cálculo de la resistencia de terrenos formados por capas de resistencias diferentes, el diseño de la red por este método se efectúa de acuerdo con lo especificado en la norma IEEEStd. 80-1986.

#### 3.5.1 Parámetros necesarios para el cálculo de una red de tierras

##### • Consideraciones generales

- i. Las uniones eléctricas entre los conductores de la malla no se deben fundir o deteriorar cuando circule la máxima corriente de falla.
- ii. Los elementos de la red deben ser mecánicamente resistentes y tener conductividad suficiente para no producir diferencias de potencial.
- iii. La profundidad mínima de instalación de la red será de 0.60 mts.
- iv. El conductor de la red será de cable de cobre desnudo.
- v. Determinar la longitud total propuesta de los conductores de la malla
- vi. Definir que tipo de conectores se utilizará (mecánicos o soldables), así como el tipo de varilla (material, longitud y diámetro).

##### • Máxima corriente de la red de tierras

Es uno de los términos más importantes en el diseño de la malla ya que un valor elevado de la corriente de falla a tierra requiere de un valor de resistencia a tierra muy bajo y un conductor de calibre más grueso. El valor de corriente de falla en la acometida del servicio lo puede dar el suministrador de energía, o se puede calcular.

La corriente simétrica de la malla es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la malla de tierras hacia el terreno que lo rodea. Puede expresarse como:

$$I_g = S_f I_f \quad (3.13)$$

En el caso de ocurrir una falla en el lado de baja tensión, la corriente será menor debido a que en el lado de baja tensión existen más retornos a tierra por donde fluyen las corrientes de tierras, provocando que en la malla circule una corriente menor, por lo que en instalaciones industriales se usará un factor de derivación de 0.3 a 0.7, el cual debe multiplicarse por la corriente de falla totales en el lado de baja tensión <sup>(10)</sup>.

- **Factor de decremento  $D_f$**

Este factor considera el efecto de desplazamiento de componente de corriente directa, y la atenuación de las componentes transitorias de alterna y directa de la máxima corriente de falla.

El factor de decremento se calcula por medio de la siguiente formula:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{t_f}{T_a}}\right)} \quad (3.14)$$

Donde  $t_f$  = Tiempo de duración de la falla en segundos

$T_a$  = Constante de tiempo subtransitoria equivalente del sistema en seg.

$$T_a = \frac{X}{W/R}$$

La relación "X/R" es la relación en el punto de falla y para un determinado punto de falla, esta relación X/R es usualmente aproximada utilizando las componentes X y R de la impedancia subtransitoria del sistema.

Se presenta la tabla 3.5.1 para  $D_f$  y diferentes valores de X/R (IEEE Std. 80-1986).

Tabla 3.5.1 Valores de la relación X/R

$t_f$ (seg)	Ciclos ( $N_3$ )	Factor $D_f$			
		X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0.008333	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
.015	3	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
0.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
0.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1	60	1.013	1.026	1.039	1.052

- **CORRIENTE MAXIMA DE MALLA**

El valor de la corriente máxima de malla se define como

$$I_G = C_p D_f I_G \quad (3.15)$$

Donde  $I_G$  = Corriente máxima de la red en amperes

$C_p$  = Factor de proyección que toma en cuenta los incrementos relativos de la corriente de falla a lo largo de la vida útil de la instalación, cuando no existieran los incrementos de la corriente de falla,  $C_p=1$

La  $I_G$  debe reflejar la peor falla, el factor de decremento y alguna futura expansión del sistema.

- **Factor de seguridad (FS)**

Se utiliza un valor de 1.0 a 1.5 para considerar un futuro aumento de la corriente de falla a tierra aplicar la siguiente expresión:

$$I_G = I \times FD \times F.S.$$

- **Efecto de la capa de roca triturada en la superficie de la subestación**

Cuando se tiene una capa de roca triturada en la superficie de la subestación, se incrementa la resistencia de contacto entre el terreno y los pies del personal de la subestación, la corriente a través del cuerpo será considerablemente más bajo con la adición de la capa de roca en la superficie, por la gran resistencia de contacto entre el terreno y los pies.

Podemos decir que  $F(x)$  es una función basada en el espaciamiento entre los pies y los valores relativos de las resistividades del terreno y de la roca triturada en la superficie:

$$F(x) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Q \quad (3.16)$$

$$Q = \frac{K^n}{1 + (2nh_s)^2} \quad (3.17)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad (3.18)$$

Donde:

$K$  = Factor de reflexión

$\rho_s$  = Resistividad de la roca triturada en Ohms-metro

$\rho$  = Resistividad del terreno en Ohms-metro

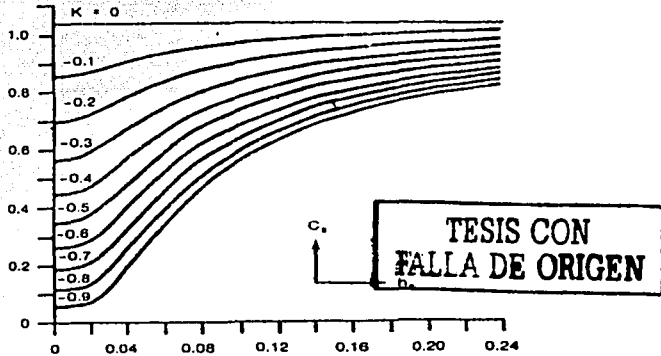
$h_s$  = Espesor de la capa de roca triturada en metros

Definimos a  $C_s$  como un factor de reducción del valor nominal de la resistividad superficial el cual tiene un valor unitario cuando la resistividad superficial es igual a la del terreno y en cualquier otro caso:

$$C_s = \frac{1}{96} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{1 + (2nh_s / 1.08)^2} \right] \quad (3.19)$$

Para este ultimo caso en que  $C_s < 1$ , Donde  $C_s$  es una función de  $(h_s, K)$  los valores son graficados en la figura 5.3.1.

Figura 3.5.1 Valores de  $C_s$  en función de  $(h_s, k)$



- **Calculo de la selección del conductor**

El conductor que formará la malla de tierras debe ser capaz de soportar la máxima corriente de falla durante un tiempo determinado sin llegar a la fusión. El material puede ser de cobre, aluminio o de hierro, pero debido a la corrosión es el cobre el material más utilizado por su alta resistencia a la corrosión.

La ecuación que evalúa la capacidad de cualquier conductor del cual se conocen las constantes del material, ordenadas de tal manera que se calcule el tamaño o calibre del conductor en función de la corriente son:

$$I = A \sqrt{\left( \frac{T_{CAP} \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left( \frac{K_O + T_m}{K_O + T_A} \right)}$$

Si el tamaño del conductor está dado en Circular Mills, la ecuación se modifica a:

$$I = 5.0671 \times 10^{-6} \times A \sqrt{\left( \frac{T_{CAP}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left( \frac{K_O + T_m}{K_O + T_A} \right)}$$

Donde:

$I$  = Corriente rms en Kiloamperes  
 $A$  = Sección transversal del conductor en  $\text{mm}^2$   
 $T_m$  = Temperatura máxima permisible en  $^{\circ}\text{C}$   
 $T_a$  = Temperatura ambiente en  $^{\circ}\text{C}$   
 $T_r$  = Temperatura de referencia para las constantes del material en  $^{\circ}\text{C}$   
 $\alpha_0$  = Coeficiente térmico de resistividad a  $^{\circ}\text{C}$   
 $\alpha_r$  = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia  $T_r$   
 $\rho_r$  = Resistividad del conductor a la temperatura de referencia  $T_r$ , en  $\mu\Omega\text{-cm}$ .  
 $K_0 = 1/\alpha_0$  ó  $(1/\alpha_r) - T_r$   
 $t_c$  = Tiempo de duración del flujo de corriente en seg.  
 $T_{\text{CAP}}$  = Factor de capacidad térmica en  $\text{J/cm}^3/^{\circ}\text{C}$

Las ecuaciones pueden ordenarse de tal manera que se calcule el tamaño o calibre del conductor requerido en función de la corriente.

$$A_{\text{mm}^2} = I \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^4 / T_{\text{CAP}}}{Ln[1 + (T_m - T_a / K_0 T_a)]}} \quad (3.20)$$

$$A_{\text{cmils}} = 1973.521 \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r \times 10^4 / T_{\text{CAP}}}{Ln[1 + (T_m - T_a / K_0 + T_a)]}} \quad (3.21)$$

La tabla 5.3.2 proporciona una referencia rápida para algunos materiales, suponiendo los siguientes parámetros de diseño:

- 1.-Temperatura ambiente de  $40^{\circ}\text{C}$
- 2.-Temperatura límite de fusión del conductor como se muestra en la tabla
- 3.-Temperatura máxima de  $450$  y  $250^{\circ}\text{C}$  para los conectores

**Tabla 3.5.2** Calibres mínimos del conductor

Tiempo de falla (s)	100% $C_u$	97% $C_u$	40% $CC_s$	30% $CC_s$	97% $C_u/T_L$	$T_L(250^{\circ}\text{C})$
30	38.4	38.7	57	62.8	51.1	64.5
4	14	14.2	20.3	24	18.7	23.5
1	7	7.1	10.4	12	9.3	11.8
5	4.9	5	7.4	8.5	6.6	8.3

La tabla 5.3.3 nos muestra los diámetros de los conductores desnudos de cobre

Las primeras normas AIEE e IEEE recomendaban calibres mínimos de 1/0 y 2/0 de conductores de cobre para construir las mallas y en recientes encuestas se tiene que se utiliza en la mayor parte conductor calibre 4/0 y unos pocos usan calibre 500 MCM o menos sin reportar daños mecánicos <sup>(14)</sup>.



Tabla 3.5.3 Calibres y diámetros de conductores

CALIBRE AWG/KCM	SECCION TRANSVERSAL		DIAMETRO mm
	mm <sup>2</sup>	cmils	
12	3.309	6530	2.053
10	5.561	10380	2.588
8	8.366	16510	3.264
6	13.300	25500	4.115
4	21.150	41740	5.189
2	33.630	66370	6.544
1/0	53.480	105500	8.251
2/0	67.430	133100	9.266
3/0	85.030	167800	10.684
4/0	107.200	211600	11.684
250	127.000	250000	13.200
350	177.000	350000	15.700
500	253.000	500000	18.700
600	304.000	600000	20.700
750	380.000	750000	23.100

- Potencial de malla

$$E_m = K_m K_{ii} I_G / L \quad (3.22)$$

Es el producto del factor geométrico  $K_m$ , El factor de corrección  $K_{ii}$  la resistividad del terreno  $\rho$  y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado  $I_G/L$ .

- Calculo del factor  $K_m$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\ln \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{Kh} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)}} \quad (3.23)$$

$$n = \sqrt{n_a \times n_b} \quad (3.24)$$

Donde  $K_{ii}=1$  para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro o con varillas en las esquinas de la malla o con varillas a lo largo del perímetro, y por toda la malla tenemos

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^2} \quad (3.25)$$

Para mallas sin varilla de tierra o mallas que contengan solo algunas varillas, ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro.

$$K_A = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (3.26)$$

h= Profundidad de la malla en metros

h<sub>0</sub>=1m(referencia de la profundidad de malla)

D= Espaciamiento entre conductores paralelos en metros

n= Número de conductores paralelos en una dirección

d= Diámetro del conductor de la malla

- **Calculo del factor K<sub>i</sub>**

$$K_i = 0.56 + 0.172 n \quad (3.27)$$

- **Potencial de paso**

$$E_s = \rho K_s K_i I_G / L \quad (3.28)$$

Es el producto del factor geométrico K<sub>s</sub>. El factor de corrección K<sub>i</sub> la resistividad del terreno ρ y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado I<sub>G</sub>/L.

- **Cálculo del factor K<sub>s</sub>**

Para una profundidad 0.25 < h < 2.5m

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (3.29)$$

para una profundidad menor que 0.25m

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} W \right] \quad (3.30)$$

Donde

$$W = 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots + 1/n - 1$$

O para n > 6

$$W = 1/2(n-1) + \ln(n-1) - 0.423$$

El empleo de las diferentes ecuaciones para el factor K<sub>s</sub>, depende de la profundidad h de la malla, ya que el potencial de paso decrece rápidamente cuando se incrementa la profundidad.

- **Calculo de la longitud total del conductor L**

Proponiendo una malla con "n" conductores paralelos y "m" conductores transversales colocados a distancias razonables (espaciamiento) y uniformes dentro del área a proteger así como un determinado número de varillas.

Para mallas con varillas de tierra:

$$L = L_c + 1.15L_r \quad (3.31)$$

$L_c$  = Longitud de conductores enterrados de la malla

$L_r$  = longitud total de las varillas de tierra

El factor 1.15 refleja el hecho de que la densidad de la corriente es mucho mayor en las varilla cerca del perímetro que en los conductores de la malla.

Para mallas sin varillas de tierra, o mallas con varilla pero localizada lejos del perímetro

$$L = L_c + L_r \quad (3.32)$$

Puede desarrollarse una ecuación que permita determinar de manera preliminar, la longitud de conductor necesaria en la malla para mantener el potencial de contacto dentro de límites seguros

$$\text{Para } E_m < E_{\text{cont } 50}: \quad L > \frac{K_m K_1 \rho_f \sigma \sqrt{I_s}}{(116 + 0.174 C_s (h_s, K) \rho_s)} \quad (3.33)$$

$$\text{Para } E_m < E_{\text{cont } 70}: \quad L > \frac{K_m K_1 \rho_f \sigma \sqrt{I_s}}{(157 + 0.235 C_s (h_s, K) \rho_s)} \quad (3.34)$$

#### • Cálculo de la resistencia a tierra

Un sistema de tierra deberá proporcionar una resistencia a tierra con valores cercanos a cero, en la practica la elevación de potencial a tierra en el lugar de la subestacion se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla, a altas corrientes se deberá tener un valor muy bajo de resistencia del sistema.

Para subestaciones de potencia es recomendable tener valores a tierra cercanos a 1 Ohm o menos, mientras que en subestaciones de distribución un rango aceptable es de 1 a 5 Ohms, dependiendo de las condiciones locales <sup>(14)</sup>.

La resistencia depende del área ocupada por el sistema de tierras, el valor mínimo de la resistencia a tierra de una subestacion en el suelo uniforme puede estimarse por medio de la formula de una placa metálica circular una vez que se ha determinado la resistividad del suelo.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \frac{\pi}{\sqrt{A}} \quad (3.35) \text{ Laurent}$$

Donde  $R_g$  = Resistencia a tierra en Ohms

$\rho$  = Resistividad promedio del suelo en Ohms-metro

$A$  = Area ocupada por la malla de tierra en  $m^2$

Puede obtenerse un valor limite de la resistencia agregando un termino a la formula anterior:

$$R_x = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L} \quad (3.36) \text{ Niemann}$$

Donde L es la longitud total de conductores enterrados de la red en m.

Las ecuaciones anteriores pueden emplearse con razonable precisión para profundidades de la red menores a 0.25 m.

Para profundidades entre 0.25 y 2.5 metros se requiere una corrección por profundidad:

$$R_x = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (3.37) \text{ Sverack's}$$

Donde h es la profundidad de la malla en m

La ecuación 3.35 se usara solamente cuando se requiera un valor estimado de la resistencia a tierra.

Las ecuaciones 3.36 y 3.37 son de gran ayuda para calcular la elevación de potencial a tierra para evaluar un diseño preliminar y determinar la longitud aproximada de conductores enterrados que se necesitan para el control de los voltajes de paso y de contacto.

El NEC (National Electric Code) establece que la resistencia a tierra no debe exceder de los 25 Ohms, este es el limite superior y una guía, ya que resistencias de mucho menor valor se requieren en muchos casos.

Un nivel de resistencia adecuado y seguro, que de protección al personal y al equipo, es obtener un valor de 1 Ohm, el NEC establece que en subestaciones de transmisión deben diseñarse sin exceder a un Ohm de resistencia. En subestaciones de distribución, la resistencia máxima recomendable es de 5 Ohms, en la mayoría de los casos, la malla de tierras del sistema de cualquier subestación proporcionará la resistencia elegida.

Las varillas a tierra, por supuesto serán requeridas en líneas de transmisión de alta tensión, donde como máximo se recomienda una resistencia de 15 Ohms, y en líneas de distribución donde se recomienda un máximo de 25 Ohms. Todos los sistemas eléctricos construidos de acuerdo con el NEC, no deben exederse los 25 Ohms.

### 3.5.2 Procedimiento de diseño

- i. **Datos de campo**
  - Área ocupada por la malla de tierra y resistividad del terreno.
  - El área que ocupará la malla podrá determinarse a partir del plano general de arreglo de equipos de la subestación.
  - En este plano estarán iniciados los límites y la ubicación de los equipos.
  - La resistividad del terreno podrá determinarse con algunos de los métodos de medición o de datos promedio proporcionados por tablas.
  - Las pruebas de resistividad determinarán el perfil de resistividad y el modelo del suelo a utilizar.
- ii. **Dimensionamiento del conductor.**
  - Cálculo de la corriente de falla. Tiempo de duración de la falla y diámetro del conductor de la malla.
  - La corriente de falla podrá calcularse con las fórmulas y será la máxima que los conductores puedan conducir en la malla de tierra.
  - El tiempo de duración de la falla reflejará el tiempo máximo posible para la liberación de la falla, incluido el de operación de una protección de respaldo.
  - La sección del conductor se calcula con sus respectivas fórmulas.
- iii. **Cálculo de potenciales de paso y contacto tolerables**
  - Los potenciales de paso y contacto tolerables, se calcularán con las ecuaciones descritas anteriormente.
  - La selección del tiempo (  $t_s$  ) estará basado en el criterio del Ingeniero de diseño de acuerdo con lo establecido en el estudio de coordinación de protecciones.
- iv. **Diseño inicial de la malla**
  - El diseño preliminar de la malla deberá incluir un conductor rodeando el área completa de la subestación.
  - Se localizarán conductores cruzados en dos direcciones formando una retícula para permitir la conexión a tierra de los diferentes equipos.
  - El espaciamiento entre estos conductores y la localización de las varillas de tierra, deberá basarse en la corriente  $I_G$  y en el área a proteger por la malla.
- v. **Resistencia a tierra de la malla**
  - Puede determinarse un valor preliminar de resistencia de la malla, con las ecuaciones indicadas.
  - Para el diseño final, pueden encontrarse estimaciones más precisas de la resistencia, especialmente cuando en los cálculos se emplea la resistencia de las varillas.

- vi. **Corriente de malla**
- La corriente  $I_G$  se determina por las ecuaciones, para evitar un sobredimensionamiento de malla, se usará en el diseño únicamente aquella parte de la corriente total de falla  $3I_0$  y que contribuye a los potenciales de paso y de malla y a la elevación de potencial de la malla.
  - La corriente  $I_G$  deberá reflejar la peor condición de falla, el factor de decremento y cualquier factor de expansión futuro en el sistema eléctrico.
- vii. **Comparación de potenciales**
- Si la máxima elevación de potencial de la malla del diseño preliminar está por debajo del valor del potencial de contacto tolerable, ya no es necesario realizar más cálculos, únicamente se agregarán si se requiere, conductores adicionales para la puesta a tierra del equipo.
- viii. **Cálculo de potenciales de paso y de contacto en la malla**
- Los potenciales de paso y de contacto en la malla se calcularán con las ecuaciones descritas.
- ix. **Comparación de potencial de contacto en la malla con el potencial de contacto tolerable.**
- En este paso se comparará el potencial de contacto en la malla llamado también potencial de malla, con el potencial de contacto tolerable.
  - Si el potencial de malla es menor que el potencial de contacto tolerable, el diseño puede complementarse, y si no modificar el diseño preliminar.
- x.
- Si los potenciales de paso y de contacto en la malla son menores a los potenciales tolerables, el diseño necesitará solamente de conductores adicionales para puesta a tierra de equipo, si no, tendrá que revisarse el diseño preliminar.
- xi.
- Si se exceden los límites de los potenciales tolerables, se requerirá de una revisión en el diseño de la malla.
  - Esta revisión incluirá espaciamientos más pequeños entre conductores, varillas de tierra adicionales, etc.
- xii. **Detalles en el diseño**
- Después de satisfacer los requerimientos para cumplir con los potenciales tolerables, deberá revisarse el diseño final para incluir conductores que hagan falta cerca de los equipos que se van a conectar a tierra, o adicionar varilla en las bases de los apartarayos o en los neutros de transformadores, etc.

## CAPITULO 4

### DESARROLLO DEL SOFTWARE

#### 4.1. Introducción al lenguaje de programación Visual Basic 6.0

*Visual Basic* es un lenguaje de programación visual (4ª Generación) construido por *Microsoft* el cual se ha vuelto el más popular del mundo. Se trata de un producto con interfaz gráfica que sirve para crear aplicaciones en *Windows*, se puede incorporar todos los elementos de este entorno informático como ventanas, botones, cajas de dialogo y de texto, botones de opción y selección, barras de desplazamiento, gráficos y menús. Basado en el *lenguaje Basic* y en la programación basada a objetos.

*Microsoft Visual Basic 6.0* nos da la facilidad de trabajar en forma de pantallas o carpetas disponibles todo el tiempo para la observación de los valores que tenemos para el cálculo, permite modificarlos a voluntad en cualquier momento de un modo muy sencillo, en ocasiones bastan unas pocas operaciones con el ratón y la inclusión a través del teclado de algunas instrucciones para disponer de aplicaciones con todas las características de *Windows*.

Como se menciono anteriormente *Visual Basic 6.0* es también un programa basado en objetos, aunque no orientado a objetos como *C++* o *Java*. La diferencia esta en que *Visual Basic 6.0* utiliza objetos con propiedades y métodos, pero carece de *herencia* y *polimorfismo* propios de los verdaderos lenguajes a objetos como *Java* y *C++*.

#### Herramientas básicas de desarrollo

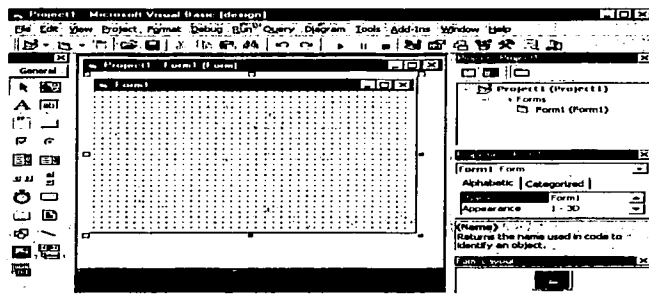
##### El Entorno de Desarrollo

Al iniciar veremos en la interfaz del Entorno de Desarrollo. (Ver Figura 4.1.1).

El entorno de programación típico de *Visual Basic 6.0* consta de ventanas que comparten el espacio disponible de la pantalla. Cada una de estas ventanas puede modificarse, cerrarse y volverse a abrir mediante el menú *View*. Estas ventanas fundamentales son:

- Ventana de Explorador de Proyecto
- Ventana de Propiedades
- Ventana del Editor de Código
- Ventana de Ubicación de Formulario
- Ventanas de Inmediato, Variables Locales y Vista

Figura 4.1.1. Entorno de Desarrollo

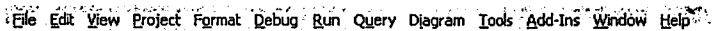


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### Barra de Menú

Despliega los comandos para trabajar con Visual Basic 6.0. (Ver figura 4.1.2).

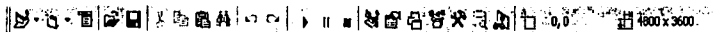
Figura 4.1.2 Barra de Menú



### Barra de Herramientas

Provee un acceso rápido a los comandos más comunes. (Ver figura 4.1.3).

Figura 4.1.3 Barra de Herramientas



### Caja de Herramientas

Esta es la Caja de Herramientas de Visual Basic, en ella se enumeran cada uno de los Controles que podemos utilizar. Es posible además agregar Controles adicionales. (Ver figura 4.1.4).

### Ventana de Explorador de Proyecto

Lista los formularios y módulos que componen un programa. (Ver figura 4.1.5).

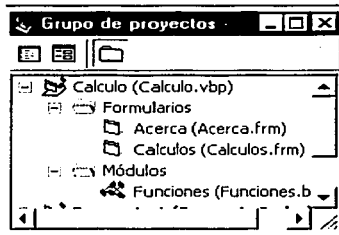


Figura 4.1.4 Caja de controles



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.1.5 Explorador de proyectos.



### Ventana de Propiedades

Lista las propiedades para el control o formulario seleccionado. Una propiedad es una característica del objeto seleccionado, tal como tamaño, color o posición, etc. (Ver figura 4.1.6).

### Ventana del Editor de Código

Es la ventana donde podrá editar su código. Se abrirá una ventana por cada módulo que esté trabajando u objeto. (Ver figura 4.1.7).

Figura 4.1.6 Ventana de Propiedades

Propiedades: Form1

Form1 Form

Alphabetic | Categorized |

(Name)	Form1
Appearance	1 - 3D
AutoRedraw	False
BackColor	<input type="checkbox"/> 8H800000F
BorderStyle	2 - Sizable

(Name)  
Returns the name used in code to identify an object.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.1.7 Editor de código

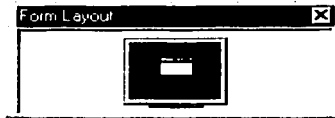
```
Private Sub MSH_Positiva_KeyPress(Index As Integer, KeyAscii As Integer)
Dim LO_EstaLleno As Boolean
Dim LO_Cols As Integer
Dim LO_Rows As Integer
Dim comple

If Index = 1 Then
    KeyAscii = 0
    Exit Sub
End If
Call PF_WriteGrid(MSH_Positiva(Index), KeyAscii)
LO_EstaLleno = True
With MSH_Positiva(Index)
    For LO_Rows = 0 To .Rows - 1
        For LO_Cols = 0 To .Cols - 1
            If Trim(.TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "" Or Trim(.TextMatrix(LO_Rows,
                LO_EstaLleno = False
        Exit For
    End If
Next LO_Cols
Next LO_Rows
End With
If LO_EstaLleno = True Then
    Call PF_AdmittanciaPositiva
Else
```

### Ventana de Ubicación de Formulario

Permite posicionar los formularios de una aplicación utilizando una pequeña representación gráfica. (Ver figura 4.1.8).

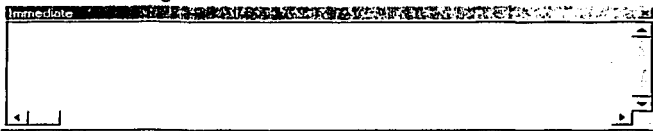
**Figura 4.1.8 Ubicación del Formulario**



### Ventanas de Inmediato, Variables Locales y Vista

Estas ventanas adicionales se utilizan en la depuración de la aplicación. Sólo están disponibles mientras se está ejecutando la aplicación dentro del Ambiente de Desarrollo. (Ver figura 4.1.9).

**Figura 4.1.9 Ventana de Variables Locales**

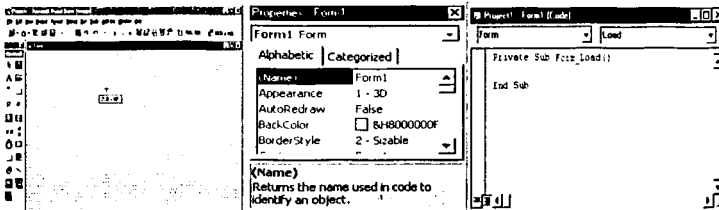


Ahora bien, teniendo en cuenta estos conceptos podemos llevar a cabo una explicación de los elementos que se aplicaran dentro del programa. Consideremos la estructura del proyecto. Hay tres pasos principales que debemos de seguir al momento de crear un proyecto. (Ver figura 4.1.10).

- Dibujar los controles sobre el formulario.
- Establecer las propiedades de los controles y el formulario.
- Escribir el código para responder a los eventos.

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

**Figura 4.1.10 Pasos para crear un proyecto.**



Una herramienta sumamente importante en el diseño del programa seran los botones de comando (commandButton). (Ver figura 4.1.11)

**Figura 4.1.11** Botón de comando.



Otro comando que es importante y que se emplea dentro de los programas son los cuadro de mensaje (**MsgBox**), nos permite darle información instantánea al usuario relacionada con cualquier evento de nuestro programa.

En el diseño de los programas siempre será necesario comunicarle algo a los usuarios, para tal motivo utilizaremos el control **Label**. El control **Frame** nos permitirá la agrupación lógica de controles que actúan en un contexto similar. Este será un control que le dará una mejor apariencia a nuestro formulario. Otro control que se empleará es el **ComboBox**, estos controles suelen recordar las entradas que se han introducido antes, para que podamos seleccionarlas sin tener que escribirlas, en ese sentido funcionan igual que un **Listbox**, pero también permiten introducir nuevas entradas. El control **ListBox**, consiste en una ventana rectangular con una lista de cadenas entre las cuales el usuario puede escoger.

**MSHFlexGrid** es un control ActiveX que proporciona los beneficios de organización que podrá encontrar normalmente en una hoja de cálculo.

Tenemos que tomar en cuenta que Visual Basic se maneja mediante **Eventos**. Los eventos, son acciones que pueden ser motivadas por el propio usuario o por el mismo sistema operativo. A estos eventos se les puede asociar código para que se ejecute al producir el evento.

**MouseMove:** al mover el ratón por encima del control

**Mousedown:** al pulsar cualquier botón del ratón

**Change:** al cambiar el contenido del control

**Click:** al hacer click con el botón izquierdo del ratón sobre el control

**DoubleClick:** al hacer doble click con el con el botón izquierdo del ratón sobre el control

**Getfocus:** este evento se activa cuando el control recibe el enfoque, es decir, cuando se activa el control en tiempo de ejecución para introducir datos en él o realizar alguna operación.

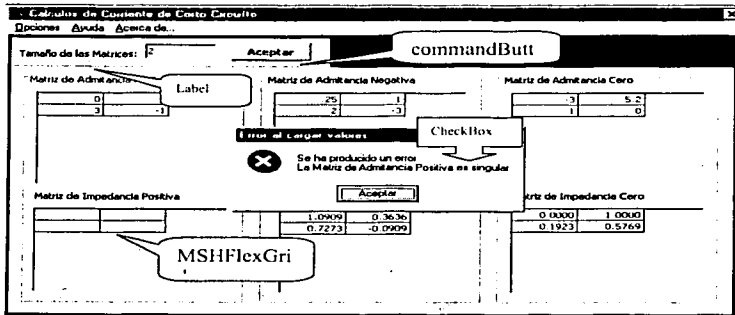
**Lostfocus:** Es el contrario del anterior evento, se activa cuando el control pierde el enfoque, es decir, se pasa a otro control para seguir introduciendo datos.

Básicamente estos serán los controles que más se utilizaran en el diseño .

## 4.2. Modulo del programa para análisis de corto circuito.

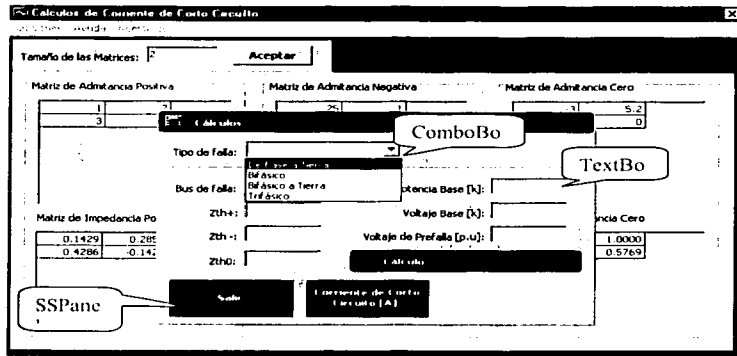
A continuación se presentará un ejemplo con todos los controles utilizados para el diseño del programa de análisis de corto circuito. (Ver figura 4.2.1 y 4.2.2).

Figura 4.2.1 Ejemplo de controles utilizados en el programa



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

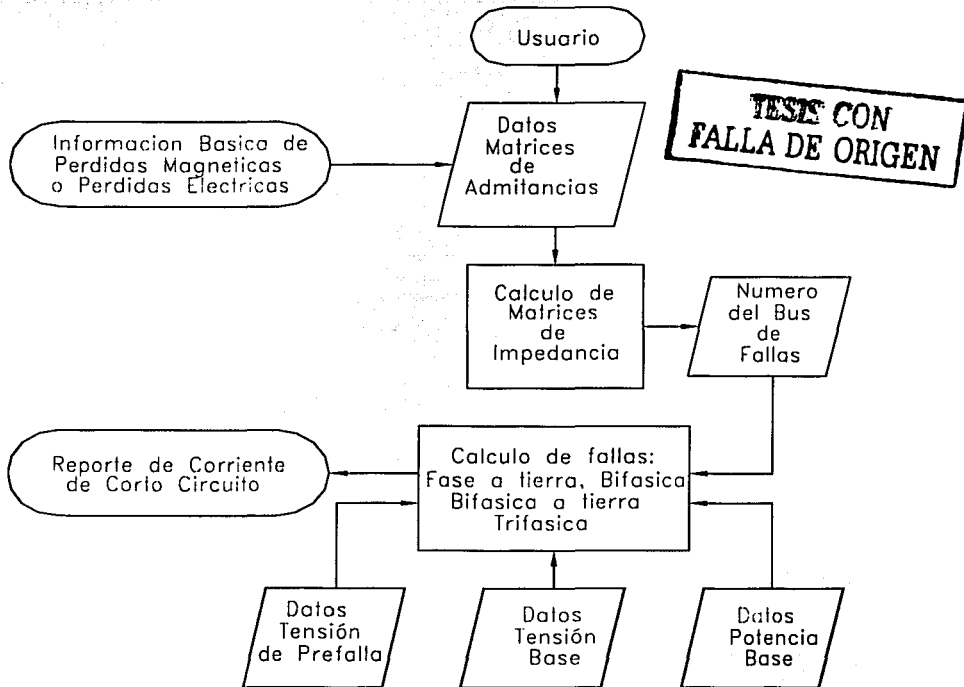
Figura 4.2.2 Ejemplo de controles utilizados en el programa



#### 4.2.1. Diagrama de flujo

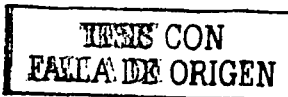
A continuación se muestra el diagrama a bloques considerado para el desarrollo del calculo de corriente de corto circuito:

Figura 4.2.3 Diagrama de flujo del programa para análisis de corto circuito



## 4.2.2 Código de programación.

```
Dim GF_Bus As Integer
Dim GF_Caleulo As Boolean
Sub PE_AdmintranciaCero()
Dim LO_Col As Integer
Dim LO_Row As Integer
Dim LO_MatAdmCer
Dim LO_MatAdmCer2
Dim LO_MatAdmCer3
Dim LO_MatIncoG
Dim LO_MatTerInd
Dim LO_Valor
On Error GoTo ErrorHandler
ReDim LO_MatAdmCer(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
ReDim LO_MatAdmCer2(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
ReDim LO_MatAdmCer3(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
For LO_Col = 0 To GF_Bus - 1
LO_Valor = Val(MSH_Cero(0).TextMatrix(LO_Row, LO_Col))
LO_MatAdmCer(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
LO_MatAdmCer2(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
LO_MatAdmCer3(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
Next LO_Col
Next LO_Row
' Crea la Matriz Unidad
ReDim LO_MatTerInd(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
LO_MatTerInd(LO_Row, LO_Row) = 1
Next LO_Row
'Transformación de la matriz y de los terminos independientes
k = 0
While k < GF_Bus - 1
i = k + 1
While i < GF_Bus
s = 0
While s < GF_Bus
LO_MatTerInd(i, s) = LO_MatTerInd(i, s) - ((LO_MatAdmCer3(i, k) * LO_MatTerInd(k, s)) / LO_MatAdmCer3(k, k))
s = s + 1
Wend
j = k + 1
While j < GF_Bus
LO_MatAdmCer3(i, j) = LO_MatAdmCer3(i, j) - ((LO_MatAdmCer3(i, k) * LO_MatAdmCer3(k, j)) / LO_MatAdmCer3(k, k))
j = j + 1
Wend
i = i + 1
Wend
k = k + 1
Wend
'Calculo de las incognitas, elementos de la matriz inversa
ReDim LO_MatIncoG(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
s = 0
While s < GF_Bus
LO_MatIncoG(GF_Bus - 1, s) = LO_MatTerInd(GF_Bus - 1, s) / LO_MatAdmCer3(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
i = GF_Bus - 2
While i = 0
LO_MatIncoG(i, s) = LO_MatTerInd(i, s) / LO_MatAdmCer3(i, i)
k = GF_Bus - 1
While k > i
LO_MatIncoG(i, s) = LO_MatIncoG(i, s) - ((LO_MatAdmCer3(i, k) * LO_MatIncoG(k, s)) / LO_MatAdmCer3(i, i))
k = k - 1
Wend
i = i - 1
Wend
i = i - 1
```



```

Wend
s = s + 1
Wend
'Nuestra la Matriz Inversa
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
  For LO_Col = 0 To GF_Bus - 1
    MSIH_Cero(1).TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(Format(LO_MatIncog(LO_Row, LO_Col), "#0.00000"))
  Next LO_Col
Next LO_Row
Label1(2).Visible = True
SSP_MatrixDisable(2).Enabled = True
Exit Sub
ErrorHand:
MsgBox Err.Description, 16, Me.Caption
MsgBox ("Se ha producido un error" & vbCrLf & "La Matriz de Admitancia Cero es singular "), vbCritical, "Error al cargar valores."
Err.Clear
MSIH_Cero(1).Clear
Exit Sub
End Sub
Sub PF_AdmitanciaNegativa()
Dim LO_Col As Integer
Dim LO_Row As Integer
Dim LO_MatAdmNeg
Dim LO_MatAdmNeg2
Dim LO_MatAdmNeg3
Dim LO_MatIncog
Dim LO_MatTerInd
Dim LO_Valor
On Error GoTo ErrorHand
ReDim LO_MatAdmNeg(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
ReDim LO_MatAdmNeg2(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
ReDim LO_MatAdmNeg3(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
  For LO_Col = 0 To GF_Bus - 1
    LO_Valor = Val(MSIH_Negativa(0).TextMatrix(LO_Row, LO_Col))
    LO_MatAdmNeg(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
    LO_MatAdmNeg2(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
    LO_MatAdmNeg3(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
  Next LO_Col
Next LO_Row
' Crea la Matriz Unidad
ReDim LO_MatTerInd(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
  LO_MatTerInd(LO_Row, LO_Row) = 1
Next LO_Row
'Transformación de la matriz y de los terminos independientes
k = 0
While k < GF_Bus - 1
  i = k + 1
  While i < GF_Bus
    s = 0
    While s < GF_Bus
      LO_MatTerInd(i, s) = LO_MatTerInd(i, s) - ((LO_MatAdmNeg3(i, k) * LO_MatTerInd(k, s)) / LO_MatAdmNeg3(k, k))
      s = s + 1
    Wend
    j = k + 1
    While j < GF_Bus
      LO_MatAdmNeg3(i, j) = LO_MatAdmNeg3(i, j) - ((LO_MatAdmNeg3(i, k) * LO_MatAdmNeg3(k, j)) / LO_MatAdmNeg3(k, k))
      j = j + 1
    Wend
    i = i + 1
  Wend
  k = k + 1
Wend
'Calculo de las incognitas, elementos de la matriz inversa
ReDim LO_MatIncog(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
s = 0
While s < GF_Bus
  LO_MatIncog(GF_Bus - 1, s) = LO_MatTerInd(GF_Bus - 1, s) / LO_MatAdmNeg3(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



```

i = GF_Bus - 2
While i >= 0
  LO_MatIncog(i, s) = LO_MatTerInd(i, s) / LO_MatAdmNeg3(i, i)
  k = GF_Bus - 1
  While k >= 1
    LO_MatIncog(i, s) = LO_MatIncog(i, s) - ((LO_MatAdmNeg3(i, k) * LO_MatIncog(k, s)) / LO_MatAdmNeg3(i, i))
    k = k - 1
  Wend
  i = i - 1
Wend
s = s + 1
Wend
' Muestra la Matriz Inversa
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
  For LO_Col = 0 To GF_Bus - 1
    MSH_Negativa(1).TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(Format(LO_MatIncog(LO_Row, LO_Col), "###0.00000"))
  Next LO_Col
Next LO_Row
MSH_Cero(0).SetFocus
Label1(1).Visible = True
SSP_MatrizDisable(1).Enabled = True
Exit Sub
ErrorHandler:
MsgBox Err.Description, 16, Me.Caption
MsgBox ("Se ha producido un error" & vbCrLf & "La Matriz de Admitancia Negativa es singular "), vbCritical, "Error al cargar valores."
Err.Clear
MSH_Negativa(1).Clear
Exit Sub
End Sub
Sub PF_AdmittanciaPositiva()
Dim LO_Col As Integer
Dim LO_Row As Integer
Dim LO_MatAdmPos
Dim LO_MatAdmPos2
Dim LO_MatAdmPos3
Dim LO_MatIncog
Dim LO_MatTerInd
Dim LO_Valor
On Error Go To ErrorHandler
ReDim LO_MatAdmPos(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
ReDim LO_MatAdmPos2(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
ReDim LO_MatAdmPos3(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
  For LO_Col = 0 To GF_Bus - 1
    LO_Valor = Val(MSH_Positiva(0).TextMatrix(LO_Row, LO_Col))
    LO_MatAdmPos(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
    LO_MatAdmPos2(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
    LO_MatAdmPos3(LO_Row, LO_Col) = LO_Valor
  Next LO_Col
Next LO_Row
' Crea la Matriz Unidad
ReDim LO_MatTerInd(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
  LO_MatTerInd(LO_Row, LO_Row) = 1
Next LO_Row
' Transformación de la matriz y de los terminus independientes
k = 0
While k < GF_Bus - 1
  i = k + 1
  While i < GF_Bus
    s = 0
    While s < GF_Bus
      LO_MatTerInd(i, s) = LO_MatTerInd(i, s) - ((LO_MatAdmPos3(i, k) * LO_MatTerInd(k, s)) / LO_MatAdmPos3(k, k))
      s = s + 1
    Wend
    j = k + 1
    While j < GF_Bus
      LO_MatAdmPos3(i, j) = LO_MatAdmPos3(i, j) - ((LO_MatAdmPos3(i, k) * LO_MatAdmPos3(k, j)) / LO_MatAdmPos3(k, k))
      j = j + 1
    Wend
  Wend
  k = k + 1
Wend

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

```

Wend
l = l + 1
Wend
k = k + 1
Wend
'Calculo de las incognitas, elementos de la matriz Inversa
ReDim LO_MatIncog(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
s = 0
While s < GF_Bus
LO_MatIncog(GF_Bus - 1, s) = LO_MatTerInd(GF_Bus - 1, s) / LO_MatAdmPos3(GF_Bus - 1, GF_Bus - 1)
l = GF_Bus - 2
While l => 0
LO_MatIncog(l, s) = LO_MatTerInd(l, s) / LO_MatAdmPos3(l, l)
k = GF_Bus - 1
While k > l
LO_MatIncog(l, s) = LO_MatIncog(l, s) - ((LO_MatAdmPos3(l, k) * LO_MatIncog(k, s)) / LO_MatAdmPos3(l, l))
k = k - 1
Wend
l = l - 1
Wend
s = s + 1
Wend
' Muestra la Matriz Inversa
For LO_Row = 0 To GF_Bus - 1
For LO_Col = 0 To GF_Bus - 1
MSH_Positiva(1).TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(Format(LO_MatIncog(LO_Row, LO_Col), "##0.00000"))
Next LO_Col
Next LO_Row
'MSH_Negativa(0).SetFocus
Label1(0).Visible = True
ESP_MatrizDisable(0).Enabled = True
Exit Sub
ErrorHandler:
'MsgBox Err.Description, 16, Me.Caption
MsgBox ("Se ha producido un error" & vbCrLf & "La Matriz de Admitancia Positiva es singular "), vbCritical, "Error al cargar valores."
Err.Clear
MSH_Positiva(1).Clear
Exit Sub
End Sub
Sub PF_CalculaResultado()
Dim LO_BusFalla As Integer
Dim LO_Index As Integer
Dim LO_Z1 As Single
Dim LO_Z2 As Single
Dim LO_Z3 As Single
Dim IB As Double
Dim IA As Double
Dim IAI As Double
Dim IAO As Double
LO_BusFalla = Val(Tex_BusFalla.Text)
LO_Index = Val(Com_Clave(0).ItemData(Com_Clave(0).ListIndex))
Lab_Z1.Caption = CStr(MSH_Positiva(1).TextMatrix(LO_BusFalla - 1, LO_BusFalla - 1))
Lab_Z2.Caption = CStr(MSH_Negativa(1).TextMatrix(LO_BusFalla - 1, LO_BusFalla - 1))
Lab_Z3.Caption = CStr(MSH_Cero(1).TextMatrix(LO_BusFalla - 1, LO_BusFalla - 1))
IB = CDb(Tex_Potencia.Text) / (Cdbl(Tex_VolInje.Text) * (Sqr(3)))
Select Case LO_Index
Case 1
IAO = CDb(Tex_Prefalla.Text) / (Cdbl(Lab_Z1.Caption) + Cdbl(Lab_Z2.Caption) + Cdbl(Lab_Z3.Caption))
IA = IB * IAO * 3
Case 2
IAI = CDb(Tex_Prefalla.Text) / (Cdbl(Lab_Z1.Caption) + Cdbl(Lab_Z2.Caption))
IA = IB * IAI * Sqr(3)
Case 3
IAO = (Cdbl(Tex_Prefalla.Text) * Cdbl(Lab_Z2.Caption)) / ((Cdbl(Lab_Z1.Caption) * Cdbl(Lab_Z2.Caption)) + (Cdbl(Lab_Z2.Caption) * Cdbl(Lab_Z3.Caption)) + (Cdbl(Lab_Z1.Caption) * Cdbl(Lab_Z3.Caption)))
IA = IB * IAO * 3
Case 4
IAI = CDb(Tex_Prefalla.Text) / (Cdbl(Lab_Z1.Caption))
IA = IB * IAI

```

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

```

End Select
Lab_Resultado.Caption = CStr(Format$(IA, "#0.00000"))
GF_Calculo = True
End Sub
Sub PF_WriteGrid(MSH_Grid As Object, KeyAscii As Integer)
Dim LO_Row As Integer
Dim LO_Col As Integer
Dim LO_Texto As String
With MSH_Grid
LO_Row = .Row
LO_Col = .Col
LO_Texto = Trim$(TextMatrix(LO_Row, LO_Col))
Select Case KeyAscii
Case 8 '***** BACKSPACE *****
If LO_Texto <> "" Then
LO_Texto = Left$(LO_Texto, Len(LO_Texto) - 1)
.TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(LO_Texto)
End If

Case 13 '***** ENTER *****
Beep
KeyAscii = 0

Case 48 To 57 '***** NUMEROS *****
LO_Texto = LO_Texto + Chr$(KeyAscii)
.TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(LO_Texto)

Case 105 '***** j *****
LO_Texto = LO_Texto + Chr$(KeyAscii)
.TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(LO_Texto)

Case 46 '***** PUNTO *****
If InStr(LO_Texto, ".") = 0 Then
LO_Texto = LO_Texto + Chr$(KeyAscii)
.TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(LO_Texto)
Else
Beep
KeyAscii = 0
Exit Sub
End If

Case 45 '***** _ *****
'If Trim$(LO_Texto) <> "" Then
'If InStr(LO_Texto, "_") = 0 Then
'LO_Texto = LO_Texto + Chr$(KeyAscii)
'.TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(LO_Texto)
'Else
'Beep
'KeyAscii = 0
'Exit Sub
'End If
'Else
'KeyAscii = 0
'End If

Case 43 '***** +*****
If Trim$(LO_Texto) <> "" Then
If InStr(LO_Texto, "+") = 0 Then
LO_Texto = LO_Texto + Chr$(KeyAscii)
.TextMatrix(LO_Row, LO_Col) = CStr(LO_Texto)
Else
Beep
KeyAscii = 0
Exit Sub
End If
Else
KeyAscii = 0
End If
Case 191 '***** ******

```

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

```

If Trim$(L.O_Texto) <> "" Then
  If InStr(L.O_Texto, "+") = 0 Then
    L.O_Texto = L.O_Texto + Chr$(KeyAscii)
    .TextMatrix(L.O_Row, L.O_Col) = CStr(L.O_Texto)
  Else
    Beep
    KeyAscii = 0
    Exit Sub
  End If
Else
  KeyAscii = 0
End If
Case Else
  KeyAscii = 0
End Select
End With
End Sub
Private Sub Com_Accion_Click(Index As Integer)
  Dim L.O_Cont As Integer
  Dim L.O_Tamano As Integer
  Select Case Index
    Case 0
      With Tex_Tamano
        If Trim$(Text) = "" Then
          MsgBox "Debe haber proporcionado el tamaño de las Matrices", 64, Me.Caption
          If .Visible = True And .Enabled = True Then
            .SetFocus
          End If
        End If
      End Sub
    End If
    L.O_Tamano = Val(Text)
  End With
  For L.O_Cont = 0 To 1
    MSH_Positiva(L.O_Cont).Clear
    MSH_Negativa(L.O_Cont).Clear
    MSH_Cero(L.O_Cont).Clear
    MSH_Positiva(L.O_Cont).Rows = L.O_Tamano
    MSH_Positiva(L.O_Cont).Cols = L.O_Tamano
    MSH_Negativa(L.O_Cont).Rows = L.O_Tamano
    MSH_Negativa(L.O_Cont).Cols = L.O_Tamano
    MSH_Cero(L.O_Cont).Rows = L.O_Tamano
    MSH_Cero(L.O_Cont).Cols = L.O_Tamano
  Next L.O_Cont
  GF_Bus = L.O_Tamano
  With MSH_Positiva(0)
    .Row = 0
    .Col = 0
    .RowsSel = 0
    .ColsSel = 0
    If .Visible = True And .Enabled = True Then
      .SetFocus
    End If
  End With
End Select
Label1(0).Visible = False
Label1(1).Visible = False
Label1(2).Visible = False
End Sub

Private Sub Form_Load()
  Com_Clave(0).AddItem "De Fase a Tierra"
  Com_Clave(0).ItemData(Com_Clave(0).NewIndex) = 1
  Com_Clave(0).AddItem "Bifásico"
  Com_Clave(0).ItemData(Com_Clave(0).NewIndex) = 2
  Com_Clave(0).AddItem "Bifásico a Tierra"
  Com_Clave(0).ItemData(Com_Clave(0).NewIndex) = 3
  Com_Clave(0).AddItem "Trifásico"
  Com_Clave(0).ItemData(Com_Clave(0).NewIndex) = 4
  CF_Calculo = False
End Sub

```

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

```

Private Sub MnuGral_Click(Index As Integer)
Select Case Index
Case 2
Acepta.Show 1, Me
End Select
End Sub
Private Sub MnuItepl_Click(Index As Integer)
Dim LO_Message As String
Dim LO_Salto As String
Select Case Index
Case 0
LO_Salto = Chr(10) & Chr(13) & Chr(10) & Chr(13)
' Muestra las instrucciones.
LO_Message = "Introduzca el orden de la matriz. Haga clic en el botón " & Chr$(34) & "Aceptar." & Chr$(34) & "
Inmediatamente puede ir ingresando los valores en la cuadrícula "
LO_Message = LO_Message & LO_Salto & "Inmediatamente se despliegan las matrices de Admitancia"
LO_Message = LO_Message & LO_Salto & "Dentro del Menú en Opciones, Se realizan los Cálculos de los diferentes tipos de Falla
que quiere calcular, esta puede ser: "
LO_Message = LO_Message & LO_Salto & Chr$(9) & " * De Fase a Tierra "
LO_Message = LO_Message & LO_Salto & Chr$(9) & " * Bifásico "
LO_Message = LO_Message & LO_Salto & Chr$(9) & " * Hifásico a Tierra"
LO_Message = LO_Message & LO_Salto & Chr$(9) & " * Trifásico "
LO_Message = LO_Message & LO_Salto & "Si al introducir los valores se desea hacer una corrección, con solo posicionarse en la
cajilla y darle la tecla Backspace se borra el dato tecleado"
MsgBox LO_Message, 32, "Instrucciones para el ingreso de valores dentro de la matriz"
End Select
End Sub
Private Sub MnuOpt_Click(Index As Integer)
Dim LO_Cadena As String
Dim LO_Archivo As String
Dim LO_i As Integer
Dim LO_x As Integer
If Index = 3 Then
End
Else
If MSH_Positiva(0).Rows = 0 Or MSH_Negativa(0).Rows = 0 Or MSH_Cero(0).Rows = 0 Then
Exit Sub
ElseIf Trim$(MSH_Positiva(1).TextMatrix(0, 0)) = "" Or Trim$(MSH_Negativa(1).TextMatrix(0, 0)) = "" Or
Trim$(MSH_Cero(1).TextMatrix(0, 0)) = "" Then
Exit Sub
End If
If Index = 0 Then
Com_Clave(0).ListIndex = -1
Tex_BusFalla.Text = ""
Tex_Potencia.Text = ""
Tex_Voltaje.Text = ""
Tex_Prefalla.Text = ""
Lab_ResultadoCaption = ""
SSP_Calculo(0).Enabled = False
SSP_Calculo(1).Enabled = False
MnuGral(0).Enabled = False
MnuGral(1).Enabled = False
MnuGral(2).Enabled = False
SSP_Calculo(2).Visible = True
ElseIf Index = 1 Then
MousePointer = 11
LO_Cadena = ""
LO_Archivo = App.Path & "\Resultados\ResulMatrices.txt"
Open LO_Archivo For Output As #1
LO_Cadena = "Matriz de Admitancia Positiva"
Print #1, LO_Cadena
For LO_i = 0 To GF_Bus - 1
LO_Cadena = ""
For LO_x = 0 To GF_Bus - 1
LO_Cadena = LO_Cadena + MSH_Positiva(0).TextMatrix(LO_i, LO_x)
LO_Cadena = LO_Cadena + " "
Next LO_x
Print #1, LO_Cadena
Next LO_i

```

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

```

Print #1, ""
LO_Cadena = "Matriz de Impedancia Positiva"
Print #1, LO_Cadena
For LO_i = 0 To GF_Bus - 1
    LO_Cadena = ""
    For LO_x = 0 To GF_Bus - 1
        LO_Cadena = LO_Cadena + MSH_Positiva(1).TextMatrix(LO_i, LO_x)
        LO_Cadena = LO_Cadena + " "
    Next LO_x
    Print #1, LO_Cadena
Next LO_i
Print #1, ""
LO_Cadena = "Matriz de Admitancia Negativa"
Print #1, LO_Cadena
For LO_i = 0 To GF_Bus - 1
    LO_Cadena = ""
    For LO_x = 0 To GF_Bus - 1
        LO_Cadena = LO_Cadena + MSH_Negativa(0).TextMatrix(LO_i, LO_x)
        LO_Cadena = LO_Cadena + " "
    Next LO_x
    Print #1, LO_Cadena
Next LO_i
Print #1, ""
LO_Cadena = "Matriz de Impedancia Negativa"
Print #1, LO_Cadena
For LO_i = 0 To GF_Bus - 1
    LO_Cadena = ""
    For LO_x = 0 To GF_Bus - 1
        LO_Cadena = LO_Cadena + MSH_Negativa(1).TextMatrix(LO_i, LO_x)
        LO_Cadena = LO_Cadena + " "
    Next LO_x
    Print #1, LO_Cadena
Next LO_i
Print #1, ""
LO_Cadena = "Matriz de Admitancia Cero"
Print #1, LO_Cadena
For LO_i = 0 To GF_Bus - 1
    LO_Cadena = ""
    For LO_x = 0 To GF_Bus - 1
        LO_Cadena = LO_Cadena + MSH_Cero(0).TextMatrix(LO_i, LO_x)
        LO_Cadena = LO_Cadena + " "
    Next LO_x
    Print #1, LO_Cadena
Next LO_i
LO_Cadena = "Matriz de Impedancia Cero"
Print #1, LO_Cadena
For LO_i = 0 To GF_Bus - 1
    LO_Cadena = ""
    For LO_x = 0 To GF_Bus - 1
        LO_Cadena = LO_Cadena + MSH_Cero(1).TextMatrix(LO_i, LO_x)
        LO_Cadena = LO_Cadena + " "
    Next LO_x
    Print #1, LO_Cadena
Next LO_i
Close #1
MousePointer = 0
MsgBox "Archivo Generado", 64, Me.Caption
End If
End If
End Sub
Private Sub MSH_Cero_KeyPress(Index As Integer, KeyAscii As Integer)
Dim LO_EstalLeno As Boolean
Dim LO_Cols As Integer
Dim LO_Rows As Integer
If Index = 1 Then
    KeyAscii = 0
    Exit Sub
End If
Call PE_WriteGrid(MSH_Cero(Index), KeyAscii)
LO_EstalLeno = True

```

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

```

With MSH_Cero(Index)
  For LO_Rows = 0 To .Rows - 1
    For LO_Cols = 0 To .Cols - 1
      If Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "" Or Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "-" Or
Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "." Or Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "-" Then
        LO_EstaLleno = False
      Exit For
    End If
    Next LO_Cols
  Next LO_Rows
End With
If LO_EstaLleno = True Then
  Call PF_AdmittanciaCero
Else
  MSH_Cero(1).Clear
End If

```

End Sub

```
Private Sub MSH_Negativa_KeyPres(Index As Integer, KeyAscii As Integer)
```

```
Dim LO_EstaLleno As Boolean
```

```
Dim LO_Cols As Integer
```

```
Dim LO_Rows As Integer
```

```
If Index = 1 Then
```

```
  KeyAscii = 0
```

```
  Exit Sub
```

```
End If
```

```
Call PF_WriteGrid(MSH_Negativa(Index), KeyAscii)
```

```
LO_EstaLleno = True
```

```
With MSH_Negativa(Index)
```

```
  For LO_Rows = 0 To .Rows - 1
```

```
    For LO_Cols = 0 To .Cols - 1
```

```
      If Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "" Or Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "-" Or
Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "." Or Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "-" Then
```

```
        LO_EstaLleno = False
```

```
      Exit For
```

```
    End If
```

```
  Next LO_Cols
```

```
Next LO_Rows
```

```
End With
```

```
If LO_EstaLleno = True Then
```

```
  Call PF_AdmittanciaNegativa
```

```
Else
```

```
  MSH_Negativa(1).Clear
```

```
End If
```

End Sub

```
Private Sub MSH_Positiva_KeyPres(Index As Integer, KeyAscii As Integer)
```

```
Dim LO_EstaLleno As Boolean
```

```
Dim LO_Cols As Integer
```

```
Dim LO_Rows As Integer
```

```
Dim comple
```

```
If Index = 1 Then
```

```
  KeyAscii = 0
```

```
  Exit Sub
```

```
End If
```

```
Call PF_WriteGrid(MSH_Positiva(Index), KeyAscii)
```

```
LO_EstaLleno = True
```

```
With MSH_Positiva(Index)
```

```
  For LO_Rows = 0 To .Rows - 1
```

```
    For LO_Cols = 0 To .Cols - 1
```

```
      If Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "" Or Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "-" Or
Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "." Or Trim(TextMatrix(LO_Rows, LO_Cols)) = "-" Then
```

```
        LO_EstaLleno = False
```

```
      Exit For
```

```
    End If
```

```
  Next LO_Cols
```

```
Next LO_Rows
```

```
End With
```

```
If LO_EstaLleno = True Then
```

```
  Call PF_AdmittanciaPositiva
```

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

```

Else
MSH_Positiva(i).Clear
* End If
* Do While Not EOF(1)
*   Line Input #1, LO_Text
*   lo_palabra = ""
*   Columna = 0
*   LO_Encontre = False
*   For Cadena = 1 To Len(LO_Text)
*     LO_Encontre = False
*     LO_Letra = Mid(LO_Text, Cadena, 1)
*     If LO_Letra <> "." Then
*       lo_palabra = lo_palabra + LO_Letra
*     Else
*       Columna = Columna + 1
*       Select Case Columna
*         Case 1
*           LO_CveProd = Val(lo_palabra)
*           If LO_Palabra = "" Then
*             Exit Do
*           Else
*             If Len(LO_Palabra) > 5 Then
*               Exit Do
*             Else
*               LO_Query = "INSERT INTO PE_Carga VALUES(" + lo_palabra + ","
*             End If
*           End If
*         Case 2 "Plantas
*           LO_Query = LO_Query + CStr(lo_palabra) + ","
*         Case 3 "Distribuidoras
*           LO_Query = LO_Query + CStr(lo_palabra) + ","
*         Case 4
*           If lo_palabra = "" Then
*             lo_palabra = "0"
*           End If
*           LO_Query = LO_Query + CStr(lo_palabra) + "," + Format(dia, "yyyy/mm/dd") + ","
*         End Select
*       lo_palabra = ""
*     End If
*   Next Cadena
* End If
* End Sub
Private Sub SSP_Accion_Click(Index As Integer)
Dim LO_Error As Boolean
Dim LO_Archivo As String
Dim LO_Cadena As String
Select Case Index
Case 0
GF.Calculo = False
With Com_Clave(0)
If .ListIndex < 0 Then
MsgBox "Deberá seleccionar el Tipo de Falla", 64, Me.Caption
If .Visible = True And .Enabled = True Then
.SetFocus
End If
Exit Sub
End If
End With
With Tex_Busfalla
LO_Error = False
If Trim$(Text) = "" Then
MsgBox "Deberá proporcionar el Bus de falla", 64, Me.Caption
LO_Error = True
ElseIf Val(Text) > GF.Bus Or Val(Text) = 0 Then
MsgBox "El bus de falla es incorrecto. Por favor verifiquelo e intente de nuevo", 64, Me.Caption
LO_Error = True
End If
If LO_Error = True Then
If .Visible = True And .Enabled = True Then

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



```

        .SetFocus
    End If
    Exit Sub
End If
End With
With Tex_Potencia
    If Trim$(Text) = "" Then
        MsgBox "Deberá proporcionar la Potencia Base", 64, Me.Caption
    If .Visible = True And .Enabled = True Then
        .SetFocus
    End If
    Exit Sub
End If
End With
With Tex_Voltaje
    If Trim$(Text) = "" Then
        MsgBox "Deberá proporcionar el Voltaje Base", 64, Me.Caption
    If .Visible = True And .Enabled = True Then
        .SetFocus
    End If
    Exit Sub
End If
End With
With Tex_Prefalla
    If Trim$(Text) = "" Then
        MsgBox "Deberá proporcionar el Voltaje de Prefalla", 64, Me.Caption
    If .Visible = True And .Enabled = True Then
        .SetFocus
    End If
    Exit Sub
End If
End With

```

Call PF\_CalculaResultado

Case 1

```

SSP_Calculo(2).Visible = False
SSP_Calculo(0).Enabled = True
SSP_Calculo(1).Enabled = True
MnuGral(0).Enabled = True
MnuGral(1).Enabled = True
MnuGral(2).Enabled = True

```

Case 2

```

If GF_Calculo = False Then
    MsgBox "Necesita realizar los calculos", 64, Me.Caption
    Exit Sub
Else

```

```

    MousePointer = 11
    I.O_Cadena = ""
    I.O_Archivo = App.Path + "\Resultados\Calculos.txt"
    Open I.O_Archivo For Output As #1
    I.O_Cadena = "Bus de falla: " + CStr(Tex_BusFalla.Text)
    Print #1, I.O_Cadena
    I.O_Cadena = "Zth+: " + CStr(Lab_Z1.Caption)
    Print #1, I.O_Cadena
    I.O_Cadena = "Zth-: " + CStr(Lab_Z2.Caption)
    Print #1, I.O_Cadena
    I.O_Cadena = "Zth0: " + CStr(Lab_Z3.Caption)
    Print #1, I.O_Cadena
    I.O_Cadena = "Potencia Base [k]: " + CStr(Tex_Potencia.Text)
    Print #1, I.O_Cadena
    I.O_Cadena = "Voltaje Base [k]: " + CStr(Tex_Voltaje.Text)
    Print #1, I.O_Cadena
    I.O_Cadena = "Voltaje de Prefalla [p.u]: " + CStr(Tex_Prefalla.Text)
    Print #1, I.O_Cadena
    I.O_Cadena = "Calculo: " + CStr(Lab_Resultado.Caption)
    Print #1, I.O_Cadena
Close #1
MousePointer = 0

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

```

MsgBox "Archivo Generado", 64, Me.Caption
End If

End Select

End Sub

Private Sub Tex_BusFalla_GotFocus()
    Call PG_SombraText(Me.Tex_BusFalla)
End Sub
Private Sub Tex_BusFalla_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If KeyAscii = 13 Then
        With Tex_Potencia
            If .Visible = True And .Enabled = True Then
                .SetFocus
            End If
        End With
    End If
    w_vuelto% = FG_Numero%(KeyAscii)
End Sub

Private Sub Tex_Potencia_GotFocus()
    Call PG_SombraText(Me.Tex_Potencia)
End Sub
Private Sub Tex_Potencia_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If KeyAscii = 13 Then
        With Tex_Voltaje
            If .Visible = True And .Enabled = True Then
                .SetFocus
            End If
        End With
    End If
    w_vuelto% = FG_Numero%(KeyAscii)
    w_importe% = FG_Importe%(KeyAscii, Tex_Potencia.Text)
End Sub
Private Sub Tex_Prefalla_GotFocus()
    Call PG_SombraText(Me.Tex_Prefalla)
End Sub
Private Sub Tex_Prefalla_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    w_vuelto% = FG_Numero%(KeyAscii)
    w_importe% = FG_Importe%(KeyAscii, Tex_Prefalla.Text)
End Sub
Private Sub Tex_Tamano_GotFocus()
    Call PG_SombraText(Me.Tex_Tamano)
End Sub
Private Sub Tex_Tamano_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If KeyAscii = 13 Then
        With Com_Accion(0)
            If .Visible = True And .Enabled = True Then
                .SetFocus
            End If
        End With
    End If
    w_vuelto% = FG_Numero%(KeyAscii)
End Sub
Private Sub Tex_Voltaje_GotFocus()
    Call PG_SombraText(Me.Tex_Voltaje)
End Sub
Private Sub Tex_Voltaje_KeyPress(KeyAscii As Integer)
    If KeyAscii = 13 Then
        With Tex_Prefalla
            If .Visible = True And .Enabled = True Then
                .SetFocus
            End If
        End With
    End If
    w_vuelto% = FG_Numero%(KeyAscii)
    w_importe% = FG_Importe%(KeyAscii, Tex_Voltaje.Text)
End Sub

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### 4.3 Modulo del programa para diseño de redes de tierras.

En este módulo es donde mediante un método computacional iterativo se diseña la Red de Tierras necesaria para satisfacer las necesidades básicas de seguridad en una subestación eléctrica de potencia.

El Módulo se divide básicamente en cuatro partes:

1. **Entrada Inicial de Datos** entre los cuales están:
  - a) *Datos de Falla.* Estos son el resultado del Módulo de corto Circuito proveyendo de información relativa a la corriente de corto circuito, duración de la falla, relación  $X/R$  en el punto de falla y algunos datos sobre temperatura ambiente y temperaturas según la norma de conectores utilizados.
  - b) *Selección de Tipo de Conductor.* Se da la opción de escoger entre 10 tipos comerciales de conductores.
  - c) *Datos Físicos del Proyecto.* Es la información relativa a dimensiones de la subestación, resistividad del terreno, resistividad y espesor de la superficie, profundidad a la que, en principio se proyecta colocar la red, etc.
  - d) *Configuración de Varillas en la Red.* Esto se refiere a si la malla tendrá varillas o no y su posición en la red.
  - e) *Nivel de Tolerancia Deseado.* Es el nivel de protección de acuerdo al peso del individuo que labore dentro de la subestación.
2. **Módulo de Cálculo.** Es donde se desarrollan todos los cálculos involucrados para obtener los potenciales de paso y contacto, los potenciales de malla, cálculo de corriente máxima de malla, Resistencia efectiva a Tierra, diámetro de conductor, etc. Este es la parte medular en cuanto a la optimización de tiempo para el usuario.
3. **Presentación de Resultados.** Se muestran todos los resultados que se obtienen en el Módulo de cálculo y se da un dictamen al respecto de si la malla es segura o no. En caso de que no sea segura, se tiene la opción de continuar a la siguiente parte.
4. **Modificación de Datos.** Es factible modificar una o más variables en el diseño de la red o malla de tierra a fin de que el dictamen sea favorable, una vez que se recalculen los potenciales de paso y de contacto.

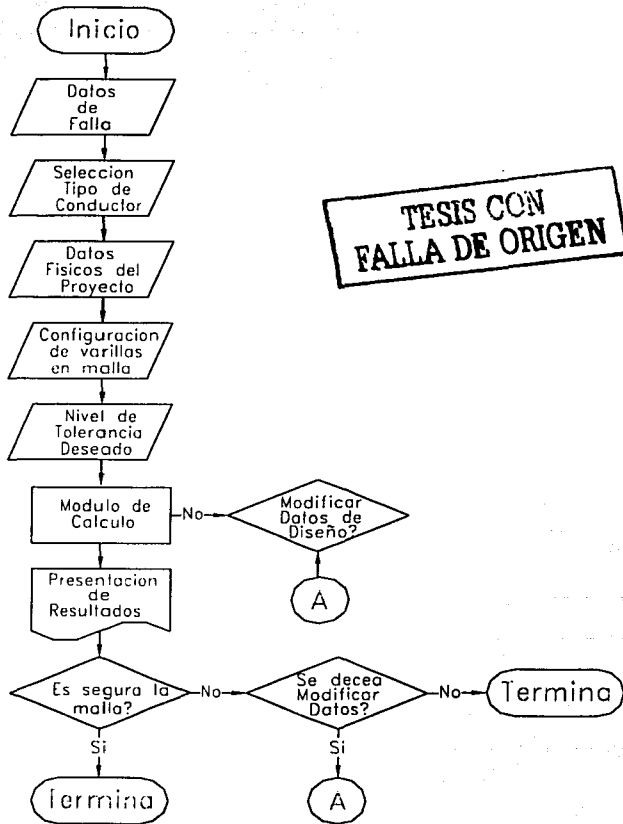
Es necesario establecer que este módulo está basado en las normas:

ANSI / IEEE Std. 80-1986  
ANSI / IEEE Std. 142-1982

### 4.3.1 Diagrama de flujo

A continuación se muestra el Diagrama a Bloques considerado para el desarrollo de la aplicación:

Figura 4.3.1 Diagrama de flujo para el diseño de redes de tierra



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

### 4.3.2 Código de programación

A continuación presentamos el listado del programa para computadora correspondiente al diseño de sistemas de tierra.

```
Dim k As Double
Dim int_contador As Integer
Dim r As Double
Dim es As Double
Public n1 As Integer
Public pmi As Double
Public bin_verdad As Boolean
Public ima, pp5, pp7, pc7, pc5 As Double
Public g As Double
Public lc, mancho, mlong, d1, n2, dir, kil, ppt, kiz, dc, l As Double
Public b, c, d, e, f As Double
Dim dbl_resultado As Double
Public str_seleccion As String
```

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

```
Sub pp57()
    If Form1.Text5.Text = Form1.Text4 Then
        es = 1
    Else
        k = (CInt(Form1.Text4.Text) - CInt(Form1.Text5.Text)) / (CInt(Form1.Text4.Text) + CInt(Form1.Text5.Text))
        For int_contador = 1 To 15
            r = r + ((k ^ int_contador) / (Sqr(1 + ((25 * int_contador * CDec(Form1.Text7.Text)) ^ 2))))
        Next int_contador
        es = (1 / 0.96) * (1 + (2 * r))
    End If
    dbl_resultado = ((1000 + ((es * 6) * CLng(Form1.Text5.Text))) * 0.116) / Sqr(CDbI(Form1.Text11.Text))
    pp5 = dbl_resultado
    Call Form1.lista_resultados("Potencial de paso tol. (50KG):", dbl_resultado)
    dbl_resultado = ((1000 + (es * 6 * CLng(Form1.Text5.Text))) * 0.157) / Sqr(CDbI(Form1.Text11.Text))
    pp7 = dbl_resultado
    Call Form1.lista_resultados("Potencial de paso tol. (70KG):", dbl_resultado)
    "Call lista_resultados("El calibre utilizado es:", 1)
    Call pc57
End Sub

Sub pc57()
    dbl_resultado = ((1000 + ((cs * 1.5) * CLng(Form1.Text5.Text))) * 0.116) / Sqr(CDbI(Form1.Text11.Text))
    Call Form1.lista_resultados("Potencial de contacto tol. (50KG):", dbl_resultado)
    pc5 = dbl_resultado
    dbl_resultado = ((1000 + (cs * 1.5 * CLng(Form1.Text5.Text))) * 0.157) / Sqr(CDbI(Form1.Text11.Text))
    Call Form1.lista_resultados("Potencial de contacto tol. (70KG):", dbl_resultado)
    pc7 = dbl_resultado
    n1 = 3
    bin_verdad = False
    Call pm
While bin_verdad = False
    If pmi > pc5 Then
        n1 = n1 + 1
        Call pm
    Else
        Call Form1.lista_resultados("Potencial de malla:", CDbI(pmi))
        Call Form1.lista_resultados("Corriente máxima de malla:", CDbI(ima))
        Call Form1.lista_resultados("El diametro del conductor es:", CDbI(g))
        Call Form1.lista_resultados("Long. total del conductor de malla:", CDbI(lc))
        Call Form1.lista_resultados("Ancho de la malla:", CDbI(mancho))
        Call Form1.lista_resultados("Largo de la malla:", CDbI(mlong))
        Call Form1.lista_resultados("Número de conductores paralelos:", CDbI(n1))
```

Call Form1.lista\_resultados("Distancia entre conductores paralelos", CDb(d1))  
Call Form1.lista\_resultados("Número de conductores transversales", CDb(Cln(n2)))  
dtr = mlong / (n2 - 1)  
Call Form1.lista\_resultados("Distancia entre conductores transversales", CDb(dtr))  
hin\_verdad = True

End If

Wend

Call pp

End Sub

Sub pm()

Dim km2 As Double

Dim km1, km3 As Double

Select Case Form1.ListView1.SelectedItem.Text

Case "Standard annealed soft copper wire"

b = 0.00393

c = 234

d = 1.7241

e = 3.422

f = 1000000

g = 29.26 / 1000

Case "Commercial Hard drawn copper wire"

b = 0.00381

c = 242

d = 1.7774

e = 3.422

f = 800000

g = 26.18 / 1000

Case "Copper clad steel core wire 1"

b = 0.00378

c = 245

d = 4.397

e = 3.846

f = 750000

g = 25.35 / 1000

Case "Copper clad steel core wire 2"

b = 0.00378

c = 245

d = 5.962

e = 3.846

f = 700000

g = 24.48 / 1000

Case "Commercial EC aluminum wire"

b = 0.00403

c = 228

d = 2.862

e = 2.556

f = 600000

g = 22.68 / 1000

Case "Aluminium alloy wire 5006"

b = 0.00353

c = 263

d = 3.2226

e = 2.598

f = 500000

g = 20.65 / 1000

Case "Aluminium alloy wire 6201"

b = 0.00347

c = 268

d = 3.284

e = 2.598

f = 400000

g = 18.49 / 1000

Case "Aluminium clad steel core wire"

b = 0.0036

c = 258

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

```

d = 8,4805
e = 2.67
f = 350000
g = 17,29 / 1000
Case "Zinc coated steel core wire"
  b = 0,0032
  c = 293
  d = 20,1
  e = 3,931
  f = 300000
  g = 16 / 1000
Case "Stainless steel No. 304"
  b = 0,0013
  c = 749
  d = 72
  e = 4,032
  f = 250000
  g = 14,6 / 1000
End Select

```

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

```

mlong = Form1.Text2.Text + 3
mancho = Form1.Text3.Text + 3
dc = mancho / (n1 - 1)
d1 = mancho / (n1 - 1)
n2 = ((mlong / d1) + 0,5) + 1
n = Sqr(n1 + n2)
k11 = 1 / ((2 * n) ^ (2 / n))
kh = Sqr(1 + Form1.Text6.Text)
km1 = (k11 / kh) * (Log(CDb(8 / (3,1416 * (2 * n - 1)))) / Log(10))
km2 = (dc) ^ 2 / (16 * Form1.Text6.Text * (g / 1000))
km3 = (dc * (2 * Form1.Text6.Text)) ^ 2 / (8 * dc * (g / 1000))
km = 0,1591 * ((Log(km2 + km3 - (Form1.Text6.Text) / (4 * (g / 1000)))) / Log(10)) + km1
k12 = 0,656 + 0,172 * n
dfl = 1 - Exp((-12,5664 * Form1.Text11.Text * Form1.Text9.Text) / Form1.Text10.Text)
df = Sqr(1 + ((Form1.Text10.Text * dfl) / (6,2832 * Form1.Text11.Text * Form1.Text9.Text)))
lma = df * Form1.Text1.Text * Form1.Text15.Text + 1000

```

```

If Form1.Combol.Text = "Malla con varillas solo en el interior" Or Form1.Combol.Text = "Malla sin varillas" Then
  lc = mlong * n1 + mancho * n2
  l = lc + 3 * Form1.Text8.Text
ElseIf Form1.Combol.Text = "Malla con varillas en el perimetro e interior" Then
  lc = mlong * n1 + mancho * n2
  l = lc + 3,45 * Form1.Text8.Text
End If

```

```

pm1 = (Form1.Text4.Text * km * k12 * lma) / l

```

```
End Sub
```

```
Sub pp0
```

```

If n1 >= n2 Then
  m = n1
  If CDb((Form1.Text6.Text) > 0,25 Then
    ks = 0,3183 * (1 / (2 * Form1.Text6.Text)) + (1 / (dc + Form1.Text6.Text)) + (1 - (0,5) * (m - 2)) / dc
  ElseIf CDb((Form1.Text6.Text) < 0,25 Then
    For l = 2 To m - 1
      w = w + (1 / l)
    Next l
    ks = 0,3183 * (1 / (2 * Form1.Text6.Text)) + (1 / (dc + Form1.Text6.Text)) + w / dc
  End If
Else

```

```

m = n2
If CDb((Form1.Text6.Text) > 0,25 Then
  ks = 0,3183 * (1 / (2 * Form1.Text6.Text)) + (1 / (dc + Form1.Text6.Text)) + (1 - (0,5) * (m - 2)) / dc
ElseIf CDb((Form1.Text6.Text) < 0,25 Then
  For l = 2 To m - 1
    w = w + (1 / l)
  Next l
  ks = 0,3183 * (1 / (2 * Form1.Text6.Text)) + (1 / (dc + Form1.Text6.Text)) + w / dc
End If

```

```

End If
End If
k11 = 0.656 + 0.172 * m

pp1 = (Form1.Text4.Text * ks * k11 * lma) / l
Call Form1.lista_resultados("Potencial de paso:", CDb1(pp1))
Call rg
End Sub

Sub rg()
ar = mtong * mancho
rg1 = Form1.Text4.Text * (1 / (1 + (1 / Sqr(20 * ar))) * (1 + 1 / (1 + Form1.Text6.Text * Sqr(20 / ar))))
Call Form1.lista_resultados("Resistencia efectiva a tierra:", CDb(rg1))
bln_pp = False
bln_pc = False

If Form1.Combo2.Text = "50 Kg." Then
If pp5 > pp1 Then
Form1.Label19.Caption = "El potencial de paso es seguro."
bln_pp = True
Else
Form1.Label19.Caption = "El potencial de paso no es seguro."
End If
If pc5 > pm1 Then
Form1.Label20.Caption = "El potencial de contacto es seguro."
bln_pc = True
Else
Form1.Label20.Caption = "El potencial de contacto no es seguro."
End If
Else
If pp7 > pp1 Then
Form1.Label19.Caption = "El potencial de paso es seguro."
bln_pp = True
Else
Form1.Label19.Caption = "El potencial de paso no es seguro."
End If
If pc7 > pm1 Then
Form1.Label20.Caption = "El potencial de contacto es seguro."
bln_pc = True
Else
Form1.Label20.Caption = "El potencial de contacto no es seguro."
End If
If bln_pp = True And bln_pc = True Then
Form1.Label21.Caption = "LA MALLA ES SEGURA"
Else
Form1.Label21.Caption = "LA MALLA NO ES SEGURA"
End If
End If
Call sc

End Sub

Sub sc()

tempo1 = (Form1.Text11.Text * b * d * 10000) / e
tempo2 = (Log(1 + (Form1.Text13.Text - Form1.Text12.Text) / (e - Form1.Text12.Text))) / Log(10)
sc1 = 1973.52 * Form1.Text15.Text * Sqr(tempo1 / tempo2)

Call Form1.lista_resultados("Sección de conductor:", CDb(g))
End Sub

Sub reinicia()
k = 0
int_contador = 0
r = 0
cs = 0
n1 = 3
pm1 = 0
bln_verdad = False
ima = 0

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



```

pp5 = 0
pp7 = 0
pc7 = 0
pc5 = 0
g = 0
lc = 0
mancha = 0
mtong = 0
d1 = 0
n2 = 0
dtr = 0
kll = 0
pp1 = 0
k12 = 0
dc = 0
l = 0
b = 0
c = 0
d = 0
e = 0
f = 0
dhl_resultado = 0
tempo2 = 0
tempo1 = 0
bin_pc = False
bin_pp = False
n = 0
kk = 0
kll = 0
km = 0
dfl = 0
df = 0
m = 0
l = 0
w = 0
n2 = 0
ks = 0
sr = 0
rg1 = 0
sc1 = 0
End Sub
Private Sub Command1_Click()
End
End Sub

Private Sub Command2_Click()
ListView2.ListItems.Clear

Call pp57
Call reinicia

End Sub

Private Sub Form_Load()

Call lista("Standard annealed soft copper wire")
Call lista("Commercial hard drawn copper wire")
Call lista("Copper clad steel core wire 1")
Call lista("Copper clad steel core wire 2")
Call lista("Commercial EC aluminium wire")
Call lista("Aluminium alloy wire 5006")
Call lista("Aluminium alloy wire 6201")
Call lista("Aluminium clad steel core wire")
Call lista("Zinc coated steel core wire")
Call lista("Stainless steel No. 304")
Combo1.Clear
Combo2.Clear
Combo1.AddItem "Malla con varillas solo en el interior"
Combo1.AddItem "Malla con varillas en el perimetro e interior"

```

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

```
Combo1.AddItem "Malla sin varillas"
Combo2.AddItem "50 Kg."
Combo2.AddItem "70 kg."
End Sub

Sub lista(str_texto As String)
Dim tmxm_int As Variant

Set tmxm_int = ListView1.ListItems.Add(, str_texto)
ListView1.SmallIcons = ImageList1
tmxm_int.Icon = 1
tmxm_int.SmallIcon = 1

End Sub

Sub lista_resultados(str_resultado As String, int_indice As Double)
Dim tmxm_int As Variant

str_resultado = str_resultado + CStr(int_indice)
Set tmxm_int = ListView2.ListItems.Add(, str_resultado)
ListView2.SmallIcons = ImageList1
tmxm_int.Icon = 2
tmxm_int.SmallIcon = 2

End Sub

Private Sub ListView1_Click()

Text16.Text = ListView1.SelectedItem.Text

End Sub
```

---

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CAPITULO 5

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

#### 5.1 Ejemplo de calculo para estudio de corto circuito

El método utilizado para el calculo manual es el método de  $Z_{bus}$ , que de igual forma es el utilizado en el diseño del programa de computo para el estudio de corto circuito, así, es posible comprobar la funcionalidad del programa, y lograr una aceptable confiabilidad.

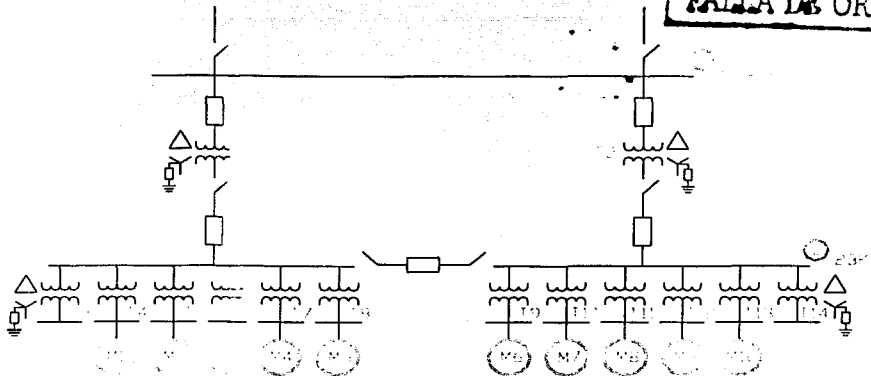
##### 5.1.1 Ejemplo de calculo manual para estudio de corto circuito

El calculo a mano tiene sus limitaciones, la obtención de los valores de falla puede complicarse tanto como se quiera, el objetivo de este capitulo es comprobar que el programa funcione correctamente basándose en el calculo manual.

El procedimiento de calculo a mano trata con los conceptos necesarios, buscamos tomando como base los conceptos del capitulo 2, la solución para el estudio de corto circuito del sistema.

En la figura 5.1 se muestra el diagrama unifilar del sistema utilizado como ejemplo para el estudio de corto circuito.

Figura 5.1.1 Diagrama unifilar del sistema



**Datos:**

$S_B = 5 \text{ MVA}$   
 $V_B = 115 \text{ kv.}$

• **SISTEMA**

115KV.  
 $P_{cc30} = 7200 \text{ MVA.}$   
 $P_{cc10} = 3500 \text{ MVA.}$

• **T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>**

5 MVA  
115KV/23KV  
 $X = 7\%$

• **T<sub>3</sub>, T<sub>14</sub> (SERVICIOS PROPIOS)**

112.5 KVA  
23 KV/0.44KV  
 $X = 3.5\%$

• **T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub>**

500 KVA  
23 KV/4.16 KV  
 $X = 3.5\%$

• **T<sub>8</sub>, T<sub>9</sub>, T<sub>10</sub>, T<sub>11</sub>, T<sub>12</sub>, T<sub>13</sub>**

1000 KVA  
23KV/4.16 KV  
 $X = 6\%$

• **M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub> (INDUCCION)**

500 HP  
4.16 KV  
 $X_1 = 25\%$   
 $\eta = 100\% = 1$   
F.P. = 0.9(-)  $\Delta$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

- $M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}$  (SINCRONOS)

1200 HP

4.16 KV

$X_1 = X_2 = 0.022$  p.u.

$X_0 = 0.035$  p.u.

$\eta = 90\% = 0.9$

F.P. = 0.8 (-) Y

DESARROLLO:

$$P_{cc30} = \frac{E_{a1}^2}{Z_1} S_{BASE}$$

$$Z_1 = \frac{E_{a1}^2}{P_{cc30}} S_{BASE}$$

$$E_{a1} = \frac{V_R}{V_B} = \frac{115}{115} = 1.0 [p.u.]$$

$$Z_1 = \frac{1.0^2 \times 5}{7200} = 0.000694 [p.u.]$$

$$I_a = 3I_{a0} [p.u.]$$

$$I_{a0} = \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_3} [p.u.]$$

$$I_B = \frac{S_B [KV A]}{\sqrt{3} \times V_B [KV]} [A]$$

$$I_a = \frac{P_{cc30} [KV A]}{\sqrt{3} \times V_B [KV]} = \frac{3500000 [KV A]}{\sqrt{3} \times 115 [KV]} = 17571.5299 [A]$$

$$I_{BASE} = \frac{5000 [KV A]}{\sqrt{3} \times 115 [KV]} = 25.1022 [A]$$

$$I_a [p.u.] = \frac{I_a [A]}{I_{BASE} [A]} = \frac{17571.5299}{25.1022} = 699.9996 [p.u.]$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$I_{a0}[p.u.] = \frac{I_a[p.u.]}{3} = \frac{699.9996}{3} = 233.3332[p.u.]$$

$$I_{a0} = \frac{E_{a1}}{2X_1 + X_0}$$

$$X_0 = \frac{E_{a1}}{I_{a0}} - 2X_1 = \frac{1.0}{233.3332} - 2(0.000694) = 0.002898[p.u.]$$

$$Z_{p.u.2} = Z_{p.u.1} \frac{S_B[MVA]}{S_{equipo}[MVA]} \left( \frac{V_{equipo}[KV]}{V_B} \right)^2$$

En el transformador T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.07 \left( \frac{5}{5} \right) \left( \frac{115}{115} \right)^2 = 0.07 [p.u.]$$

En el lado de baja tensión en el transformador

$$V_B = 115 \left( \frac{23}{115} \right) = 23 [KV]$$

$$Z_{BASE} = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(23)^2}{5} = 105.8 [\Omega]$$

$$X_n = \frac{1}{105.8} = 0.009452 [p.u.]$$

En el transformador T<sub>3</sub>, T<sub>14</sub>

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.035 \left( \frac{5}{0.1125} \right) \left( \frac{23}{23} \right)^2 = 1.5556 [p.u.]$$

En el transformador T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub>

$$X_1 = X_2 = X_3 = 0.035 \left( \frac{5}{0.5} \right) \left( \frac{23}{23} \right)^2 = 0.35 [p.u.]$$

En el lado de baja tensión en el transformador

$$V_B = 23 \left( \frac{4.16}{23} \right) = 4.16 [KV]$$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

En los motores  $M_1, M_2, M_3, M_4$

$$KVA = \frac{H.P. \times 0.746}{(F.P.) \times (\gamma)} = \frac{500 H.P. \times 0.746}{(0.9)(1.0)} = 414.4444 [KVA]$$

$$X_1 = 0.25 \left( \frac{5}{0.414444} \right) \left( \frac{4.16}{4.16} \right)^2 = 3.0161 [p.u.]$$

En los motores  $M_5, M_6, M_7, M_8, M_9, M_{10}$

$$KVA = \frac{1200 [H.P.] \times 0.746}{(0.8)(0.9)} = 1243.333 [KVA]$$

$$X_1 = X_2 = 0.022 \left( \frac{5}{1.243333} \right) \left( \frac{4.16}{4.16} \right)^2 = 0.088472 [p.u.]$$

$$X_0 = 0.035 \left( \frac{5}{1.243333} \right) \left( \frac{4.16}{4.16} \right)^2 = 0.14075 [p.u.]$$

En los transformadores  $T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}$

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.06 \left( \frac{5}{1} \right) \left( \frac{23}{23} \right)^2 = 0.3 [p.u.]$$

Numero de Buses : 14

La matriz es de orden 14 X 14

Red de admitancia de secuencia positiva

Figura 5.1.2 Red de admitancia de secuencia positiva

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

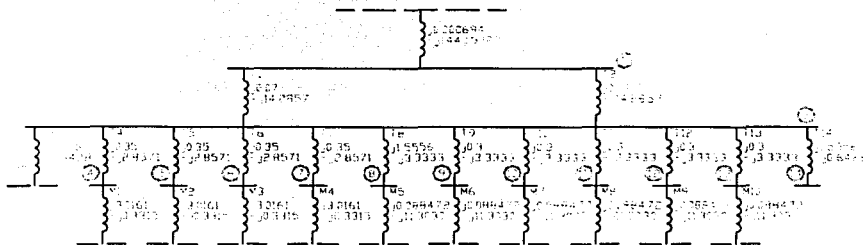
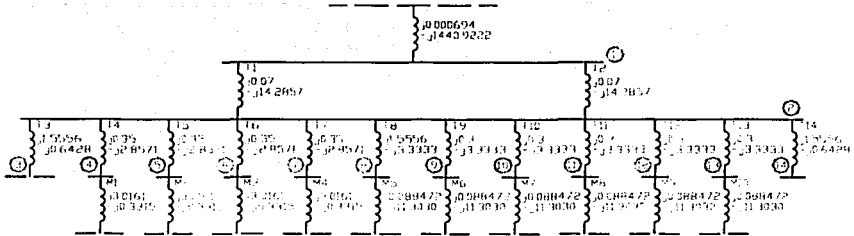


Figura 5.1.3 Red de admitancia de secuencia negativa



$$Y_{1-1} = (-j1440.9222) + (-j14.2857) + (-j14.2857) = -j1469.4936$$

$$Y_{2-2} = (-j14.2857) + (-j14.2857) + (-j.6428) + (-j2.8571) + (-j2.8571) + (-j2.851) +$$

$$(-j3.3333) + (-j3.3333) + (-j3.3333) + (-j.33333) + (-j3.3333) + (-j.06428) = -j61.2852$$

$$Y_{3-3} = -j0.6428$$

$$Y_{4-4} = (-j2.8571) + (-j0.3315) = -j3.1886$$

$$Y_{4-5} = (-j2.8571) + (-j0.3315) = -j3.1886$$

$$Y_{6-6} = (-j2.8571) + (-j0.3315) = -j3.1886$$

$$Y_{7-7} = (-j2.8571) + (-j0.3315) = -j3.1886$$

$$Y_{8-8} = (-j3.3333) + (-j11.3030) = -j14.6363$$

$$Y_{9-9} = (-j3.3333) + (-j11.3030) = -j14.6363$$

$$Y_{10-10} = (-j3.3333) + (-j11.3030) = -j14.6363$$

$$Y_{11-11} = (-j3.3333) + (-j11.3030) = -j14.6363$$

$$Y_{12-12} = (-j3.3333) + (-j11.3030) = -j14.6363$$

$$Y_{13-13} = (-j3.3333) + (-j11.3030) = -j14.6363$$

$$Y_{14-14} = -j0.6428$$

$$Y_{1-2} = Y_{2-1} = j14.2857 + j14.2857 = j28.5714$$

$$Y_{1-3} = Y_{3-1} = j0$$

$$Y_{1-4} = Y_{4-1} = j0$$

$$Y_{2-3} = Y_{3-2} = j0.6428$$

$$Y_{2-4} = Y_{4-2} = j2.8571$$

$$Y_{2-5} = Y_{5-2} = j2.8571$$

$$Y_{2-6} = Y_{6-2} = j2.8571$$

$$Y_{2-7} = Y_{7-2} = j2.8571$$

$$Y_{2-8} = Y_{8-2} = j3.3333$$

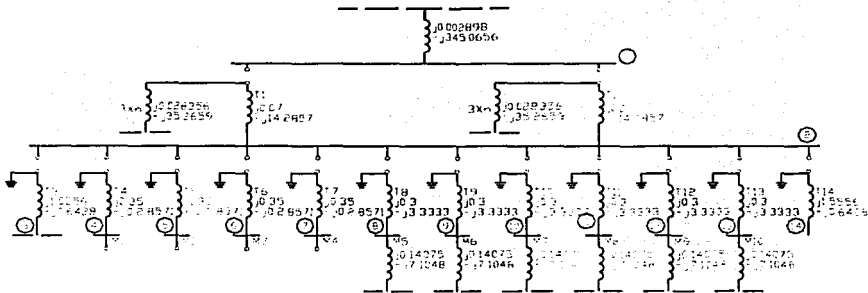
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



$$\begin{aligned}
 Y_{2-9} &= Y_{9-2} = j3.3333 \\
 Y_{2-10} &= Y_{10-2} = j3.3333 \\
 Y_{2-11} &= Y_{11-2} = j3.3333 \\
 Y_{2-12} &= Y_{12-2} = j3.3333 \\
 Y_{2-13} &= Y_{13-2} = j3.3333 \\
 Y_{2-14} &= Y_{14-2} = j0.6428
 \end{aligned}$$

### Red de admittancia de secuencia cero

Figura 5.1.4 Red de admittancia de secuencia cero



$$\begin{aligned}
 Y_{1-1} &= -j345.0656 \\
 Y_{3-2} &= (-j49.5516) (-j49.5516) = -j24.7758 \\
 Y_{3-3} &= -j0.6428 \\
 Y_{4-4} &= -j2.8571 \\
 Y_{5-5} &= -j2.8571 \\
 Y_{6-6} &= -j2.8571 \\
 Y_{7-7} &= -j2.8571 \\
 Y_{8-8} &= -j3.3333 \\
 Y_{9-9} &= -j3.3333 \\
 Y_{10-10} &= -j3.3333 \\
 Y_{11-11} &= -j3.3333 \\
 Y_{12-12} &= -j3.3333 \\
 Y_{13-13} &= -j3.3333 \\
 Y_{14-14} &= -j0.6428
 \end{aligned}$$

TEMA CON  
 ESCALA DE ORIGEN

**Matriz de red de admitancia de secuencia positiva y negativa**

$$Y_{BUS} = -j [Y]$$

$$Y_{BUS} = -j \begin{bmatrix} 14694936-285714 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -285714 & 612852 & -06428 & -28571 & -28571 & -28571 & -33333 & -33333 & -33333 & -33333 & -33333 & -33333 & -06428 & 0 \\ 0 & -06428 & 06428 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -28571 & 0 & 31886 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -28571 & 0 & 0 & 31886 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -28571 & 0 & 0 & 0 & 31886 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -28571 & 0 & 0 & 0 & 0 & 31886 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -33333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 146363 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -33333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 146363 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -33333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 146363 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -33333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 146363 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -33333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 146363 & 0 & 0 \\ 0 & -06428 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 146363 & 0 \\ 0 & -06428 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 06428 \end{bmatrix}$$

**Matriz de red de admitancia de secuencia cero**

$$Y_{BUS} = -j [Y]$$

$$Y_{BUS}^0 = -j \begin{bmatrix} 3450656 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 247758 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 06428 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 28571 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 28571 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 28571 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 28571 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33333 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33333 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 06428 \end{bmatrix}$$

$$Z_{ii} = \frac{1}{Y_{ii}}$$

TIENE CON  
 FALLA DE ORIGEN

### Matriz de red de impedancias de secuencia positiva y negativa

$$Z_{BUS}^+ =$$

0.00069	0.00043	0.00043	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009	0.00043
0.00043	0.0224	0.0224	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0224
0.00043	0.0224	1.5781	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0224
0.00039	0.0200	0.0200	0.3316	0.018	0.018	0.018	0.018	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0200
0.00039	0.0200	0.0200	0.018	0.3316	0.018	0.018	0.018	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0200
0.00039	0.0200	0.0200	0.018	0.018	0.3316	0.018	0.018	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0200
0.00039	0.0200	0.0200	0.018	0.018	0.018	0.3316	0.018	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0200
0.00009	0.0051	0.0051	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0695	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0051
0.00009	0.0051	0.0051	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0012	0.0695	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0051
0.00009	0.0051	0.0051	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0012	0.0012	0.0695	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0051
0.00009	0.0051	0.0051	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0012	0.0012	0.0012	0.0695	0.0012	0.0012	0.0012	0.0051
0.00009	0.0051	0.0051	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0695	0.0012	0.0012	0.0051
0.00009	0.0051	0.0051	0.0046	0.0046	0.0046	0.0046	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0695	0.0012	0.0051
0.00043	0.0224	0.0224	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	1.5781

### Matriz de red de impedancias de secuencia cero

$$Z_{BUS}^0 =$$

0.0029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.0404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1.5557	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5557

**TESIS CON  
 EVALUACIÓN DE ORIGEN**

- **Calculo de corriente de corto circuito de fase a tierra**

En el bus 1

$$I_{a0} = \frac{V_K}{Z_{11}^* + Z_{11}^- + Z_{11}^0}$$

$$I_{a0} = 3I_{a0}$$

$$I_{a0} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.00069 \angle 90^\circ + 0.00069 \angle 90^\circ + 0.0029 \angle 90^\circ}$$

$$I_{a0} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{(0 + j0.00069) + (0 + j0.00069) + (0 + j0.0029)}$$

$$I_{a0} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.00428 \angle 90^\circ} = 233.64485 \angle -90^\circ$$

$$I_{BASE} = \frac{S_b [K]}{\sqrt{3} V_b [K]} [A] = \frac{5000 [K]}{\sqrt{3} * 115 [K]} = 25.10219 [A]$$

$$I_{BASE} = 25.10219 [A]$$

$$I_u = 3I_{a0} = 3 * 233.64485 \angle -90^\circ = 700.93455 \angle -90^\circ [p.u.]$$

$$I_a = 25.10219 * 700.93455 = 17594.99225 [A]$$

- **Calculo de corriente de corto circuito bifásico**

En el bus 1

$$I_{a1} = \frac{V_K}{Z_{11}^* + Z_{11}^-}$$

$$I_b = -I_c = -j \sqrt{3} I_{a1}$$

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.00069 \angle 90^\circ + 0.00069 \angle 90^\circ}$$

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{(0 + j0.00069) + (0 + j0.00069)}$$

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.00138 \angle 90^\circ} = 724.63768 \angle -90^\circ$$

TESIS CON  
SALLA DE ORIGEN

$$I_{BASE} = \frac{S_B [K]}{\sqrt{3} V_B [K]} [A] = \frac{5000 [K]}{\sqrt{3} * 115 [K]} = 25.10219 [A]$$

$$I_{BASE} = 25.10219 [A]$$

$$I_b = -I_c = \sqrt{3} \angle 270^\circ * 724.63768 \angle -90^\circ$$

$$I_b = 1255.10928 \angle 180^\circ [p.u.]$$

$$I_b = 25.10219 * 1255.10928 = 31505.99162 [A]$$

• **Calculo de corriente de corto circuito bifásico a tierra**

En el bus 1

$$I_{a0} = \frac{V_K Z_{11}^-}{Z_{11}^+ Z_{11}^- + Z_{11}^- Z_{11}^0 + Z_{11}^0 Z_{11}^+}$$

$$I_b + I_c = 3I_{a0}$$

$$I_{a0} = \frac{1.0 \angle 0^\circ * 0.00069 \angle 90^\circ}{0.00069 \angle 90^\circ * 0.00069 \angle 90^\circ + 0.00069 \angle 90^\circ * 0.0029 \angle 90^\circ + 0.0029 \angle 90^\circ * 0.00069 \angle 90^\circ}$$

$$I_{a0} = \frac{0.00069 \angle 90^\circ}{0.0000004761 \angle 180^\circ + 0.000002001 \angle 180^\circ + 0.000002001 \angle 180^\circ}$$

$$I_{a0} = \frac{0.00069 \angle 90^\circ}{(-0.0000004761 + j0) + (-0.000002001 + j0) + (-0.000002001 + j0)}$$

$$I_{a0} = \frac{0.00069 \angle 90^\circ}{(-0.0000044781 + j0)} = \frac{0.00069 \angle 90^\circ}{0.0000044781 \angle 180^\circ} = 154.083205 \angle -90^\circ$$

$$I_b + I_c = 3I_{a0} = 3 * 154.083205 \angle -90^\circ = 462.249615 \angle -90^\circ [p.u.]$$

$$I_{BASE} = \frac{S_B [K]}{3 V_B [K]} [A] = \frac{5000 [K]}{3 * 115 [K]} = 25.10219 [A]$$

$$I_{BASE} = 25.10219 [A]$$

$$I_1 = I_b + I_c = 3I_{a0} = 462.249615 \angle -90^\circ * 25.10219 = 11603.47766 [A]$$

• **Calculo de corriente de corto circuito trifásico**

En el bus 1

$$V_1 = 1.0 \angle 0^\circ \text{ [p.u.]}$$

$$I_1 = I_a = I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.00069 \angle 90^\circ} = 1449.27536 \angle -90^\circ \text{ [p.u.]}$$

Bus 1

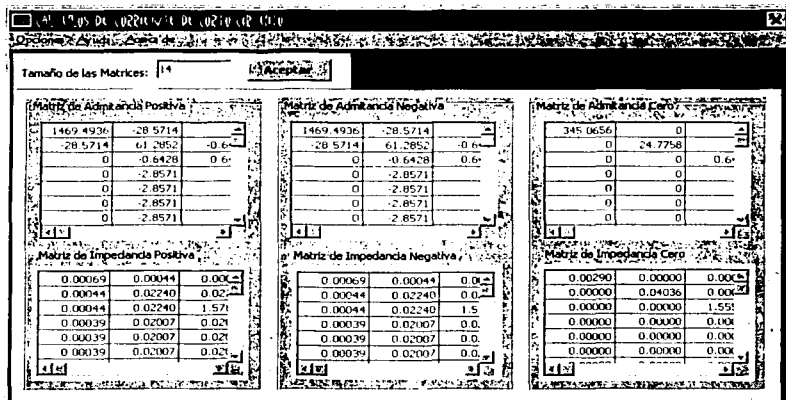
$$I_{BASE} = \frac{S_B [K]}{\sqrt{3} V_B [K]} [A] = \frac{5000 [K]}{\sqrt{3} * 115 [K]} = 25.10219 [A]$$

$$I_1 = I_a = I_{a1} = 1449.27536 * 25.10219 = 36379.98545 [A]$$

**5.1.2 Ejemplo de calculo utilizando el programa de estudio de corto circuito**

- Ingreso de las matrices de admitancia y obtención de las matrices de impedancia

Figura 5.1.5 Ingreso de datos



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

- **Calculo de corriente de corto circuito de fase a tierra**

Figura 5.1.6 Calculo de corto circuito de fase a tierra

Algoritmo de Corriente de Corto Circuito

Tamaño de las Matrices: 14

Matriz de Admittancia Positiva

1469.4936	-28.5714
-28.5714	61.2052
0	-0.4428
0	-2.8571
0	-2.8571
0	-2.8571

Matriz de Impedancia Positiva

0.00069	0.00044
0.00044	0.02240
0.00044	0.02240
0.00039	0.02007
0.00039	0.02007
0.00039	0.02007

Calculos

Tipo de falla: **A**

Bus de falla: 1

Potencia Base [k]: 5000

Zth+: 0.00069

Voltaje Base [k]: 115

Zth-: 0.00069

Voltaje de Prefalla [p.u]: 1

Zth0: 0.00290

Calculo: 17594.98992

Salto

Corriente de Corto (A):

Generar Archivo de Calculo

Bus de falla: 1  
 Zth+: 0.00069  
 Zth-: 0.00069  
 Zth0: 0.00290  
 Potencia Base [k]: 5000  
 Voltaje Base [k]: 115  
 Voltaje de Prefalla [p.u]: 1

Calculo: 17594.98992

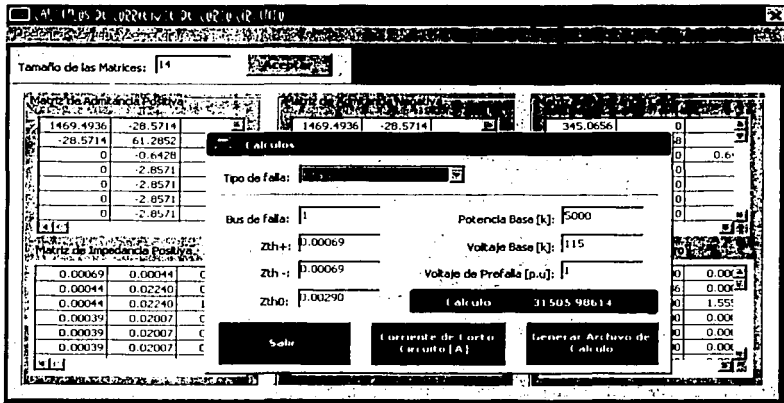
**TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN**

- **Calculo de corriente de corto circuito bifásico**

Bus de falla: 1  
 Zth+: 0.00069  
 Zth-: 0.00069  
 Zth0: 0.00290  
 Potencia Base [k]: 5000  
 Voltaje Base [k]: 115  
 Voltaje de Prefalla [p.u]: 1

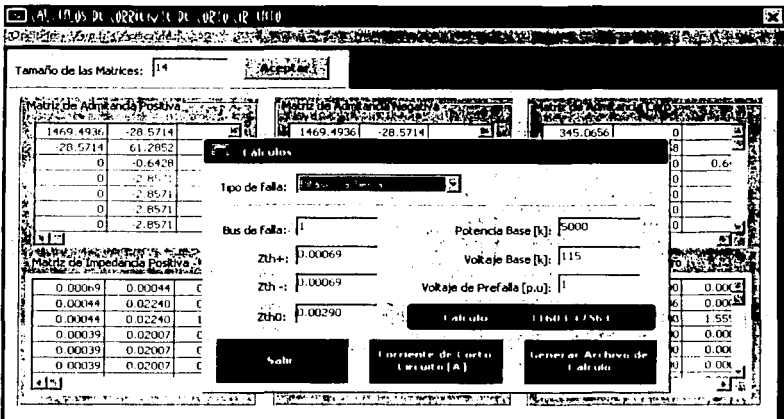
Calculo: 31505.98614

Figura 5.1.7 Calculo de corto circuito bifásico



- Calculo de corriente de corto circuito bifásico a tierra

Figura 5.1.8 Calculo de corto circuito bifásico a tierra



YESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

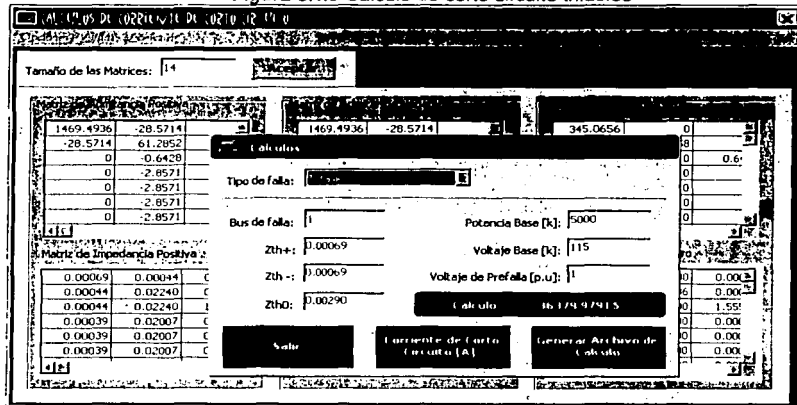


Bus de falla: 1  
 Zth+: 0.00069  
 Zth-: 0.00069  
 Zth0: 0.00290  
 Potencia Base [k]: 5000  
 Voltaje Base [k]: 115  
 Voltaje de Prefalla [p.u.]: 1

**Calculo: 11603.47563**

- **Calculo de corriente de corto circuito trifásico**

**Figura 5.1.9 Calculo de corto circuito trifásico**



Bus de falla: 1  
 Zth+: 0.00069  
 Zth-: 0.00069  
 Zth0: 0.00290  
 Potencia Base [k]: 5000  
 Voltaje Base [k]: 115  
 Voltaje de Prefalla [p.u.]: 1

**Calculo: 36379.97915**

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Observando ambos resultados , manual y a través del programa de estudio de calculo de corto circuito, podemos concluir que los cálculos que realiza el programa son realmente confiables para cualquier aplicación o situación que se presente.

## 5.2 Ejemplo de aplicación para el calculo de diseño de sistemas de tierra

### 5.2.1 Ejemplo de calculo manual para diseño de sistemas de tierra

#### Procedimiento de diseño

- Datos de campo

Corriente de corto circuito ( $I_{cc}$ )	<b>17594.99225 A</b>
Tiempo de duración de la falla ( $t_f$ )	<b>0.5 s</b>
Resistividad del suelo ( $\rho$ )	<b>200 <math>\Omega</math> m</b>
Resistividad superficial ( $\rho_s$ )	<b>3000 <math>\Omega</math> m</b>
Relación reactancia/resistencia (X/R)	<b>10</b>
Espesor de la capa superficial ( $h_{sp}$ )	<b>0.15 m</b>
Profundidad de la malla (h)	<b>0.6 m</b>
Longitud de los electrodos de tierra ( $L_e$ )	<b>3.048 m</b>
Diámetro de las varillas electrodo (d)	<b>0.013 m</b>
Diámetro del calibre 4/0	<b>0.0134 m</b>

- Dimensionamiento del conductor

#### a) Determinación del factor de decremento ( $D_f$ ):

Debido a que el valor de X y R no se conocen, no se puede calcular el factor de decremento numéricamente; por lo que se usa la siguiente tabla que esta relaciona con la ecuación 65 de la norma ANSI/IEEE std. 80-1986.

Tabla 5.2.1 Calculo del factor de decremento en función del tiempo y X/R

$t_f$ (s)	Ciclos 60 Hz	Factor de $D_f$			
		X/R=10	X/R=20	X/R=30	X/R=40
0.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
0.05	3.0	1.232	1.378	1.462	1.515
0.10	6.0	1.125	1.232	1.316	1.378
0.20	12.0	1.064	1.125	1.181	1.232
0.30	18.0	1.043	1.085	1.125	1.163
0.40	24.0	1.033	1.064	1.095	1.125
<b>0.50</b>	<b>30.0</b>	<b>1.026</b>	1.052	1.077	1.101
0.75	45.0	1.018	1.035	1.052	1.068
1.0	60.0	1.013	1.026	1.039	1.052

De la tabla 5.2.1 se encuentra un valor  $D_f=1.026$

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

b) Establecimiento del valor del factor de proyección ( $f_p$ )

Este factor se establece basándose en el conocimiento y análisis del sistema eléctrico del cual forma parte la red de tierras a proyectar, con el fin de saber si no variarán los parámetros principales utilizados para el diseño de este sistema, en un periodo futuro amplio.

En este caso se supone la permanencia a futuro del sistema en condiciones iniciales y se establece lo siguiente:  $f_p=1.0$

c) Cálculo de la corriente máxima de la malla  $I_G$

$$I_G = I_{cc} \times D_I \times f_p = 17594.99225 \times 1.026 \times 1.0 = 18052.46 \text{ A}$$

d) Cálculo de la sección del conductor de la malla

Valor constante del factor circular mil/A= 5.6 (tomado de la tabla 5.2 de la IEEE para conectores mecánicos de bronce con temperatura  $T_m = 450^\circ\text{C}$ ).

Tabla 5.2.2 Calibres mínimos del conductor (CMILS/A)

Tiempo de falla (seg)	Cobre 100%	Cobre 97%	CCS 40%	CCS 30%	Cobre 97%/	
					límite de temperatura 450 °C	límite de temperatura 250 °C
30	38.4	38.7	57	65.8	51.1	64.5
4	14	14.2	20.8	24	18.7	23.5
1	7	7.1	10.4	12	9.3	11.8
0.5	4.9	5	7.4	8.5	6.6	8.3

$$A_{\text{conductor}} = I_G \times 6.6 = 119146.25 \text{ CM} = 119.4625 \text{ KCM}$$

Para este valor de área de sección transversal de conductor, se selecciono un calibre 4/0 AWG (211.6 KCM), ya que la norma recomienda que los conductores de la malla sean de cobre, con calibre mínimo de 4/0 AWG (107.2 mm<sup>2</sup>).

- Cálculo de potenciales de paso y contacto

e) Cálculo del valor de reflexión (factor de reducción del valor nominal de la resistividad superficial ( $k$ )):

$$K = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s) = (200 - 3000) / (200 + 3000) = -0.875$$

De tablas obtenemos un valor de  $C_s = 0.72$

f) Cálculo de los potenciales tolerables por el cuerpo humano:

#### Potencial de paso

Para personas con peso promedio de 70 kg ( $E_{\text{paso}70 \text{ kg}}$ ):

1000 = valor de la resistencia del cuerpo humano en ohms, en condiciones de humedad extremas: establecido por la norma, aunque se sabe que el valor de la resistencia del cuerpo humano oscila entre los 200 y los 300 ohms.

$$E_{\text{paso}70 \text{ kg}} = [1000 + (6 \times C_s \times \rho_s)] (0.157 / t_r^{1/2})$$
$$E_{\text{paso}70 \text{ kg}} = 3099.5 \text{ V}$$

#### Potencial de contacto:

Para personas con peso promedio de 70 kg ( $E_{\text{contacto}70 \text{ kg}}$ ):

$$E_{\text{contacto}70 \text{ kg}} = [1000 + (1.5 \times C_s \times \rho_s)] (0.157 / t_r^{1/2})$$
$$E_{\text{contacto}70 \text{ kg}} = 941.4 \text{ V}$$

#### • Diseño inicial de la malla

g) Cálculo del potencial de malla:

Datos:

$V_e$  = No. de varillas electrodos = 70

$L_{ve}$  = longitud de las varillas electrodo = 10 ft o 3.048 m

$L_r$  = longitud de las varillas electrodo =  $1.15 \times V_e \times L_{ve} = 1.15 \times 70 \times 3.048 = 245.364 \text{ m}$

h) Cálculo de la longitud total del conductor enterrado en la malla:

La norma indica que la malla puede estar constituida por cables colocados paralela y perpendicularmente, con un espaciamiento razonable, en lo que sea posible los cables deben de colocarse a lo largo de las hileras de estructuras o equipos, para facilitar la conexión a los mismos.

En este caso se selecciona un arreglo de tal manera que cumpla las especificaciones requeridas de tener potenciales de paso y de contacto por debajo de los valores tolerables calculados anteriormente, formando para ello rectángulos de 1.5 x 1.25 m; en un total de conductores de 80 x 120 m, y 80 x 100 m que cubren perfectamente la superficie disponible para la red de tierras de 120 x 100 m, y además permite tener un margen un tanto amplio de seguridad de operación de la misma

$$L = L_r + (n_a \times l_a) + (n_b \times l_b) = 245.364 + (80 \times 120) + (80 \times 100) = 17845.364 \text{ m}$$

Donde:

$L$  = longitud total en la red de tierras.

$n_a$  = No. de conductores en la red dispuestos horizontalmente = 80

$n_b$  = No. de conductores en la red dispuestos horizontalmente = 80

$l_a$  = longitud de los conductores en la red verticalmente = 120 m

$l_b$  = longitud de conductores en la red horizontalmente = 100 m

- **Resistencia a tierra de la malla**

i) Cálculo de la resistencia a tierra ( $R_g$ )

$$A = 120 \times 100 = 12000$$

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] = 0.409 \Omega$$

Esta red de tierras cumple con otra de las especificaciones marcadas en la norma, pues tiene una resistencia a tierra menor de  $5 \Omega$ , valor establecido por el cálculo.

- **Comparación de potenciales**

$$I_G \times R_S \leq E_{TOQUE}$$
$$7395.91 \leq 941.4$$

La máxima elevación del potencial de la malla esta por arriba del valor de potencial de contacto tolerable, por lo que no cumple, y debemos de seguir con los siguientes pasos.

- **Cálculo de potenciales de paso y de contacto de la malla**

1) Cálculo del potencial de contacto ( $E_m$ )

Datos:

$d$  = diámetro del conductor calibre 4/0 AWG en metros = 0.0134 m

$D$  = separación entre los conductores verticalmente

$$D = 100/79 = 1.266 \text{ m}$$

$K_{11} = 1$ ; para este caso ya que sí se tienen varillas electrodos, en el perímetro del área que ocupa la red de tierras.

j) Cálculo de  $n$  = interpolación de conductores para el potencial de contacto:

$$n\sqrt{80 \times 80} = 80$$

Para el potencial de contacto:

Datos:

$$K_i = 0.65 + (0.17 \times n) = 0.65 + (.17 \times 80) = 14.25$$

k) Cálculo del factor Kh

Datos:

h = profundidad de la malla en metros = 0.60 m

h<sub>o</sub> = profundidad de referencia de la malla en metros = 1 metro

$$Kh = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = 1.2649$$

l) Cálculo del factor de contacto K<sub>m</sub>

Datos:

ρ<sub>s</sub> = 200 ohm-metro

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ Ln \left( \frac{D^2}{16xDxd} + \frac{(D+2h)^2}{8xDxd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{kii}{kh} Ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

K<sub>m</sub> = 0.09

$$E_m = \rho_s \times K_m \times K_i(I_G/L) = 259.476 \text{ V}$$

2) Cálculo del potencial de paso (E<sub>s</sub>)

Datos:

Cálculo del factor de paso K<sub>s</sub>:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \left[ \frac{1}{D} + (1 - 0.5^{n-2}) \right] \right]$$

K<sub>s</sub> = .1.005

m) Potencial de paso (E<sub>s</sub>):

$$E_s = \rho_s \times K_m \times K_i(I_G/L) = 2897.480 \text{ V}$$

- Comparación de potencial de contacto de la malla con el potencial de contacto y de paso tolerables

$$E_m \leq E_{toque}$$

$$2897.48 \leq 3099.56$$

$$Es \leq E_{toque}$$
$$259.476 \leq 941.4$$

Como las dos respuestas son correctas comprobamos que el diseño es el adecuado.

Comprobando la longitud de conductor necesaria en la malla para mantener el potencial de dentro de los límites seguros:

$$L > \frac{K_m K_f I_g \rho}{157 + 0.235(C_s) \rho_s}$$
$$17845.364 > 4926.7$$

Por lo tanto el diseño de la Longitud de la malla es correcto

Se observa que si es factible poner en operación la red de tierras, ya que cumple con la condición primordial que los potenciales de paso y contacto no exceden los límites de los potenciales tolerados por el cuerpo humano, por lo que podemos decir, que si es posible poner en operación esta red de tierras, calculada bajo estos parámetros.

## 5.2.2 Ejemplo de calculo utilizando el programa para diseño de sistemas de tierra

Figura 5.2.1 Datos de la falla

Diseno de la malla de tierra en una subestacion electrica

Datos de la falla | Conductor | Datos Fisicos del Proyecto | Configuración de varillas en malla | Resultados

FRECUENCIA DEL SISTEMA (HZ):       TEMPERATURA MAXIMA PARA CONECTORES SOLDABLES:  <math>^{\circ}\text{C}</math>

RELACION X/R EN EL PUNTO DE LA FALLA?       TEMPERATURA MAXIMA PARA CONECTORES ATORNILLABLES:  <math>^{\circ}\text{C}</math>

DURACION DE LA FALLA (S):       CORRIENTE RMS DE LA FALLA (KA):

TEMPERATURA DEL AMBIENTE <math>^{\circ}\text{C}</math>:

Figura 5.2.2 Selección del conductor

Diseno de la malla de tierra en una subestacion electrica

Datos de la falla | Conductor | Datos Fisicos del Proyecto | Configuración de varillas en malla | Resultados

Seleccione un conductor:

- Standard annealed soft copper wire
- Copper clad steel core wire 1
- Commercial EC aluminum wire
- Aluminum alloy wire 5201
- Zinc coated steel core wire
- Commercial hard drawn copper wire
- Copper clad steel core wire 2
- Aluminum alloy wire 5036
- Aluminum clad steel core wire
- Stainless steel No. 304

Conductor seleccionado:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Figura 5.2.3 Datos físicos del proyecto

Diseño de la malla de tierra en una subestación eléctrica

Datos de la malla	Conductor	Datos físicos del Proyecto	Configuración de varillas en malla	Resultados
Factor de proyección CP:		1	Resistividad de la superficie de la subestación (Ω-METRO):	3000
Longitud de la subestación (M):		120	Profundidad de la malla (M):	6
Ancho de la subestación (M):		100	Espesor de la superficie de la subestación (M):	15
Resistividad del terreno (Ω-METRO):		200	Cantidad de varillas:	70

Salir      Aceptar

Figura 5.2.4 Varillas en la malla

Diseño de la malla de tierra en una subestación eléctrica

Datos de la malla	Conductor	Datos físicos del Proyecto	Configuración de varillas en malla	Resultados
Tipo de malla:			Malla con varillas en el perímetro e interior	
Seleccione el nivel de tolerancia:			701 g	

Salir      Aceptar

Figura 5.2.5 Resultados

Diseño de la malla de tierra en una subestación eléctrica

<input type="checkbox"/> Potencial de paso tol (50Kv) 2246 12084661244 <input type="checkbox"/> Potencial de paso tol (70Kv) 3040 00038722546 <input type="checkbox"/> Potencial de contacto tol (50Kv) 694 56679157957 <input type="checkbox"/> Potencial de contacto tol (70Kv) 926 525743775798 <input type="checkbox"/> Potencial de malla 678 236399718221 <input type="checkbox"/> Corriente máxima de malla 18054 6634804062 <input type="checkbox"/> El diámetro del conductor es 0.02926 <input type="checkbox"/> Long. total del conductor de malla 7657.5 <input type="checkbox"/> Ancho de la malla 103	<input type="checkbox"/> Largo de la malla 123 <input type="checkbox"/> Número de conductores paralelos 31 <input type="checkbox"/> Distancia entre conductores paralelos 3 433333333333333 <input type="checkbox"/> Número de conductores transversales 37 <input type="checkbox"/> Distancia entre conductores transversales 3 38607510358 <input type="checkbox"/> Potencial de paso 1413 15503003636 <input type="checkbox"/> Resistencia efectiva a tierra 0.8107144953557 <input type="checkbox"/> Sección de conductor 0.02926
---	--

**Resultado Final**  
 El potencial de paso es seguro.      El potencial de contacto es seguro.      **LA MALLA ES SEGURA**

Al analizar los resultados en los dos ejemplos, manual y por medio del programa de computo, se concluye que el programa es confiable ya que cumple con las condiciones necesarias para tener un red de tierras segura, además de reducir la longitud de la red de tierras evitando un diseño sobredimensionado comparado con el calculo manual.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## CONCLUSIONES

- Se desarrollo el programa de computo para calculo de los diferentes tipos de falla de corto circuito en lenguaje Visual Basic basado en el método de Zbus
- Se desarrollo el programa de computo para diseño de sistemas de tierra para subestaciones eléctricas en lenguaje Visual Basic 6.0 basado en la norma ANSI/IEEE.std.80/1986
- Un programa de computadora que analice fallas en sistemas eléctricos, es una herramienta muy útil para cualquier persona interesada en el estudio de fallas en sistemas eléctricos; dicho programa proporciona mayor información en menor tiempo sobre el sistema eléctrico en desequilibrio
- Se pusieron en práctica los conocimientos adquiridos para el cálculo y definición de la metodología a emplearse, y combinándolo con una herramienta de programación tan poderosa como lo es Visual Basic 6.0, se logró obtener un software de sencilla aplicación, flexible y sobre todo fácil de llevar a cualquier computadora con el uso de la aplicación ejecutable
- Este software ha representado una ampliación de los conocimientos que normalmente aplicamos en la vida profesional ya que puso a prueba nuestra capacidad de análisis y síntesis para desarrollarlo
- Finalmente con base en lo anterior se demostró la funcionalidad del programa desarrollado con lo que se cumple el objetivo planteado

## BIBLIOGRAFIA

- (1) Chapman Stephen J. , Máquinas eléctricas, 2ª edición  
Edit. McGraw-Hill, Mexico 1993
- (2) Enríquez Harper Gilberto, Elementos de centrales eléctricas II (Generadores  
excitátrices, gobernadores y subestaciones)  
Edit. Limusa
- (3) Enríquez Harper Gilberto, Elementos de diseño de subestaciones eléctricas  
Edit. Limusa, México 1980
- (4) Enríquez Harper Gilberto, Introducción al análisis de redes eléctricas  
Edit. Limusa, México 1981
- (5) Enríquez Harper Gilberto, Técnicas computacionales en Ingeniería de alta  
tension  
Editorial Limusa, México 1987
- (6) Espinosa y Lara Roberto, Sistemas de distribución  
Edit. Limusa, México 1990
- (7) Garcia Marquez Rogelio, La puesta a tierra de instalaciones eléctricas y el  
R.A.T.  
Marcombó, Baxareu editores, España
- (8) Grainger J. John, Stevenson Jr. William D. , Análisis de sistemas de potencia  
Edit. McGraw-Hill, México 1996
- (9) Homer E. Brown, Solution of Large Networks by Matriz Methods  
John Wiley & Sons, Inc.
- (10) Lopez Monroy Guillermo  
Sistemas de Tierra en Redes de distribución
- (11) Lorenzo Bautista Rodolfo, Análisis de Corto Circuito en Sistemas Eléctricos  
Industriales  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. 1992
- (12) L. Kosow Irving, P. H. D., Máquinas eléctricas y transformadores  
Edit. Reverte, s.a de c. v. 1982

- (13) Pascual Tomas Martínez, Análisis de la corriente de cortocircuito en sistemas eléctricos de potencia  
Ed. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica –IPN-1997
- (14) Pascual Tomas Martínez ,Diseño de sistemas de tierras, 1° Edicion  
Ed. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica –IPN-1998
- (15) Pressmann R.S., Ingeniería del Software: un enfoque práctico,3ª Edición  
Mc Graw Hill. Madrid, 1993
- (16) Ramirez vasquez Jose, Estaciones de transformacion y distribucion –  
proteccion de sistemas electricos  
Ediciones CEAC, Enciclopedia CEAC de electricidad
- (17) Stagg,G&El-Abiad,H.A., Computer Methods in Power System Analysis  
Mc Graw-Hill Book Co.
- (18) Stevenson Jr. William D., Elements of Power System Analysis  
Mc Graw-Hill Book Co.
- (19) Strag Gilbert , Linear Algebra.  
Academic Press, Inc.
- (20) Velazco Solis Jesus, Distribucion de energia eléctrica en plantas industriales  
III basado en las Nom-93 y Nec-93, 2° Edicion  
Proteccion Electrica Nacional, Mexico 1994
- (21) Viqueira Landa Jacinto, Redes eléctricas, primera parte  
Edit. Alfaomega
- (22) Wildi Theodore, Sistemas de transmisión de potencia eléctrica, 1° Edicion  
Edit. Limusa, México 1979.
- (23) Yourdon E., Modern Structured Analysis  
Prentice-Hall. New Jersey, 1989
- (24) CFE Comisión Federal de Electricidad ( WWW. cfe.gob.mx)
- (25) Departamento Técnico, Memoria técnica(transformadores)  
Voltran, s.a. de c.v.
- (26) IEEE Estándar 80-1986 Guide for safety in subestacion Grounding
- (27) IEEE Green Book Recommended Practice for Grounding of Industrial and  
commercial power system, Ansl/IEEE Std. 142-1982

- (28) IEEE Recommended practice for electric power Distribution for industrial plants, 2<sup>o</sup> printing  
May 1996
- (29) Nom-001-Semp-1999, Norma oficial Mexicana relativa a las instalaciones destinadas al suministro y uso de la energia electrica
- (30) Operation under stress and strain  
IEEE spectrum march 1978
- (31) Parte I. Extractos y Traducción de: Power Failure Analisis and prevention And IEEE Spectrum Compendium 1979

## Apendice

157

# PAGINACIÓN DISCONTINUA



## **A1 Índice de figuras**

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1.1.1 Representación esquemática de un sistema de energía eléctrica	4
Figura 1.1.2 Sistema de energía elemental	5
Figura 1.1.3 Diagrama esquemático de un sistema eléctrico en lazo o malla	6
Figura 1.2.1 Transformador de dos devanados	11
Figura 1.3.1 Porcentaje de capacidad efectiva instalada degeneración y Porcentaje de generación por fuente	16
Figura 1.3.2 Secuencia de transformación de energía en centrales termoeléctricas	18
Figura 1.3.3 Esquema de una central termoeléctrica tipo vapor	19
Figura 1.6.1 Seccionamiento de una estructura radial subterránea de un sistema de distribución	25
Figura 1.8.1 Diagrama esquemático de la seguridad y el control automático en los sistemas eléctricos de potencia	31
Figura 1.8.2 Estados de Operación de los Sistemas de Potencia	32
Figura 1.8.3 Etapas de disturbio en un sistema eléctrico de potencia	35
Figura 1.8.4 Mecanismo de actuación del operador en un sistema eléctrico de potencia	36
Figura 2.2.1 Diagrama de punto de falla	47
Figura 2.2.2 Tipos de fallas	49
Figura 2.2.3 Falla monofásica	50
Figura 2.2.4 Falla bifásica	52
Figura 2.2.5 Falla bifásica a tierra	54
Figura 2.2.6 Falla trifásica	
Figura 2.3.1 Diagrama unifilar y de Impedancias de los MVA	61

Figura 2.3.2	Circuito para la obtención de las ecuaciones de malla	66
Figura 2.3.3	Circuito para la obtención de las ecuaciones de nodos	68
Figura 3.1.1	Sistema radial	73
Figura 3.1.2	Sistema en anillo	74
Figura 3.1.3	Sistema de malla	74
Figura 3.2.1	Superficie del terreno	78
Figura 3.2.2	Método de Wenner	78
Figura 3.3.1	Electrodo hemisférico	79
Figura 3.3.2	Electrodo con su imagen	79
Figura 3.3.3	Cable sencillo enterrado horizontalmente	81
Figura 3.3.4	Longitud del conductor enterrado contra la resistencia a tierra	81
Figura 3.3.5	Variación de la resistencia para diferentes configuraciones	82
Figura 3.4.1	Potenciales de paso y contacto	89
Figura 3.5.1	Valores de $C_s$ en función de $(h_s, k)$	93
Figura 4.1.1	Entorno de Desarrollo	102
Figura 4.1.2	Barra de Menú	102
Figura 4.1.3	Barra de Herramientas	102
Figura 4.1.4	Caja de controles	103
Figura 4.1.5	Explorador de proyectos	103
Figura 4.1.6	Ventana de Propiedades	104
Figura 4.1.7	Editor de código	104
Figura 4.1.8	Ubicación del Formulario	105
Figura 4.1.9	Ventana de Variables Locales	105
Figura 4.1.10	Pasos para crear un proyecto	105

Figura 4.1.11 Botón de comando	106
Figura 4.2.1 Ejemplo de controles utilizados en el programa i	107
Figura 4.2.2 Ejemplo de controles utilizados en el programa ii	107
Figura 4.2.3 Diagrama de flujo del programa para análisis de corto circuito	108
Figura 4.3.1 Diagrama de flujo para diseño de redes de tierra	122
Figura 5.1.1 Diagrama unifilar del sistema	129
Figura 5.1.2 Red de admitancia de secuencia positiva	133
Figura 5.1.3 Red de admitancia de secuencia negativa	144
Figura 5.1.4 Red de admitancia de secuencia cero	135
Figura 5.1.5 Ingreso de datos	140
Figura 5.1.6 Calculo de corto circuito de fase a tierra	141
Figura 5.1.7 Calculo de corto circuito bifásico	142
Figura 5.1.8 Calculo de corto circuito bifásico a tierra	142
Figura 5.1.9 Calculo de corto circuito trifásico	143
Figura 5.2.1 Datos de la falla	150
Figura 5.2.2 Selección del conductor	150
Figura 5.2.3 Datos físicos del proyecto	151
Figura 5.2.4 Varillas en la malla	151
Figura 5.2.5 Resultados	152

## **A2 Índice de tablas**

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
Tabla 1.2.1 Reactancias típicas de máquinas síncronas trifásicas	10
Tabla 1.2.2 Valores de reactancias típicas para máquinas síncronas y de inducción, en por unidad para máquinas a razón de KVA's	10
Tabla 1.2.3 Rango típico de reactancias de transformadores de potencia	14
Tabla 1.3.1 Tipos de generación y fuentes de energía utilizados en el sistema eléctrico nacional	15
Tabla 1.3.2 Capacidad instalada y de la generación	17
Tabla 1.3.3 Capacidad efectiva instalada y la generación termoeléctrica	20
Tabla 1.4.1 Capacidad en subestaciones en (MVA)	22
Tabla 1.5.1 Longitud de las líneas de transmisión del sistema eléctrico nacional (Km)	22
Tabla 1.6.1 Longitud de las líneas de distribución en el sistema eléctrico nacional en (km) 1994 – 2001	24
Tabla 2.1.1 Impedancia referida a 60 Hz	42
Tabla 2.1.2 Valores de reactancia típicos de máquinas síncronas e inducción, estimación de máquinas KVA en por unidad	43
Tabla 2.2.1 Formulas para cálculo de corrientes de corto circuito para diferentes tipos de fallas	58
Tabla 3.2.1 Clasificación general de resistividad	76
Tabla 3.3.1 Valores esperados en electrodos múltiples	80
Tabla 3.3.2 Formulas y arreglos para el cálculo de resistencias a tierra	83
Tabla 3.4.1 Factores de corriente del corazón	86
Tabla 3.4.2 Efectos fisiológicos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano	87
Tabla 3.5.1 Valores de la relación X/R	91

<b>Tabla 3.5.2 Calibres mínimos del conductor</b>	<b>94</b>
<b>Tabla 3.5.3 Calibres y diámetros de conductores</b>	<b>95</b>
<b>Tabla 5.2.1 Calculo del factor de decremento en función del tiempo y X/R</b>	<b>144</b>
<b>Tabla 5.2.2 Calibres mínimos del conductor (CMILS/A)</b>	<b>145</b>

### A3 Manual de usuario para el modulo de calculo para estudio de corto circuito

#### 1. Introducción

Con la necesidad de obtener información sobre sistemas eléctricos en desequilibrio, se tiene la necesidad de crear un programa que analice fallas en menor tiempo, dicho análisis puede obtenerse por diferentes métodos como son: bus infinito, MVA'S, etc..

El método utilizado para el desarrollo de este programa es el de Z bus, el cual tiene una dinámica apropiada para la programación, que en comparación con los otros métodos es más sencilla.

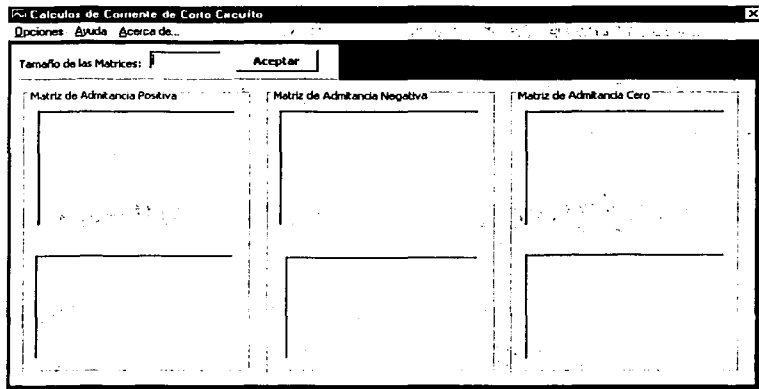
A continuación se detalla el acceso al sistema, así como también algunas recomendaciones.

#### 2. Módulos del Sistema

##### Acceso al Sistema

El acceso al Sistema, se realiza mediante el archivo ejecutable llamado calculo.exe, el cual muestra la siguiente pantalla. (Ver figura A3.1).

Figura A3.1. Pantalla Principal

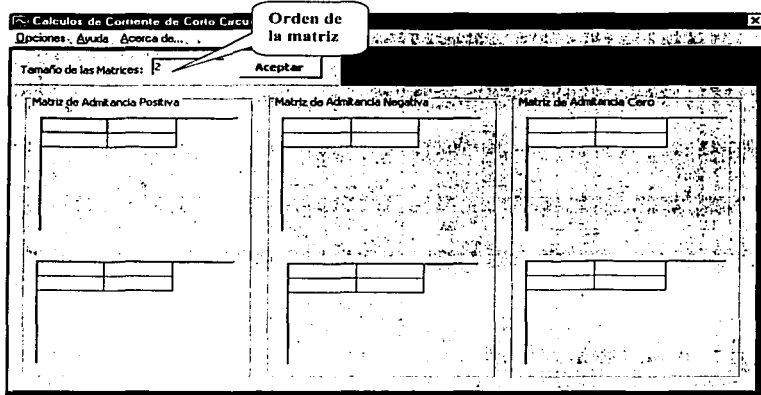


TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Se introduce el tamaño de las matrices, la cual puede ser de orden "n", cabe mencionar que el orden de las tres matrices es el mismo.

Inmediatamente se crean las cuadrículas, en las cuales se ingresan los valores para las diferentes matrices. (Ver figura A3.2).

Figura A3.2. Orden de la matriz y creación de las tablas

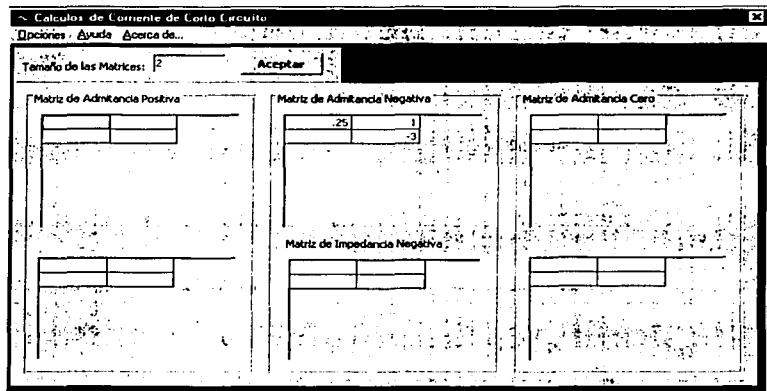


Se ingresan todos los valores de las matrices de Admitancia, el orden de introducir las matrices no importa, es decir se puede ingresar primero la matriz positiva, después la matriz de admitancia cero, etc. (Ver figura A3.3).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

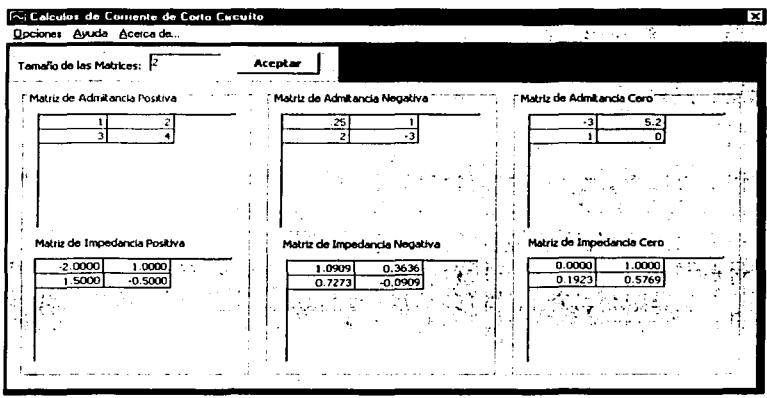
**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Figura A3.3. Ingresando valores a la Matriz



Después de haber introducido el valor de cada matriz, automáticamente se calculan las matrices de Impedancia. (Ver Figura A3.4)

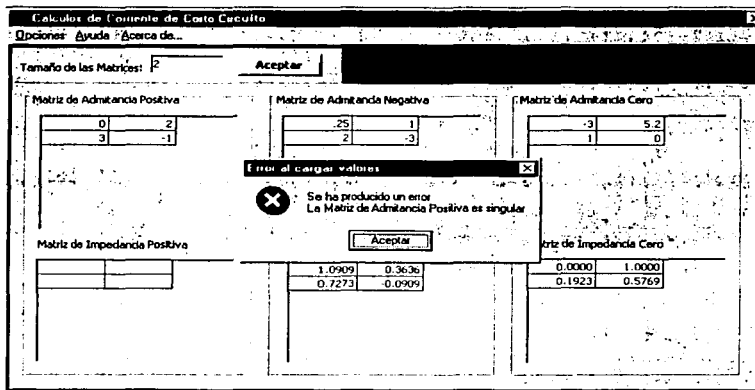
Figura A3.4. Matrices de Admitancia e Impedancias





En caso de existir un error al ingresar los valores de la matriz se desplegará el siguiente error, esto es debido a que el determinante de la matriz es igual a cero, y por lo consiguiente no existe matriz inversa para dicha matriz. (Ver figura A3.5)

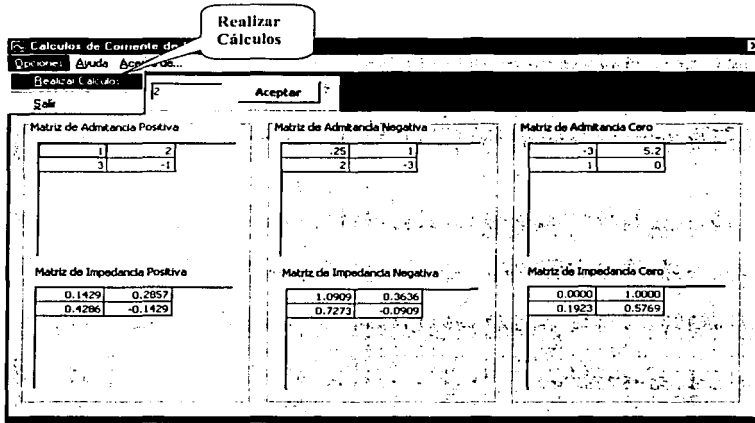
Figura A3.5. Error al Ingresar valores en la Matriz de Admitancia



Una vez, ingresadas las tres matrices, se puede acceder al módulo de "Realizar Cálculos". (Ver Figura A3.6).

TESIS CON  
SELLA DE ORIGEN

Figura A3.6. Módulo de Cálculos



En este módulo usted podrá realizar cálculos seleccionando diferentes tipos de falla(Ver figura A3.7).. como son:

- De Fase a Tierra
- Bifásico
- Bifásico a Tierra
- Trifásico

Seleccionado el tipo de falla, necesita ingresar el bus de falla, inmediatamente después tendrá que proporcionar la Potencia Base, Voltaje Base y Voltaje de Prefalla. (Ver figura A3.8).

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Figura A3.7. Selección del tipo de falla

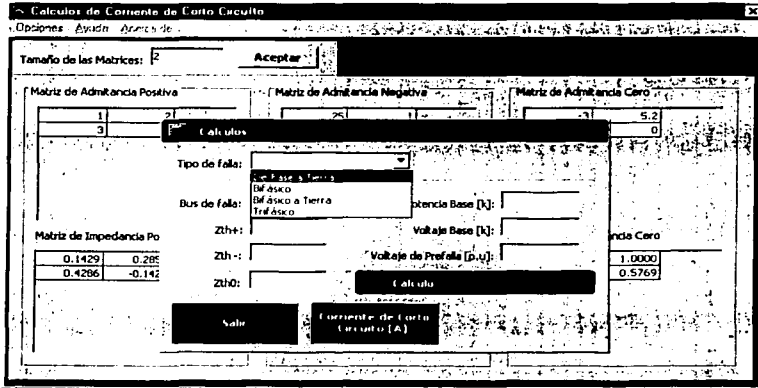
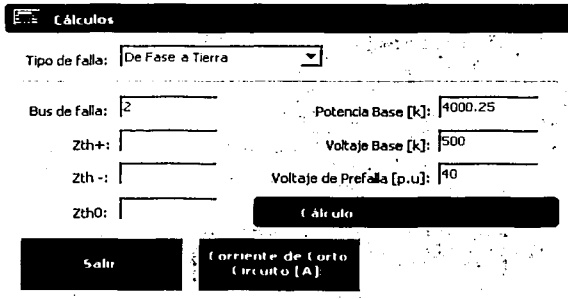


Figura A3.8. Ingresando datos para el cálculo de corriente de Corto Circuito



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Para el resultado del Cálculo, necesita haber ingresado todos los valores menos los de  $Z_{th+}$ ,  $Z_{th-}$  y  $Z_{th0}$ , estos valores los ingresa automáticamente de las matrices de Impedancias. Una vez ingresados los valores se dispone a pulsar el boton Corriente de Corto circuito y automáticamente nos da el cálculo. (Ver figura A3.9).

Figura A3.9. Resultado del Cálculo

Cálculos

Tipo de falla: De Fase a Tierra

Bus de falla: 2

Zth+: 0.1429

Zth-: 0.0909

Zth0: 0.5769

Potencia Base [k]: 4000.25

Voltaje Base [k]: 500

Voltaje de Prefalla [p.u.]: 10

Cálculo: 1615.5375

Salir

Corriente de Corto (circuito [A])

El Bus de falla tiene que ser menor o igual al tamaño de la matriz, si existe un error al ingresar el tipo de falla, se despliega el siguiente mensaje: (Ver figura A3.10).

Figura A3.10. Error al ingresar el Bus de datos

Calculos de Corriente de Corto Circuito

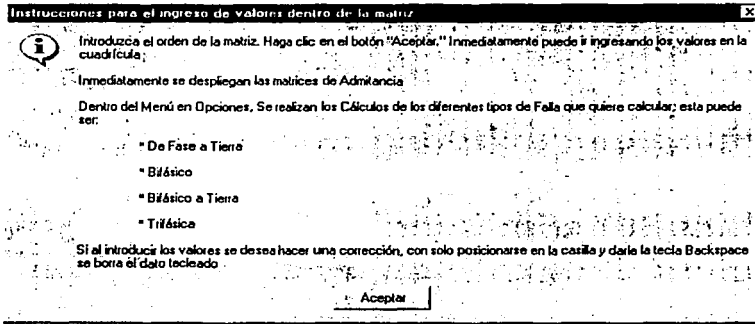
El bus de falla es incorrecto. Por favor verifiquelo e intentelo de nuevo

Aceptar

A su vez, se encuentra la opción de Ayuda del sistema, esta nos proporciona información relativa a la carga de valores de las matrices y del cálculo de los tipos de fallas. (Ver figura A3.11).

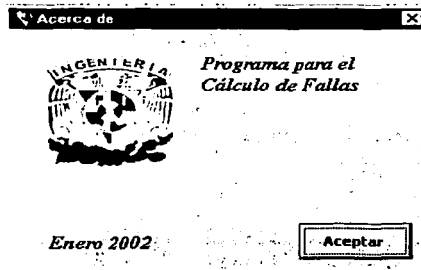
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura A3.11. Ayuda del sistema



Por último, la opción "acerca de...", nos muestra los créditos del sistema. Ver figura A3.12.

Figura A3.12



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## A4 Manual de usuario para el módulo de diseño de sistemas de tierra

### 1. Introducción.

En este módulo se contempla el diseño de mallas de tierra para subestaciones eléctricas de potencia mediante un método computacional para hacer del diseño más sencillo ya que para obtener un buen diseño se tiene que recurrir a procesos iterativos con la consiguiente inversión de tiempo.

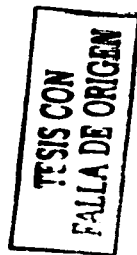
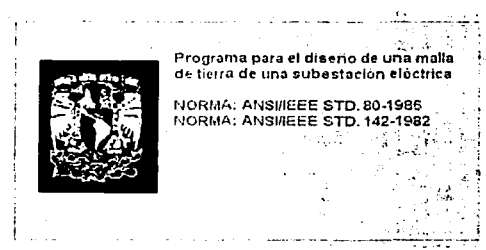
Se tiene una pantalla dividida con pestañas de tal manera que en cualquier momento durante el diseño se pueden ver los valores con los cuales se está trabajando, asimismo se pueden modificar y simplemente moviéndose a la pestaña de resultados y oprimiendo aceptar, el diseño se recalcula.

### 2. Entrada al Módulo.

Para facilidad de instalación se creo un programa ejecutable de tal manera que no es estrictamente necesario tener instalado Visual Basic en la computadora donde se estará haciendo el diseño, bastará con copiar el software en un directorio y dar un <<doble click>> sobre el icono de "tierras.exe".

Con lo anterior se desplegará la pantalla de presentación que se muestra en la Figura A4.1. por un intervalo de 10 segundos.

Figura A4.1 Pantalla de presentación



### 3. Ingreso de los Datos de Diseño

Después de mostrar la pantalla de presentación, se desplegará la pantalla de diseño que está dividida en 5 pestañas, en la primera se piden los Datos de la Falla (Figura A4.2), los cuales son el resultado del Módulo de Cálculo de Corto Circuito.

Figura A4.2 Pantalla de datos de falla

Diseño de la malla de tierra en una subestación eléctrica

Datos de la falla | Conductor | Datos Físicos del Proyecto | Configuración de variables en malla | Resultados

FRECUENCIA DEL SISTEMA (HZ):

RELACION X/R EN EL PUNTO DE LA FALLA?:

DURACION DE LA FALLA (S):

TEMPERATURA DEL AMBIENTE (C):

TEMPERATURA MAXIMA PARA CONECTORES SOLDABLES (C):

TEMPERATURA MAXIMA PARA CONECTORES ATORNILLABLES (C):

CORRIENTE RMS DE LA FALLA (KA):

Salir Aceptar

En la siguiente pestaña se tienen las opciones para escoger el conductor con el cual se construirá la malla de tierras, existen 10 posibilidades, Figura A4.3.

Figura A4.3 Pantalla de selección del conductor para la malla de tierra

Diseño de la malla de tierra en una subestación eléctrica

Datos de la falla | Conductor | Datos Físicos del Proyecto | Configuración de variables en malla | Resultados

Seleccione un conductor.

Standard annealed soft copper wire	6.0mm: standard drawn copper wire
Copper clad steel core wire 1	Copper clad steel core wire 2
Commercial E6 aluminum wire	Aluminum alloy wire 5252
Aluminum alloy wire 4271	Aluminum clad steel core wire
Zinc coated steel core wire	Stainless steel No. 304

Conductor seleccionado:

Salir Aceptar

IMPRIME CON  
 DE ORIGEN

A continuación hay que proporcionar los Datos Físicos del Proyecto, los cuales incluyen las dimensiones de la subestación, materiales de construcción y

datos del terreno que generalmente se obtienen mediante la medición directa o bien datos de tablas o la norma, Figura A4.4.

Figura A4.4. Pantalla de datos Físicos del proyecto

Existen tres posibilidades en cuanto a configuración de las varillas o electrodos en la malla de tierra y son las que se presentan en la pestaña que se muestra en la Figura A4.5, al igual que las opciones de tolerancia a 50 Kg o 70 Kg, Figura A4.6.

Figura A4.5. Selección de la configuración de varillas deseada

CON  
 DE ORIGEN



Figura A4.6. Selección del nivel de tolerancia

Diseño de la malla de tierra en una subestación eléctrica

Inicio de la Malla | Conductor | Datos Básicos del Proyecto | Configuración de parámetros en malla | Resultados

Tipo de malla:

Seleccione el nivel de tolerancia:

50%g  
70%g

Salir Aceptar

#### 4. Presentación de Resultados

La última pestaña es donde se exhiben los resultados producto de los cálculos realizados mediante el programa al oprimir la tecla de <<Aceptar>>, Figura A4.7.

Figura A4.7. Pantalla de Resultados

Diseño de la malla de tierra en una subestación eléctrica

Inicio de la Malla | Conductor | Datos Básicos del Proyecto | Configuración de parámetros en malla | Resultados

Resultado Final

Salir Aceptar

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Después de que se muestran los resultados numéricos en la parte superior, se tiene un diagnóstico de si la malla es segura o no dependiendo de las diferentes variables utilizadas en el diseño, lo cual se muestra en el ejemplo que se presenta más adelante.

En cualquier momento del diseño se pueden cambiar los valores de los datos y recalcular para obtener el diagnóstico de si la malla es segura, con sólo cambiarse a la pestaña de Resultados y oprimiendo la tecla <<Aceptar>>

Como se puede observar el manejo del programa es realmente sencillo y flexible.