



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

2002

ESTUDIO Y CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO DE  
UNA PLANTA INDUSTRIAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A:  
JORGE FEDERICO ANTUÑANO CENICEROS

ASESOR: ING. IVÁN MUÑOZ SOLÍS

MÉXICO D.F., CD. UNIVERSITARIA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis 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.

A mis queridos padres:  
Federico (q. e. p. d.)  
María de los Angeles

A mis maestros

A la U. N. A. M.

## CONTENIDO

	Página
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO.....</b>	<b>2</b>
1.1 Consideraciones fundamentales.....	2
1.2 Fuentes de corriente de corto circuito.....	6
1.3 Corrientes de corto circuito simétricas y asimétricas.....	11
1.4 Los dispositivos que limitan la corriente de corto circuito.....	20
1.5 Relación X/R y factor de asimetría.....	23
<b>CAPÍTULO 2. MÉTODO DE CÁLCULO.....</b>	<b>28</b>
2.1 Selección del método de cálculo.....	28
2.2 Tipos de fallas.....	29
2.3 Pasos a seguir en el cálculo.....	31
2.4 El método unitario.....	34
2.5 Expresiones a utilizar en el cálculo.....	35
<b>CAPÍTULO 3. CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO.....</b>	<b>38</b>
3.1 Aplicación del cálculo de corto circuito a instalaciones industriales...	38
3.2 Elaboración del diagrama unifilar.....	39
3.3 Selección de una base apropiada.....	39
3.4 Obtención de los datos del equipo y elementos importantes.....	43
3.5 Localización de los puntos de falla a analizar.....	57
3.6 Conversión de las resistencias, reactancias e impedancias en valores en por unidad, sobre una base seleccionada en kVA.....	59
3.7 Elaboración del diagrama de impedancias.....	82
3.8 Cálculo de la impedancia equivalente.....	85
3.9 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito.....	111
3.10 Determinación de los factores de multiplicación, conociendo la relación X/R.....	113
3.11 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito.....	119

<b>CAPÍTULO 4, CÁLCULO DE FALLA DE FASE A TIERRA.....</b>	<b>122</b>
4.1 Falla de línea ( fase ) a tierra.....	122
4.2 Diagrama de impedancias de secuencia positiva.....	123
4.3 Diagrama de impedancias de secuencia negativa.....	123
4.4 Diagrama de impedancias de secuencia cero.....	123
4.5 Falla de línea ( fase ) a tierra sólida.....	126
4.6 Valores típicos de reactancia positiva, negativa y cero del equipo y elementos importantes.....	126
4.7 Determinación de los valores de la reactancia de secuencia cero del equipo y elementos importantes.....	127
4.8 Cálculo de la reactancia de secuencia cero en la línea de suministro	137
4.9 Elaboración del diagrama de reactancias de secuencia cero.....	140
4.10 Cálculo de la corriente de falla de fase a tierra en la línea de suministro.....	142
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>144</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>146</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>148</b>

## INTRODUCCIÓN

El corto circuito es una situación indeseable en un sistema eléctrico, pero que lamentablemente se puede presentar ocasionando daños cuantiosos, interrupción de energía, lesiones al personal e interrupciones costosas de producción. Por lo tanto, es sumamente importante determinar el valor de corto circuito en un sistema de potencia eléctrica con el fin de seleccionar apropiadamente los dispositivos protectores, cables, barras conductoras y dispositivos de desconexión para que sean capaces de soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos de las elevadas corrientes de corto circuito.

Por normas, un equipo debe cumplir con una serie de requisitos previamente determinados. Tales requisitos son eléctricos y mecánicos, todos ellos perfectamente estipulados en códigos y especificados técnicamente en normas de construcción, recepción y pruebas. Dentro de esta gama de requerimientos esta el de la capacidad interruptiva, que es el parámetro que determina el valor de la corriente de corto circuito que puede soportar.

Los procedimientos de cálculo de corto circuito son generales, ya que por un lado el fenómeno es el mismo, y por el otro, la metodología no difiere en forma importante entre un sistema eléctrico de potencia clásico y un sistema de potencia de tipo industrial.

Para la persona que diseña o hace cálculos para ajustes de protecciones en las instalaciones eléctricas, o bien selecciona o verifica las características del equipo de interrupción, tiene la necesidad de hacer cálculos de corto circuito.

En este trabajo se presenta un fundamento teórico para explicar las causas, efectos y el comportamiento de las corrientes de corto circuito. Se mencionan también los pasos a seguir para calcular dichas corrientes, así como los métodos más utilizados. Finalmente se presenta el ejemplo práctico del cálculo de corto circuito para el proyecto, en el cual se hará el cálculo completo para diferentes fallas escogidas.

Para el ejemplo práctico se obtuvieron todos los datos impedancias, reactancias, relaciones  $X/R$ , de tablas con valores aprobados y estandarizados, ya que no contamos con datos reales de los equipos.

**CAPÍTULO 1**  
**CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO**



## CAPÍTULO 1

### CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

#### I.1 Consideraciones fundamentales.

Para que el uso de dispositivos de protección, interruptores y fusibles sea adecuado, la elección se hace en base a criterios de operación apropiada y segura teniendo en cuenta la corriente continua normal que conducen los mismos, su capacidad momentánea de corto circuito y su capacidad interruptiva.

En condiciones normales de operación, la carga consume una corriente proporcional al voltaje aplicado y a la impedancia de la carga. Si se presenta un corto circuito, el voltaje se aplica sólo a través de la baja impedancia de los conductores y del transformador, desde la fuente de voltaje hasta el punto del corto circuito, y ya no se le opone la impedancia normal de la carga.

Los interruptores seleccionados con base en la corriente que conducen en forma continua deben resistir e interrumpir las elevadas corrientes de corto circuito que se presentan. La carga normal que conduce el interruptor determina la corriente de carga, y esta no depende de la capacidad del sistema que la alimenta. Sin embargo, la magnitud de la corriente de corto circuito depende de la capacidad del sistema de suministro y es independiente de la carga normal.

Para ilustrar lo anterior, se muestra a continuación un ejemplo sencillo del cálculo de una corriente de falla, ver figura 1 en la página no. 3.

La impedancia que limita el flujo de la corriente a plena carga del motor, es principalmente la impedancia aparente del motor, cuyo valor es de 20 ohms.

Al ocurrir un corto circuito en el punto "F", la única impedancia que limita el flujo de la corriente de corto circuito es la impedancia del transformador  $Z_T=0.1\text{ohms}$  comparada con 20 ohms del motor. Por consiguiente, la corriente de corto circuito es 200 veces la corriente a plena carga.

A menos que el interruptor "A" sea capaz de interrumpir 1000 amperes, la corriente de corto circuito continuará circulando, causando grandes daños.



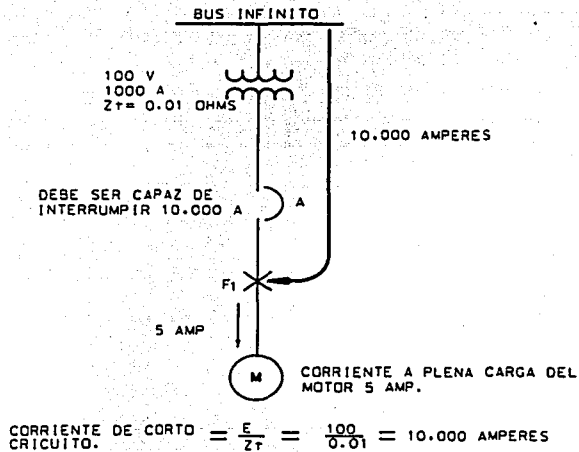
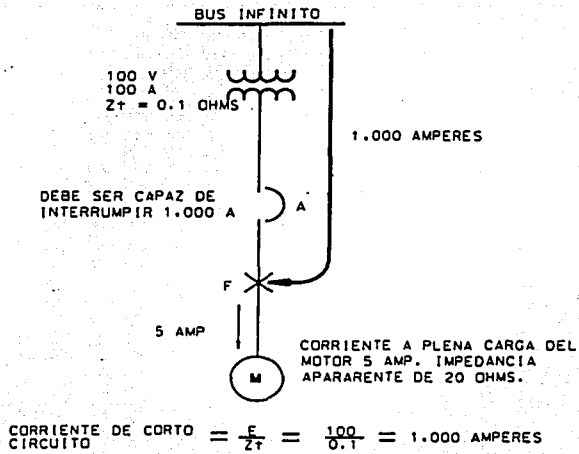


FIGURA 1

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Supóngase que la planta se amplia y que se instala un transformador más grande con capacidad de 1000 amperes, un corto circuito en el punto "F1" del esquema inferior de la fig. 1 estará ahora limitado por la impedancia del transformador más grande, cuyo valor es de  $Z_T = 0.01$  ohms solamente. Independientemente que la corriente a plena carga del motor sigue siendo de 5 amperes, la corriente de corto será ahora de 10,000 amperes y el interruptor "A" debe tener la capacidad suficiente para interrumpir dicha corriente.

Este ejemplo numérico demuestra que la magnitud de la corriente de corto circuito depende principalmente de la capacidad del sistema de suministro de potencia.

También demuestra que la posibilidad de que ocurran corto circuitos en un sistema es determinante para elegir la capacidad adecuada de interruptores y fusibles. Los dispositivos elegidos deben resistir e interrumpir con seguridad la corriente máxima de corto circuito que descarga el sistema sin que se destruyan.

Se puede establecer una analogía entre la función de un dispositivo interruptor a prueba de corto circuito y un dispositivo a prueba de explosión destinado a áreas peligrosas. El dispositivo debe ejecutar cierta función independientemente de que se produzca una explosión en su interior, y debe construirse en tal forma que la explosión se mantenga en su interior y a la vez resista los esfuerzos térmicos y mecánicos que acompañan a la misma. Además de trabajar normalmente, el dispositivo debe ser a prueba de explosión en la misma forma que un dispositivo interruptor. Este dispositivo también debe ser a prueba de corto circuito para evitar la destrucción del mismo y la posible propagación de efectos térmicos y mecánicos.

La comparación de cargas normales y corrientes de corto circuito con el flujo de agua en las plantas hidroeléctricas ilustra otra analogía. La carga normal de la turbina determina el flujo de agua en condiciones normales de operación y no tiene relación con la magnitud del embalse que está atrás del muro de contención. Si éste se rompe, la cantidad de agua que fluye depende de la magnitud del embalse y no tiene relación con la carga normal de las turbinas.

El flujo normal de agua se compara al flujo normal de corriente eléctrica. Si el muro de contención se rompe, este flujo de agua es similar al flujo de corriente de corto circuito que produce efectos indeseables. Los dispositivos interruptores evitan tales percances debido a que tienen la capacidad adecuada de corto circuito.

La protección selectiva coordinada que se usa en los sistemas modernos de alimentación asegura el aislamiento efectivo de las secciones dañadas de un sistema, permitiendo que el resto del mismo opere en forma normal. El aislamiento de la falla mediante los interruptores cercanos a la misma se logra efectuando los pasos siguientes: cálculo cuidadoso del corto circuito, estudio detallado de las características de tiempo y corriente de los dispositivos protectores y selección de la capacidad adecuada para resistir el corto circuito.

Las consecuencias de una selección inadecuada de los dispositivos de interrupción y protección pueden ser desastrosas. Cuando el equipo de protección contra corto circuito no se selecciona cuidadosamente o cuando se elige en base al ahorro en el costo de la instalación, se obtiene una protección inadecuada. Si los dispositivos fallan aunque sea una vez durante su vida útil, entonces toda la inversión que se ha hecho en estos dispositivos es inútil. El público no se entera de muchos percances desastrosos que causan la fallas de corriente debidas a la selección inadecuada de equipo de protección.

## 1.2 Fuentes de corriente de corto circuito.

La magnitud de las corrientes de corto circuito depende de las diversas fuentes que las generan, de sus reactancias y de las reactancias del sistema hasta el punto de falla. Las fuentes de corrientes de corto circuito son: sistemas de suministro público, generadores, motores síncronos y de inducción, ver figura 2 en la página no. 9.

**El sistema de suministro público** generalmente proporciona información a cerca de su posible corriente de corto circuito. Debido a que el sistema de suministro es mucho mayor que el sistema del usuario, la disminución de corriente simétrica de corto circuito se percibe muy poco o nada durante una falla, ver A de la figura 3 en la página no. 10.

**Los generadores** del sistema del usuario pueden ser una fuente de corriente de corto circuito. Estos están impulsados por motores primarios, como turbinas de vapor o gas, motores diesel y ruedas hidráulicas. Cuando se presenta un corto circuito, la energía primaria impulsa al generador y éste continúa produciendo voltaje, ya que la excitación del campo se mantiene debido a la rotación del generador a velocidad normal.

El voltaje generado produce un corto circuito con una corriente de gran magnitud que fluye hacia la falla. Solamente la reactancia del generador y la del circuito entre el generador y el punto de falla limitan este flujo. La reactancia de un generador cambia con el tiempo después del inicio de la falla. La reactancia se compone de los siguientes valores:

$X''_d$  = Reactancia subtransitoria, la cual determina la corriente de corto circuito inmediatamente después del inicio de la falla. Este valor dura unos pocos ciclos después de que ocurre la falla y se incrementa al siguiente valor en aproximadamente 0.1 de segundo.

$X'_d$  = Reactancia transitoria, que dura aproximadamente dos segundos y va aumentando hasta alcanzar el valor definitivo.

$X_d$  = Reactancia síncrona, la cual determina el flujo de corriente después de que se alcanza una condición de estado estacionario. No es efectiva hasta varios segundos después de que ocurrió el corto circuito.

Los generadores tienen una reactancia variable que aumenta en magnitud con el tiempo. Por consiguiente, la corriente de corto circuito disminuye exponencialmente con el tiempo desde un valor inicial alto a un nivel en estado constante más bajo, ver B de la figura 3 en la página no. 10. La velocidad de disminución depende de las constantes del generador. La información proporcionada por el fabricante del generador incluye los valores mínimos de  $X''_d$  y  $X'_d$ . Estos se usan para calcular la máxima corriente de corto circuito posible.

**Los motores síncronos** se comportan en forma similar a los generadores síncronos. Cuando ocurre una falla y el voltaje del sistema se reduce a un valor muy bajo, el motor síncrono deja de tomar energía del sistema para continuar su rotación y comienza a disminuir su velocidad, pero la inercia de la carga tiende a evitar que esta disminución sea muy rápida. De este modo la inercia hace las veces de un motor primario y dado que la excitación se mantiene, el motor se comporta como un generador suministrando corriente de corto circuito durante varios ciclos después de que ocurre el corto circuito, ver C de la figura 3 en la página no. 10.

Las reactancias variables de los motores síncronos se designan de la misma manera que las de un generador. Sin embargo, los valores de  $X''_d$ ,  $X'_d$  y  $X_d$  son diferentes. La magnitud de la corriente de corto circuito debida a los motores síncronos también depende de la capacidad en hp, voltaje nominal y reactancia de los motores, así como de la reactancia del sistema hasta el punto de falla.

**Los motores de inducción** aportan corriente de corto circuito cuando, después de ocurrir una falla, el motor continúa en movimiento debido a la inercia de la carga y el rotor, y se comporta como un generador. Pero hay una gran diferencia en la forma en que contribuyen a la corriente de corto circuito los motores de inducción y los síncronos.

El flujo de campo del motor de inducción se produce por la inducción del estator y no por el devanado del campo de cc. Debido a que este flujo disminuye rápidamente después de la falla, la aportación del motor de inducción disminuye también con rapidez y desaparece por completo después de unos pocos ciclos. No hay aportación de corriente de falla en estado estacionario, y por lo tanto, a los motores de inducción se les asigna sólo un valor de reactancia subtransitoria,  $X''_d$ .

El valor de  $X''_d$  es casi igual a la de la reactancia presente con el rotor estático. De ahí que el valor simétrico inicial de la corriente de corto circuito es casi igual al del voltaje total de la corriente de arranque del motor, que tiene un valor entre 600 y 900% de la corriente de carga normal, ver D de la figura 3 en la página no. 10. La magnitud de la corriente de corto circuito que aporta el motor de inducción depende de la potencia, voltaje nominal y reactancia del motor, así como de la reactancia del sistema hasta el punto de la falla.

**La corriente total** simétrica de corto circuito es una combinación de todas las fuentes de corriente de corto circuito que se han descrito. La red de suministro público, los generadores, los motores síncronos y de inducción; todos ellos contribuyen con corriente de corto circuito durante una falla. El flujo en las máquinas disminuye con el tiempo después del inicio de la falla, por lo tanto su aportación de corriente de falla también disminuye con el tiempo.

Por consiguiente, la suma total resultante de corriente de corto circuito disminuye con el tiempo, ver E de la figura 3 en la página no. 10. La magnitud de la corriente tiene el valor más alto durante el primer medio ciclo, disminuyendo este valor después de unos cuantos ciclos. Después de uno o dos ciclos la aportación del motor de inducción desaparece.

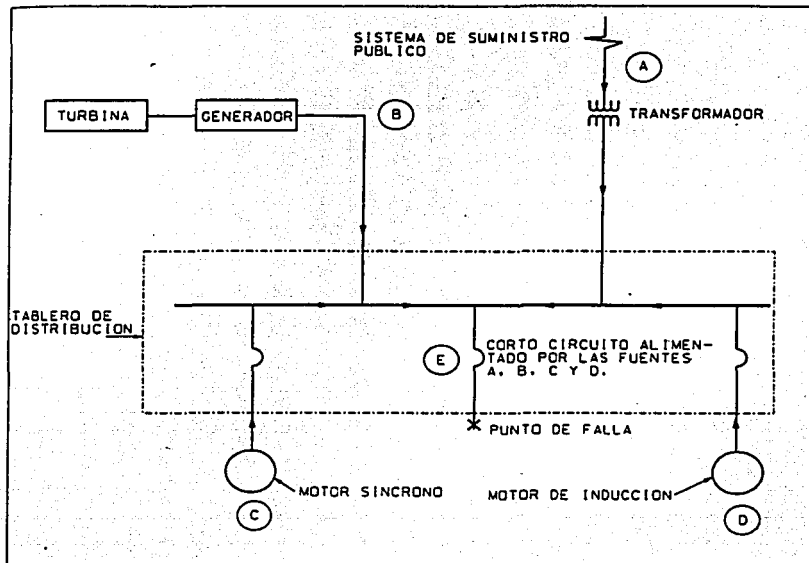


FIGURA 2 LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO QUE FLUYE HACIA EL PUNTO DE LA FALLA TIENE UNA APORTACION DE DIFERENTES FUENTES POSIBLES. INCLUYENDO EL SISTEMA DE SUMINISTRO PUBLICO, LOS GENERADORES Y LOS MOTORES DE LA PLANTA.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

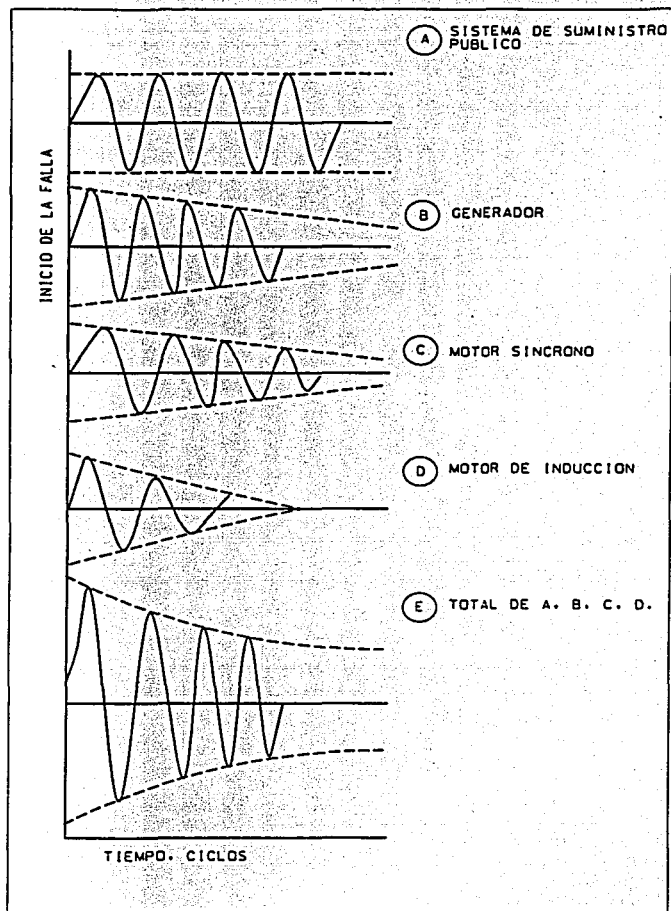


FIGURA 3 LA CORRIENTE TOTAL SIMETRICA DE CORTO CIRCUITO ES LA SUMA DE LAS CORRIENTES DE FALLA QUE APORTAN DIFERENTES FUENTES. CADA UNA CON UN COMPORTAMIENTO CARACTERISTICO.



### 1.3 Corrientes de corto circuito simétricas y asimétricas.

Las palabras "simétrica" y "asimétrica" describen la forma de las ondas de corriente alterna, alrededor de su eje cero. Si las equivalentes de los picos de las ondas de corriente son simétricas alrededor del eje cero, se les denomina "envolventes de corriente simétrica"; si las envolventes no son simétricas alrededor del eje cero de los ejes, se les denomina entonces "envolventes de corriente asimétrica". En cualquier caso, la envolvente es una línea que se traza uniendo los picos de las ondas, la mayoría de las corrientes de corto circuito son casi siempre asimétricas, durante los primeros ciclos después de la ocurrencia del corto circuito, la corriente asimétrica está en su máximo durante el primer ciclo después que el corto circuito ocurre y en unos pocos ciclos después se transforma en simétrica.

Tratándose de una corriente de corto circuito, existe una relación con las mediciones de la raíz media cuadrática (rmc) o valor efectivo de su onda senoidal. Estas ondas de corriente se clasifican en dos grupos:

Una onda de corriente senoidal simétrica es una corriente alterna en equilibrio con respecto a la línea cero; en este caso el eje de la onda, ver figura 4 en la página no. 13.

Una onda de corriente senoidal asimétrica es una corriente alterna no equilibrada con respecto a la línea cero, que en este caso no coincide con el eje de la onda ver figura 5 en la página no. 14.

Hasta ahora se ha considerado sólo la componente simétrica de la aportación de corriente de corto circuito, pero además hay que tomar en cuenta que la magnitud de esta corriente se aumenta aún más durante los primeros ciclos debido a la componente llamada de CC.

La componente de CC causa que la onda de corto circuito sea asimétrica y disminuya con el tiempo, lo que ocasiona una diferencia aún mayor en magnitud entre el primer ciclo (después del inicio de la falla) y varios ciclos más tarde.

Las ondas de corriente de corto circuito en los sistemas industriales de alimentación son principalmente de forma senoidal. La resistencia de los circuitos de potencia normales es de poca importancia en comparación con su reactancia. Además, cuando ocurre un corto circuito, la mayor parte de la resistencia se elimina permaneciendo un circuito altamente reactivo.

Si en este circuito ocurre una falla en el instante del voltaje pico de la onda, la corriente de corto circuito comienza casi en cero y su onda senoidal que debe estar 90 grados fuera de fase con respecto a la de voltaje, es totalmente simétrica con respecto al eje cero, ver figura 6 en la página no. 15.

Si el corto circuito ocurre en el punto cero de la onda de voltaje, la corriente, también con inicio en cero, no se puede incrementar con el voltaje ni permanecer en fase con él. La onda de corriente debe retrasarse 90 grados con respecto al voltaje, y por lo tanto, se desplaza del eje cero. A medida que el voltaje se aproxima a su pico, la onda de corriente continúa incrementándose hasta que el voltaje se vuelve cero, produciendo una corriente de corto circuito totalmente asimétrica, ver figura 7 en la página no. 16.

Se puede concebir la corriente asimétrica total como corriente simétrica que tiene sobrepuesta una componente de CC, ver figura 8 en la página no. 17. La componente de CC representa el desplazamiento de la onda senoidal desde el eje cero. Un corto circuito se puede presentar en cualquier punto entre los valores cero y pico de voltaje. El desplazamiento de la onda de corriente de corto circuito tiene lugar entre los dos extremos, dependiendo del punto de la onda de voltaje en el cual ocurre el corto circuito, ver figura 9 en la página no. 18.

Todo circuito real tiene resistencia, y ésta causa que la componente de CC disminuya a cero varios ciclos después de que se inicia la falla. El efecto resultante es la transformación de una corriente inicial asimétrica a una simétrica. Se considera que la componente de CC se genera en el sistema de corriente alterna y no por alguna fuente externa. Por lo tanto, su energía se disipará como una pérdida de  $I^2R$  en la resistencia del circuito, ver figura 10 en la página no. 19.

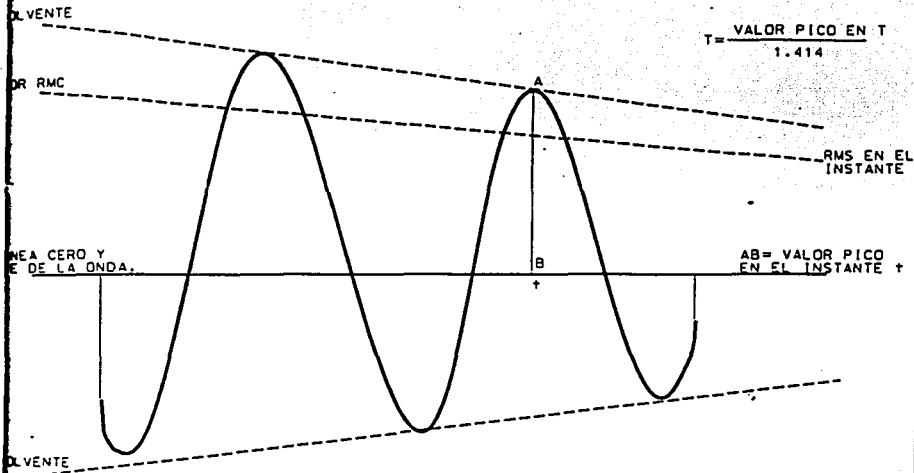


FIGURA 4 UNA ONDA SENOIDAL SIMETRICA TIENE SU EJE EN COINCIDENCIA CON EL EJE CERO ESTABLECIDO EN CONDICIONES NORMALES. LA ONDA SENOIDAL PUEDE DISMINUIR EN MAGNITUD.

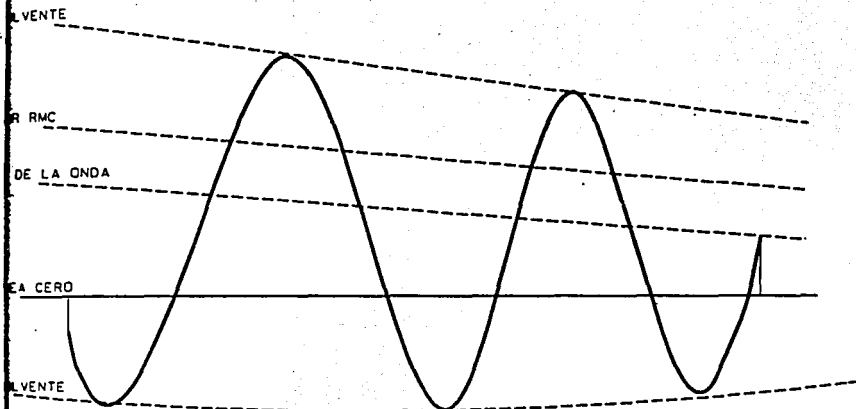


FIGURA 5 EL EJE DE UNA ONDA SENOIDAL ASIMETRICA NO COINCIDE CON EL EJE NORMAL CERO. LA ENVOLVENTE DEFINE LOS VALORES PICO DE LA ONDA EN TORNO A SU PROPIO EJE.

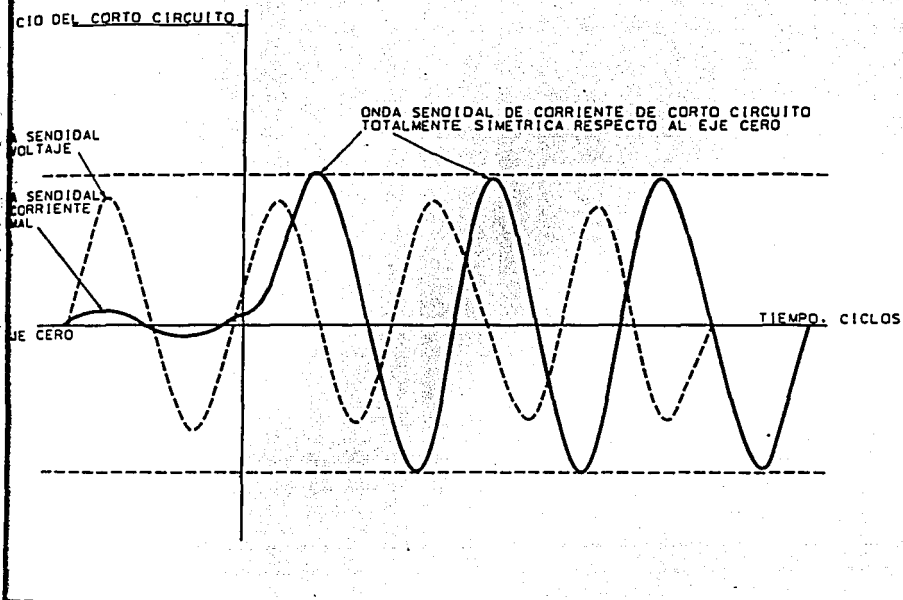


FIGURA 6 CUANDO EL CORTO CIRCUITO OCURRE EN EL INSTANTE DE UN VOLTAJE PICO Y EL CORTO CIRCUITO ES TOTALMENTE REACTIVO. LA ONDA DE CORTO CIRCUITO ES SIMETRICA EN TORNO AL EJE CERO.

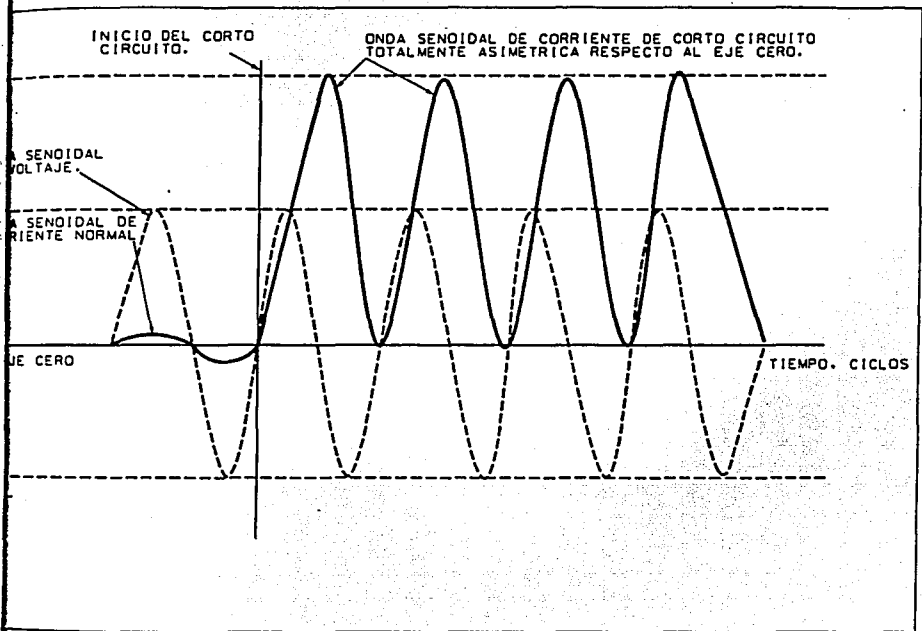


FIGURA 7 CUANDO EL CORTO CIRCUITO OCURRE A UN VOLTAJE CERO Y ES TOTALMENTE REACTIVO. LA ONDA DE CORTO CIRCUITO NO TIENE SIMETRIA CON RESPECTO AL EJE CERO

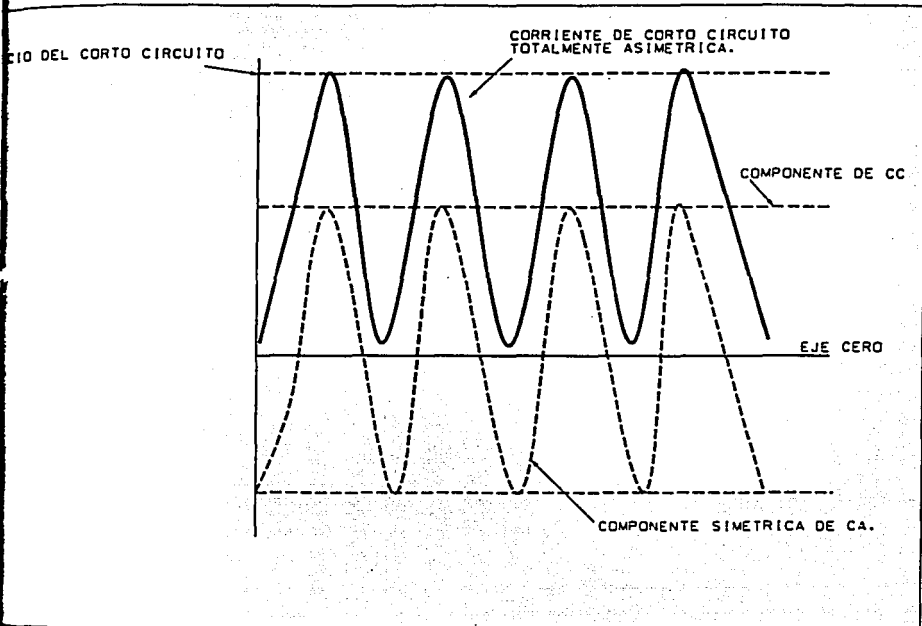


FIGURA 8 LA CORRIENTE ASIMETRICA DE CORTO CIRCUITO SE PUEDE CONCEBIR COMO LA SUMA DE UNA CORRIENTE ALTERNA SIMETRICA Y UNA COMPONENTE DE CC SUPERPUESTA A ELLA.

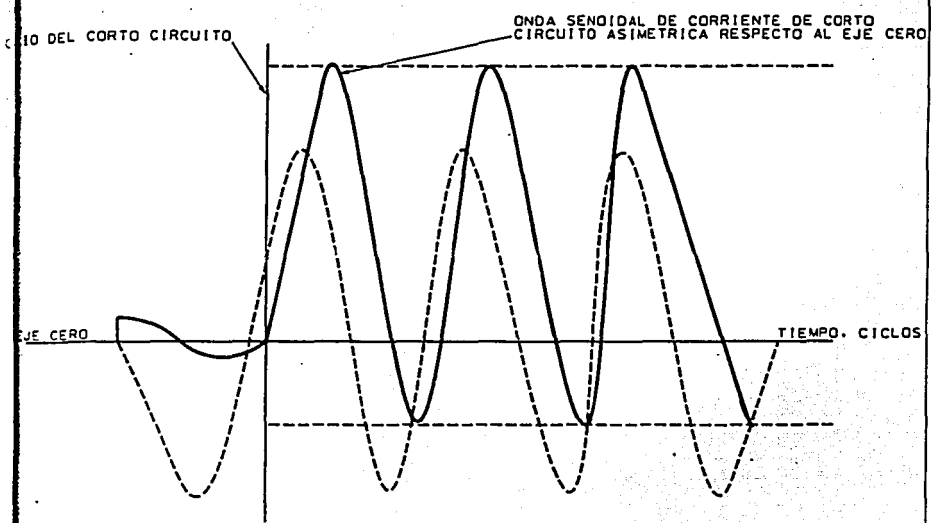


FIGURA 9 EN UN CIRCUITO REAL. EL CORTO CIRCUITO OCURRE CON FRECUENCIA EN ALGUN PUNTO ENTRE LOS VALORES CERO Y PICO DE LA ONDA DE VOLTAJE. EL CIRCUITO MOSTRADO ES TOTALMENTE REACTIVO.



MAXIMA CORRIENTE PICO ASIMETRICA INSTANTANEA = COMPONENTE DE CC +  
COMPONENTE SIMETRICA DE CA.  
EI VALOR A MEDIO CICLO DEPENDE DEL VALOR  $X/R$ .

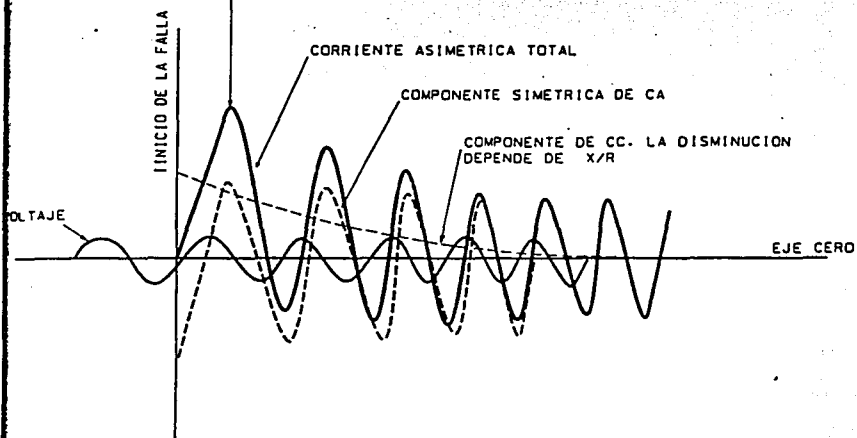


FIGURA 10 LA COMPONENTE DE CC EN UN CIRCUITO REAL DISMINUYE CON EL TIEMPO DEBIDO A LA PRESENCIA DE ALGUNA RESISTENCIA.

#### **1.4 Los dispositivos que limitan la corriente de corto circuito.**

Durante los cortos circuitos son las impedancias de los transformadores, los reactores, cables, barras conductoras, fusibles, limitadores de corriente y cualesquiera otras impedancias del circuito. Debido a su reactancia, los transformadores reducen la magnitud de las corrientes de corto circuito producidas por las fuentes a las cuales están conectados.

Los reactores se usan para limitar las corrientes de corto circuito mediante la inserción deliberada de una reactancia en el circuito. Sin embargo, los reactores tienen algunas desventajas muy marcadas. Producen caídas de voltaje que pueden ser el motivo de disminuciones momentáneas de voltaje en el sistema cuando ocurre una falla, o cuando se arrancan motores de gran capacidad. Pueden afectar desfavorablemente la regulación de voltaje y pueden activar los dispositivos de bajo voltaje, además de consumir energía. Estas desventajas deben tomarse en cuenta cuando hay que elegir entre reactores, disyuntores de mayor capacidad de interrupción o fusibles limitadores de corriente.

Los cables y barras conductoras son parte de la conexión entre las fuentes de corriente de corto circuito y el punto de la falla. Su impedancia natural limita la corriente de cortocircuito, y la cuantía de la limitación depende de la naturaleza, calibre y longitud del cable. Algunos diseños de barras conductoras se prestan para incrementar la impedancia deliberadamente. Los valores de resistencia, reactancia e impedancia de cables y barras conductoras se encuentran en los catálogos de los fabricantes.

Los fusibles limitadores de corriente abren el circuito antes de que la corriente de corto circuito alcance su valor pico, ver figura 11 en la página no. 22. La interrupción sucede generalmente en el primer cuarto de ciclo. Como se muestra en la figura 11, el tiempo total de interrupción es la suma de un tiempo de fusión mientras que el elemento del fusible se calienta y se funde, y un tiempo de arco luego de que el elemento se funde y los productos gaseosos del arco se enfrían debido a los efectos de los componentes adicionales del fusible. El arco origina impedancia, la cual limita la corriente reduciéndola finalmente a cero.

El fusible limitador de corriente tiene una baja impedancia hasta que una corriente muy alta empieza a fluir a través del mismo. Es a la vez un dispositivo limitador de corriente e interruptor de corriente de corto circuito, mientras que los fusibles y disyuntores normales sólo son dispositivos de interrupción.

Un corto circuito tiene tres clases de componentes principales: (1) fuentes que tienen reactancias variables con el tiempo y que producen corrientes de corto circuito, (2) componentes de circuito con reactancias constantes que limitan la magnitud de la corriente de corto circuito y (3) interruptores y fusibles que interrumpen el flujo de corriente de corto circuito. En el caso de una falla específica, el primer paso en el cálculo de corto circuito es la determinación de sus reactancias. La corriente de corto circuito en el primer medio ciclo se determina mediante las reactancias subtransitorias,  $X''_d$ . Estas determinan el esfuerzo instantáneo de interruptores y fusibles, que es el mayor esfuerzo que deben de resistir.

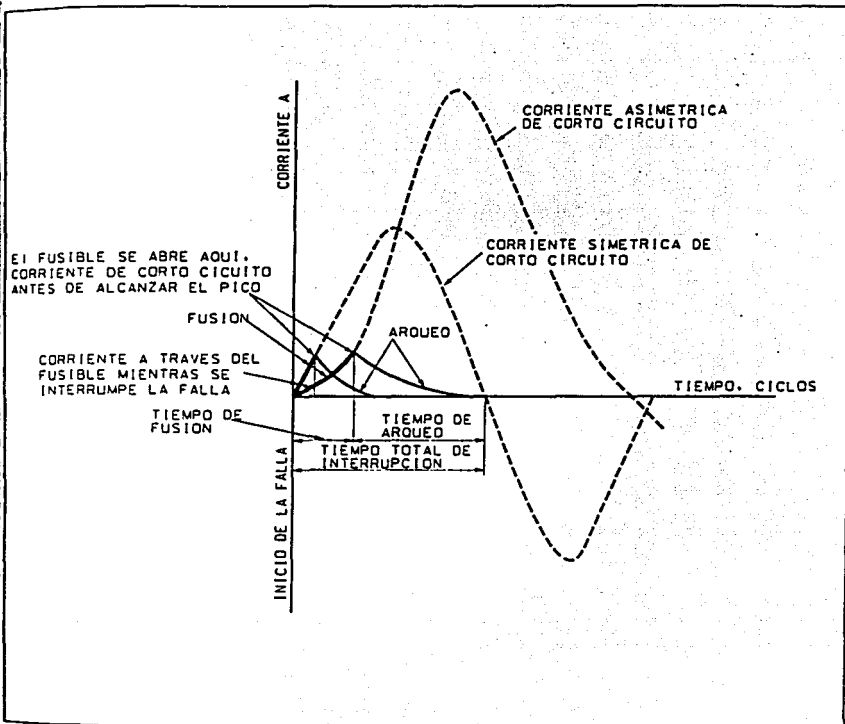


FIGURA 11 LOS FUSIBLES LIMITADORES DE CORRIENTE INTERRUMPEN EN  $\frac{1}{4}$  DE CICLO LA FALLA DE AMBAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO, SIMETRICAS Y ASIMETRICAS. EL ELEMENTO DEL FUSIBLE SE FUNDE ANTES DE ALCANZAR EL PICO.

## 1.5 Relación X/R y factor de asimetría

El factor X/R es la relación de la reactancia a la resistencia del circuito considerado. La disminución o decremento de la componente de CC depende de la relación X/R. X corresponde a la reactancia y R a la resistencia de todos los componentes del circuito entre la fuente y la falla. Si  $R=0$ , la relación es infinita y la componente de CC nunca disminuye. Si  $X=0$ , la relación es cero y la componente de CC disminuye instantáneamente.

En el caso de relaciones intermedias, la componente de CC disminuye con el transcurso del tiempo a cero, dependiendo la duración de éste lapso de la relación específica X/R. A mayor reactancia con respecto a la resistencia, más tiempo tardará en disminuir la componente de CC.

La obtención de las componentes de CC se simplifica mediante el uso de multiplicadores aceptados. Estos multiplicadores convierten los amperes rmc simétricos calculados a amperes rmc asimétricos, incluyendo la componente de CC.

En la aplicación de los dispositivos protectores contra corto circuito, se consideran las componentes máximas de CC para el esfuerzo, momentáneo de interruptores. Así se tiene la seguridad de que los dispositivos protectores instalados resistirán la corriente máxima de corto circuito que puede ocurrir en el sistema.

**Para el esfuerzo momentáneo**, todas las reactancias subtransitorias de las fuentes deben considerarse en el primer medio ciclo de la corriente simétrica de corto circuito, antes de usar el multiplicador. Para efectuar cálculos prácticos generalmente se usa un multiplicador de 1.5 a 1.6 en circuitos de voltaje medio y alto, y aproximadamente de 1.25 en circuitos de bajo voltaje. La tabla mostrada es una lista abreviada de multiplicadores publicada por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA), ver Tabla no. 1 en la siguiente página.

**El esfuerzo de interrupción** se basa en la magnitud de la corriente de corto circuito en el momento en que se separan los contactos del disyuntor o en el que se funde el fusible. El disyuntor interrumpe el flujo de corriente después de tres, cinco u ocho ciclos. En las plantas industriales generalmente se usan los disyuntores de ocho ciclos. Después de ocho ciclos la aportación de los motores de inducción desaparece y la reactancia de los motores sincrónicos pasa de subtransitoria a transitoria.

**TABLA No. 1 RELACION A AMPERES RMC SIMETRICOS**

Factor de potencia de corto circuito,%	Relación X/R de corto circuito	Pico instantáneo máximo 1- $\phi$ AMP	Máximo 1- $\phi$ AMP rmc a 1/2 ciclo	Promedio 3- $\phi$ AMP rmc a 1/2 ciclo
5	10.974	2.625	1.568	1.301
10	9.9301	2.455	1.436	1.229
15	6.5912	2.309	1.330	1.171
20	4.8990	2.183	1.247	1.127
25	3.8730	2.074	1.181	1.093
30	3.1798	1.978	1.130	1.066
35	2.6764	1.894	1.091	1.046
40	2.2913	1.819	1.062	1.031
45	1.9845	1.753	1.041	1.020
50	1.7321	1.694	1.026	1.013
55	1.5185	1.641	1.015	1.008
60	1.3333	1.594	1.009	1.004
65	1.1691	1.553	1.004	1.002
70	1.0202	1.517	1.002	1.001

(De la Tabla de multiplicadores publicada por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA))

Este es el motivo por el cual para obtener el esfuerzo de interrupción de los disyuntores para más de 600 volts, se emplea la reactancia subtransitoria de los generadores y la reactancia transitoria de los motores sincronicos, sin tomar en cuenta a los motores de inducción. La componente de CC casi desaparece después de ocho ciclos, y por lo tanto, se usa un multiplicador de 1.0 para estos disyuntores.

La relación X/R para los transformadores se muestra en la curva de la figura 12 de la página no. 25, la relación X/R para los generadores y pequeños motores sincronicos, se da entre la reactancia subtransitoria y la resistencia de armadura referidas a la potencia en KVA del generador ó del motor y su voltaje nominal.

Estos valores se pueden ver en las curvas de la figura 13 en la página no. 26. Lo mismo se hace para las relaciones X/R de los motores de inducción ver figura 14 en la página no. 27.

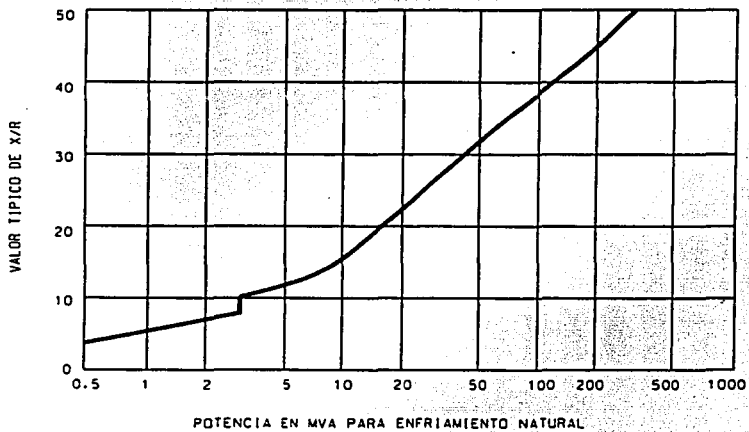


FIGURA 12 VALORES DE RELACION X/R PARA TRANSFORMADORES  
( DE LA FIGURA N1.1 DE ANSI/IEEE STD. 141-1986 )

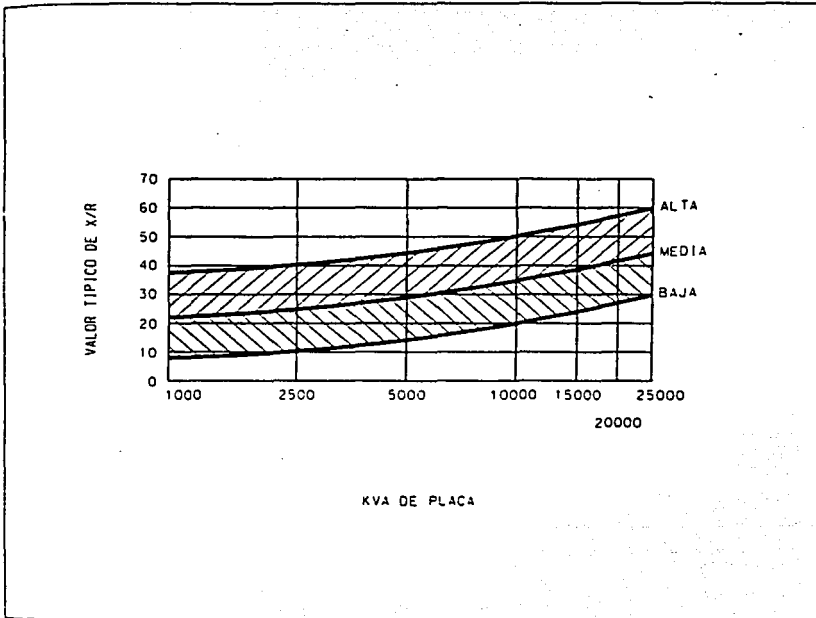


FIGURA 13 RANGOS DE VALORES DE X/R PARA  
 GENERADORES PEQUEÑOS Y MOTORES SÍNCRONOS  
 ( ROTOR SCLIDO Y DE POLOS SALIENTES )  
 ( DE LA FIGURA N1.2 DE ANSI/IEEE STD. 141-1986 )



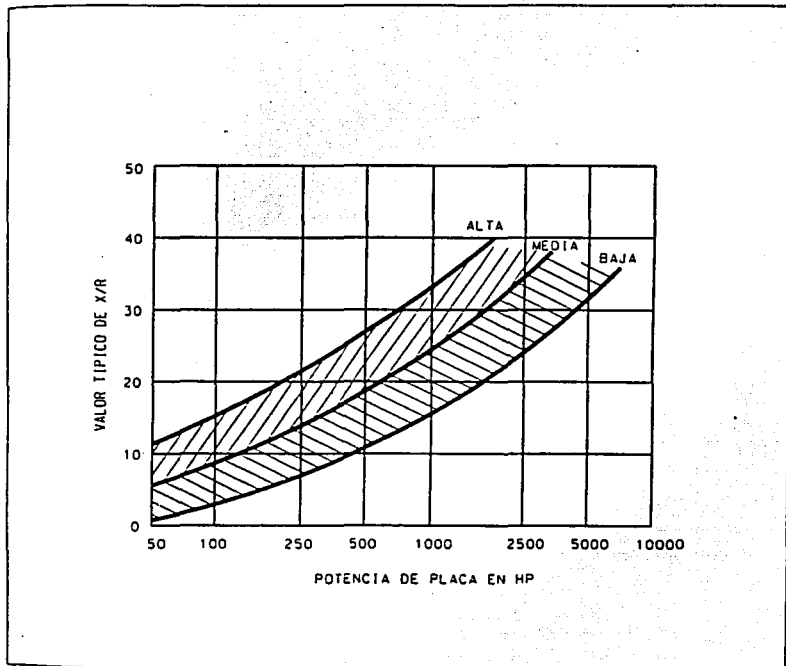


FIGURA 14 RANGO DE VALORES DE X/R PARA MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN  
 ( DE LA FIGURA N1.3 DE ANSI/IEEE STD. 141-1986 )

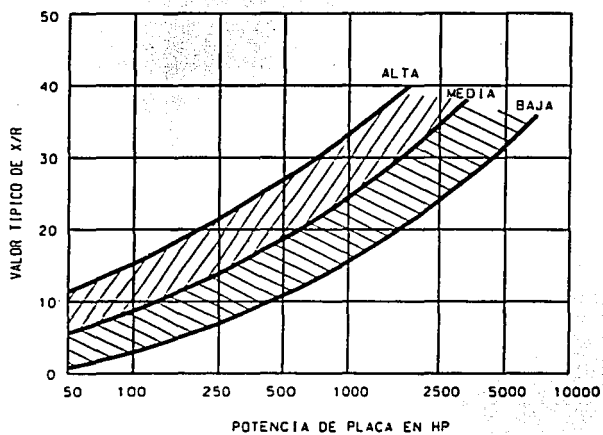


FIGURA 14 RANGO DE VALORES DE X/R PARA MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN  
( DE LA FIGURA N1.3 DE ANSI/IEEE STD. 141-1986 )

# CAPÍTULO 2

## MÉTODO DE CÁLCULO



## CAPÍTULO 2

### MÉTODO DE CÁLCULO

#### 2.1 Selección del método de cálculo

Para determinar los valores de corto circuito existen básicamente tres métodos: componentes simétricas, en por unidad y el de los MVAs

##### a) Método de las componentes simétricas

El método de las componentes simétricas permite expresar las cantidades de las tres fases desequilibradas como la suma de tres componentes; positiva, negativa y cero. Las dos primeras son sistemas trifásicos equilibrados o simétricos. Las tres cantidades del sistema de secuencia cero son iguales y están en fase.

Puesto que las tres componentes de secuencia son independientes hasta el punto de la falla, se necesitan tres diagramas de redes. La red de secuencia positiva muestra voltajes de generadores, así como reactancias de generadores, transformadores y líneas.

La red de secuencia negativa generalmente es una copia de la red de secuencia positiva, con excepción de que no se muestran voltajes de generadores. La reactancia de secuencia negativa de la maquinaria síncrona ocasionalmente puede diferir de la reactancia de secuencia positiva.

La red de secuencia cero generalmente es similar a la red de secuencia negativa con excepción de que se presta atención especial a las conexiones de los transformadores. Los transformadores con conexión a tierra Y-Y permiten el flujo de corriente de secuencia cero de un lado al otro del banco. Los bancos conectados en Y-delta permiten que la corriente fluya en el neutro conectado a tierra, pero bloquean el paso de la corriente de secuencia cero de un lado al otro del banco. Las resistencias y los reactores entre los neutros de las máquinas o transformadores y tierra se ilustran al triple de su valor nominal.

##### b) Método en por unidad

El método unitario aplicado a cálculos de corto circuito convierte todas las diferentes reactancias de un circuito a una relación con base en un número convenientemente elegido. Este número base es un valor en kVA.

### c) Método de los MVAs

El método de los MVAs básicamente es una modificación del método ohmico en el cual la impedancia de un circuito es la suma de las impedancias de sus componentes, y en virtud de que por definición la admitancia es la reciproca de la impedancia, se tiene que la reciproca de la admitancia del sistema es la suma de las reciprocas de las admitancias componentes.

En este trabajo se escogió el método unitario, ya que las reactancias expresadas en valores unitarios se pueden combinar y comparar fácilmente, si se usa más de un nivel de voltaje no es necesario efectuar la conversión de un nivel de voltaje a otro, además no es tan complicado como el método de las componentes simétricas y se obtienen resultados muy cercanos. El método unitario se emplea en publicaciones de IEEE. El valor unitario es igual a la relación:

$$\text{Valor unitario} = \frac{\text{Un número}}{\text{Un número base}}$$

## 2.2 Tipos de fallas

Las fallas ó corto circuitos, pueden ocurrir en un sistema eléctrico de potencia trifásico en distintas formas. El dispositivo de protección o equipo, debe tener la capacidad de interrumpir o de soportar cualquier tipo de falla que se pueda presentar. Las fallas que se pueden presentar son las que se indican a continuación, pero, para la determinación de las características del equipo de interrupción.

Se considera la falla trifásica, aún cuando la probabilidad de ocurrencia de esta sea baja y casi siempre sea causada por motivos accidentales.

### a) Falla trifásica sólida.

Una falla trifásica sólida describe la condición en que los tres conductores, es decir, las tres fases, se unen físicamente con un valor de cero impedancia entre ellas, como si se soldaran o atornillaran físicamente.

Aún cuando este tipo de condiciones de falla no es el más frecuente en ocurrencia, resulta, por lo general, el de mayor valor, y por esta razón resulta el cálculo básico para las instalaciones industriales.

### **b) Falla de fase a fase sólida.**

En la mayoría de los sistemas trifásicos, los niveles de falla sólida de fase a fase son de aproximadamente el 87%, de la corriente de falla trifásica sólida, debido a esto, el cálculo de esta falla, no siempre se requiere, ya que no representa el máximo valor.

### **c) Falla de Línea (fase) a tierra sólida.**

En sistemas con el neutro, sólidamente conectada a tierra, la falla sólida de fase a tierra es por lo general, igual o ligeramente menor que la falla sólida trifásica, excepto cuando se conectan los neutros a tierra a través de un valor elevado de impedancia en el que el valor de corriente es significativamente menor.

El cálculo de la falla de línea a tierra, es necesario en las instalaciones comerciales e industriales que tienen el neutro sólidamente aterrizado en el lado de bajo voltaje, para el cálculo de la falla de línea a tierra, se requiere del uso de técnicas por componentes simétricas.

La falla por corto circuito que tiene la probabilidad de ocurrencia mayor es la de línea a tierra (80% aproximadamente) y en último término la trifásica (5% aproximadamente), y es de estos dos tipos de fallas de las cuales se efectúan normalmente los estudios de corto circuito. La primera por ser la más probable de ocurrir y la segunda porque a pesar de ser la menos probable en ocurrencia es la que comúnmente somete a los esfuerzos más severos a los equipos, dispositivos de protección, de desconexión, cables, etc., y además desde el punto de vista analítico resulta la más fácil de estudiar.

## 2.3 Pasos a seguir en el cálculo

Para hacer un estudio de corto circuito se siguen los siguientes pasos:

1. **Elaboración del diagrama unifilar.** Mostrando todas las fuentes de corto circuito y todos los elementos de impedancia. El diagrama unifilar debe incluir el suministro del exterior, generadores, motores sincrónicos y de inducción, así como los elementos importantes por impedancia tales como transformadores, reactores, cables, barras conductoras e interruptores.
2. **Selección de una base apropiada.** En kVA que sea común para todos los niveles de voltaje se puede usar un número entero como 1,000, 10,000 ó 100,000. Se seleccionan voltajes básicos para cada nivel de voltaje nominal. Generalmente se seleccionan los voltajes de los transformadores como valores base.
3. **Obtención de los datos del equipo y elementos importantes.** Preferentemente de la información que proporciona el fabricante, las Tablas 2 y 3 muestran valores aprobados y estandarizados, así como las figuras 12, 13 y 14 del capítulo anterior que muestran las relaciones X/R de transformadores, motores sincrónicos y de inducción.
4. **Localización de los puntos de falla a analizar.** En el diagrama unifilar se muestra la localización de los puntos de falla a analizar. Los valores de corriente de corto circuito en los diferentes puntos del sistema se usarán para la selección adecuada de todos los dispositivos protectores del Sistema Eléctrico de la Planta Industrial.
5. **Conversión de las resistencias, reactancias e impedancias en valores en por unidad sobre una base seleccionada en kVA.** El sistema unitario es un medio conveniente para expresar diferentes números, facilitando su comparación.
6. **Elaboración del diagrama de impedancias.** Convirtiendo el diagrama unifilar a valores unitarios sobre una base seleccionada. Este diagrama debe incluir todas las resistencias y reactancias importantes.

7. **Cálculo de la impedancia equivalente.** En una única que incluya todas las impedancias entre la barra conductora de reactancia cero y el punto de falla. La impedancia total equivalente expresada unitariamente sobre una base seleccionada, se usa para determinar la corriente de corto circuito y los kVA en el punto de falla.
8. **Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito.** Es la corriente de corto circuito ó kVA.
9. **Determinación de los factores de multiplicación, conociendo la relación X/R.** Aplicando los métodos de interpolación y extrapolación si es necesario para determinar los factores de multiplicación conociendo la relación X/R.
10. **Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito.** Aplicando los multiplicadores de desplazamiento. La Tabla no. 1, proporciona los multiplicadores apropiados para varias aplicaciones.



**TABLA No. 2 VALORES TIPICOS PARA MAQUINAS GIRATORIAS  
( EN P.U. DE LOS KVA DE LA MAQUINA )\***

	X"d	X'd
Turbine generators*		
2 poles	0.09	0.15
4 poles	0.15	0.23
Salient-pole generators with damper windings*		
12 poles or less	0.16	0.33
14 poles or more	0.21	0.33
Synchronous motors		
6 poles	0.15	0.23
8-14 poles	0.20	0.30
16 poles or more	0.28	0.40
Synchronous condensers*	0.24	0.37
Synchronous converters*		
600 V direct current	0.20	—
250 V direct current	0.33	—
Individual large induction motors, usually above 600 V	0.17	—
Smaller motors, usually 600 V and below See Table no. 3		

NOTE: Approximate synchronous motor kVA bases can be found from motor horsepower ratings as follows:

- 0.8 power factor motor - kVA base = hp rating
- 1.0 power factor motor - kVA base = 0.8 \* hp rating

- \* Use manufacture's specified values if available.
- + X'd not normally used in short-circuit calculations.

( De la Tabla N1.1 de ANSI/IEEE std. 141-1986 )

**TABLA No. 3 FACTORES DE MULTIPLICACION PARA REACTANCIAS  
( IMPEDANCIAS ) DE MOTORES DE INDUCCION**

Type of Rotating Machine	First-Cycle Network	Interrupting Network
Induction Motors		
All others, 50 hp and above	1.2 X"d*	3.0 X"d'
All smaller than 50 hp	1.67 X"d-	Neglect

- \* or estimate the first-cycle network X = 0.20 per unit based on motor rating
- + or estimate the first-cycle network X = 0.28 per unit based on motor rating.
- ' or estimate the interrupting network X = 0.50 per unit based on motor rating.

( De la Tabla 25 de ANSI/IEEE std. 141-1986 )

## 2.4 El método unitario.

Se usa con profusión en cálculos de corto circuito. Puesto que las corrientes de corto circuito dependen de los valores de las reactancias  $X$ , desde e incluyendo las fuentes hasta el punto de falla, el problema principal en el cálculo es la determinación de la impedancia total. Para obtenerla, primero se debe determinar la reactancia de cada fuente y elemento del circuito y entonces combinarlas en serie y en paralelo.

Después de obtener la impedancia total, se calcula la corriente simétrica de corto circuito,  $V$  es el voltaje del sistema y  $Z$  la impedancia total. El voltaje  $V$  es el voltaje de línea a neutro, es decir el voltaje de línea a línea dividido entre  $\sqrt{3}$ .

La impedancia  $Z$  se expresa mediante la fórmula  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ . Sin embargo, la resistencia no se toma en cuenta en cálculos de fallas mayores de 600 V, resultando un pequeño error de porcentaje que se consideré insignificante. En sistemas mayores de 600 V la resistencia de los cables es relativamente pequeña, y generalmente no se toma en cuenta. En sistemas de 600 V y menores, la resistencia de los alimentadores y barras conductoras debe tomarse en cuenta si su valor es mayor de un cuarto del valor de la reactancia entre la fuente y el punto de falla.

Hay tres sistemas principales para expresar las reactancias de los elementos de un circuito. Las reactancias pueden expresarse en ohms, en por ciento, o en unidades tomando como base un valor elegido en kVA. Las reactancias expresadas en valores unitarios se pueden combinar fácilmente si se usa más de un nivel de voltaje (no es necesario efectuar la conversión de un nivel de voltaje a otro). El método unitario se emplea en publicaciones del IEEE. El sistema unitario es un medio conveniente para expresar diferentes números, facilitando su comparación. El valor unitario es igual a la relación:

$$\text{Valor unitario} = \frac{\text{Un número}}{\text{Un número base elegido}}$$

El método unitario aplicado a cálculos de corto circuito convierte todas las diferentes reactancias de un circuito a una relación con base en un número convenientemente elegido. Este número base es un valor en kVA, frecuentemente el del transformador de mayor capacidad en el circuito, y es un número entero como 1,000 ó 10,000 kv

## 2.5 Expresiones a utilizar en el cálculo.

Si interpretamos que los kVA base son trifásicos y la tensión kV base es entre fases:

De ANSI/IEEE std. 141-1986:

**La fórmula 1.** Se usa para calcular la corriente base:

$$I_{base} = \frac{kVA_{base}(1000)}{\sqrt{3}(\text{volts base})}$$

**La fórmula 2.** Se usa para calcular la impedancia base:

$$Z_{base} = \frac{\text{volts base}}{\sqrt{3}(\text{amperes base})}$$

Las siguientes fórmulas son necesarias para convertir los datos de resistencia, reactancia e impedancia a valores unitarios y combinar éstos en una impedancia unitaria total sobre una base elegida:

**La fórmula 3.** Se usa para convertir los kVA posibles de corto circuito del servicio de suministro público a reactancia unitaria:

$$Z_s = \frac{kVA_{base}}{\text{corto} - \text{circuitokVA}}$$

**La fórmula 4.** Se usa para convertir las reactancias de cables, barras conductoras, bus ducto y otros elementos en ohms, a valores unitarios:

$$X_{pu} = \frac{\text{ohms}(kVA_{base})}{(kV_{base})^2(1000)}$$

**La fórmula 5.** Se usa para convertir la impedancia en por ciento basada en la capacidad nominal de un transformador a impedancia unitaria:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kV\text{Abase})}{kVA_{\text{nominal}}(100)}$$

**La fórmula 6.** Se usa para convertir las reactancias de motores obtenidas de la información de fabricantes o tablas basada en su capacidad nominal a reactancia unitaria:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(kV\text{Abase})}{kVA_{\text{nominal}}}$$

**La fórmula 7.** Se usa para calcular la impedancia total:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Las siguientes fórmulas son necesarias para la combinación de reactancias y resistencias en serie y paralelo.

**La fórmula 8.** Se usa para para la combinación de resistencias o reactancias en serie:

$$X = X_1 + X_2$$

**La fórmula 9.** Se usa para la combinación de dos resistencias o reactancias en paralelo:

$$X = \frac{X_1 X_2}{X_1 + X_2}$$

**La fórmula 10.** Se usa para la combinación de varias resistencias o reactancias en paralelo:

$$X = \frac{1}{\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4}}$$

**La fórmula 11.** Se usa para calcular los amperes de corto circuito simétricos:

$$I_{cc} = \frac{kV_{base}}{Z_{pu} \sqrt{3} (kV_{base})}$$

**La fórmula 12.** Se usa para calcular la potencia de corto circuito simétrica:

$$P_{cc} = \frac{kV_{base}}{Z_{pu}} = \sqrt{3} I_{cc} (kV_{base})$$

**La fórmula 13.** Se usa para calcular la corriente asimétrica:

$$I_{cc, asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times I_{cc, simétrica}$$

**La fórmula 14.** Se usa para calcular la potencia asimétrica:

$$P_{cc, asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times P_{cc, simétrica}$$

**La fórmula 15.** Se usa para convertir valores de resistencias y reactancias dadas en ohms/Km a ohms:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega / Km} \times \text{longitud}}{1000}$$

# CAPÍTULO 3

## CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO



## CAPÍTULO 3

### CÁLCULO DE CORTO CIRCUITO

#### 3.1 Aplicación del cálculo de corto circuito a instalaciones industriales.

Los métodos de cálculo de corto circuito, se puede decir, que son generales y aplicables a cualquier sistema eléctrico, sin embargo, en el caso de las instalaciones industriales, se deben hacer algunas consideraciones particulares, debido a que se tienen cargas en mediana y baja tensión, y por ejemplo, la resistencia que es despreciable en los sistemas eléctricos de potencia en alta tensión, en estos sistemas no lo son.

Las componentes que limitan la corriente durante los cortos circuitos son las impedancias de los transformadores, los reactores, cables, barras conductoras, fusibles limitadores de corriente, interruptores y cualesquiera otras impedancias del circuito. Debido a su reactancia, los transformadores reducen la magnitud de las corrientes de corto circuito producidas por las fuentes a las cuales están conectados. Los cables son parte de la conexión entre las fuentes de corriente de corto circuito y el punto de falla. Su impedancia natural limita la corriente de corto circuito, y la cuantía de la limitación depende de la naturaleza calibre y longitud del cable. En este trabajo haremos las siguientes consideraciones particulares; las impedancias de las barras conductoras, fusibles e interruptores serán despreciables, ya que dichas impedancias no son relevantes para la obtención de los resultados finales del cálculo de corto circuito.

Ya se examinarán los principios básicos del estudio de las corrientes de corto circuito, así como las diferentes fallas que pueden ocurrir en una instalación industrial. Ahora se puede aplicar un método de cálculo simplificado y confiable para calcular los valores correctos de las corrientes de corto circuito.

El método unitario es el más utilizado en cálculos de corto circuito de plantas industriales. Puesto que las corrientes de corto circuito dependen de los valores de las resistencias  $R$  y de las reactancias  $X$ , desde incluyendo las fuentes hasta el punto de falla, el problema principal en el cálculo es la determinación de la impedancia total.

Para obtenerla, primero se debe determinar la reactancia o impedancia de cada fuente y elemento del circuito, y entonces combinarlos en serie y paralelo. Después de obtener la impedancia total, se calcula la corriente simétrica de corto circuito. En este capítulo seguiremos los diez pasos que se mencionaron en el capítulo anterior para realizar el cálculo de corto circuito.

### **3.2 Elaboración del diagrama unifilar.**

El diseño del diagrama unifilar ésta apegado a las Normas y Reglamentos vigentes, los cuales son:

1. Normas Nom- 001- SEMP-1994
2. American National Standards Institute (ANSI)
3. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
4. National Electrical Manufacturers Association (NEMA)
5. Comision Electrotechnique Internationale (CEI)

El sistema de distribución seleccionado es Radial, en este sistema se tienen dos alimentadores de llegada (Suministrados por C.F.E.) y tres transformadores de potencia. Este sistema se usa en la Industria en la mayoría de los casos.

Este sistema, es seguro, fácil de operar y adecuado para agregar nuevos alimentadores, y subestaciones. Se tiene una buena regulación de tensión, porque los alimentadores secundarios normalmente son cortos. Se debe tomar en cuenta que una falla en un alimentador principal o en un transformador ocasionará una pérdida de servicio en el área que es alimentada por estos, hasta que el equipo sea reparado. Además el mantenimiento de equipo implica un paro total del área alimentada por este equipo.

El Diagrama Unifilar muestra todas las fuentes de corto circuito y todos los elementos de impedancias. Este diagrama incluye el suministro del exterior, un motor sincrónico que corresponde al Compresor Principal de Aire, así como también los motores de inducción, los centros de control de motores y los elementos importantes por su impedancia tales como los transformadores y los cables conductores, ver figuras 15, 16 y 17 en las páginas 40, 41 y 42 respectivamente.

### **3.3 Selección de una base apropiada.**

Seleccionamos una base apropiada en kVA que sea común para todos los niveles de voltaje. Para este sistema, kVA base = 1000 es una cifra conveniente.

También seleccionamos voltajes básicos distintos para cada nivel de voltaje nominal, los kV base seleccionados son 34.5 kV, 13.8 kV, 4.16 kV y 0.48 kV.





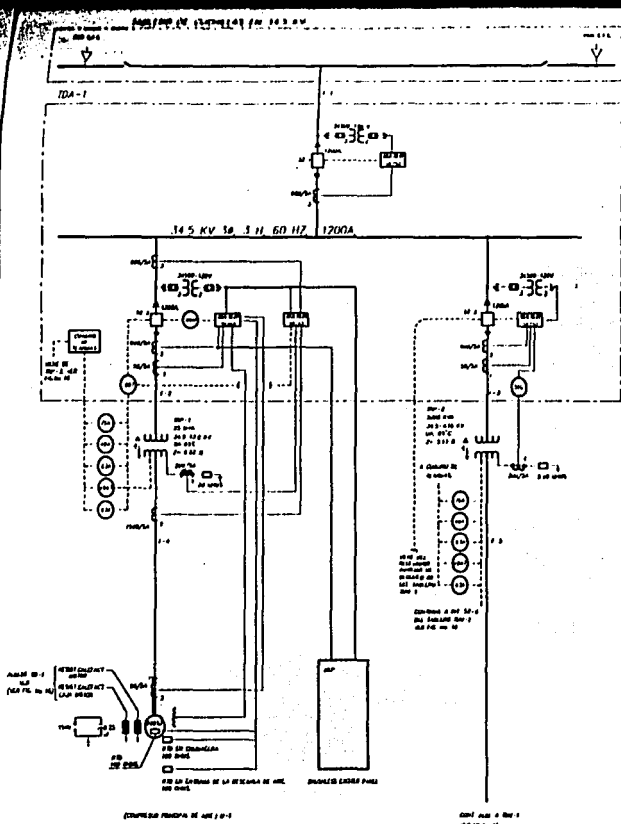


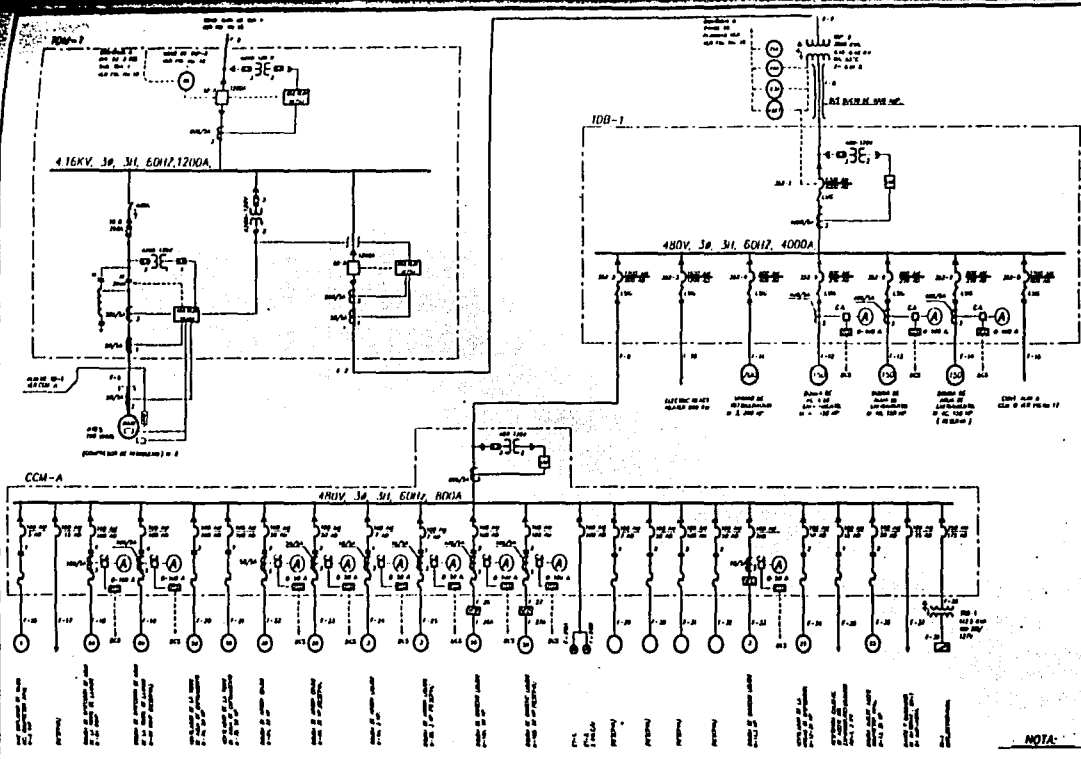
FIGURA 15 DIAGRAMA UNIFILAR DE MEDIA TENSION

**LEYENDA**

	TRANSFORMADOR		INTERRUPTOR
	BARRIO		FUSIBLE
	BANK DE CONDENSADORES		RELAY
	INTERRUPTOR DE MANIOBRA		TIERRA
	GENERADOR		MOTOR
	TRANSFORMADOR CON TOPE		BANK DE CONDENSADORES CON TOPE
	INTERRUPTOR CON TOPE		FUSIBLE CON TOPE
	BARRIO CON TOPE		RELAY CON TOPE
	TRANSFORMADOR CON TOPE Y TIERRA		INTERRUPTOR CON TOPE Y TIERRA
	BARRIO CON TOPE Y TIERRA		FUSIBLE CON TOPE Y TIERRA
	TRANSFORMADOR CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES		INTERRUPTOR CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES
	BARRIO CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES		RELAY CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES
	TRANSFORMADOR CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES Y FUSIBLE		INTERRUPTOR CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES Y FUSIBLE
	BARRIO CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES Y FUSIBLE		RELAY CON TOPE, TIERRA Y BANK DE CONDENSADORES Y FUSIBLE

- NOTAS:**
- LA PROTECCION DE SOBRECARGA SE HA REALIZADO EN TODOS LOS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV, PARA PROTECCION Y SECCIONADO EN LOS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV.
  - EN TODAS LAS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV, SE HA REALIZADO LA PROTECCION DE SOBRECARGA EN LOS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV.
  - LA PROTECCION DE SOBRECARGA SE HA REALIZADO EN TODAS LAS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV, PARA PROTECCION Y SECCIONADO EN LOS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV.
  - EN TODAS LAS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV, SE HA REALIZADO LA PROTECCION DE SOBRECARGA EN LOS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV.
  - EN TODAS LAS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV, SE HA REALIZADO LA PROTECCION DE SOBRECARGA EN LOS SECCIONES DE BARRIO DE 34.5 KV.

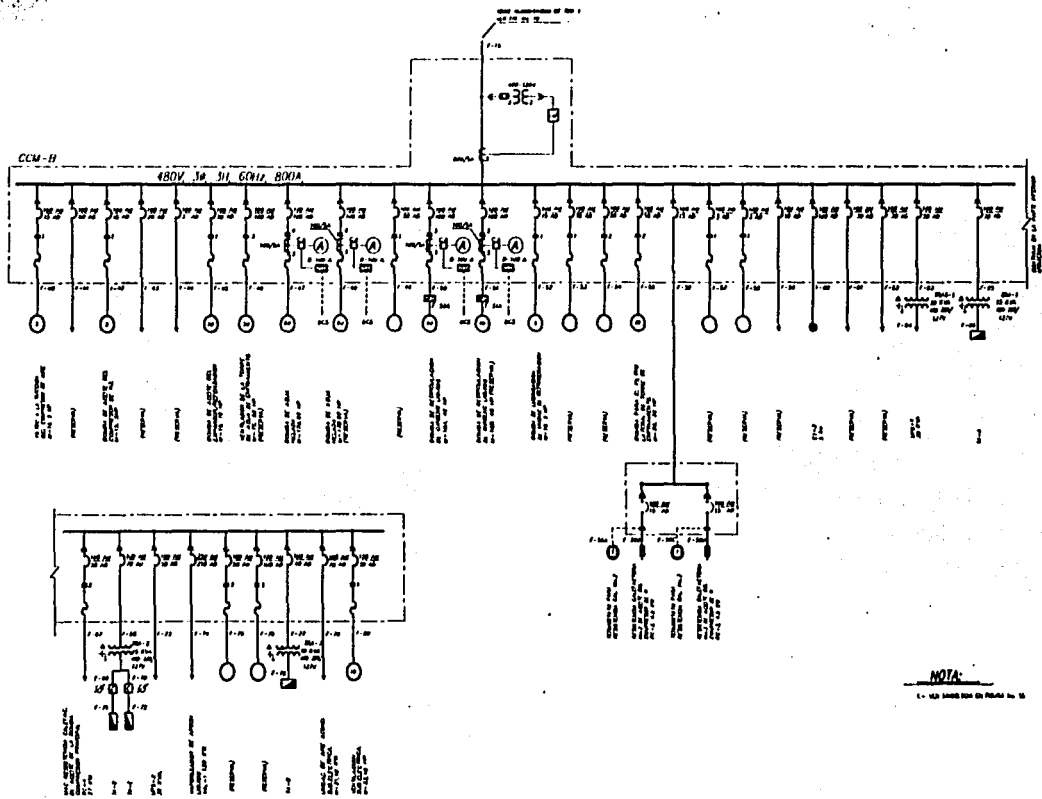
TESIS CON  
 FALTA DE ORIGEN



NOTA:

1. - 480V Sistema de Energía de 3F

FIGURA 16 DIAGRAMA UNIFILAR DE MEDIA Y BAJA TENSION



NOTA:

1.- Ver Anexo B de Manual No. 10

FIGURA 17 DIAGRAMA UNIFILAR DE BAJA TENSION

### 3.4 Obtención de los datos del equipo y elementos importantes.

#### 3.4.1 Datos del sistema de suministro <sup>(1)</sup>:

Potencia de corto circuito trifásico  $P_{cc3\phi} = 1116 \text{ MVA}$   
Corriente de corto circuito trifásico  $I_{cc3\phi} = 18.7 \text{ kA}$   
Potencia de corto circuito monofásico  $P_{cc1\phi} = 808 \text{ MVA}$   
Corriente de corto circuito monofásico  $I_{cc1\phi} = 13.5 \text{ kA}$   
Voltaje de suministro  $V_s = 34.5 \text{ kV}$   
Número de fases 3  
Frecuencia 60 Hz  
Relación  $X_S/R_S = 8.71$

#### 3.4.2 Datos de los transformadores:

##### Transformador de potencia TRP-1

Capacidad nominal 25,000 kVA  
Relación de transformación 34.5 - 13.8 kV  
Tipo de enfriamiento OA, 65°C  
Impedancia  $Z = 6.92\%$ <sup>(2)</sup>  
Frecuencia 60Hz  
Relación  $X/R = 23$ <sup>(3)</sup>

##### Transformador de potencia TRP-2

Capacidad nominal 5,000 kVA  
Relación de transformación 34.5 - 4.16 kV  
Tipo de enfriamiento OA, 65°C  
Impedancia  $Z = 5.13\%$ <sup>(2)</sup>  
Frecuencia 60Hz  
Relación  $X/R = 12$ <sup>(3)</sup>

##### Transformador de potencia TRP-3

Capacidad nominal 3,000 kVA  
Relación de transformación 4.16 - 0.48 kV  
Tipo de enfriamiento OA, 65°C  
Impedancia  $Z = 6.01\%$ <sup>(2)</sup>  
Frecuencia 60Hz  
Relación  $X/R = 8$ <sup>(3)</sup>

(1) Datos proporcionados por C.F.E en 34.5kV.

(2) Datos proporcionados por el fabricante del equipo.

(3) Datos obtenidos de la figura no. 12

### **Transformador de distribución TRD-1**

Capacidad nominal 112.5kVA  
Relación de transformación 480-220/127V  
Tipo de enfriamiento AA, 170 °C  
Impedancia  $Z=4.60\%$ <sup>(1)</sup>  
Frecuencia 60Hz  
Relación  $X/R=1.60$ <sup>(2)</sup>

### **Transformador de alumbrado TRA-1**

Capacidad nominal 15 kVA  
Relación de transformación 480-220/127V  
Tipo de enfriamiento AA, 170 °C  
Impedancia.  $Z=2.80\%$ <sup>(1)</sup>  
Frecuencia 60Hz  
Relación  $X/R=0.86$ <sup>(2)</sup>

### **Transformador de alumbrado TRA-2**

Capacidad nominal 45 kVA  
Relación de transformación 480-220/127V  
Tipo de enfriamiento AA, 170 °C  
Impedancia.  $Z=3.10\%$ <sup>(1)</sup>  
Frecuencia. 60Hz  
Relación  $X/R=0.68$ <sup>(2)</sup>

### **Transformador de alumbrado TRA-3**

Capacidad nominal 30 kVA  
Relación de transformación 480-220/127V  
Tipo de enfriamiento AA, 170 °C  
Impedancia.  $Z=4.00\%$ <sup>(1)</sup>  
Frecuencia. 60Hz  
Relación  $X/R=0.36$ <sup>(2)</sup>

### **Transformador de aislamiento TRAS-1**

Capacidad nominal 30 kVA  
Relación de transformación 480-220/127V  
Tipo de enfriamiento AA, 170 °C  
Impedancia.  $Z=4.00\%$ <sup>(1)</sup>  
Frecuencia 60Hz  
Relación  $X/R=0.36$ <sup>(2)</sup>

(1) Datos obtenidos de la Tabla no. 4.

(2) Datos obtenidos en forma aproximada de la figura no 12.

### 3.4.3 Datos de los motores principales:

#### Motor del compresor principal de aire M-1

Tipo de motor Síncrono  
Capacidad nominal 20,652 HP  
Corriente nominal 716A<sup>(1)</sup>  
Voltaje nominal 13.8kV  
Eficiencia  $\eta = 0.90^{(1)}$   
Factor de potencia FP = 1.0<sup>(1)</sup>  
Capacidad normal en operación 17118kVA<sup>(2)</sup>  
Número de fases 3  
Frecuencia 60 Hz  
Relación X/R=42<sup>(3)</sup>  
Reactancia subtransitoria X<sup>n</sup>d=28%<sup>(4)</sup>

#### Motor del compresor de nitrógeno M-2

Tipo de motor Inducción  
Capacidad nominal 2,000 HP  
Corriente nominal 256A<sup>(1)</sup>  
Voltaje nominal 4.16kV  
Eficiencia  $\eta = 0.9^{(1)}$   
Factor de potencia FP=0.90<sup>(1)</sup>  
Capacidad normal en operación 1842kVA<sup>(2)</sup>  
Número de fases 3  
Frecuencia 60Hz  
Relación X/R=30<sup>(5)</sup>  
Reactancia subtransitoria X<sup>n</sup>d=17%<sup>(4)</sup>

#### Motor de la unidad de refrigeración M-3

Tipo de motor Inducción  
Capacidad nominal 200 HP  
Corriente nomininal 251A<sup>(6)</sup>  
Voltaje nomininal 440V  
Eficiencia  $\eta = 0.86^{(6)}$   
Factor de potencia FP=0.91<sup>(6)</sup>  
Capacidad normal en operación 191kVA<sup>(2)</sup>  
Número de fases 3  
Frecuencia 60 Hz  
Relación X/R=12<sup>(5)</sup>  
Reactancia subtransitoria X<sup>n</sup>d=20%<sup>(7)</sup>

## Motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4A

Tipo de motor Inducción

Capacidad nominal 150 HP.

Corriente nominal 188A<sup>(6)</sup>

Voltaje nominal 440V

Eficiencia  $\eta = 0.86^{(6)}$

Factor de potencia FP = 0.91<sup>(6)</sup>

Capacidad normal en operación 143kVA<sup>(2)</sup>

Número de fases 3

Frecuencia 60 Hz

Relación X/R = 10<sup>(5)</sup>

Reactancia subtransitoria X"d=20%<sup>(7)</sup>

## Motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4B

Tipo de motor Inducción

Capacidad nominal 150 HP.

Corriente nominal 188A<sup>(6)</sup>

Voltaje nominal 440V

Eficiencia  $\eta = 0.86^{(6)}$

Factor de potencia FP = 0.91<sup>(6)</sup>

Capacidad normal en operación 143kVA<sup>(2)</sup>

Número de fases 3

Frecuencia 60 Hz

Relación X/R = 10<sup>(5)</sup>

Reactancia subtransitoria X"d=20%<sup>(7)</sup>

(1) Datos proporcionados por el fabricante del equipo.

(2) Fórmula para calcular los kVA normales en operación :  $kVA=0.746 \times HP/\eta \times FP$

(3) Datos obtenidos de la figura no. 13

(4) Datos obtenidos de la Tabla no. 2

(5) Datos obtenidos de la figura no. 14

(6) Datos obtenidos de la Tabla no. 6.

(7) Datos obtenidos de la Tabla no. 3.



### 3.4.4 Datos de los centros de control de motores:

Centro de control de motores					CCM- A
Voltaje nominal		Número de fases	Número de hilos	Frecuencia	
480 V		3	3	60 Hz	
MOTORES < 50 HP					
Clave	Nombre	HP <sup>(2)</sup>	$\eta$ <sup>(3)</sup>	FP <sup>(3)</sup>	kVA <sup>(4)</sup>
M-5	Mac. sop. de vacio del comp. ppal.	1	0.64	0.80	1.45
M-8A <sup>(1)</sup>	Bomba de argón crudo	20	0.79	0.88	21.46
M-9A <sup>(1)</sup>	Bomba de argón líquido	3	0.70	0.83	3.85
M-11	Bomba de oxígeno líquido	3	0.70	0.83	3.85
M-12	Vent. de la unidad de disposición	25	0.76	0.89	27.57
M-13	Bomba aux. de aceite comp. ppal.	25	0.76	0.89	27.57
TOTAL KVA NORMAL EN OPERACION					86.00
MOTORES $\geq$ 50 HP					
Clave	Nombre	HP <sup>(2)</sup>	$\eta$ <sup>(3)</sup>	FP <sup>(3)</sup>	kVA <sup>(4)</sup>
M-6A <sup>(1)</sup>	Bomba de agua torre de lavado	60	0.81	0.90	61.39
M-7A <sup>(1)</sup>	Vent. torre agua de enfriamiento	50	0.80	0.90	51.80
M-7B <sup>(1)</sup>	Vent. torre agua de enfriamiento	50	0.80	0.90	51.80
M-10A <sup>(1)</sup>	Bomba oxígeno líquido	50	0.80	0.90	51.80
TOTAL KVA NORMAL EN OPERACION					217.00

Ver Tabla no. 3

La reactancia del grupo de motores que operan a una tensión menor de 600 V:

Para motores < 50 HP  $X''d = 23\% = 0.23 \text{ pu.}$

Para motores  $\geq$  50 HP  $X''d = 20\% = 0.20 \text{ pu.}$

- (1) Los correspondientes equipos de reserva ( M-6B, M-7C, M-8B, M-9B, M-10B ) no contribuyen a la corriente de corto circuito
- (2) Ver diagrama unifilar de la figura 16.
- (3) Datos obtenidos de la Tabla no. 6
- (4) Fórmula para calcular los kVA normal en operación:  $kVA = 0.746 \times HP / \eta \times FP$

Centro de control de motores				CCM - B	
Voltaje nominal		Número de fases	Número de hilos		Frecuencia
480 V		3	3		60 Hz
MOTORES < 50 HP					
Clave	Nombre	HP <sup>(2)</sup>	$\eta$ <sup>(3)</sup>	FP <sup>(3)</sup>	kVA <sup>(4)</sup>
M-14	Filtro a la succ. del comp. de aire	5	0.73	0.85	6.01
M-15	Bomba de aceite del comp. nitróg.	5	0.73	0.85	6.01
M-16	Bomba de aceite exp.-reforzador	10	0.75	0.87	11.43
M-18A <sup>(1)</sup>	Bomba recirc. oxígeno líquido	40	0.81	0.89	41.39
M-19	Bomba lub. unid. refrigeración	5	0.73	0.85	6.01
M-20	Bomba para el filtro torre enfriam.	20	0.79	0.89	21.46
M-21	Unid. de aire acondicionado	25	0.76	0.89	27.57
M-22	Vent. subestación eléctrica	10	0.75	0.87	11.43
TOTAL kVA NORMAL EN OPERACION					131.00
MOTORES $\geq$ 50 HP					
Clave	Nombre	HP <sup>(2)</sup>	$\eta$ <sup>(3)</sup>	FP <sup>(3)</sup>	kVA <sup>(4)</sup>
M-17A	Bomba de agua helada	60	0.81	0.90	61.00
TOTAL kVA NORMAL EN OPERACION					61.00

Ver Tabla no. 3

La reactancia del grupo de motores que operan a una tensión menor de 600 V:

Para motores < 50 HP  $X''d = 28\% = 0.28$  pu.

Para motores  $\geq$  50 HP  $X''d = 20\% = 0.20$  pu.

- (1) Los correspondientes equipos de reserva ( M-17B Y M-18B ) no contribuyen a la corriente de corto circuito
- (2) Ver diagrama unifilar de la figura 16.
- (3) Datos obtenidos de la Tabla no. 6
- (4) Fórmula para calcular los kVA normal en operación:  $kVA = 0.746 \times HP / \eta \times FP$

### **3.4.5 Datos de los alimentadores a los equipos principales**

#### **Alimentador del tablero de distribución en media tensión TDA-1**

Número de circuito F-1  
Calibre del conductor 350kCM  
Número de conductores 6 (dos conductores por fase)  
Longitud del circuito 10mts.  
Tipo de aislamiento EPR  
Voltaje del circuito 34.5kV  
Resistencia  $R=0.1266\Omega/\text{Km}^{(1)}$   
Reactancia  $X=0.1844\Omega/\text{Km}^{(1)}$

#### **Alimentador del tablero de distribución en media tensión TDM-1**

Número de circuito F-5  
Calibre del conductor 350kCM  
Número de conductores 6 (dos conductores por fase)  
Longitud del circuito 40mts.  
Tipo de aislamiento EPR  
Voltaje del circuito 4.16 kV  
Resistencia  $R=0.1266\Omega/\text{Km}^{(1)}$   
Reactancia  $X=0.1844\Omega/\text{Km}^{(1)}$

#### **Alimentador del tablero de distribución en baja tensión TDB-1**

Número de circuito F-8  
Capacidad del bus ducto 4000A  
Número de barras 3  
Longitud del circuito 30mts.  
Tipo de bus ducto Feeder  
Voltaje del circuito 480 kV  
Resistencia  $R=0.0111\Omega/\text{Km}^{(2)}$   
Reactancia  $X=0.0078\Omega/\text{Km}^{(2)}$

#### **Alimentador del transformador de potencia TRP-1**

Número de circuito F-2  
Calibre del conductor 500kCM  
Número de conductores 3 (un conductor por fase)  
Longitud del circuito 35mts.  
Tipo de aislamiento EPR  
Voltaje del circuito 34.5 kV  
Resistencia  $R=0.0984\Omega/\text{Km}^{(1)}$   
Reactancia  $X=0.1726\Omega/\text{Km}^{(1)}$

### **Alimentador del transformador de potencia TRP-2**

Número de circuito F-3  
Calibre del conductor 4/OAWG  
Número de conductores 3 (un conductor por fase)  
Longitud del circuito 40mts.  
Tipo de aislamiento EPR  
Voltaje del circuito 34.5 kV  
Resistencia  $R=0.2133\Omega/\text{Km}^{(1)}$   
Reactancia  $X=0.1913\Omega/\text{Km}^{(1)}$

### **Alimentador del transformador de potencia TRP-3**

Número de circuito F-7  
Calibre del conductor 500kCM  
Número de conductores 3 (un conductor por fase)  
Longitud del circuito 35mts.  
Tipo de aislamiento THW-LS  
Voltaje del circuito 480 kV  
Resistencia  $R=0.0984\Omega/\text{Km}^{(2)}$   
Reactancia  $X=0.1726\Omega/\text{Km}^{(2)}$

### **Alimentador del motor del compresor principal de aire M-1**

Número de circuito F-4  
Calibre del conductor 350kCM  
Número de conductores 9 (tres conductores por fase)  
Longitud del circuito 50mts.  
Tipo de aislamiento EPR  
Voltaje del circuito 13.8kV  
Resistencia  $R=0.1266\Omega/\text{Km}^{(1)}$   
Reactancia  $X=0.1844\Omega/\text{Km}^{(1)}$

### **Alimentador del motor del compresor de nitrógeno M-2**

Número de circuito F-6  
Calibre del conductor 250kCM  
Número de conductores 3 (un conductor por fase)  
Longitud del circuito 100mts.  
Tipo de aislamiento EPR  
Voltaje del circuito 4.16 kV  
Resistencia  $R=0.1827\Omega/\text{Km}^{(1)}$   
Reactancia  $X=0.1870\Omega/\text{Km}^{(1)}$

### **Alimentador del motor de la unidad de refrigeración M-3**

Número de circuito F-11  
Calibre del conductor 400kCM  
Número de conductores 3 (un conductor por fase)  
Longitud del circuito 90mts.  
Tipo de aislamiento THW-LS  
Voltaje del circuito 480V  
Resistencia  $R=0.1168\Omega/\text{Km}^{(2)}$   
Reactancia  $X=0.1608\Omega/\text{Km}^{(2)}$

### **Alimentador del motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4A**

Número de circuito F-12  
Calibre del conductor 250kCM  
Número de conductores 3 (un conductor por fase)  
Longitud del circuito 55mts.  
Tipo de aislamiento THW-LS  
Voltaje del circuito 480V  
Resistencia  $R=0.1811\Omega/\text{Km}^{(2)}$   
Reactancia  $X=0.1624\Omega/\text{Km}^{(2)}$

### **Alimentador del motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4B**

Número de circuito F-13  
Calibre del conductor 250kCM  
Número de conductores 3 (un conductor por fase)  
Longitud del circuito 60mts.  
Tipo de aislamiento THW-LS  
Voltaje del circuito 480V  
Resistencia  $R=0.1811\Omega/\text{Km}^{(2)}$   
Reactancia  $X=0.1624\Omega/\text{Km}^{(2)}$

### **Alimentador del centro de control de motores CCM-A**

Número de circuito F-9  
Calibre del conductor 500kCM  
Número de conductores 6 (dos conductores por fase)  
Longitud del circuito 35mts.  
Tipo de aislamiento THW-LS  
Voltaje del circuito 480V  
Resistencia  $R=0.0965\Omega/\text{Km}^{(2)}$   
Reactancia  $X=0.1529\Omega/\text{Km}^{(2)}$

## Alimentador del centro de control de motores CCM-B

Número de circuito F-15

Calibre del conductor 500kCM

Número de conductores 6 (dos conductores por fase)

Longitud del circuito 25mts.

Tipo de aislamiento THW-LS

Voltaje del circuito 480V

Resistencia  $R=0.0965\Omega/\text{Km}^{(2)}$

Reactancia  $X=0.1529\Omega/\text{Km}^{(2)}$

(1) Datos obtenidos de la Tabla no. 3.

(2) Datos obtenidos de la Tabla no. 7.

<b>TABLA No. 4 TRANSFORMADORES TIPO SECO, RESISTENCIA, REACTANCIA E IMPEDANCIA EN % ( TEMPERATURA BASE 170 °C )</b>			
kVA	Resistencia % (R)	Reactancia % (x)	Impedancia % (z)
15	2.10	1.82	2.80
30	3.80	1.37	4.00
45	2.52	1.73	3.10
75	2.27	1.91	3.00
112.5	2.43	3.87	4.60
150	2.35	5.00	5.50
225	1.15	5.50	5.90
300	1.80	4.50	4.90
500	1.60	5.90	6.10

(Adaptado de la Tabla 14 Publicación GET-35508 G.E.)

<b>TABLA No. 5 IMPEDANCIAS DE BUS DUCTO</b>				
Bus Ducto ( tipo )	Amperes	Ohms por Km Línea a Neutro. Corriente Alterna 60HZ.		
		Resistencia ( R )	Reactancia ( X )	Impedancia ( Z )
Alimentador con barras de cobre	800	0.0656	0.0748	0.0997
	1000	0.0433	0.0265	0.0511
	1350	0.0324	0.0259	0.0413
	1600	0.0288	0.0170	0.0334
	2000	0.0216	0.0167	0.0272
	2500	0.0193	0.0121	0.0203
	3000	0.0131	0.0098	0.0164
	4000	0.0111	0.0078	0.0137
	5000	0.0082	0.0059	0.0101

(Adaptado de la Tabla 20 Publicación GET-35508 G.E. en ohms/100 Pies )

**TABLA No. 6 FACTOR DE POTENCIA, EFICIENCIA Y CORRIENTE APLENA CARGA DE MOTORES TRIFASICOS DE CORRIENTE ALTERNA.**

Motor de inducción de jaula de ardilla y rotor devanado

kW	HP	FP <sup>(1)</sup>	$\eta$ <sup>(2)</sup>	440V
0.373	(1/2)	0.75	0.65	1.0
0.560	(3/4)	0.75	0.65	1.5
0.746	(1)	0.80	0.64	1.9
1.119	(1½)	0.81	0.67	2.7
1.49	(2)	0.82	0.66	3.6
2.23	(3)	0.83	0.70	5.0
3.73	(5)	0.85	0.73	7.9
5.60	(7½)	0.85	0.78	11.0
7.46	(10)	0.87	0.75	15.0
11.19	(15)	0.88	0.76	22.0
14.92	(20)	0.88	0.79	28.0
18.65	(25)	0.89	0.76	36.0
22.38	(30)	0.89	0.78	42.0
29.84	(40)	0.89	0.81	54.0
37.3	(50)	0.90	0.80	68.0
44.76	(60)	0.90	0.81	80.0
55.95	(75)	0.90	0.81	100.0
74.60	(100)	0.91	0.83	130.0
93.25	(125)	0.91	0.82	163.0
119.90	(150)	0.91	0.86	188.0
149.20	(200)	0.91	0.86	251.0

(Adaptado de la Tabla no.430-150 de las normas NOM- 001- SEMP-1994)

<sup>(1)</sup> De las curvas características para el factor de potencia de motores de inducción polifásicos, par normal y baja corriente de arranque, referencia Motor Application and Maintenance Handbook Smeaton.

<sup>(2)</sup> De las curvas características para la eficiencia de motores de inducción polifásicos, par normal y baja corriente de arranque, referencia Motor Application and Maintenance Handbook Smeaton



**TABLA No. 7 RESISTENCIA, REACTANCIA E IMPEDANCIA PARA CONDUCTORES DE COBRE 600V, EN TUBO CONDUIT MAGNETICO A 75 °C EN OHMS/KM.**

CALIBRE AWG O kCM	TRES CONDUCTORES MONOPOLARES POR TUBO CONDUIT			UN CABLE TRIPOLAR POR TUBO CONDUIT		
	R	X	Z	R	X	Z
*14	10.2854	-	10.2854	10.2854	-	10.2854
*12	6.4698	-	6.4698	6.4698	-	6.4698
*10	4.0682	-	4.0682	4.0682	-	4.0682
8	2.6600	0.2474	2.6715	2.6600	0.1893	2.6667
(solido) 8	2.5787	0.2474	2.5905	2.5787	0.1893	2.5856
(solido) 6	1.6732	0.2247	1.7383	1.6732	0.1722	1.6820
(solido) 6	1.6273	0.2247	1.6427	1.6273	0.1722	1.6364
(solido) 4	1.0532	0.2073	1.0734	1.0532	0.1585	1.0661
(solido) 4	1.0236	0.2073	1.0444	1.0236	0.1585	1.0358
2	0.6627	0.1919	0.6899	0.6627	0.1470	0.6788
1	0.5250	0.1870	0.5573	0.5250	0.1430	0.5441
1/0	0.4200	0.1772	0.4559	0.4200	0.1358	0.4414
2/0	0.3346	0.1749	0.3776	0.3346	0.1335	0.3603
3/0	0.2641	0.1703	0.3142	0.2641	0.1303	0.2945
4/0	0.2100	0.1631	0.2659	0.2100	0.1250	0.2444
250	0.1811	0.1624	0.2433	0.1811	0.1243	0.2197
300	0.1522	0.1617	0.2221	0.1522	0.1237	0.1961
350	0.1240	0.1611	0.2033	0.1240	0.1224	0.1742
400	0.1168	0.1608	0.1987	0.1168	0.1217	0.1687
450	0.1056	0.1575	0.1896	0.1056	0.1184	0.1587
500	0.0965	0.1529	0.1808	0.0965	0.1145	0.1497
600	0.0843	0.1519	0.1737	0.0843	0.1125	0.1406
750	0.0709	0.1460	0.1623	0.0709	0.1070	0.1284

Adaptado de la Tabla 19 Publicación GET-35508 G.E. en ohm/1000 Pies)

Valores adaptados de la Tabla 1.4 de NTIE-81

**TABLA No. 8 RESISTENCIA, REACTANCIA E IMPEDANCIA PARA CONDUCTORES DE COBRE, 5kv Y 15kv, EN TUBO CONDUIT MAGNETICO, A 75 °C EN OHMS/KM.**

CALIBRE AWG O kCM	TRES CONDUCTORES MONOPOLARES POR TUBO CONDUIT			UN CABLE TRIFOLAR POR TUBO CONDUIT		
	R	X	Z	R	X	Z
(solido) 8	2.6600	0.2822	2.6749	2.6600	0.2159	2.6687
6	2.5787	0.2822	2.5940	2.5757	0.2159	2.5877
6	1.6732	0.2612	1.6934	1.6732	0.2001	1.6851
6	1.6273	0.2612	1.6481	1.6273	0.2001	1.6395
(solido) 4	1.0552	0.2434	1.0809	1.0532	0.1864	1.0695
4	1.0236	0.2434	1.0521	1.0236	0.1667	1.0370
2	0.6627	0.2247	0.6997	0.6627	0.1719	0.6846
1	0.5250	0.2215	0.5698	0.5250	0.1693	0.5516
1/0	0.4200	0.2083	0.4688	0.4200	0.1594	0.4492
2/0	0.3380	0.2067	0.3961	0.3380	0.1581	0.3731
3/0	0.2671	0.1985	0.3327	0.2671	0.1519	0.3072
4/0	0.2133	0.1913	0.2865	0.2133	0.1463	0.2586
250	0.1827	0.1870	0.2614	0.1827	0.1430	0.2320
300	0.1552	0.1850	0.2414	0.1552	0.1414	0.2099
350	0.1266	0.1844	0.2336	0.1266	0.1400	0.1887
400	0.1188	0.1798	0.2155	0.1188	0.1362	0.1807
450	0.1076	0.1765	0.2067	0.1076	0.1325	0.1706
500	0.0984	0.1726	0.1986	0.0984	0.1293	0.1624
600	0.0866	0.1693	0.1901	0.0866	0.1253	0.1523
750	0.0732	0.1631	0.1787	0.0732	0.1194	0.1400

Adaptado de la Tabla 19 Publicación GET-3550B GE en ohm/1000 Pies)

### 3.5 Localización de los puntos de falla a analizar:

En el Diagrama Unifilar de la figura 18 se muestra la localización de los puntos de falla a analizar. Los valores calculados de corriente de corto circuito en los diferentes puntos. ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $F_5$  y  $F_6$ ), del Sistema se usarán para la selección adecuada de todos los dispositivos protectores del Sistema Eléctrico de la Planta Industrial.

La capacidad interruptiva de los dispositivos protectores (interruptores de potencia, interruptores electromagnéticos, interruptores magnéticos, termomagnéticos, etc.) del Sistema Eléctrico, así como también la capacidad de corriente de corto circuito de las barras de los diferentes tableros de distribución, centros de control de motores y la de los cables alimentadores se podrá determinar correctamente de acuerdo a los valores calculados de corriente de corto circuito en los diferentes puntos seleccionados.

Se trazará un diagrama de impedancias convirtiendo el diagrama unifilar a valores unitarios sobre una base seleccionada. Este diagrama debe incluir todas las reactancias y resistencias importantes.

Se integrarán todas las impedancias en una única equivalente que incluya todas las impedancias hacia la barra conductora de reactancia cero, donde aparece el punto de falla, usando las fórmulas del capítulo no. 2. La impedancia total equivalente expresada unitariamente sobre una base seleccionada, se usa para determinar la corriente y la potencia de corto circuito en el punto de falla.

TABLERO DE CUCHILLAS EN 34.5 KV

FOR C.F.E.

NOTA:

1.- VER SIMBOLOGIA Y NOTAS GENERALES EN FIGURA No. 12

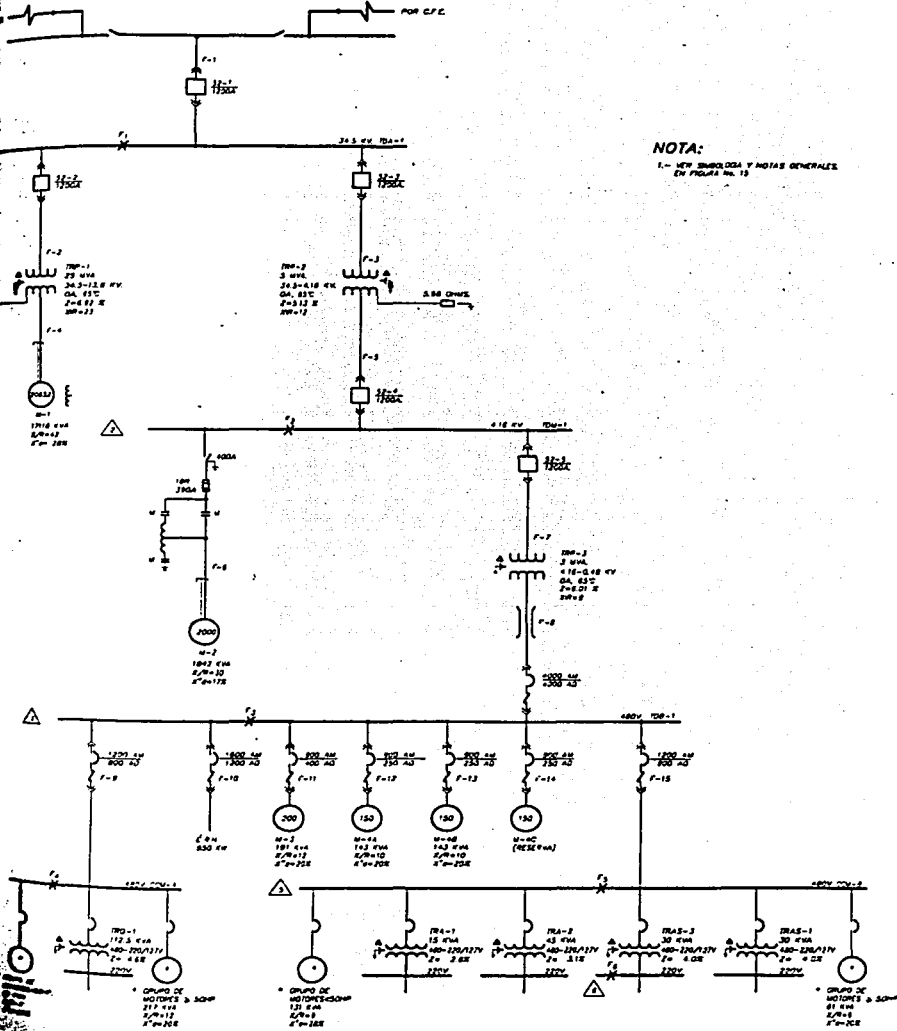


FIGURA 18 LOCALIZACION DE PUNTOS DE FALLA

### 3.6 Conversión de las resistencias, reactivancias e impedancias en valores en por unidad, sobre una base seleccionada en kVA.

#### 3.6.1 Sistema de suministro S.S.

Con el dato de la potencia de corto circuito trifásico que en este punto es:  $P_{cc3\phi} = 1116 \text{ MVA}$  y utilizando la fórmula 3, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_s = \frac{\text{kV}_{\text{base}}}{\text{corto-circuito kVA}} = \frac{1000}{1116,000} = 0.0008 \text{ pu.}$$

La relación de la reactivancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X_s}{R_s} = 8.71 \Rightarrow X_s = 8.71 R_s.$$

Sustituyendo el valor de la reactivancia  $X_s$  en la fórmula 7 y despejando el valor de la resistencia  $R_s$ , calculamos la resistencia en pu:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \Rightarrow Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{R_s^2 + (8.71 R_s)^2} = \sqrt{R_s^2 [1 + (8.71)^2]}$$

Elevamos ambos lados de la fórmula al cuadrado:

$$Z_s^2 = \left( \sqrt{R_s^2 [1 + (8.71)^2]} \right)^2 \Rightarrow Z_s^2 = R_s^2 [1 + (8.71)^2] \Rightarrow R_s^2 = \frac{Z_s^2}{1 + (8.71)^2}$$

Extraemos raíz cuadrada en ambos lados de la fórmula:

$$\sqrt{R_s^2} = \sqrt{\frac{Z_s^2}{1 + (8.71)^2}} \Rightarrow R_s = \frac{Z_s}{\sqrt{1 + (8.71)^2}}$$

Finalmente sustituyendo el valor numérico de  $Z_s$  en la fórmula, obtenemos el valor de la resistencia en pu:

$$R_s = \frac{0.0008}{\sqrt{1 + (8.71)^2}} = 0.00009 \text{ pu.} \Rightarrow X_s = 8.71 \times 0.00009 = 0.0008 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:  $Z_s = 0.0008 \text{ pu.}$      $R_s = 0.00009 \text{ pu.}$      $X_s = 0.0008 \text{ pu.}$

### 3.6.2 Transformador de potencia TRP-1.

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 6.92\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kVAbase)}{kVA_{nominal}(100)} = \frac{6.92(1000)}{25,000(100)} = 0.0027 \text{ pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 23 \Rightarrow X = 23R$

Sustituyendo el valor de la reactancia  $X$  en la fórmula 7 y despejando la resistencia  $R$ , calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1+(23)^2}} = \frac{0.0027}{\sqrt{1+(23)^2}} = 0.0001 \text{ pu.} \Rightarrow X_{pu} = 23 \times 0.0001 = 0.0023 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 0.0027 \text{ pu.}$        $R_{pu} = 0.0001 \text{ pu.}$        $X_{pu} = 0.0023 \text{ pu.}$

### 3.6.3 Transformador de potencia TRP-2.

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 5.13\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kVAbase)}{kVA_{nominal}(100)} = \frac{5.13(1000)}{5,000(100)} = 0.0102 \text{ pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 12 \Rightarrow X = 12R.$

Sustituyendo el valor de la reactancia  $X$  en la fórmula 7 y despejando la resistencia  $R$ , calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1+(12)^2}} = \frac{0.0102}{\sqrt{1+(12)^2}} = 0.0008 \text{ pu.} \Rightarrow X_{pu} = 12 \times 0.0008 = 0.0096 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 0.0102 \text{ pu.}$        $R_{pu} = 0.0008 \text{ pu.}$        $X_{pu} = 0.0096 \text{ pu.}$

### 3.6.4 Transformador de potencia TRP-3.

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 6.01\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kV_{base})}{kVA_{nominal}(100)} = \frac{6.01(1000)}{3,000(100)} = 0.0200pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 8 \Rightarrow X = 8R$

Sustituyendo el valor de la reactancia X en la fórmula 7 y despejando la resistencia R, calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + (23)^2}} = \frac{0.0200}{\sqrt{1 + (23)^2}} = 0.0024pu. \Rightarrow X_{pu} = 8 \times 0.0024 = 0.0198pu.$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 0.0200pu.$      $R_{pu} = 0.0024pu.$      $X_{pu} = 0.0198pu.$

### 3.6.5 Transformador de distribución TRD-1.

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 4.60\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kV_{base})}{kVA_{nominal}(100)} = \frac{4.60(1000)}{112.5(100)} = 0.4088pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 1.60 \Rightarrow X = 1.60R$

Sustituyendo el valor de la reactancia X en la fórmula 7 y despejando la resistencia R, calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + (1.6)^2}} = \frac{0.4088}{\sqrt{1 + (1.60)^2}} = 0.2166pu. \Rightarrow X_{pu} = 1.6 \times 0.2166 = 0.3465pu.$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 0.4088pu.$      $R_{pu} = 0.2166pu.$      $X_{pu} = 0.3465pu.$

### 3.6.6 Transformador de alumbrado TRA-1

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 2.80\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kV_{Abase})}{kVA_{nominal}(100)} = \frac{2.80(1000)}{15(100)} = 1.8666 \text{ pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 0.86 \Rightarrow X = 0.86R$

Sustituyendo el valor de la reactancia  $X$  en la fórmula 7 y despejando la resistencia  $R$ , calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + (0.86)^2}} = \frac{1.8666}{\sqrt{1 + (0.86)^2}} = 1.4152 \text{ pu.} \Rightarrow X_{pu} = 0.86 \times 1.4152 = 1.2170 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 1.8666 \text{ pu.}$      $R_{pu} = 1.4152 \text{ pu.}$      $X_{pu} = 1.2170 \text{ pu.}$

### 3.6.7 Transformador de alumbrado TRA-2.

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 3.10\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kV_{Abase})}{kVA_{nominal}(100)} = \frac{3.10(1000)}{45(100)} = 0.6888 \text{ pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 0.68 \Rightarrow X = 0.68R$

Sustituyendo el valor de la reactancia  $X$  en la fórmula 7 y despejando la resistencia  $R$ , calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + (0.68)^2}} = \frac{0.6888}{\sqrt{1 + (0.68)^2}} = 0.5695 \text{ pu.} \Rightarrow X_{pu} = 0.68 \times 0.5695 = 0.3873 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 0.6888 \text{ pu.}$      $R_{pu} = 0.5695 \text{ pu.}$      $X_{pu} = 0.3873 \text{ pu.}$



### 3.6.8 Transformador de alumbrado TRA-3.

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 4.00\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kVAbase)}{kVAnominal(100)} = \frac{4.00(1000)}{30(100)} = 1.3333pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 0.36 \Rightarrow X = 0.36R$

Sustituyendo el valor de la reactancia X en la fórmula 7 y despejando la resistencia R, calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + (0.36)^2}} = \frac{1.3333}{\sqrt{1 + (0.36)^2}} = 1.2544pu. \Rightarrow X_{pu} = 0.36 \times 1.2544 = 0.4516pu.$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 1.3333pu.$   $R_{pu} = 1.2544pu.$   $X_{pu} = 0.4516pu.$

### 3.6.9 Transformador de aislamiento TRAS-1

Con el dato de la impedancia sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $Z = 4.00\%$  y la fórmula 5, calculamos la impedancia sobre la base seleccionada en pu:

$$Z_{pu} = \frac{\%Z(kVAbase)}{kVAnominal(100)} = \frac{4.00(1000)}{30(100)} = 1.3333pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:  $\frac{X}{R} = 0.36 \Rightarrow X = 0.36R$

Sustituyendo el valor de la reactancia X en la fórmula 7 y despejando la resistencia R, calculamos la resistencia en pu:

$$R_{pu} = \frac{Z_{pu}}{\sqrt{1 + (0.36)^2}} = \frac{1.3333}{\sqrt{1 + (0.36)^2}} = 1.2544pu. \Rightarrow X_{pu} = 0.36 \times 1.2544 = 0.4516pu.$$

Por lo tanto:  $Z_{pu} = 1.3333pu.$   $R_{pu} = 1.2544pu.$   $X_{pu} = 0.4516pu.$

### 3.6.10 Motor del compresor principal de aire M-1

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 28\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(kVA_{base})}{kVA_{nominal}} = \frac{0.28(1000)}{17118} = 0.0163pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 42 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{42} = \frac{0.0163}{42} = 0.0003pu.$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.0003pu.$      $X_{pu} = 0.0163pu.$

### 3.6.11 Motor del compresor de nitrógeno M-2.

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 17\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(kVA_{base})}{kVA_{nominal}} = \frac{0.17(1000)}{1842} = 0.0922pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 30 \Rightarrow R_{pu} = 30 = \frac{0.0922}{30} = 0.0030pu.$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.0030pu.$      $X_{pu} = 0.0922pu.$

### 3.6.12 Motor de la unidad de refrigeración M-3

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 20\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(kV_{base})}{kVA_{nominal}} = \frac{0.20(1000)}{191} = 1.0471 \text{ pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 12 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{12} = \frac{1.0471}{12} = 0.0872 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.0872 \text{ pu.}$   $X_{pu} = 1.041 \text{ pu.}$

### 3.6.13 Motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4A.

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 20\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(kV_{base})}{kVA_{nominal}} = \frac{0.20(1000)}{143} = 1.3986 \text{ pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 10 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{10} = \frac{1.3986}{10} = 0.1398 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.1398 \text{ pu.}$   $X_{pu} = 1.3986 \text{ pu.}$

### 3.6.14 Motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4B

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 20\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(kV_{base})}{kV_{Anominal}} = \frac{0.20(1000)}{143} = 1.3986pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 10 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{10} = \frac{1.3986}{10} = 0.1398pu.$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.1398pu.$      $X_{pu} = 1.3986pu.$

### 3.6.15 Centro de control de motores ( motores < 50HP ) CCM-A

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 28\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(kV_{base})}{kV_{Anominal}} = \frac{0.28(1000)}{86} = 3.2558pu.$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 7 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{7} = \frac{3.2558}{7} = 0.4651pu.$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.4651pu.$      $X_{pu} = 3.2558pu.$

### 3.6.16 Centro de control de motores ( motores $\geq 50\text{HP}$ ) CCM-A

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 20\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(\text{kVAbase})}{\text{kVANominal}} = \frac{0.20(1000)}{217} = 0.9216\text{pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 12 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{12} = \frac{0.9216}{12} = 0.0768\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.0768\text{pu.}$      $X_{pu} = 0.9216\text{pu.}$

### 3.6.17 Centro de control de motores ( motores $< 50\text{HP}$ ) CCM-B

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 28\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(\text{kVAbase})}{\text{kVANominal}} = \frac{0.28(1000)}{131} = 2.1374\text{pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 9 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{9} = \frac{2.1374}{9} = 0.2374\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.2374\text{pu.}$      $X_{pu} = 2.1374\text{pu.}$

### 3.6.18 Centro de control de motores ( motores $\geq 50\text{HP}$ ) CCM-B

Con el dato de la reactancia subtransitoria sobre la capacidad nominal de este equipo que es:  $X''d = 20\%$  y la fórmula 6, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{X_{pu}(\text{kVAbase})}{\text{kVANominal}} = \frac{0.20(1000)}{61} = 3.2786\text{pu.}$$

La relación de la reactancia a la resistencia en este punto es:

$$\frac{X}{R} = 6 \Rightarrow R_{pu} = \frac{X_{pu}}{6} = \frac{3.2786}{6} = 0.5464\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.5464\text{pu.}$        $X_{pu} = 3.2786\text{pu.}$

### 3.6.19 Alimentador del tablero de distribución de media tensión TDA-1

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.1266\Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{10\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0006\Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.1844\Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{10\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0009\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVBase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0006(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000005\text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVBase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0009(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000008\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 5 \times 10^{-7} \text{ pu.}$   $X_{\text{pu}} = 8 \times 10^{-7} \text{ pu.}$

### 3.6.20 Alimentador del tablero de distribución en media tensión TDM-1.

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/Km} \times longitud}{1000} = \frac{0.1266\Omega/Km}{2} \times \frac{40m}{1000m} = 0.0025\Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/Km} \times longitud}{1000} = \frac{0.1844\Omega/Km}{2} \times \frac{40m}{1000m} = 0.0036\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{pu} = \frac{ohms(kVabase)}{(kVbase)^2 1000} = \frac{0.0025(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0001pu.$$

$$X_{pu} = \frac{ohms(kVabase)}{(kVbase)^2 1000} = \frac{0.0036(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0002pu.$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.0001pu$ .  $X_{pu} = 0.0002pu$ .



### 3.6.21 Alimentador del tablero de distribución en baja tensión TDB-1

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/Km} \times longitud}{1000} = 0.011 \Omega/Km \times \frac{30m}{1000m} = 0.0003\Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/Km} \times longitud}{1000} = 0.0078 \Omega/Km \times \frac{30m}{1000m} = 0.0002\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{pu} = \frac{ohms(kVAbase)}{(kVbase)^2 1000} = \frac{0.0003(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0013pu.$$

$$X_{pu} = \frac{ohms(kVAbase)}{(kVbase)^2 1000} = \frac{0.0002(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0008pu.$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.0013pu.$   $X_{pu} = 0.0008pu.$

### 3.6.22 Alimentador del transformador de potencia TRP-1

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.0984 \Omega/\text{Km} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0034 \Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1726 \Omega/\text{Km} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0060 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVBase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0034(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000003 \text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVBase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0060(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000005 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 3 \times 10^{-6} \text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 5 \times 10^{-6} \text{pu.}$

### 3.6.23 Alimentador del transformador de potencia TRP-2

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.2133 \Omega/\text{Km} \times \frac{40\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0085 \Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1913 \Omega/\text{Km} \times \frac{40\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0076 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0085(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000007 \text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0076(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000006 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 7 \times 10^{-6} \text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 6 \times 10^{-6} \text{pu.}$

### 3.6.24 Alimentador del transformador de potencia TRP-3

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.0984 \Omega/\text{Km} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0034 \Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1726 \Omega/\text{Km} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0060 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kV}_{\text{base}})}{(\text{kV}_{\text{base}})^2 1000} = \frac{0.0034(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0002 \text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kV}_{\text{base}})}{(\text{kV}_{\text{base}})^2 1000} = \frac{0.0060(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0003 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 0.0002 \text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 0.0003 \text{pu.}$

### 3.6.25 Alimentador del motor del compresor principal de aire M-1

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando tres conductores por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.1266\Omega/\text{Km}}{3} \times \frac{50\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0021\Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.1844\Omega/\text{Km}}{3} \times \frac{50\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0030\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0021(1000)}{(13.8)^2 1000} = 0.00001\text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0030(1000)}{(13.8)^2 1000} = 0.00002\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 1 \times 10^{-5} \text{ pu.}$   $X_{\text{pu}} = 2 \times 10^{-5} \text{ pu.}$

### 3.6.26 Alimentador del motor del compresor de nitrógeno M-2

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1827 \Omega/\text{Km} \times \frac{100\text{m}}{1000\text{m}} = 0.01827 \Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1870 \Omega/\text{Km} \times \frac{100\text{m}}{1000\text{m}} = 0.01870 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0182(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0010 \text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0187(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0010 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 0.0010 \text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 0.0010 \text{pu.}$

### 3.6.27 Alimentador del del motor de refrigeración M-3

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/Km} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1168_{\Omega/Km} \times \frac{90m}{1000m} = 0.0105_{\Omega}$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/Km} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1608_{\Omega/Km} \times \frac{90m}{1000m} = 0.0144_{\Omega}$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{pu} = \frac{\text{ohms}(kV_{Abase})}{(kV_{base})^2 1000} = \frac{0.0105(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0455_{pu}.$$

$$X_{pu} = \frac{\text{ohms}(kV_{Abase})}{(kV_{base})^2 1000} = \frac{0.0144(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0625_{pu}.$$

Por lo tanto:  $R_{pu} = 0.0455_{pu}$ .  $X_{pu} = 0.0625_{pu}$ .

### 3.6.28 Alimentador del motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4A

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1811 \Omega/\text{Km} \times \frac{55\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0099 \Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1624 \Omega/\text{Km} \times \frac{55\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0089 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0099(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0432 \text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0089(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0386 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 0.0432 \text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 0.0386 \text{pu.}$



### 3.6.29 Alimentador del motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4B

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1811 \Omega/\text{Km} \times \frac{60\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0108 \Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.1624 \Omega/\text{Km} \times \frac{60\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0097 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0108(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0471 \text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0097(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0421 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 0.0471 \text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 0.0421 \text{pu.}$

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

### 3.6.30 Alimentador del centro de control de motores CCM-A.

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.0965\Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0016\Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.1529\Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0026\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0016(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0069\text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0026(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0112\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 0.0069\text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 0.0112\text{pu.}$

### 3.6.31 Alimentador del centro de control de motores CCM-B

Con los datos de la longitud en metros, la resistencia y la reactancia en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos los valores de la resistencia y la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$R_{\Omega} = \frac{R_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.0965 \Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{25\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0012 \Omega$$

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.1529 \Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{25\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0019 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la resistencia y la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$R_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0012(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0052 \text{pu.}$$

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0019(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0082 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $R_{\text{pu}} = 0.0052 \text{pu.}$   $X_{\text{pu}} = 0.0082 \text{pu.}$

### 3.7 Elaboración del diagrama de impedancias

Convirtiendo el diagrama unifilar a valores unitarios sobre una base seleccionada. Este diagrama debe incluir todas las resistencias y reactancias del equipo y elementos importantes.

El diagrama de impedancias esta compuesto por un diagrama de resistencias y un diagrama de reactancias en por unidad del equipo y elementos importantes, a partir de estos dos diagramas podremos determinar la impedancia equivalente en los puntos de falla localizados en el diagrama unifilar de la figura 18.

El diagrama de resistencias se muestra en la figura 19. y el diagrama de reactancias se muestra en la figura 20. Estos diagramas contienen los valores de resistencia y reactancia en pu calculados en el capitulo anterior.

### 3.7.1 DIAGRAMA DE RESISTENCIAS

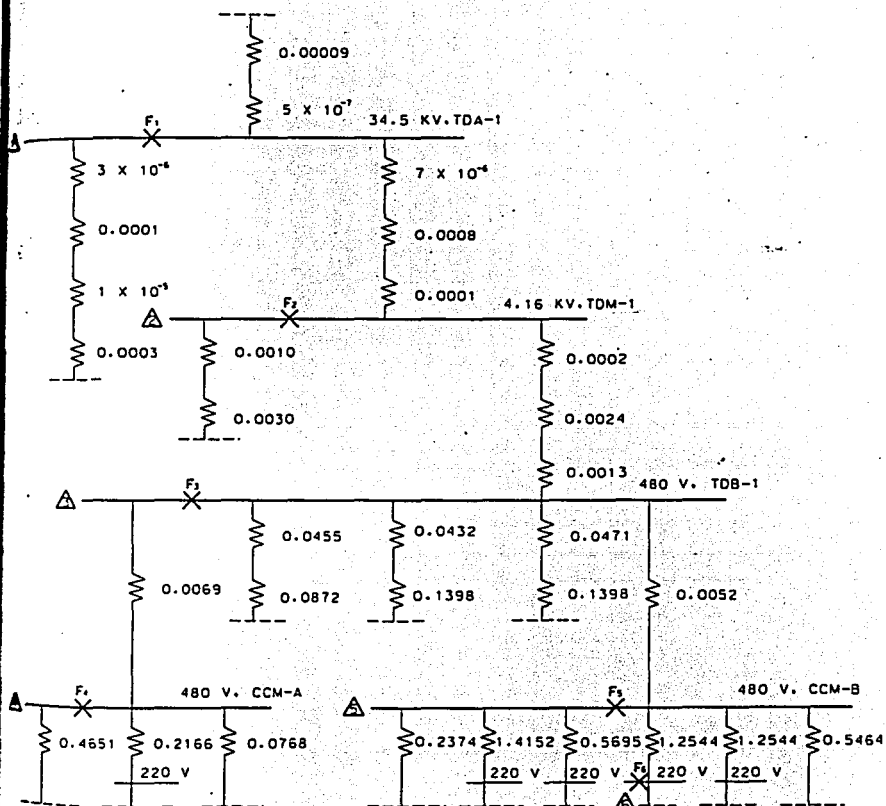


FIGURA 19

3.7.2 DIAGRAMA DE REACTANCIAS

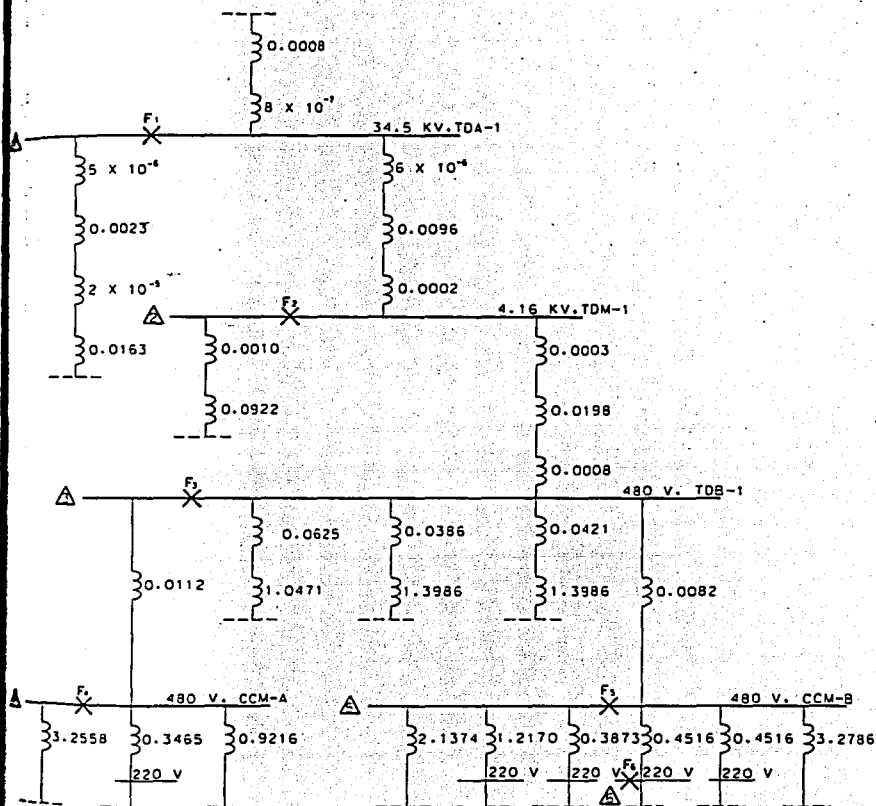


FIGURA 20

### **3.8 Cálculo de la impedancia equivalente.**

En una única que incluya todas las impedancias entre la barra de reactancia cero y el punto de falla.

La obtención de esta impedancia equivalente será a partir de los diagramas de resistencias y reactancias que aparecen en las figuras 19 y 20 respectivamente y con la utilización de las fórmulas del capítulo 2 para la combinación de resistencias y reactancias en serie y en paralelo.

De acuerdo a la localización de los 6 puntos de falla que se muestran en el diagrama unifilar de la figura 18, simplificaremos los diagramas combinando las resistencias y reactancias equivalentes obtenidas en cada punto en una impedancia equivalente total.

La impedancia total equivalente expresada unitariamente sobre una base seleccionada se usa para determinar la corriente de corto circuito y los kVA en los diferentes puntos de falla a analizar.

De acuerdo a los valores calculados de corriente de corto circuito en los diferentes puntos seleccionados, se podrá determinar la capacidad interruptiva de todos los dispositivos protectores (interruptores de potencia, interruptores electromagnéticos, interruptores magnéticos, termomagnéticos, etc.) del Sistema Eléctrico, así como también la capacidad de corto circuito de las barras de los diferentes tableros de distribución, centros de control de motores, tableros de alumbrado y la de los cables de energía y cables de baja tensión.

### 3.8.1 CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA F1

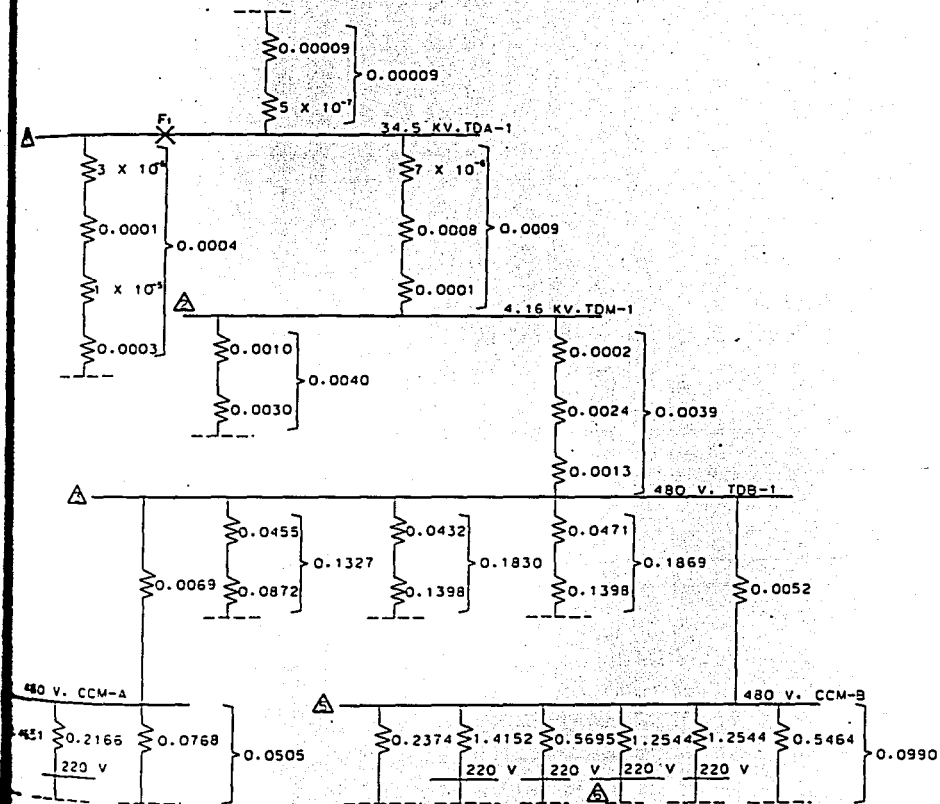


FIGURA 21



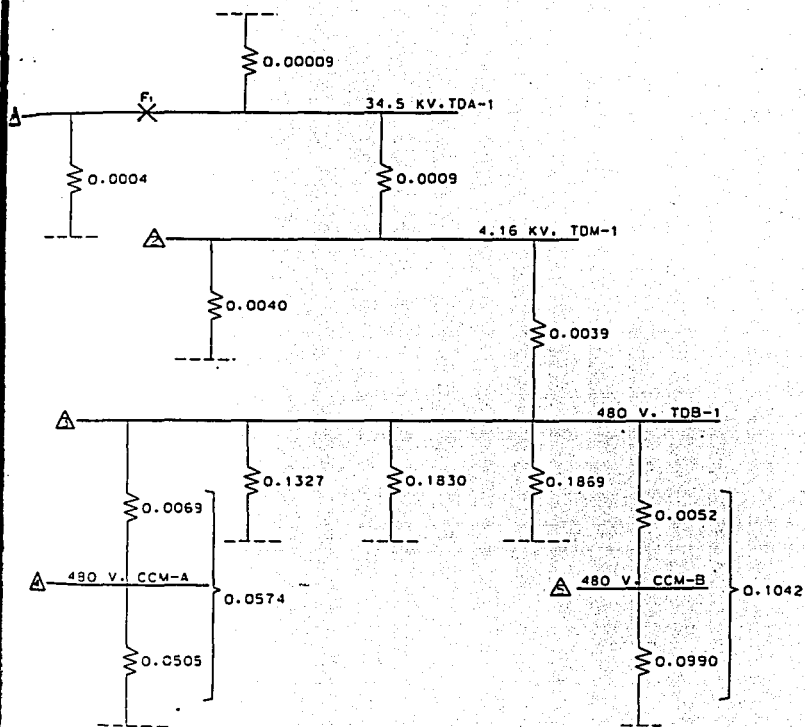


FIGURA 22

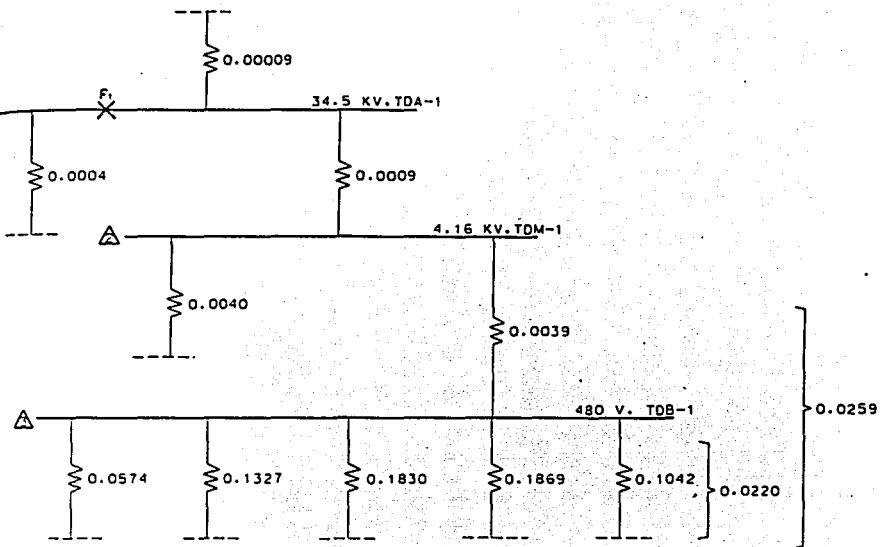


FIGURA 23

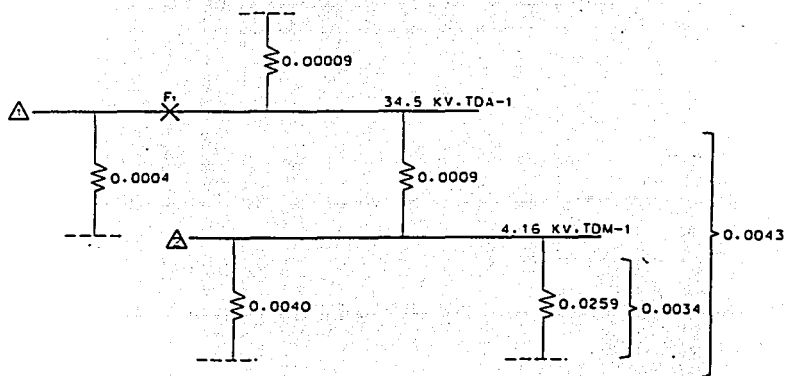


FIGURA 24

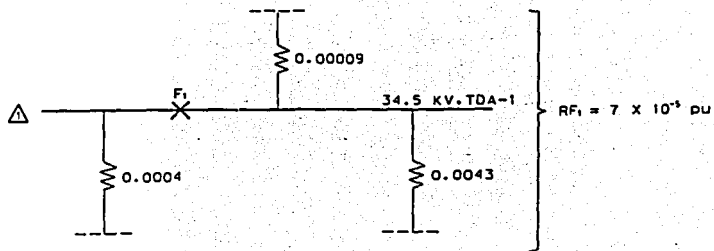


Figura 25

3.8.2 CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA  $F_2$

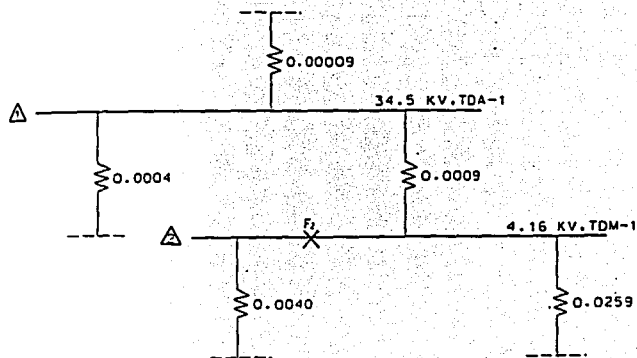


FIGURA 26

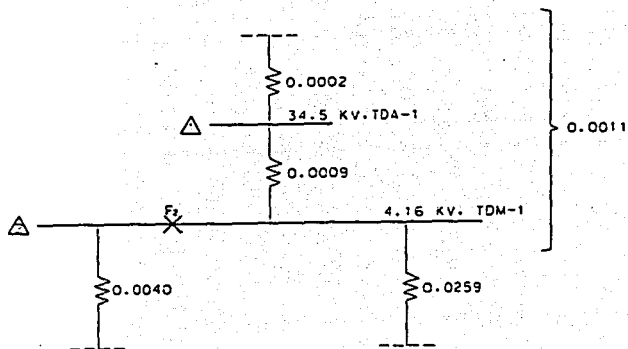


FIGURA 27

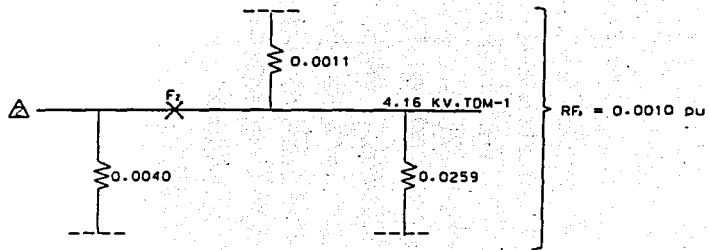


FIGURA 28

### 3.8.3 CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA F<sub>3</sub>

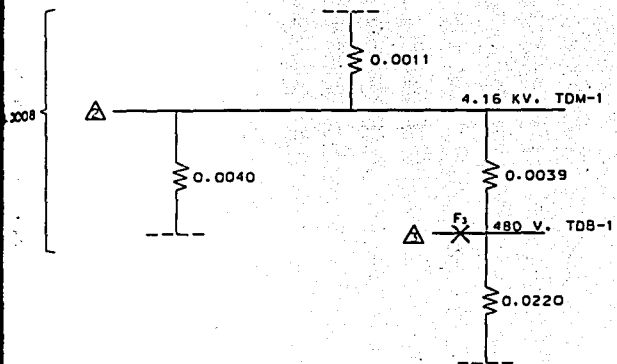


FIGURA 29

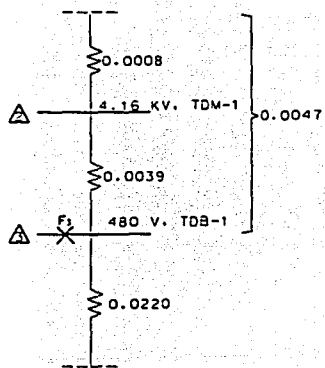


FIGURA 30

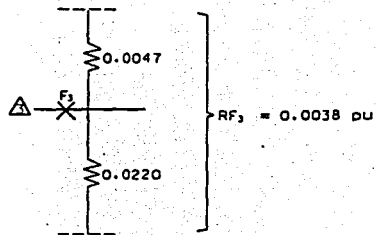


FIGURA 31

### 3.8.4 CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA $F_2$

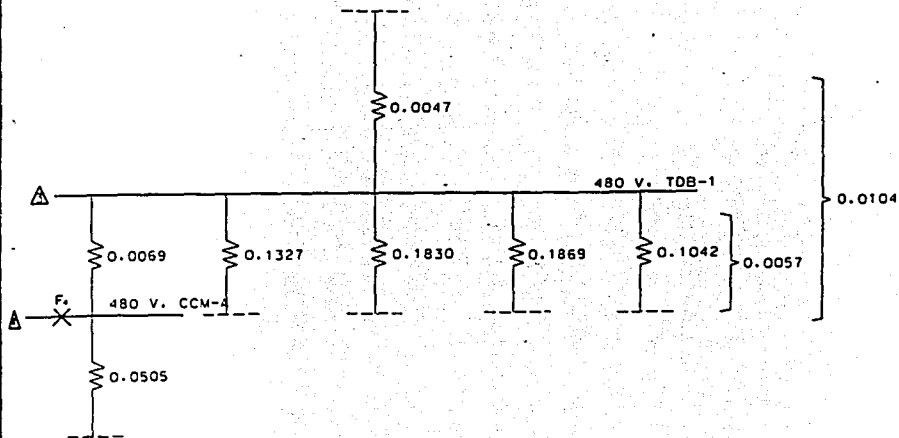


FIGURA 32

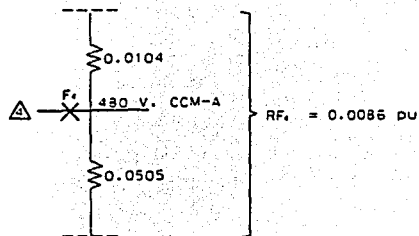


FIGURA 33



3.8.5 CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA  $F_s$

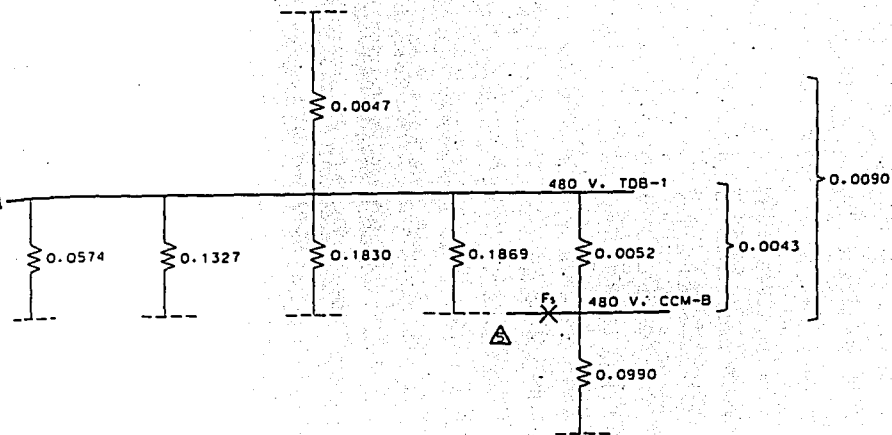


FIGURA 34

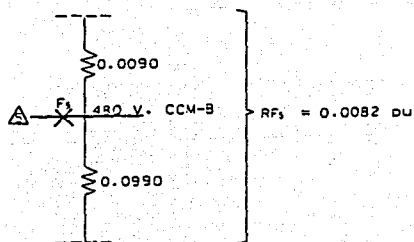


FIGURA 35

### 3.8.6 CALCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA $F_1$

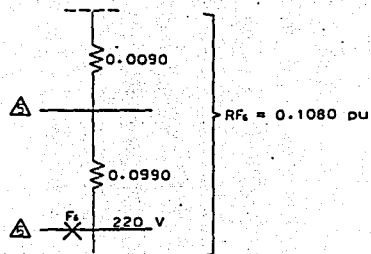


FIGURA 36

3.8.7 CALCULO DE LA RECTANCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA F1

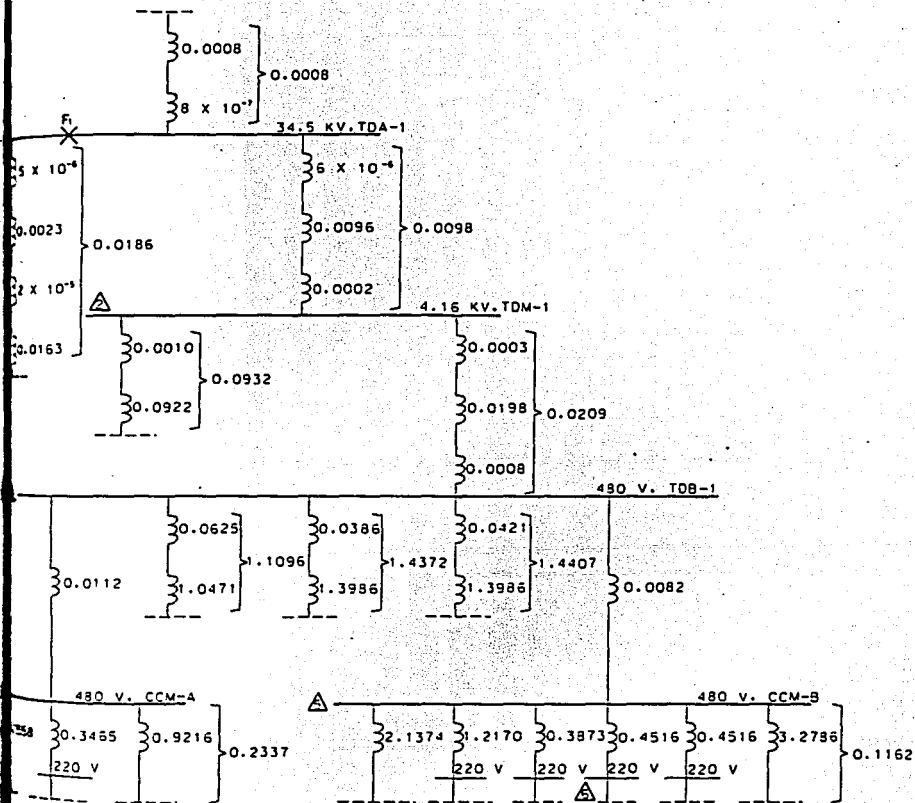


FIGURA 37

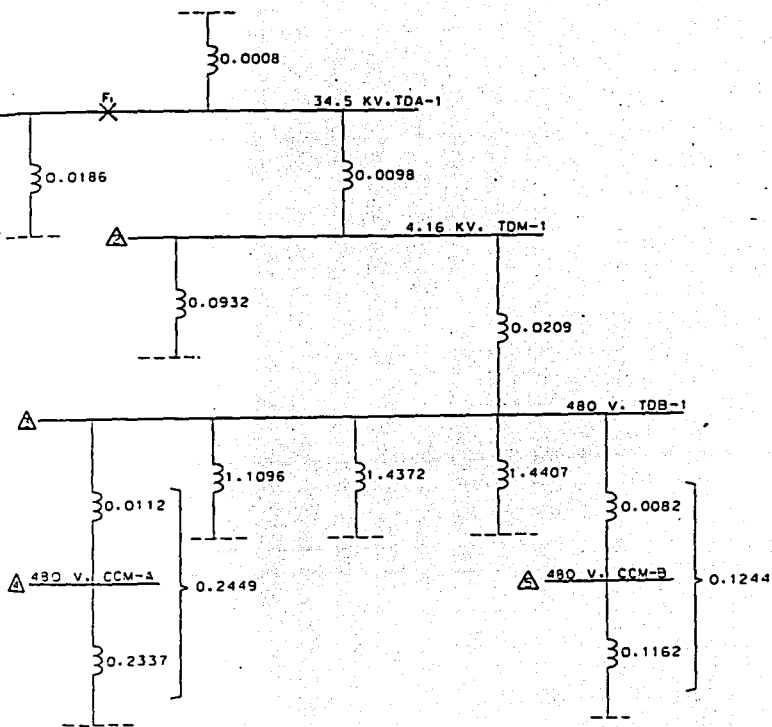


FIGURA 38

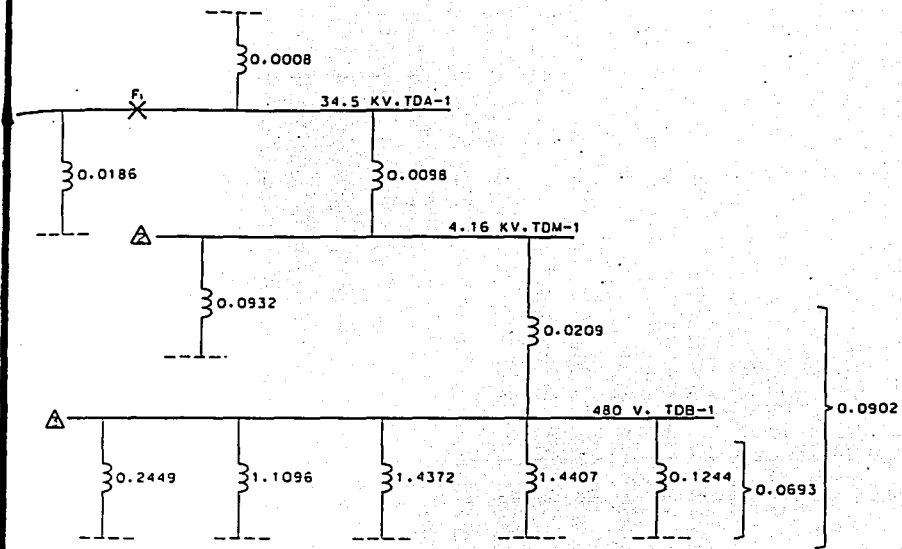


FIGURA 39

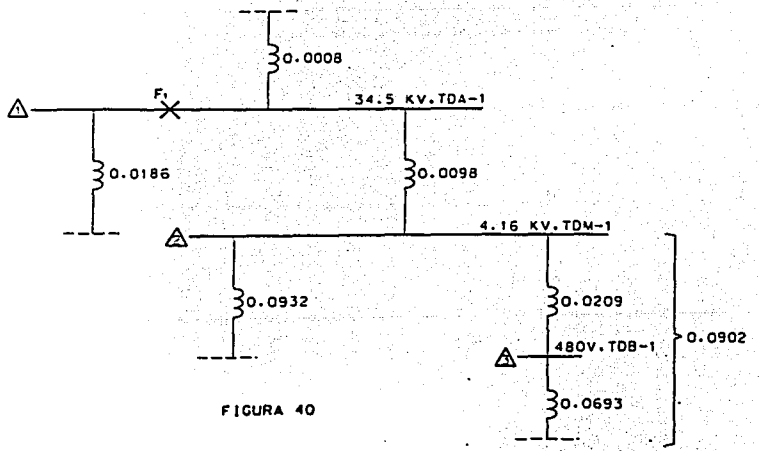


FIGURA 40

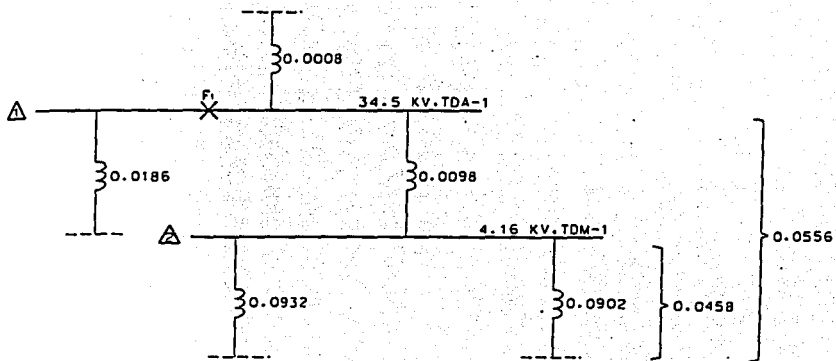


FIGURA 41

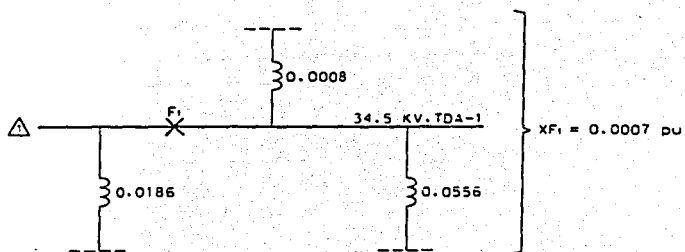


FIGURA 42

3.8.8 CALCULO DE LA REACTANCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA  $F_2$

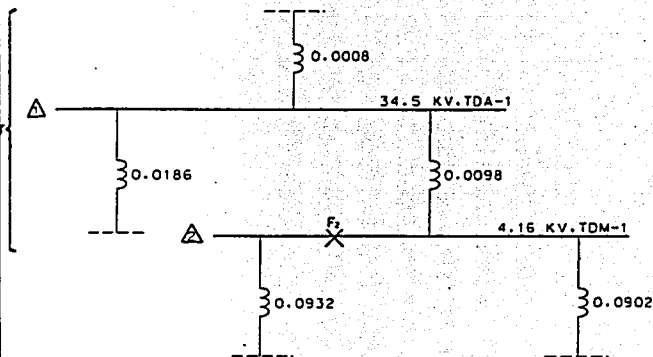


FIGURA 43

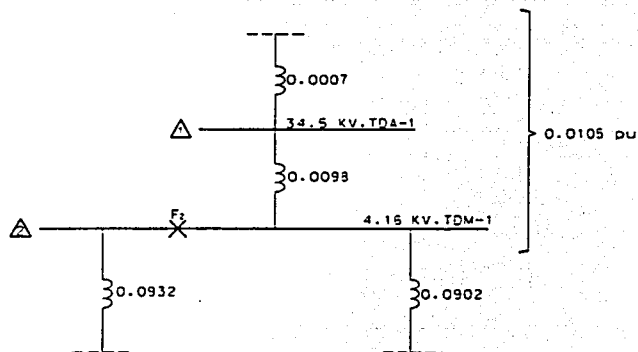


FIGURA 44

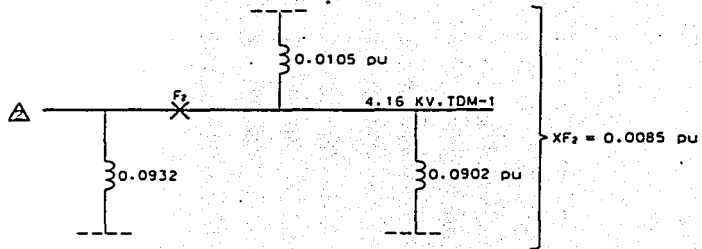


FIGURA 45



3.8.9 CALCULO DE LA RECTANCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA  $F_1$

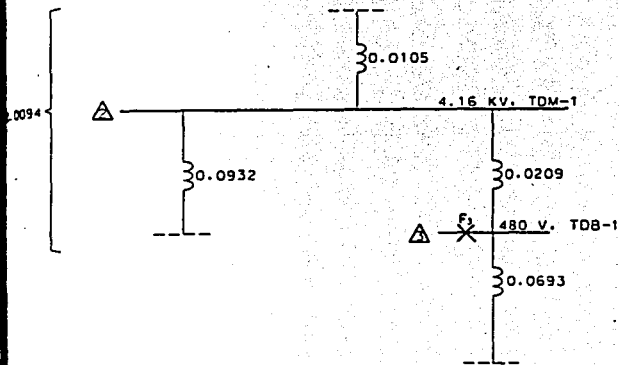


FIGURA 46

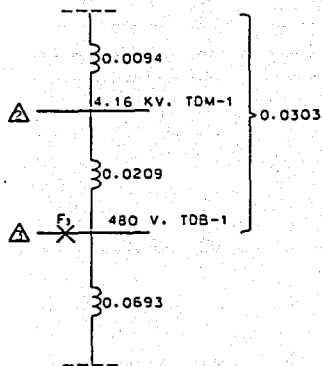


FIGURA 47

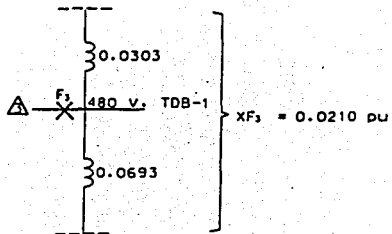


FIGURA 48

3.8.10 CALCULO DE LA RECTANCIA EN EL PUNTO DE FALLA F.

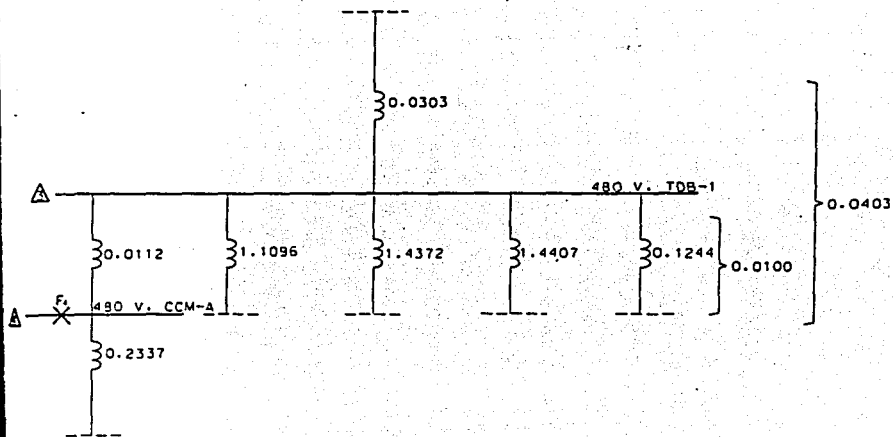


FIGURA 49

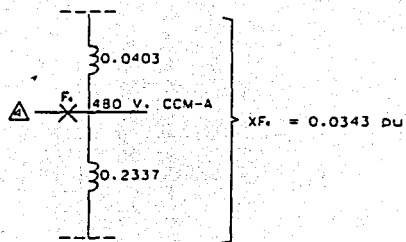


FIGURA 50

3.8.11 CALCULO DE LA REACTANCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA F<sub>3</sub>

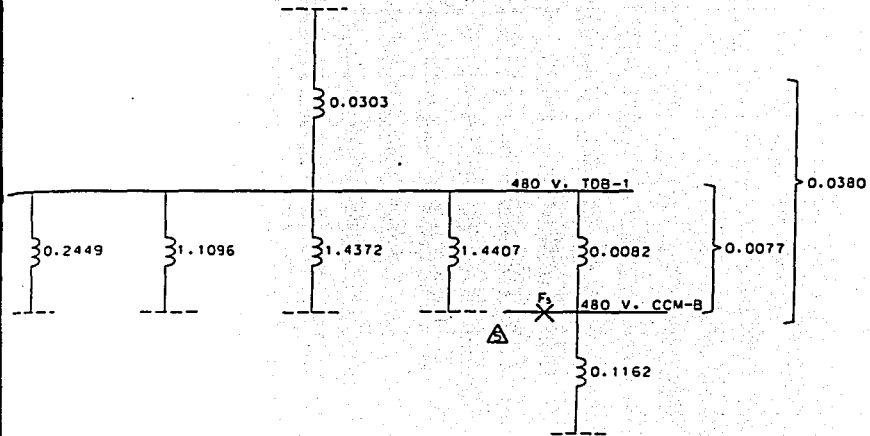


FIGURA 51

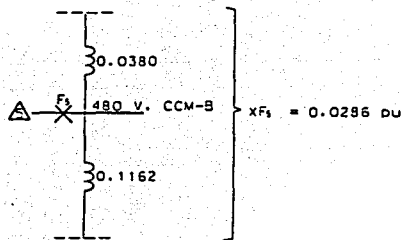


FIGURA 52

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3.8.12 CALCULO DE LA REACTANCIA EQUIVALENTE EN EL PUNTO DE FALLA  $F_0$

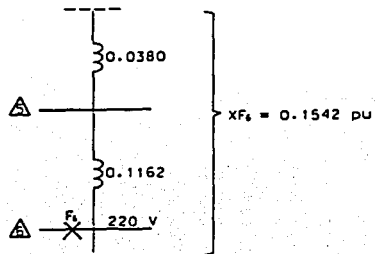


FIGURA 53

### 3.8.13 Cálculo de la impedancia equivalente en pu en el punto de falla F<sub>1</sub>.

Con los valores de la resistencia y la reactancia en pu en el punto de falla F<sub>1</sub> que son:  $R_1 = 7 \times 10^{-3}$  pu y  $X_1 = 0.0007$  pu y utilizando la fórmula 7, calculamos la impedancia equivalente en pu en el punto mencionado:

$$Z_1 = \sqrt{(R_1)^2 + (X_1)^2}$$

Sustituyendo los respectivos valores en la fórmula tenemos que:

$$Z_1 = \sqrt{(7 \times 10^{-3})^2 + (0.0007)^2}$$

Por lo tanto:

$$Z_1 = 0.0007 \text{ pu.}$$

### 3.8.14 Cálculo de la impedancia equivalente en pu en el punto de falla F<sub>2</sub>.

Con los valores de la resistencia y la reactancia en pu en el punto de falla F<sub>2</sub> que son:  $R_2 = 0.0010$  pu y  $X_2 = 0.0085$  pu y utilizando la fórmula 7, calculamos la impedancia equivalente en pu en el punto mencionado:

$$Z_2 = \sqrt{(R_2)^2 + (X_2)^2}$$

Sustituyendo los respectivos valores en la fórmula tenemos que:

$$Z_2 = \sqrt{(0.0010)^2 + (0.0085)^2}$$

Por lo tanto:

$$Z_2 = 0.0085 \text{ pu.}$$

### 3.8.15 Cálculo de la impedancia equivalente en pu en el punto de falla F<sub>3</sub>.

Con los valores de la resistencia y la reactancia en pu en el punto de falla F<sub>3</sub> que son:  $R_3 = 0.0038\text{pu}$  y  $X_3 = 0.0210\text{pu}$  y utilizando la fórmula 7, calculamos la impedancia equivalente en pu en el punto mencionado:

$$Z_3 = \sqrt{(R_3)^2 + (X_3)^2}$$

Sustituyendo los respectivos valores en la fórmula tenemos que:

$$Z_3 = \sqrt{(0.0038)^2 + (0.0210)^2}$$

Por lo tanto:

$$Z_3 = 0.0213\text{pu.}$$

### 3.8.16 Cálculo de la impedancia equivalente en pu en el punto de falla F<sub>4</sub>.

Con los valores de la resistencia y la reactancia en pu en el punto de falla F<sub>4</sub> que son:  $R_4 = 0.0086\text{pu}$  y  $X_4 = 0.0343\text{pu}$  y utilizando la fórmula 7, calculamos la impedancia equivalente en pu en el punto mencionado:

$$Z_4 = \sqrt{(R_4)^2 + (X_4)^2}$$

Sustituyendo los respectivos valores en la fórmula tenemos que:

$$Z_4 = \sqrt{(0.0086)^2 + (0.0343)^2}$$

Por lo tanto:

$$Z_4 = 0.0353\text{pu.}$$

### 3.8.17 Cálculo de la impedancia equivalente en pu en el punto de falla F<sub>3</sub>.

Con los valores de la resistencia y la reactancia en pu en el punto de falla F<sub>3</sub> que son: R<sub>3</sub> = 0.0082pu y X<sub>3</sub> = 0.0286pu y utilizando la fórmula 7, calculamos la impedancia equivalente en pu en el punto mencionado:

$$Z_3 = \sqrt{(R_3)^2 + (X_3)^2}$$

Sustituyendo los respectivos valores en la fórmula tenemos que:

$$Z_3 = \sqrt{(0.0082)^2 + (0.0286)^2}$$

Por lo tanto:

$$Z_3 = 0.0297pu.$$

### 3.8.18 Cálculo de la impedancia equivalente en pu en el punto de falla F<sub>6</sub>.

Con los valores de la resistencia y la reactancia en pu en el punto de falla F<sub>6</sub> que son: R<sub>6</sub> = 0.1080pu y X<sub>6</sub> = 0.1542pu y utilizando la fórmula 7, calculamos la impedancia equivalente en pu en el punto mencionado:

$$Z_6 = \sqrt{(R_6)^2 + (X_6)^2}$$

Sustituyendo los respectivos valores en la fórmula tenemos que:

$$Z_6 = \sqrt{(0.1080)^2 + (0.1542)^2}$$

Por lo tanto:

$$Z_6 = 0.1882pu.$$



### 3.9 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito.

#### 3.9.1 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>1</sub>:

Con el valor de la impedancia en pu en el punto de falla F<sub>1</sub> que es: Z<sub>1</sub>=0.0007pu y utilizando las fórmulas 11 y 12, calculamos los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto mencionado:

$$I_{cc} = \frac{kV_{Abase}}{Z_{pu}\sqrt{3}(kV_{base})} = \frac{1000}{0.0007 \times 1.732 \times (34.5)} = 23,908 \text{ Amp.}$$

$$P_{cc} = \frac{kV_{Abase}}{Z_{pu}} = \frac{1000}{0.0007} = 1429 \text{ MVA}$$

#### 3.9.2 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>2</sub>:

Con el valor de la impedancia en pu en el punto de falla F<sub>2</sub> que es: Z<sub>2</sub>=0.0085pu y utilizando las fórmulas 11 y 12, calculamos los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto mencionado:

$$I_{cc} = \frac{kV_{Abase}}{Z_{pu}\sqrt{3}(kV_{base})} = \frac{1000}{0.0085 \times 1.732 \times 4.16} = 16,328 \text{ Amp.}$$

$$P_{cc} = \frac{kV_{Abase}}{Z_{pu}} = \frac{1000}{0.0085} = 118 \text{ MVA}$$

#### 3.9.3 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>3</sub>:

Con el valor de la impedancia en pu en el punto de falla F<sub>3</sub> que es: Z<sub>3</sub>=0.0213pu y utilizando las fórmulas 11 y 12, calculamos los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto mencionado:

$$I_{cc} = \frac{kV_{Abase}}{Z_{pu}\sqrt{3}(kV_{base})} = \frac{1000}{0.0213 \times 1.732 \times (0.48)} = 56,472 \text{ Amp.}$$

$$P_{cc} = \frac{kV_{Abase}}{Z_{pu}} = \frac{1000}{0.0213} = 47 \text{ MVA}$$

### 3.9.4 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>4</sub>:

Con el valor de la impedancia en pu en el punto de falla F<sub>4</sub> que es: Z<sub>4</sub>=0.0353 pu y utilizando las fórmulas 11 y 12, calculamos los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto mencionado:

$$I_{cc} = \frac{kV_{Base}}{Z_{pu}\sqrt{3}(kV_{base})} = \frac{1000}{0.0353 \times 1.732 \times (0.48)} = 34,075 \text{ Amp.}$$

$$P_{cc} = \frac{kV_{Base}}{Z_{pu}} = \frac{1000}{0.0353} = 28 \text{ MVA}$$

### 3.9.5 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>5</sub>:

Con el valor de la impedancia en pu en el punto de falla F<sub>5</sub> que es: Z<sub>5</sub>=0.0297 pu y utilizando las fórmulas 11 y 12, calculamos los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto mencionado:

$$I_{cc} = \frac{kV_{Base}}{Z_{pu}\sqrt{3}(kV_{base})} = \frac{1000}{0.0297 \times 1.732 \times (0.48)} = 40,450 \text{ Amp.}$$

$$P_{cc} = \frac{kV_{Base}}{Z_{pu}} = \frac{1000}{0.0297} = 34 \text{ MVA}$$

### 3.9.6 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>6</sub>:

Con el valor de la impedancia en pu en el punto de falla F<sub>6</sub> que es: Z<sub>6</sub>=0.1882 pu y utilizando las fórmulas 11 y 12, calculamos los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito en el punto mencionado:

$$I_{cc} = \frac{kV_{Base}}{Z_{pu}\sqrt{3}(kV_{base})} = \frac{1000}{0.1882 \times 1.732 \times (0.22)} = 13,945 \text{ Amp.}$$

$$P_{cc} = \frac{kV_{Base}}{Z_{pu}} = \frac{1000}{0.1882} = 5 \text{ MVA}$$

### 3.10 Determinación de los factores de multiplicación conociendo la relación X/R.

#### 3.10.1 Determinación del factor de multiplicación en el punto de falla F<sub>1</sub>:

Con el valor de X/R en el punto de falla F<sub>1</sub> que es:  $\frac{X}{R} = \frac{0.0007}{7 \times 10^{-3}} = 70.0000$

De la Tabla no. 1 extrapolamos para encontrar el multiplicador de amperes 3φ rmc a medio ciclo:

Relación X/R de corto circuito	Promedio 3-φ AMP. rmc a ½ ciclo
70.0000	K (valor a extrapolar)
10.9740	1.3010
6.5912	1.2290

Aplicando la fórmula:  $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$

De donde definimos lo siguiente:

$$A=70.0000-10.9740=59.0260$$

$$B=70.0000 - 6.5912=63.4088$$

$$\text{Esto implica que: } \frac{A}{B} = \frac{59.0260}{63.4088} = 0.9308$$

$$C=K-1.3010$$

$$D=K-1.2290$$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{A}{B} = \frac{C}{D} = 0.9308 = \frac{K-1.3010}{K-1.2290}$$

$$(K-1.2290)0.9308=K-1.3010$$

$$K0.9308-K=1.1439-1.3010$$

$$K(0.9308-1)=-0.1571$$

$$K = \frac{-0.1571}{-0.0692} = 2.2700$$

### 3.10.2 Determinación del factor de multiplicación en el punto de falla F<sub>2</sub>:

Con el valor de X/R en el punto de falla F<sub>2</sub> que es:  $\frac{X}{R} = \frac{0.0085}{0.0010} = 8.5000$

De la Tabla no. 1 interpolamos entre los valores de X/R 9.9301 y 6.5912 para encontrar el multiplicador de amperes 3 $\phi$  rmc a medio ciclo:

Relación X/R de corto circuito	Promedio 3- $\phi$ AMP. rmc a 1/2 ciclo
9.9301	1.2290
8.5000	K ( valor a interpolar )
6.5912	1.1710

Aplicando la fórmula:  $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$

De donde definimos lo siguiente:

$$A=9.9301-8.5000=1.4300$$

$$B=9.9301-6.5912=3.3300$$

$$\text{Esto implica que: } \frac{A}{B} = \frac{1.4300}{3.3300} = 0.4294$$

$$C=1.2290-K$$

$$D=1.2290-1.1710=0.0580$$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{A}{B} = \frac{C}{D} = 0.4294 = \frac{1.2290-K}{0.0580}$$

$$1.2290-K=0.0249$$

$$K=1.2290-0.0249$$

$$K=1.2041$$

### 3.10.3 Determinación del factor de multiplicación en el punto de falla F<sub>3</sub>:

Con el valor de X/R en el punto de falla F<sub>3</sub> que es:  $\frac{X}{R} = \frac{0.0210}{0.0038} = 5.5200$

De la Tabla no. 1 interpolamos entre los valores de X/R 6.5912 y 4.8990 para encontrar el multiplicador de amperes 3 $\phi$  rmc a medio ciclo:

Relación X/R de corto circuito	Promedio 3- $\phi$ AMP. rmc a 1/2 ciclo
6.5912	1.1710
5.5200	K (valor a interpolar)
4.8990	1.1270

Aplicando la fórmula:  $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$

De donde definimos lo siguiente:

$$A = 6.5912 - 5.5200 = 1.0712$$

$$B = 6.5912 - 4.8990 = 1.6922$$

$$\text{Esto implica que: } \frac{A}{B} = \frac{1.0712}{1.6922} = 0.6330$$

$$C = 1.1710 - K$$

$$D = 1.1710 - 1.1270 = 0.0440$$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{A}{B} = \frac{C}{D} = 0.6330 = \frac{1.1710 - K}{0.0440}$$

$$1.1710 - K = 0.0278$$

$$K = 1.1710 - 0.0278$$

$$K = 1.1432$$

### 3.10.4 Determinación del factor de multiplicación en el punto de falla F<sub>4</sub>:

Con el valor de X/R en el punto de falla F<sub>4</sub> que es:  $\frac{X}{R} = \frac{0.0343}{0.0086} = 3.9883$

De la Tabla no. 1 interpolamos entre los valores de X/R 4.8990 y 3.8730 para encontrar el multiplicador de amperes 3 $\phi$  rmc a medio ciclo:

Relación X/R de corto circuito	Promedio 3- $\phi$ AMP. rmc a $\frac{1}{2}$ ciclo
4.8990	1.1270
3.9883	K (valor a interpolar)
3.8730	1.0930

Aplicando la fórmula:  $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$

De donde definimos lo siguiente:

$$A = 4.8990 - 3.9883 = 0.9107$$

$$B = 4.8990 - 3.8730 = 1.0260$$

$$\text{Esto implica que: } \frac{A}{B} = \frac{0.9107}{1.0260} = 0.8876$$

$$C = 1.1270 - K$$

$$D = 1.1270 - 1.0930 = 0.0340$$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{A}{B} = \frac{C}{D} = 0.8876 = \frac{1.1270 - K}{0.0340}$$

$$1.1270 - K = 0.0301$$

$$K = 1.1270 - 0.0301$$

$$K = 1.1969$$

### 3.10.5 Determinación del factor de multiplicación en el punto de falla $F_3$ :

Con el valor de X/R en el punto de falla  $F_3$  que es:  $\frac{X}{R} = \frac{0.0286}{0.0082} = 3.4878$

De la Tabla no. 1 interpolamos entre los valores de X/R 3.8730 y 3.1798 para encontrar el multiplicador de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo:

Relación X/R de corto circuito	Promedio 3- $\phi$ AMP. rmc a $\frac{1}{2}$ ciclo
3.8730	1.0930
3.4878	K (valor a interpolar)
3.1798	1.0660

Aplicando la fórmula:  $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$

De donde definimos lo siguiente:

$$A = 3.8730 - 3.4878 = 0.3852$$

$$B = 3.8730 - 3.1798 = 0.6932$$

$$\text{Esto implica que: } \frac{A}{B} = \frac{0.3852}{0.6932} = 0.5556$$

$$C = 1.0930 - K$$

$$D = 1.0930 - 1.0660 = 0.0270$$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{A}{B} = \frac{C}{D} = 0.5556 = \frac{1.0930 - K}{0.0270}$$

$$1.0930 - K = 0.0150$$

$$K = 1.0930 - 0.0150$$

$$K = 1.0780$$

### 3.10.6 Determinación del factor de multiplicación en el punto de falla $F_6$ :

Con el valor de X/R en el punto de falla  $F_6$  que es:  $\frac{X}{R} = \frac{0.1542}{0.1080} = 1.4277$

De la Tabla no. 1 interpolamos entre los valores de X/R 1.5185 y 1.3333 para encontrar el multiplicador de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo:

Relación X/R de corto circuito	Promedio 3- $\phi$ AMP. rmc a $\frac{1}{2}$ ciclo
1.5185	1.0080
1.4277	K (valor a interpolar)
1.3333	1.0040

Aplicando la fórmula:  $\frac{A}{B} = \frac{C}{D}$

De donde definimos lo siguiente:

$$A = 1.5185 - 1.4277 = 0.0908$$

$$B = 1.5185 - 1.3333 = 0.1852$$

$$\text{Esto implica que: } \frac{A}{B} = \frac{0.0908}{0.1852} = 0.4902$$

$$C = 1.0080 - K$$

$$D = 1.0080 - 1.0040 = 0.0040$$

$$\text{Por lo tanto: } \frac{A}{B} = \frac{C}{D} = 0.4902 = \frac{1.0080 - K}{0.0040}$$

$$1.0080 - K = 0.0019$$

$$K = 1.0080 - 0.0019$$

$$K = 1.0061$$



### **3.11 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito.**

#### **3.11.1 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>1</sub>:**

Con los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito que son:  $I_{cc}=23,908\text{Amp}$  y  $P_{cc}=1429\text{MVA}$ , el factor de multiplicación de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo en el punto de falla F<sub>1</sub> que es: 2.2700 y utilizando las fórmulas 13 y 14, calculamos los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en este punto:

$$I_{cc. \text{ asimétrica}} = \text{Factor de asimetría} \times I_{cc. \text{ Simétrica}}$$

$$I_{cc. \text{ asimétrica}} = 2.2700 \times 23,908$$

$$I_{cc. \text{ asimétrica}} = 54,271\text{Amp.}$$

$$P_{cc. \text{ asimétrica}} = \text{Factor de asimetría} \times P_{cc. \text{ simétrica}}$$

$$P_{cc. \text{ asimétrica}} = 2.2700 \times 1429$$

$$P_{cc. \text{ asimétrica}} = 3244\text{MVA.}$$

#### **3.11.2 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>2</sub>:**

Con los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito que son:  $I_{cc}=16,328\text{Amp}$  y  $P_{cc}=118\text{MVA}$ , el factor de multiplicación de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo en el punto de falla F<sub>2</sub> que es: 1.2041 y utilizando las fórmulas 13 y 14, calculamos los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en este punto:

$$I_{cc. \text{ asimétrica}} = \text{Factor de asimetría} \times I_{cc. \text{ Simétrica}}$$

$$I_{cc. \text{ asimétrica}} = 1.2041 \times 16,328$$

$$I_{cc. \text{ asimétrica}} = 19,661\text{Amp.}$$

$$P_{cc. \text{ asimétrica}} = \text{Factor de asimetría} \times P_{cc. \text{ simétrica}}$$

$$P_{cc. \text{ asimétrica}} = 1.2041 \times 118$$

$$P_{cc. \text{ asimétrica}} = 142\text{MVA.}$$

### **3.11.3 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>3</sub>:**

Con los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito que son:  $I_{cc}=56,472\text{Amp}$  y  $P_{cc}=47\text{MVA}$ , el factor de multiplicación de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo en el punto de falla  $F_3$  que es: 1.1432 y utilizando las fórmulas 13 y 14, calculamos los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en este punto:

$I_{cc. asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times I_{cc. Simétrica}$

$I_{cc. asimétrica} = 1.1432 \times 56,472$

$I_{cc. asimétrica} = 64,559\text{Amp.}$

$P_{cc. asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times P_{cc. simétrica}$

$P_{cc. asimétrica} = 1.1432 \times 47$

$P_{cc. asimétrica} = 54\text{MVA.}$

### **3.11.4 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>4</sub>:**

Con los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito que son:  $I_{cc}=34,075\text{Amp}$  y  $P_{cc}=28\text{MVA}$ , el factor de multiplicación de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo en el punto de falla  $F_4$  que es: 1.0969 y utilizando las fórmulas 13 y 14, calculamos los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en este punto:

$I_{cc. asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times I_{cc. Simétrica}$

$I_{cc. asimétrica} = 1.0969 \times 34,075$

$I_{cc. asimétrica} = 37,377\text{Amp.}$

$P_{cc. asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times P_{cc. simétrica}$

$P_{cc. asimétrica} = 1.0969 \times 28$

$P_{cc. asimétrica} = 31\text{MVA.}$

### **3.11.5 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>s</sub>:**

Con los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito que son:  $I_{cc}=40,450\text{Amp}$  y  $P_{cc}=34\text{MVA}$ , el factor de multiplicación de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo en el punto de falla  $F_s$  que es: 1.0780 y utilizando las fórmulas 13 y 14, calculamos los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en este punto:

$$I_{cc} \text{ asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times I_{cc} \text{ Simétrica}$$

$$I_{cc} \text{ asimétrica} = 1.0780 \times 40,450$$

$$I_{cc} \text{ asimétrica} = 43,605\text{Amp.}$$

$$P_{cc} \text{ asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times P_{cc} \text{ simétrica}$$

$$P_{cc} \text{ asimétrica} = 1.0780 \times 34$$

$$P_{cc} \text{ asimétrica} = 37\text{MVA.}$$

### **3.11.6 Cálculo de los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en el punto de falla F<sub>s</sub>:**

Con los valores de la corriente y la potencia simétricas de corto circuito que son:  $I_{cc}=13,945\text{Amp}$  y  $P_{cc}=5\text{MVA}$ , el factor de multiplicación de amperes  $3\phi$  rmc a medio ciclo en el punto de falla  $F_s$  que es: 1.0061 y utilizando las fórmulas 13 y 14, calculamos los valores de la corriente y la potencia asimétricas de corto circuito en este punto:

$$I_{cc} \text{ asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times I_{cc} \text{ Simétrica}$$

$$I_{cc} \text{ asimétrica} = 1.0061 \times 13,945$$

$$I_{cc} \text{ asimétrica} = 14,030\text{Amp.}$$

$$P_{cc} \text{ asimétrica} = \text{Factor de asimetría} \times P_{cc} \text{ simétrica}$$

$$P_{cc} \text{ asimétrica} = 1.0061 \times 5$$

$$P_{cc} \text{ asimétrica} = 5\text{MVA.}$$

# CAPÍTULO 4

## CÁLCULO DE FALLA DE FASE A TIERRA



## CAPÍTULO 4

### CÁLCULO DE FALLA DE FASE A TIERRA

#### 4.1 Falla de línea (fase) a tierra.

Este tipo de falla es la que se presenta con mayor frecuencia en los sistemas eléctricos ya que puede tener su origen en distintas causas como pueden ser fallas en los aislamientos, contacto de un conductor de fase con estructuras, carcazas, etc; descargas atmosféricas, contactos de ramas de árboles con conductores, etc.

La corriente de corto circuito para este tipo de falla se ve afectada por la forma en que se encuentran conectados los neutros de los equipos y aparatos conectados a tierra. Ya que representan los puntos de retorno para circulación de las corrientes de secuencia cero por lo que para el estudio de este tipo de fallas es necesario considerar la forma en como se encuentran conectadas las redes de secuencia de acuerdo al punto seleccionado para la falla y en particular en la llamada red de secuencia cero de los elementos del sistema la forma en como se encuentran conectadas.

La determinación de la corriente total de falla en un punto se obtiene como la contribución de las corrientes de corto circuito por los elementos activos de la red bajo estudio en ese punto; esto significa que se requiere elaborar un diagrama de impedancias que considere a las llamadas impedancias de secuencia positiva, otro que considere a las de secuencia negativa y uno más que contenga a los de secuencia cero, a partir de estos diagramas se obtienen las impedancias equivalentes en cada caso vistos del punto de la falla hacia la fuente de alimentación del corto circuito.

Lo anterior conduce a que el inicio de un estudio de corto circuito para una falla de línea a tierra (como para cualquier otro tipo de falla) debe ser la elaboración de los diagramas de impedancias para el sistema bajo estudio, para esto el procedimiento es el que ya hemos desarrollado:

- a) Se parte del diagrama unifilar del sistema en donde se representan todos los elementos principales para el estudio es decir las fuentes como son los motores sincrónicos, motores de inducción, etc. los elementos pasivos como son los transformadores, cables, etc. indicando los principales datos para cada elemento como su potencia nominal, tensión nominal, reactancias transitorias, subtransitorias y de secuencia cero en motores, impedancias de transformadores, cables y en general elementos limitadores de corrientes.

- b) Seleccionar una potencia base y las tensiones base convenientes para referir todas las impedancias a un valor común de potencia y a las tensiones adecuadas.
- c) Se elaboran los diagramas de impedancias del sistema, indicando sobre estos los valores de impedancias de los distintos elementos, ya estando referidos a una base común.

Para la elaboración de los diagramas de impedancias se puede proceder como se indica en los siguientes puntos:

#### **4.2 Diagrama de impedancias de secuencia positiva.**

Este diagrama se puede obtener en una forma bastante simple reemplazando cada elemento del sistema mostrado en el diagrama unifilar por su impedancia, ya referida a la base común y representado también a las fuentes de voltaje con sus valores expresados en por unidad y referidos también a una base de tensión común.

En el caso de las fuentes de voltaje es necesario considerar que dependiendo de la importancia y magnitud del sistema se pueden obtener fuentes equivalentes para los motores síncronos y grupos de motores de inducción.

#### **4.3 Diagrama de impedancias de secuencia negativa.**

El diagrama de impedancias de secuencia negativa para un sistema o red eléctrica se elabora en la misma forma que el de secuencia positiva. Es bastante común que en los estudios de corto circuito de fase a tierra se haga solo el diagrama de secuencia positiva y las reactancias se tomen igual para la secuencia negativa en la fórmula de cálculo.

#### **4.4 Diagrama de impedancias de secuencia cero.**

La elaboración del diagrama de impedancias de secuencia cero requiere de consideraciones adicionales a las hechas para los diagramas de secuencia positiva y negativa ya que las corrientes de secuencia cero que circulan a través de estas impedancias, lo hacen a tierra por lo que influye en forma determinante la forma en como se encuentran los neutros de los distintos elementos conectados a tierra.

Para la elaboración del diagrama de secuencia cero es conveniente hacer una breve revisión de la forma en como se conectan a tierra y sus correspondientes diagramas de reactivancias para algunos elementos aislados, en particular de los transformadores, ver figura 54 en la página siguiente.

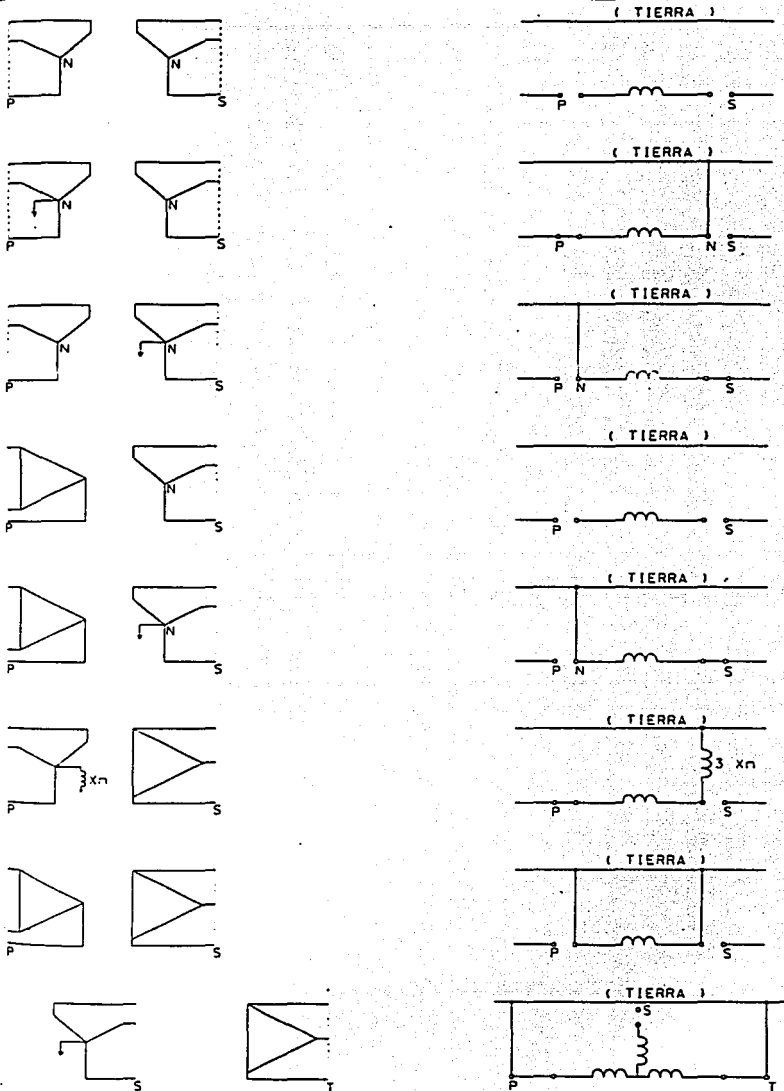


FIGURA 54 DIAGRAMAS DE SECUENCIA CERO PARA TRANSFORMADORES



#### 4.5 Falla de línea (fase) a tierra sólida.

En sistemas con el neutro sólidamente conectado a tierra la falla sólida de fase a tierra es por lo general, igual o ligéramente menor que la falla sólida trifasica, excepto cuando se conectan los neutros a tierra a través de un valor elevado de impedancia en el que el valor de corriente es significativamente menor.

El cálculo de la falla de fase a tierra, es necesario en las instalaciones comerciales e industriales que tienen el neutro sólidamente aterrizado en el lado de bajo voltaje, para el cálculo de la falla de fase a tierra, se requiere del uso de técnicas por componentes simétricas.

#### 4.6 Valores típicos de reactancia positiva, negativa y cero del equipo y elementos importantes.

La maquinaria síncrona tiene valores típicos de reactancia ( $X_d$ = síncrona,  $X'_d$ =transitoria,  $X''_d$ =subtransitoria) las cuales son reactancias de secuencia positiva ( $X_1$ ). La reactancia de secuencia negativa ( $X_2$ ) en general es igual a la subtransitoria ( $X_2 = X''_d$ ). La reactancia de secuencia cero ( $X_0$ ) generalmente es menor que cualquier de las otras.

Para los motores síncronos y de inducción, se puede considerar en forma aproximada que:  $X_0 = X_1 / 2$ .

Los transformadores tiene reactancias idénticas de secuencia positiva y negativa. La reactancia de secuencia cero también tiene el mismo valor ( $X_1 = X_2 = X_0$ ).

Las corrientes de secuencia cero no fluyen si el neutro del transformador no se conecta a tierra. Cuando la corriente de secuencia cero no fluye,  $X_0$  se considera infinita. En la mayoría de los casos en los que las corrientes de secuencia cero pueden fluir  $X_0$  es igual a la reactancia de secuencia positiva.

En un transformador conectado en delta -Y, la corriente de secuencia cero solo puede fluir a través de la conexión del neutro de la Y si el neutro se conecta a tierra. Ninguna corriente de secuencia cero fluye en el lado de la conexión delta.

En los cables, las reactancias positiva y negativa se consideran iguales, la reactancia de secuencia cero de un cable trifásico es mayor que las reactancias de secuencia positiva y negativa debido a que la separación entre los conductores de salida y los de retorno es mayor en el circuito de secuencia cero que en los de secuencia positiva y negativa. La vía de retorno a través del forro o un conductor con conductor con distribución a tierra puede conducir todas las corrientes de secuencia cero. Esto origina una caída de voltaje tres veces mayor que la producida

si la vía de retorno conduce la corriente de sólo un conductor de salida. A la vía de retorno en un circuito de secuencia cero se le asigna una impedancia de tres veces su impedancia real.

#### **4.7 Determinación de los valores de la reactancia de secuencia cero del equipo y elementos importantes en pu.**

Los transformadores tienen reactancias idénticas de secuencia positiva y negativa. La reactancia de secuencia cero también tiene el mismo valor  $X_1=X_2=X_0$ , por lo tanto de la figura no 20:

##### **4.7.1 Transformador de potencia TRP-1:**

$$X_1=X_2=X_0=0.0023 \text{ pu.}$$

##### **4.7.2 Transformador de potencia TRP-2:**

$$X_1=X_2=X_0=0.0096 \text{ pu.}$$

##### **4.7.3 Transformador de potencia TRP-3:**

$$X_1=X_2=X_0=0.0198 \text{ pu.}$$

##### **4.7.4 Transformador de distribución TRD-1:**

$$X_1=X_2=X_0=0.3465 \text{ pu.}$$

##### **4.7.5 Transformador de alumbrado TRA-1:**

$$X_1=X_2=X_0=1.2170 \text{ pu.}$$

##### **4.7.6 Transformador de alumbrado TRA-2:**

$$X_1=X_2=X_0=0.3873 \text{ pu.}$$

##### **4.7.7 Transformador de alumbrado TRA-3:**

$$X_1=X_2=X_0=0.4516 \text{ pu.}$$

##### **4.7.8 Transformador de aislamiento TRAS-1:**

$$X_1=X_2=X_0=0.4516 \text{ pu.}$$

Para los motores síncronos y de inducción, se puede considerar en forma aproximada que:  $X_0 = X_1/2$  por lo tanto:

**4.7.9 Motor del compresor principal de aire M-1:**

$$X_0 = X_1/2 = 0.0163/2 = 0.0081 \text{ pu.}$$

**4.7.10 Motor del compresor de nitrógeno M-2:**

$$X_0 = X_1/2 = 0.0922/2 = 0.0461 \text{ pu.}$$

**4.7.11 Motor de la unidad de refrigeración M-3:**

$$X_0 = X_1/2 = 1.0471/2 = 0.5235 \text{ pu.}$$

**4.7.12 Motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4A:**

$$X_0 = X_1/2 = 1.3986/2 = 0.6993 \text{ pu.}$$

**4.7.13 Motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4B:**

$$X_0 = X_1/2 = 1.3986/2 = 0.6993 \text{ pu.}$$

**4.7.14 Centro de control de motores CCM-A (motores < 50 HP):**

$$X_0 = X_1/2 = 3.2558/2 = 1.6279 \text{ pu}$$

**4.7.15 Centro de control de motores CCM-A (motores ≥ 50 HP):**

$$X_0 = X_1/2 = 0.9216/2 = 0.4608 \text{ pu.}$$

**4.7.16 Centro de control de motores CCM-B (motores < 50 HP):**

$$X_0 = X_1/2 = 2.1374/2 = 1.0687 \text{ pu.}$$

**4.7.17 Centro de control de motores CCM-B (motores ≥ 50 HP):**

$$X_0 = X_1/2 = 3.2786/2 = 1.6393 \text{ pu.}$$

#### 4.7.18 Alimentador del tablero de distribución en media tensión TDA-1

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.3514\Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{10\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0017\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVAbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0017(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.0000014\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 1 \times 10^{-7} \text{pu.}$

#### 4.7.19 Alimentador del tablero de distribución en media tensión TDM-1

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos el valores de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.3753\Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{40\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0075\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVAbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0075(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0004\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.0004\text{pu.}$

#### 4.7.20 Alimentador del tablero de distribución en baja tensión TDB-1

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/Km} \times longitud}{1000} = \frac{0.3278 \Omega/Km \times 30m}{1000m} = 0.0098 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{ohms(kVBase)}{(kVbase)^2 1000} = \frac{0.0098(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0425 pu.$$

Por lo tanto:  $X_{pu} = 0.0425 pu.$

#### 4.7.21 Alimentador del transformador de potencia TRP-1

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/Km} \times longitud}{1000} = \frac{0.3514 \Omega/Km \times 35m}{1000m} = 0.0122 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{pu} = \frac{ohms(kVBase)}{(kVbase)^2 1000} = \frac{0.0122(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000102 pu.$$

Por lo tanto:  $X_{pu} = 1 \times 10^{-5} pu.$

#### 4.7.22 Alimentador del transformador de potencia TRP-2

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.3888\Omega/\text{Km} \times \frac{40\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0155\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0155(1000)}{(34.5)^2 1000} = 0.000013\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 1 \times 10^{-5} \text{pu.}$

#### 4.7.23 Alimentador del transformador de potencia TRP-3

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.3514\Omega/\text{Km} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0122\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0122(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0007\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.0007\text{pu.}$

#### 4.7.24 Alimentador del motor del compresor principal de aire M-1

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando tres conductores por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.3753\Omega/\text{Km}}{3} \times \frac{50\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0062\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0062(1000)}{(13.8)^2 1000} = 0.000032\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 3 \times 10^{-5} \text{pu.}$

#### 4.7.25 Alimentador del motor del compresor de nitrógeno M-2

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.5309\Omega/\text{Km} \times \frac{100\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0530\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0530(1000)}{(4.16)^2 1000} = 0.0030\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.0030\text{pu.}$

#### 4.7.26 Alimentador del motor de la unidad de refrigeración M-3

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.3271 \Omega/\text{Km} \times \frac{90\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0294 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0294(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.1276 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.1276 \text{pu.}$

#### 4.7.27 Alimentador del motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4A

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = 0.3304 \Omega/\text{Km} \times \frac{55\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0181 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0181(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0785 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.0785 \text{pu.}$



#### 4.7.28 Alimentador del motor de la bomba de agua de enfriamiento M-4B

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando un conductor por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.3304\Omega/\text{Km} \times 60\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0198\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVBase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0198(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0860\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.0860\text{pu.}$

#### 4.7.29 Alimentador del centro de control de motores CCM-A

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.3278\Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{35\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0057\Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVBase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0057(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0248\text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.0248\text{pu.}$

#### 4.7.30 Alimentador del centro de control de motores CCM-B

Con los datos de la longitud en metros, la reactancia de secuencia cero en ohms/Km de este alimentador y considerando dos conductores por fase obtenemos el valor de la reactancia en ohms utilizando la fórmula 15:

$$X_{\Omega} = \frac{X_{\Omega/\text{Km}} \times \text{longitud}}{1000} = \frac{0.3278 \Omega/\text{Km}}{2} \times \frac{25\text{m}}{1000\text{m}} = 0.0040 \Omega$$

Utilizando la fórmula 4, calculamos la reactancia sobre la base seleccionada en pu:

$$X_{\text{pu}} = \frac{\text{ohms}(\text{kVAbase})}{(\text{kVbase})^2 1000} = \frac{0.0040(1000)}{(0.48)^2 1000} = 0.0177 \text{pu.}$$

Por lo tanto:  $X_{\text{pu}} = 0.0177 \text{pu.}$

#### 4.7.31 Resistencia del neutro del transformador TRP-1

La impedancia base se calcula utilizando la fórmula 2 del capítulo 2, de la siguiente manera:

$$Z_{\text{base}} = \frac{(\text{kVbase})^2 (1000)}{\text{kVAbase}}$$

Por lo tanto sustituyendo valores en la fórmula:  $Z_{\text{base}} = \frac{(13.8)^2 (1000)}{1000} = 190.44 \Omega$

La resistencia en pu del neutro del transformador es:

$$R_{\text{pu}} = \frac{R_{\Omega}}{Z_{\text{base}}} = \frac{20}{190.44}$$

Finalmente:

$$R_{\text{pu}} = 0.3150 \text{pu.}$$

#### 4.7.32 Resistencia del neutro del transformador TRP-2

La impedancia base se calcula utilizando la fórmula 2 del capítulo 2, de la siguiente manera:

$$Z_{base} = \frac{(kV_{base})^2 (1000)}{kVA_{base}}$$

$$\text{Por lo tanto sustituyendo valores en la fórmula: } Z_{base} = \frac{(4.16)^2 (1000)}{1000} = 17.30\Omega$$

La resistencia en pu del neutro del transformador es:

$$R_{pu} = \frac{R_{\Omega}}{Z_{base}} = \frac{6}{17.30}$$

Finalmente:

$$R_{pu} = 0.3468pu.$$

#### 4.8 Cálculo de la reactancia de secuencia cero en la línea de suministro:

Para la falla de línea a tierra usando el método de las componentes simétricas se puede calcular la corriente total de falla en un punto dado del sistema.

**La fórmula 16.** Se usa para calcular la corriente de falla de fase a tierra:

$$I_a = 3I_0.$$

**La fórmula 17.** Se usa para calcular la corriente rmc simétrica de secuencia cero en el punto de falla

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0}$$

Donde:

$I_0$  = Corriente rmc simétrica de secuencia cero en el punto de falla.

$E$  = Voltaje en el punto de falla en pu.

$X_1$  = Reactancia equivalente de secuencia positiva en el punto de falla.

$X_2$  = Reactancia equivalente de secuencia negativa en el punto de falla.

$X_0$  = Reactancia equivalente de secuencia cero en el punto de falla.

La expresión anterior supone que las corrientes de secuencia en cada diagrama de secuencia se encuentran conectadas en serie.

Es bastante común que las reactancias de secuencia positiva y negativa sean iguales, por lo que entonces la expresión para el cálculo de la corriente de falla a tierra se puede simplificar como:

$$I_a = \frac{3E}{2X_1 + X_0}$$

La potencia de corto circuito monofásica en la línea de suministro es:

$$P_{cc1\phi} = 808 \text{ MVA} \quad (\text{Dato proporcionado por C.F.E. en } 34.5 \text{ kV})$$

Por lo tanto la corriente de corto circuito monofásico en la línea de suministro es:

$$I_{cc} = \frac{P_{cc1\phi} \times 1000}{\sqrt{3} \times \text{kV}} = \frac{808 \times 1000}{\sqrt{3} \times 34.5} = 13522 \text{ Amp.}$$

Utilizando la fórmula 1 del capítulo 2, calculamos la corriente base:

$$I_{base} = \frac{\text{kV}_{base}(1000)}{\sqrt{3}(\text{volts base})} = \frac{1000(1000)}{\sqrt{3} \times 34500} = 16.73 \text{ Amp.}$$

La corriente de falla en la línea de suministro en pu es:

$$I_a = \frac{I_{cc1\phi}}{I_{base}} = \frac{13522}{16.73} = 808.24 \text{ pu.}$$

Por lo tanto la corriente  $I_o$  en pu es:

$$I_o = \frac{I_a}{3} = \frac{808.24}{3} = 269.41 \text{ pu.}$$

Despejando de la fórmula 17 a  $X_o$ :

$$X_o = \frac{E}{I_o} - X_1 - X_2$$

Sabemos que E esta en pu, por lo tanto  $E=1$  y la reactancia positiva  $X_1$  equivalente en el punto de falla en el bus no. 1 ( ver figura no. 42) es:

$$X_1=0.0007\text{pu.}$$

Y considerando que para fines de este cálculo la reactancia positiva  $X_1$  es igual a la reactancia negativa  $X_2$  tenemos que:

$$X_1=X_2=0.0007\text{pu.}$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula 17 donde despejamos a  $X_0$  tenemos que:

$$X_0 = \frac{1}{269.41} - 0.0007 - 0.0007 = 0.0023\text{pu.}$$

#### 4.9 Elaboración del diagrama de reactancias de secuencia cero.

La elaboración del diagrama de reactancias de secuencia cero requiere de consideraciones adicionales a las hechas para los diagramas de secuencia positiva y negativa ya que las corrientes de secuencia cero que circulan a través de estas impedancias lo hacen a tierra por lo que influye en forma determinante la forma en como se encuentran los neutros de los distintos elementos conectados a tierra.

En la red de secuencia cero circulan sólo corrientes de secuencia cero, que aparecen durante la falla a tierra. La red de secuencia cero generalmente es similar a la red de secuencia negativa con excepción de: (1) Se presta atención especial a las conexiones de los transformadores. Los transformadores con conexión a tierra Y-Y permiten el flujo de corriente de secuencia cero de un lado a otro del banco. Los bancos conectados en delta-Y permiten que la corriente fluya en el neutro conectado a tierra, pero bloquean el paso de la corriente de secuencia cero de un lado al otro del banco (2) Las resistencias y las reactancias conectadas entre los neutros de las máquinas o transformadores y tierra se ilustran al triple de su valor nominal.

Las corrientes de secuencia cero o negativa no pueden fluir en sistemas equilibrados porque las máquinas sincronas o de inducción solo generan voltajes de secuencia positiva. Cuando ocurre una falla esta hace las veces de un convertidor que cambia los voltajes de secuencia positiva a voltajes de secuencia negativa y cero. Las componentes de secuencia negativa y cero se determinan instalando redes con una sola fuente de voltajes en la falla.

Para la elaboración del diagrama de reactancias de secuencia cero emplearemos el diagrama de reactancias de secuencia cero para transformadores, en este diagrama se muestran las diferentes conexiones de los transformadores y su representación en la red de secuencia cero.

En nuestro caso aplicaremos la figura que representa a la conexión delta-Y, en la cual podemos observar que la resistencia conectada entre el neutro del transformador y tierra tiene un valor al triple de su valor nominal como ya lo hemos comentado. El diagrama de reactancias de secuencia cero contiene todos los valores determinados en el punto 4.7 de este capítulo, finalmente calcularemos la corriente de falla a tierra en la línea de suministro, como podremos observar en el cálculo mencionado sólo intervendrán las reactancias de secuencia cero calculada en el punto y la reactancia de secuencia cero del alimentador del tablero TDA-1.

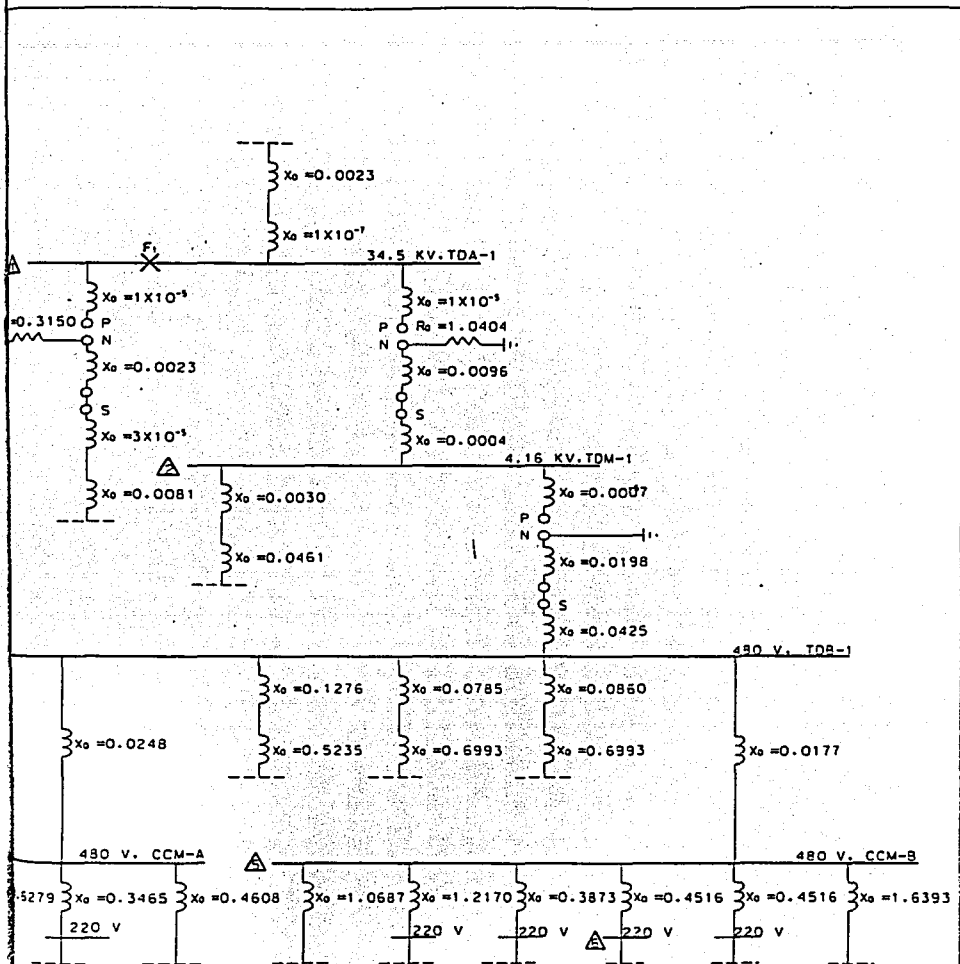


FIGURA 55 DIAGRAMA DE REACTANCIAS DE SECUENCIA CERO



#### 4.10 Cálculo de la corriente de falla de fase a tierra en la línea de suministro.

Con el valor de la reactancia equivalente de secuencia positiva en el punto de falla  $F_1$  que es :

$$X_1 = 0.0007 \text{ pu}$$

Y teniendo en cuenta que la reactancia equivalente de secuencia positiva es igual a la reactancia equivalente de secuencia negativa:

$$X_1 = X_2 = 0.0007 \text{ pu}$$

Así como también con el valor de la reactancia de secuencia cero en la línea de suministro que es:

$$X_0 = 0.0023 \text{ pu.}$$

Y la reactancia de secuencia cero del alimentador del tablero de distribución en media tensión TDA-1 que es:

$$X_0 = 1 \times 10^{-7} \text{ pu.}$$

Sustituyendo estos valores en la fórmula 17 tenemos que:

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} = \frac{E}{2X_1 + X_0}$$

$$I_0 = \frac{1}{2(0.0007) + 0.0023 + 1 \times 10^{-7}} = 270.27 \text{ pu.}$$

Por lo tanto:

$$I_a = 3I_o = 3 \times 270.27 = 810.81 \text{ pu.}$$

$$I_{\text{base}} = 16.73 \text{ Amp.}$$

Finalmente:

$$I_{cc1\Phi} = I_a \times I_{\text{base}} = 810.81 \times 16.73 = 13,565 \text{ Amp..}$$

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para disponer de una protección adecuada contra corto circuito y evitar accidentes debe tomarse en cuenta lo siguiente:

- (1) Se debe determinar con exactitud la corriente de corto circuito que se puede presentar, para así poder seleccionar con minuciosidad los dispositivos de protección contra corto circuito.
- (2) Tener presente el incremento en la carga de la planta y el hecho de que la capacidad de corto circuito de los dispositivos interruptores depende de la magnitud del sistema de alimentación. La selección de los mismos debe hacerse con miras a un futuro crecimiento; de lo contrario estos dispositivos interruptores tendrán que reemplazarse cuando se amplíe la planta.
- (3) Se deben verificar todos los esfuerzos de los circuitos tales como los de las barras de distribución. Estos esfuerzos son proporcionales al cuadrado de la corriente de corto circuito.
- (4) Verificar el calibre de los cables y su capacidad para resistir el calentamiento en caso de corto circuito, además del causado por la corriente de la carga normal.
- (5) Verificar todo el sistema de alimentación, desde el punto de suministro de la energía hasta el último motor.
- (6) Solucionar el problema de la determinación de corto circuito en base a la ingeniería y no en base a la "buena suerte". "Desear" que no haya fallas es una mala política. Esto se demuestra con las incontables pruebas de daños causados por dispositivos de interrupción inadecuados
- (7) Seleccionese los dispositivos protectores de circuitos cuya capacidad interruptiva sea igual o mayor que la corriente de corto circuito disponible en el punto de aplicación pudiendose considerar las siguientes excepciones:

- (a) Si el interruptor se usa como un interruptor de respaldo en operación coordinada en cuyo caso debe operar mas lentamente que el interruptor más alejado del punto de suministro. Este interruptor de respaldo debe tener capacidad momentanea adecuada para sostener la sobrecarga el tiempo requerido por el segundo interruptor para interrumpir.
- (b) Si el interruptor es aplicado en cascada, puede selccionarse con capacidad inferior al corto circuito disponible siempre y cuando se observen las dictadas para este arreglo.
- (8) Siempre que se tenga duda en la selección de un equipo es muy conveniente la consulta con los diferentes fabricantes, ya que estos cuentan con personal suficientemente capacitado para dar asesoria y lograr con esto la elección correcta.
- (9) Es muy recomendable hacer tablas comparativas de las ventajas y desventajas que presentan los equipos que se pretenden seleccionar para una aplicación dada.
- (10) En la actualidad el cálculo de corto circuito de una Planta Industrial se hace por medio de programas de computadora, diseñados para tal fin, sin embargo es importante que el diseñador de Sistemas Eléctricos sepa interpretar en forma correcta los resultados que le proporcionan estos programas, de tal manera espero que con el estudio del presente trabajo le sea de utilidad para la interpretación de los resultados mencionados.

# GLOSARIO



## GLOSARIO

**A** Amperes

**AA** Tipo de enfriamiento propio, transformador tipo seco.

**AD** Amperes de disparo.

**AM** Amperes de marco.

**ANSI** Instituto Nacional Americano de Estándares.

**AWG** Calibre de alambres americanos.

**BEP** Panel excitador de escobillas.

**°C** Grados centígrados.

**CA** Corriente alterna.

**CC** Componente de corriente directa.

**CCM** Centro de control de motores.

**CEI** Comisión Internacional de Electrotecnia.

**CFE** Comisión Federal de Electricidad.

**CT** Contacto trifásico.

**DCS** Sistema de control distribuido.

**E** Voltaje en el punto de falla en por unidad.

**EPR** Etileno-propileno.

**F-1** Circuito de fuerza no. 1.

**FP** Factor de potencia.

**HP** Caballos de fuerza.

**Hz** Ciclos por segundo.

**I** Corriente.

**Ia** Corriente de falla de fase a tierra.

**Ibase** Corriente base.

**Icc** Corriente de corto circuito simétrica.

**Icc asimétrica** Corriente de corto circuito asimétrica.

**Io** Corriente rmc simétrica de secuencia cero en el punto de falla.

**IEEE** Instituto de Ingenieros de Electricidad y Electronica.

**kA** Kiloamperes.

**Km** Kilometro

**kV** Kilovolts.

**kVbase** Kilovolts base.

**kVA** Kilovolts-amperes.

**kVAbase** Kilovolts-amperes base.

**KCM** Kilo circular mil.

**LSIG** Tiempo largo, corto, instantaneo y falla a tierra.

**MVA** Megavolts-amperes.

**NEMA** Asociación Nacional de Fabricantes de Equipo Eléctrico.

**OA** Tipo de enfriamiento propio, sumergido en aceite.

**Pcc** Potencia de corto circuito simétrica.

**Pcc asimétrica** Potencia de corto circuito asimétrica.

**R** Resistencia.  
**Rohms/Km** Resistencia en ohms por kilometro.  
**R $\Omega$ /Km** Resistencia en ohms por kilometro  
**RC** Resistencia calefactora.  
**RTD** Resistencia detectora de temperatura.  
**Rpu** Resistencia en por unidad.  
**RF<sub>1</sub>** Resistencia equivalente en el punto de falla F<sub>1</sub>  
**RMC** Raiz media cuadratica.  
**T** Termostato.  
**TA** Tablero de alumbrado.  
**TCD** Transductor de corriente de 4-20mA.  
**TD** Tablero de distribución en media tensión.  
**TDB** Tablero de distribución en baja tensión  
**TDM** Tablero de distribución en media tensión.  
**THW-LS** Termoplástico resistente a la humedad y al calor  
**TRA** Transformador de alumbrado.  
**TRAS** Transformador de aislamiento.  
**TRD** Transformador de distribución.  
**TRP** Transformador de potencia  
**VFD** Variador de frecuencia.  
**W** Watimetro.  
**X** Reactancia.  
**Xohms/Km** Reactancia en ohms por kilometro.  
**X $\Omega$ /Km** Reactancia en ohms por kilometro  
**X<sub>1</sub>** Reactancia equivalente de secuencia positiva en el punto de falla.  
**X<sub>2</sub>** Reactancia equivalente de secuencia negativa en el punto de falla.  
**X<sub>0</sub>** Reactancia equivalente de secuencia cero en el punto de falla  
**XF<sub>1</sub>** Reactancia equivalente en el punto de falla F<sub>1</sub>.  
**Xpu** Reactancia en por unidad.  
**X"<sub>d</sub>** Reactancia subtransitoria.  
**X'<sub>d</sub>** Reactancia transitoria.  
**X<sub>d</sub>** Reactancia sincrona.  
**Z** Impedancia.  
**Zbase** Impedancia base.  
**Zpu** Impedancia en por unidad.  
**ZT** Impedancia total.  
**%Z** Por ciento de impedancia.



# BIBLIOGRAFIA



## BIBLIOGRAFIA

IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants  
(ANSI/IEEE Std 141-1986)

IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and  
Commercial Power Systems.  
(IEEE Std 242-1986).

Industrial Power Systems Handbook.  
Donald Beeman.

Short-circuit Current Calculations for Industrial and Commercial Power Systems.  
(General Electric)

Protección de Instalaciones Eléctricas Industriales y Comerciales.  
Gilberto Enriquez Harper.

Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos por Relevadores.  
Gilberto Enriquez Harper.

Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas.  
Gilberto Enriquez Harper.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMP-1994.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN