

26/131



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

# **ESTUDIO DEL CORTO CIRCUITO**

## **T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A N**

**JOSE LUIS VILLA ALCANTARA**

**IGNACIO MORALES GALVAN**

**JOSE D. AYALA HERRERA**

**ANTONIO PEREZ GUZMAN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## C O N T E N I D O

<b>CAPITULO</b>	<b>I</b>
1.1	Introducción -1
1.2	Generalidades -1
1.3	Naturaleza de las corrientes de corto circuito en A.C. -2
1.4	Fuentes de corto circuito -9
1.5	Comportamiento de las corrientes de corto circuito -9
1.6	Generadores -12
1.7	Motores síncronos -15
1.8	Motores de inducción -17
1.9	Componentes que limitan corriente de corto circuito -21
1.10	Detalles en el cálculo de la corriente de corto circuito -32
<b>CAPITULO</b>	<b>II</b>
2.1	Métodos para calcular el corto circuito -38
2.2	Método por unidad -38
2.3	Método de las componentes simétricas -58
2.4	Método porcentual -68
2.5	Método de los MVA'S
<b>CAPITULO</b>	<b>III</b>
3.1	Cálculo de corto circuito por computadores digital -79
3.2	Algoritmo para la formación de matrices de red. -80
3.3	Programa en lenguaje fortran para el cálculo del corto circuito utilizando el algoritmo - Stagg E-Abiad -103.
<b>APENDICE</b>	<b>A</b>
	Tablas de reactancia y factores -124

## I N T R O D U C C I O N

I

### CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO EN A.C.:

El cálculo de las corrientes en corto circuito en A.C., es esencial para una adecuada selección de los dispositivos de protección y equipos en sistemas industriales y de potencia. El diseñador del sistema, que es frecuentemente un Ingeniero Electrónico, es responsable del diseño del sistema y de la selección del equipo, y tendrá a su cargo el cálculo de las corrientes de corto circuito en el sistema. Los procedimientos y técnicas para el cálculo de las corrientes en corto circuito no se encuentran disponibles en un solo lugar, sino que aparecen en muchas publicaciones y reportes. El propósito de éste trabajo es proporcionar la información y procedimientos necesarios para el cálculo de las corrientes de corto circuito en sistemas de potencia, industriales y comerciales. Se ha intentado en éste trabajo contestar las preguntas más frecuentes que surgen en la hora del calcular las corrientes de corto circuito.

### GENERALIDADES:

Con el aumento de la demanda de la energía eléctrica se ha observado y experimentado un gran importancia de proteger contra las inevitables fallas al equipo y los circuitos de los sistemas de distribución industrial, ya que aún el mejor diseño está sujeto en algunas ocasiones a cortos circuitos que originan intensidades de corrientes elevadas, en éste caso los dispositivos de protección de sobre corriente deben operar con seguridad y rapidéz para aislar y separar la falla, en forma tal que las intensidades de las corrientes anormales no produzcan daño alguno en los circuitos y en el equipo, reduciendo así al mínimo las inevitables interrupciones en las operaciones de la planta generadora y asegurando la continuidad del servicio.

Los interruptores y fusibles que generalmente se usan para ejecutar este tipo de protección, deben seleccionarse para conducir e interrumpir con seguridad las grandes intensidades de corriente a la que están sujetas durante la falla. También las partes del sistema, tales como: cables, ductos, y cuchillas desconectoras, deberán ser capaces de soportar sin deformación los esfuerzos mecánicos y térmicos resultantes. Las dimensiones físicas y complejidad de muchos sistemas industriales modernos, pueden hacer que el trabajo manual necesario para ejecutar el cálculo de las intensidades de las corrientes de falla sea complicado, en vista de que se necesita mucho tiempo para efectuarlo. Afortunadamente hoy en día se encuentran a disposición del público las computadoras analógicas y digitales que se encargan de ejecutar ese trabajo, en un tiempo muy reducido y con un costo justificado, ya que con esto se tiene un estudio de fallas más aproximado. Ya sea que se usen o no las computadoras, de todos modos será necesario tener un conocimiento sólido y un entendimiento de la naturaleza de las corrientes de falla y de los métodos para calcularlas.

#### NATURALEZA DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO EN A.C.

La selección adecuada de los dispositivos de protección se basa principalmente en los cálculos de corto circuito. Un dispositivo de protección en los cálculos de corto circuito, puede ser definido como un dispositivo eléctrico que se agrega al sistema para protegerlo contra los peligros ocasionados por una sobrecarga ó un corto circuito. Esto se logra por medio de una interrupción automática y de acuerdo a la capacidad de los dispositivos de corto circuito. Los primeros dispositivos de protección contra corto circuito son: Interruptores y Fusibles. Los circuitos a base de interruptores, automáticamente protegen al circuito por medio de relevadores (separados ó construidos dentro del sistema), los cuales detectan corrientes anormales, y de esta forma opera: el circuito de protección. Los Fusibles son dispositivos que están provistos con un elemento que se funde e interrumpe la corriente anormal al paso de ésta.

Los sistemas eléctricos de potencia en plantas industriales y comerciales son diseñados para alimentar las cargas de la manera más segura. Una de las consideraciones más importantes en el diseño, en un sistema de potencia es un adecuado control de las corrientes de corto circuito; si éstas corrientes no son controladas pueden causar serios daños en el sistema. Los daños que ocasionan una falla pueden ser directamente al equipo, ó un daño indirecto como lo es la caída de la producción. En algunas ocasiones pueden llegar a ocasionar incendios de gran importancia. Los sistemas eléctricos de potencia son diseñados de tal forma que la falla pueda ser aislada de la totalidad del sistema para así poderlo reparar. Las causas de un corto circuito pueden ser la presencia de insectos o roedores en el equipo, conexiones flojas, arcos eléctricos, deterioro en el aislamiento, humedad, polvo, incrustaciones de objetos metálicos, fenómenos naturales, etc. En una planta industrial el objetivo principal es producir consistente y económicamente, y su capacidad para llevar a cabo esto depende de la continuidad del servicios eléctrico. Las interrupciones en el servicio pueden ser evaluadas en términos de la caída de producción, frecuentemente el costo de la caída de producción excede el costo del daño físico ocasionado a el equipo involucrado en la falla, por lo tanto es importante que el sistema eléctrico sea adecuadamente diseñado para que la falla sea aislada rápidamente, y la interrupción del servicio sea mínima. Además de la caída de producción, la falla puede ocasionar daños directamente al personal, ya sea a causa de una explosión o fuego, de aquí la importancia de una buena protección.

Una interrupción en el servicio de energía eléctrica daña de forma diferente a diferentes tipos de industria; por ejemplo la interrupción del servicio en la operación de una máquina únicamente ocasiona un atraso en la producción, mientras que una interrupción similar en una planta química puede ocasionar pérdida de material y un posible daño en el equipo. Otras industrias tales como refinerías, textiles y plantas de procesamiento son afectadas de manera similar; algunas plantas pueden aceptar interrupciones momentáneas, pero nunca interrupciones prolongadas. Así el tipo de industria tendrá una influencia pri-

mordial en el tipo de protección aplicado al sistema

Todos los sistemas están sujetos a cortos circuitos y fallas a tierra que deberán ser aislados rápidamente. La capacidad de interrupción representa la máxima corriente de corto circuito que circula a través de los interruptores y de los fusibles cuando ocurre la falla en el circuito. Otros dispositivos como switches desconectores y buses deberán soportar esfuerzos térmicos y mecánicos, ocasionados por las altas corrientes de corto circuito.

Para una adecuada aplicación de interruptores y fusibles, la selección de éstos fusibles es hecha en base a una operación adecuada y segura. Se deberá de considerar la corriente continua normal que transporta. Las fallas posibles de corto circuito podrían ser de fase a fase, en sistemas no aterrizadas, y de fase a fase, ó bien de fase a tierra en sistemas aterrizados.

La magnitud del sistema de potencia que alimenta la carga, dicta el aumento de la corriente de corto circuito. Bajo operación normal, la carga consume una corriente proporcional al voltaje aplicado y a la impedancia de la carga. Si ocurre un corto circuito, el voltaje es aplicado a través de una baja impedancia, pues ésta impedancia es únicamente la de los cables y el transformador que se encuentran desde la fuente de voltaje al punto de falla; ésta impedancia no es mas grande a la que exista en condiciones normales. Los interruptores que son seleccionados en base a la corriente continua que transportan, pueden también ser capaces de interrumpir la alta corriente que ocasiona un corto circuito. La corriente de carga es determinada por la carga normal que el interruptor transporta y no tiene relación con el tamaño del sistema que alimenta la carga. La magnitud de la corriente de corto circuito, no obstante, depende de el tamaño del sistema alimentador y es independiente de la carga normal.

La magnitud, los efectos del corto circuito y los factores de los

que éstos dependen son ilustrados con un simple ejemplo de cálculo de corriente de falla. Consideremos una fuente de capacidad infinita y un transformador monofásico de 50 KVA, alimentando un motor de 10HP - como se ilustra en la figura 1.

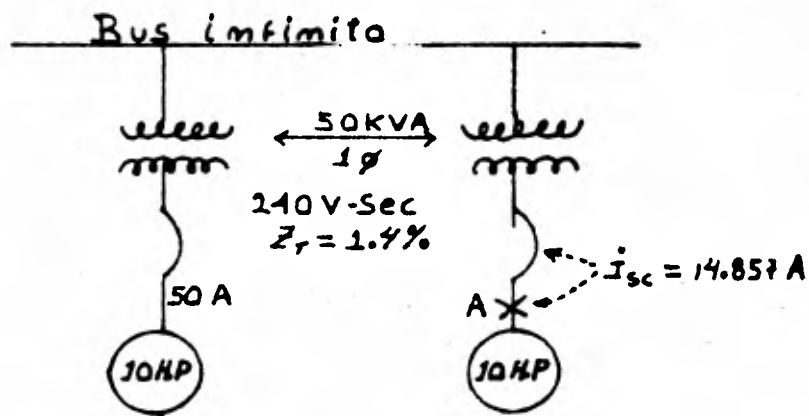


Figura 1

El transformador tiene un voltaje en el secundario de 240V y una impedancia  $Z=1.4\%$ .

Por simplicidad despreciaremos la impedancia de la línea, entre el punto A y el transformador.

Bajo condiciones normales el motor toma 50A, la cual circula a través de el interruptor de protección, y por lo tanto asumiremos que ocurre la falla en el punto A. La máxima corriente de corto circuito



considerando la impedancia de el transformador, es fácilmente calculada por la fórmula  $I_{sc\ max} = (100\% - / Z) I_{fl\ sec}$ , donde  $I_{sc\ max}$  es la máxima corriente de corto circuito,  $I_{fl\ sec}$  es la corriente total en la carga, en el lado del secundario del transformador,  $Z$  es impedancia en por ciento de el transformador.

La corriente de carga en el lado secundario del transformador es igual a  $50KVA(100)/240V = 208A$ . Es calculado sustituyendo en la fórmula de corto circuito,  $I_{sc\ max} = (100/1.4)208 = 14,857A$ . El interruptor que proteje al alimentador y al motor, entonces deberá ser capaz no sólo de conducir la carga normal de 50A, deberá soportar el máximo corto circuito posible, es decir 14857A.

Hasta ahora hemos despreciado la asimetría de las corrientes de corto circuito. En realidad esas corrientes son mas grandes en valor dependiendo de la relación que existe entre la resistencia y la reactancia (X/R), de el circuito considerado. Mas adelante consideraremos éste punto. Asumiremos ahora que en lugar de el transformador de 50 KVA tenemos un transformador de 500KVA, con una impedancia de  $Z=2.2$ , alimentando el mismo motor de 10HP como se ilustra en la figura 2

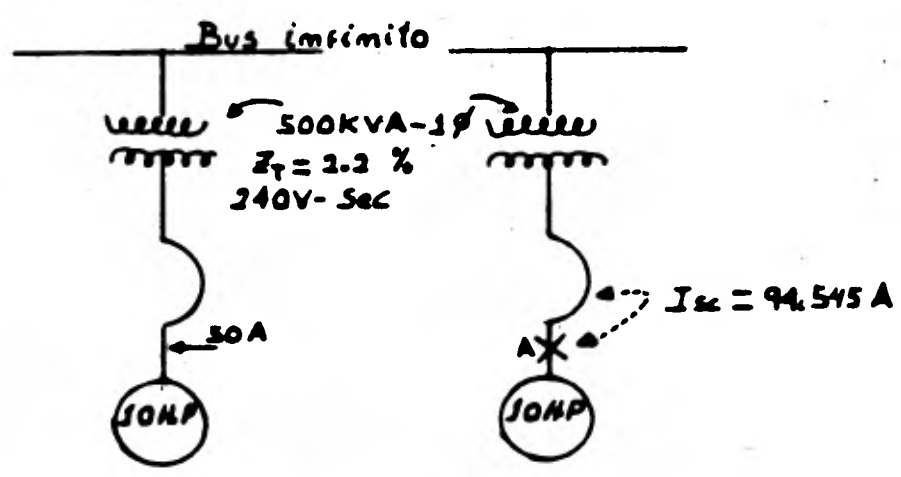


Figura 2

La corriente de la carga en el lado del secundario del transformador es de  $500\text{KVA}(1000)/240 = 2080\text{A}$ , si la misma falla ocurre en el punto "A", la corriente de corto circuito será  $I_{sc\text{ max}} = (100/2.2)2080 = 94,545\text{A}$ .

La carga normal de el interruptor de protección en el alimentador y en el motor es la misma que la de la figura 1. Pero el interruptor deberá ahora ser seleccionado de tal forma que soporte  $94,545\text{ A}$  de corriente simétrica en lugar de  $14,857\text{A}$  simétricos.

Este ejemplo numérico nos demuestra que la magnitud del corto circuito depende principalmente de el tamaño de el sistema de potencia - alimentador, también se demuestra que es de gran importancia seleccionar la capacidad adecuada del interruptor. El dispositivo seleccionado deberá soportar e interrumpir la corriente máxima de corto circuito ocasionada por el sistema.

La coordinación de la protección en los sistemas de potencia modernos asegura un efectivo aislamiento de la sección dañada en el sistema, permitiendo que el resto del sistema opere normalmente; esto se logra de la siguiente manera: Un cálculo cuidadoso del corto circuito, un estudio detallado de las características, tiempo corriente de los dispositivos de protección.

Las consecuencias de una selección impropia de los dispositivos de protección puede ser desastrosa; esto es cuando en un equipo de protección de corto circuito, no es cuidadosamente seleccionado ó cuando éste es escogido intentando ahorrar en el costo de la instalación, lógicamente el resultado es una inadecuada protección. Para asegurar una adecuada protección contra corto circuito y prevenir accidentes es conveniente:

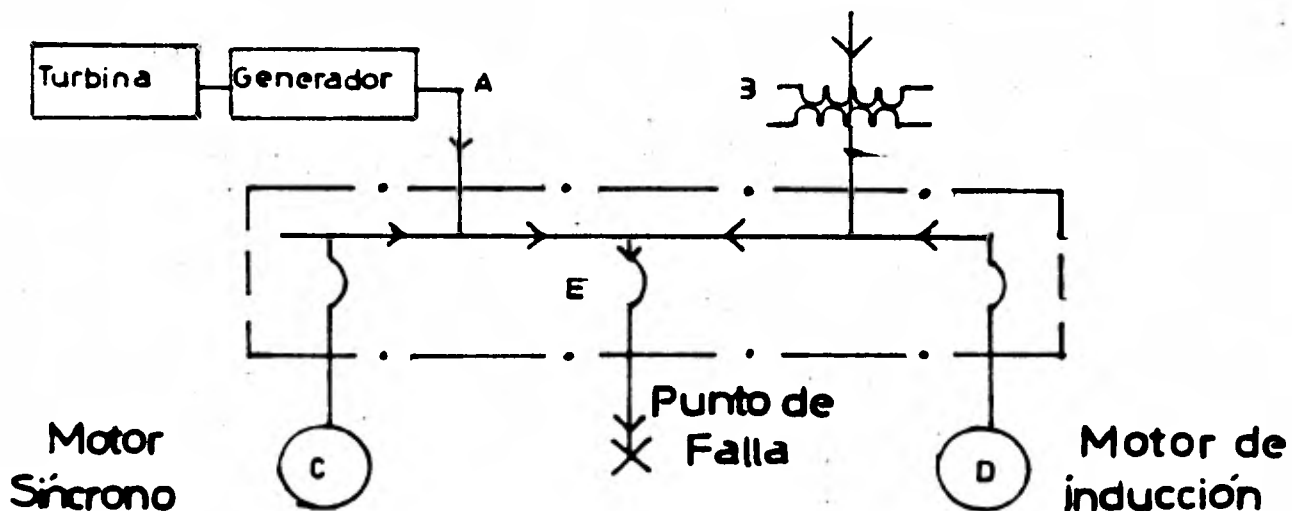
- 1).- Determinar correctamente la corriente de corto circuito, só lo después de esto se podrán determinar cuidadosamente los dispositivos de protección.
- 2).- El crecimiento de la carga en la planta y la selección de los dispositivos de protección, se deberá hacer con mira ha cia una futura expansión, de otra forma esos dispositivos de interrupción deberán ser reemplazados cuando la planta se expanda.
- 3).- Todo circuito sometido a esfuerzos deberá ser checado. Esos esfuerzos son proporcionales al cuadrado de la corriente de corto circuito.
- 4).- Checar la capacidad de los cables, pues deberán soportar el calor producido por las corrientes de corto circuito, además de la corriente normal de carga.
- 5).- Checar todo el sistema de potencia del lado de baja.
- 6).- Aproximar el problema de la determinación de corto circuito a una base puramente ingenieril, mas que a una base de buena suerte. Esto excluye una innumerable cantidad de contratiem pos causados por impropios dispositivos de interrupción.

## FUENTES DE CORTO CIRCUITO

### COMPORTAMIENTO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO:

La importancia de un conocimiento exacto de las corrientes de corto circuito ya fue discutido con anterioridad; la magnitud de las corrientes depende de las diferentes fuentes que las generan de sus reactivancias, y del sistema de reactivancias a el punto de falla. Las fuentes de corriente del corto circuito son: el sistema que proporciona el servicio (C.F.E.), generadores, motores síncronos y motores de inducción, figura 3.

### Sistema Utilizado



Corto Circuito  
Dado Por ABCDE

Figura 3

C.F.E.; proporciona potencia a través de transformadores reductores de voltaje a los consumidores en el voltaje que ellos deseen. Aunque los transformadores son algunas veces considerados como una fuente de corriente de corto circuito, estrictamente hablando esto no es correcto. Los transformadores cambian la magnitud del voltaje y la corriente, pero no la generan. La corriente de corto circuito proporcionada a través de un transformador depende de su voltaje en el secundario y su porcentaje de reactancia; también depende de la reactancia de los generadores y el sistema bajo las terminales del transformador, de igual forma depende de la reactancia del circuito, entre el transformador y el punto de falla. El porcentaje de la reactancia de un transformador es el porcentaje del valor del voltaje, aplicado al primario del transformador, para producir el valor de la corriente de carga para el secundario en corto circuito. El porcentaje de la reactancia es un porcentaje del voltaje medio y no una impedancia.

C.F.E., frecuentemente proporciona información acerca de su corriente de corto circuito, puesto que C.F.E. es mucho mayor que la planta del sistema; si ocurre un decremento en la corriente simétrica de corto circuito, será muy poco lo que se note durante la falla (ver figura 4a).

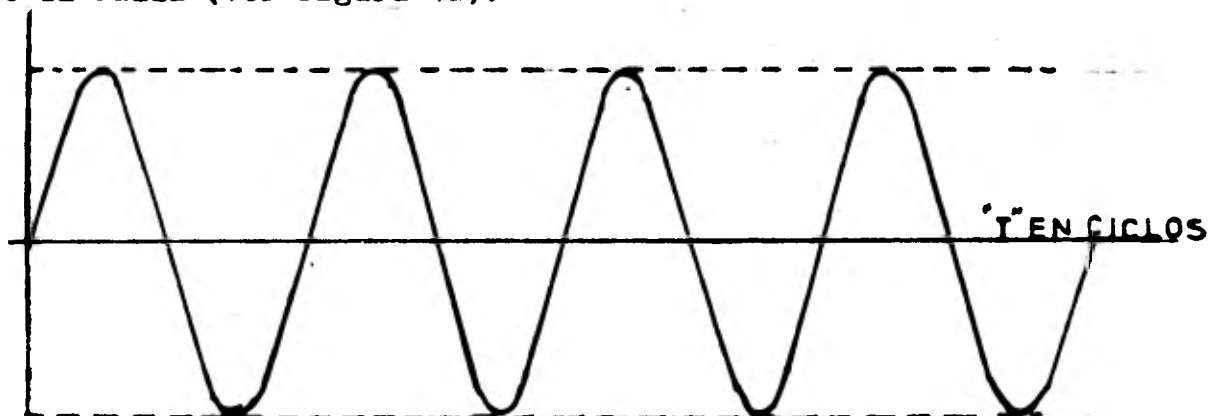


Figura 4a  
SISTEMA UTILIZADO

Cuando hablamos de una corriente de corto circuito, estamos interesados acerca de las mediciones del valor (R.M.S.), ó valor efectivo de su onda senoidal. Estas ondas de corriente podrán ser clasificadas dentro de dos grupos: una onda de corriente senoidal simétrica; la cual es una corriente alterna balanceada alrededor del eje cero, como se muestra en la figura 5.

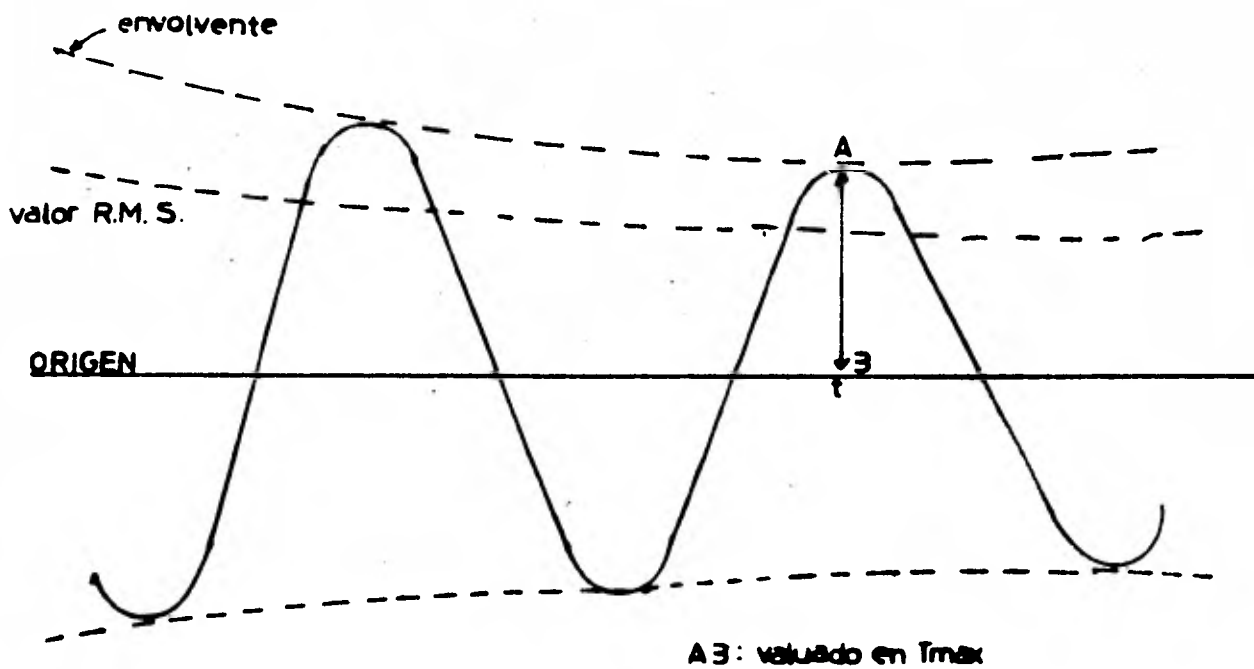


Figura 5

El otro tipo de onda, es una onda de corriente senoidal asimétrica, la cual no está balanceada alrededor del eje cero; como se muestra en la figura 6.

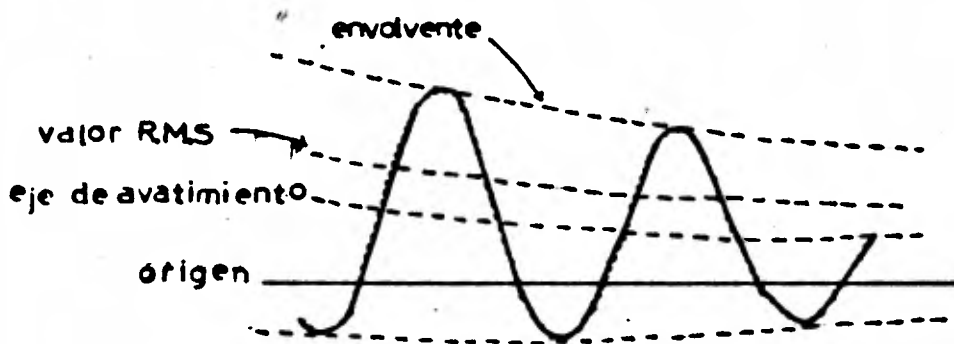


Figura 6

Los generadores que existen en el sistema de los consumidores, pueden ser una fuente de corriente de corto circuito. Estos son movidos por máquinas, tales como turbinas de gas ó de vapor, máquinas diesel ó máquinas movidas por agua (Turbina Pelton), cuando ocurre un corto circuito, el generador continúa moviendose generando voltaje; puesto que la excitación del campo es mantenida por el generador que gira a una velocidad normal.

El voltaje generado produce una corriente de corto circuito de gran magnitud, y ésta corriente circula hacia el punto de falla. El flujo de corriente es limitado únicamente por la reactancia del generador y la del circuito entre el generador y el punto de falla. La reactancia de un generador cambia con el tiempo ó después de que la falla ocurre. La reactancia está formada por los siguientes valores:  $X''$ = reactancia subtransitoria, que es la reactancia aparente del estador en el instante en que la falla ocurre.

Determina la corriente de corto circuito inmediatamente después de la falla. Este valor existe en los primeros ciclos después de - que la falla ocurre y alrededor de .01 segundos.

$X'd$ = reactancia transitoria, existe éste valor alrededor de 2 segundos mientras llega al valor final; éste valor depende del diseño de la máquina.

$X_d$ = reactancia síncrona, determina la corriente que circula después que la condición de estado estable es alcanzada. No es efectiva sino hasta varios segundos después de que el corto circuito ocurre, - consecuentemente no es utilizada en los cálculos de corto circuito.



Un generador tiene una reactancia variable que se incrementa en magnitud con el tiempo; consecuentemente la corriente de corto circuito decrece exponencialmente al transcurrir el tiempo de un valor inicialmente grande a un valor estable como se muestra en la figura 4B

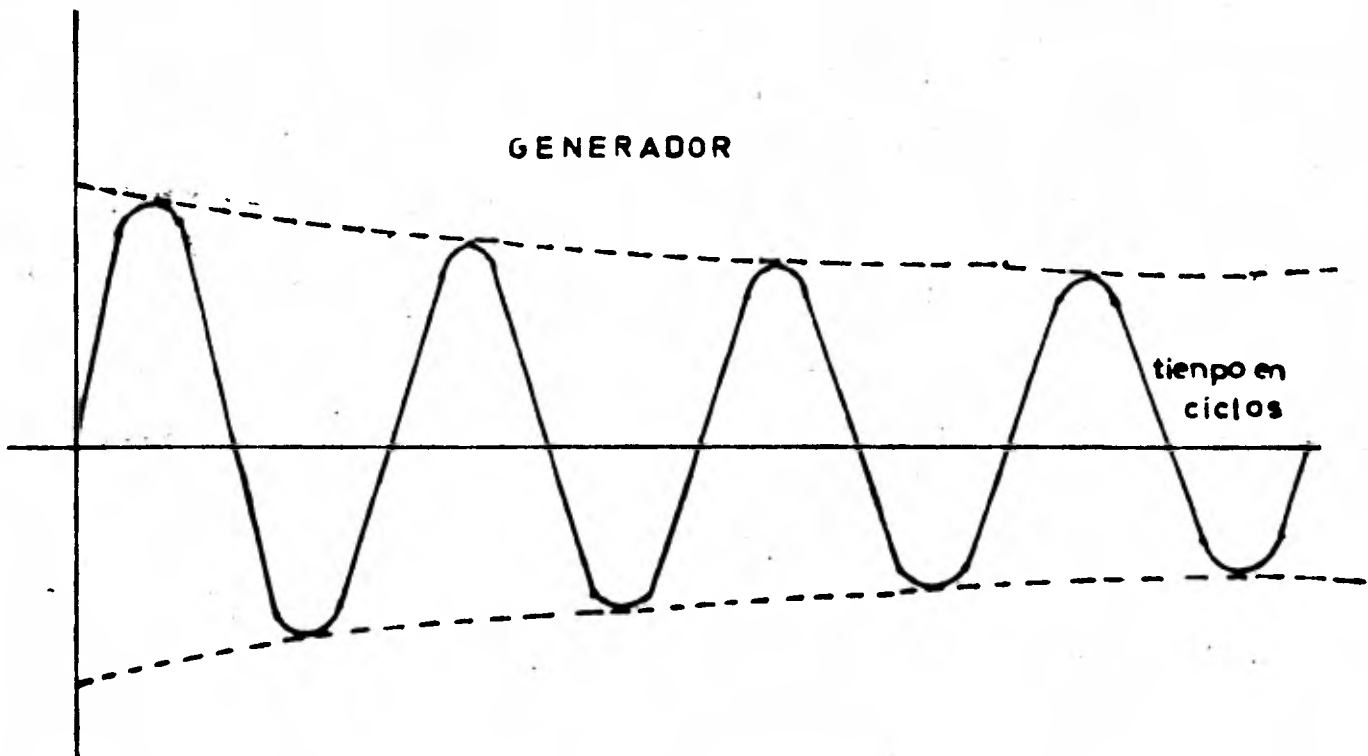


Figura 4b

La velocidad con que decrece depende de las constantes del generador. Los valores  $X''_d$  y  $X'_d$ , dados por los fabricantes de la máquina son los valores más bajos; su uso proporciona la máxima corriente de corto circuito que puede ocurrir.

## MOTORES SINCRONOS

Los motores síncronos son construidos de una forma mucho muy similar a la de los generadores; ésto es, tienen un campo excitado por corriente directa y un estator en el que la corriente alterna circula. - Normalmente los motores síncronos toman potencia C.A. de la línea y la convierten en energía mecánica. Cuando ocurre un corto circuito en el sistema; el voltaje en el sistema es reducido a un valor muy bajo, y - consecuentemente el motor deja de proporcionar energía a la carga mecánica y se para lentamente, no obstante aquí ocurre algo similar a lo que pasa en un generador, pues la inercia de la carga y el rotor del motor mueven al motor síncrono. El motor síncrono entonces se transforma en un generador y contribuye a la corriente de corto circuito - por muchos ciclos después de que el corto circuito a ocurrido, ésto se muestra en la figura 4C.

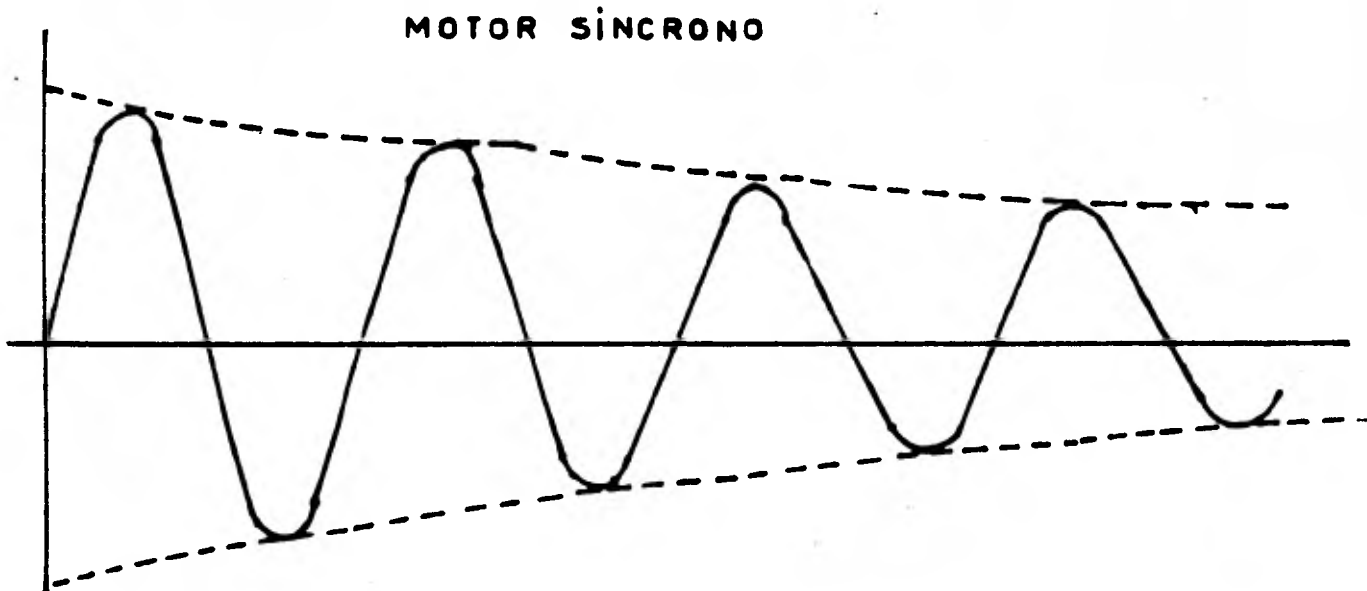


Figura 4c

El aumento de la corriente de corto circuito producida por el motor depende de la impedancia del motor síncrono y la impedancia del sistema al punto de falla. La reactancia del motor síncrono se les designa como  $X''$ ,  $X'$  y  $X$  igual que en un generador. No obstante estos valores serán diferentes para los motores síncronos. La magnitud de la corriente de corto circuito debida al motor síncrono también depende de los H.P. y voltaje del sistema.

## MOTORES DE INDUCCION

La inercia de la carga y del motor en un motor de inducción tienen el mismo efecto, producido en el motor síncrono éste es, la carga mueve al motor después de que ocurre el corto circuito. Aquí hay una mayor diferencia, el motor de inducción no tiene excitación del C.D. en el campo, pero hay un flujo en el motor de inducción durante su -- operación normal; éste flujo activa de la misma manera que el flujo producido por el campo del C.D. en el motor síncrono.

El campo del motor de inducción es producido por inducción del estator. El flujo en el rotor permanece normal mientras se le aplica un voltaje al estator por medio de una fuente externa, sin embargo si la fuente externa de voltaje es repentinamente suprimida, "pués esto es lo que ocurre cuando hay un corto circuito en el sistema". El flujo en el rotor no puede cambiar instantáneamente, dado que el flujo del rotor no puede decrecer instantáneamente y debido a que la inercia de las partes rotatorias mueven al motor de inducción, un voltaje es generado en el estator, el cual es ocasionado por éste movimiento. Este flujo ocasiona una corriente de corto circuito, la cual permanece hasta que el flujo en el rotor es cero. La corriente de corto circuito desaparece casi completamente alrededor de cuatro ciclos puesto que no hay bastante corriente de campo en el rotor para que exista un flujo, como en el caso de una máquina síncrona.

No hay por lo tanto contribución de la corriente de falla en estado estable, consecuentemente los motores de inducción tienen únicamente un valor de reactancia, la subtransitoria  $X''$ , el valor de  $X''$  es casi igual a la de la reactancia del rotor. Por lo tanto el valor inicial de la corriente de corto circuito simétrica es casi igual a la corriente de arranque del motor, que es alrededor de 600-900% de la corriente normal de carga (ver figura 4D).

FIG 40

## MOTOR DE INDUCCION

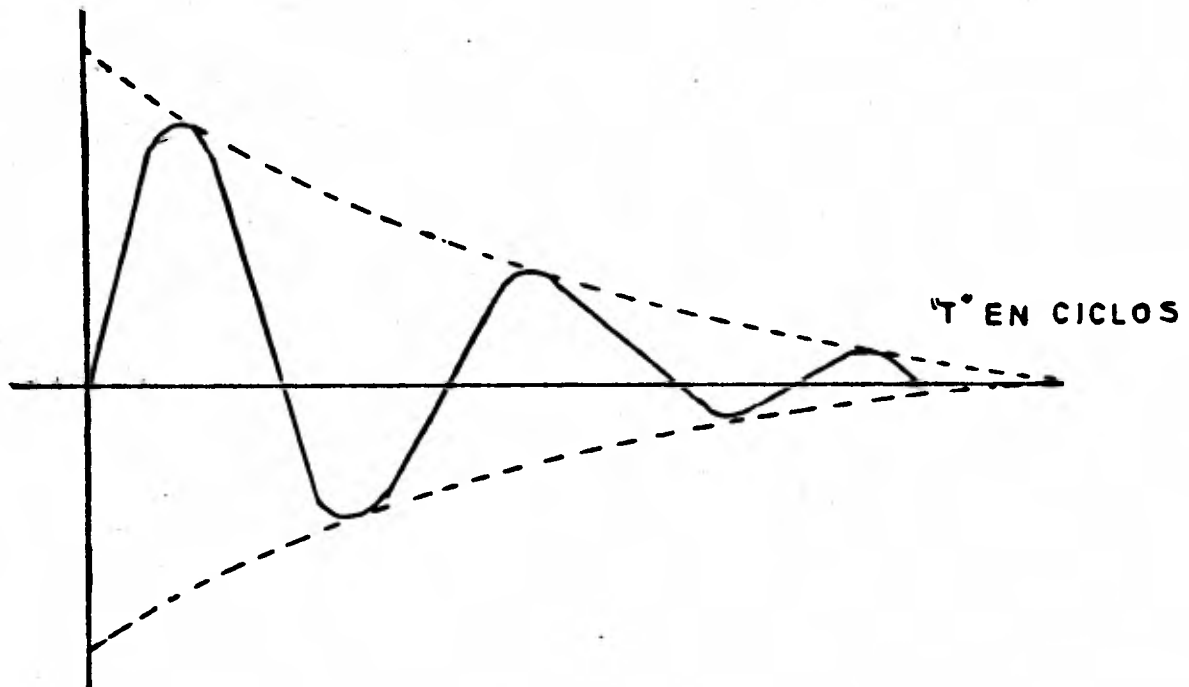


Figura 4d

La magnitud de la corriente de corto circuito que aporta el motor de inducción depende de los H.P., del voltaje, de la reactancia del motor y de la reactancia del sistema al punto de falla.

La corriente total de falla simétrica de corto circuito es una combinación de todas las fuentes de corto circuito que hemos descrito.

C.F.E., generadores, motores síncronos y de inducción, todos contribuyen a la corriente de corto circuito en una falla. El flujo en las máquinas decrece con el tiempo después de que ocurre la falla, de aquí que su contribución a la corriente de falla también decrece con el tiempo como se muestra en la figura 4E.

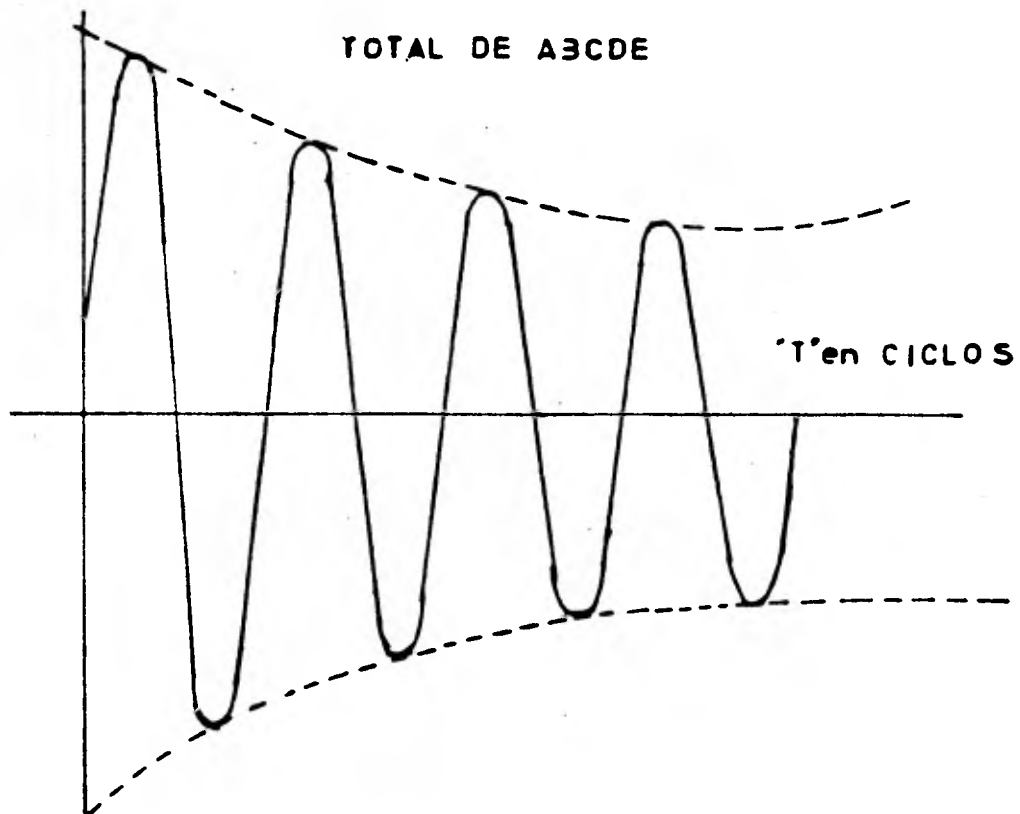


Figura 4 E

La magnitud de la corriente es la más grande durante el primer ciclo y decrece en valor después de algunos ciclos. Después de uno o dos ciclos la contribución de el motor de inducción ha desaparecido.

Hemos considerado únicamente la componente simétrica de la corriente de corto circuito. Pero no hemos tomado en cuenta que la magnitud de la corriente de corto circuito es incrementada durante los primeros ciclos por la llamada componente de C.D. Esta particularidad será analizada mas adelante.

La componente de C.D. ocasiona que la onda de corriente de corto circuito sea asimétrica y decrezca con el tiempo, esto dá lugar a una mayor diferencia en magnitud entre el primer ciclo después del inicio de la falla y varios ciclos después.

Dado que la magnitud de la corriente de corto circuito varia con el tiempo. Se deberá determinar algún procedimiento para determinar la corriente de corto circuito a diferentes tiempos después de que la falla ocurre.

## COMPONENTES QUE LIMITAN LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO

Las componentes que limitan la corriente durante el corto circuito son las impedancias de los transformadores, reactancias, cables, buses, fusibles, limitadores de corriente y otras impedancias. Los transformadores debido a su reactancia, reducen la magnitud de las corrientes de corto circuito producidas por las fuentes a las que está conectado.

Los reactores son dispositivos usados para limitar la corriente de corto circuito insertándolos dentro de éste. Los reactores tienen algunas desventajas, no obstante ellos producen una caída de voltaje que puede ser la causa de que el voltaje en el sistema caiga cuando una falla ocurre; ó cuando se arrancan grandes motores. Estos reactores en un momento determinado podrían afectar adversamente la regulación del voltaje.

Los cables y buses son parte del eslabon entre las fuentes de corriente de corto circuito y el punto de falla. Su impedancia natural limita la corriente de corto circuito y la capacidad para limitar ésta corriente depende en gran medida del tamaño, naturaleza y longitud del cable. En algunas ocasiones ciertos tipos de buses podrían ser usados para introducir una impedancia dentro del circuito. Los valores de resistencia para buses y cables son encontrados en los catálogos de sus fabricantes.



Los fusibles limitadores de corriente abren el circuito antes de que la corriente de corto circuito se haya incrementado hasta su valor pico, ver figura 7

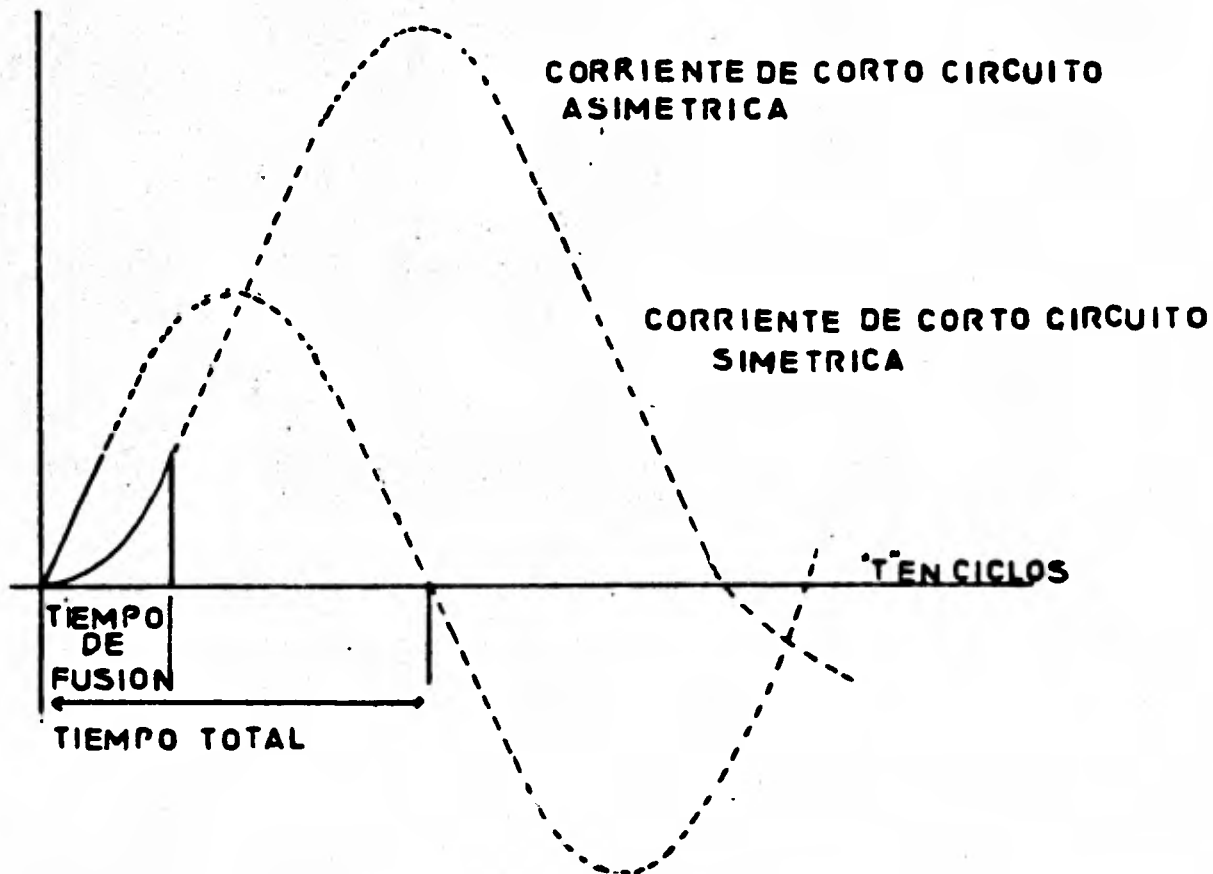


Figura 7

La interrupción frecuentemente ocurre en el primer cuarto de ciclo tal como se observa en la figura 7. El tiempo total que utiliza el fusible está compuesto de un tiempo en el cual se funde el elemento del mismo y un tiempo de arco después de que el elemento se ha fundido. El arco introduce una impedancia que limita la corriente, re

duciendola finalmente a cero. El fusible limitador de corriente mantiene una baja impedancia hasta el momento en que una corriente muy alta circula a través de el. Este es un dispositivo limitador de corriente y un dispositivo interruptor de corriente de corto circuito, mientras que los fusibles comunes y circuitos interruptores son dispositivos de interrupción únicamente.

Un corto circuito tiene tres clases de componentes:

- 1).- Fuentes que tienen una reactancia variable con tiempo.
- 2).- Componentes de circuito con una reactancia fija que limita la magnitud de la corriente de corto circuito.
- 3).- Interruptores y fusibles que interrumpen la corriente de corto circuito.

La determinación de sus reactancias para una falla específica es el primer paso que hay que dar para los cálculos de corto circuito. La corriente de corto circuito en el primer medio ciclo está determinada por las reactancias subtransitorias  $X''d$ . Estas determinan el valor momentáneo de interruptores y fusibles, siendo éste cálculo el esfuerzo máximo que deberán de soportar.

Las ondas de las corrientes de corto circuito en sistemas de potencia son principalmente ondas senoidales (ver figura 5 y 6). La resistencia de los circuitos de potencia típicos es despreciable comparada con su reactancia. Así que cuando ocurre un corto circuito mucha de la resistencia desaparece y lo que queda es un circuito altamente reactivo.

Si la falla ocurre en un circuito en el instante en que la onda de voltaje se encuentra en el pico, la corriente de corto circuito de-

berá iniciar en casi cero y su onda senoidal que deberá estar  $90^\circ$  de fasada con respecto al voltaje, deberá ser totalmente simétrica alrededor del eje cero. ver figura 8

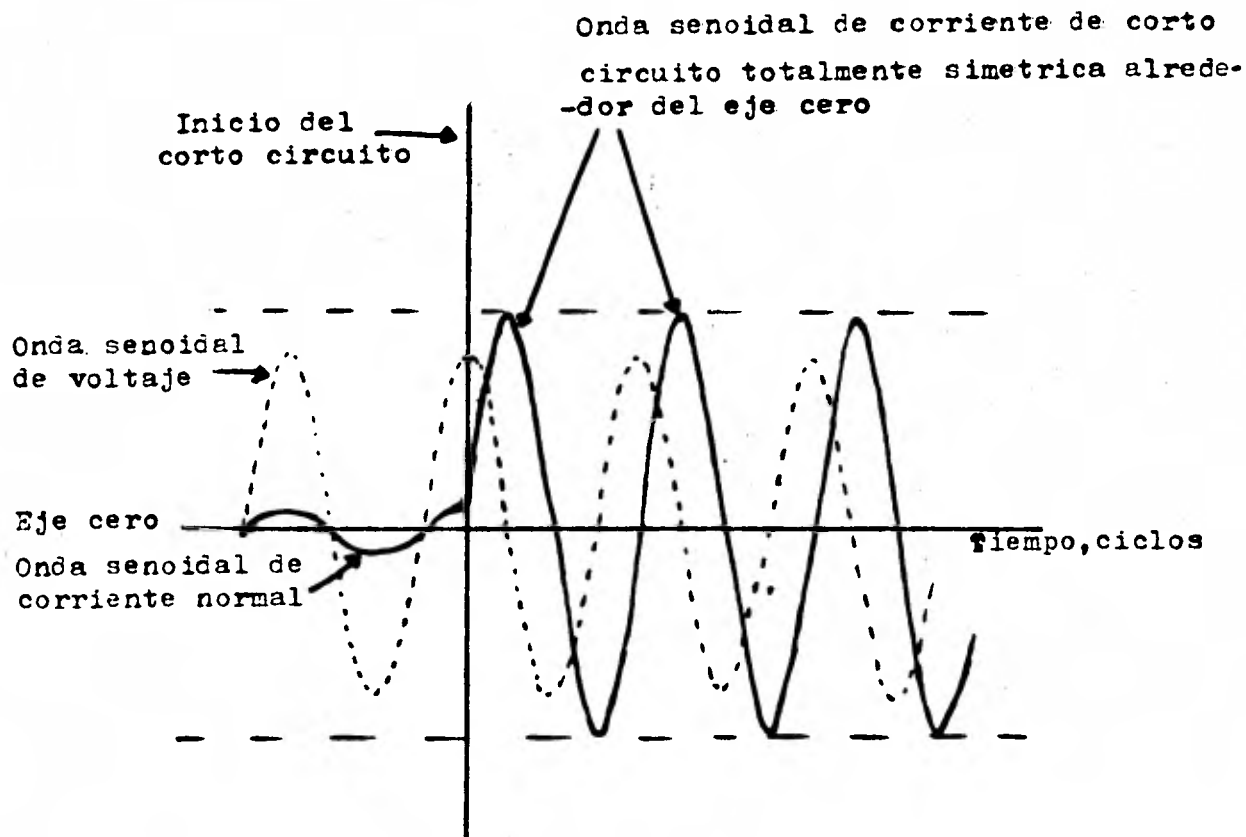


Figura 8

Si el corto circuito ocurre cuando la onda de voltaje se encuentra en el punto cero, la corriente también inicia en cero, no puede aumentar con el voltaje y permanece en fase con éste

La onda de corriente estará retrazada del voltaje  $90^\circ$  por lo tanto es desplazada del eje cero. como el voltaje alcanza su pico de onda de corriente continúa incrementandose hasta que el voltaje llega a ser cero ,produciendo una corriente de corto circuito totalmente asimétrica. ver figura 9

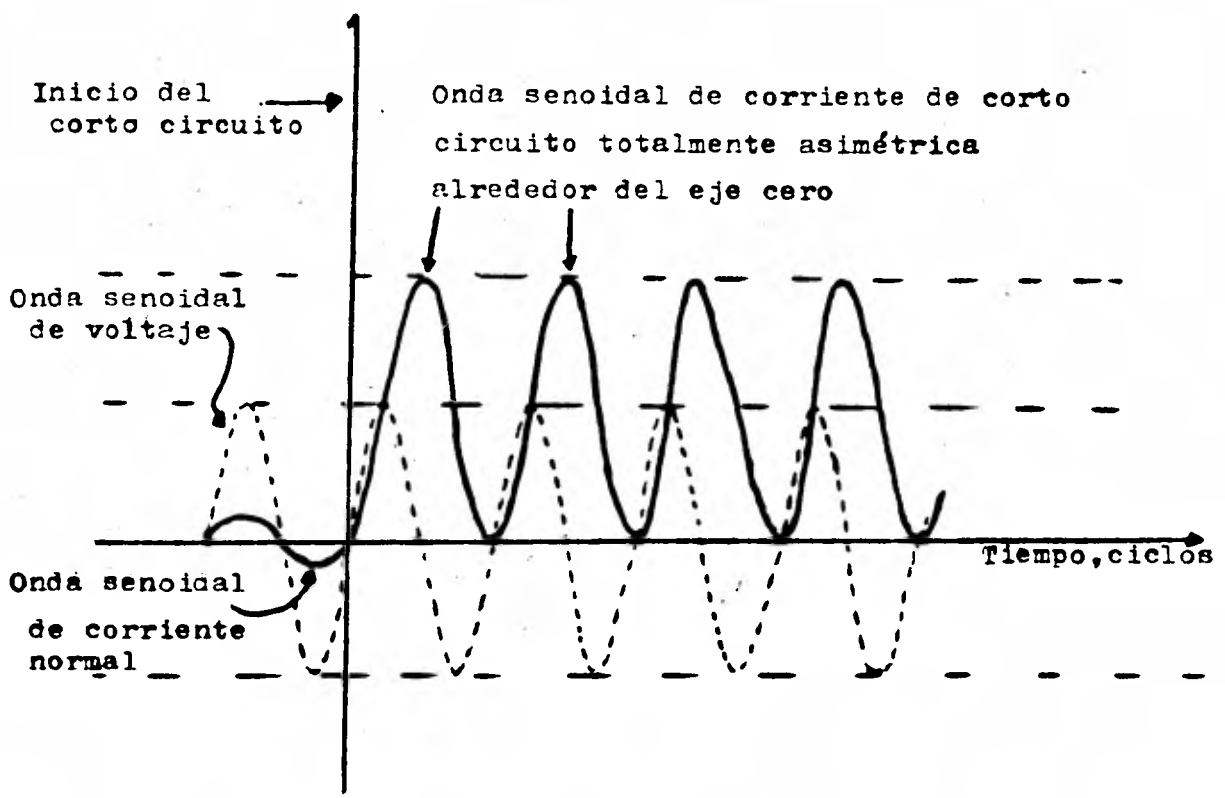


Figura 9

Podemos tratar la corriente total asimétrica como una corriente si métrica que tiene una componente de corriente directa que desplaza a és ta del eje cero, ver figura 10.

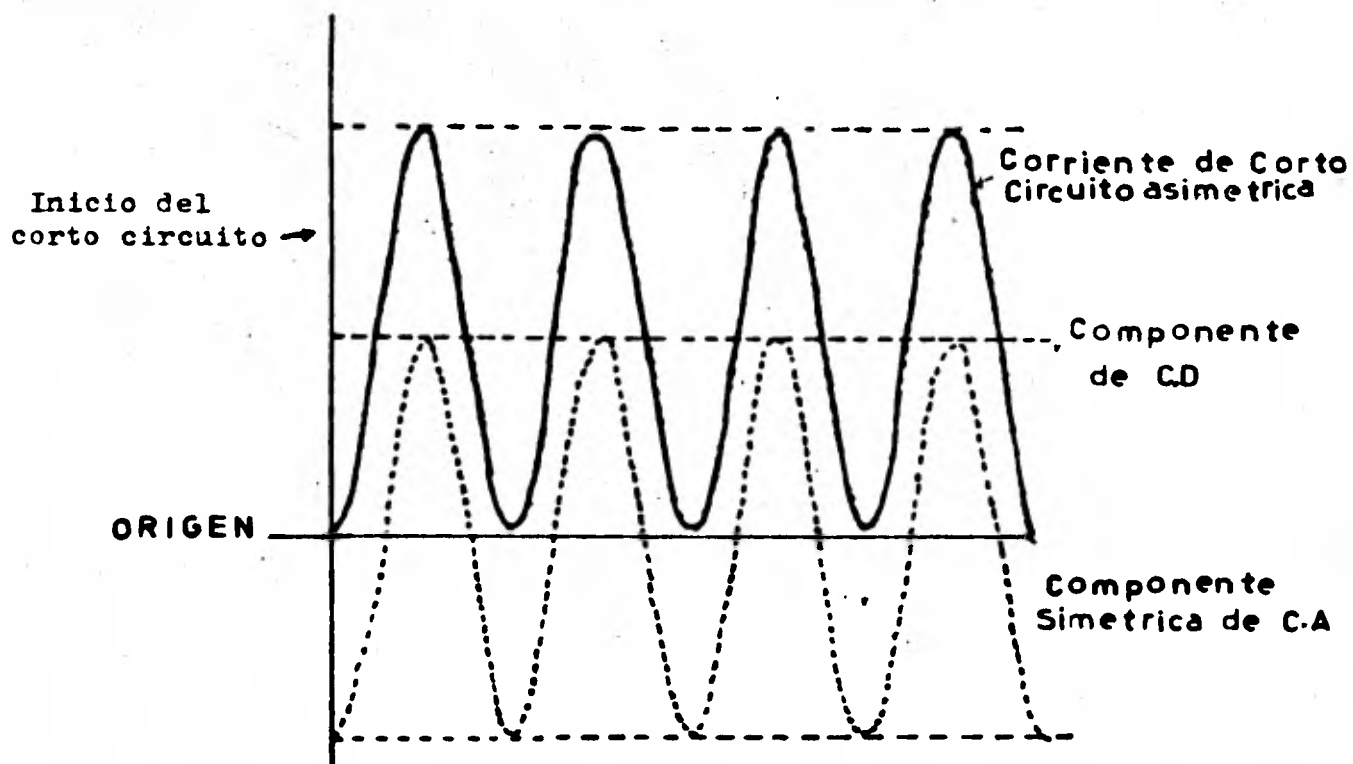


Figura 10

La componente C.D. representa el desplazamiento de la onda senoidal del eje cero.

Un corto circuito puede ocurrir en cualquier parte entre cero y el pico de la onda de voltaje. Así que la corriente de corto circuito estará en algún lugar entre éstos dos límites dependiendo en que punto de la onda de voltaje ocurre el corto circuito ver fig 11

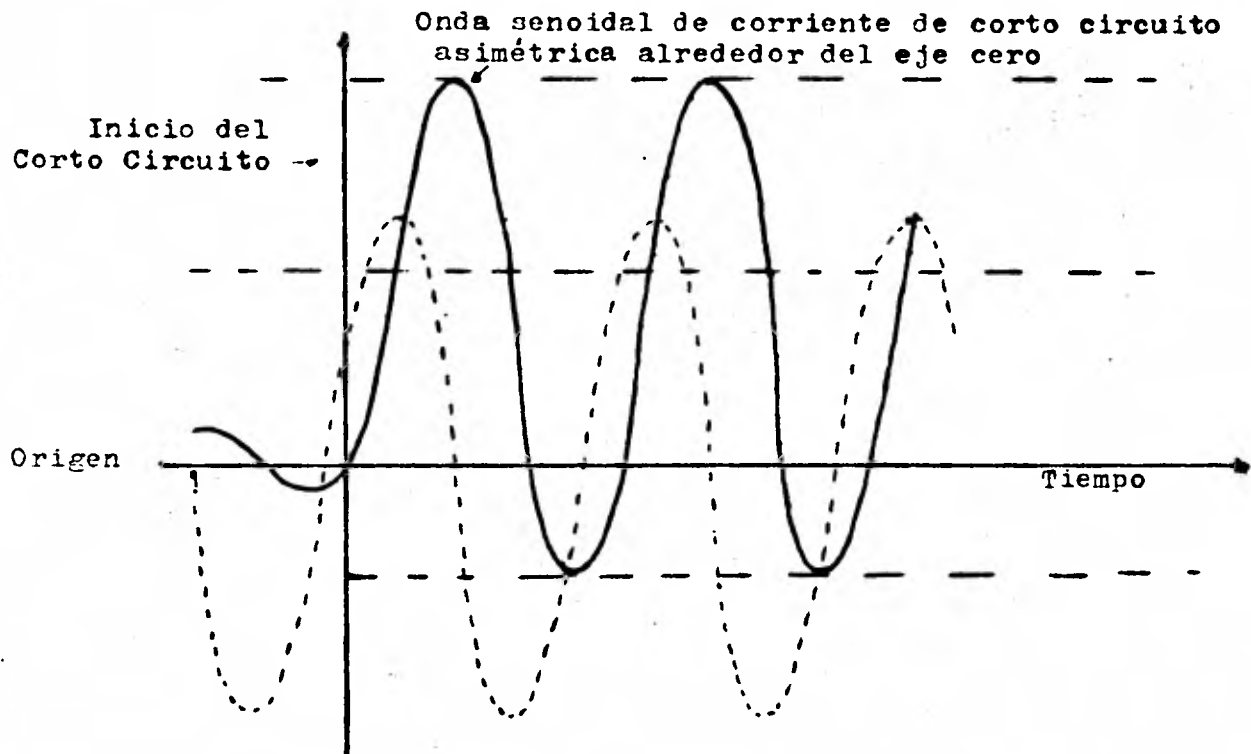


Figura 11

Un circuito real tiene resistencia y ésta es la causa de que la componente de CD llega a cero varios ciclos después de que la falla ocurre. El efecto ocasionado por la resistencia es un cambio de una corriente inicial asimétrica a una simétrica. La componente de CD

es generada en el sistema de A.C. y no es introducida por una fuente externa de C.D. Consecuentemente su energía será disipada por " $i^2 R$ " en la resistencia del circuito, ver figura 12.

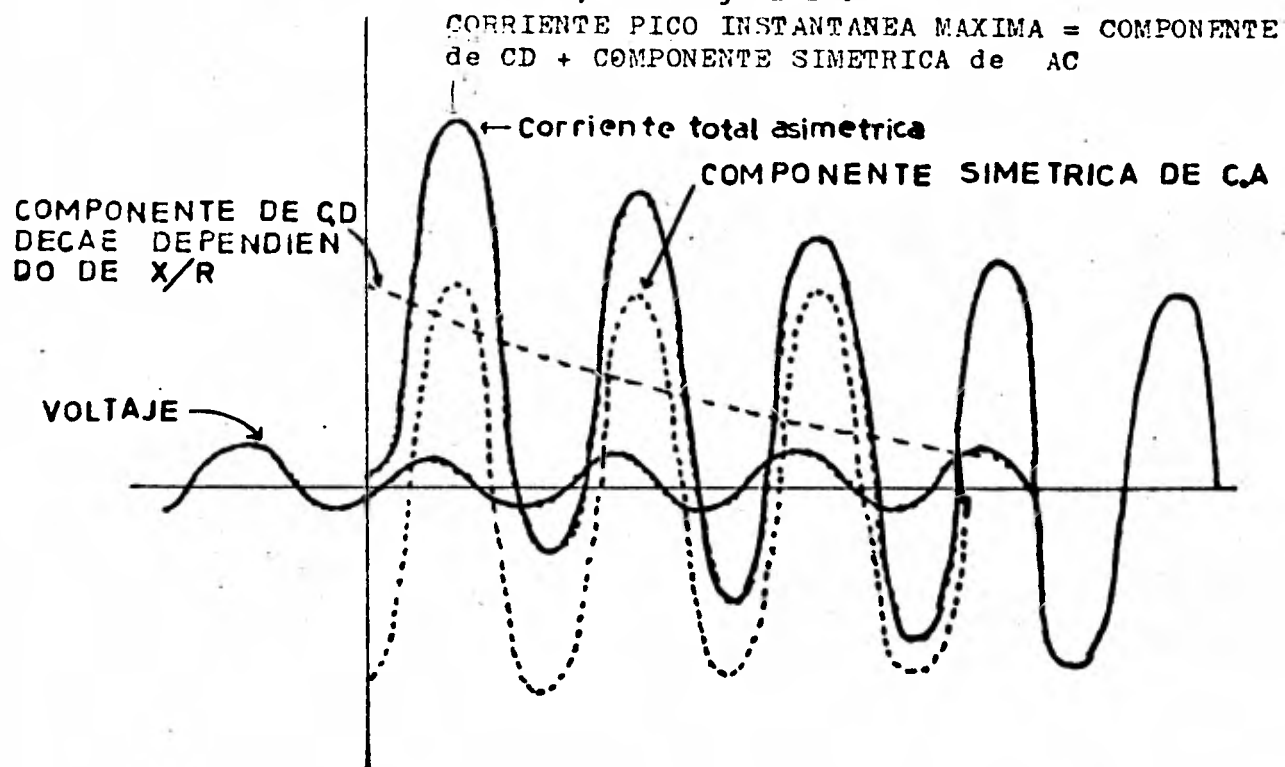


Figura 12

El factor  $X/R$  es la relación reactancia-resistencia del circuito considerado. El decremento de la componente de C.D. depende de la relación  $X/R$ ;  $X$  y  $R$  son formadas por la resistencia y reactancia de todas las componentes del circuito entre la fuente y el punto de falla, si  $R=0$  la relación es infinita y la componente de C.D. nunca decrecerá (ver figura 10). Si  $X=0$  la relación es cero y la componente de

C.D. decrece instantáneamente, así que la velocidad con que decrezca la componente de C.D. dependerá de la relación  $X/R$ , ver figura 12. - Entre mas grande sea  $X$  mas tiempo lo tomará a la componente de D.C. decrecer.

Un cálculo exacto del valor R.M.S. de la corriente asimétrica en tiempos diferentes después de que la falla ocurre es muy complicado. Para efectuar éstos cálculos se tendrá que conocer los factores precisos de relación de cambios en las reactancias aparentes de los generadores, y los factores de decremento para componentes de C.D. tendrán también que ser conocidos. Existen métodos simplificados que nos informan de la componente de C.D. a través del U S O. de un multiplicadoador. Estos multiplicadores convierten los cálculos simétricos R.M.S. a amperes asimétricos R.M.S. (incluyendo la componente de C.D.)

Para la aplicación de dispositivos de protección contra corto -- circuito, únicamente serán consideradas las máximas componentes de C. D. para obtener el valor momentáneo de los interruptores y fusibles. Así nos aseguramos que los dispositivos de protección aplicados soportarán la máxima corriente de corto circuito que pueda ocurrir en el - sistema.

Para obtener el valor momentáneo deberán ser consideradas todas las reactancias subtransitorias de las fuentes en el primer medio ciclo de la corriente simétrica de corto circuito, antes de que el multiplicador sea aplicado. En cálculos prácticos un multiplicador de 1.5-1.6 es generalmente utilizado para medio y alto voltaje y aproximadamente 1.25 para circuitos de bajo voltaje, la table "M" es una -- lista abreviada de multiplicadores publicado por la National Electrical Manufacturens Association (NEMA).



La figura 13 muestra multiplicadores para diferentes valores de  $X/R$ , de 0-7 ciclos después de que la falla ocurre.

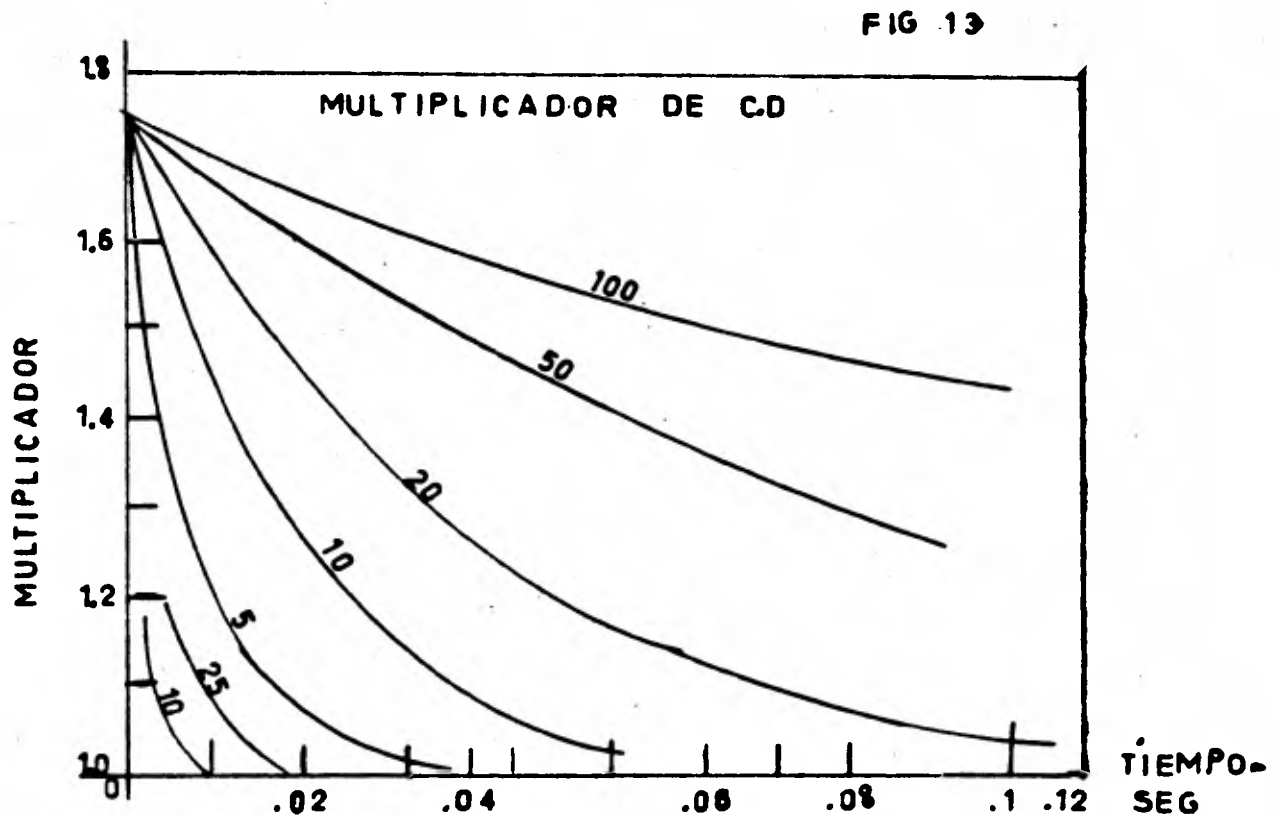


Figura 13

El valor de interrupción está basado en la magnitud de la corriente de corto circuito en el momento en que los contactos del interruptor se separan ó cuando el fusible se activa. Un circuito interrumpe después de 3, 5, u 8 ciclos. Los interruptores de 8 ciclos son generalmente usados en plantas industriales. Después de 8 ciclos la contribución del motor de inducción ha desaparecido y la reactancia del motor síncrono a cambiado de subtransitoria a transitoria. Esto es

así porque para el valor de interrupción de los interruptores arriba de 600 volts tenemos que usar la reactancia subtransitoria del generador y la reactancia transitoria del motor síncrono, despreciando los motores de inducción. La componente de C.D. después de 8 ciclos casi ha desaparecido. Por lo tanto para esos interruptores se usará un multiplicador de 1.0

## DETALLES EN EL CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

La selección de las protecciones para corto circuito en los sistemas eléctricos de potencia se inicia con el estudio del corto circuito. El propósito de esos cálculos es hacer una adecuada selección de los dispositivos de protección (interruptores y fusibles).

El rango de los interruptores (arriba de 600 V), es complicado por los pocos ciclos que éste toma para abrir después del inicio del corto circuito. Este tiempo es la suma de los tiempos necesarios para que el relevador de protección cierre sus contactos. Los esfuerzos mecánicos mas grandes son producidos durante el primer medio ciclo por la contribución de la componente de C.D. y las contribuciones de los motores y los generadores.

Desde el inicio de un corto circuito hasta que los contactos del interruptor actúan, la corriente decrece porque la componente de C.D. y los valores de las reactancias de los motores cambian. Consecuentemente la corriente que se deberá interrumpir es la del cuarto, quinto u octavo ciclos después de que la falla ocurre y es menor que el valor máximo durante el primer medio ciclo. A causa de la magnitud cambia con el tiempo, deberán ser consideradas dos clasificaciones de la corriente de corto circuito para los dispositivos de protección.

**El Valor Momentáneo;** éste valor ocurre en el primer medio ciclo después de que a ocurrido la falla, con éste valor sabremos a que esfuerzos mecánicos y térmicos se podría llegar a someter nuestro dispositivo de protección.

**El Valor Interruptivo;** éste valor nos hace saber cual deberá ser la capacidad del dispositivo para interrumpir el flujo de corriente de corto circuito después de cuatro, cinco, u ocho ciclos, de acuerdo al

tipo del interruptor.

La clasificación de los interruptores está especificada por las normas USASI y NEMA, y por las recomendaciones de IEEE. Están clasificadas de acuerdo a el tipo de interruptor, voltaje, corriente, capacidad interrumpida, etc. La table N tiene 13 columnas, cada una tiene un rango específico para un interruptor seleccionado.

Hay cuatro límites que nunca deberán ser excedidos en la selección de un dispositivo; voltaje de operación (columna 3 tabla N); corriente momentánea (columna 9); MVA interruptivos (columna 10); máximo rango de interrupción en amperes (columna 12). Para un dispositivo de 4160V, 250-MVA, los cuatro rangos pertinentes son:

VOLTAJE DE OPERACION, para el máximo diseño en KV, es de 4.76 kV; éste es el mas alto valor de voltaje R.M.S., en el rango de frecuencia para el cual el interruptor está diseñado

CORRIENTE MOMENTANEA, es de 60,000 A; es la máxima corriente asimétrica R.M.S. que el interruptor soportará incluyendo las corrientes de corto circuito de todas las fuentes y la componente de C.D. Esta informa acerca de la corriente máxima durante el primer medio ciclo -- después de que la falla ocurre. Este valor es importante dado que los esfuerzos mecánicos varían con el cuadrado de la corriente.

MVA INTERRUPTIVOS, MVA trifásico, son 250 MVA (el rango de los MVA interruptivos en el voltaje especificado). Este valor es el producto de los KV a los que el interruptor opera, el rango de corriente de corto circuito en KA que serán interrumpidos es  $4.16 (32) (\sqrt{3})$ .

MAXIMO RANGO DE INTERRUPCION EN AMPERS ES 37,500 A, ésta es la corriente R.M.S. más grande que el interruptor, deberá interrumpir -- haciendo caso omiso de que tan bajo es el voltaje.

Donde no hay contribución de motores, únicamente es necesario una revisión del valor interruptivo MVA. Si éste valor no excede el de la columna 10, entonces la máxima corriente de corto circuito incluyendo la componente de C.D. estará dentro del valor momentáneo de el interruptor. Cuando hay una carga de motor bastante considerable, entonces en toncés se deberá revisar el valor momentáneo y el interruptivo.

El máximo valor momentáneo es encontrado determinando la corrien te en el primer medio ciclo. La corriente de corto circuito durante és te tiempo incluyendo todas las fuentes de corto circuito, generadores, motores, síncronos de inducción y la compañía suministradora de ener-- gía. Las reactancias subtransitorias de generadores, motores síncro- nos y de inducción, forman el diagrama total de reactancias. La compo- nente de C.D. que es máxima en el primer medio ciclo, se le aplicará - un multiplicador que para el caso general es de 1.6 (como se muestra en la tabla '0'), y en caso especial donde el valor simétrico calcula- do excede de 500 MVA y el circuito es alimentado directamente de los generadores a través de reactores limitadores de corriente, el multi- plicador es de 1.5.

Los interruptores de 8 ciclos son generalmente usados en plantas industriales y de potencia. Normalmente la contribución de los moto- res síncronos a cambiado de subtransitoria a transitoria, aún antes de que los contactos actúen. Consecuentemente al calcular el valor - interruptivo, serán usadas las reactancias subtransitorias del genera- dor y las reactancias síncronas de los motores síncronos, y los moto- res de inducción serán despreciados en el momento en que los contactos del interruptor actúan (después de 8 ciclos), casi toda la componente de directa ha desaparecido (así que por ésta razón se usa un multipli- cador de 1.0).

En sistemas de gran potencia, donde el valor simétrico interrup- tivo es de 500 MVA ó mayor, y el circuito es alimentado principalmen-

te por generadores ó a través de limitadores de corriente, los multiplicadores especiales de la tabla '0' deberán ser usados.

FUSIBLES DE ALTO VOLTAJE son de los tipos; limitadores de corriente que abren antes del primer pico de corriente, y los no limitadores de corriente, que abren el circuito en uno u dos ciclos después del inicio de la falla. Los fusibles están clasificados de acuerdo a la máxima corriente RMS que circula en el primer ciclo después de que la falla ocurre. Los fusibles son clasificados también en términos de la corriente máxima RMS de corto circuito que circula en el primer ciclo después de que la falla ocurre, y ésta se determina usando las reactancias subtransitorias de todos los motores y generadores de sistema. En el caso especial donde el voltaje de operación es de 15 KV ó menos, los fusibles no son limitadores de corriente y la relación X/R del circuito alimentador es menor de 4, entonces el multiplicador que se deberá usar es de 1.2 . Así el valor interruptivo de los fusibles de potencia en ampers es calculado de la misma forma que el valor momentáneo de los circuitos interruptores.

CIRCUITOS INTERRUPTORES DE BAJO VOLTAJE (hasta 600 V), difieren - de los de alto voltaje porque son casi instantáneos en su operación. - los contactos de éstos interruptores actúan durante el primer ciclo de la corriente de corto circuito. A causa de su rápida operación en éstos dispositivos en el valor momentáneo y el interruptivo son considerados iguales.

La corriente de corto circuito que será determinada es la corriente en la primera mitad del ciclo. Las reactancias subtransitorias de los generadores, motores de inducción y motores síncronos deberán ser usadas y deberá tomarse en cuenta la componente de C.D. El multiplicador es mas bajo que con los dispositivos de alto voltaje debido a la baja relación X/R en bajo voltaje. La baja relación de X/R, ocasiona que la componente de C.D. disminuya mas rapidamente comparada con los circuitos de alto voltaje.

En el pasado los circuitos de bajo voltaje estuvieron basados en la corriente total asimétrica RMS del primer medio ciclo como un promedio de las tres fases. Las normas NEMA e IEEE, han reconocido un multiplicador de 1.25 basado en una relación de X/R. de 11.72. El multiplicador fue aplicado a la corriente simétrica de corto circuito del - primer medio ciclo.

Por varios años las normas NEMA han sido establecidas en base a - la corriente simétrica interruptiva. Los interruptores son probados - bajo máximas condiciones asimétricas con un circuito de prueba con una relación X/R no menor de .6., que corresponde a un multiplicador promedio de 1.17.

La tabla 'P' muestra las clasificaciones simétricas y asimétricas de interrupción de amperes, para medio ciclo correspondiente a los dispositivos de bajo voltaje. Si no hay datos disponibles para calcular

la relación X/R, y hay alguna indicación de que ésta relación es mayor que 6.6, es aconsejable usar el multiplicador 1.25 que corresponde a una relación de 11.72. Cuando se sabe que la relación X/R no excede de 6.6 use un multiplicador de 1.0.



## METODOS PARA CALCULAR CORTO CIRCUITO

**METODO POR UNIDAD:** Este método es bastante usado en los cálculos de corto circuito. Puesto que las corrientes de corto circuito dependen de los valores de las reactancias  $X$ , y las fuentes al punto de falla, el principal problema en el cálculo es encontrar la reactancia total. Para obtenerla debemos primero determinar la reactancia en cada fuente y elemento en el circuito y entonces combinarlas en serie y en paralelo hasta obtener una reactancia total.

Después de que se ha obtenido una reactancia total se calcula la corriente de falla aplicando la ley de OHM  $I=E/Z$  donde  $I$  es la corriente simétrica de corto circuito,  $E$  es el voltaje de el sistema y  $Z$  la impedancia total. El voltaje  $E$  es el voltaje de línea a neutro. (El voltaje de línea a línea dividido entre  $\sqrt{3}$ ).

La impedancia  $Z$  es expresada por la formula:  $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$ , donde la resistencia es comúnmente despreciada para los cálculos de falla arriba de 600 V, con el consiguiente error del cálculo. En sistemas arriba de 600 V, la resistencia del cable es relativamente pequeña, y frecuentemente despreciables. En sistemas abajo de 600 V la resistencia de alimentadores y buses deberá ser considerada si su valor es -- mas de un cuarto de la reactancia entre la fuente y el punto de falla.

Hay tres sistemas principales para expresar las reactancias de un corto circuito. Las reactancias pueden ser expresadas en ohms, en por ciento y por unidad, escogiendo una base en KVA. Las reactancias expresadas por unidad pueden ser facilmente combinadas usando sólo un nivel de voltaje (no es necesaria ninguna conversión al ir de un nivel a otro).

Un sistema en por unidad es una forma de expresar diferentes canti

dades para hacer mas fácil su comparación. El valor en por unidad es una relación:

$$\text{Por unidad} = \frac{\text{un número}}{\text{un número base escogido.}}$$

El número base es llamado Valor Unidad

El método por unidad aplicado a los cálculos de corto circuito - convierte todas las diferentes reactancias de un corto circuito a una relación con un valor base previamente escogido. La base es un valor KVA, frecuentemente el del transformador mas grande en el circuito; y es normalmente un número redondo como 1000 KVA.

Las formulas siguientes son necesarias para convertir valores de reactancia a valores en por unidad y para convertir los valores en por unidad a una reactancia total en por unidad a una reactancia total en por unidad. En las fórmulas el valor Ohms es el valor de línea a neutro; los KVA es la base trifásica en KVA; KV es el voltaje de línea a línea.

FORMULA 1. Es utilizada para convertir los valores de reactancias dadas en Ohms de los cables, buses, etc. a valores en por unidad:

$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{Ohms} \left( \frac{\text{KVA}}{\text{KV}^2} \right)}{1000 \times \text{KV}^2}$$

FORMULA 2. Es utilizada para convertir una reactancia en porcentaje, en reactancias en por unidad.

$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{reactancia en por ciento}}{100}$$

FORMULA 3. Es utilizada para obtener el valor en por ciento si esto se requiere:

$$\text{Reactancia en Por ciento} = \text{Reactancia en por unidad} \times (100)$$

FORMULA 4. Es utilizada para convertir reactancias en por unidad que tienen la base de su equipo a reactancias en por unidad en la base escogida de KVA. Las reactancias de motores, generadores y transformadores son comúnmente dadas en por ciento de sus propios KVA, que pueden ser convertidos a en por unidad usando la fórmula 2; entonces la fórmula 4 es:

$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{Reactancia en por unidad (en KVA de la máquina)} \text{ KVA}}{\text{KVA de la máquina}}$$

Por ejemplo asumamos un transformador de 1000 KVA con una reactancia de 5.75%. ¿Cuál es su reactancia en por unidad en una base de 10,000 KVA? Aplicando la fórmula 2, la reactancia en por unidad en su propio rango es  $5.75/100 = .0575$ ; aplicando la fórmula 4, la reactancia en por unidad en la base escogida es  $.0575 (10,000)/1000 = .575$ .

FORMULA 5. Es usada para convertir los KVA de corto circuito disponibles de la planta suministradora de energía a reactancia en por unidad.

$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{KVA}}{\text{KVA corto circuito disponibles.}}$$

En sistemas de bajo voltaje la compañía suministradora (CPE) podría expresar la corriente de corto circuito disponible en amperes. Se deberá determinar si este valor es simétrico ó asimétrico, y el valor

de X/R. Si la corriente de corto circuito está en amperes asimétricos tendremos que encontrar el multiplicador apropiado para el valor de X/R en las tablas.

FORMULA 6. Es para convertir amperes asimétricos en amperes simétricos.

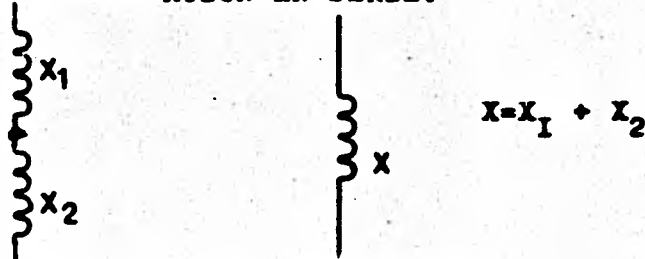
$$\text{Amperes simétricos} = \frac{\text{Amperes Asimétricos}}{\text{Multiplicador}}$$

FORMULA 7. Es para convertir amperes simétricos RMS a reactancia en por unidad.

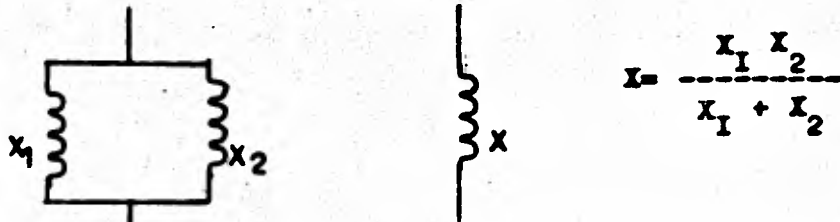
$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{KVA}}{\text{Amperes simétricos (KV)} (\sqrt{3})}$$

Después de que todas las reactancias han sido convertidas en valores en por unidad en la base escogida, deberán ser combinadas en series y paralelos para obtener la reactancia total equivalente en por unidad. Esto se logra utilizando las formulas de la 8 a la 12, las cuales se muestran a continuación:

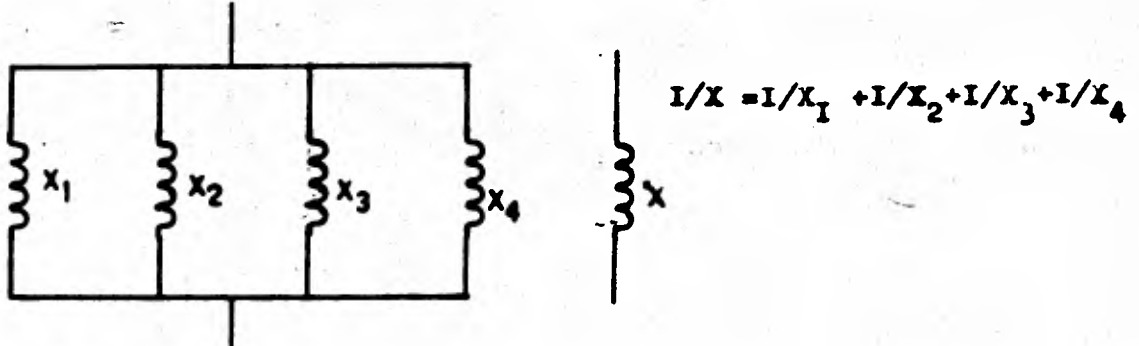
FORMULA 8.-COMBINACION EN SERIE.



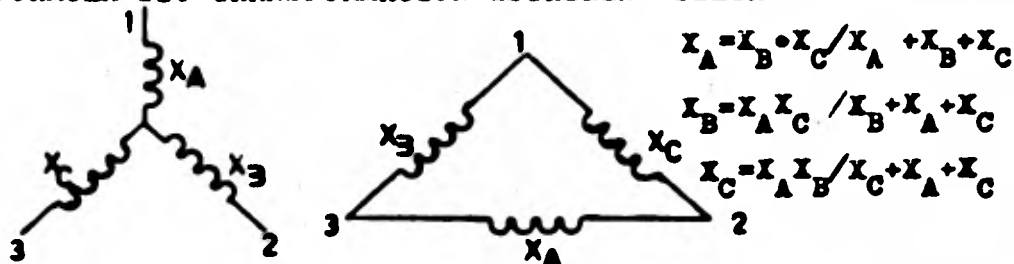
FORMULA 9.-COMBINACION EN PARALELO.



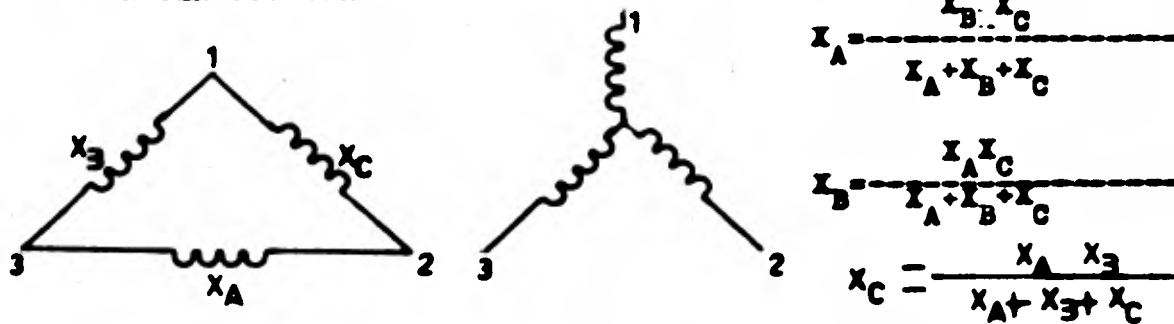
FORMULA 10.-COMBINACION EN VARIOS ELEMENTOS EN PARALELO.



FORMULA 11.-TRANSFORMACION ESTRELLA- DELTA



FORMULA 12.-TRANSFORMACION DELTA- ESTRELLA.



FORMULA 13 Es utilizada para obtener los KVA de corto circuito simétricos de la reactancia total en por unidad

$$\text{KVA s. c. Simétricos} = \frac{\text{KVA}}{\text{Reactancia total en por unidad}}$$

FORMULA 14 Es utilizada si los amperes simétricos R.M.S. son requeridos

$$A \text{ s.c. Simétricos} = \frac{\text{KVA}}{\text{Reactancia total en por unidad} \text{ (KV)} \sqrt{3}}$$

El valor interruptivo y el momentáneo son obtenidos aplicando los multiplicadores apropiados de la tabla '0' para los valores simétricos calculados.

## CALCULO DE LAS CORRIENTES INDUSTRIALES DE CORTO CIRCUITO

Ya que los principios básicos para el cálculo de fallas y dispositivos de protección fueron investigados, estamos listos para aplicar un método simplificado, para obtener las corrientes de corto circuito y así poder seleccionar los dispositivos de interrupción. Este método podría ser usado en lugar de métodos complicados que involucran decremento de curvas.

Hay siete etapas a seguir en un estudio de corto circuito:

- 1).- Preparar un diagrama unifilar del sistema
- 2).- Seleccionar la base adecuada en KVA.
- 3).- Obtener los valores de las reactancias de todo el equipo por medio de los datos que proporciona el fabricante.
- 4).- Convertir el diagrama de reactancias a un diagrama de valores en por unidad.
- 5).- Combinar las reactancias para obtener una sola reactancia - equivalente.
- 6).- Determinar la corriente simétrica de corto circuito y los KVA.
- 7).- Determinar la corriente asimétrica de corto circuito y los KVA.

ETAPA 1. Preparar el diagrama unifilar que muestre todas las fuentes de corriente de corto circuito y todas las impedancias de los elementos. figura 14.

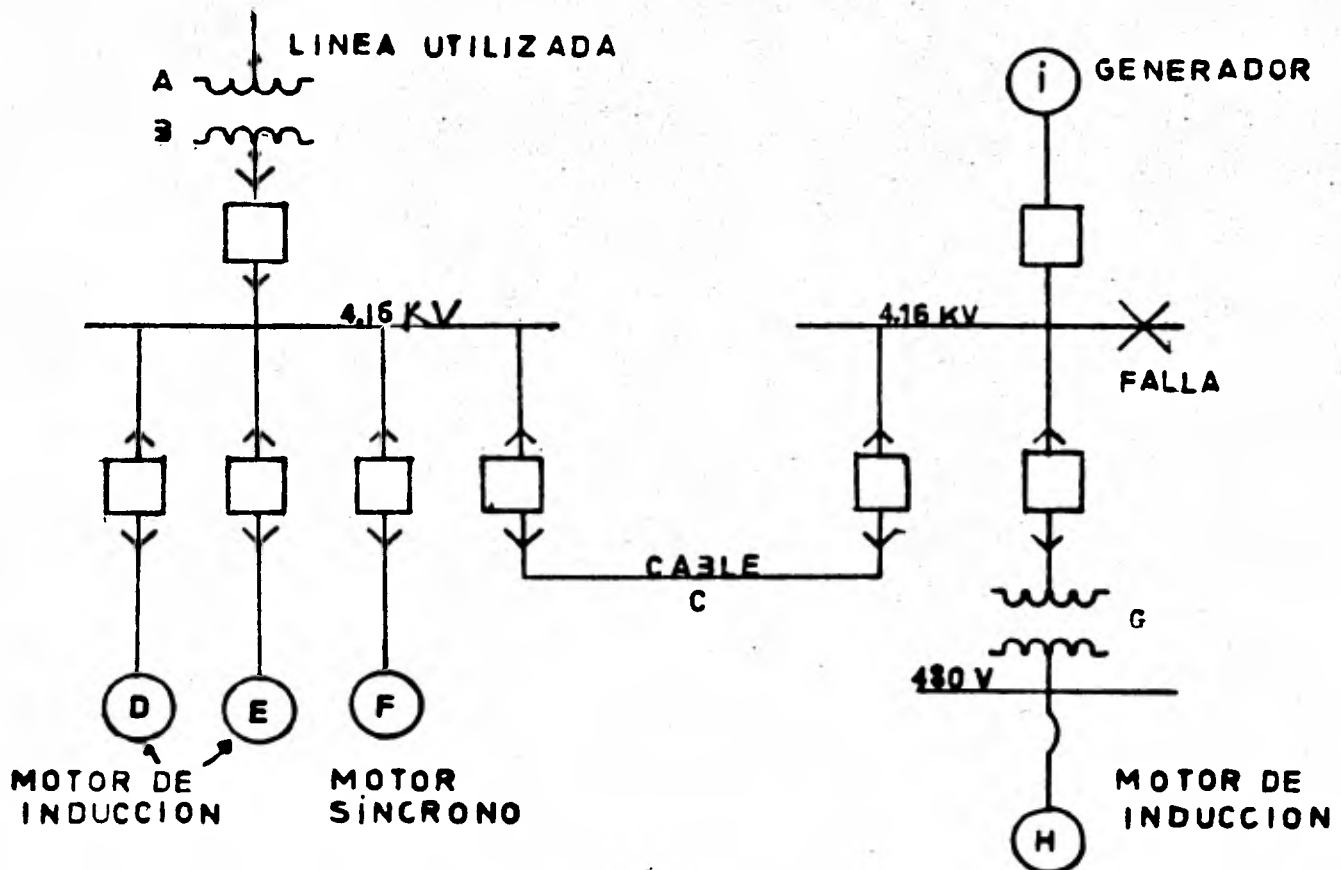


Figura 14



El diagrama unifilar deberá incluir fuentes suministradoras (CFE), generadoras, motores de inducción y síncronos y también las impedancias de elementos tales como transformadores, reactores, cables, buses, etc.

ETAPA 2. Selecciona la base adecuada en KVA que será común para todos los niveles de voltaje. Un número redondo, por ejemplo 1000 ó 10,000 será usado para mayor facilidad. Bases de voltaje separada, -- son seleccionadas para cada nivel de voltaje nominal. Normalmente el voltaje de los transformadores es seleccionado como base.

ETAPA 3. Obtener los valores de las reactancias, preferentemente de los datos de los fabricantes. Las tablas 1, 2, 3 y 4, dan datos típicos de reactancias. Con fuentes de corriente de corto circuito provenientes de máquinas rotatorias, las reactancias varían dentro de un corto período de tiempo después de que la falla ocurre, cambia de la reactancia subtransitoria  $X''$  a la transitoria  $X'$  y a la síncrona  $X_d$ . Los motores de inducción como ya se indicó, tienen únicamente reactancia. Subtransitoria  $X''_d$ ; éstos son considerados únicamente en cálculos del valor momentáneo y no son considerados en los cálculos del valor interruptivo por lo que se omiten del diagrama.

La selección de reactancias subtransitorias y transitorias para equipo rotatorio que contribuye al corto circuito ya ha sido tratada con anterioridad. La tabla '0' es una guía para la correcta selección de reactancias, los valores seleccionados de reactancias son introducidos en el diagrama de reactancias (etapa 4), después se pasa a convertir los valores a por unidad.

ETAPA 4. Hacer un diagrama de reactancias convirtiendo el diagrama unifilar a un diagrama en valores en por unidad con una base ya previamente escogida. Este diagrama deberá incluir todas las reactancias significativas y todas las resistencias. Las reactancias serán principalmente usadas, pero si fueran usadas impedancias en lugar de éstas, --

será necesario un cálculo vectorial para combinar las resistencias con las reactividades. Frecuentemente la resistencia de muchas partes del sistema es un pequeño porcentaje en comparación con la reactividad, y un error despreciable en el cálculo es cometido al ignorar la resistencia. Esta regla arriba de 600 V; pero en 600 V y abajo la resistencia de los alimentadores y ramas del circuito pueden llegar a ser de gran importancia.

Aparte de las impedancias ya mencionadas, todos los sistemas incluyen otro tipo de componentes o carga que deberán ser representadas en el diagrama, y que cuando se requiere que el cálculo de las corrientes de corto circuito sea exacto se deberán de tomar en consideración. Tales cargas son por ejemplo lámparas, soldadoras, hornos y capacitores. En los cálculos prácticos éstos son omitidos, tales impedancias son relativamente altos valores y su omisión no tiene un efecto muy significativo en los cálculos finales.

Un diagrama típico de reactividades es mostrado en la figura 15.

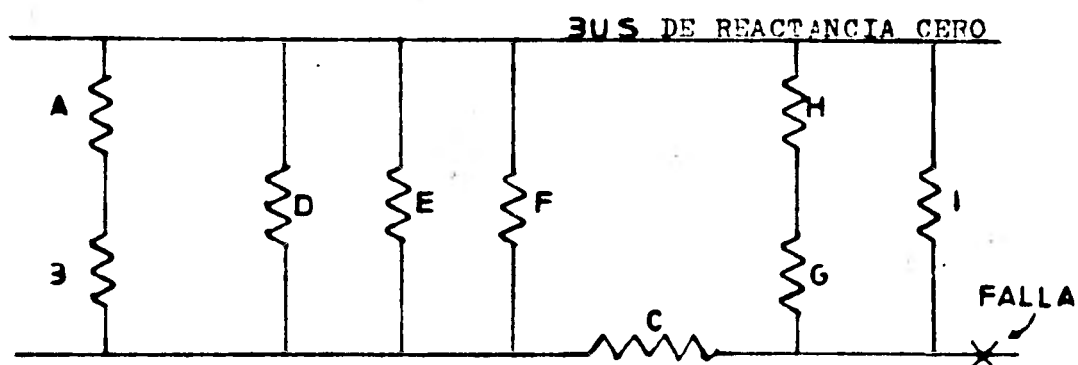


Figura 15

Este es obtenido tomando un bus de referencia "bus de reactancia cero", y conectando todas las fuentes de corrientes de corto circuito a éste bus.

ETAPA 5. Combinar las reactancias para obtener un equivalente - entre el bus de reactancia cero y punto de falla, usando las formulas de la 8 a la 12. La reactancia equivalente en por unidad es usada para determinar la corriente de corto circuito y los KVA en el punto de falla.

Todos los buses deberán ser numerados ó identificados de alguna forma. El punto escogido para efectuar el cálculo de corto circuito, deberá ser seleccionado cuidadosamente. En la mayoría de los estudios se efectúa el cálculo en todos los buses. Para obtener la corriente mas severa, se asume que ésto ocurre cuando la máxima concentración de maquinaria está en operación y todas las interconexiones están cerradas.

Las condiciones que se deberán de considerar para la máxima corriente son:

- 1).- ¿Qué máquinas y circuitos a ser considerados están actualmente en operación?.
- 2).- ¿Qué interruptores están abiertos ó cerrados?.
- 3).- ¿Qué futuras expansiones ó cambios en el sistema afectarán la planta?.

ETAPA 6. Determina el valor simétrico de la corriente de corto circuito y los KVA. La corriente simétrica de corto circuito es encontrada por medio de la fórmula 14:

$$A. \text{ s.c. sim} = \frac{\text{KVA BASE}}{\text{Reactancia total} \times (\text{KV} \sqrt{3})}$$

Para encontrar los KVA simétricos use la fórmula 13.

$$\text{KVA s.c. sim} = \frac{\text{KVA BASE}}{\text{Reactancia total por unidad.}}$$

ETAPA 7. Encuentre valor asimétrico de la corriente de corto circuito ó los KVA aplicando el multiplicador adecuado. La tabla '0' da los multiplicadores adecuados para varias aplicaciones. La figura 13 proporciona los multiplicadores para la corriente RMS asimétrica requerida para un corto tiempo después de la falla y para varias relaciones X/R.

Ejemplo Numérico. Será calculado el corto circuito para un sistema industrial de potencia para medio y bajo voltaje.

ETAPA 1. El diagrama unifilar de un sistema industrial de potencia es mostrado en la figura 16, donde una línea alimentadora y un generador local podrían alimentar la planta a un mismo tiempo. A 4.16 KV y 480 V, se tiene un transformador con una relación 4.16/480 y 1000 KVA y con una impedancia de 8%. Los motores de inducción alimentados a 480 V, son iguales con una reactancia subtransitoria del 25% ( $X''_d$ ), los rangos y reactancias de el resto del equipo son mostrados en el diagrama unifilar. figura 16.

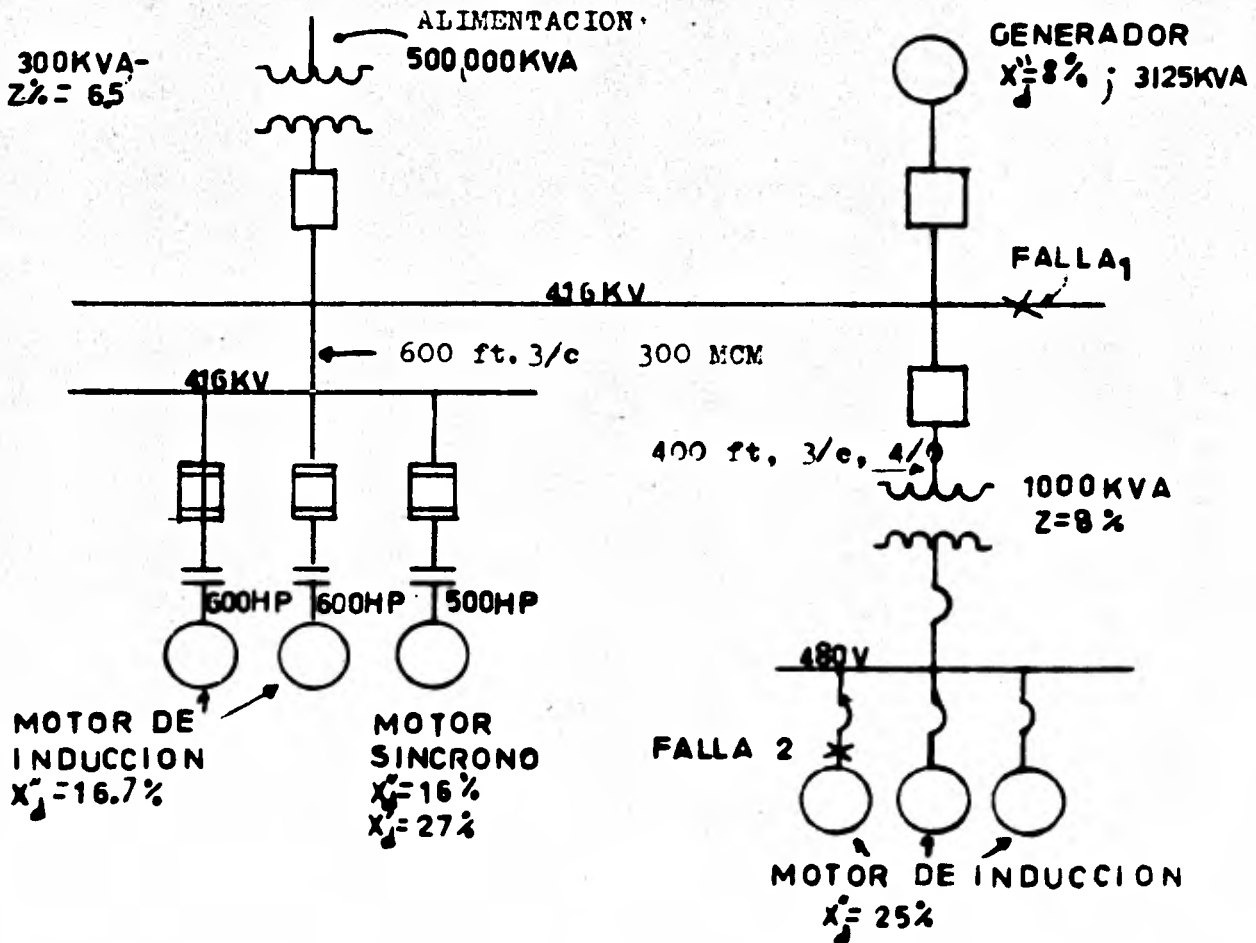


Figura 16

ETAPA 2. Seleccione los KVA base; en éste sistema 10,000 KVA, es un número conveniente. La base a voltaje medio es 4.16 KV y la base a bajo voltaje es 480 V.

ETAPA 3. Convierta las reactancias de el diagrama unifilar a valores en por unidad de acuerdo a la base KVA escogida.

FORMULA 1.

$$\text{Reactancia por unidad} = \frac{\text{ohms} \times \text{KVA}}{1000 \times \text{KV}^2}$$

FORMULA 2.

$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{Reactancia en por ciento}}{100}$$

FORMULA 4

$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{Reactancia en P.U. (en KVA propios)} \times \text{KVA}}{\text{KVA de la máquina}}$$

$$\text{Reactancia en por unidad} = \frac{\text{KVA}}{\text{KVA s.c. disponibles}}$$

(En estas fórmulas KVA sólo sin subíndice significa que es la base de KVA).

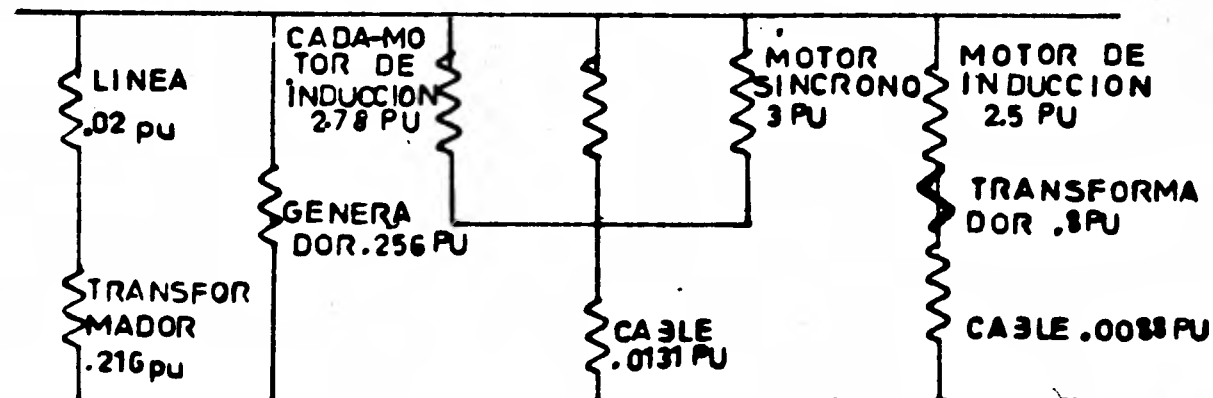
Los valores en por unidad se muestran en la tabla 'Q'

ETAPA 4. Convierta el diagrama unifilar a un diagrama de reactancias.

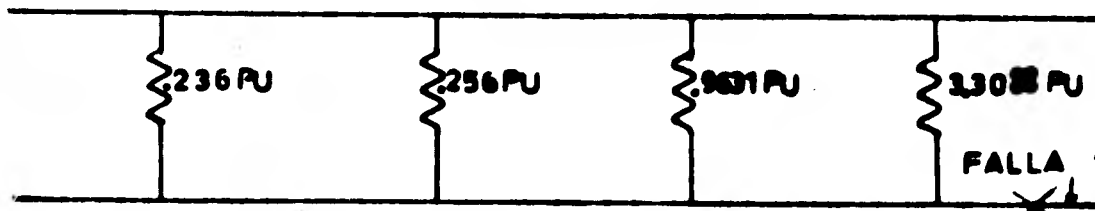
ETAPA 5,6 y7, Combine las reactancias para obtener una reactancia equivalente.

A. Calcule el valor momentáneo en la falla 1 en el bus de 4.16 KV, usando las reactancias subtransitorias para todo el equipo rotatorio. El diagrama resultante y la combinación total de los valores en por unidad es mostrado en la figura 17.

BUS DE REACTANCIA CERO



$$\frac{1}{2.78} + \frac{1}{2.78} + \frac{1}{3} = \frac{1}{x} = 1.05; \quad x = .95$$



$$\frac{1}{.236} \cdot \frac{1}{.256} \cdot \frac{1}{.9631} \cdot \frac{1}{2.3088} = \frac{1}{x} = 2.47 \quad x_T = .105 \text{ pu}$$

Elemento	Reactancia del elemento : en su propia base	Reactancia en por unidad en la base seleccionada
Línea alimentadora	500 MVA	$\frac{10,000}{500,000} = 0.02$ (5)
Transformador de alimentación	6.5% = 0.065 pu (2)	$0.065 \times \frac{10,000}{3000} = 0.216$ (4)
Generador 3125 KVA	8 % = 0.08 pu (2)	$0.08 \times \frac{10,000}{3125} = 0.356$ (4)
Transformador 1000 KVA	8 % = 0.08 pu (2)	$0.08 \times \frac{10,000}{1000} = 0.8$ (4)
Motor de inducción 4000 V	16.7 % = 0.167 (2)	$0.167 \times \frac{10,000}{500} = 2.78$ (4)
Motor sincrónico 4000 V	$X''_d = 16\% = 0.16$ pu (2)	$0.16 \times \frac{10,000}{500} \times \left(\frac{4000}{4150}\right)^2 = 3.$ (4)
	$X'_d = 27\% = 0.27$ pu (2)	$0.27 \times \frac{10,000}{500} \times \left(\frac{4000}{4150}\right)^2 = 4.8$ (4)
Motor de inducción 480 V	$X''_d = 25\% = 0.25$ pu (2)	$0.25 \times \frac{10,000}{1000} = 2.5$ (4)
Cables a 4 KV motores	$\frac{600\text{ft}}{1000} (.0377 \times) \text{ohms}$	$\frac{\text{ohms } 10,000}{1000 \times 4.16^2} = .0131 \times$ (1)
Cables a 1000KVA transformador	$\frac{400\text{ft}}{1000} (.0381 \times) \text{ohms}$	$\frac{\text{ohms } 10,000}{1000 \times 4.16^2} = .0088 \times$ (1)

Los números entre parentesis se refieren a las  
formulas dadas con anterioridad

TAHLA 'Q'



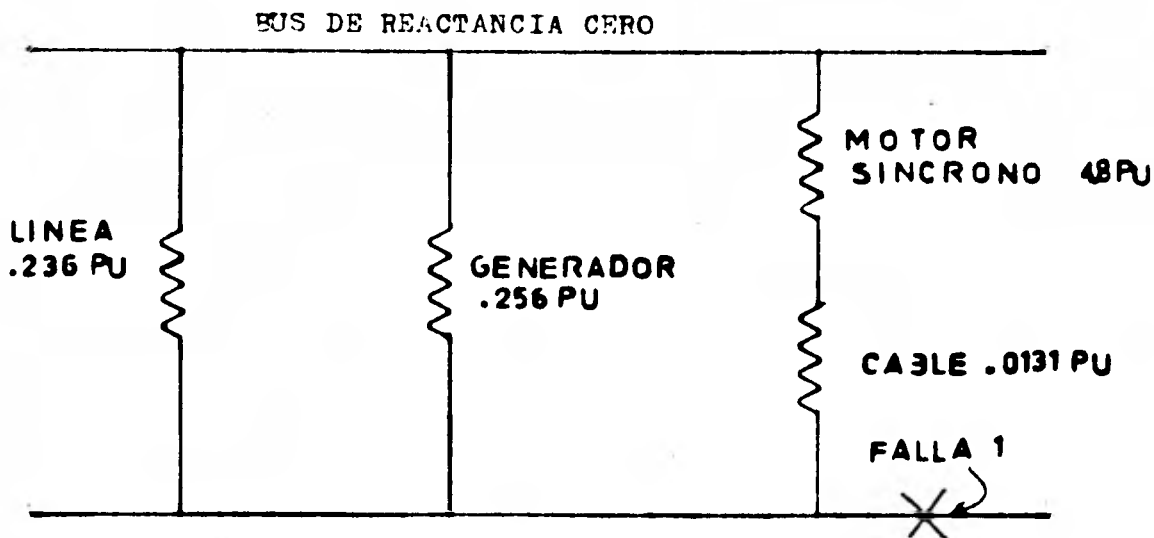
$$\text{Los ampers sim. s.c.} = \frac{10,000}{0.105 \times 4.16 \times \sqrt{3}} = 13,200 \text{ A} \quad (14)$$

$$\text{Los ampers asim. mom. s.c.} = 1.6 \times 13,200 = 21,100 \text{ A}$$

$$\text{KVA momentáneos simétricos} = \frac{10,000}{0.105} = 95,000 \text{ KVA}$$

$$\text{KVA momentáneos asimétricos} = 1.6 \times 95,000 = 152,000 \text{ KVA}$$

B. Calcule el valor interruptivo en el bus de 4.16 KV falla (1). Para el valor interruptivo la contribución de los motores de inducción es despreciada y no se incluye en el diagrama de reactancias. El motor síncrono usa el valor transitorio ( $X'd$ ), con ésto se elimina el bus de 480 V. El generador y el sistema alimentador (CFE) permanecen iguales. El diagrama de reactancias para el valor interruptivo y la combinación de los valores en por unidad es mostrado en la fig. 18



$$\frac{1}{.236} \cdot \frac{1}{.256} \cdot \frac{1}{4.8131} = \frac{1}{X_T} = 2.38 \quad X_T = .12 \text{ PU}$$

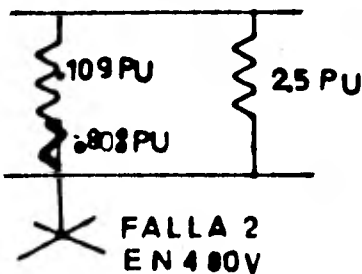
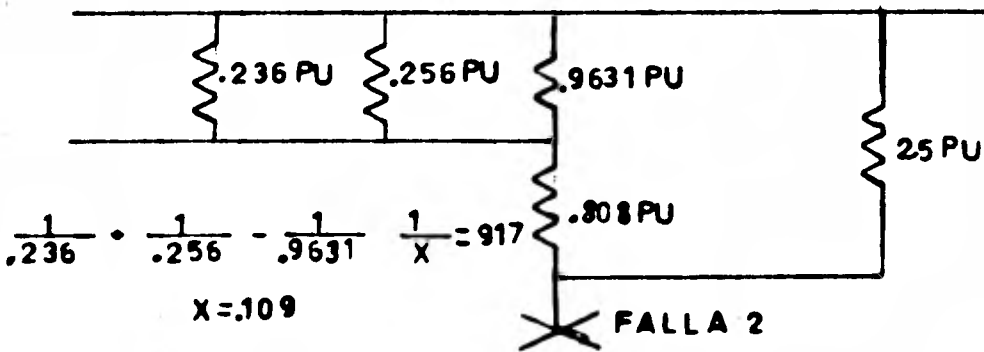
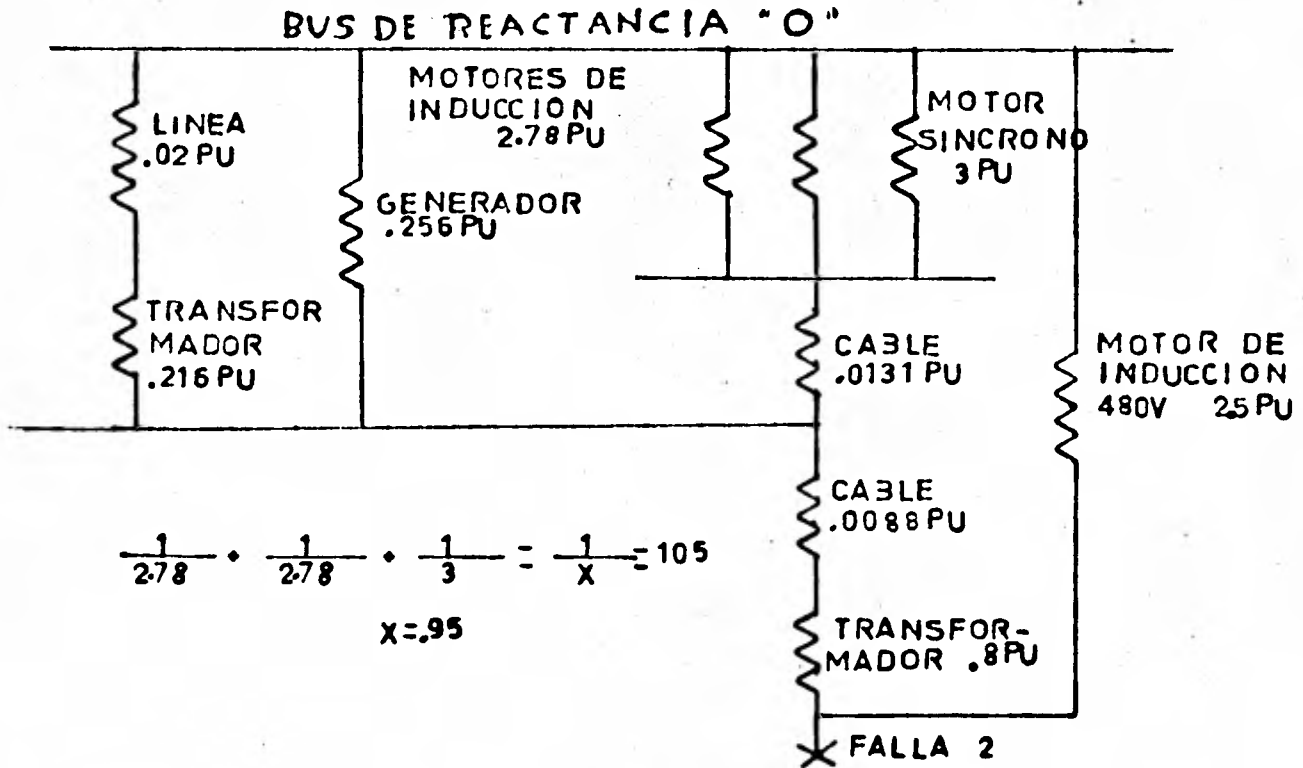
Figura 18

$$\text{Ampers interruptivos s.c.} = \frac{10,000}{0.12 \times 4.16 \times \sqrt{3}} = 11,600 \text{ A (14).}$$

$$\text{KVA interruptivos s.c.} = \frac{10,000}{0.12} = 83,500 \text{ KVA (13)}$$

C. Calcule la corriente de corto circuito en el bus de 480 V (falla 2). El diseño para los circuitos de bajo voltaje difiere de los de medio y alto voltaje. Ya que en bajo voltaje son casi instantáneos sus contactos y algunas veces actúan durante el primer ciclo de corriente. Por lo tanto, la corriente de corto circuito determinada deberá ser para el primer medio ciclo, y esto se hace de la misma manera que en el caso del cálculo del valor momentáneo para mediano y alto voltaje; esto es, usando las reactancias subtransitorias de generadores y motores síncronos y de inducción. Con esto el diagrama de reactancia total equivalente es mostrado en la figura 19.

FIG 19



$$\frac{1}{.9178} \cdot \frac{1}{25} = \frac{1}{X_T} = 1.409$$

$$X_T = 0.71$$

$$\text{Ampers simétricos de s.c.} = \frac{10,000}{0.71 \times 0.48 \times \sqrt{3}} = 17,000 \text{ A (14)}$$

$$\text{Ampers asimétricos de s.c.} = 1.25 \times 17,000 = 21,200 \text{ A}$$

La selección de los interruptores puede ahora ser hecha en base a las tablas N, O y P. Los interruptores son seleccionados en base a su corriente nominal, voltaje y capacidad para soportar los valores momentáneos e interruptivo calculados.

La etapa siguiente es propiamente coordinar los interruptores para que éstos operen secuencialmente en una forma predeterminada. Los interruptores mas cercanos al punto de falla deberán actuar primero para aislar la sección dañada del resto del sistema.

## COMO USAR COMPONENTES SIMETRICAS

Las fallas trifásicas no aterrizadas normalmente impone los esfuerzos mas severos a los dispositivos de protección, y el método para el cálculo de las corrientes de corto circuito mostrado con anterioridad es útil para éste tipo de fallas. No obstante en un sistema trifásico de potencia también puede estar sujeto a fallas de fase a tierra; fallas de fase a fase no aterrizadas; y fallas de fase a fase aterrizadas.

Una falla de fase a tierra algunas veces produce una corriente mucho mayor que una falla trifásica si existen en el circuito valores -- particulares de reactancias.

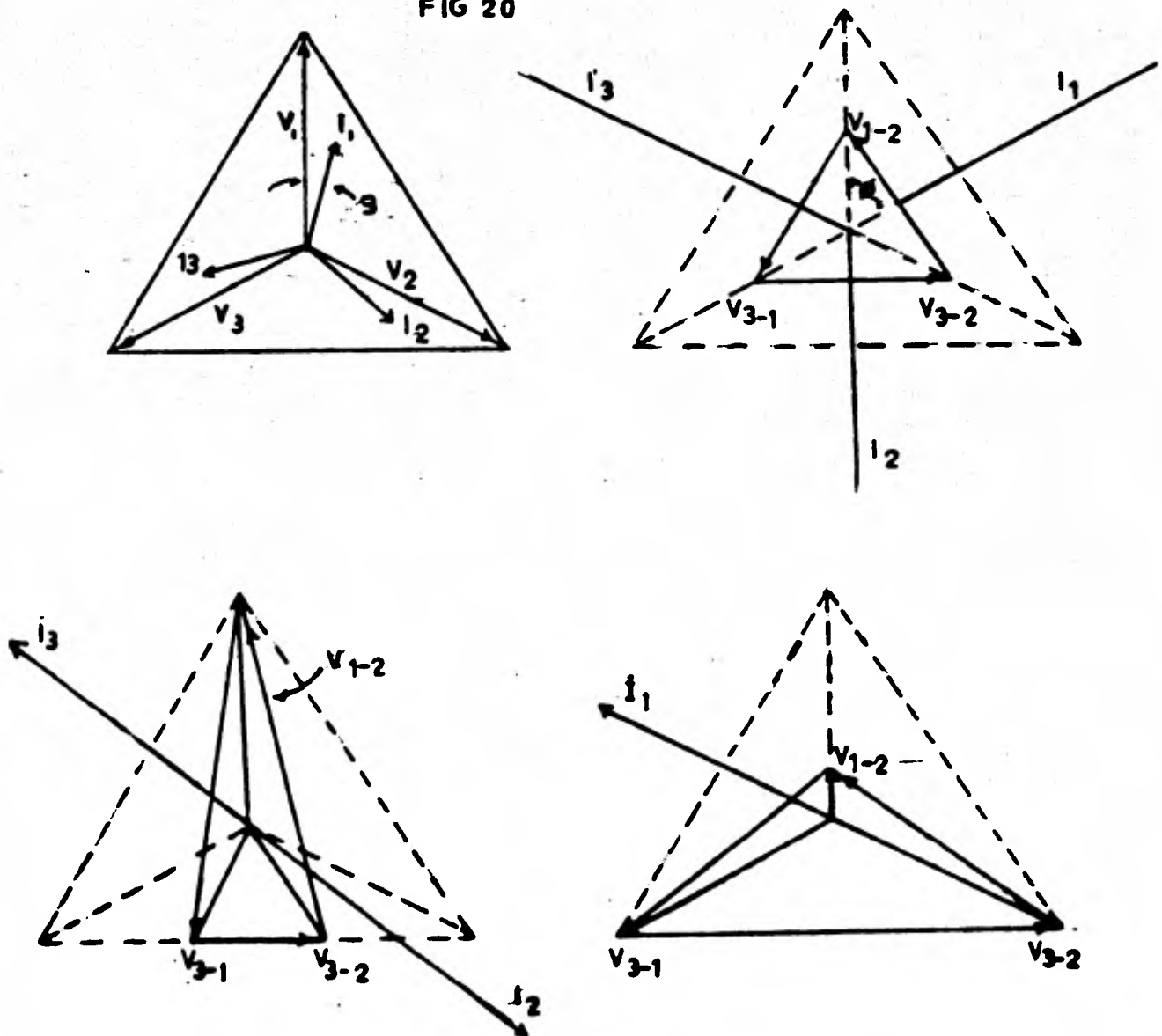
Un corto circuito trifásico en un sistema trifásico balanceado produce una falla trifásica balanceada. Falla de línea a tierra ó de línea a línea producen fallas trifásicas desbalanceadas.

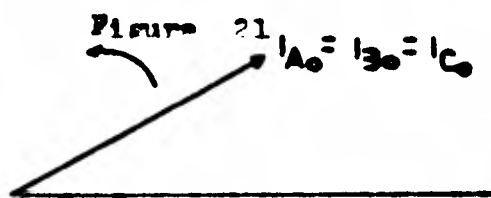
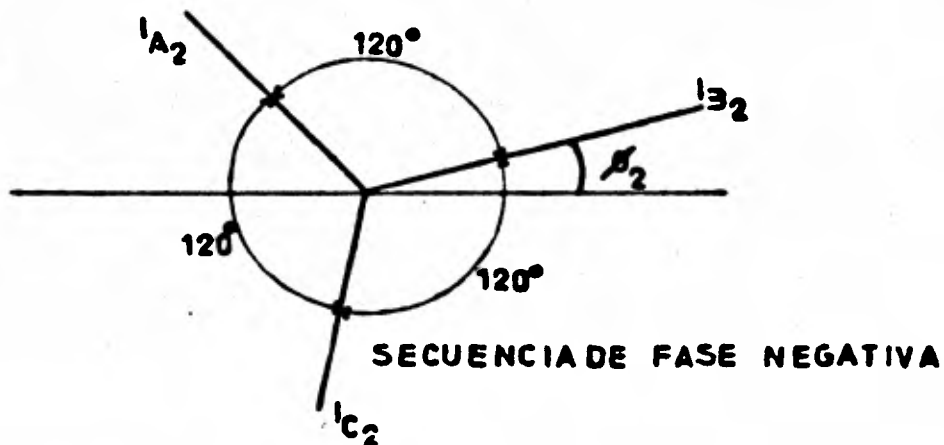
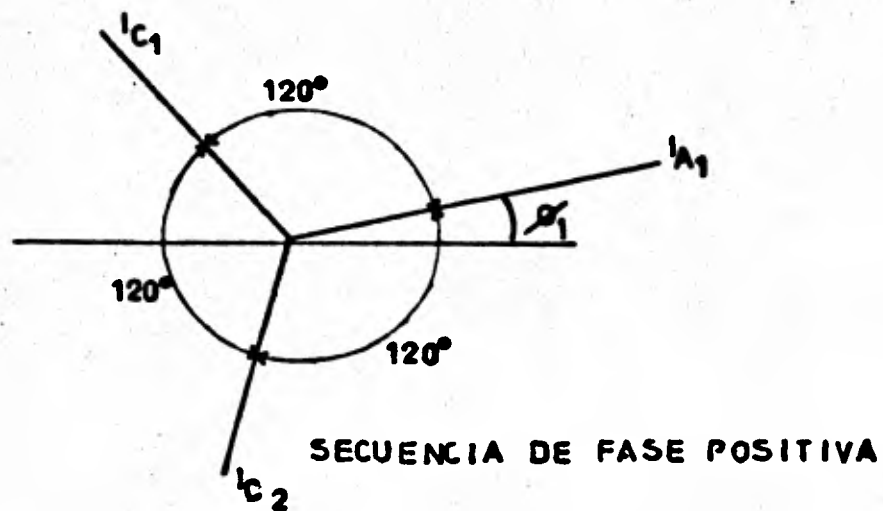
El método de las componentes simétricas consiste en reducir un sistema desbalanceado de fasores (que representan los volts ó amperes) a un sistema balanceado de fasores designados como componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

Un sistema balanceado trifásico es aquel en el cual las tres cantidades correspondientes a las tres fases son iguales en magnitud y están desfasadas 120 grados. Si una falla trifásica ocurre en éste sistema, su efecto en las corrientes y voltajes puede ser visualizado en la figura 20 izquierda. Cuando ocurre una falla de fase a fase ó de fase a tierra, ésta produce un sistema trifásico desbalanceado, figura 20 derecha.

El método de las componentes simétricas permite que las cantidades trifásicas desbalanceadas sean expresadas como suma de tres sistemas trifásicos, dos de las cuales son balanceados ó simétricos. (figura 21). Las tres cantidades del sistema de secuencia cero son iguales y están en fase.

FIG 20





SECUENCIA DE FASE CERO

Figura 21

En un sistema de potencia balanceado (simétrico) los voltajes generados por la maquinaria rotatoria son iguales en magnitud y están defasados 120 grados. En un sistema de éstas características la impedancia en todas las fases se asume que es igual al punto de falla. Las corrientes de secuencia positiva únicamente producen caídas de voltaje de secuencia positiva, corrientes de secuencia negativa producen caídas de voltaje de secuencia negativa y las corrientes de secuencia cero producen caídas de voltaje de secuencia cero. No existe interacción entre las secuencias de las fases.

**REACTANCIAS DE SECUENCIA:** Se designa como  $X_1$  a las reactancias de secuencia positiva, como  $X_2$  a las reactancias de secuencia negativa. Estos valores representan las reactancias del sistema para el flujo de corrientes de secuencia positiva, negativa y cero.

Las máquinas síncronas tienen sus valores típicos de reactancias ( $X_d$  síncrona,  $X'_d$  transitoria y  $X''_d$  subtransitoria), las cuales son reactancias de secuencia positiva. Las reactancias de secuencia negativa ( $X_2$ ) es generalmente igual a la reactancia subtransitoria, excepto para generadores hidráulicos. La reactancia de secuencia cero ( $X_0$ ) generalmente menor que cualquiera de las otras, tal como se muestra en la tabla 'R'

Los transformadores tienen reactancias idénticas en secuencia positiva y negativa. La reactancia de secuencia cero tiene también el mismo valor excepto para los transformadores trifásicos de tres embobinados.



nados cuando las conexiones son hechas de tal forma que bloqueen la corriente de secuencia cero. Las corrientes de secuencia cero no circularán si el neutro de el transformador no está aterrizado. Cuando la corriente de secuencia cero no puede circular, entoncén  $X_0$  se considera infinita.

En muchos casos donde las corrientes de secuencia cero pueden circular  $X_0$  es la misma que la reactancia de secuencia positiva.

En transformadores conectados delta-estrella la corriente de secuencia cero puede circular a través de la conexión a neutro de la estrella si ésta conexión está aterrizada. No hay corrientes de secuencia cero que circulen en el lado de conexión delta. En un transformador conectado estrella estrella las corrientes de secuencia cero circulan en ambos lados el primario y el secundario, si sus neutros están aterrizados. Para líneas de transmisión y cables las reactancias de secuencia positiva y negativa se consideran iguales. En las líneas de transmisión, la reactancia de secuencia cero es diferente porque la corriente de secuencia cero regresa por tierra. La reactancia de secuencia cero es generalmente mas grande que la reactancia de secuencia positiva y negativa.

La reactancia de secuencia cero de un cable trifásico es mayor que las reactancias de secuencia positiva y negativa porque el espacio entre los conductores de salida y de regreso es mayor en el circuito de secuencia cero que en el de secuencia positiva ó negativa. El regreso de la corriente a través de un conductor forrado o un conductor

de tierra podría transportar todas las corrientes de secuencia cero. - Este introduciría una caída de voltaje tres veces mas grande que la -- producida si el cable de retorno transporta la corriente de únicamente un conductor de salida. La impedancia de retorno es un circuito de se cuencia cero es dado como una impedancia tres veces mas grande que su impedancia actual.

Para estimaciones imparciales, las relaciones de  $X_0 / X_1$  dan valores mínimos. Por ejemplo, un conductor triple con un forro no metálico ó conduit y un regreso por tierra, el promedio de conductividad - tendrá una relación  $X_0 / X_1$  y- el rango de 3 a 5.

Las figuras 22 y 23 muestran los diagramas de secuencia para los cálculos, puesto que las tres componentes de secuencia son independientes entre si en el punto de falla, y son necesarias tres redes ó dia-- gramas (de fase a neutro del sistema de potencia).

La red de secuencia positiva muestra los generadores de voltaje, las reactancias de los generadores, transformadores y líneas.

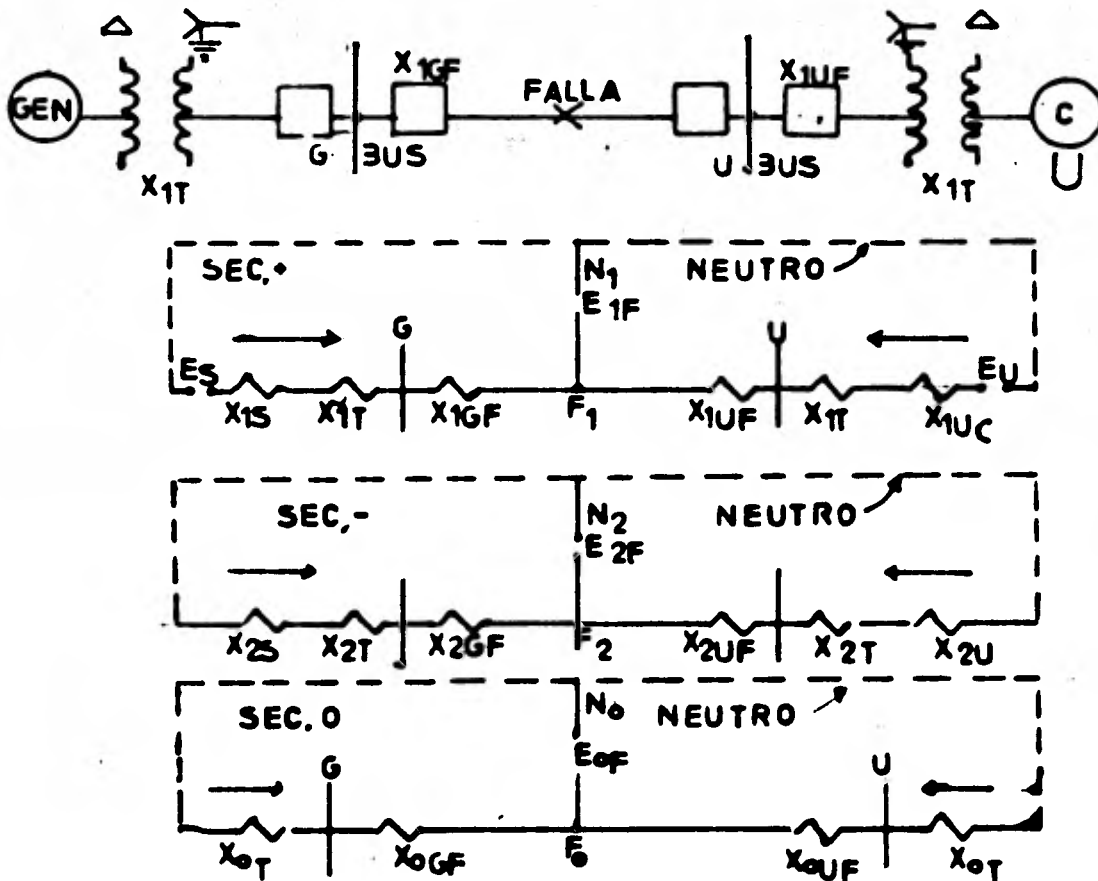
La red de secuencia negativa es generalmente una réplica de la - red de secuencia positiva excepto que: ( 1 ) No se muestran generadores de voltaje, puesto que los generadores síncronos no operan con fase inversa. ( 2 ) La reactancias de secuencia negativa de la maquina síncrona podría ocasionalmente diferir de la reactancia de secuencia positiva.

La red de secuencia cero es generalmente similar a la red de se-- cuencia negativa excepto que: ( 1 ) Se dan consideraciones especiales para las conexiones de los transformadores. Los transformadores Estrella-Estrella con neutro aterrizado permiten que la corriente de secuencia cero circule en ambos lados. La conexión Estrella-Delta permite -

que la corriente circule en el lado de la estrella si éste se encuentra aterrizado, pero bloquea la circulación de la corriente de secuencia cero y ésta no puede circular de un lado a otro. [ 2 ] Las resistencias y reactores conectados entre la máquina ó los neutros de los transformadores y tierra son introducidos en un diagrama con un valor tres veces mayor que el nominal.

Las corrientes de secuencia negativa y cero no pueden circular en sistemas balanceados porque las máquinas síncronas ó las de inducción generan únicamente voltajes de secuencia positiva. Cuando ocurre una falla; ésta actúa como un convertidor que cambia los voltajes de secuencia positiva a voltajes de secuencia negativa y cero. Las componentes de secuencia negativa y cero son determinadas colocando en las redes una fuente de voltaje en el punto de falla.

El cálculo de fallas desbalanceadas es ilustrado en la figura 22.



La red de secuencia positiva incluye los voltajes generados  $E_s$  y  $E_v$ , así como también el voltaje de secuencia positiva  $E_{1F}$  en el punto de falla. Las redes de secuencia cero y negativa incluyen los voltajes  $E_{2F}$  y  $E_{0F}$  producidos por conversión en la falla. Después de reducir todas las reactancias a una equivalente para las redes de secuencia positiva ( $X_1$ ); negativa ( $X_2$ ) y cero ( $X_0$ ), se aplican las siguientes formulas:

$$\text{Falla de una línea a tierra} = \frac{3 E_{\phi} - N}{X_1 + X_2 + X_3}$$

$$\text{Falla de línea a línea} = \frac{E_{\phi} - N}{X_1 + \frac{\sqrt{3}}{X_2}}$$

$$\text{Falla de doble línea a tierra} = \frac{3 E_{\phi} - N X_2}{X_1 X_2 + X_0 (X_1 + X_2)}$$

$$\text{Falla trifásica} = E_{\phi} / N / X_1$$

Si las redes están en OHMS en un voltaje base, las corrientes serán obtenidas directamente en la base del voltaje por medio de esas fórmulas. Generalmente las reactancias de las máquinas y transformadores son expresadas en por ciento o por unidad en base a sus propios KVA.

Un ejemplo numérico para el cálculo del corto circuito por el método de las componentes simétricas es mostrado en la figura 23

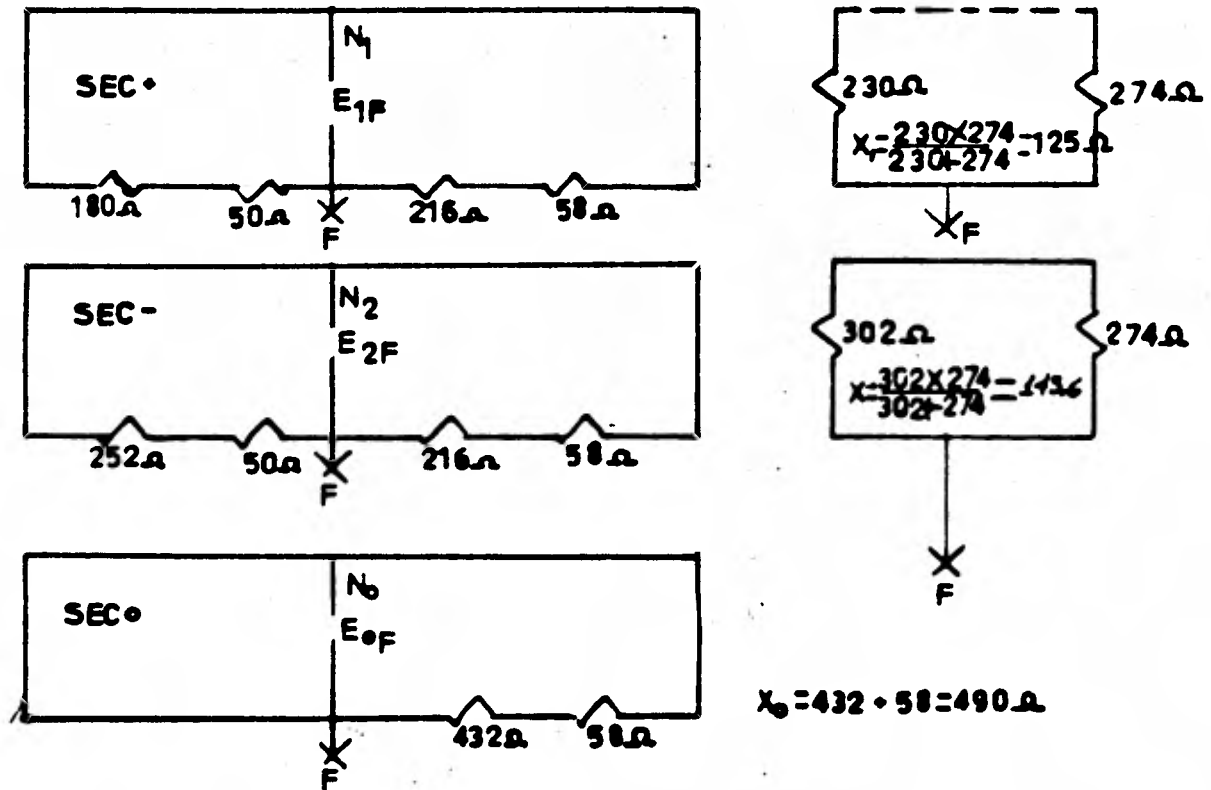
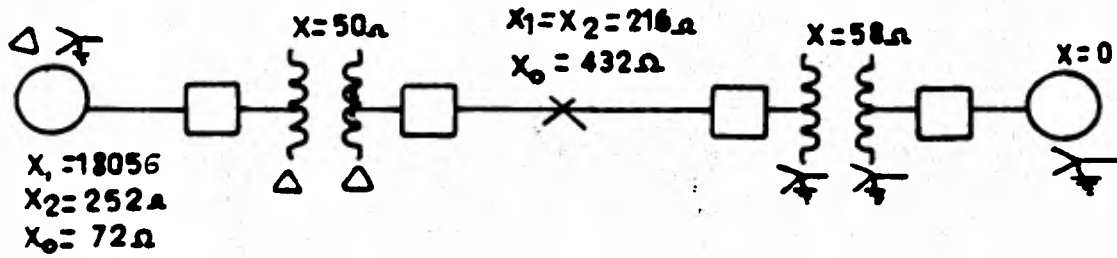


Figure 23

El sistema consiste de una estación generadora, una línea de transmisión de 120 KV y un sistema de generación que se considera infinito. Las reactancias mostradas están en OHMS y la base de referencia será 120 KV de fase a fase, Todas las resistencias son despreciables.

El voltaje de la línea de transmisión a neutro es:

$$V_{\phi-N} = 120 / \sqrt{3} = 69.3 \text{ KV}$$

Falla de línea a tierra =

$$\frac{3E_{\phi-N}}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{3 \cdot 69,300}{125 + 144 + 490} = \frac{207,900}{759} = 274 \text{ A} \quad (1)$$

Falla de línea a línea =

$$\frac{E_{\phi-N} \sqrt{3}}{X_1 + X_2} = \frac{120,000}{269} = 446 \text{ A} \quad (2)$$

Falla de dos líneas a tierra =

$$\frac{3E_{\phi-N} X_2}{X_1 X_2 + X_0 (X_2 + X_2)} = \frac{29,937,600}{149,810} = 200 \text{ A} \quad (3)$$

Falla trifásica =

$$\frac{E_{\phi-N}}{X_1} = \frac{69,300}{125} = 554 \text{ A} \quad (4)$$

## METODO PORCENTUAL

El método porcentual es un método aproximado pero muy práctico para el cálculo de corto circuito, ya que la exactitud obtenida es suficiente para el fin obtenido puesto que los equipos se fabrican con capacidades interruptivas determinadas (estandar).

METODO EN %.- Generalmente éste método es normal, para el cálculo de corto circuito en sistemas eléctricos ya que generalmente las impedancias de las máquinas están expresadas en %.

El porcentaje de reactancia se define como el porcentaje de voltaje nominal que es consumido por la caída de voltaje en la reactancia - cuando circula la corriente nominal.

Pudiéndose expresar como sigue:

$$\%X = (I \times X \times 100) / E_n$$

Donde:

$\%X$  = Porcentaje de reactancia

$X$  = Impedancia ó reactancia al neutro en ohms

$I$  = Corriente de línea en ampers

$E_n$ : Tensión de línea a neutro en Volts

Si  $E_n$  es en  $kV$

Por lo cual

$$\%X = (I \times X) \text{ KV} \times 10$$

Si se tiéne que la corriente en circuito trifásico en función de la potencia es igual a:

$$I = (\text{KVA base}) / \sqrt{3} \text{ KV}$$

Substituyendo ésto en la ecuación anterior se tiéne:

$$\%X = \text{KVA base} / 10 (\text{KV})^2$$

Si se tiénen reactancias en  $\%$  se debe elegir una potencia base en KVA. En general en sistemas que sólo tiénen una fuente lo común es emplear la potencia de régimen en KVA del transformador de alimentación.

Las reactancias de generadores transformadores y motores, generalmente están expresadas en  $\%$  de su propio régimen en KVA y por tanto sus reactancias deben convertirse a la base común elegida para el estudio por medio de la siguiente fórmula:

$$\%X \text{ base 2} = (\text{KVA base 2} / \text{KVA base 1}) \% \text{KVA base 1}$$

Generalmente la compañía suministradora de energía da como dato a una potencia de corto circuito en KVA ó MVA que el sistema pueda entregar en un lugar. En otros casos sólo se conoce la capacidad de interrupción del interruptor de la línea de entrada, en los cuales para convertir los datos disponibles en por ciento de reactancia sobre la base en KVA empleada en el diagrama de impedancias se puede utilizar las fórmulas siguientes:

Si se da la potencia de corto circuito:



$$\%X = \frac{\text{KVA base del diagrama de reactancia} \times 100}{\text{KVA simétricas de corto circuito del sistema.}}$$

Si sólo se conoce la capacidad interruptiva en KVA del interruptor de entrada:

$$\%X = \frac{\text{KVA base del diagrama de reactancias} \times 100}{\text{KVA capacidad interruptiva del int. de entrada.}}$$

En caso que se conozca la corriente de corto circuito (valor simétrico eficaz)

$$\%X = \frac{\text{KVA base del diagrama de reactancia} \times 100}{I \text{ corto circuito simétrico} \sqrt{3} \text{ KV nominal.}}$$

La corriente de corto circuito será:

$$I \text{ corto circuito simétrico} = (\text{KVA base} \times 100) / (\%X \sqrt{3} \text{ KV})$$

La corriente asimétrica será:

$$I_{cc} \text{ asimétrica} = I_{ccim} \times \text{factor de multiplicación.}$$

La potencia de corto circuito en KVA se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Potencia de corto circuito en KVA} = (100 \times \text{KVA base}) / \%X$$

## METODO DE LOS MVA'S

Este método presenta varias ventajas sobre los demás métodos cuando se buscan soluciones prácticas ya que los resultados obtenidos son de bastante precisión y también presenta la ventaja de ahorro, de tiempo, de cálculo en comparación con los métodos mencionados.

### CALCULO DE CORTO CIRCUITO POR EL METODO DE LOS MVA'S

- 1.- Prepare un diagrama unifilar mostrando todas las fuentes de corriente de corto circuito así como todas las impedancias de los elementos. El diagrama unifilar debe incluir todos los datos útiles de generadores, motores síncronos y de inducción, también como su impedancia significativa de los elementos tales como transformadores, reactores, cables, buses, etc.
- 2.- Se establece la contribución de cada elemento (en MVA'S) al corto circuito y para esto contamos con las siguientes expresiones:

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

$$KVAcc = 100 (KV)^2 (Y)$$

$$MVAcc = (KV)^2 (Y)$$

$$MVAcc = MVA/Z_{p.u}$$

$$I_{cc} = (MVAcc \times 1000) / (\sqrt{3} \times KV)$$

Donde:

Y = admitancia de un circuito

$Z_{ohms}$  = impedancia en ohms  
 $Z_{p,u}$  = impedancia en p,u  
 $KV$  = tensión entre fases  
 $KVA_{sc}$  = KVA de corto circuito  
 $MVA_{cc}$  = MVA de corto circuito

- 3.- Una vez determinada la contribución el corto circuito en MVA'S de cada elemento, se procede a establecer el diagrama de bloques en base al diagrama unifilar, en éste diagrama es conveniente seleccionar los puntos de falla a considerar.
- 4.- Se establece una combinación de bloques hasta encontrar un equivalente en el punto considerado.

Los bloques se combinan de acuerdo a las siguientes consideraciones.

Cuando se trata de bloques en paralelo, el bloque equivalente es la suma aritmética en ellos es decir:

$$MVA (1,2,3) = MVA + MVA2 + MVA3$$

Cuando se tienen bloques en serie, el equivalente será el inverso de la suma de los inversos de cada uno de ellos, ó sea:

$$MVA (1,2,3) = 1 / (1/MVA1 + 1/MVA2 + 1/MVA3)$$

## PORQUE EL METODO DE LOS M.V.A.

Hay muchas causas por las cuales el método de los M.V.A. es recomendado para cálculos de corto circuito en sistemas de potencia:

A.-No requiere una base comun de M.V.A. como la que se requiere en método de por unidad.

B.-No es necesario convertir impedancias de un voltaje a otro lo cual se requiere en el método ohmico.

C.-Las formulas de conversion usadas en los métodos ohmico y por unidad son complejas y no son faciles de memorizar.

D.-Ambos métodos, el ohmico y el de por unidad frecuentemente se cometen errores al pasar de un voltaje a otro, ó al convertir impedancias a la base comun.

E.-El método de los M.V.A. utiliza numeros grandes que denotan las cantidades en M.V.A.

Con una poca de practica uno puede estimar el resultado con el solo hecho de mirar la combinacion.

Por ejemplo: Con 10 y 10 en serie da 5; y 100 en serie da 9.1 tambien 10 y 10000 en serie da 10. Un numero pequeño combinado con uno grande 100 veces mayor, no afecta al numero pequeño.

## EJEMPLO:

El diagrama unifilar (figura 4A) es convertido a un diagrama de - MVA'S (figura 4B).

## Combinación de MVA'S

- 1.- MVA'S en serie son combinados como resistencias en paralelo.
- 2.- MVA'S en paralelo son sumados aritméticamente.

Haciendo referencia a la figura 4B

$$MVA_{12} = \frac{1500}{1500} \times \frac{1230}{1230} = 675 \text{ (este es el nuevo MVA)}.$$

$$MVA_{13} = \frac{675}{675} \times \frac{198}{198} = 153$$

$$MVA_{1+4} = MVA_1 + MVA_4 = 153 + 75 = 228$$

$$I_{12} = \frac{228}{\sqrt{3}} \times \frac{1000}{12} = 11,000 \text{ AMP.}$$

$$MVA_{12} = \text{Suma de } MVA_1 \text{ y } MVA_2 \text{ en serie}$$

$$MVA_{1+4} = \text{Suma de } MVA_1 \text{ y } MVA_4 \text{ en paralelo}$$

$$I_{12} = \text{Corriente de coto circuito en el Bus de 12 KV.}$$

FALLA DE FASE A TIERRA.

Resolver la falla de fase a tierra es tan simple como - resolver una trifasica. Puesto que la falla de secuencia + positiva es igual a la negativa, por lo tanto para la figura 4.

$$M.V.A_{xI} = M.V.A_{x2} = 228$$

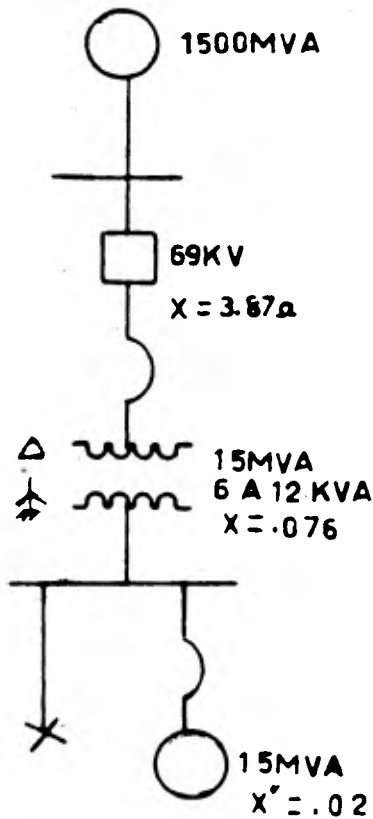


FIG 4A

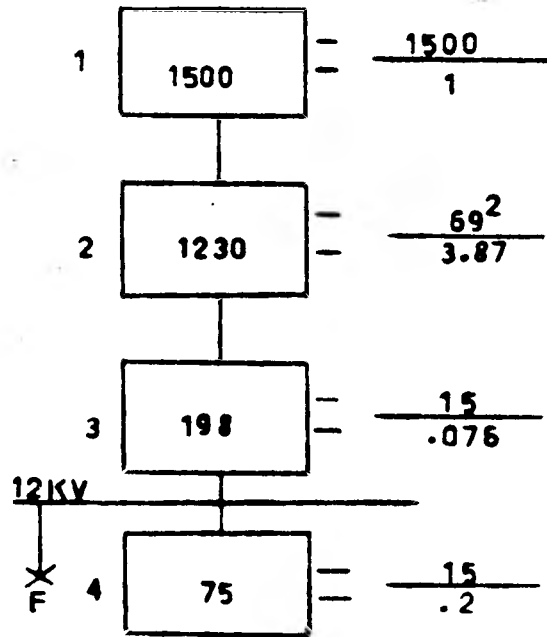


FIG 4B

La falla de secuencia cero en MVA, no obstante puede ser calculada, y su valor en MVA está combinado con los valores en MVA positivo y negativo.

En la figura 4A; Durante la falla en el bus de 12 KV, sólo el transformador y el motor contribuyen a los MVA'S de secuencia cero. La delta en el primario del transformador bloquea cualquier corriente de secuencia cero que circule del sistema y a través del transformador, por lo tanto, la figura 5 muestra el circuito de secuencia cero:

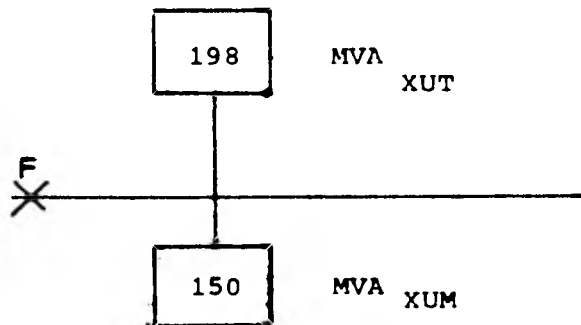


Figura 5

$$MVA_{XOT} = MVA_{X1} = MVA_{X2} = 198$$

(la reactancia cero del transformador es igual a sus reactancias positiva y negativa).

$$MVA_{XOM} = \frac{15}{0.1} = 150 \text{ MVA}$$

(puesto que la reactancia de secuencia cero del motor es alrededor de 1/2 de la reactancia de secuencia positiva).

La falla de secuencia cero entonces es igual a la suma, que es:

$$MVA_{XOT} + MVA_{XOM} = 198 + 150 = 348$$

La falla de fase a tierra es obtenida con el uso de la figura 6

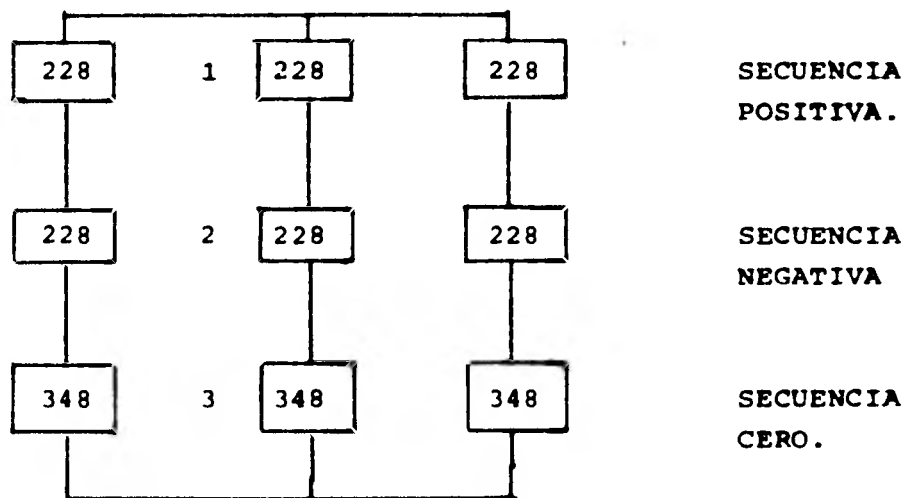


Figura 6

CIRCUITO PARA LA FALLA DE FASE A TIERRA (MVA)



## CIRCUITO PARA LA FALLA DE FASE A TIERRA(M.V.A)

Puesto que son tres ramas en paralelo, lo mas simple es tomar una rama fuera del circuito y encontrar su valor en M.V.A., entonces multiplicar ese valor por 3 y éste es el valor final.

$$MVA_{I_2} = 228/2 = 114$$

$$MVA_{I_3} = \frac{114 \times 348}{114 + 348} = 86$$

$$MVA_{FO} = 3 \times 86 = 258$$

$$I_{FO} = \frac{258 \times 1000}{\sqrt{3} \times 12} = 12400 \text{ AMP}$$

## CALCULO DEL CORTO CIRCUITO POR COMPUTADORA DIGITAL

## IMPACTO DE LAS COMPUTADORAS:

El desarrollo de la tecnología de las computadoras ha proporcionado las siguientes ventajas en los sistemas eléctricos de potencia.:

- 1).- Más medio eficientes y económicos para ejecutar los cálculos rutinarios ingenieriles que se requieren en la planificación, diseño y operación de un sistema de potencia.
- 2).- Una mejor utilización del talento ingenieril, auxiliando al ingeniero en los tediosos cálculos manuales y permitiéndole así pasar más tiempo en trabajos de tipo técnico.
- 3).- La capacidad para desarrollar más estudios de tipo ingenieril aplicando procedimientos con los cuales se obtenga un número de soluciones alternas para un problema particular y así tener una amplia base para las decisiones ingenieriles.
- 4).- La capacidad para desarrollar estudios que hasta ahora no fueron posibles a causa del volumen de cálculos involucrados.

Dos factores que más han contribuido a la realización de estos beneficios, son la declinación en el costo de equipo computacional y el desarrollo de eficientes técnicas computacionales.

### ALGORITMO PARA LA FORMACION DE MATRICES DE RED

Para el estudio de fallas en sistemas de potencia se pueden hacer usando métodos iterativos ó métodos directos. en la actualidad se emplean generalmente métodos directos ya que estos no presentan problemas de convergencia y son por lo general mas rápidos. En el analisis de fallas se consideran generalmente dos métodos .

1.-El método de la matriz de impedancia de malla  $Z$  malla

2.-El método de la matriz de impedancia nodal  $Z$  bus.

1.-El método de la matriz de impedancia de malla requiere del uso de las matrices de incidencia para la formacion de  $Z$  malla por multiplicacion de dichas matrices y la matriz primitiva.

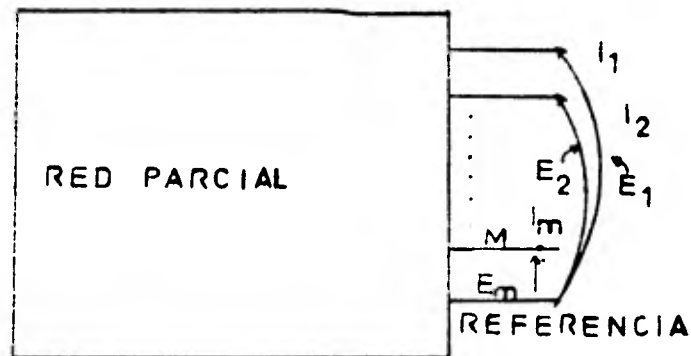
2.-Para el método de la matriz de impedancia nodal  $Z$  bus, ésta matriz de impedancia se puede obtener por inversion de la matriz  $Y$  bus que se obtiene del producto de las matrices de incidencia y la matriz primitiva lo cual no resulta eficiente, por lo que se emplea en la practica el algoritmo presentado por STAGG-ELABIAD. En este algoritmo para la formación de  $Z$  bus se agrega elemento por elemento, iniciandose el proceso con una matriz de orden  $I$  y modificandolas según se van agregandolos distintos elementos.

### ALGORITMO PARA FORMAR $Z$ BUS.

Este método consiste basicamente en formar-

la matriz por pasos, donde  $Z_{bus}$  del paso  $K$  se obtiene del paso  $K-1$  incluyendo un nuevo elemento de la red. El proceso empieza normalmente con un sólo elemento y continúa hasta que todos los elementos son considerados.

Supongase que  $Z_{bus}$  se conoce para alguna sub-red de una red que se analiza, es decir que se conoce la relación entre  $V_{bus}$  e  $I_{bus}$  para La Red Parcial.



$$E_{bus} = Z_{bus} I_{bus}$$

Suponiendo que  $Z_{bus}$  es simétrica y de orden  $m \times m$ , entonces  $V_{bus}$  e  $I_{bus}$  son de orden  $m \times 1$  (vectores de voltaje y corriente).

Un elemento puede ser agregado en dos formas: como rama ó como -- unión.

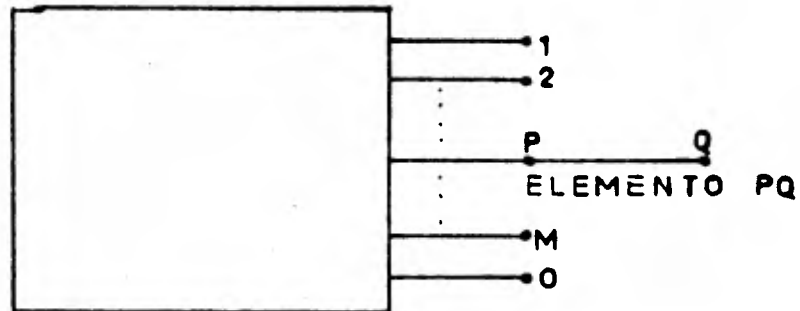
Al agregarse un elemento como rama se forma un nuevo bus  $q$  y entonces la matriz de impedancias es de orden  $m+1$ , las nuevas matrices de voltaje y corriente son de orden  $(m + 1) \times 1$ , sólo varían los ele--

mentos del nuevo renglón y columna, el resto no:

Si el elemento que se agrega es una unión, entonces no se agrega ningún bus nuevo y la nueva matriz de impedancias no cambia de orden.

En éste caso todos los términos de la matriz deben modificarse al considerarse la nueva unión.

Adición de una rama:



Consideramos las ecuaciones de la red parcial con una red añadida

$$E_{\text{bus}} = Z_{\text{bus}} I_{\text{bus}} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & & & & \\ Z_{21} & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ Z_{m1} & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{12} & \dots & Z_{1m} \\ Z_{22} & \dots & Z_{2m} \\ & & \\ & & \\ Z_{m2} & \dots & Z_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_m \end{bmatrix}$$

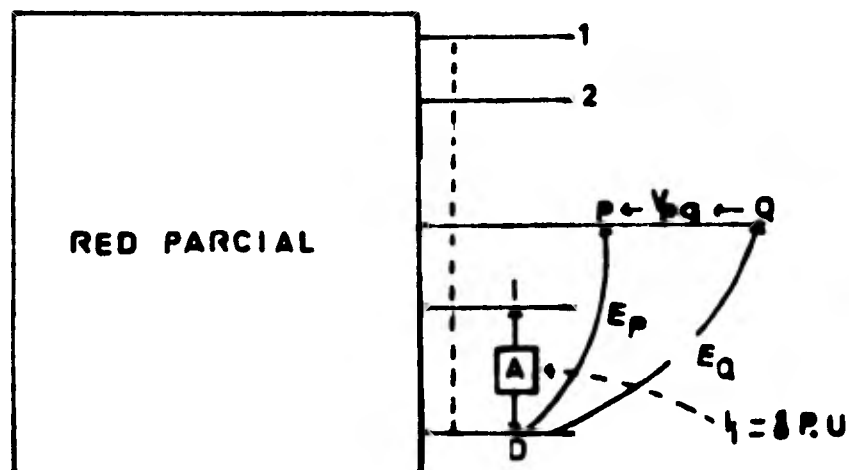
Al agregar un elemento como rama:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1m} & z_{1q} \\ z_{21} & z_{22} & & z_{2m} & z_{2q} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & & z_{mm} & z_{mq} \\ z_{q1} & z_{q2} & & z_{qm} & z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \\ I_q \end{bmatrix} \quad (23)$$

La matriz de coeficientes de éste sistema de ecuaciones es simétrica, es decir:  $z_{ij} = z_{ji}$ , y en particular  $z_{qi} = z_{iq}$ .

El elemento  $z_{qi}$  se calcula suponiendo una corriente entrando al bus  $i$ , y determinando el voltaje resultante del bus  $q$  con respecto al nodo de referencia, con el resto de corriente igual a cero.

Algoritmo para la formación de matrices de red:



Para todas las corrientes igual a cero excepto la corriente  $I_1$  de ecuación 2, 3 se obtiene que:

$$E_k = Z_{k1} I_1 + Z_{k2} I_2 + Z_{ki} I_i + Z_{km} I_m$$

como,  $I_1 = I_2 = I_m = 0$

$$E_k = Z_{ki} I_i \quad k = 1, 2, \dots, m, q.$$

es decir:

$$E_1 = Z_{1i} I_i$$

$$E_2 = Z_{2i} I_i$$

$$E_k = Z_{ki} I_i$$

$$E_m = Z_{mi} I_i$$

$$E_q = Z_{qi} I_i$$

De la figura se puede observar que:

$$V_{pq} = E_p - E_q \quad (2.4)$$

En la figura las corrientes en los elementos de la red son expresados de las admitancias primitivas y los voltajes a través de los elementos por:

$$\begin{matrix} I_{pq} \\ I_{xy} \end{matrix} = \begin{matrix} Y_{pq,pq} & Y_{pq,xy} \\ Y_{xy,pq} & Y_{xy,xy} \end{matrix} \begin{matrix} V_{pq} \\ V_{xy} \end{matrix} \quad (2.5)$$

En la ecuación 2,5 pq se refiere al elemento añadido y xy se refiere a los otros elementos, donde:

$I_{pq}$  y  $V_{pq}$  = corrientes y voltajes a través de elemento añadido

$\bar{I}_{xy}$  y  $\bar{V}_{xy}$  = vectores de corriente y voltaje de los elementos de la red parcial.

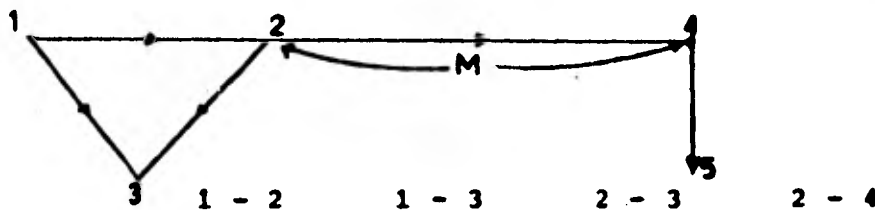
$Y_{pq,pq}$  = admitancia propia del elemento añadido

$\bar{Y}_{pq,xy}$  = vector de admitancia mutua entre el elemento añadido pq y el elemento xy de la red parcial.

$\bar{Y}_{xy,pq}$  =  $Y_{pq,xy}$  transpuesta del vector  $Y_{pq,xy}$ .

$[Y_{xy,xy}]$  = admitancia primitiva propia de la red parcial.

Para aclarar lo anterior usaremos la siguiente figura:



Sean

$p = 4$

$q = 5$

		1 - 2	1 - 3	2 - 3	2 - 4
1 - 2	$Y_{12,12}$				
1 - 3		$Y_{13,13}$			
2 - 3			$Y_{23,23}$		
2 - 4				$Y_{24,24}$	

$Y_{xy,xy}$



La matriz de admitancias primitiva para la gráfica anterior.

	1 - 2	1 - 3	2 - 3	2 - 4	4 - 5
1 - 2	$Y_{12,12}$				
1 - 3		$Y_{13,13}$			
2 - 3			$Y_{23,23}$		M
2 - 4				$Y_{24,24}$	
4 - 5			M		$Y_{45,45}$

$$PQ = 4 - 5 \quad XY = 2-3$$

$Y_{pq,xy}$	=				M		
-------------	---	--	--	--	---	--	--

Algoritmo para la formación de matrices de red

M

$$Y_{xy,pq} =$$

$$Y_{pq,pq} =$$

$Y_{45,45}$
-------------

La corriente en la rama añadida es cero:

$$I_{pq} = 0 \quad (2.6)$$

Pero como  $V_{pq}$  no es cero, entonces la rama agregada está mutuamente acoplada a uno ó mas elementos de la red parcial, además:

$$V_{xy} = \overline{E}_x - \overline{E}_y \quad (2.7)$$

donde:  $E_x$  y  $E_y$  son los voltajes de bus en la red parcial de 2.5

$$I_{pq} = Y_{pq,pq} V_{pq} + Y_{pq,xy} V_{xy} = 0$$

pero de 2.6  $I_{pq} = 0$

$$Y_{pq,pq} V_{pq} + Y_{pq,xy} V_{xy} = 0.$$

$$V_{pq} = \frac{Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}} \quad (2.8)$$

Substituyendo 2.8 en 2.4

$$\frac{Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}} = E_p - E_p$$

$$E_q = E_p + \frac{Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}}$$

ó también

$$E_q = E_p + \frac{Y_{pq,xy} (E_x - E_y)}{Y_{pq,pq}}$$

pero también:

$$E_q = z_{qi} I_i$$

$$E_p = z_{pi} I_i$$

$$E_x = z_{xi} I_i$$

$$E_y = z_{yi} I_i$$

para  $I_i = 1.0$  p.u

$$E_q = z_{qi}, E_p = z_{pi}$$

$$E_x = z_{xi}, E_y = z_{yi}$$

Entonces:

$$Y = \frac{y_{pq,xy} (z_{xi} - z_{yi})}{y_{pq,pq}} \quad (2.9)$$

$$z_{qi} = z_{pi} + Y$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$i \neq 1$$

El elemento  $Z_{qq}$  puede calcularse inyectando una corriente al bus  $q$  y calculando el voltaje, haciendo todas las otras corrientes igual a cero.

Si tiene que:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= Z_{1q} I_q \\
 E_2 &= Z_{2q} I_q & E_m &= Z_{mq} I_q \\
 E_p &= Z_{pq} I_q & E_q &= Z_{qq} I_q
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Haciendo  $I_q = 1.0$  p.u se obtiene  $Z_{qq}$  por cálculo de  $E_{qi}$ ; los voltajes en los buses  $p$  y  $q$  están relacionados por:

$V_{pq} = E_p - E_q$ , la corriente a través del elemento añadido es:

$$I_{pq} = -I_q = -I$$

de la relación matricial 2.5

$$I_{pq} = Y_{pq,pq} V_{pq} + Y_{pq,xy} V_{xy} = -I_q = -I$$

de donde:

$$V_{pq} = \frac{-I + Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}}$$

$$V_{pq} = \frac{1 + Y_{pq,xy} (E_x - E_y)}{Y_{pq,pq}}$$

$$E_p - E_q = \frac{1 + Y_{pq,xy} (E_x - E_y)}{Y_{pq,pq}}$$

$$E_q = E_p + \frac{1 + Y_{pq,xy} (E_x - E_y)}{Y_{pq,pq}}$$

de las ecuaciones 2.10 haciendo  $I_q = 1.0$

$$Z_{pq} = Z_{pq} + \frac{1 + Y_{pq,xy} (\bar{Z}_{xq} - \bar{Z}_{yq})}{Y_{pq,pq}} \quad (2.11)$$

Si no hay acoplamiento mutuo entre la rama a\u00f1adida y otros elementos de la red parcial, entonces los elementos  $Y_{pp,xy}$  son cero y:

De 2.11

$$Z_{pq,pq} = \frac{1}{Y_{pq,pq}} = Z_{pq,pq}$$


---


$$Z_{pq} = Z_{pq} + Z_{pq,pq}$$

De 2.9

$$Z_{qi} = Z_{pi} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.12)$$

$$i \neq q$$

Además si no hay acoplamiento mutuo y p es el nodo de referencia.

$$E_{pi} = Z_{pi} I_i; \quad E_{pi} = \frac{E_{pi}}{I_i} = \frac{0}{I_i} = 0$$

$$Z_{qi} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$i \neq q$$

también

$$Z_{pi} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$i \neq q$$

Además:

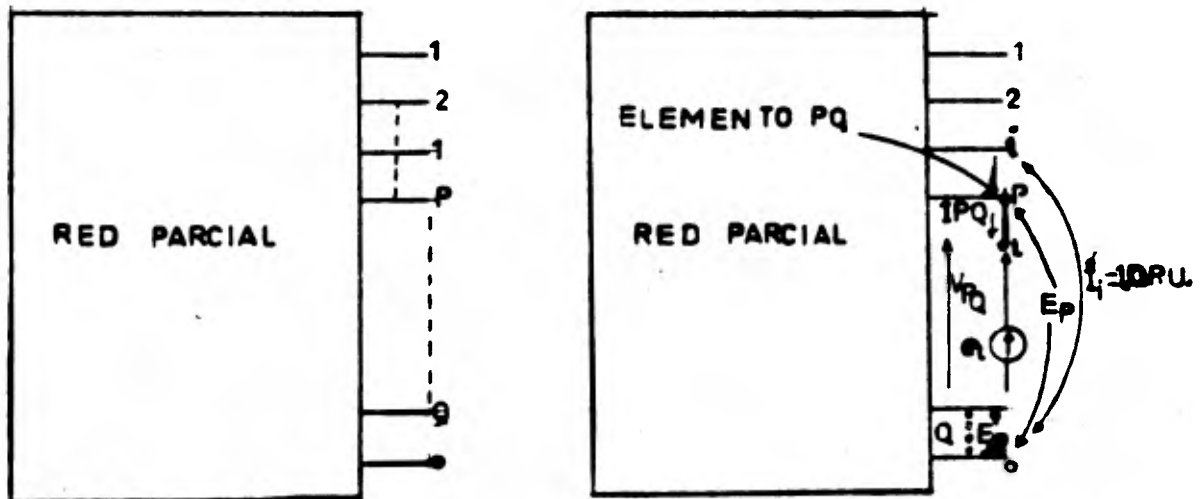
$$Z_{pq} = 0$$

y entonces:

$$Z_{qq} = \frac{1}{Y_{pq,pq}} \quad (2.13)$$

### Adición de una unión;

Si el elemento añadido  $pq$  es una unión, el procedimiento para recalcular los elementos de la matriz de impedancia de bus es conectar en serie con el elemento añadido, una fuente de voltaje  $e_L$  esto crea un nodo ficticio  $L$  el cual será eliminado después. La fuente de voltaje  $e_L$  es seleccionada de modo que la corriente a través de la unión añadida sea cero.



La ecuación de comportamiento para la red parcial con el elemento añadido  $p = L$  y la fuente de voltaje  $e_l$ , en serie es:

$E_1$	1	$Z_{11}$	$Z_{12} \dots$	$Z_{1p} \dots$	$Z_{1m}$	$Z_{1L}$	$I_1$
$E_2$	2	$Z_{21}$	$Z_{22} \dots$	$Z_{2p} \dots$	$Z_{2m}$	$Z_{2L}$	$I_2$
.	.	.	.	.	.	.	.
$E_p$	$=p$	$Z_{p1}$	$Z_{p2} \dots$	$Z_{pp} \dots$	$Z_{pm}$	$Z_{pL}$	$I_p$
.	.	.	.	.	.	.	.
$E_m$	m	$Z_{m1}$	$Z_{m2} \dots$	$Z_{mp} \dots$	$Z_{mm}$	$Z_{mL}$	$I_m$
$E_L$	L	$Z_{L1}$	$Z_{L2} \dots$	$Z_{Lp}$	$Z_{Lm}$	$Z_{LL}$	$I_L$

de la figura:

$$e_l = E_L - E_q$$



El elemento  $Z_{Li}$  puede calcularse inyectando una corriente en el bus y calculando el voltaje en el bus "L" con respecto al bus q.

Entonces todas las corrientes de los bus son cero

$$E_k = Z_{ki} I_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.14)$$

$$e_1 = Z_{1k} I_i$$

Haciendo  $I_i = I_{p.u.} Z_{Li}$  se puede obtener directamente por cálculo de "e<sub>L</sub>"

$$\text{La fuente de voltaje en serie es; } e_L + V_{pL} = E_p - E_q$$

$$e_1 = E_p - E_q - V_{pL}$$

y la corriente a través de la unión añadida es:

$$i_{pq} = 0$$

El elemento pL puede ser tratado con una rama, entonces se tiene una relación matricial semejante al caso de agregar una rama dada por:

$$\begin{bmatrix} i_{pL} \\ i_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pL,pL} \\ Y_{xy,pL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{pL} \\ V_{xy} \end{bmatrix}$$

De la relación anterior desarrollando para  $ip_L$  se tiene:

$$ip_L = Y_{pL,pL} V_{pL} + Y_{pL,xy} V_{xy}$$

pero:  $ip_L = ip_q = 0$  debido a que " $e_L$ " se ajustó a esa forma, entonces:

$$Y_{pL,pL} V_{pL} + Y_{pL,xy} V_{xy} = 0$$

$$V_{pL} = \frac{Y_{pL,xy} V_{xy}}{Y_{pL,pL}}$$

como:

$$Y_{pL,xy} = Y_{pq,xy} \quad y \quad Y_{pL,pL} = Y_{pq,pq}$$

entonces:

$$V_{pL} = \frac{Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}} \tag{2.16}$$

en la ecuación:

$$e_L = E_p - E_p - V_{pL}$$

la ecuación 2.16:

$$e_L = z_{Li} I_i$$

$$E_q = z_{pi} I_i$$

$$V_{xy} = E_x - E_y = z_{xi} I_i - z_{yi} I_i$$

como  $I_i = 1$  p.u.

$$z_{Li} = z_{pi} - z_{qi} + \frac{y_{pq,xy} (z_{xi} - z_{yi})}{z_{pq,pq}} \quad (2.17)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \\ i \neq L$$

El elemento  $z_{LL}$  puede calcularse inyectando una corriente en el bus L con bus q como referencia y calculando el voltaje en el bus L con respecto al bus q y todas las otras corrientes de bus igual a cero. De la ecuación:

$$E_k = z_{kL} I_L \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2.18)$$

$$e_L = z_{LL} I_L$$

La corriente en el elemento "pL" es:

$$i_{pL} = - I_L = - 1$$

Esta corriente en términos de admitancias primitivas y los voltajes a través de los elementos es:

$$i_{pL} = Y_{pL,pL} V_{pL} + Y_{pL,xy} V_{xy} = - 1$$

$$V_{pL} = \frac{- 1 + Y_{pL,xy} V_{xy}}{Y_{pL,pL}}$$

y como:

$$Y_{pL,xy} = Y_{pq,xy} \text{ y } Y_{pq,pq} = Y_{pq,pq}$$

entonces:

$$V_{pL} = \frac{- 1 + Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}}$$

(2.19)

$$V_{PL} = E_p - E_q - e_L$$

$$E_p - E_p - e_L = - \frac{1 + Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}}$$

$$V_{xy} = E_x - E_y = z_{xL} i_L = z_{yL} i_L$$

$$E_p = z_{pL} i_L$$

$$e_L = z_{LL} i_L$$

$$E_q = z_{qL} i_L$$

$$-e_L = -E_p + E_q - \frac{1 + Y_{pq,xy} V_{xy}}{Y_{pq,pq}}$$

$$z_{LL} i_L = z_{pL} i_L - z_{qL} i_L + \frac{1 + Y_{pq,xy} (z_{xL} i_L - z_{yL} i_L)}{Y_{pq,pq}}$$

como:  $i_L = 1$ .

$$z_{LL} = z_{pL} - z_{qL} + \frac{1 + Y_{pq,xy} (z_{xL} - z_{yL})}{Y_{pq,pq}}$$

(2.20).

Si no hay acoplamiento mutuo entre el elemento agregado y otros elementos de la red parcial, entonces los elementos  $Y_{pq,xy}$  son cero y se tiene que:

$$Z_{pq,pq} = \frac{1}{Y_{pq,pq}}$$

de la ecuación 2.17 con  $Y_{pq,xy} = 0$

$$Z_{Li} = Z_{pi} - Z_{qi} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$i \neq L$$

de 2.20 con  $Y_{qp,xy} = 0$

$$Z_{LL} = Z_{pL} - Z_{qL} + \frac{1}{Y_{pq,pq}}$$

$$Z_{LL} = Z_{pL} - Z_{qL} + Z_{pq} I_{pq}$$

Además si no hay acoplamiento mutuo y P es el nodo de referencia.

$$E_p = Z_{pi} I_i ; \quad Z_{pi} = \frac{E_p}{I_i}$$

Para p nodo de referencia  $E_p = 0$  y entonces:

$$z_{pi} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$i \neq L$$

y entonces se tiene que:

$$z_{Li} = -z_{qi} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$i \neq L$$

y también como:

$$E_p = z_{pL} i_L; \text{ como } E_p = 0$$

$$z_{pL} = 0$$

Los elementos en la fila y columna L de la matriz de impedancias de bus para la red parcial aumentada se obtienen de las ecuaciones 2.17 y 2.20, y queda por calcular la matriz de impedancia de bus para incluir el efecto de la unión añadida, esto puede venir -- aparejado por la modificación de los elementos  $z_{ij}$  donde  $i, j = 1, 2, \dots, m$  y eliminando la fila y columna L del nodo ficticio.

El nodo ficticio L se puede eliminar poniendo un corto circuito, la fuente de voltaje en serie.

De la relación matricial original aumentada por la fuente  $e_L$  y el nodo ficticio L.

$$E_{bus} = Z_{bus} I_{bus} + Z_{iL} I_L \quad (2.21)$$

$$e_L = Z_{Lj} I_{bus} + Z_{LL} I_L = 0 \quad (2.22)$$

de 2.22

$$I_L = - \frac{Z_{Lj} I_{bus}}{Z_{LL}}$$

Substituyendo 2.21

$$E_{bus} = Z_{bus} I_{bus} - \frac{Z_{iL} Z_{Lj}}{Z_{LL}} I_{bus}$$

$$E_{bus} = \left( Z_{bus} - \frac{Z_{Li} Z_{Lj}}{Z_{LL}} \right) I_{bus}$$

Esta ecuación se conoce como ecuación de comportamiento de la red parcial incluyendo la unión p - q, por tanto la matriz de impedancia de bus requerida es:

$$Z_{bus} \quad (modificada) = Z_{bus} \quad (antes de la eliminacion) - \frac{Z_{iL} Z_{Lj}}{Z_{LL}}$$



$$Z_{bus} \quad = \quad Z_{bus} \quad - \quad \frac{Z_{iL} Z_{Lj}}{Z_{LL}}$$

(modificada)                      (antes de la eliminación)

cualquier elemento de  $Z_{bus}$  modificada es:

$$Z_{ij} \text{ (mod.)} = Z_{ij} \text{ (antes modificada)} - \frac{Z_{iL} Z_{Lj}}{Z_{LL}}$$

C O M P I L E R

FILE SPDATE,UNIT=READER  
FILE C=RESUL,UNIT=PRINTER

```

DIMENSION M(50),N(50),NCCN(50),X(50),Z(50,50),PAREN(150),HEF(150),
1ABC(100,5),VEL(100,5),VEL(100,5),HEV(100,5),FALLA(100,20),CRITCS(
1100,6),CRITCA(100,5),CRITCI(100,2),VF(10),VLI(10,5),VF(100,2),
1VGLTS(100),FENIP(20),CASC(20),FFAC(10,2),L(100),IUS(100),
1FFES(100),FREG(100),MFT(100),FIFT(100),NIFE(50)
1,ZI(50,50),XI(50),XRX(50),ZT(50,50),XT(50)
1EQUIVALENCE (NCCN(1),HEC(1,1))
1INTEGER P=0,N
1REAL RONTA
1N=5
1N=6
1001 FORMAT(1H1,5(/),10X,2FALLA MONOFASICA EN EL FLS 2,F15.5,
1,5(/),10X,2LCS MVA DE LE FALLA MONOFASICA A TIERRA SON 2,F15.5,
15(/),10X,2LA CORRIENTE MONOFASICA DE CERTO CIRCUITO ES 2,F15.5)
322 FORMAT(26I3)
14 FORMAT(14/8(14,F6.2))
2000 FORMAT(1F10.2,2F10.2)
20 FORMAT(14/10(2I3,12))
207 FORMAT(1F15.4,2F10.4)
202 FORMAT(1H1,755,2ESTILCIC CU CORTO CIRCUITO/147,2SISTEMA ELECTRIC
1EL 212,4,7,7,110,2CASC(213,(120,944))
207 FORMAT(1H0,9X,2BUS 1V,2T45,2LINEA RESISTENCIA TIFC REACTANCI
1,2,155,2EN P U CO:3)
218 FORMAT(10X,13,2F7.2,14X,2I3,2F13.8,14,F13.8)
216 FORMAT(13X,2I3,2F13.8,14,F13.8)
200 FORMAT(13X,2NUM EN ELSES EN EL ESTU10212/9X,2ALP DE ELEPER1,CS214)
203 FORMAT(13X,2CALCULO DE VALTRES MEFENTANES SLETRANSITORICS E INTERR
1LZITIVOS ASIMETRICOS EN 100 VOLTS)
204 FORMAT(13X,2CALCULO DE VALCRES INTERLPTIVOS EN A.T. SIN CCA)MIBUCIC
1A EL M10RES)
200 FORMAT(12A,2I7,2F10.4)
202 FORMAT(1H1,57X,2MCASTYC,2AMP,2102,2AMP,2191,2AMP, INT,2/57,2SIP,2
117,2SIP,2T01,2AS1,2YSC,2ASIP,2ACV2)
203 FORMAT(1H0,2,2FALLA TOTAL EN FLS213,2T43,1,6,2,2MV2T57,FR,2,2F13.2)
2034 FORMAT(13X,2CUMARTELECCION DEL ELEPER1,2EN2F6,2,2MV2T57,FR,2,2F12.2)
2034 FORMAT(121,2VULI,2JESEN ELS213,2F6.2)
2031 FORMAT(1X,2D,2F13.8)
1209 FORMAT(1X,2,2,2F13.8)
2031 FORMAT(10X,2LUS NO DEFINIO EN TARJETA,14)
2031 FORMAT(10X,2LUS NO DEFINIO EN TARJETA,14)
2031 FORMAT(1H1,56X,2FACTRES DE ASIP,2/56X,2C(14C) CAP,2/56X,2MV
1CAP,2CH INT,2/7,2(4X,2F6.2,2X,2F5.2,2X,2F5.2))
202 FORMAT(2I13)
2031 FORMAT(10X,2VOLTAGE INDEFINIO EN TARJETA,14)
750 FORMAT(1H1)

```

LECTURA DE DATOS XPRCECENCIA,CASO A RESOLVER, ETC.  
KLAU(JA\*200)(FENTE(LP),LP=1-12),APREG(P),CASC(LN),LN=1-12)

```

C CCCCC01
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC02
C FILE IS OCCC LCNE
FORU71 STAGE1 OF SEGMENT 002
C CCCCC03
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC04
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC05
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC06
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC07
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC08
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC09
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC10
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC11
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC12
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC13
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC14
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC15
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC16
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC17
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC18
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC19
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC20
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC21
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC22
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC23
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC24
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC25
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC26
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC27
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC28
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC29
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC30
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC31
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC32
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC33
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC34
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC35
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC36
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC37
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC38
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC39
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC40
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC41
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC42
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC43
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC44
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC45
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC46
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC47
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC48
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC49
C FILE IS OCCC LCNE
C CCCCC50
C FILE IS OCCC LCNE

```





```

CU 5999 I1=1,2
READ(-A,20)NLEP,(N(I),A(I),ACON(I)),I=1,ALLEP)
IF(NLEP=0)GO TO 303
READ(UA,2000)BASE,VMAE,VMAE2
READ(UA,2000)TRFAC(VMAE,VMAE2)
READ(UA,2000)TRFAC(I,J),J=1,2,I=1,NELEP)
CU 2001 I=1,NELEP
NLEP=TRFAC(I,3)
VALGR=TRFAC(I,4)
VALGX=TRFAC(I,5)
VMAE=TRFAC(I,6)
IF(NCL.CO,21)X(I)=VMAE2*VALGX/VMAE1
IF(NCL.CO,22)X(I)=(VALGX/IC0.C)*(VMAE2/VMAE1)
IF(NCL.CO,23)X(I)=(VALGX*VMAE2)/(IC00.C*(VMAE1**2))
IF(NCL.CO,24)X(I)=VALGX/VMAE1
IF(NCL.CO,25)X(I)=(VALGX/100.C)*(VMAE2/VMAE1)
IF(NCL.CO,26)X(I)=(VALGX*VMAE2)/(IC00.C*(VMAE1**2))

```

3001

IMPRESION DE TITULOS Y DATOS DEL PROBLEMA

```

NUNTA=C
WRITE(-B,2000)BASE,VMAE2,VMAE2
WRITE(-B,2000)TRFAC(I,J),J=1,2,I=1,NELEP)
WRITE(-B,2000)TRFAC(I,J),J=1,2,I=1,NELEP)
READ(UA,2000)TRFAC(I,J),J=1,2,I=1,NELEP)
READ(UA,2000)TRFAC(I,J),J=1,2,I=1,NELEP)
WRITE(-B,2000)TRFAC(I,J),J=1,2,I=1,NELEP)
CU 301 I=1,NELEP
IF(NCL.CO,302)GO TO 302,303
302 WRITE(-B,2000)FLS(I),LTS(I),A(I),X(I),ACON(I),X(I))
IF(NUNTA=45)GO TO 301,301,700
700 WRITE(-B,2000)
WRITE(-B,2000)
WRITE(-B,2000)
CU 303 I=1,NELEP
NUNTA=NUNTA+1
WRITE(-B,2000)H(I),A(I),X(I),ACON(I),X(I))
IF(NUNTA=45)GO TO 301,301,700
701 WRITE(-B,2000)
WRITE(-B,2000)
WRITE(-B,2000)
NUNTA=0
301 CONTINUE
WRITE(-B,250)NLS,NELEP
CU TO 301
351 IF(MI.E,1)GO TO 10
WRITE(-B,2000)
CU TO 10
10 WRITE(-B,2000)

```

303

CALCULO DE LA MATRIZ DE ADMITANCIAS ZRLS

```

10 NFIL=C
CU TO 10 I=1,NELEP
IF(NCON(I)-2) 1,2,3
1 NFIL=NFIL+1
CU TO 40
2 NFA(I)=0
CU TO 60
IF(NCON(I)-4)3,4,4
60 NFA(I)=0
PNEWK)=NFIL

```

Vertical column of characters, possibly a control stream or a list of identifiers, running down the right side of the page.







```

C
TERMINA CALCULO FALLA TOTAL
PRINCIPIAN CALCULO CENTRIFICACION ELEMENTOS CORRIENTES
81 CC 82 IN=1.5
IF (CNC(11,15)) GO 87
87 R=ANG(11,14)*9
C=PI*E*(R)
CC 85 IN=1.5,ELF
IF (CNC(11,15).EQ.0) GO 81,ANG,R(11),EG,HFF(11,11),CF*E
100 IN=1.5,ANG(11,14),ANG,R(11),EG,HFF(11,11),CF*E
83 CONTINUE
CC TO 300
84 FALLAC(11,IN)=VMAE2*(Z1(P,P)-Z1(P,5))/(Z1(11)+Z1(P,P))
CLOS(11,IN)=1000*CF*LLA(11,IN)/(CF*Z1(11)+Z1(P,P))
IF (V) PV=EG*92
85 C=CAC(11,IN)=CRTC(11,IN)*FACT(D=1)
IF (C) CAE=1.0*82
C=CAC(11,IN)=CRTC(11,IN)*FACT(D=2)
87 CONTINUE
C P 81 EL CALCULO DE CONTRIBUCION DE ELEMENTOS (CORRIENTES)
81 CC 82 IN=1.5
IF (CNC(11,15)) GO 100
90 R=ANG(11,14)*9
F=PI*E*(R)
CC 92 IN=1.5,ELF
IF (CNC(11,15).EQ.0) GO 81,ANG,R(11),EG,REL(11,14),CR,R(11),EG
100 IN=1.5,ANG(11,14),ANG,R(11),EG,REL(11,14),CR TO 95
92 CONTINUE
CC TO 100
95 IF (CNC(11,15).EQ.0) GO TO 98
R=ANG(11,14)*9
C=PI*E*(R)
F=Z1(P,6)
CC TO 91
98 R=C*0
97 FALLAC(11,IN)=VMAE2*(Z1(P,R)-F)/(Z1(11)+Z1(P,P))
91 CONTINUE
TERMINA EL CALCULO DE CORRIENTES
SE INICIA EL CALCULO DE VOLTAJES
100 CC 101 IN=1.5
IF (CNC(11,15)) GO 275*102
102 R=ANG(11,14)*9
C=PI*E*(R)
V(11,IN)=(Z1(P,P)-Z1(P,6))/Z1(P,P)
101 CONTINUE
CC TO 75
300 WRITE(CD,258)IT
CC TO 75
309 WRITE(CD,260)IT
75 CONTINUE
C
TERMINA CALCULO DE VOLTAJES
IMPRESION DE RESULTADOS
IF (11).EQ.2) GO TO 1231
R=EG*(C*252)
RDATA=C
CC 400 IT=1,NT
IF (RDATA.LT.42) GO TO 950

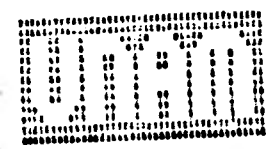
```

CC	101	IN	1.5
CC	102	IN	1.5
CC	103	IN	1.5
CC	104	IN	1.5
CC	105	IN	1.5
CC	106	IN	1.5
CC	107	IN	1.5
CC	108	IN	1.5
CC	109	IN	1.5
CC	110	IN	1.5
CC	111	IN	1.5
CC	112	IN	1.5
CC	113	IN	1.5
CC	114	IN	1.5
CC	115	IN	1.5
CC	116	IN	1.5
CC	117	IN	1.5
CC	118	IN	1.5
CC	119	IN	1.5
CC	120	IN	1.5
CC	121	IN	1.5
CC	122	IN	1.5
CC	123	IN	1.5
CC	124	IN	1.5
CC	125	IN	1.5
CC	126	IN	1.5
CC	127	IN	1.5
CC	128	IN	1.5
CC	129	IN	1.5
CC	130	IN	1.5
CC	131	IN	1.5
CC	132	IN	1.5
CC	133	IN	1.5
CC	134	IN	1.5
CC	135	IN	1.5
CC	136	IN	1.5
CC	137	IN	1.5
CC	138	IN	1.5
CC	139	IN	1.5
CC	140	IN	1.5
CC	141	IN	1.5
CC	142	IN	1.5
CC	143	IN	1.5
CC	144	IN	1.5
CC	145	IN	1.5
CC	146	IN	1.5
CC	147	IN	1.5
CC	148	IN	1.5
CC	149	IN	1.5
CC	150	IN	1.5
CC	151	IN	1.5
CC	152	IN	1.5
CC	153	IN	1.5
CC	154	IN	1.5
CC	155	IN	1.5
CC	156	IN	1.5
CC	157	IN	1.5
CC	158	IN	1.5
CC	159	IN	1.5
CC	160	IN	1.5
CC	161	IN	1.5
CC	162	IN	1.5
CC	163	IN	1.5
CC	164	IN	1.5
CC	165	IN	1.5
CC	166	IN	1.5
CC	167	IN	1.5
CC	168	IN	1.5
CC	169	IN	1.5
CC	170	IN	1.5
CC	171	IN	1.5
CC	172	IN	1.5
CC	173	IN	1.5
CC	174	IN	1.5
CC	175	IN	1.5
CC	176	IN	1.5
CC	177	IN	1.5
CC	178	IN	1.5
CC	179	IN	1.5
CC	180	IN	1.5
CC	181	IN	1.5
CC	182	IN	1.5
CC	183	IN	1.5
CC	184	IN	1.5
CC	185	IN	1.5
CC	186	IN	1.5
CC	187	IN	1.5
CC	188	IN	1.5
CC	189	IN	1.5
CC	190	IN	1.5
CC	191	IN	1.5
CC	192	IN	1.5
CC	193	IN	1.5
CC	194	IN	1.5
CC	195	IN	1.5
CC	196	IN	1.5
CC	197	IN	1.5
CC	198	IN	1.5
CC	199	IN	1.5
CC	200	IN	1.5



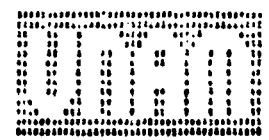
1000 CONTINUE  
CALL EXIT  
END

C 0021C59E13  
C 0021C59F13  
C 0021C59F12  
SEGMENT 002 IS 0420 LCAC





FORMAT SEGMENT IS 4002 LONG  
SEGMENT CCB IS 8655 LONG



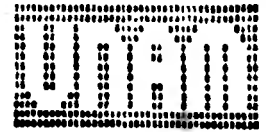
NO ERRORS DETECTED. NUMBER OF CARDS = 320.  
COMPILATION TIME = 18 SECONDS ELAPSED. C.C.S. SECONDS PROCESSING.  
L2 STACK SIZE = 4. P.L.C.C. FILE SIZE = 140 LINES. ESTIMATED C.C.C. STORAGE REQUIREMENT = 17731 BYTES.  
TOTAL PROGRAM CODE = 1230 BYTES. ARRAY STORAGE = 1544 BYTES.  
NUMBER OF PROGRAM SEGMENTS = 9. NUMBER OF C.I.S.H. SEGMENTS = 92.  
PROGRAM CODE FILE = (A725)CCRYC ON FACH.  
COMPILER COMPILED ON 10/09/79

	1.00	C.00	250.00
0.0	C.C	21	U.C0000000
0.0	C.C	22	U.C0000000
0.0	C.C	23	U.C0000000
0.0	C.C	24	U.C0000000
0.0	C.C	25	U.C0000000
0.0	C.C	26	U.C0000000
0.0	C.C	27	U.C0000000
0.0	C.C	28	U.C0000000
0.0	C.C	29	U.C0000000
0.0	C.C	30	U.C0000000
0.0	C.C	31	U.C0000000
0.0	C.C	32	U.C0000000
0.0	C.C	33	U.C0000000
0.0	C.C	34	U.C0000000
0.0	C.C	35	U.C0000000
0.0	C.C	36	U.C0000000
0.0	C.C	37	U.C0000000
0.0	C.C	38	U.C0000000
0.0	C.C	39	U.C0000000
0.0	C.C	40	U.C0000000
0.0	C.C	41	U.C0000000
0.0	C.C	42	U.C0000000
0.0	C.C	43	U.C0000000
0.0	C.C	44	U.C0000000
0.0	C.C	45	U.C0000000
0.0	C.C	46	U.C0000000
0.0	C.C	47	U.C0000000
0.0	C.C	48	U.C0000000
0.0	C.C	49	U.C0000000
0.0	C.C	50	U.C0000000
0.0	C.C	51	U.C0000000
0.0	C.C	52	U.C0000000
0.0	C.C	53	U.C0000000
0.0	C.C	54	U.C0000000
0.0	C.C	55	U.C0000000
0.0	C.C	56	U.C0000000
0.0	C.C	57	U.C0000000
0.0	C.C	58	U.C0000000
0.0	C.C	59	U.C0000000
0.0	C.C	60	U.C0000000
0.0	C.C	61	U.C0000000
0.0	C.C	62	U.C0000000
0.0	C.C	63	U.C0000000
0.0	C.C	64	U.C0000000
0.0	C.C	65	U.C0000000
0.0	C.C	66	U.C0000000
0.0	C.C	67	U.C0000000
0.0	C.C	68	U.C0000000
0.0	C.C	69	U.C0000000
0.0	C.C	70	U.C0000000
0.0	C.C	71	U.C0000000
0.0	C.C	72	U.C0000000
0.0	C.C	73	U.C0000000
0.0	C.C	74	U.C0000000
0.0	C.C	75	U.C0000000
0.0	C.C	76	U.C0000000
0.0	C.C	77	U.C0000000
0.0	C.C	78	U.C0000000
0.0	C.C	79	U.C0000000
0.0	C.C	80	U.C0000000
0.0	C.C	81	U.C0000000
0.0	C.C	82	U.C0000000
0.0	C.C	83	U.C0000000
0.0	C.C	84	U.C0000000
0.0	C.C	85	U.C0000000
0.0	C.C	86	U.C0000000
0.0	C.C	87	U.C0000000
0.0	C.C	88	U.C0000000
0.0	C.C	89	U.C0000000
0.0	C.C	90	U.C0000000
0.0	C.C	91	U.C0000000
0.0	C.C	92	U.C0000000
0.0	C.C	93	U.C0000000
0.0	C.C	94	U.C0000000
0.0	C.C	95	U.C0000000
0.0	C.C	96	U.C0000000
0.0	C.C	97	U.C0000000
0.0	C.C	98	U.C0000000
0.0	C.C	99	U.C0000000
0.0	C.C	100	U.C0000000





SISTEMA ELECTRICO DE CORTO CIRCUITO



CASE 0

BUS KV  
 10 4.16  
 11 0.48  
 12 0.48  
 13 0.48  
 14 0.22

LINEA	RESISTENCIA EA P U	TIPO REACTANCIA CCA
C 10	C.CCC000CC	1.CCCCCCCC
C 10	C.CCC000CC	1.35410000
C 10	C.CCC000CC	1.81227000
C 11	C.CCC000CC	1.37500000
C 11	C.CCC000CC	1.85178000
C 12	C.CCC000CC	1.37500000
C 12	C.CCC000CC	2.85000000
C 13	C.CCC000CC	1.75000000
C 13	C.CCC000CC	1.87400000
C 14	C.CCC000CC	2.00000000
C 14	C.CCC000CC	2.00000000

NUM BU BUSES EN EL ESTUDIO 3  
 NUM DE ELEMENTOS 11  
 CALCULO DE VALORES PORCENTUALES SUBTRANSFORMADORES E INTERRUPTORES ASIMETRICOS EN 480 VOLTS

11  
 110  
 111  
 112  
 113  
 114

110  
 111  
 112  
 113  
 114

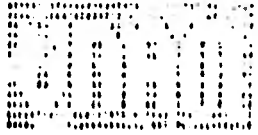


201 1 16 22:40  
201 0 0 11:05  
201 0 0 11:05

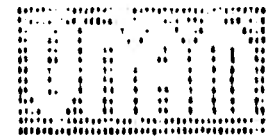
000000000000  
000000000000  
000000000000

22.5100  
22.5100  
22.5100

552.1615  
360.1100  
2.8772



STACION ELECTRIC EL CORTO CIRCUITO



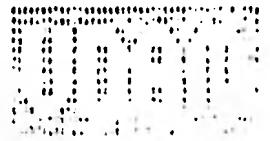
CASE 0

BUS	KV	LINEA	RESISTENCIA	INDUCTANCIA
10	9.16	C. 10	C.CCCCCC	1.00000000
11	9.16	C. 11	C.CCCCCC	1.00000000
12	9.16	C. 12	C.CCCCCC	1.00000000
13	9.16	C. 13	C.CCCCCC	1.00000000
14	9.16	C. 14	C.CCCCCC	1.00000000
15	9.16	C. 15	C.CCCCCC	1.00000000
16	9.16	C. 16	C.CCCCCC	1.00000000
17	9.16	C. 17	C.CCCCCC	1.00000000
18	9.16	C. 18	C.CCCCCC	1.00000000
19	9.16	C. 19	C.CCCCCC	1.00000000
20	9.16	C. 20	C.CCCCCC	1.00000000
21	9.16	C. 21	C.CCCCCC	1.00000000
22	9.16	C. 22	C.CCCCCC	1.00000000
23	9.16	C. 23	C.CCCCCC	1.00000000
24	9.16	C. 24	C.CCCCCC	1.00000000
25	9.16	C. 25	C.CCCCCC	1.00000000
26	9.16	C. 26	C.CCCCCC	1.00000000
27	9.16	C. 27	C.CCCCCC	1.00000000
28	9.16	C. 28	C.CCCCCC	1.00000000
29	9.16	C. 29	C.CCCCCC	1.00000000
30	9.16	C. 30	C.CCCCCC	1.00000000
31	9.16	C. 31	C.CCCCCC	1.00000000
32	9.16	C. 32	C.CCCCCC	1.00000000
33	9.16	C. 33	C.CCCCCC	1.00000000
34	9.16	C. 34	C.CCCCCC	1.00000000
35	9.16	C. 35	C.CCCCCC	1.00000000
36	9.16	C. 36	C.CCCCCC	1.00000000
37	9.16	C. 37	C.CCCCCC	1.00000000
38	9.16	C. 38	C.CCCCCC	1.00000000
39	9.16	C. 39	C.CCCCCC	1.00000000
40	9.16	C. 40	C.CCCCCC	1.00000000
41	9.16	C. 41	C.CCCCCC	1.00000000
42	9.16	C. 42	C.CCCCCC	1.00000000
43	9.16	C. 43	C.CCCCCC	1.00000000
44	9.16	C. 44	C.CCCCCC	1.00000000
45	9.16	C. 45	C.CCCCCC	1.00000000
46	9.16	C. 46	C.CCCCCC	1.00000000
47	9.16	C. 47	C.CCCCCC	1.00000000
48	9.16	C. 48	C.CCCCCC	1.00000000
49	9.16	C. 49	C.CCCCCC	1.00000000
50	9.16	C. 50	C.CCCCCC	1.00000000
51	9.16	C. 51	C.CCCCCC	1.00000000
52	9.16	C. 52	C.CCCCCC	1.00000000
53	9.16	C. 53	C.CCCCCC	1.00000000
54	9.16	C. 54	C.CCCCCC	1.00000000
55	9.16	C. 55	C.CCCCCC	1.00000000
56	9.16	C. 56	C.CCCCCC	1.00000000
57	9.16	C. 57	C.CCCCCC	1.00000000
58	9.16	C. 58	C.CCCCCC	1.00000000
59	9.16	C. 59	C.CCCCCC	1.00000000
60	9.16	C. 60	C.CCCCCC	1.00000000
61	9.16	C. 61	C.CCCCCC	1.00000000
62	9.16	C. 62	C.CCCCCC	1.00000000
63	9.16	C. 63	C.CCCCCC	1.00000000
64	9.16	C. 64	C.CCCCCC	1.00000000
65	9.16	C. 65	C.CCCCCC	1.00000000
66	9.16	C. 66	C.CCCCCC	1.00000000
67	9.16	C. 67	C.CCCCCC	1.00000000
68	9.16	C. 68	C.CCCCCC	1.00000000
69	9.16	C. 69	C.CCCCCC	1.00000000
70	9.16	C. 70	C.CCCCCC	1.00000000
71	9.16	C. 71	C.CCCCCC	1.00000000
72	9.16	C. 72	C.CCCCCC	1.00000000
73	9.16	C. 73	C.CCCCCC	1.00000000
74	9.16	C. 74	C.CCCCCC	1.00000000
75	9.16	C. 75	C.CCCCCC	1.00000000
76	9.16	C. 76	C.CCCCCC	1.00000000
77	9.16	C. 77	C.CCCCCC	1.00000000
78	9.16	C. 78	C.CCCCCC	1.00000000
79	9.16	C. 79	C.CCCCCC	1.00000000
80	9.16	C. 80	C.CCCCCC	1.00000000
81	9.16	C. 81	C.CCCCCC	1.00000000
82	9.16	C. 82	C.CCCCCC	1.00000000
83	9.16	C. 83	C.CCCCCC	1.00000000
84	9.16	C. 84	C.CCCCCC	1.00000000
85	9.16	C. 85	C.CCCCCC	1.00000000
86	9.16	C. 86	C.CCCCCC	1.00000000
87	9.16	C. 87	C.CCCCCC	1.00000000
88	9.16	C. 88	C.CCCCCC	1.00000000
89	9.16	C. 89	C.CCCCCC	1.00000000
90	9.16	C. 90	C.CCCCCC	1.00000000
91	9.16	C. 91	C.CCCCCC	1.00000000
92	9.16	C. 92	C.CCCCCC	1.00000000
93	9.16	C. 93	C.CCCCCC	1.00000000
94	9.16	C. 94	C.CCCCCC	1.00000000
95	9.16	C. 95	C.CCCCCC	1.00000000
96	9.16	C. 96	C.CCCCCC	1.00000000
97	9.16	C. 97	C.CCCCCC	1.00000000
98	9.16	C. 98	C.CCCCCC	1.00000000
99	9.16	C. 99	C.CCCCCC	1.00000000
100	9.16	C. 100	C.CCCCCC	1.00000000

NUM EL BUSES EN EL ESTUDIO 5  
 NUM EL ELEMENTOS 1  
 CALCULO DE VALORES POTENCIALES SLETRONICOS E INTERRUPTORES ASIMETRICOS EN ACV VOLTS



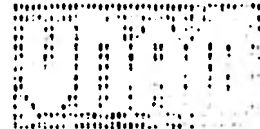




FALTA MONOGRAFIA EN EL PUNTO  
10.01000

LOS MAYA DE LA PENINSULA YUCATECA A VITRINA DEL  
134.000000

LA COPIA DE LA MONOGRAFIA DE LA PENINSULA YUCATECA  
450.000000



FALLA MONASTICA EN EL SUR

18-00000

LOS VIA DE LA FALLA MONASTICA A TIERRA DEL

0-07210

LA CONSTITUCION MONASTICA DE CUERPO CIRCULAR DE

04-03513



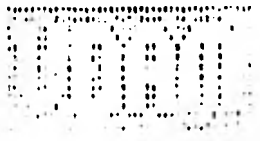
FALLA MONTECASSICA EN EL 1910

LOS RIVA DE LA FALLA MONTECASSICA A TIERRA COM.

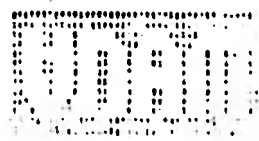
20.03.20

LA COMITENTE MONTECASSICA DE CONTE CINCINTE ES

2023.02.19



FALLA MONOFASICA EN EL PUNTO 13,000000  
LOS IVA DE LA FALLA MONOFASICA A 11000000  
LA COPRIMENT MONOFASICA DE COSTO CINCIENTO LR 12018,00276  
10,65600



123

FALLA HONORASICA EN EL PUE

LCS HVA DE LE FALLA HONORASICA A TIFCOA SCH

11.5777A

LA CONPTIENE HONORASICA DE CONTO CICHUO LS

30375.90710







Ratio to rms symmetrical ampere

Short-circuit power factor, %	Short-circuit X/R ratio	Max I <sub>0</sub> in airblast timeous peak A	Max I <sub>0</sub> rms A at 1/2 cycle	Average I <sub>0</sub> rms A at 1/2 cycle
5	10.074	2.075	1.075	1.301
10	9.901	2.045	1.054	1.229
15	6.912	2.300	1.070	1.171
20	4.690	2.153	1.047	1.127
25	3.673	2.073	1.061	1.093
30	3.173	1.978	1.050	1.066
35	2.676	1.884	1.040	1.046
40	2.291	1.819	1.032	1.031
45	1.985	1.753	1.021	1.020
50	1.757	1.691	1.015	1.013
55	1.585	1.630	1.015	1.008
60	1.333	1.564	1.000	1.004
65	1.169	1.503	1.004	1.002
70	1.020	1.447	1.002	1.001

Table 2—Air power circuit breaker characteristics

Column 1 Type of Breaker	Voltage ratings			Insulation level A.C. stand-off		Current ratings, amperes			60-Hz interrupting rating			13 rated inter- rupting time in cycles (60-Hz basis)
	Rated KV	Rated MVA	Minimum KV at rated MVA	Low fre- quency peak KV	High peak crest KV	Cont. limiting at 60-Hz	Short time		3-phase rated MVA	Lines open At rated voltage	Total Max- imum rating	
4.16-75	4.16	4.75	3.5	19	60	1200	1000	12,000	75	10,500	12,500	8
4.16-250	4.16	4.75	3.65	19	60	1200, 2000	10,000	37,000	250	35,000	37,500	8
4.16-250B	4.16	4.75	3.65	19	60	1200, 2000	10,000	37,500	250	35,000	37,500	8
4.16-350	4.16	4.75	4.0	19	60	1200, 2000	10,000	50,000	350	48,000	50,000	8
7.2-500	7.2	8.25	6.6	36	95	1200, 2000	70,000	44,000	500	40,000	44,000	8
13.8-500	13.8	15.0	11.5	36	95	1200, 2000	40,000	25,000	500	21,000	25,000	8
13.8-500B	13.8	15.0	11.5	36	95	1200, 2000	40,000	25,000	500	21,000	25,000	8
13.8-750	13.8	15.0	11.5	36	95	1200, 2000	40,000	37,500	750	31,500	37,500	8
13.8-750B	13.8	15.0	11.5	36	95	1200, 2000	40,000	37,500	750	31,500	37,500	8
13.8-1000	13.8	15.0	11.5	36	95	1200, 2000	40,000	50,000	1000	42,000	50,000	8

Table 3—Machine reactances and multipliers used in simplified calculations

Kind of equipment interrupting duty	Machine reactances to use			Multipliers	
	Synchronous generators	Synchronous motors	Induction Motors	General case	Special case
Power circuit breakers with interrupting times of:					
8 cycles	Subtransient	Transient	Transient	1.0	1.1 <sup>a</sup>
5 cycles	Subtransient	Transient	Transient	1.1	1.2 <sup>a</sup>
3 cycles	Subtransient	Transient	Transient	1.2	1.3 <sup>a</sup>
2 cycles	Subtransient	Transient	Transient	1.4	1.5 <sup>a</sup>
L-V power circuit breakers	Subtransient	Subtransient	Subtransient	1.0 <sup>b</sup>	—
Molded-case circuit breakers	Subtransient	Subtransient	Subtransient	1.0	—
Fuses and fused cutouts (above 1500 V)	Subtransient	Subtransient	Subtransient	1.6	1.2 <sup>c</sup>
L-V fuses (600 V and below)	Subtransient	Subtransient	Subtransient	1.0 <sup>d</sup>	—
L-V motor controllers (including operating fuses or m.c. breakers)	Subtransient	Subtransient	Subtransient	1.25	—
Momentary duty Power circuit breaker	Subtransient	Subtransient	Subtransient	1.6	1.5 <sup>e</sup>

(a) Use only if calculated short-circuit value exceeds 500 MVA and circuit is not fed directly from generators or entirely through current limiting reactors. (b) Factor based on that at X/R equals infinity; less than that for X/R values above this but less than or equal to 17, use 1.25. (c) Use only if 15 kV or less, bus area at current limiting and X/R is less than 4. (d) Includes NEMA standard current limiting fuses. (e) Only if 6 kV or less and circuit is not mainly fed directly from generators or entirely through current limiting reactors.

Table 4—Standard ratings of low-voltage air circuit breakers

Breaker type	Voltage		Interrupting rating <sup>a</sup> , amperes		30-cycle short-time rating <sup>b</sup> , amperes		Frame size, continuous current rating, amperes
	Ac	Dc	Asymmetrical	Symmetrical	Asymmetrical	Symmetrical	
15	600-481	250 & below	15,000	14,000	15,000	14,000	225
15	480-241	—	25,000	25,000	15,000	14,000	225
15	240 & below	—	30,000	25,000	15,000	14,000	225
25	600-481	250 & below	25,000	22,000	25,000	22,000	600
25	480-241	—	35,000	30,000	25,000	22,000	600
25	240 & below	—	50,000	42,000	25,000	22,000	600
50	600-481	250 & below	50,000	42,000	50,000	42,000	1600
50	480-241	—	60,000	50,000	50,000	42,000	1600
50	240 & below	—	75,000	65,000	50,000	42,000	1600
75	600-481	250 & below	75,000	65,000	75,000	65,000	3000
75	480-241	—	75,000	65,000	75,000	65,000	3000
75	240 & below	—	100,000	85,000	75,000	65,000	3000
100	600-481	250 & below	100,000	85,000	100,000	85,000	4000
100	480-241	—	100,000	85,000	100,000	85,000	4000
100	240 & below	—	150,000	130,000	100,000	85,000	4000

<sup>a</sup>Current measured at instant 1/2-cycle after fault. <sup>b</sup>Including surge trip device.

TABLE R  
Reactance values of three-phase, 60-hz rotating equipment

Apparatus	Positive sequence			Negative sequence $X_2$	Zero sequence $X_0$
	Synchronous $X_d$	Transient $X_d'$	Steady state $X_d''$		
2-pole generator (45 psu, 11000 kva)	1.25-1.91* 1.15*	0.23-0.38 0.27	0.17-0.25 0.21	0.17-0.25 0.21	0.03-0.14 0.10*
2-pole generator (150 psu, 11000 kva)	1.0-1.86 1.75*	0.18-0.30 0.23	0.13-0.17 0.13	0.13-0.17 0.14	0.03-0.073 0.04*
4-pole generator (150 psu, 11000 kva)	1.36-1.67 1.49	0.26-0.30 0.27	0.17-0.20 0.19	0.16-0.205 0.19	0.04-0.1025 0.10*
Salient pole generators and motors with dampers	0.6-1.5 1.25	0.2-0.5 0.3	0.15-0.3 0.2	0.15-0.32 0.2	0.01-0.04 0.02*
Salient pole generators without dampers	0.6-1.5 1.25	0.2-0.5 0.3	0.2-0.5 0.3	0.2-0.65 0.48	0.01-0.04 0.02*
Synchronous condensers (air cooled)	1.25-2.75 1.65	0.3-0.4 0.4	0.19-0.3 0.27	0.18-0.4 0.29	0.01-0.015 0.02*
Synch condensers (oil cooled, 10000 kva)	1.4-2.65 2.1	0.3-0.6 0.4*	0.2-0.35 0.3	0.2-0.48 0.31	0.03-0.14 0.04*

\*Upper values give the range, lower values the average.

**Table 1—Generator subtransient reactance, approximate p-u X on kVA rating**

Salient pole with damper winding	12 poles or less	0.18
	14 poles or more	0.24
Salient pole without damper winding	12 poles or less	0.25
	14 poles or more	0.35
Distributed pole, 625 to 9375 kVA	2 poles	0.09
	2 poles	0.10
	4 poles	0.14

**Table 2—Motor reactances, approximate p-u X on kVA rating**

	Subtransient	Transient
Synchronous, individual large motor 6 poles	0.10	0.15
	8 to 14 poles	0.24
Synchronous groups, 600 V or less	0.25	0.33
	above 600 V	0.25
Induction, individual large	0.25	—
Induction groups, 600 V or less	0.25	—
	above 600 V	0.20

**Table 3—Transformer reactances, p-u X on transformer kVA base**

Three-phase load centers, primary 13.8 kV or less, low-voltage secondary		
300 to 500 kVA		0.050
750 to 2500 kVA		0.055

**Single-phase distribution transformers**

kVA	5 kV and below	5.1 to 15 kV
3 to 5	0.020	0.023
10 to 15	0.020	0.020
25 to 50	0.025	0.024
75 to 167	0.033	0.037
250 to 500	0.047	0.051

**Three-phase power transformers, secondary above 2.4 kV, above 500 kVA**

Primary kV	P-u X on kVA base
11.23	0.055
34.5	0.060
46	0.065
69	0.070

**Single-phase power transformers, secondary above 2.4 kV, above 500 kVA**

Primary kV	P-u X on kVA base
2.2 to 25	0.055
25.1 to 34.5	0.060
34.6 to 46	0.065
46.1 to 69	0.070

**Table 4—Cable and busway, ohms per 1000 ft, line to neutral**

A	R	X	Z	X/R
<b>Plug-in busway, copper bus bars</b>				
225	0.0836	0.0300	0.1157	
400	0.0437	0.0232	0.0495	
600	0.0350	0.0179	0.0393	
800	0.0218	0.0136	0.0757	
1000	0.0145	0.0135	0.0198	
<b>Plug-in busway, aluminum bus bars</b>				
225	0.1090	0.0720	0.1313	
400	0.0550	0.0722	0.0592	
600	0.0304	0.0121	0.0327	
800	0.0243	0.0154	0.0223	
<b>Low-impedance feeder busway</b>				
800	0.0219	0.0395	0.0235	
1000	0.0190	0.0350	0.0196	
1350	0.0126	0.0044	0.0134	
1600	0.0116	0.0035	0.0121	
2000	0.0075	0.0031	0.0081	
2500	0.0057	0.0025	0.0062	
3000	0.0055	0.0017	0.0058	
4000	0.0037	0.0016	0.0040	
<b>Current-limiting busway</b>				
1000	0.013	0.063	0.064	4.85
1350	0.012	0.061	0.062	5.08
1600	0.009	0.056	0.057	6.22
2000	0.007	0.052	0.052	7.45
2500	0.006	0.049	0.049	8.15
3000	0.005	0.046	0.046	9.20
4000	0.004	0.042	0.042	10.50

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

- Electric Power Distribution for Industrial Plants
  
- IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Comercial Powers Sisstems.
  
- SHORT CIRCUIT ABC  
Copyright Material IEEE  
Conference Catalog No. 73CH0769-OIA  
Paper No. PCI-73-7
  
- Revista Power  
Abril 1969, Agosto 1969, Diciembre 1969 y Febrero 1970
  
- Computer Methods in Power  
System Analysis  
Stagg and El-Abiad
  
- Instituto Mexicano del Petroleo  
III Seminario de Ingenieria Eléctrica