

# **Protecciones Eléctricas**

Manual de asignatura

## **Sistema de Universidades Tecnológicas**

**ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA INDUSTRIAL**

Programa 2004

## Créditos

**Elaboró:** IEM Carmen Roman

**Revisó:**

**Colaboradores:** Ing Julio Antonio Hernández Valenzuela

**Autorizó:**

## Contenido

### Objetivo general

SELECCIONAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS

### Habilidades por desarrollar en general

Escribir la habilidad propuesta que se debe desarrollar en esta asignatura.

	Teoría	Horas Práctica	Total	Página
I <i>Conceptos básicos de Protección en Instalaciones Eléctricas</i>	5	0	5	10
II <i>Estudio del Corto Circuito en Instalaciones Industriales y Comerciales</i>	5	15	20	26
III <i>Dispositivos para la Protección de Sistemas Eléctricos.</i>	5	10	15	76
IV <i>Análisis, Selección y Aplicación de Dispositivos de Protección en Motores y Transformadores.</i>	10	25	35	90
Guía de practicas				X

# I

## **CONCEPTOS BASICOS DE PROTECCION EN INSTALACIONES ELECTRICAS**

### **Objetivo particular de la unidad**

REAFIRMAR LOS CONCEPTOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS

### **Habilidades por desarrollar en la unidad**

Escribir la habilidad propuesta que se debe desarrollar en esta asignatura.

## **I.1 Instalaciones Eléctricas**

### **Saber en la Teoría (5 hrs.)**

Conceptos de:  
Instalación Eléctrica

Criterios de Protección

Diagrama Unifilar

Definición de cortocircuito y sus efectos (arco eléctrico, calentamiento, esfuerzos magnéticos)

Conocer el sistema por unidad (pu)



## **Estudio del Corto Circuito en Instalaciones Industriales y Comerciales**

### **Objetivo particular de la unidad**

Identificar las características y resultados en un cortocircuito, así como seleccionar elementos de protección.

### **Habilidades por desarrollar en la unidad**

Escribir la habilidad propuesta que se debe desarrollar en esta asignatura.

### **2.1 Conceptos Básicos**

### **2.2 Calculo del Cortocircuito**

#### **Saber en la Teoría (5 hrs.)**

Conocer la definición de; falla trifásica sólida, falla de fase a fase sólida, falla de línea a tierra sólida

#### **Saber Hacer en la practica (15 hrs.)**

Realizar cálculos de cortocircuito a instalaciones industriales y comerciales, bajo el parámetro de bus infinito.

Valorar las capacidades interruptivas para fusibles e interruptores para bajo, medio y alto voltaje.

**III****Dispositivos para la Protección de Sistemas Eléctricos****Objetivo particular de la unidad**

Identificar la diferencia entre sobrecarga y cortocircuito y aplicar la protección adecuada para cada caso específico, además de aplicar las curvas tiempo-corriente para la selección y combinación de protecciones.

**Habilidades por desarrollar en la unidad**

Escribir la habilidad propuesta que se debe desarrollar en esta asignatura.

3.1 Definiciones

3.2 Dispositivos para protección

**Saber en la Teoría (5 hrs.)**

Definiciones Básicas: Sobrecarga

Conocer los dispositivos para protección contra sobrecorriente

Reconocer los fusibles como elementos de protección

**Saber Hacer en la practica (15 hrs.)**

Aplicar la coordinación de los equipos de protección para diferentes arreglos, con métodos gráficos

## IV

### ANÁLISIS, SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN EN MOTORES Y TRANSFORMADORES

#### **Objetivo particular de la unidad**

Analizar y seleccionar las diferentes protecciones que existen para motores y transformadores en una instalación eléctrica industrial

#### **Habilidades por desarrollar en la unidad**

Escribir la habilidad propuesta que se debe desarrollar en esta asignatura.

4.1 Definiciones de la Instalación

4.2 Elementos

4.3 Prueba de Arranque

#### **Saber en la Teoría (5 hrs.)**

Elementos de la instalación eléctrica para el motor y transformador

Enlistar los elementos que conforman una instalación eléctrica industrial (motores, Transformadores, accesorios, líneas de alimentación, centros de carga, etc)

Registrar los procedimientos para las pruebas de arranque en una instalación eléctrica industrial

#### **Saber Hacer en la práctica (15 hrs.)**

Calcular los parámetros importantes para la selección de motores y transformadores

Calcular protecciones para la alimentación de motores y transformadores

Evaluar los resultados de las pruebas de arranque en una instalación eléctrica industrial

## **INTRODUCCIÓN DE LA ASIGNATURA.**

Este manual, tiene la intención de ser una guía para conducir el desarrollo de la asignatura de Protecciones Eléctricas que se imparte en la carrera de Técnico Superior Universitario en Electricidad y Electrónica Industrial. Con esta guía cada profesor que imparte la asignatura contará con una referencia de la profundidad de los temas y los tipos de prácticas a realizar durante el curso; permitiendo que el nivel de conocimientos y habilidades sea hasta cierto punto homogénea entre los estudiantes de las diferentes Universidades Tecnológicas del país.

Esta asignatura es parte de un contexto integral para los alumnos de Electricidad y Electrónica Industrial ya que es aquí es donde se le vincula con la protección de las instalaciones eléctricas industriales, dependiendo de su tamaño y complejidad así como la introducción al ámbito de los sistemas eléctricos de potencia.

Desde luego, que para tener un resultado óptimo en la materia es necesario llevar a la práctica los conocimientos recibidos en clase a las empresas de su entorno donde puedan aplicarse. Para esto se han diseñado algunos ejemplos prácticos y se recomienda el hacer visitas industriales para complementar la comprensión de cada uno de los temas de esta asignatura.





## CONTENIDOS TEMÁTICOS DE APRENDIZAJE

1. Conceptos básicos de Protección en Instalaciones Eléctricas
  - 1.1 Instalaciones eléctricas.
    - 1.1.1 Conceptos de Instalación Eléctrica
    - 1.1.2 Criterios de protección
    - 1.1.3 Diagrama unifilar
    - 1.1.4 Sistema de porcentaje por unidad (PU)
  
2. Estudio del Corto Circuito en Instalaciones Industriales y Comerciales
  - 2.1 Conceptos básicos.
    - 2.1.1 Fuente de corto circuito.
    - 2.1.2 Reactancias de las maquinas rotatorias.
    - 2.1.3 Corrientes de cortocircuito simétricas y asimétricas.
    - 2.1.4 Falla trifásica sólida.
    - 2.1.5 Falla de fase a fase sólida.
    - 2.1.6 Falla de línea a tierra sólida.
  
  - 2.2 Calculo del cortocircuito.
    - 2.2.1 Calculo del cortocircuito.
    - 2.2.2 Capacidades interruptivas para fusibles e interruptores para bajo, mediano y alto voltaje.
  
  - 2.3 Redes de secuencia.
    - 2.3.1 Operadores de las componentes simétricas.
    - 2.3.2 Redes de secuencia.
    - 2.3.3 Falla trifásica y monofásica.
  
3. Dispositivos para la Protección de Sistemas Eléctricos.
  - 3.1 Definiciones.
    - 3.1.1 Sobrecarga, cortocircuito y sus efectos.
  
  - 3.2 Dispositivos de protección.
    - 3.2.1 Dispositivos de sobrecorriente.
    - 3.2.2 Los fusibles como elementos de protección.

4. Análisis, Selección y Aplicación de Dispositivos de Protección en Motores y Transformadores.
  - 4.1 Elementos de instalación para el motor y el transformador
  - 4.2 Elementos que conforman la instalación eléctrica.
  - 4.3 Prueba de arranque.

## UNIDAD I

### CONCEPTOS BASICOS DE PROTECCION EN INSTALACIONES ELECTRICAS

El análisis de los sistemas, es un conjunto de técnicas que se basan en las leyes fundamentales de la electricidad, aplicables principalmente a circuitos trifásicos de corriente alterna. Estas técnicas facilitan el cálculo del comportamiento de los sistemas bajo condiciones específicas, para auxiliar en el diseño de nuevos sistemas, para rediseñar los sistemas existentes, o bien, para hacer ajustes y modificaciones a partes de las instalaciones.

Los estudios principales de análisis en instalaciones industriales incluyen:

- Estudios y cálculos de cortocircuito.
- Selección de dispositivos de protección.
- Coordinación de dispositivos de protección.
- Otros aspectos relevantes tales como; arranque de motores, estudios de caída de voltaje y la corrección de los factores de potencia.



Photo credit: California Energy Commission

El principal objetivo de este tipo de estudios es proporcionar a los técnicos una fuente de información para satisfacer los siguientes aspectos:

- ❑ Seguridad.
- ❑ Confiabilidad en el servicio.
- ❑ Confiabilidad en el suministro de la energía.
- ❑ Diseño en las instalaciones fáciles de operar y mantener.
- ❑ Costos mínimos, tanto iniciales como de operación.

### **CRITERIOS DE PROTECCIÓN**

Las condiciones de operación anormales contra las que se deben de proteger los sistemas eléctricos son el cortocircuito y las sobrecargas.

El cortocircuito puede tener su origen en distintas formas, por ejemplo, fallas de aislamiento, fallas mecánicas en el equipo, fallas en el equipo por sobrecargas excesivas y repetitivas, etc.

Las sobrecargas se pueden presentar también por causas muy simples, como pueden ser instalaciones inapropiadas, operación incorrecta del equipo, arranques frecuentes de motores, ventilación deficiente, periodos largos de arranque de motores.

Todo sistema eléctrico diseñado debe de ser capaz de:

- a) Aislar rápidamente la porción afectada del sistema, de manera que minimice el efecto y se mantenga el servicio tan normal como sea posible.
- b) Reducir el valor de la corriente de cortocircuito, para reducir los daños potenciales al equipo o partes de la instalación.
- c) Proveer al sistema, siempre que sea posible, del medio del recierre automático, para minimizar la duración de las fallas de tipo transitorio.

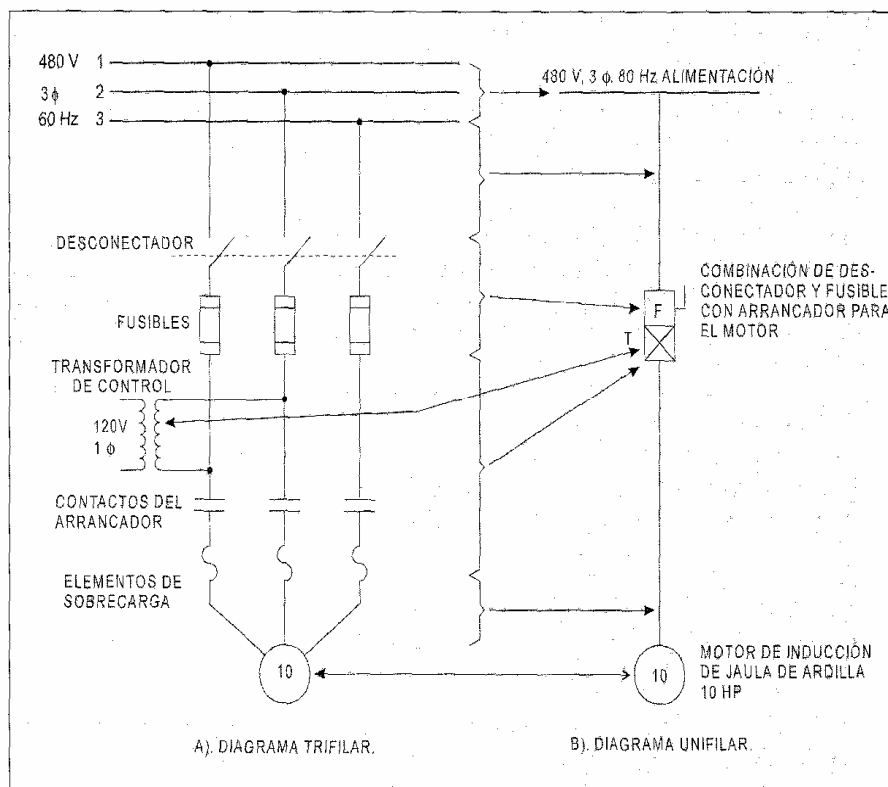
Por lo cual un sistema de protección, lo podemos definir como: “La detección y pronto aislamiento de la porción afectada del sistema, ya sea que ocurra en cortocircuito, o bien, en otra condición

anormal que pueda producir daño a la parte afectada o a la carga que alimenta”.

La coordinación, es la selección o ajuste, u ambas cosas, de los dispositivos de protección, para aislar la parte afectada del sistema cuando ocurre alguna anomalía.

## DIAGRAMA UNIFILAR

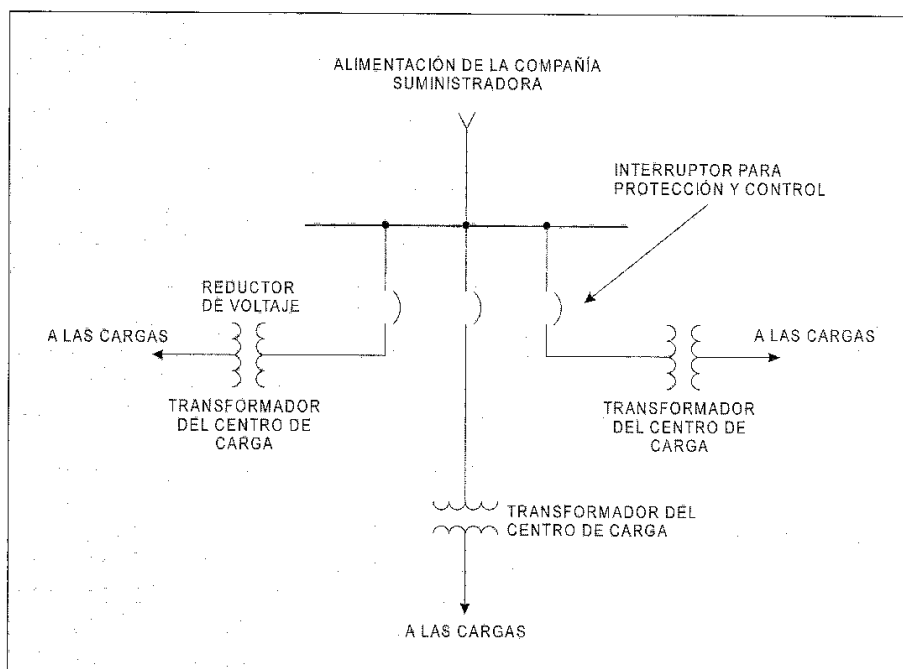
En el estudio de sistemas eléctricos de potencia o para aplicaciones industriales, el uso de diagramas unifilares es de gran utilidad. Estos indican por medio de líneas sencillas y símbolos simplificados, la interconexión y partes componentes de un circuito o un sistema eléctrico.



## COMPARACIÓN ENTRE DIAGRAMAS TRIFILAR Y UNIFILAR EN DONDE SE MUESTRA LA SIMPLIFICACIÓN ENTRE LA REPRESENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CADA DIAGRAMA

Para la distribución de potencia a escala industrial, existen al menos tres sistemas de arreglos básicos: sistema radial simple, el sistema selectivo primario y el sistema selectivo secundario.

- 1) **Sistema radial simple:** es el más económico para la distribución directa de la potencia a los centros de carga, de donde, a su vez, la potencia se distribuye para su utilización. En la siguiente figura, se muestra el esquema básico de este sistema, que resulta adecuado para muchas aplicaciones. Tiene su mejor bondad en la confiabilidad, ya que si falla la alimentación, se pierde el suministro para el resto de la instalación.

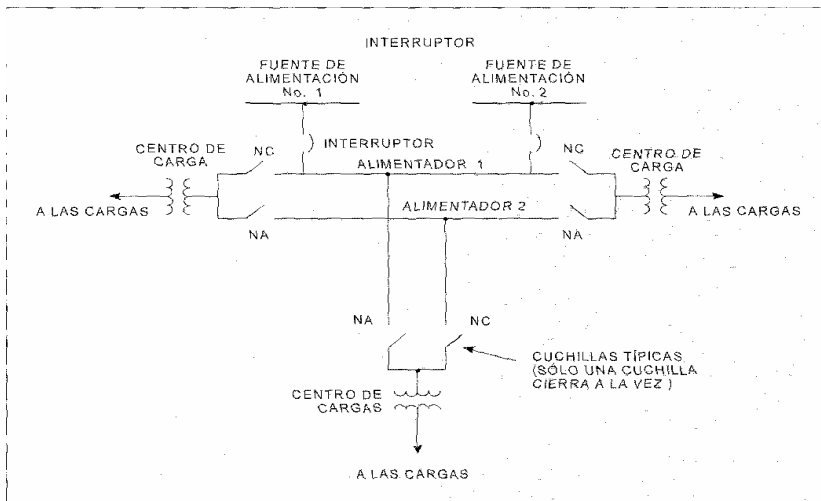


**SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN RADIAL (SIMPLE)**

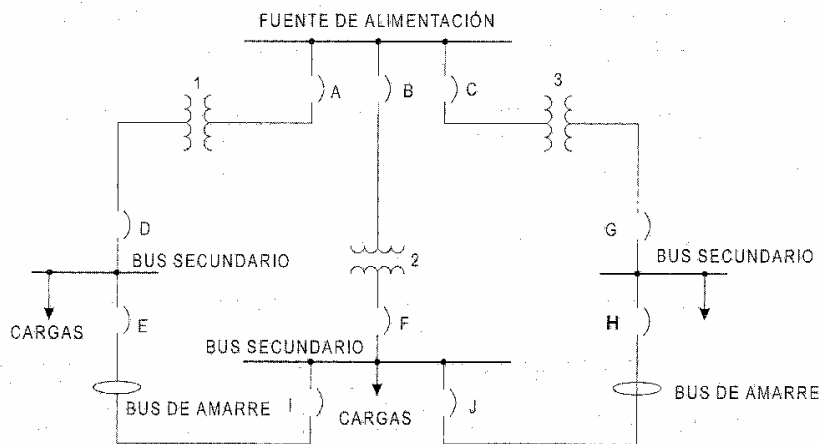
- 2) **Sistema selectivo primario:** este sistema proporciona una alimentación alterna a cada centro de carga. Dos líneas van hacia cada unidad o centro de carga. En resistencia, si se presenta una falla en las líneas de alimentación, entonces sólo algunos de los centros de carga pierden su potencia y mediante switcheos rápidos regresan a servicio, en tanto que el alimentador en falla se repara. Tiene un costo superior, debido a los alimentadores adicionales y al equipo de switcheo. Es

recomendable para sitios en donde existe mucha la demanda ya que presenta un mayor grado de confiabilidad.

- 3) **Sistema selectivo secundario:** este sistema es básicamente radial primario con enlaces secundarios entre los buses o barras. tiene la desventaja de tener una cuenta de alimentación única. Es posible tener más de una fuente radial para mejorar la confiabilidad por medio del uso de un bus secundario de amarre, que permite aislar cualquier alimentador secundario, cerrando los interruptores de amarre al bus.



**SISTEMA SELECTIVO PRIMARIO**



**SISTEMA SELECTIVO SECUNDARIO**

Del sistema mostrado tenemos, que si por alguna razón el transformador 1 tiene que estar fuera de servicio o si se presenta una falla en el alimentador, los interruptores A y D podrían ser abiertos para aislar el circuito del alimentador al transformador. Los interruptores de amarre I y E podrían cerrarse y todas las cargas sobre el secundario del transformador 1, serian alimentados temporalmente desde el transformador 2.

En este sistema se requiere un cuidadoso análisis, porque si las cargas sobre un bus, mas las cargas del segundo bus, son mayores de la capacidad de un transformador, se puede producir una interrupción en el servicio.

Algunos sistemas que utilizan secundario selectivo están diseñados de manera que cada transformador tome solo la mitad de la carga para poder tomar la carga adicional cuando el bus de amarre se cierre. Si se producen un disparo de los interruptores A o D, o ambos, se podría iniciar el cierre de los interruptores Y, espera completar el cierre del secundario. Si el amarre secundario bajo condiciones normales de operación tiene un interruptor normalmente abierto, podría cerrar.

### VALORES EN PORCIENTO Y EN POR UNIDAD

Una cantidad en por ciento es 100 veces una cantidad en por unidad, ambas son usadas por cada persona a conveniencia. Un valor en por unidad (PU) o cualquier cantidad expresada en PU, es la relación de esta cantidad entre un valor denominado como base. El resultado se expresa como una cantidad adimensional.

Los valores reales, tales como voltaje (V), corriente (I), potencia (P), potencia reactiva (Q), volt-ampere (VA), resistencia  $R$ , reactancia (X) e impedancias (Z), se pueden expresar en PU o en por ciento, de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$\text{Cantidad en PU} = \frac{\text{Cantidad}}{\text{Cantidad base en las mismas unidades}}$$

Donde la cantidad es un valor escalar o complejo, expresado en sus propias unidades, tales como: volts, amperes, watts, etc.



La llamada cantidad base a valor base, se refiere a un valor de referencia, seleccionado a conveniencia para la misma cantidad y en las mismas unidades.

Por lo que las cantidades en PU y en por ciento, son adimensionales.

#### EJEMPLO 1

Referir los voltajes de 100, 115 y 13.8 kV a la base de 115 kV y expresarlos en:

- a) PU (por unidad)
- b) En por ciento

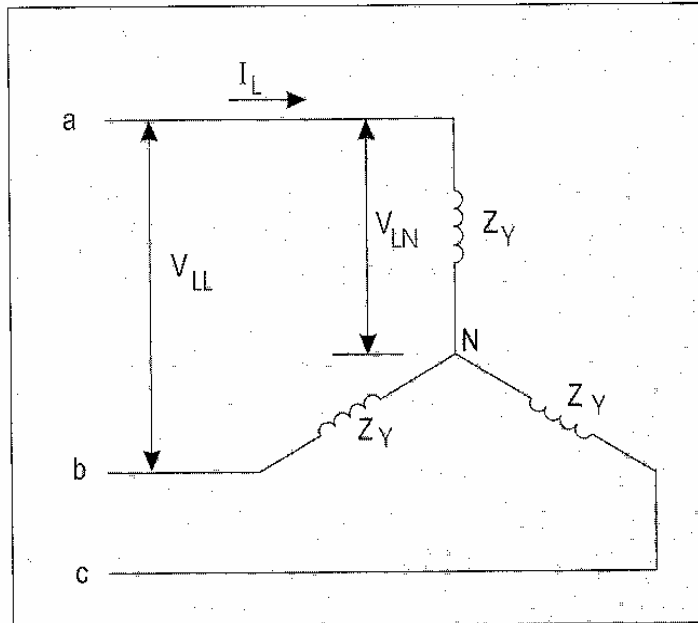
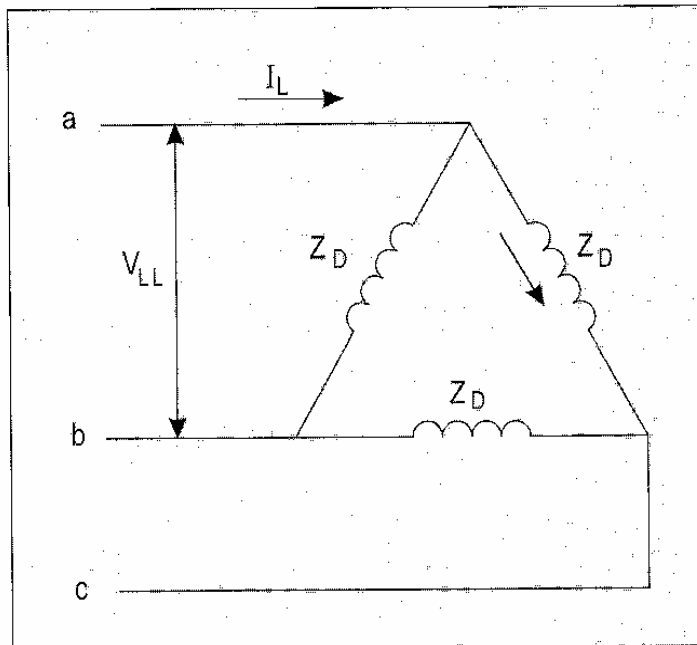
Cantidad en por ciento = PU x 100

$$\text{Cantidad en PU} = \text{Cantidad} / \text{Cantidad base}$$

Tomando como base los 115 kV, tenemos:

a) En PU	b) En por ciento
$100 \text{ kV} \div 115 \text{ kV} = 0.87 \text{ PU}$	$0.87 \times 100\% = 87\%$
$115 \text{ kV} \div 115 \text{ kV} = 1 \text{ PU}$	$1.0 \times 100\% = 100\%$
$13.8 \text{ kV} \div 115 \text{ kV} = 0.12 \text{ PU}$	$0.12 \times 100\% = 12\%$

## Formulario De Circuitos Trifásicos:

**A) IMPEDANCIAS CONECTADAS EN ESTRELLA.****B) IMPEDANCIAS CONECTADAS EN DELTA.**

Para cada una de las conexiones anteriores, se aplican las siguientes expresiones:

$S = 3 V_{LL} I_L$	<b>Donde:</b> S = Potencia trifásica aparente
$V_{LL} = 3 V_{LN} \angle 30^\circ$	$V_{LL}$ = Voltaje de línea a línea
$I_L = S \div (3 V_{LL})$	$V_{LN}$ = Voltaje de línea a neutro

Para las conexiones, estrella y delta, se pueden obtener los valores de impedancia y corriente.

1. Impedancias conectadas en estrella	$Z_Y = V_{LN} \div I_L$ $Z_Y = V_{LL}^2 \angle -30^\circ \div S$
2. Para las impedancias conectadas en delta:	$I_D = I_L \angle 30^\circ \div 3$ $Z_D = V_{LL} \div I_D$ $Z_D = 3V_{LL}^2 \angle -30^\circ \div S$ $I_D = V_{LL} \div Z_D = S \angle 30^\circ \div 3 V_{LL}$

Las cantidades tomadas como referencia y conocidas como base, son cantidades escalares, por lo que no se requiere notación fasorial para su manejo, de manera que si se usa el subíndice (b) para expresar estas cantidades se puede escribir en la forma siguiente:

Para la potencia base:	$Kva_b = 3 kV_b I_b$
La corriente base:	$I_b = kVA_b \div 3 kV_b$
La impedancia base:	$Z_b = \frac{kV_b^2 \times 1000}{kVA_b}$
Si se expresa la potencia en MVA, dado que se puede escribir $KVA_b = 1\ 000 \times MVA_b$ , la impedancia se puede expresar como:	$Z_b = kV_b^2 \div MVA_b$

En los sistemas eléctricos trifásicos, la práctica común es usar el voltaje nominal del sistema como voltaje base y un valor conveniente en KVA o MVA como potencia base.

Para instalaciones industriales, 10 MVA puede ser un valor apropiado; en tanto que en sistemas eléctricos de potencia, 100 MVA es un valor conveniente,

El voltaje usado como base, es el de fase a fase. Los valores de impedancias expresados en PU, se refieren al valor base de impedancia y, entonces, se manejan las siguientes expresiones:

$$Z_{PU} = Z (\Omega) \div Z_b(\Omega) = Z (\Omega) MVA_b \div (kV_b)^2$$

También:

$$Z_{PU} = Z (\Omega) kVA_b \div 1000 (kV_b)^2$$

En notación en por ciento, recordando que:

$$Z\% = Z_{PU} \times 100$$

$$Z\% = 100 MVA_b \times Z(\Omega) \div (kV_b)^2$$

$$Z\% = Z (\Omega) kVA_b \div 10 (kV_b)^2$$

Cuando los valores en ohms se desean obtener a partir de los valores en PU o en por ciento:

$Z (\Omega) = kV_b^2 \times Z_{PU} \div MVA_b$	$Z (\Omega) = [1000(kV_b)^2 \times Z_{PU}] \div kV_b$
$Z (\Omega) = [(kV_b^2)(Z\%)] \div 100 MVA_b$	$Z (\Omega) = [10 (kV_b)^2 (Z\%)] \div kVA_b$
<p>Ecuación general para cambiar de una base a otra</p> $Z_{2PU} = Z_{1PU} \times (KVA_2 / KVA_1) \times (KV_1^2 / KV_2^2)$	
<p>Ecuación para el cambio de base cuando las relaciones de transformación de los transformadores corresponden a los voltajes nominales</p> $Z_{2PU} = Z_{1PU} \times (KVA_2 / KVA_1) \times \frac{KV_1^2}{KV_2^2}$	

Estos valores son aplicables al cálculo de valores de resistencias o de reactancias.

#### Ejemplo 2.

Un transformador de 10MVA, 115 kV / 34.5 kV, con una impedancia al 10%. Exprese su impedancia a la base de 20MVA.

$$Z_{2PU} = Z_{1PU} \times (kVA_2 / kVA_1)$$

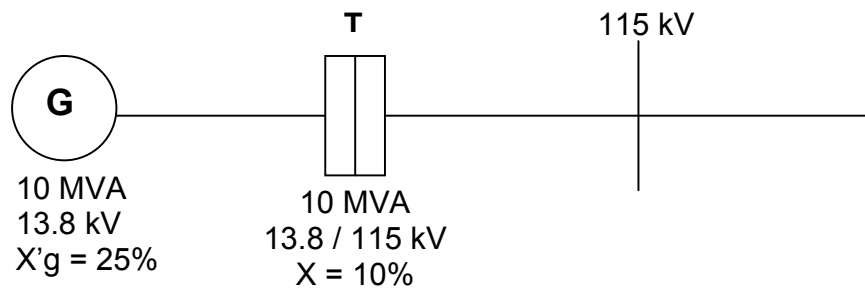
$$Z_{2PU} = 10\% \times (20 \text{ kVA} / 10 \text{ kVA})$$

$$Z_{2PU} = 20\%, \text{ o bien: } Z_{2PU} = 0.2 \text{ PU}$$

#### Ejemplo 3

Para el sistema mostrado en la siguiente figura;

- Referir los valores a la base de 100 MVA y 115 kV en el lado de alto voltaje.
- Supóngase que el transformador tiene las siguientes datos: 10 MVA, 13.2/115 kV,  $X_T = 10\%$ . Referir a la base de 100 MVA y 115 kV.
- Si los valores base son 100 MVA y 115 kV en el lado de alto voltaje y los datos del transformador son: 10 MVA, 13.2/100 kV,  $X_T = 10\%$ , obtener los valores a la base indicada.



- a) Se seleccionan como valores base:
- 100 MVA
  - Vbase (alto voltaje) = 115 kV
  - Vbase (bajo voltaje) = 13.8 kV
  - Para el generador (G):
  - $X'_g = (25/100) \times (100 \text{ MVA} / 10 \text{ MVA}) = 2.5 \text{ P.U.}$
  - Para el transformador (T):
  - $X_T = (10\% / 100) \times (100 \text{ MVA} / 10 \text{ MVA}) = 1.0 \text{ P.U.}$
- b) Vbase (alto voltaje) = 115 kV
- Vbase (bajo voltaje) = 13.2 kV
  - Para el generador (G):
  - $X'_g = (25/100) \times (100 \text{ MVA} / 10 \text{ MVA}) \times (13.8 \text{ kV} / 13.2 \text{ kV})^2$
  - $X'_g = 2.73 \text{ P.U.}$
  - Para el transformador (T):
  - $X_T = (10\% / 100) \times (100 \text{ MVA} / 10 \text{ MVA})$
  - $X_T = 1 \text{ P.U.}$
- c) Vbase (alto voltaje) = 115 kV
- Vbase (bajo voltaje) = 115 kV  $\times$  (13.2 kV / 110 kV) = 13.8 kV
  - Para el generador (G):
  - $X'_g = (25/100) \times (100 \text{ MVA} / 10 \text{ MVA}) = 2.5 \text{ P.U.}$
  - Para el transformador (T):
  - $X_T = (10\% / 100) \times (100 \text{ MVA} / 10 \text{ MVA}) \times (13.2 \text{ kV} / 13.8 \text{ kV})^2 = 0.916 \text{ PU}$
  - $X_T = (10\% / 100) \times (100 \text{ MVA} / 10 \text{ MVA}) \times (110 / 115)^2 = 0.916 \text{ P.U.}$

Se tiene un centro de control de motores que tiene conectados motores de inducción con una potencia total de 420 HP a 440 V. Si se supone que el grupo de motores tiene una reactancia equivalente del 25% a la base de 420 KVA. Calcular el valor de la reactancia en ohms.

$$X(\Omega) = \frac{X(\%) \cdot KV^2 \cdot 1000}{100 \cdot KVA \text{ rotor}}$$

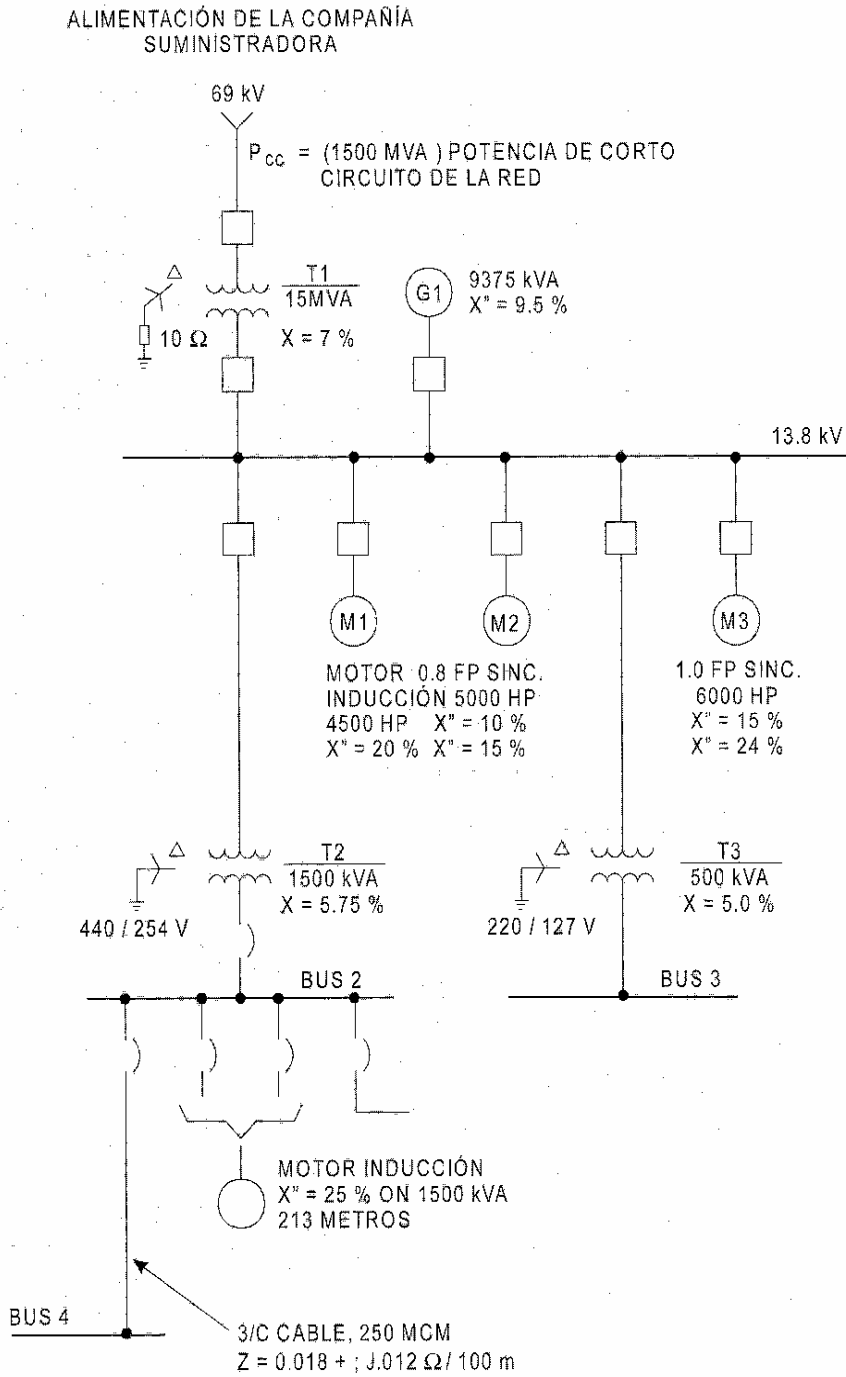
$$X(\Omega) = \frac{25 \cdot (0.440)^2 \cdot 1000}{100 \cdot 420}$$

$$X(\Omega) = 0.1152 \Omega / \text{Fase}$$

En la siguiente figura, se muestra el diagrama unifilar de un sistema de potencia industrial. Muestra la información básica que identifica a cada uno de sus componentes y su interconexión. El diagrama también incluye la siguiente información:

1. La capacidad de cortocircuito de la compañía suministradora.
2. La potencia en KVA de los transformadores y sus valores de impedancias.
3. Los tipos, potencias y reactancias de las máquinas.
4. El tipo de cable, su longitud e impedancia.

Si se selecciona como base de potencia 15,000 KVA y los valores de voltajes de referencia son 13.8 kV, 440 V y 220 V. Calcular los valores de reactancias en por unidad.





**1. La reactancia equivalente de la compañía suministradora.**

$$X_s = \frac{\text{kVA base}}{\text{kVAcc}} = \frac{15\,000}{1500\,000} = 0.01 \text{ p.u.}$$

**2. Transformador T<sub>1</sub>.**

$$X = \frac{7}{100} \left( \frac{15\,000}{15\,000} \right) = 0.07 \text{ p.u.}$$

**3. Generador G<sub>1</sub>.**

$$X = \frac{9.5}{100} \left( \frac{15\,000}{9\,375} \right) = 0.152 \text{ p.u.}$$

**4. Motor M<sub>1</sub>.**

$$X = \frac{20}{100} \left( \frac{15\,000}{4\,500} \right) = 0.666 \text{ p.u.}$$

**5. Motor M<sub>2</sub>.**

$$X = \frac{10}{100} \left( \frac{15\,000}{5\,000} \right) = 0.30 \text{ p.u.}$$

**6. Motor M<sub>3</sub>.**

$$X = \frac{15}{100} \left( \frac{15\,000}{6\,000 \times 0.8} \right) = 0.468 \text{ p.u.}$$

**7. Motores a 440 V.**

$$X = \frac{25}{100} \left( \frac{15\,000}{1\,500} \right) = 2.5 \text{ p.u.}$$

8. Transformador T<sub>2</sub>.

$$x = \frac{5.75}{100} \left( \frac{15000}{500} \right) = 0.575 \text{ p.u.}$$

9. Transformador T<sub>3</sub>

$$x = \frac{5}{100} \left( \frac{15000}{500} \right) = 1.5 \text{ p.u.}$$

10. Cable trifásico de 250 MCM a 440 V y 213 m de longitud.

$$Z_c = (0.10) + j0.012 \times \frac{213}{100}$$

$$Z_c = 0.03834 + j0.02556 \Omega/\text{fase}$$

$$R = \frac{0.03834 \times (15000)}{1000 \times (0.44)^2} = 2.97 \text{ p.u.}$$

$$X = \frac{0.02556 \times (15000)}{1000 \times (0.44)^2} = 1.98 \text{ p.u.}$$

---

## **UNIDAD II**

### **Estudio del Corto Circuito en Instalaciones Industriales y Comerciales**

#### **FUENTES DE CORTO CIRCUITO**

Cuando se hace un estudio depara determinar la magnitud de las corrientes de cortocircuito, es muy importante que se consideren todas las fuentes de cortocircuito y que las características de las impedancias de estas fuentes sean conocidas. Las principales fuentes de cortocircuito son:

- a) Los generadores.
- b) Los motores asíncronos.
- c) Los motores de inducción.
- d) La compañía suministradora de energía eléctrica.

#### **a) GENERADORES.**

Cuando ocurre un cortocircuito en el circuito alimentado por el generador, este tiende a seguir produciendo voltaje, debido a que la excitación del campo se mantiene y el primomotor continúa accionando al generador a la velocidad normal. El voltaje generado produce una corriente de cortocircuito de gran magnitud que circula del generador al punto de cortocircuito. El valor de esta corriente se encuentra solo limitada por la impedancia del generador y la del circuito entre el generador y el punto de la falla. Si se trata de un cortocircuito entre las terminales del generador, la corriente solo esta limitada a la propia impedancia del mismo.

#### **b) MOTORES SINCRONOS.**

Este tipo de motor tiene un devanado de campo excitado por corriente directa y un devanado del estator por el cual circula la corriente alterna. El motor sincrónico demanda corriente alterna del sistema y la transforma en energía mecánica.

Cuando se presenta el cortocircuito en el sistema, el voltaje en este se reduce a un valor muy bajo. En consecuencia, el motor suspende la entrega de energía a la carga mecánica e inicia su frenado lentamente. El valor de la corriente de cortocircuito producida por el motor depende de la impedancia del mismo y de la del sistema al punto del cortocircuito.

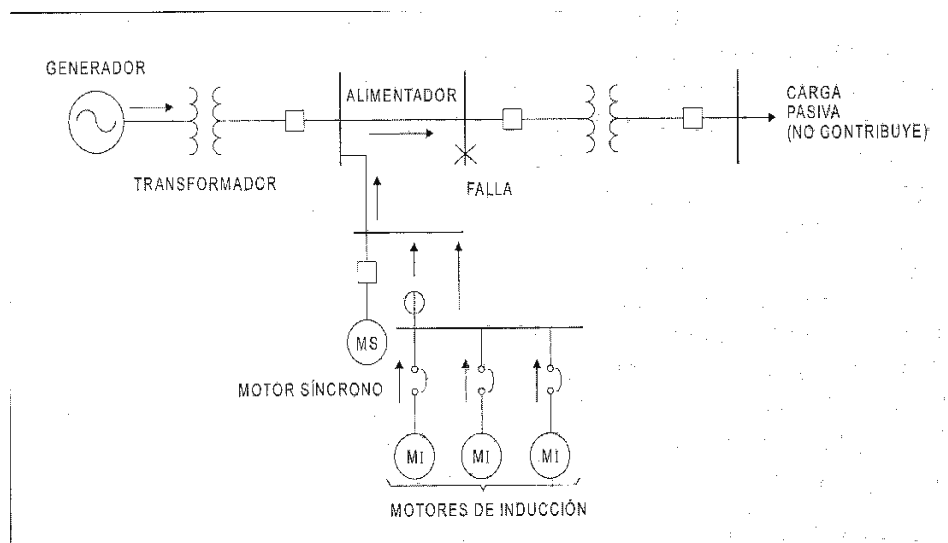
### c) MOTORES DE INDUCCION.

El motor de inducción no tiene devanado de excitación en corriente continua, pero existe un flujo en el motor de inducción durante la operación normal, que actúa como el producido por el devanado de campo en corriente continua en el motor.

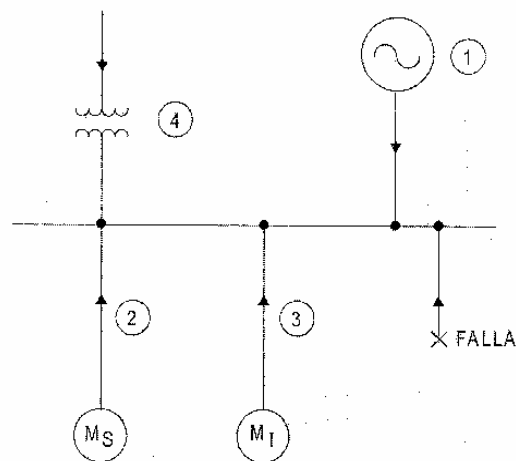
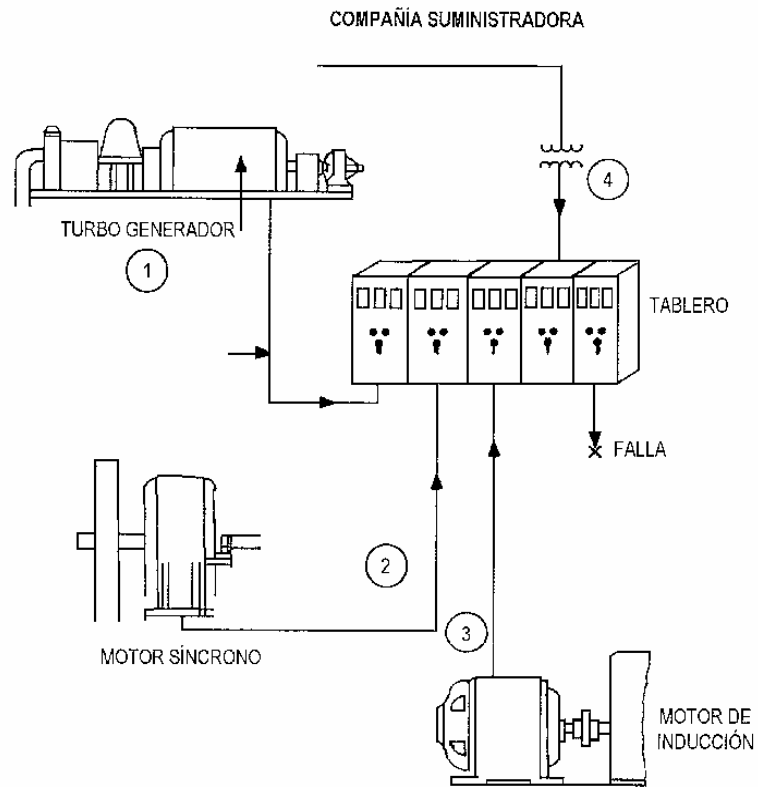
La magnitud de la corriente de cortocircuito depende de la impedancia del propio motor y de la impedancia del sistema en el punto de ocurrencia de la falla. La impedancia de la máquina efectiva en el momento del cortocircuito, corresponde casi al valor de la impedancia a rotor bloqueado. Por lo cual, el valor de la corriente de cortocircuito, es aproximadamente igual al valor de la corriente de arranque a rotor bloqueado del motor.

### d) COMPAÑÍA SUMINISTRADORA

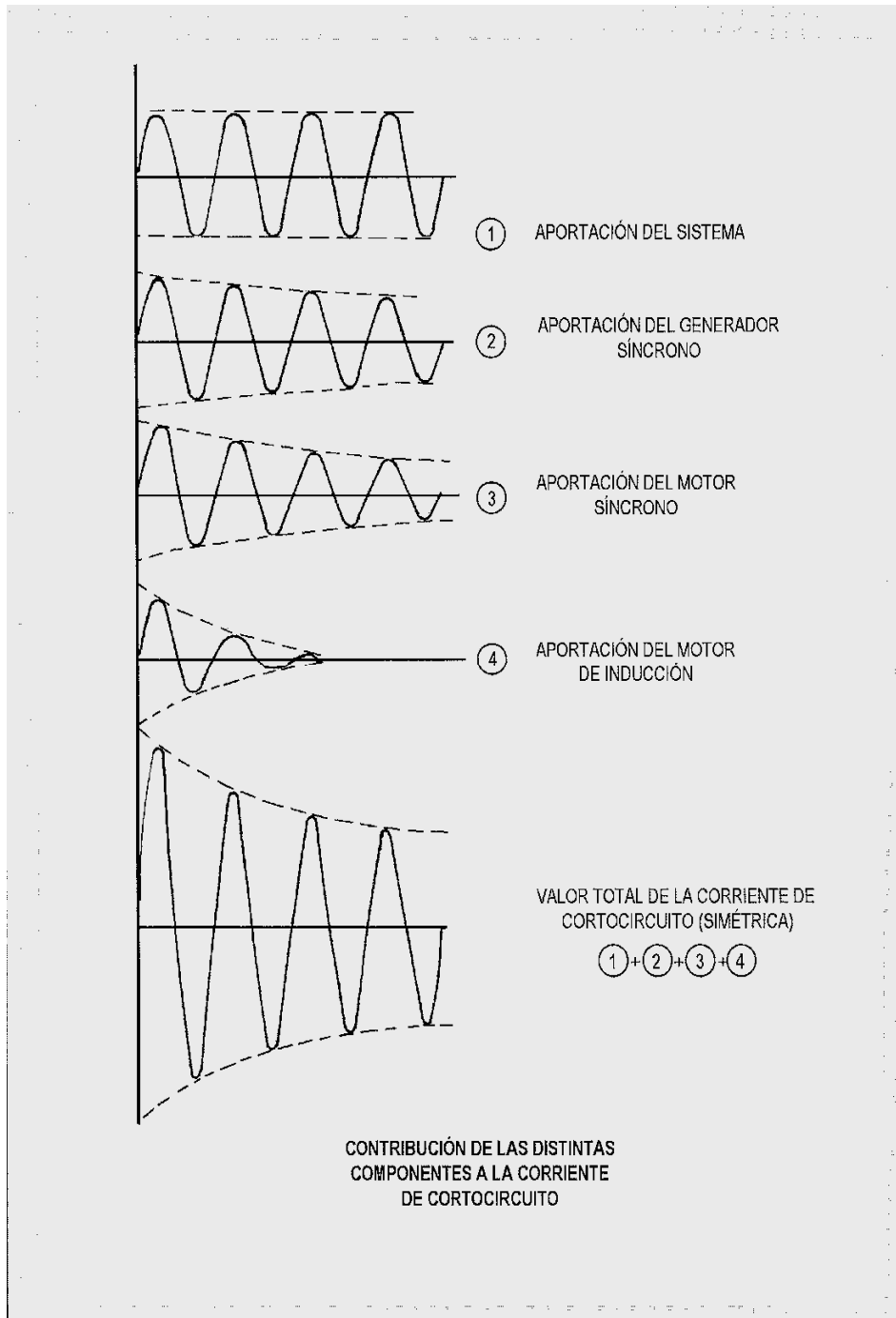
El valor total de la corriente de cortocircuito en un punto de la red, es la suma de las contribuciones de cada uno de los elementos con la intensidad y duración de cada caso, como se muestra a continuación:56



- ❑ Los elementos que alimentan la falla (activos) son: el generador, el motor asíncrono y los motores de inducción.
- ❑ Los elementos que se oponen al paso de la corriente de falla (pasivos) son: la impedancia de los propios elementos activos de los alimentadores, las barras y los transformadores.



## FUENTE DE ALIMENTACIÓN A UN CORTOCIRCUITO O FALLA Y DIAGRAMA UNIFILAR CORRESPONDIENTE



---

## REACTANCIAS DE LAS MAQUINAS ROTATORIAS

Dado que el voltaje de excitación al devanado de campo, permanece prácticamente constante dentro de un intervalo de tiempo relativamente corto, por lo cual, se puede usar la reactancia de las maquina s para explicar el comportamiento de la corriente de cortocircuito.

Se consideran tres valores de reactancias para generadores y motores en el cálculo de cortocircuito en tiempo específico. Estos valores se conocen como:

- a) La reactancia subtransitoria ( $X''_d$ ).
- b) La reactancia transitoria ( $X'_d$ ).
- c) La reactancia sincrónica ( $X_s$ ).

### La reactancia subtransitoria ( $X''_d$ ).

Es la reactancia aparente del devanado del estator en el instante en que ocurre el cortocircuito y determina el valor de la corriente que circula durante los primeros pocos ciclos después de la falla.

### La reactancia transitoria ( $X'_d$ ).

Esta reactancia determina la corriente que sigue al periodo cuando la reactancia subtransitoria decae. La reactancia subtransitoria es efectiva después de un ciclo y medio, dependiendo del diseño de la maquina.

### La reactancia sincrónica ( $X_s$ ).

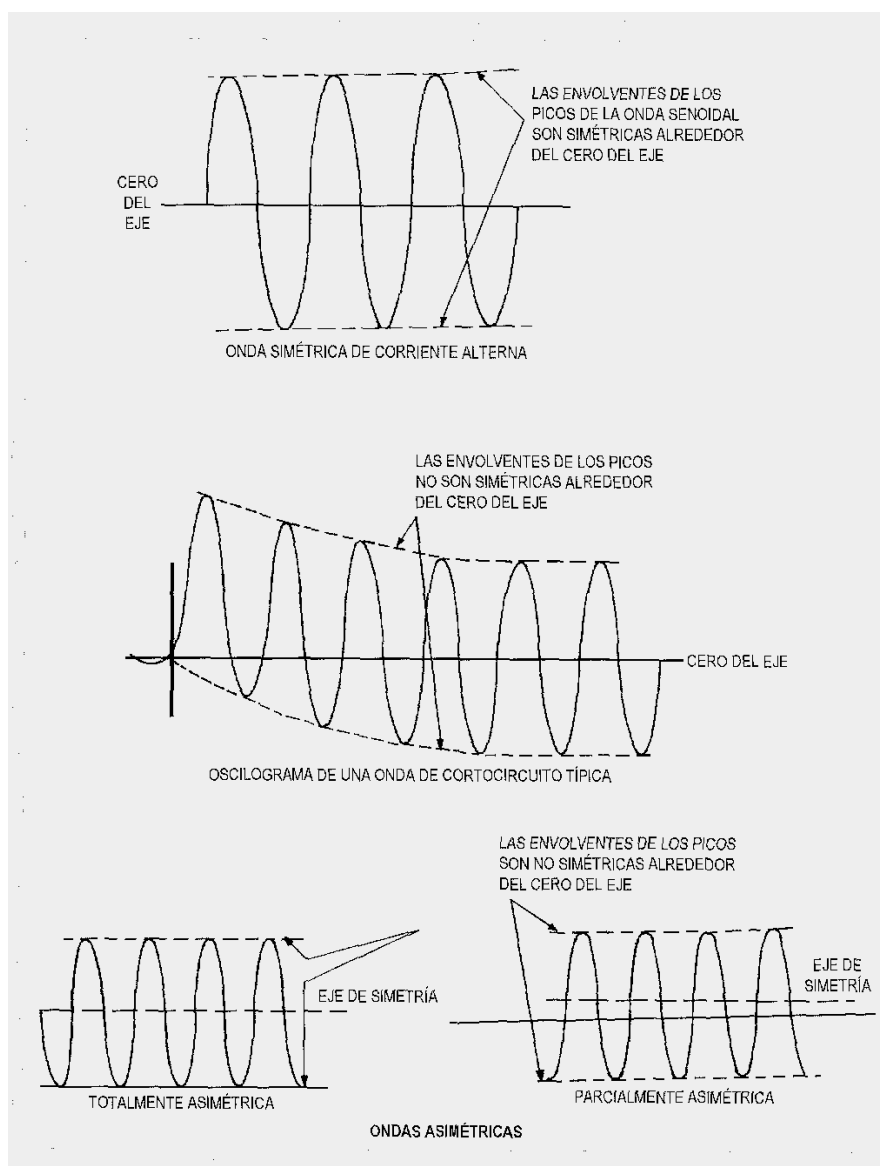
Esta reactancia es la que determina la corriente que circula cuando se llega a la condición de estado permanente. No es efectiva hasta después de varios segundos que ocurre el cortocircuito.

Los motores sincrónicos tienen las mismas reactancias que los generadores, pero con diferente valor. Los motores de inducción, por no tener devanado de campo se dice que tienen reactancia subtransitoria.

## CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO SIMÉTRICAS Y ASIMÉTRICAS.

Las palabras simétrica y asimétrica describen la forma de las ondas de corriente alterna, alrededor de su eje cero. Si las envolventes 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, se les denomina: “**envolventes de corriente asimétrica**”.

En cualquier caso, la envolvente es una línea que se traza uniendo los picos de las ondas.





## TIPOS DE FALLAS.

**FALLA TRIFASICA SÓLIDA.** Describe la condición en que los tres conductores, se unen físicamente con un valor de cero impedancias entre ellas, como si se soldaran o atornillaran físicamente.

**FALLA DE FASE A FASE SÓLIDA.** En la mayoría de los sistemas trifásicos, este tipo de falla es 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 valor máximo.

**FALLA DE LINEA (FASE) A TIERRA SÓLIDA.** En sistemas con neutro solidamente conectado a tierra, este tipo de falla es igual o ligeramente menor que la fallas sólida trifásica, excepto cuando se conectan los neutros a tierra a través de un valor elevado de impedancia, dónde el valor de corriente es significativamente menor.

Este tipo de cálculo es importante, sobre todo si se tiene el neutro solidamente aterrizado en el lado de bajo voltaje. Para el cálculo de dicha falla, se requiere el uso de las componentes simétricas, ya que la corriente de falla a tierra se puede calcular como:

$I_F = \frac{3 V}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_N}$	<p><b>Donde:</b></p> <p>V = Voltaje de línea a neutro</p> <p>Z<sub>1</sub> = Impedancia de secuencia positiva</p> <p>Z<sub>2</sub> = Impedancia de secuencia negativa</p> <p>Z<sub>0</sub> = Impedancia de secuencia cero</p> <p>Z<sub>N</sub> = Impedancia de conexión a tierra del neutro</p>
--	---

El valor de Z<sub>N</sub> en la instalaciones industriales, puede ser una resistencia (R<sub>N</sub>), cuyo valor se selecciona de manera que limite la corriente de falla a tierra a un valor entre 400 y 2000 amperes.

## APLICACIÓN DEL CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO A INSTALACIONES INDUSTRIALES Y COMERCIALES.

Este método se basa en el calculo de la corriente de cortocircuito simétrica, modelando cada generador como una fuente de voltaje detrás de la reactancia apropiada (por lo general, la subtransitoria). Cuando se usa la reactancia subtransitoria, se obtiene un valor inicial de la corriente de cortocircuito, y cuando se usa la transitoria, da el valor de esta corriente

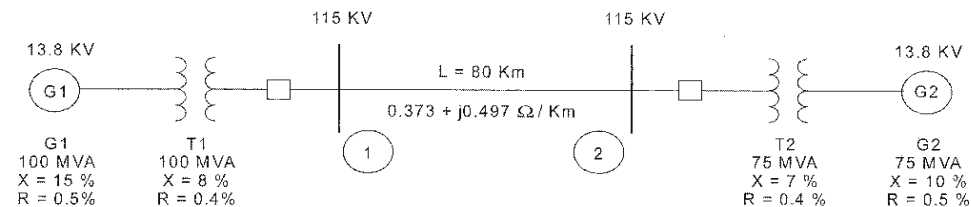
unos ciclos después. La componente de corriente directa se ignora. A este método se le conoce como  $\epsilon/x$ , debido a que desprecia el valor de la resistencia (líneas de transmisión, transformadores, cables de potencia), en donde el valor de la reactancia predomina sobre el de la resistencia.

Para las instalaciones de baja tensión, esta consideración no es válida, por lo cual la reactancia se reemplaza por la impedancia utilizando el método  $X/R$ . Haciendo énfasis en la siguiente apreciación:

$$(X / R) = X_{\text{bus}} K / R_{\text{bus}} K$$

### EJEMPLO 2.1

Para el sistema mostrado en la figura, calcular la relación  $X/R$  para un cortocircuito trifásico en el bus 1.



Si se toma como base de potencia 100 MVA, se pueden convertir los valores dados a por unidad.

Para el generador  $G_1$  ---  $X^* = 0.15$ ,  $R^* = 0.005$

Para el Generador  $G_2$  ---  $X^* = 0.10 \times \frac{100}{75} = 0.1333$

$$R^* = 0.005 \times \frac{100}{75} = 0.0066$$

Para el transformador  $T_1$  ---  $X^* = 0.08$ ,  $R^* = 0.004$

Para el transformador  $T_2$  ---  $X^* = 0.070 \times \frac{100}{75} = 0.093$

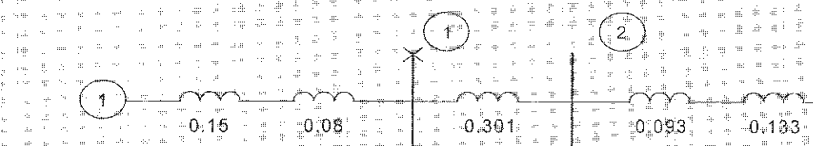
$$R^* = 0.004 \times \frac{100}{75} = 0.005$$

Para la línea de transmisión de 115kV

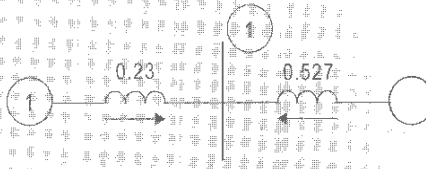
$$X^* = 0.497 \times 80 \times \frac{100}{115^2} = 0.301$$

$$R^* = 0.373 \times 80 \times \frac{100}{115^2} = 0.226$$

El diagrama de reactancias correspondientes es el siguiente:



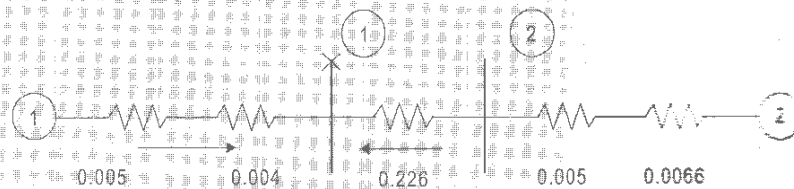
Reduciendo para la falla en bus (1):



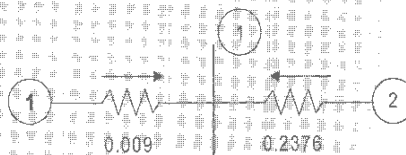
Combinando en paralelo las dos reactancias, se obtiene la equivalente de Thevenin.

$$X_{Thev} = \frac{0.23 \times 0.527}{0.23 + 0.527} = 0.16$$

El correspondiente diagrama de resistencia es el siguiente:



Reduciendo:



Combinando en paralelo:

$$R_{Thev} = \frac{0.009 \times 0.2376}{0.009 + 0.2376} = 0.00867$$

La relación X/R:

$$\frac{X}{R} = \frac{X_{Thev}}{R_{Thev}} = \frac{0.16}{0.00867} = 18.45$$

El cálculo de los factores multiplicadores dependientes de la relación X/R, se hace para obtener el factor de asimetría de la corriente de cortocircuito, aplicable al cálculo de las capacidades interruptivas de los interruptores.

Para fusibles e interruptores en baja tensión, se considera el primer ciclo de la corriente de cortocircuito, por lo que la reactancia subtransitoria es la única que se usa para los generadores y para los motores, dicha suposición no es válida para los motores en baja tensión.

Considerando que al tener conectados un grupo de motores en baja tensión, estos van a alimentarse del lado de baja tensión del transformador, por lo cual la capacidad de la subestación (KVA) es por lo general igual a la potencia total de los motores en HP y en este caso el grupo de motores se puede representar por una reactancia del 25% a la base de los KVA del transformador.

Para los cálculos de cortocircuito que permiten dimensionar la potencia de los interruptores de baja tensión, no se requiere considerar la relación  $X/R$ . La corriente de cortocircuito simétrica subtransitoria, se utiliza, ya que tienen amplios márgenes en las capacidades interruptivas, sin embargo, es necesario hacer estas consideraciones:

1. Generación local al voltaje de los interruptores en capacidades mayores de 500 KVA.
2. Transformadores tipos seco o cargas en tamaños de 250 KVA y mayores.
3. Cualquier tipo de transformador de 2500KVA o mayor.
4. La red eléctrica del sistema.
5. Transformadores con impedancias superiores a los valores normalizados.
6. Reactores limitadores de corriente al voltaje del interruptor en el lado de la fuente.

<b>FACTOR DE POTENCIA (%)</b>	<b>RELACION X/R DEL SISTEMA</b>	<b>FACTOR DE MULTIPLICACION</b>
-------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

		<b>CON INTERRUPTORES SIN FUSIBLES ADICIONALES</b>	<b>CON INTERRUPTORES Y FUSIBLES</b>
20	4.9 o menor	1.00	1.00
15	6.60	1.00	1.07
12	6.27	1.04	1.11
10	9.95	1.07	1.15
8.5	11.72	1.09	1.18
7.5	14.25	1.11	1.21
8.0	20 o mayor	1.15	1.26

Si el fusible se dimensiona sobre la base de la corriente total, se especifica un factor de multiplicación, de acuerdo con lo siguiente:

- Factor de multiplicación: 1.55 en la mayoría de los casos.
- Factor de multiplicación: 1.20 para casos especiales.

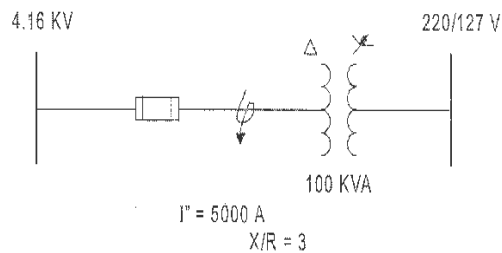
Los casos especiales son:

- a) Los cortos circuitos en redes de distribución.
- b) Los fusibles de potencia.

Los casos especiales se aplican solo se consideran distantes de la generación, cuando la relación X/R es menor que 4 y la tensión del sistema sea de 15 kV o menor

**EJEMPLO 2.2**

Se tiene el alimentador de una red de distribución con 4.16 kV en el primario y 220/127V en el secundario, la corriente de cortocircuito subtransitoria ( $I''$ ) en el primario es de 5000 A y la relación  $X/R$  es 3. Calcular la capacidad interruptiva de la corriente para los casos que se indican.



**A)** Si se usan cortacircuitos con capacidad total de corriente y se considera el sistema distante de la fuente o generación.

$$\text{Capacidad interruptiva} = 1.20 \times 5000 = 6000 \text{ A}$$

**B)** Si ahora se reemplaza el corta circuitos por otro que tenga su capacidad sobre la base de la corriente de cortocircuito simétrica.

$$\text{Capacidad interruptiva} = 5000 \text{ A}$$

**C)** Si se sustituye el cortacircuitos por un fusible de potencia limitador de corriente con su capacidad de corriente total.

$$\text{Capacidad interruptiva} = 1.55 \times 5000 = 7750 \text{ A}$$

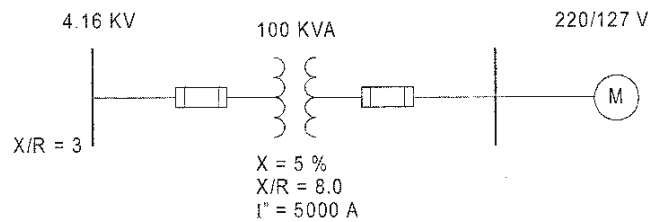
**D)** En el supuesto que el fusible limitador de corriente tenga sus datos referidos a la corriente de cortocircuito simétrica.

$$\text{Capacidad interruptiva} = 5000 \text{ A}$$

### EJEMPLO 2.3

En el ejemplo anterior, se supone que se instala en el lado de bajo voltaje del transportador un fusible limitador de corriente, en este lado de bajo voltaje se alimenta a un motor trifásico de inducción. El transformador tiene una reactancia del 5% y una relación  $X/R = 8.0$  referido a la base de 100 KVA.

Calcular la corriente de cortocircuito trifásica en el fusible para una falla en las terminales del motor. Calcular también la relación  $X/R$  y la capacidad interruptiva.



Para el cálculo de las reactancias y resistencias, se procede como sigue:

El voltaje de fase a neutro en el lado de alto voltaje:

$$4.16/\sqrt{3} = 2.402 \text{ kV} = 2402 \text{ volts.}$$

La reactancia de la fuente:

$$X_{\text{Fuente}} = V/I'' = 2402/5000 = 0.480 \text{ } \Omega/\text{Fase}$$

La reactancia del transformador:

$$X_{\text{Trans}} = X_{\text{pu}} (\text{kV})^2/\text{KVA} \times 1000 = 0.05 (4.16)^2/100 \times 1000$$

$$X_{\text{Trans}} = 8.653 \text{ } \Omega/\text{Fase}$$

La reactancia total:



$$X_{\text{Tot}} = 0.48 + 8.653 = 9.133 \text{ } \Omega/\text{Fase}$$

La corriente de cortocircuito subtransitoria:

$$I'' = V/X_T = 2402/9.133 = 263 \text{ A en el lado de alto voltaje}$$

En el lado de bajo voltaje:

$$I'' = \frac{4160}{220} \times 263 = 4973 \text{ A}$$

La resistencia de la fuente y del transformador se obtiene de la relación:

$$\frac{X}{R} = 3 \text{ para la fuente, } R = \frac{X}{3}$$

$$\frac{X}{R} = 8 \text{ para el transformador, } R = \frac{X}{8}$$

$$R_{Tot} = 0.48/3 + 8.653/8 = 1.242 \text{ } \Omega/\text{Fase}$$

La relación:  $X_{Tot}/R_{Tot} = 9.133/1.242 = 7.353$

El valor de la corriente de cortocircuito simétrica es:

$$I'' = 4973 \text{ A}$$

El valor de la corriente de cortocircuito asimétrica es:

$$I''_{ASIM} = 1.55 \times 4973 = 7708.15 \text{ A}$$

### CAPACIDADES INTERRUPTIVAS EN PRIMER CICLO PARA INTERRUPTORES DE MEDIO Y ALTO VOLTAJE.

Para determinar la capacidad interruptiva de los interruptores con voltajes nominales mayores de 1000V, se utilizan los valores de las reactancias de las máquinas rotatorias, como se indica en la siguiente tabla.

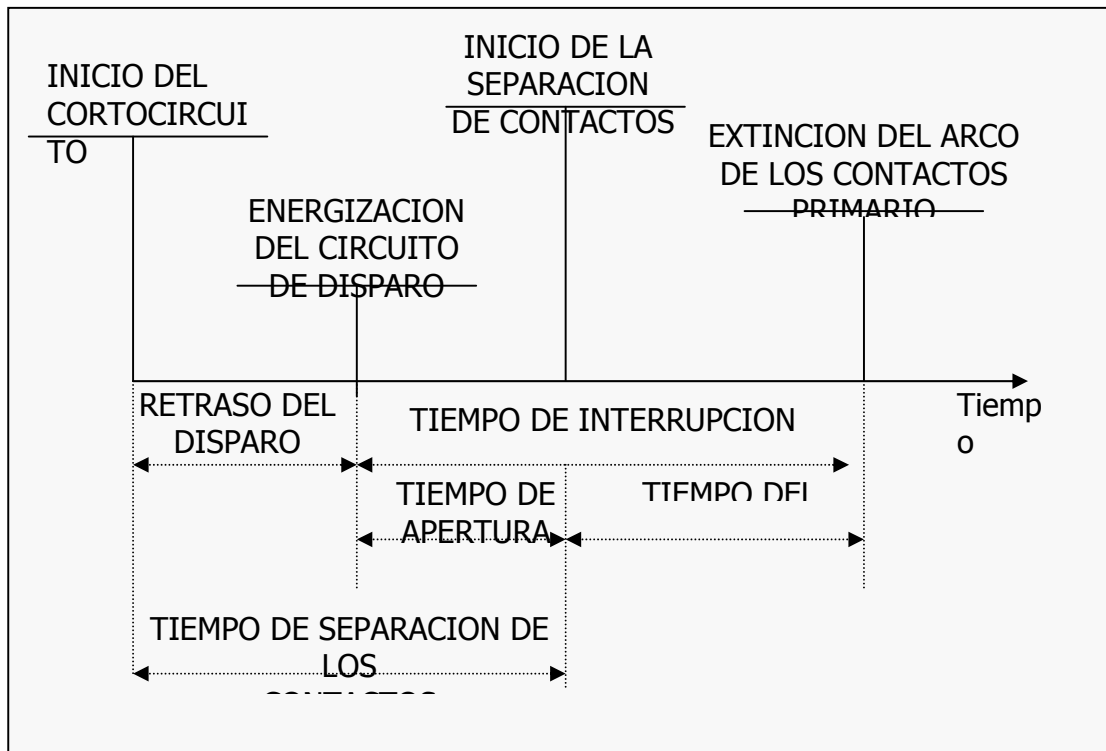


### REACTANCIAS DE MAQUINAS PARA ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO EN MEDIO Y ALTO VOLTAJE

Turbogeneradores, condensadores asíncronos e hidrogeneradores con devanados de amortiguamiento		$X''d$
Hidrogeneradores sin devanados de amortiguamiento		$0.75 X''d$
Motores sincronicos		$X''d$
Motores de inducción	Arriba de 1000Hp a 1800rpm	$X''d$
	Arriba de 250 HP a 3600rpm	$1.2X''d$
	Arriba de 50 HP Menores de 50HP	Despreciable

### CAPACIDADES INTERRUPTIVAS PARA INTERRUPTORES DE MEDIO Y ALTO VOLTAJE.

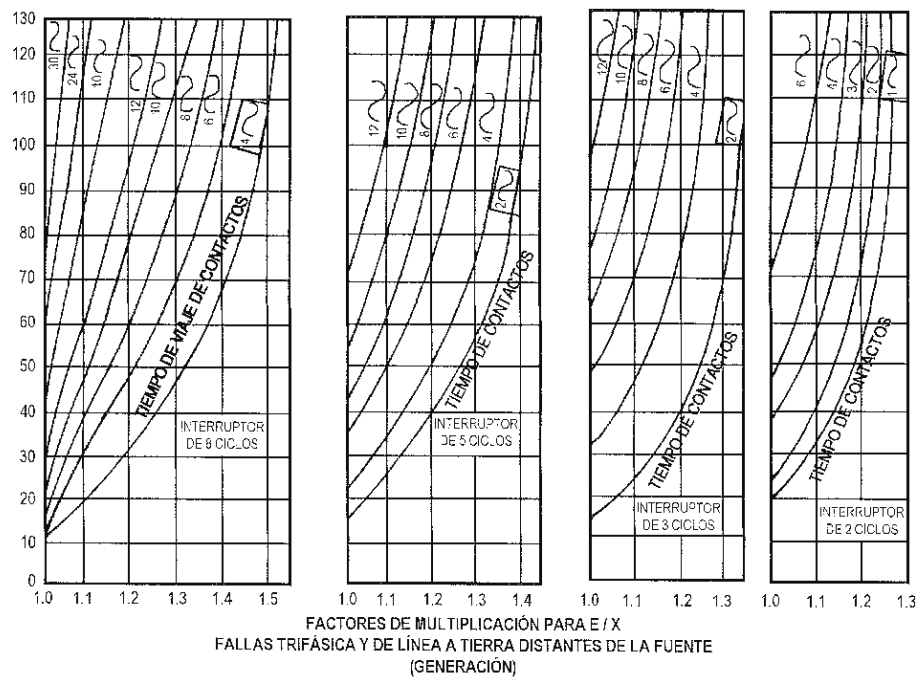
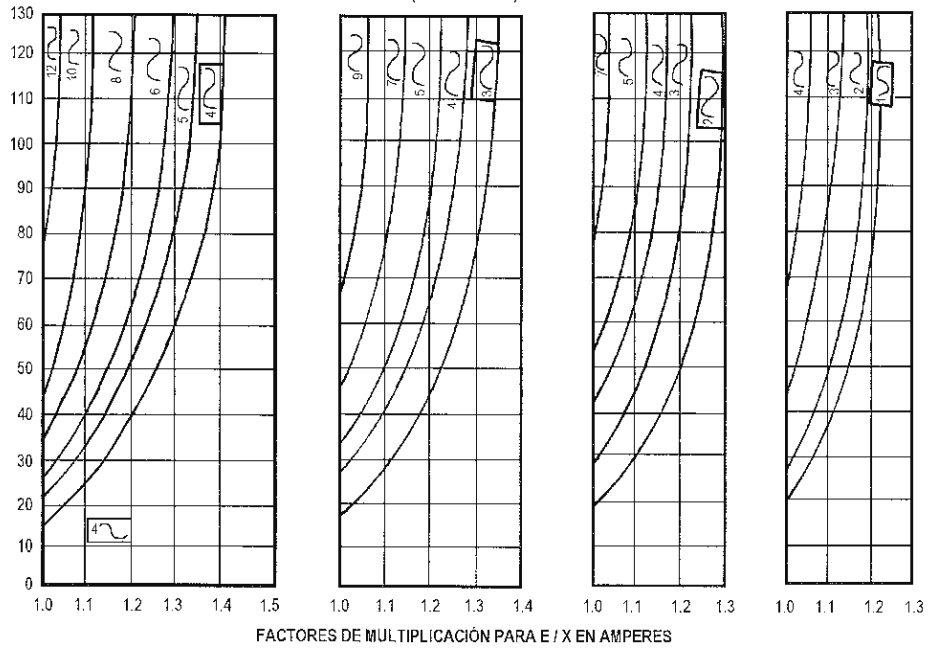
Para el cálculo de capacidades interruptivas, se debe conocer el tiempo de recorrido o de actuación de los contactos. La figura siguiente muestra los elementos para el cálculo del tiempo total de recorrido de los contactos, que es el tiempo total entre la iniciación del cortocircuito y la presencia del arco entre los contactos en el inicio de la desconexión.



**RELACION ENTRE EL TIEMPO DE INTERRUPCION Y EL TIEMPO DE SEPARACION DE LOS CONTACTOS**

TIEMPO DE INTERRUPCION	TIEMPO MINIMO DE SEPARACION ENTRE CONTACTOS
2 CICLOS	1.5 CICLOS
3 CICLOS	2 CICLOS
5 CICLOS	3 CICLOS
8 CICLOS	4 CICLOS

FALLA DE LÍNEA A TIERRA CERCANA A LA FUENTE  
(GENERACIÓN)



**EJEMPLO 2.5**

Un interruptor a su tensión nominal de 15 kV, tiene un factor de rango  $K=2.27$  y un valor de cortocircuito nominal de 19 kA.

Si el interruptor se aplica:

- A)** A un sistema con tensión de operación de 13 kV, calcular su capacidad interruptiva.
- B)** Repetir el inciso anterior, si se conecta el interruptor a un sistema de 6 kV.

**A)** La capacidad interruptiva en 13kV es:

$$19 \text{ kA} \times \frac{15 \text{ kV}}{13 \text{ kV}} = 21.92 \text{ kA}$$

La máxima capacidad interruptiva es  $K$  veces la corriente de cortocircuito nominal, es decir:  $2.27 \times 19 \text{ kA} = 43.14 \text{ kA}$

**B)** Cuando se aplica el mismo interruptor a la red de 6 kV, la corriente interruptiva.

$$19 \text{ kA} \times \frac{15 \text{ kV}}{6 \text{ kV}} = 47.5 \text{ kA}$$

La capacidad máxima del interruptor es: 43 kA

**EJEMPLO 2.6**

En un sistema de 13.8 kV se tiene un interruptor, cuyos datos (referidos a un valor simétrico) son los siguientes:

- Voltaje máximo 15 kV. factor de rango de voltaje  $K=1.30$ , tiempo de interrupción 5 ciclos. (Tiempo de recorrido de contactos, 3 ciclos).
- Capacidad interruptiva simétrica máxima = 48 kA.
- Corriente de cortocircuito nominal (a voltaje nominal máximo) = 37 kA, capacidad de cierre y recierre: 77 kA.
- Si la relación  $X/R$  del sistema es desconocida y  $X=14\%$  (referida a la base de 100 MVA y 13.8 kV), evaluar la capacidad interruptiva del interruptor.

La corriente de cortocircuito:

$$I'' = \frac{E}{X} = \frac{1.0}{0.14} = 7.143 \text{ p.u.}$$

El valor en amperes a la base de 100 MVA y 13.8 kV:

$$I'' = 7.14 \times \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13.8} = 29.88 \text{ kA}$$

La capacidad interruptiva referida a 13.8 kV es la siguiente:

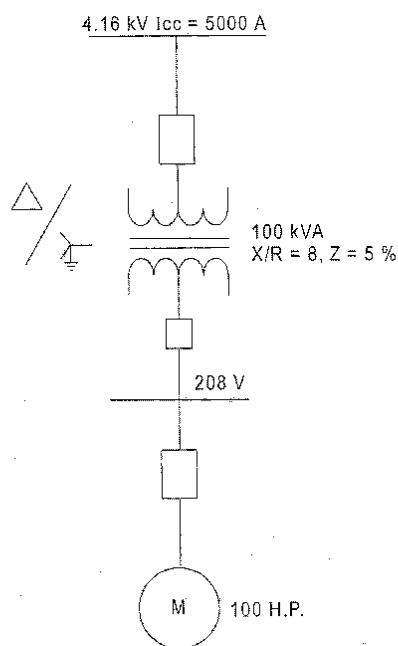
$$37 \times (15/13.8) = 40 \text{ kA}$$

El 80% de 40 kA es 32 kA, el cual es un valor mayor que 30 kA que es la capacidad interruptiva, por lo que se afirma que el interruptor es satisfactorio.

## EJEMPLO 2.7

En el sistema mostrado, se supone que en el lado de bajo voltaje se usa un fusible limitador de corriente que alimenta a un motor. El transformador de donde se alimenta el motor tiene una relación  $X/R = 8$  y su impedancia es del 5% a la base de 100 kVA.

Se desea calcular la corriente de cortocircuito que circula a través del fusible para una falla en las terminales del motor.



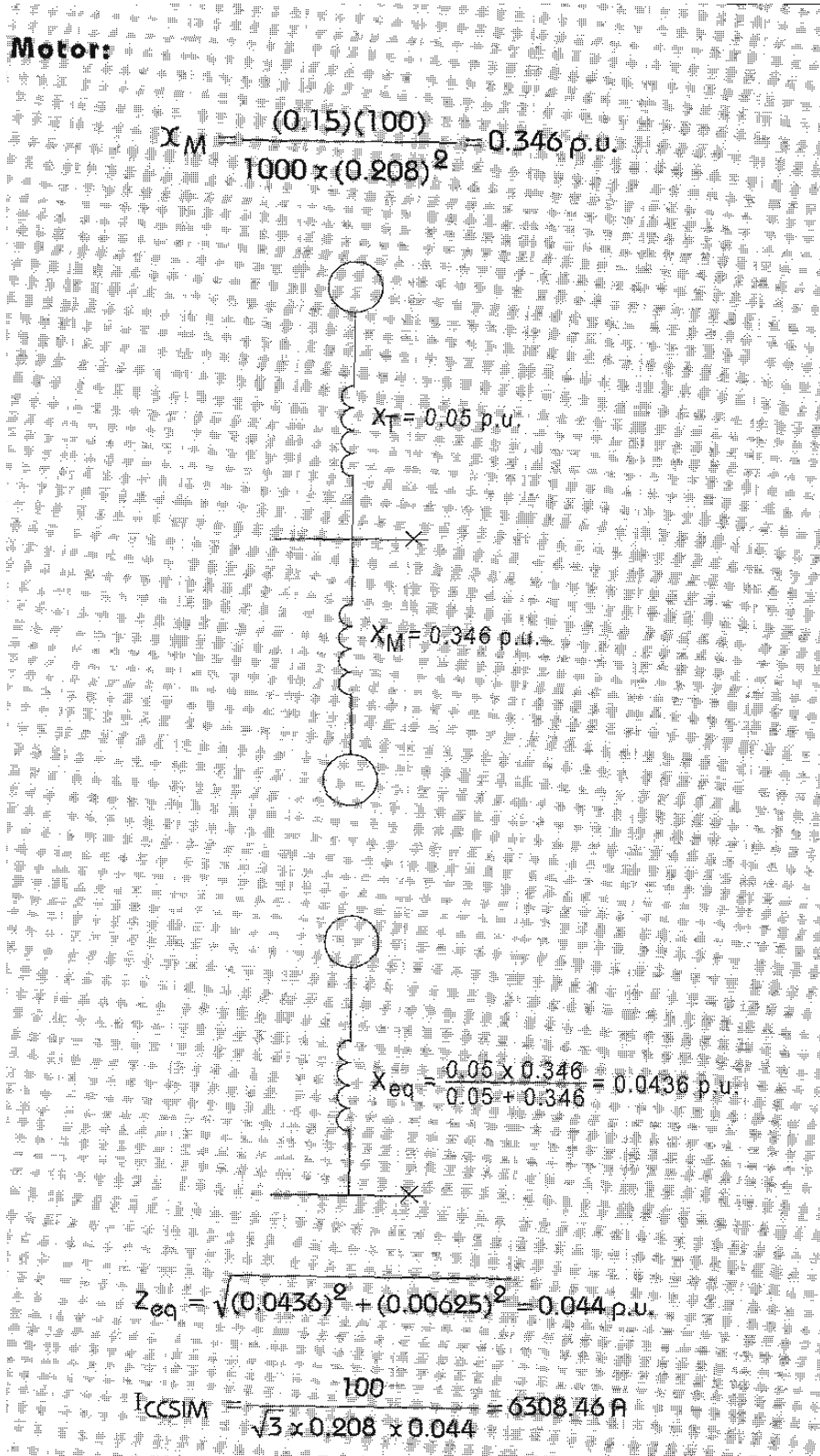
Para la red:

$$X_{red} = \frac{kVA_{base}}{kVA_{red}} = \frac{100}{20800} = 0.004 \text{ p.u.}$$

Transformador:

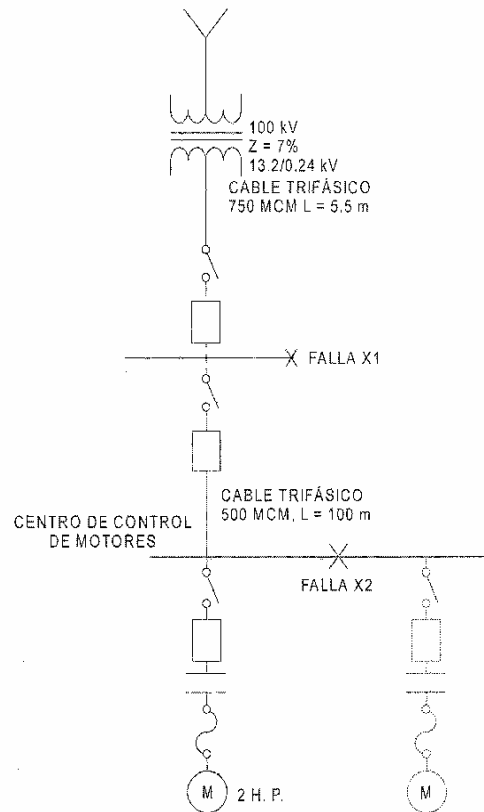
$$X_T = \frac{5(100)}{100(100)} = 0.05 \text{ p.u.}$$

$$X/R = 8; R = \frac{5}{8} = 0.625 \quad R_T = \frac{0.625(100)}{100(100)} = 0.00625 \text{ p.u.}$$



En la siguiente figura, se muestra el diagrama unifilar de un sistema radial simple cuya información se indica para cada componente la potencia de cortocircuito para la compañía suministradora es de 100,000 kVA, en el transformador de alimentación la relación  $X/R = 10$ .

Calcular la corriente de falla trifásica en los puntos  $X_1$  y  $X_2$ .



Para la red:

$$X_{red} = \frac{10000}{100000} = 0.10 \text{ p.u.}$$

Para el transformador:

$$X_T = \frac{7(10000)}{100(10000)} = 0.07 \text{ p.u.}$$



$$R = 10 \Rightarrow R = \frac{X}{10} = \frac{7}{10} = 0.7\%; \quad R_T = \frac{0.7(10000)}{100(10000)} = 0.007 \text{ p.u.}$$

Para el cable de 750 MCM con  $L = 7.5 \text{ m}$

$$750 \text{ MCM} \Rightarrow R = 5.515 \times 10^{-5} \text{ } \Omega/\text{m}; \quad X = 2.59 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m}$$

$$X_{C1} = \frac{(2.59 \times 10^{-4})(7.5)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 0.337 \text{ p.u.}$$

$$R_{C1} = \frac{(5.515 \times 10^{-5})(7.5)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 0.0718 \text{ p.u.}$$

Para el cable de 500 MCM con  $L = 100 \text{ m}$

$$750 \text{ MCM} \Rightarrow R = 5.515 \times 10^{-5} \text{ } \Omega/\text{m}; \quad X = 2.59 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m}$$

$$X_{C2} = \frac{(2.763 \times 10^{-4})(100)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 4.796 \text{ p.u.}$$

$$R_{C2} = \frac{(8.093 \times 10^{-5})(100)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 1.405 \text{ p.u.}$$

Para el centro de control de motores:

$$I_{pc} = 2400 \text{ A}$$

$$I_{rb} = 5.5 \times 2400 = 13200$$

$$\frac{\chi}{R} = 10 \Rightarrow R = \frac{\chi}{10} = \frac{7}{10} = 0.7\%; \quad R_T = \frac{0.7(10000)}{100(10000)} = 0.007 \text{ p.u.}$$

**Para el cable de 750 MCM con  $L = 7.5 \text{ m}$**

$$750 \text{ MCM} \Rightarrow R = 5.515 \times 10^{-5} \frac{\Omega}{\text{m}}; \quad \chi = 2.59 \times 10^{-4} \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$\chi_{C1} = \frac{(2.59 \times 10^{-4})(7.5)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 0.337 \text{ p.u.}$$

$$R_{C1} = \frac{(5.515 \times 10^{-5})(7.5)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 0.0718 \text{ p.u.}$$

**Para el cable de 500 MCM con  $L = 100 \text{ m}$**

$$500 \text{ MCM} \Rightarrow R = 8.263 \times 10^{-5} \frac{\Omega}{\text{m}}; \quad \chi = 2.763 \times 10^{-4} \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$\chi_{C2} = \frac{(2.763 \times 10^{-4})(100)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 4.796 \text{ p.u.}$$

$$R_{C2} = \frac{(8.093 \times 10^{-5})(100)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 1.405 \text{ p.u.}$$

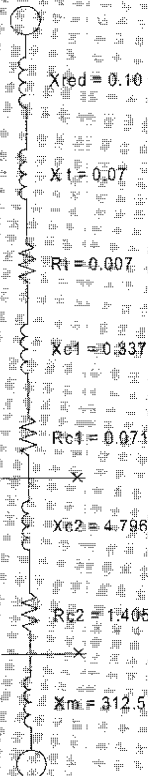
**Para el centro de control de motores:**

$$I_{pc} = 2400 \text{ A}$$

$$I_{pb} = 5.5 \times 2400 = 13200$$

$$X'd = \frac{I_{pe}}{I_b} \left( \frac{0.240}{0.240} \right)^2 = 0.18 \text{ p.u.}$$

$$X_m = \frac{(0.18)(10000)}{(1000)(0.24)^2} = 312.5 \text{ p.u.}$$



Para la falla X1:

$$X_{eq} = \frac{0.507 \times 317.296}{0.507 + 317.296} = 0.50$$

$$R_{eq} = \frac{0.0788 \times 1.405}{0.0788 + 1.405} = 0.0746$$

$$Z_{eq} = \sqrt{(0.506)^2 + (0.0746)^2} = 0.5114$$

$$I_{ccsim} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 0.24 \times 0.5114} = 47040.01 \text{ A}$$

Para la falla X2:

$$X_{eq} = \frac{5.303 \times 312.5}{5.303 + 312.5} = 5.214$$

$$R_{eq} = 1.4838$$

$$Z_{eq} = \sqrt{(5.214)^2 + (1.4838)^2} = 5.421$$

$$I_{ccsim} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 0.24 \times 5.421} = 4437.605 \text{ A}$$

## EJEMPLO 2.9

En el siguiente diagrama, se muestra un sistema alimentado por la compañía suministradora conectado a un generador propio (autogenerador), se requiere calcular el valor del cortocircuito para una falla trifásica en el bus 2. Se sugiere usar como potencia base 100 MVA.

### PRSO 1

El primer paso para el estudio es expresar los valores de las impedancias en par unidad, para esto, se considera elemento por elemento del sistema.

**Compañía suministradora:**

$$Z_{ut} = \frac{\text{MVA}_{base}}{\text{MVA}_{fuente}} = \frac{100}{400} = 0.25 \text{ p.u.}$$

Dada la relación  $\frac{X}{R} = 7$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) = \tan^{-1}(7) = 81.87^\circ$$

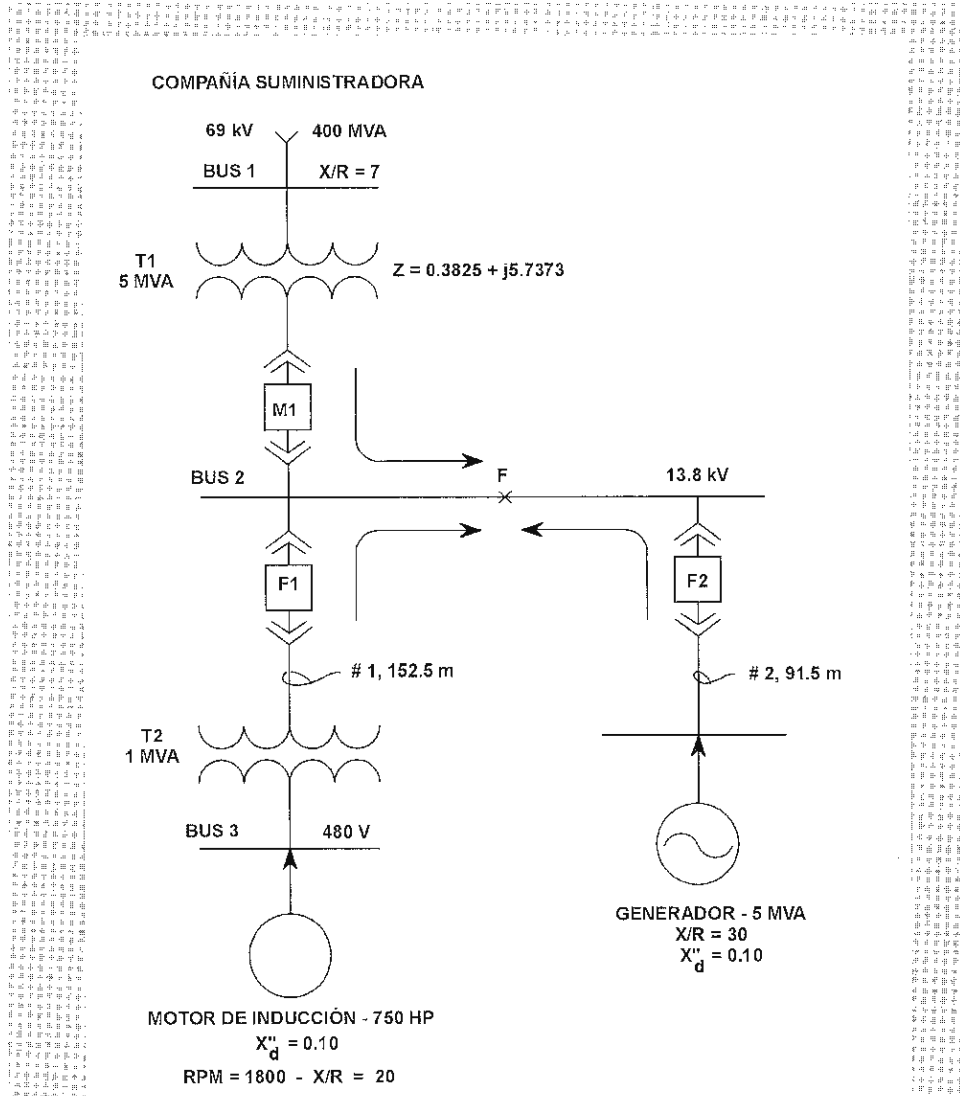


DIAGRAMA DEL SISTEMA PARA EL ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO

$$X_{pu} = Z_{ut} \times \text{Sen}\theta = 0.25 \times \text{Sen}(81.87^\circ)$$

$$X_{pu} = 0.24749$$

También la resistencia:

$$R_{pu} = Z_{ut} \times \text{Cos}\theta = 0.25 \times \text{Cos}(81.87^\circ)$$

$$R_{pu} = 0.03536 \text{ p.u.}$$

**Motor de inducción de 750 HP:**Tomando en forma aproximada  $1\text{HP} = 1\text{KVA}$ 

$$Z_M = Z_m \times \frac{\text{MVA}_b}{\text{MVA}_M}$$

$$Z_M = 0.25 \times \frac{100}{0.750} = 33.333 \text{ p.u.}$$

Como la relación  $\frac{X}{R} = 20$ 

$$R_{p.u.} = X''_d / \left( \frac{X}{R} \right) \times \frac{\text{MVA}_b}{\text{MVA}_M}$$

$$R_{p.u.} = (0.25 / 20) \times \frac{100}{0.75}$$

$$R_{p.u.} = 1.666 \text{ p.u.}$$

**Generador 5 MVA:**

$$Z_G = Z_g \times \frac{\text{MVA}_b}{\text{MVA}_g}$$

$$Z_G = 0.10 \times \left( \frac{100}{5} \right) = 2.00 \text{ p.u.}$$

$$R_{p.u.} = X''_d / \left( \frac{X}{R} \right) \times \frac{\text{MVA}_b}{\text{MVA}_g}$$

$$R_{p.u.} = (0.100 / 30) \times \left( \frac{100}{5} \right)$$

$$R_{p.u.} = 0.0667 \text{ p.u.}$$

**Transformador de 5 MVA:**

$$Z_{p.u.} = (Z_{\%t} \times MVA_b) / (100 \times MVA_t)$$

$$X_{p.u.} = 5.7373 \times \left( \frac{100}{100 \times 5} \right)$$

$$X_{p.u.} = 1.14745$$

$$R_{p.u.} = 0.3825 \times (100 / 100 \times 5)$$

$$R_{p.u.} = 0.0765$$

**Transformador de 1000 KVA**

$$Z_{p.u.} = (Z_{\%t} \times MVA_b) / (100 \times MVA_t)$$

$$X_{p.u.} = (5.9184 \times \left( \frac{100}{100 \times 1} \right))$$

$$X_{p.u.} = 5.9184$$

$$R_{p.u.} = 0.9864 \times \left( \frac{100}{100 \times 1} \right)$$

$$R_{p.u.} = 0.9864$$

**ALIMENTADOR 1**

$$Z_{p.u.} = Z_f \times MVA / (KV^2 \times 1000)$$

Los datos del cable son:

$$R = 0.0005 \Omega/m \quad X = 0.0002 \Omega/m$$

$$X_{p,u} = (152.5 \times 0.0002) \times 100 / (13.8^2 \times 1000)$$

$$X_{p,u} = 0.01418$$

$$R_{p,u} = (0.0005 \times 152.5) \times 100 / (13.8^2 \times 1000)$$

$$R_{p,u} = 0.04201$$

### ALIMENTADOR 2

$$Z_{p,u} = Z_m \times MVA_6 / (KV^2 \times 1000)$$

Los datos para el cable son:

$$R = 0.0007 \Omega / m, \quad X = 0.0002 \Omega / m$$

$$X_{p,u} = (0.0002 \times 91.5) \times 100 / (13.8^2 \times 1000)$$

$$X_{p,u} = 0.00862$$

$$R_{p,u} = (0.0007 \times 91.5) \times 100 / (13.8^2 \times 1000)$$

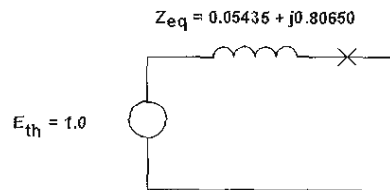
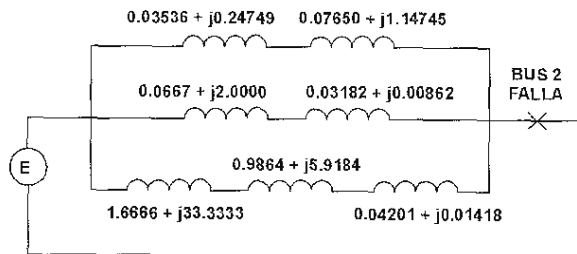
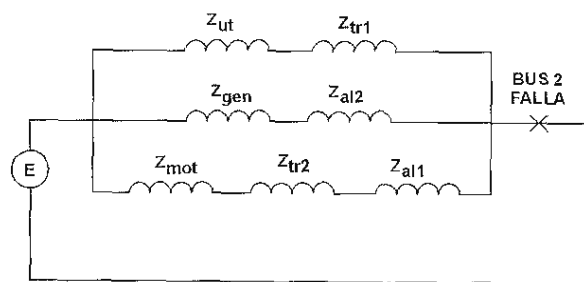
$$R_{p,u} = 0.3182$$

### PASO 2

Elaboración del diagrama de reactancias y reducción de la red al punto de falla.

En el siguiente diagrama, se muestra el arreglo de reactancias y su reducción por combinación serie-paralelo.





RED EQUIVALENTE PARA LA FALLA EN EL BUS 2

**PASO 3**

**Cálculo de la corriente de falla**

La corriente de falla trifásica se calcula de acuerdo con la expresión:

$$I_f = \left( \frac{V_0}{Z_{eq}} \right) \times I_{base}$$

Donde:

$$I_{base} = \frac{KVABase}{\sqrt{3} \times KVbase} = \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 13.8}$$

$$I_{base} = 576 \text{ A}$$

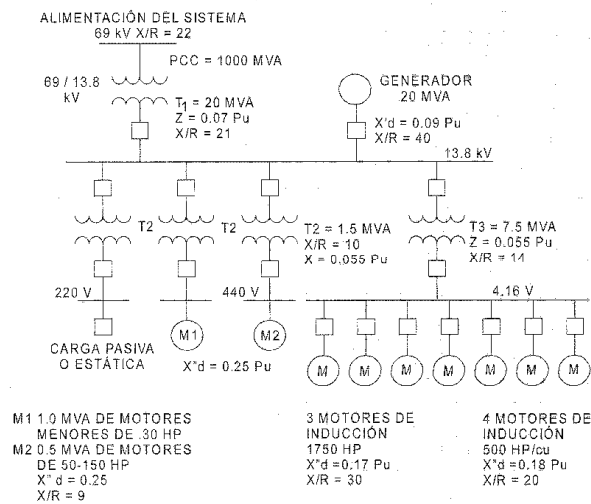
$$Z_{eq} = \sqrt{(0.01435)^2 + (0.80650)^2} = 0.8083 \angle 86.14^\circ$$

$$I_f = \left( \frac{1.0}{0.8083} \right) \times 4183.8 \quad I_f = 5176 \text{ A}$$

### EJEMPLO 2.10

Para el sistema mostrado en la figura, calcular para una falla trifásica:

- A) El valor de la corriente de cortocircuito en la barra de 13.8 kV y la capacidad interruptiva.
- B) El valor de la corriente de cortocircuito en la barra de 4.16 kV.



A) A partir del diagrama unifilar simplificado para el sistema industrial, y con los datos de impedancias y reactivancias indicados, se refieren estos valores a una base común, para lo cual se tenía como potencia base 10 MVA y los voltajes base son los propios del sistema, es decir 69, 13.8 y 4.16 kV.

De acuerdo con la expresión general:

$$X_{base2} = X_{base1} \left( \frac{KVA_{base2}}{KVA_{base1}} \right) \left( \frac{KV_{base1}}{KV_{base2}} \right)^2$$

De tal forma que para cada componente del sistema se tiene lo siguiente:

Transformador  $T_1$   $X = 0.07 (10/20) = 0.035 \text{ p.u.}$

Transformador  $T_2$   $X = 0.055 (10/1.5) = 0.367 \text{ p.u.}$

Transformador  $T_3$   $X = 0.055 (10/7.5) = 0.0733 \text{ p.u.}$

Para las máquinas rotatorias, las reactancias subtransitorias en p.u. referidas a la base de 10 MVA.

Generador  $G_1$   $X''_d = 0.09 (10/20) = 0.045 \text{ p.u.}$

Motores de 175 HP Por facilidad se puede hacer  
 $HP = TKVA$  de modo que:

$$X'' = 0.17 (10/1.75) = 0.971 \text{ p.u.}$$

Motores de 500 HP  $X'' = 0.18 \left( \frac{10}{0.5} \right) = 3.60 \text{ p.u.}$

Grupo de motores de bajo voltaje de 1.0 MVA con potencias menores de 50HP cada uno.

$$X'' = 0.25 (10/1) = 2.50 \text{ p.u.}$$

Para el grupo de motores de bajo voltaje de 0.5 MVA con potencias de 50 a 150 HP cada uno.

$$X'' = 0.25 (10/0.5) = 5.0 \text{ p.u.}$$

Para la red de alimentación:

La reactancia equivalente subtransitoria, se puede calcular a partir de la expresión:

$$I'' = \frac{V}{X''} = \frac{1.0 \text{ p.u.}}{X''} \text{ p.u.}$$

Donde  $I$  es la corriente de cortocircuito en por unidad (p.u.) que se obtiene como:

$$I_{\text{p.u.}} = \frac{I_{\text{cc}}}{I_{\text{base}}}$$

$$I_{\text{cc}} = \frac{P_{\text{cc}}}{\sqrt{3} V} = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (69 \times 10^3)}$$

$$I_{\text{base}} = \frac{P_{\text{base}}}{\sqrt{3} V} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 69}$$

$$I_{\text{p.u.}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 69} \times \frac{\sqrt{3} \times 69}{10} = \frac{1000}{10} = 100 \text{ p.u.}$$

La reactancia del sistema:  $X'' = \frac{1}{I_{\text{cc p.u.}}} = \frac{1}{100} = 0.01 \text{ p.u.}$

Las reactancias, para la determinación de las capacidades interruptivas de primer ciclo de los interruptores, usan los valores de reactancias subtransitorias, a excepción de los siguientes casos:

Para los motores de 500 HP, usar:

$$3.60 \times 1.2 = 4.32$$

Para el grupo de motores de baja tensión entre 50 y 150 HP, usar:

$$5 \times 1.2 = 6.0$$

Para el grupo de motores en baja tensión menores de 50 HP, se puede omitir.

En las reactivancias para determinar las capacidades interruptivas de los interruptores en C.A., usar las reactivancias subtransitorias con excepción de:

**Motores de 175 HP, usar:**

$$0.971 \times 1.50 = 1.457$$

**Motores de 500 HP, usar:**

$$3.60 \times 3.00 = 10.8$$

**Grupo de motores en baja tensión de 50 a 150HP, usar:**

$$5.0 \times 3.0 = 15.0$$

Grupo de motores menores de 50 HP en este caso se omite.

La relación  $X/R$  y el valor de las resistencias para la determinación de las capacidades interruptivas:

$$T_1, \frac{X}{R} = 21, \quad X = 0.035, \quad R = 0.001667$$

$$T_2, \frac{X}{R} = 10, \quad X = 0.367, \quad R = 0.0367$$

$$T_3, \frac{X}{R} = 14, \quad X = 0.0733, \quad R = 0.00524$$

**Para la red de alimentación de 69 kV**

$$\frac{X}{R} = 22, \quad X = 0.010, \quad R = 0.000455$$

$$G_1, \frac{X}{R} = 40, \quad X = 0.045, \quad R = 0.001125$$

**Motor de 1750 HP**

$$\frac{X}{R} = 30, \quad X = 1.457, \quad R = 0.0486$$

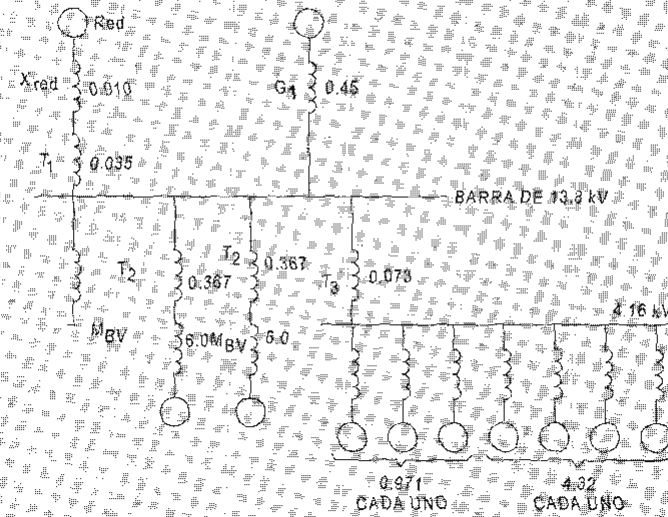
**Motor de 500 HP**

$$\frac{X}{R} = 20, \quad X = 10.8, \quad R = 0.540$$

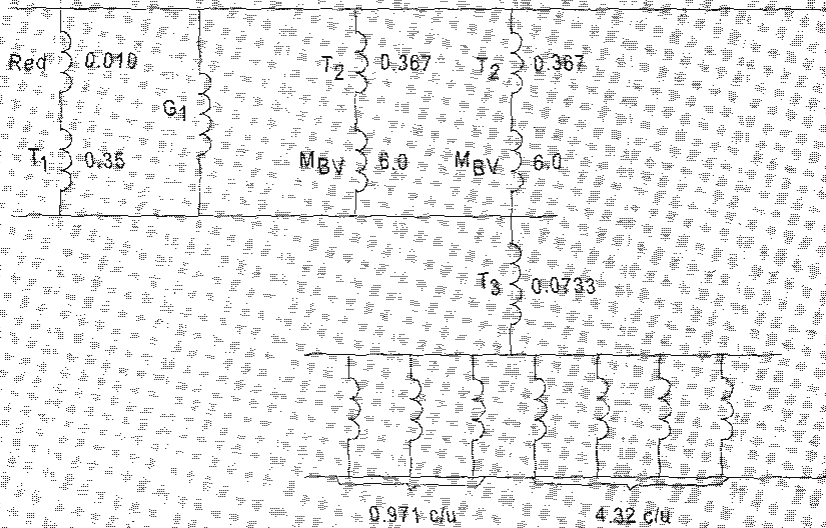
**Grupo de motores en bajo voltaje**

$$\frac{X}{R} = 9, \quad X = 15.0, \quad R = 1.667$$

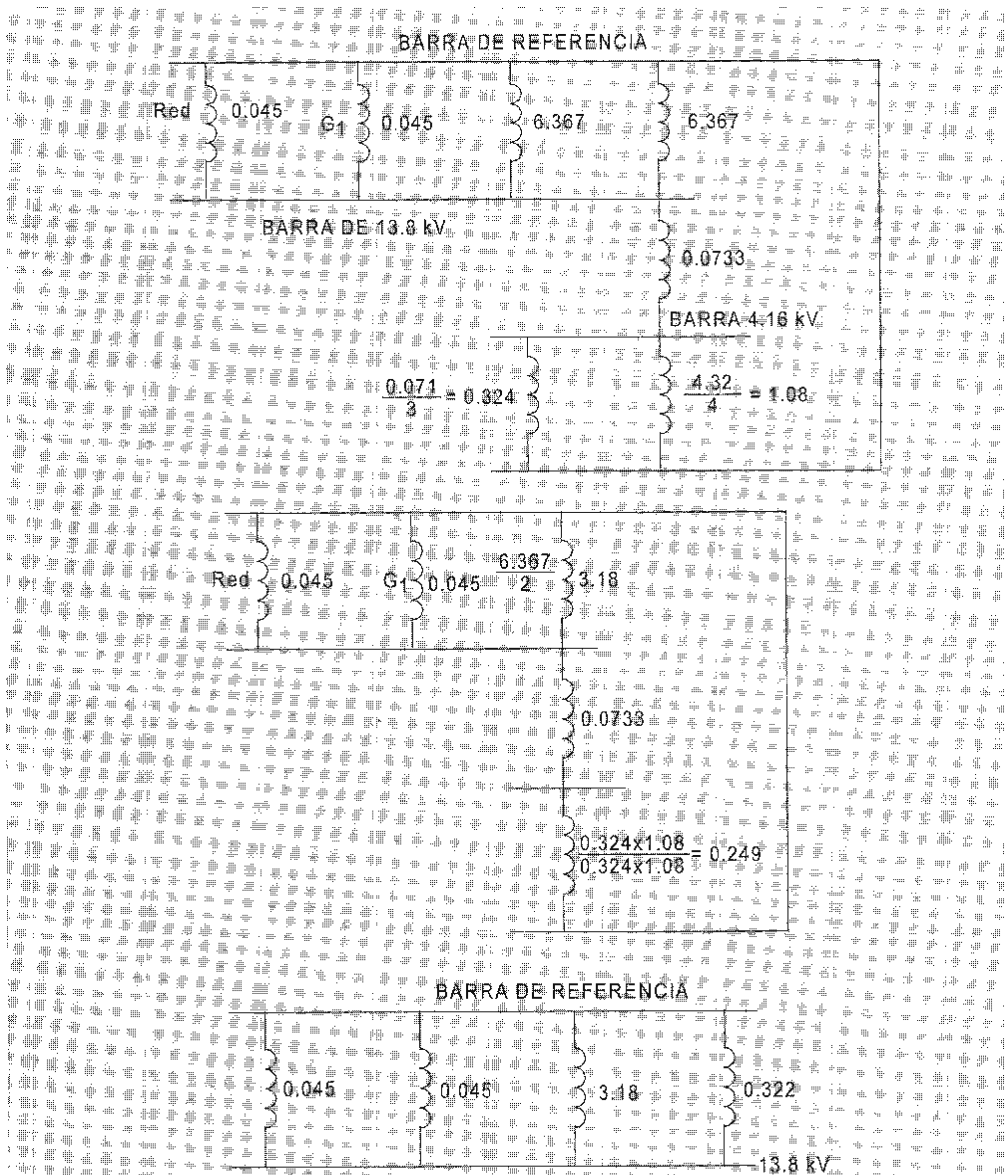
Con la información anterior, se elabora el diagrama de reactancias para el cálculo de la corriente de cortocircuito de primer ciclo.



Este diagrama se puede representar como sigue:



Haciendo la reducción correspondiente de la red para la falla de 13.8 kV:



La reactancia equivalente es:

$$X_T = \frac{1}{\frac{1}{0.045} + \frac{1}{0.045} + \frac{1}{0.322} + \frac{1}{3.18}} = 0.021 \text{ p.u.}$$

La corriente de cortocircuito trifásica en la barra de 13.8kV es:

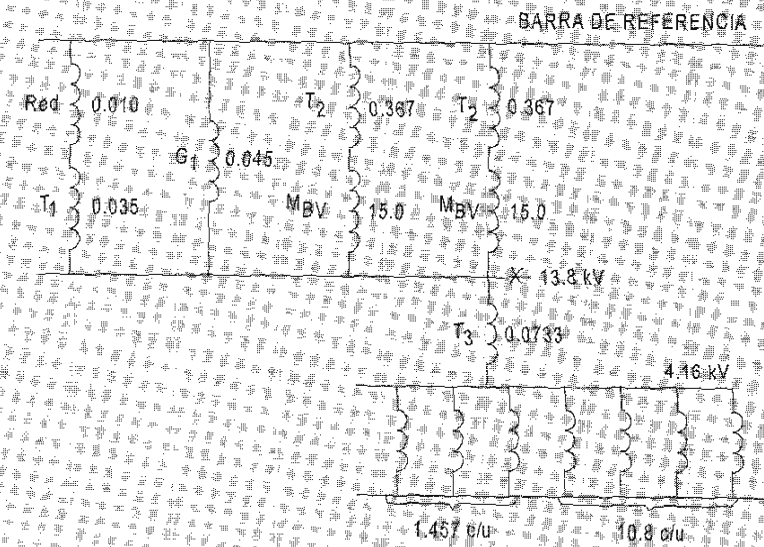
$$I'' = \frac{E}{X_T} = \frac{1.0}{0.021} = 47.8 \text{ p.u.}$$

La corriente de primer ciclo referida a la base de 10 MVA

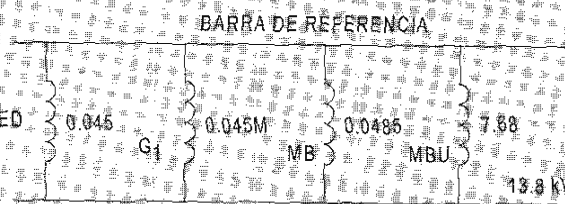
$$I_{cc} = I' \times \text{factor} \times I_{\text{base}}$$

$$I_{cc} = 47.8 \times 1.6 \times \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13.8} = 32 \text{ KA}$$

Diagrama de reactancias para determinar la capacidad interruptiva.



Haciendo un proceso de simplificación como para el caso anterior, se llega al siguiente arreglo de reactancias:



La reactancia equivalente es:

$$X_T = \frac{1}{\frac{1}{0.045} + \frac{1}{0.045} + \frac{1}{0.085} + \frac{1}{7.60}} = 0.021 \text{ pu}$$



La corriente de cortocircuito para la falla trifásica en la barra de 13.8 kV.

$$I'' = \frac{\epsilon}{X_T} = \frac{1.0}{0.021} = 46.6 \text{ p.u.}$$

La corriente simétrica interruptiva es ahora:

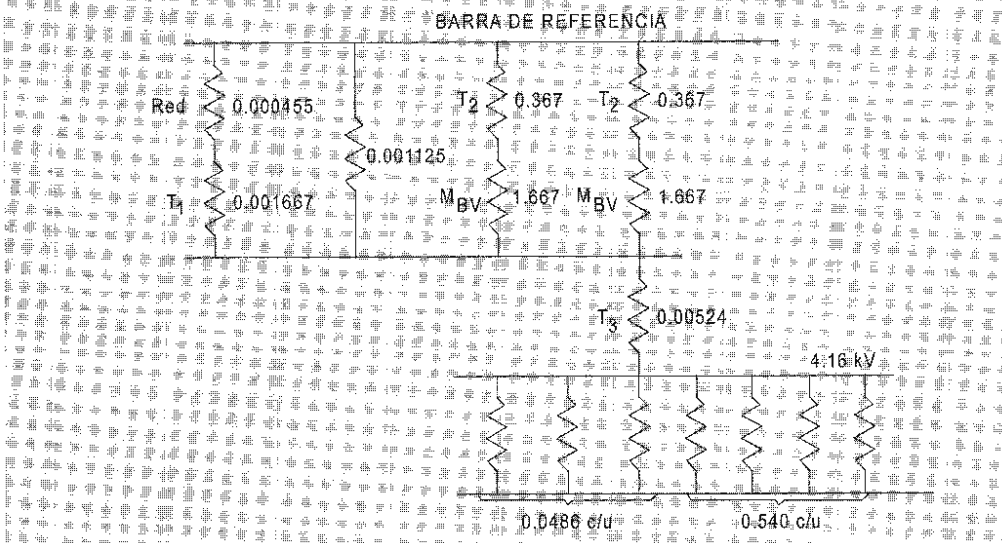
$$I_{cc} = I'' \times I_{base} = 46.6 \times \frac{10 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13.8} = 19.5 \text{ KA}$$

La tensión nominal del interruptor sería clase 15 kV, por lo que la capacidad interruptiva es:

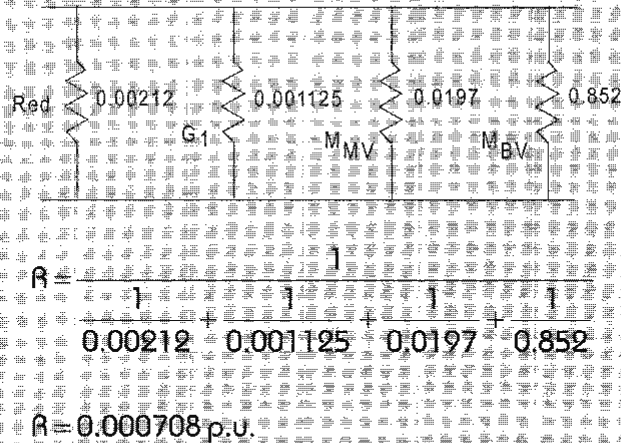
$$P_{cc} = \sqrt{3} V \cdot I_{cc} = \sqrt{3} \times 15 \times 19.5 = 506 \text{ MVA}$$

El valor comercial sería un interruptor de 750 MVA a 15KV que tiene una capacidad interruptiva de 28KA que operando a 13.8 KV es  $28 \times \left(\frac{15}{13.8}\right) = 30.4 \text{ KA}$ .

El 80% de este valor es 24 KA que resulta suficiente para esta aplicación. La capacidad de tierra y recierre es 58 KA, que comparada con la capacidad de primer ciclo de 32KA resulta suficiente. Para ver si esto resulta conservador, se calcula la relación  $X_T/R$ . La red de resistencias para la capacidad interruptiva con los valores de resistencias calculados, antes, es la siguiente:



### Reduciendo y simplificando la red:



Ahora la relación  $x/R$  es:

$$x/R = 0.02144 / 0.000708 = 30.3$$

Si se encuentra remota la generación la capacidad interruptiva es:

$$1.13 \times 10^{-5} = 22 \text{ KA}$$

Si se encuentra cercana la falla de la generación

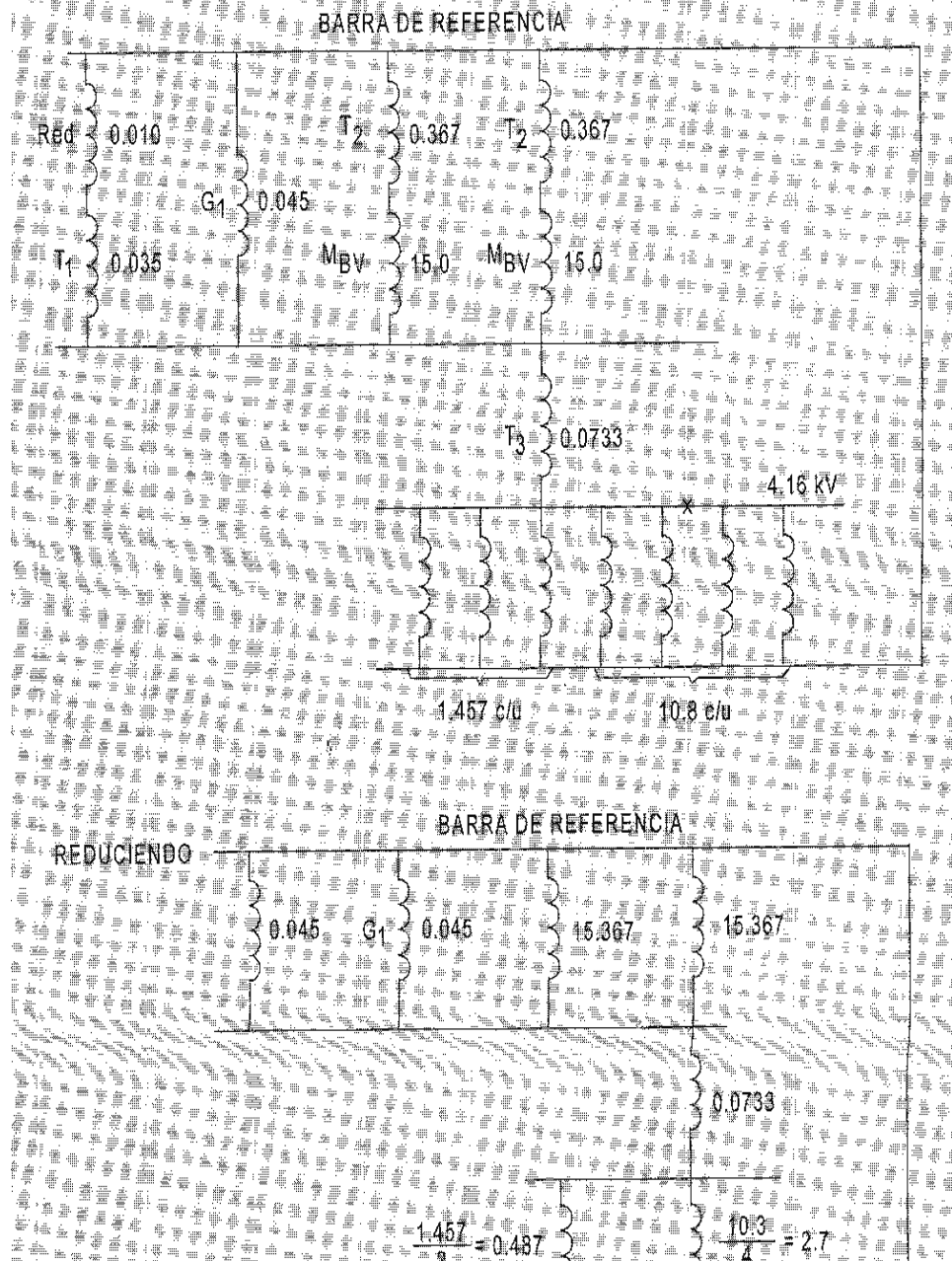
$$1.03 \times 19.5 = 20 \text{ KA}$$

Si se usara un interruptor de 500MVA, tiene una capacidad de interrupción simétrica de:

$$18 \times (1/13.8) = 19.6 \text{ KA}$$

La cual es insuficiente, por lo que se recurre al interruptor de 750 MVA, lo que es coincidente con lo indicada antes.

B) Para la falla en la barra de 4.16KV, el diagrama de reactancias es el siguiente:





La corriente de falla trifásica:

$$I'' = \frac{1}{X} = \frac{1.0}{0.0776} = 12.88 \text{ p.u.}$$

La corriente Interruptiva:

$$I_{cc} = I'' \times I_{base} = 12.88 \times \frac{10}{\sqrt{3} \times 4.16}$$

$$I_{cc} = 17.87 \text{ KA}$$

La potencia del cortocircuito sería en este caso:

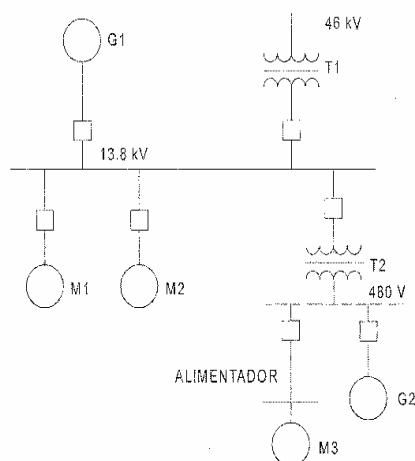
$$P_{cc} = \sqrt{3} V \times I_{cc} = \sqrt{3} \times 4.16 \times 17.87 \text{ KA}$$

$$P_{cc} = 128.8 \text{ MVA}$$

La capacidad comercial más próxima es 150 MVA.

## EJEMPLO 2.11

Para el sistema mostrado en la figura, calcular la corriente de cortocircuito monofásica para una falla en los buses 1, 2 y 3.



Alimentación de la compañía suministradora (red)	$P_{cc} = 1000 \text{ MVA}, x_{fR} = 22$
Generador 1 (G1)	25 MVA, $X''d = 9\%, X_0 = 5\% R_N = 100\%, x_{fR} = 10$
Generador 2 (G2)	5 MVA, $X''d = 9\%, X_0 = 5\% X_N = 3\%, x_{fR} = 10$
Transformador 1 (T1)	20 MVA, $X_1 = X_2 = X_0 = 7\%, x_{fR} = 7$
Transformador 2 (T2)	5 MVA, $X_1 = X_2 = X_0 = 7\%, x_{fR} = 5$
Motor 1 (M1)	5000 HP, $X_1 = X_2 = 15\%, X_0 = 6\%, x_{fR} = 10$
Motor 2 (M2)	1500 HP, $X_1 = X_2 = 15\%, X_0 = 6\%, x_{fR} = 10$
Motor 3 (M3)	100 HP, $X_1 = X_2 = 15\%, X_0 = 6\%, x_{fR} = 8$

El alimentador tiene una capacidad de 4000 A con  $Z_1 = Z_2 = 0.040 \frac{\Omega}{\text{fase}}$ ,  
 $Z_0 = 2 \frac{\Omega}{\text{fase}}$  y  $x_{fR} = 10$ .

### SOLUCIÓN

$$\text{MVA}_{\text{BASE}} = 10$$

Para el G1:

$$X_0 = 0.05 \left( \frac{10}{5} \right) = 0.02 \text{ p.u.}$$

Para el G2:

$$X_0 = 0.05 \left( \frac{10}{5} \right) = 0.2 \text{ p.u.}$$

Para el T1:

$$X_0 = 0.07 \left( \frac{10}{20} \right) = 0.35 \text{ p.u.}$$

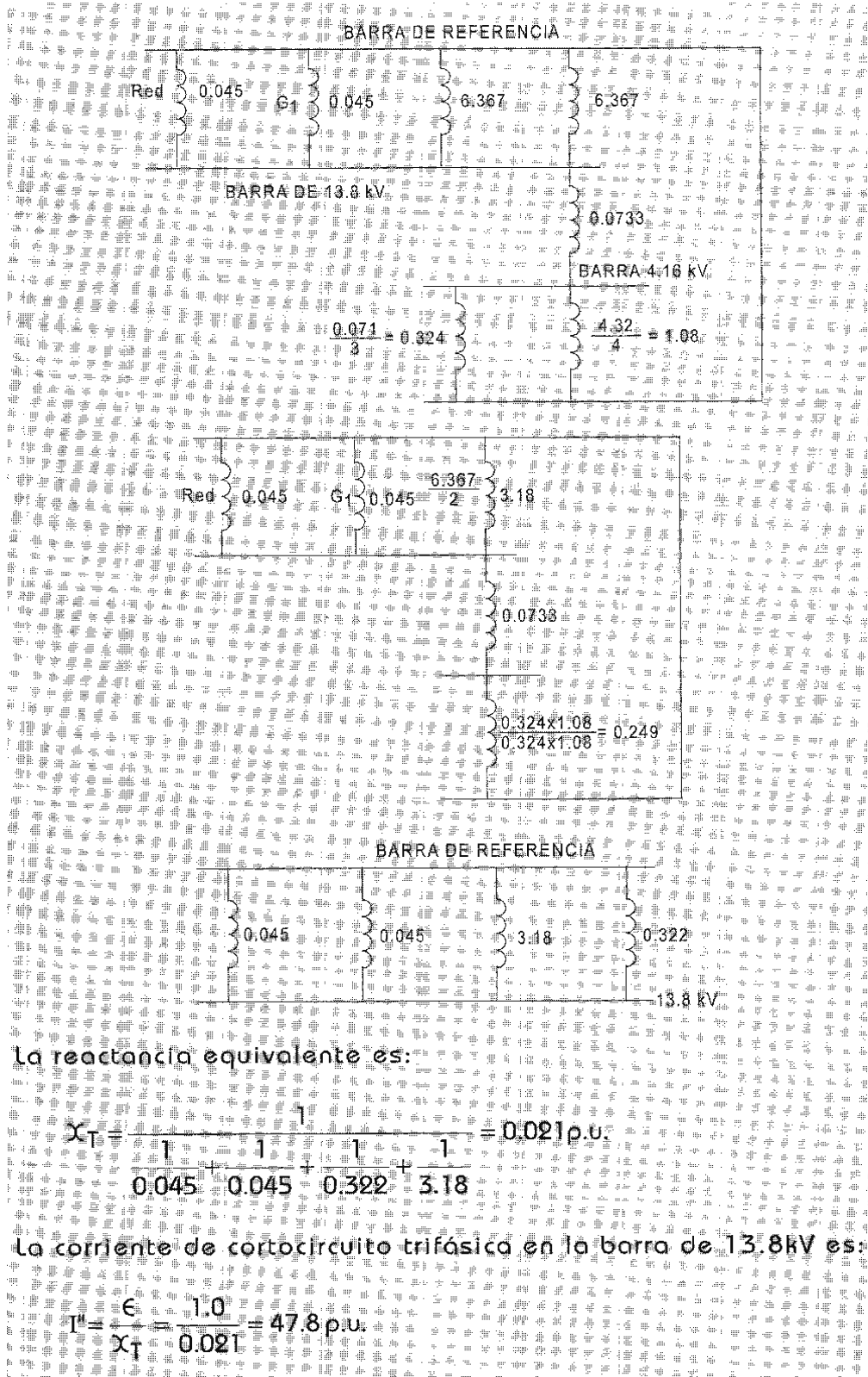


TABLA DE CONEXIONES

ELEMENTO	NODO SALIDA	NODO LLEGADA	REACTANCIA
1	0	1	0.02
2	-	-	---
3	-	-	---
4	0	1	0.035
5	1	2	0.14
6	0	2	0.16
7	2	3	260.41
8	-	-	---

$$Y_{11} = \frac{1}{0.02} + \frac{1}{0.035} + \frac{1}{0.14} = 85.71$$

$$Y_{22} = \frac{1}{0.14} + \frac{1}{0.16} + \frac{1}{260.41} = 0.0038$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -\frac{1}{0.14} = -7.14$$

$$Y_{13} = Y_{31} = 0.0$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -\frac{1}{260.4} = -0.0038$$

$$Y_{BUS}^{(0)} = \begin{vmatrix} 85.71 & -7.14 & 0 \\ -7.14 & 13.39 & -0.0038 \\ 0 & -0.0038 & 0.0038 \end{vmatrix}$$

$$Z_{BUS}^{(0)} = Y_{BUS}^{-1} = \begin{vmatrix} 0.012 & 0.0065 & 0.0065 \\ 0.0065 & 0.078 & 0.078 \\ 0.0065 & 0.078 & 263.23 \end{vmatrix}$$



**Para la falla en el bus 1:**

$$I_{f1} = \frac{3.0}{2(0.017) + 0.012} = 65.21 \text{ p.u.}$$

$$I_{f1} = 65.21 \times 418.37 = 27.28 \text{ KA}$$

**Para la falla en el bus 2:**

$$I_{f2} = \frac{3.0}{2(0.083) + 0.078} = 12.29 \text{ p.u.}$$

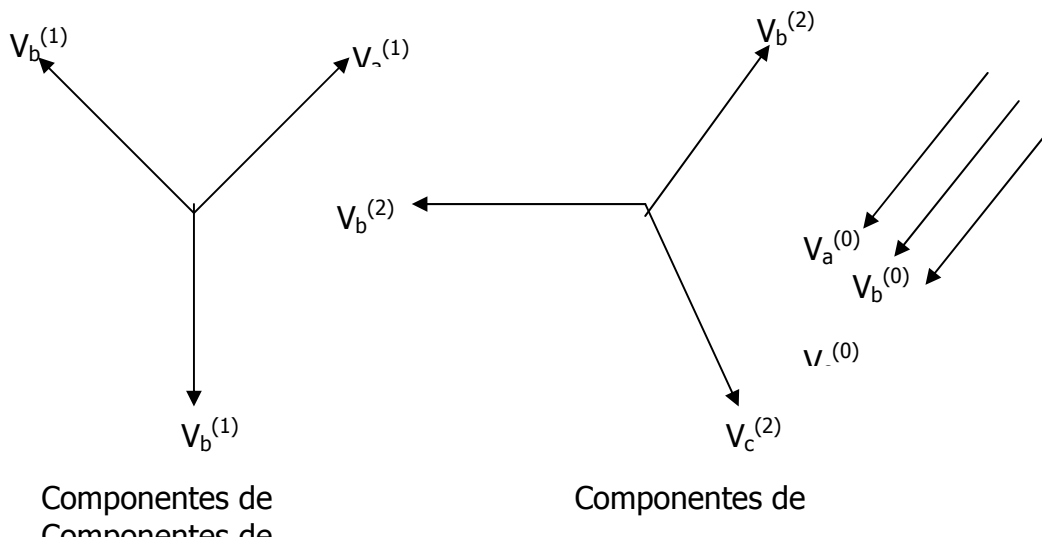
$$I_{f2} = 12.29 \times 22028 = 271.28 \text{ KA}$$

## FORMACIÓN DE REDES DE SECUENCIA

Una de las herramientas más poderosas para tratar con circuitos polifásicos desbalanceados es el método de las componentes simétricas desarrollado por Fortescue. Dicho trabajo nos prueba que un sistema desbalanceado de  $n$  fasores relacionados, se puede resolver con  $n$  sistemas de fasores balanceados llamados *componentes simétricas* de los fasores originales. Los  $n$  fasores de cada conjunto de componentes son iguales en longitud, y los ángulos entre fasores adyacentes de un conjunto son iguales.

De acuerdo con el teorema, tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de fasores. Los conjuntos balanceados de componentes son:

1. *Componentes de secuencia positiva*, que consisten en tres fasores de igual magnitud desplazados uno de otro por una fase de  $120^\circ$  y que tienen la misma secuencia de fase que los fasores originales.
2. *Componentes de secuencia negativa*, que consisten en tres fasores iguales en magnitud, desplazados en fase uno del otro por  $120^\circ$  y que tiene una secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales y
3. *Componentes de secuencia cero*, que consisten en tres fasores iguales en magnitud y con un desplazamiento de fase cero uno de otro.



Considerando que la suma de los vectores simétricos nos debe de dar los vectores asimétricos, podemos suponer lo siguiente;

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a_1} + I_{a_2} + I_o \\ I_b &= I_{b_1} + I_{b_2} + I_o \\ I_c &= I_{c_1} + I_{c_2} + I_o \end{aligned}$$

Secuencia Positiva:

$$\begin{aligned} I_{b_1} &= I_{a_1} \angle -120^\circ = a^2 I_{a_1} \\ I_{c_1} &= I_{a_1} \angle 120^\circ = a I_{a_1} \end{aligned}$$

Secuencia Negativa:

$$\begin{aligned} I_{b_2} &= I_{a_2} \angle 120^\circ = a I_{a_2} \\ I_{c_2} &= I_{a_2} \angle -120^\circ = a^2 I_{a_2} \end{aligned}$$

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1 \angle 0^\circ$$

Por lo cual:

$$I_o = 1/3 ( I_a + I_b + I_c )$$

$$I_{a_1} = 1/3 ( I_a + a I_b + a^2 I_c )$$

$$I_{a_2} = 1/3 ( I_a + a^2 I_b + a I_c )$$

## EJEMPLO 2.12

Tenemos tres corrientes asimétricas, encontrar los valores simétricos y comprobar su suma con el valor asimétrico.

$$I_a = 5 \text{ amp} = 5 \angle 0^\circ$$

$$I_b = -j8.66 \text{ amp} = 8.66 \angle -90^\circ$$

$$I_c = j10 \text{ amp} = 10 \angle 90^\circ$$

Sustituyendo los valores correspondientes, tenemos que:

$$I_o = 1/3 ( I_a + I_b + I_c )$$

$$I_o = 1/3 ( 5 \angle 0^\circ + 8.66 \angle -90^\circ + 10 \angle 90^\circ )$$

$$\begin{aligned}
 I_0 &= 5/3 \angle 0^\circ + 8.66/3 \angle -90^\circ + 10/3 \angle 90^\circ \\
 I_0 &= 1.67 \angle 0^\circ + 2.89 \angle -90^\circ + 3.33 \angle 90^\circ \\
 I_0 &= 1.67 + j0 + 0 - j 2.89 + 0 + j3.33 \\
 I_0 &= 1.67 + j0.44 = 1.72 \angle 14.76^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{a1} &= 1/3 ( I_a + a I_b + a^2 I_c ) \\
 I_{a1} &= 1/3 [5 \angle 0^\circ + (8.66 \angle -90^\circ + \angle 120^\circ) + (10 \angle 90^\circ + \angle 240^\circ)] \\
 I_{a1} &= 5/3 \angle 0^\circ + 8.66/3 \angle 30^\circ + 10/3 \angle 330^\circ \\
 I_{a1} &= 1.67 \angle 0^\circ + 2.89 \angle 30^\circ + 3.33 \angle 330^\circ \\
 I_{a1} &= 1.67 + j0 + 2.5 + j 1.5 + 2.88 - j1.67 \\
 I_{a1} &= 7.05 - j0.22 = 7.05 \angle -1.79^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{a2} &= 1/3 ( I_a + a^2 I_b + a I_c ) \\
 I_{a2} &= 1/3 [5 \angle 0^\circ + (8.66 \angle -90^\circ + \angle 240^\circ) + (10 \angle 90^\circ + \angle 120^\circ)] \\
 I_{a2} &= 5/3 \angle 0^\circ + 8.66/3 \angle 150^\circ + 10/3 \angle 210^\circ \\
 I_{a2} &= 1.67 \angle 0^\circ + 2.89 \angle 150^\circ + 3.33 \angle 210^\circ \\
 I_{a2} &= 1.67 + j0 - 2.5 + j 1.5 - 2.88 - j1.67 \\
 I_{a2} &= -3.71 - j0.22 = 3.71 \angle -176.6^\circ
 \end{aligned}$$

Sumando resultados:

$$\begin{aligned}
 I_0 &= 1.67 + j0.44 = 1.72 \angle 14.76^\circ \\
 I_{a1} &= 7.05 - j0.22 = 7.05 \angle -1.79^\circ \\
 I_{a2} &= -3.71 - j0.22 = 3.71 \angle -176.6^\circ
 \end{aligned}$$

$$I_a = 5.01 + 0 = 5 \angle 0^\circ \text{ amp}$$

$$\begin{aligned}
 I_{b1} &= 7.05 \angle -1.79^\circ + \angle -120^\circ = 7.05 \angle -121.79^\circ \\
 I_{b2} &= 3.71 \angle -176.6^\circ + \angle 120^\circ = 3.71 \angle -56.6^\circ \\
 I_0 &= 1.67 + j0.44 = 1.72 \angle 14.76^\circ
 \end{aligned}$$

$$I_b = 0 - j8.66 \text{ amp}$$

$$\begin{aligned}
 I_{c1} &= 7.05 \angle -1.79^\circ + \angle 120^\circ = 7.05 \angle 118.21^\circ \\
 I_{c2} &= 3.71 \angle -176.6^\circ + \angle -120^\circ = 3.71 \angle -296.6^\circ \\
 I_0 &= 1.67 + j0.44 = 1.72 \angle 14.76^\circ
 \end{aligned}$$

$$I_c = 0 + j10$$

## UNIDAD III

### Dispositivos para la Protección de Sistemas Eléctricos.

Los sistemas eléctricos están diseñados para suministrar en forma continua la energía eléctrica a los equipos o dispositivos que deben ser alimentados, por lo que la confiabilidad del servicio es un aspecto que resulta muy importante. El gran riesgo a estos servicios está en que el flujo de corriente tenga un valor mayor que el esperado, de la corriente que debe circular por el mismo. Estas corrientes se conocen por lo general como “sobrecorrientes”, se originan por distintas causas, pero para fines prácticos se clasifican como: sobrecargas y cortocircuito.

**Sobrecargas.** Las sobrecargas se definen como corrientes que son mayores que el flujo de corriente normal, están confinadas a la trayectoria normal de circulación de corriente y pueden causar sobrecalentamiento del conductor si se permite que continúe circulando.

Las sobrecargas se pueden producir de distintas maneras, por ejemplo, cuando el circuito de un motor, las chumaceras del motor o las chumaceras del equipo que acciona el motor operan calientes porque requiere lubricación y provocan que se transmita calor sobre el eje, lo que ejerce cierto frenado, lo cual se traduce como una sobrecarga, ya que no puede girar a su velocidad y es posible que se pare totalmente.

### CORTOCIRCUITO.

El cortocircuito se puede definir como una corriente que se encuentra fuera de sus rangos normales. Algunos cortocircuitos no son mayores que las corrientes de cargas, mientras que otros pueden ser muchas veces más los valores de la corriente normal.

Un cortocircuito se puede originar de distintas maneras, por ejemplo, la vibración del equipo puede producir en algunas partes pérdidas de aislamiento, de manera que los conductores queden expuestos a contacto entre sí o a tierra.

Otro caso puede ser el de los aisladores que pueden estar excesivamente sucios por efecto de la contaminación, y en presencia de lluvia o llovizna ligera, puede producir el flameo del conductor a la estructura (tierra).

### EFFECTOS DEL CORTOCIRCUITO

1. **Arco Eléctrico.** Este es similar al que se presenta cuando se usa soldadura eléctrica, ya que es un arco muy brillante y caliente y se puede presentar en un rango de corriente que va de unos cuantos

hasta miles de amperes. El efecto de la falla es muy dramático, ya que el arco quema prácticamente todo lo que se encuentra en su trayectoria.

2. **Calentamiento.** Cuando un cortocircuito tiene una gran magnitud de corriente, causa severos efectos de calentamiento, por ejemplo, una corriente de falla de 15 KA en un conductor de cobre calibre 6 AWG, produce una elevación de temperatura de 205°C en menos de un ciclo de duración de la falla, estas temperaturas podrían iniciar el los materiales mas próximos.
3. **Esfuerzos magnéticos.** Debido a que un campo magnético se forma alrededor de cualquier conductor cuando circula por el una corriente, se puede deducir fácilmente que cuando circula una corriente de cortocircuito de miles de amperes, el campo magnético se incrementa muchas veces y los esfuerzos magnéticos producidos son significativamente mayores.

La protección entra sobrecorriente para conductores y equipos se utiliza con el propósito de interrumpir el circuito eléctrico, si la corriente alcanza un valor que pudiera causar una temperatura excesiva y peligrosa en el conductor o en su aislamiento.

De aquí que casi todos los circuitos eléctricos deban tener protección contra sobrecorrientes en alguna forma. Los dispositivos de protección contra sobrecorriente, deben cumplir con los siguientes requerimientos generales:

- a) Ser completamente automáticos.
- b) Transportar la corriente normal sin interrupción.
- c) Interrumpir inmediatamente las sobrecorrientes.
- d) Ser fácilmente reemplazables o reestablecidos.
- e) Ser seguros bajo condiciones normales y de sobrecorriente.

Para reunir los requerimientos para la protección contra cortocircuito, se deben de cumplir con las siguientes especificaciones:

- Debe ser capaz de cerrar en forma segura sobre cualquier valor de corriente de carga o corriente de cortocircuito, dentro del rango de capacidad momentánea del circuito.

- Debe ser seguro para abrir cualquier corriente que pueda circular dentro del rango de interrupción del circuito.
- Debe interrumpir automáticamente un flujo anormal de corriente dentro de su capacidad interruptiva.

Los dispositivos fundamentales que se utilizan para cumplir con las funciones de protección son:

- a) Los interruptores
- b) Los fusibles

### **INTERRUPTORES PARA SISTEMAS CON VOLTAJES MAYORES DE 600V**

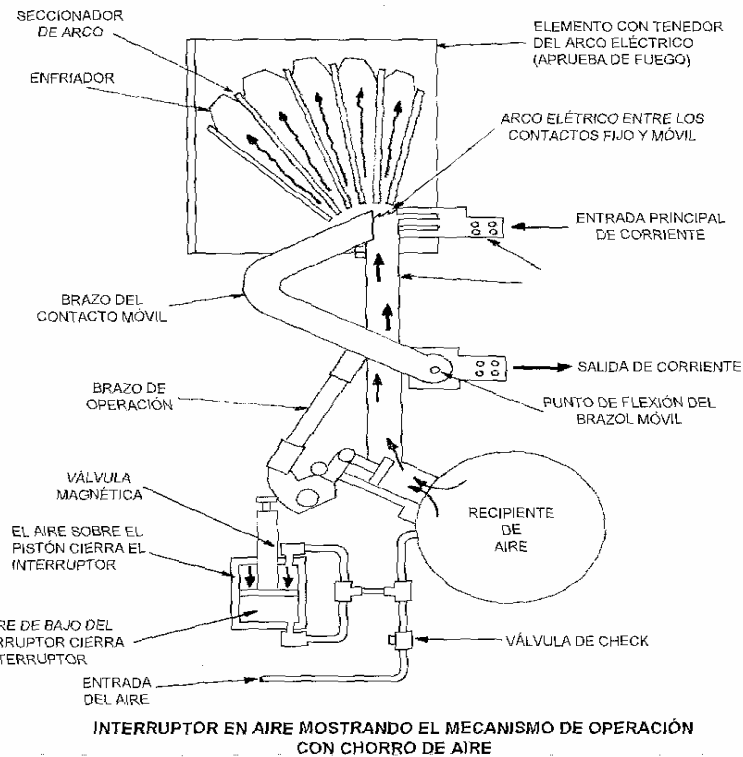
Los Interruptores Para Voltajes Mayores A los 600 V, Se Dividen En Cuatro Grandes Grupos:

- Interruptores de aire
- Interruptores de vacío
- Interruptores de aire
- Interruptores de gas

Todos estos interruptores operan en conjunto con los relevadores de protección para llenar los requisitos para una operación automática.

**Interruptores de aire.** Tienden a ser usados en instalaciones en interiores e interrumpen sólo con aire entre sus contactos. Este tipo de interruptor se usa en exteriores, siempre cuando el mecanismo del interruptor, los controles, se instalan en casetas cuidándose de la intemperie. Se fabrican dentro de los rangos de 2400 a 34500V.

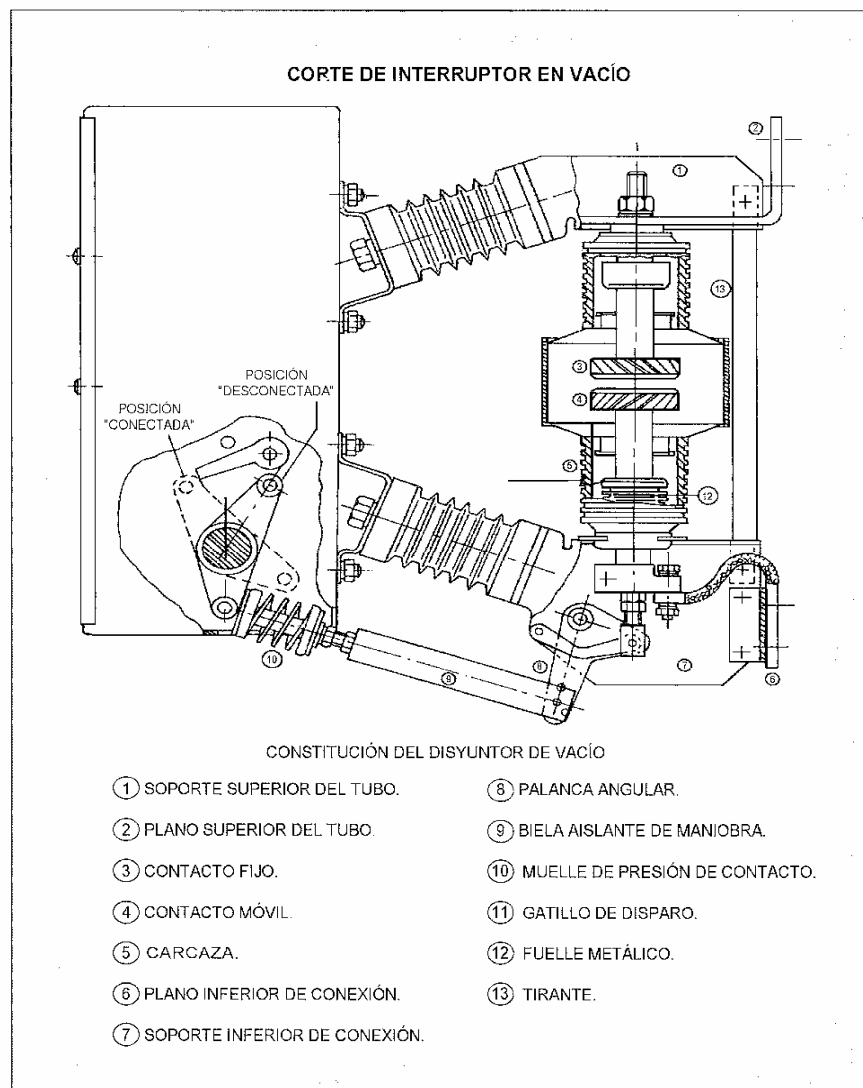
El aire de una fuente de aire comprimido se usa, ya sea para abrir o para cerrar la navaja de los contactos móviles bajo carga eléctrica, un arco se iniciará entre la navaja móvil y los contactos fijos.



**Interruptores en vacío.** Debido a que el vacío constituye una ausencia de cualquier sustancia y ante la ausencia de electrones, representa un mejor dieléctrico. Algunas ventajas de estos dispositivos pueden ser: son más rápidos para extinguir el arco eléctrico, producen menos ruido durante la operación, el tiempo de vida de los contactos es mayor y elimina o reduce el riesgo de explosiones potenciales por presencia de gases o líquidos. El mantenimiento de estos interruptores es reducido y se pueden usar en cualquier lugar, ya que no les afecta el factor temperatura ni las condiciones atmosféricas.

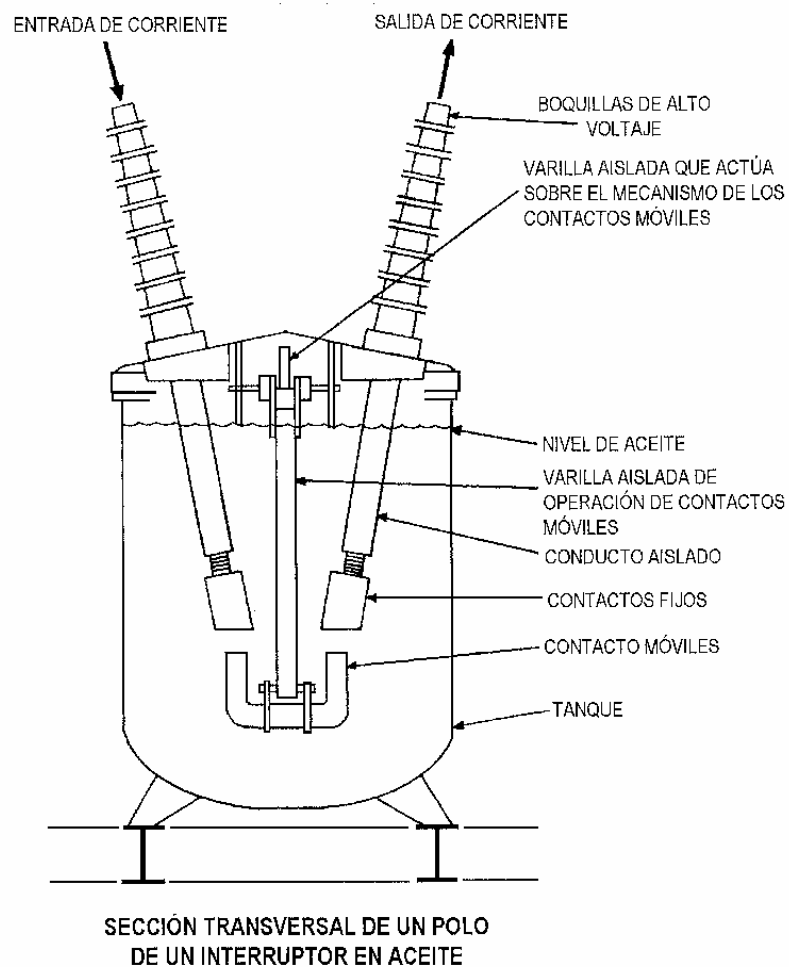
Su construcción es simple, ya que se tienen dos contactos tipo disco, mostrados dentro de un cilindro contenedor. La cámara es evacuada para proporcionar el vacío, un contacto es fijo y el otro se arregla para que se mueva el contacto fijo o se aleje de él, según sea que cierre o abra, el movimiento se controla por medio de una barra de acero que se acciona desde el exterior. La separación de los contactos oscila entre los 2 cm.





**Interruptores de aceite.** Operan a más de 13.8 kV, teniendo su uso en instalaciones del tipo exterior. Estos interruptores tienen un recipiente que contiene aceite, dentro del cual se instalan los contactos y el mecanismo de operación, de tal forma que el arco eléctrico que se forma se extingue por medio del aceite.

Este tipo de interruptores se aplican para rangos de tensión de 2.4 a 400 kv. En voltajes hasta 69kV, los tres polos del interruptor se encuentran dentro del mismo tanque, en tensiones mayores a se usa un tanque separado por cada polo.



**Interruptores en gas.** Utilizan por lo general  $\text{SF}_6$ , son utilizados en alta y extra alta tensión (hasta 765 kV), utilizando el gas inerte en el módulo de interrupción los cuales representa las cámaras llenas de gas en donde ocurre la separación y cierre de los contactos. Por cada polo puede haber dos o tres módulos o secciones, dependiendo del nivel de tensión, estos módulos están conectados en serie.

Un **fusible** es un dispositivo de protección contra sobre corriente, teniendo un miembro que se va a fundir cuando se abre el circuito que es directamente calentado por el paso de una sobrecorriente a través del mismo.

---

---

## FUSIBLES PARA ALTAS TENSIONES (ARRIBA DE LOS 600 V)

Se dividen en:

- Fusibles de potencia limitadores de corriente.
- Fusibles de potencia no limitadores de corriente.
- Fusibles tipo distribución para uso en cortocircuitos.

### **Fusibles de potencia y rígido de corriente.**

Esta diseñado para fundirse antes de que la corriente de cortocircuito tenga tiempo de alcanzar su valor pico, por lo cual limitan su corriente a niveles seguros. Tienen una laminilla de plata que se conecta entre ambos extremos del fusible en el interior de un tubo aislante. La laminilla es capaz de conducir la corriente de carga en forma normal, debido a que el calor que se produce es rápidamente absorbido sin embargo, las corrientes anormales funden ducha laminilla.

### **Fusibles de potencia no limitadores de corriente.**

Son similares al tipo cartucho, se utilizan para sistemas de 600 V o menores. Se construyen en un tubo aislante con extremos atornillables y un eslabón fusible conectado entre los dos contactos en los extremos del grupos tubo para formar la trayectoria de la corriente.

### **Fusibles tipo distribución para uso en cortocircuitos.**

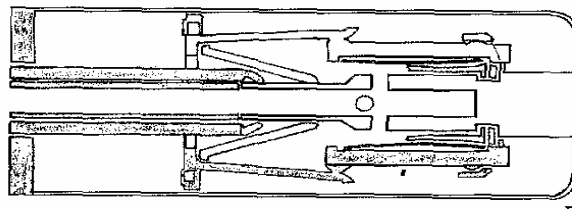
Se utilizan en redes de distribución aéreas. Los utilizan las compañías distribuidoras de energía eléctrica, su uso en instalaciones industriales esta limitado, ya que está restringida su aplicación en instalaciones tipo exterior.

**FUNCIONAMIENTO DE UN INTERRUPTOR EN SF<sub>6</sub>**

**PRINCIPIO DE CORTE**

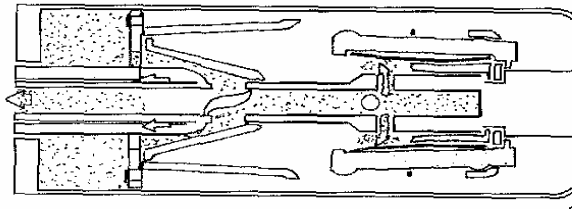
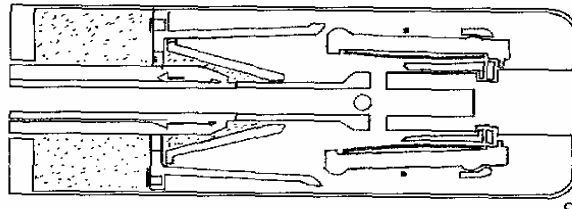
El corte se efectúa por auto-soplado del gas SF<sub>6</sub>

Aparato en posición "cerrado" (fig. 1)



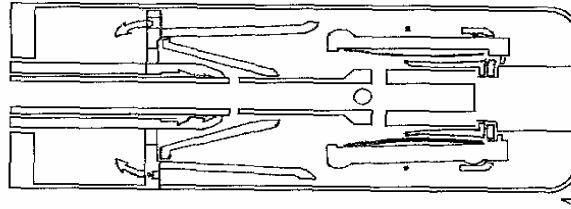
**APERTURA**

El gas SF<sub>6</sub> está comprimido por el pistón solidario al contacto principal desde el principio del movimiento. Los contactos principales se separan primero (fig.2) y posteriormente los contactos de arco (fig.3)

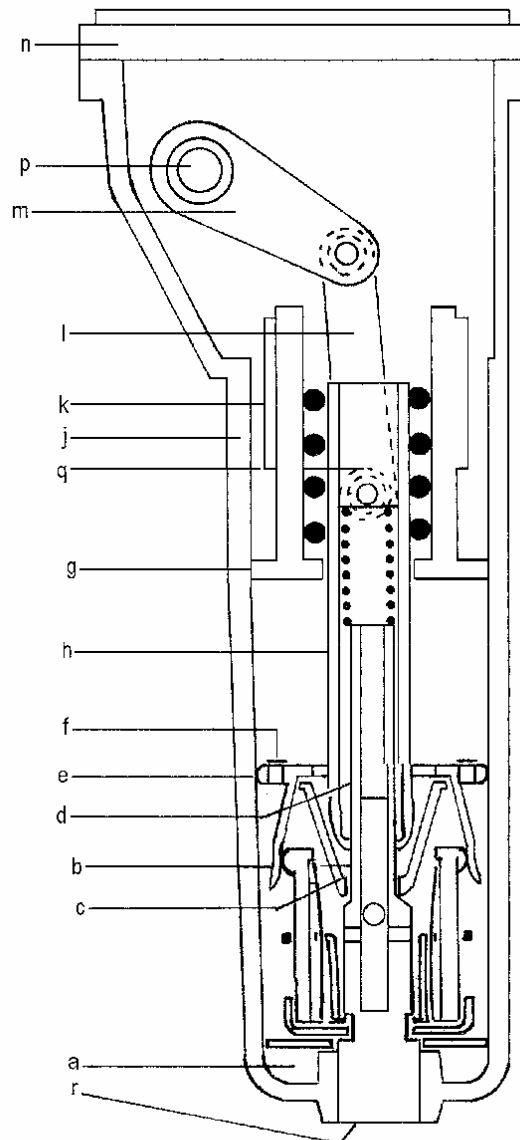


**CIERRE**

Una válvula (fig.4) se abre sobre el pistón para permitir la maniobra de cierre

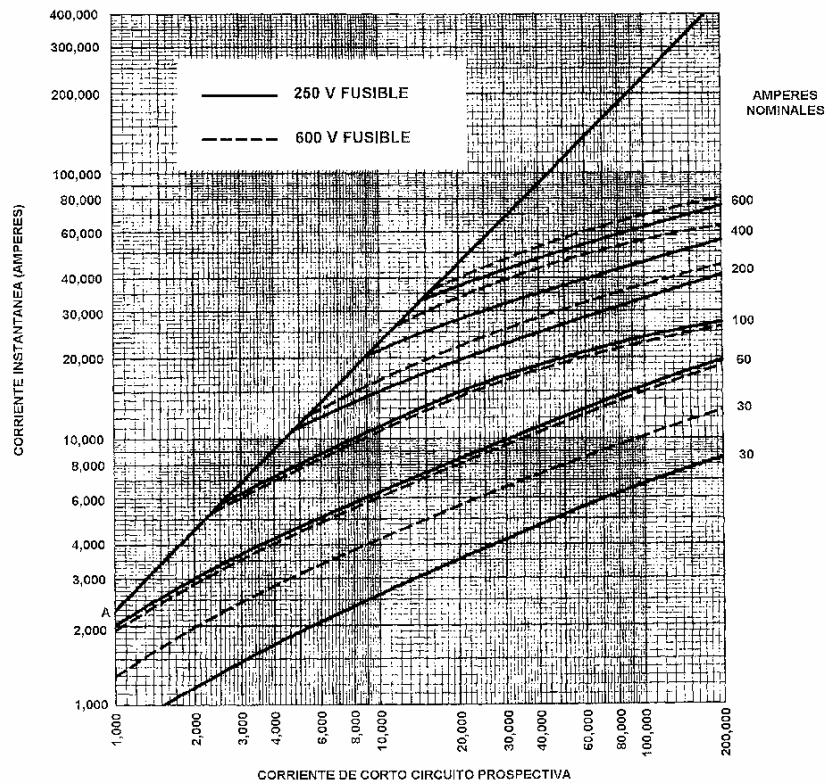


- n- Tapa.
- p- Válvula de llenado.
- m- Manivela.
- l- Biela aislante.
- k- Cojinetes cónicos de rolamiento.
- j- Carcasa aislante.
- q- Toma de corriente superior.
- g- Soporte.
- f- Válvula.
- h- Vástago de contacto.
- e- Pistón.
- d- Contacto apaga chispas móvil.
- b- Contacto apaga chispas fijo.
- c- Tobera aislante.
- a- Tamiz molecular.
- r- Toma de corriente inferior.

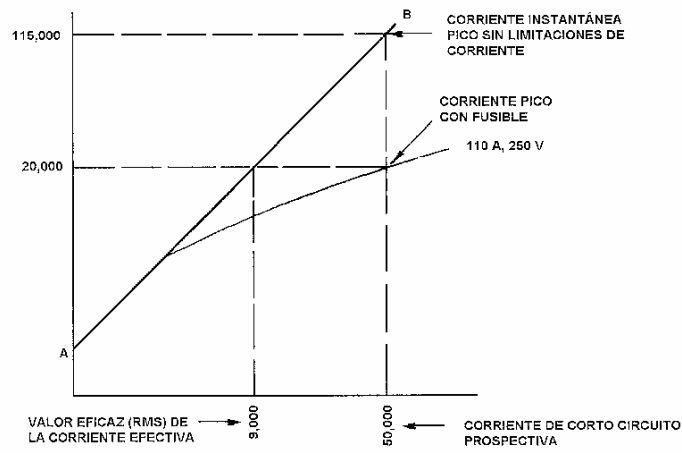


### PARTES DE UN POLO PARA INTERRUPTOR EN SF6 EN MEDIA TENSIÓN

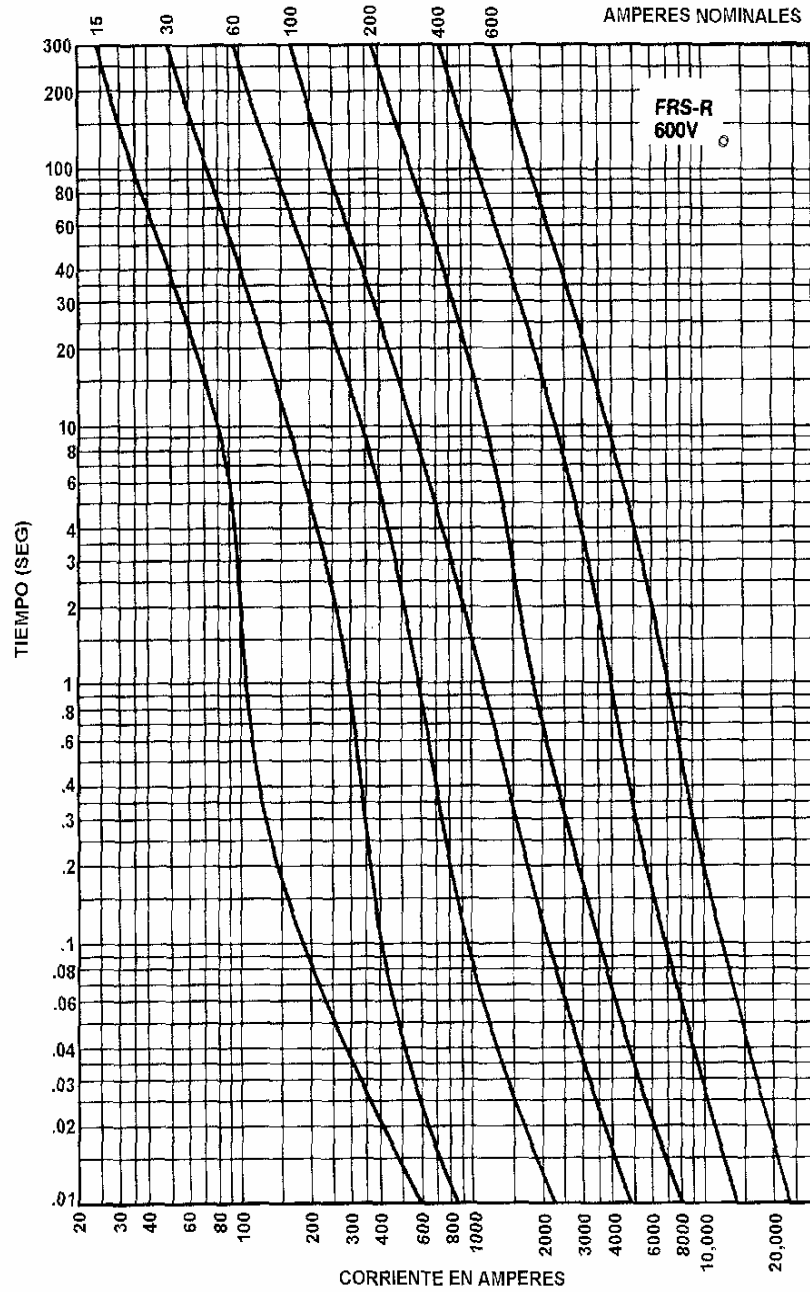




CURVA TÍPICA DE FUSIBLES

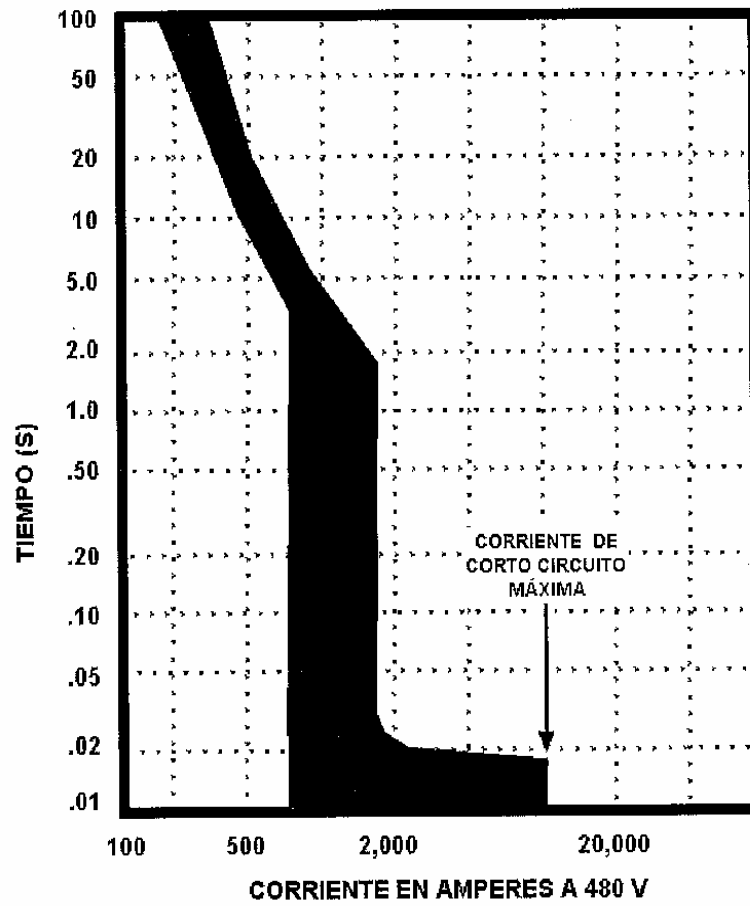


EJEMPLO DE USO DE CURVAS DE FUSIBLES

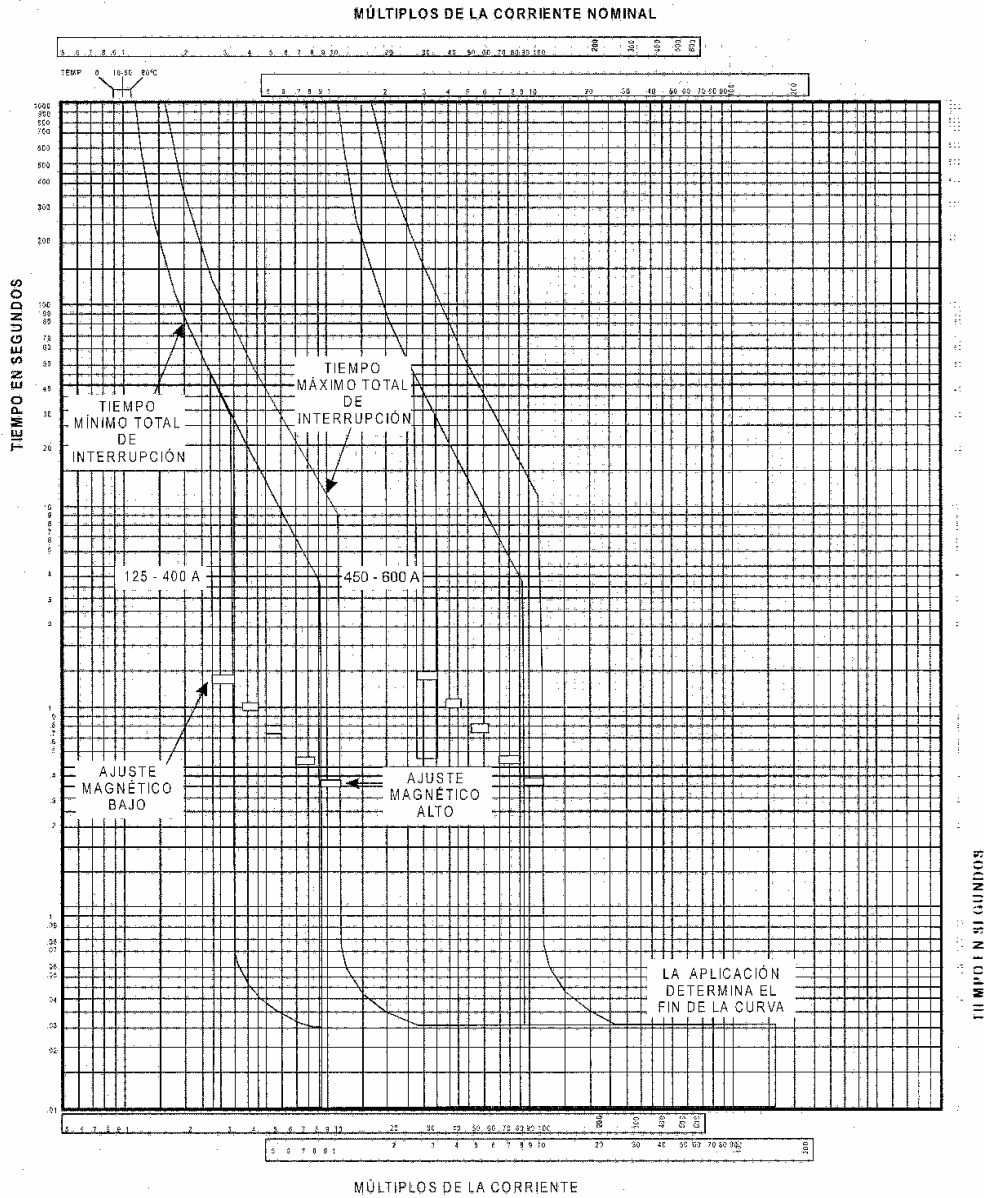


CURVA TÍPICA PARA FUSIBLE CLASE T-600V, DE TIPO ACCIÓN RETARDADA





**CURVA DE UN INTERRUPTOR CON MARCO DE 100A**



## UNIDAD IV

### ANÁLISIS, SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE SIPOSITIVOS DE PROTECCIÓN EN MOTORES Y TRANSFORMADORES

Para la instalación eléctrica para los motores, se debe de hacer utilizando las Normas Técnicas para Instalaciones Eléctricas. Los elementos principales para una instalación eléctricas de varios motores se muestra a continuación.

Calcular para un motor trifásico de inducción de 5HP, 60 Hz, 220 volts con letra de código H.

- a) La mínima y máxima corriente de arranque posible.
- b) La corriente normal de operación a plena carga.
- c) La máxima corriente de arranque como una relación de la corriente nominal.

a) De tablas, para la letra de código H, el motor tiene de 6.3 a 7.09 kVA/HP, por lo tanto:

Los kVA mínimos que demanda son:

$$\text{kVA mínimos} = 6.3 \frac{\text{kVA}}{\text{HP}} \times 5 \text{ HP} = 31.5$$

Los kVA máximos que demanda:

$$\text{kVA máximos} = 7.09 \frac{\text{kVA}}{\text{HP}} \times 5 \text{ HP} = 35.45$$

Como se trata de un motor trifásico, entonces su potencia se puede expresar como:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I_L \quad (\text{VA})$$

De donde, para el caso de la mínima corriente de línea:

$$I_{\text{min}} = \frac{VA_{\text{min}}}{\sqrt{3} \times V} \times \frac{31.5 \times 1000}{\sqrt{3} \times 200} = 82.66 \text{ A}$$

$$I_{\text{máx}} = \frac{VA_{\text{máx}}}{\sqrt{3} \times V} \times \frac{35.45 \times 1000}{\sqrt{3} \times 200} = 93.03 \text{ A}$$

b) La corriente normal de operación a plena carga, se obtiene de la tabla para corriente a plena carga de motores. De manera que, para 5 HP a 220 volts, la corriente es 15 A.

c) La máxima corriente de arranque, como una relación de la corriente nominal, es:

$$\frac{I_{\max}}{I_{\text{nom}}} = \frac{95.03}{15} = 6.202$$

Es decir, aproximadamente 6.2 veces mayor que la corriente de operación.

Calcular las características principales para los alimentadores de los motores trifásicos de inducción a 60 Hz, cuyos datos principales se dan a continuación:

- ➔ Motor de 5HP, 220 volts con letra de código A y corriente nominal de 15.9, jaula de ardilla.
- ➔ Motor de 25HP, 440 volts con una corriente nominal de 36 amperes.
- ➔ Motor de 30 HP a 440 volts. El motor tiene el rotor devanado.
- ➔ Motor de 50 HP, jaula de ardilla a 440 volts con corriente a plena carga de 68A.

Para el motor jaula de ardilla de 5 HP 220 volts con letra de código A, el circuito derivado se puede proteger por medio de un interruptor termomagnético de  $1.5 \times 15.9 = 23.85$  amperes debido al bajo valor que da su letra de código a rotor bloqueado. El máximo ajuste del dispositivo de sobrecarga (elemento térmico) es:

$$1.15 \times 15.9 = 18.29 \text{ A.}$$

Para el motor de 25 HP a 440 volts, como no se dan datos de letra de código, se puede suponer un factor de servicio de 1.2, con lo que el elemento de protección contra sobrecarga se puede ajustar a un valor:

$$1.25 \times 36 = 45 \text{ A.}$$

Se puede usar un fusible de tiempo no retardado para proteger el circuito y cuyo valor es:

$$3 \times 36 = 108 \text{ A.}$$

Para el motor de 30 HP a 440 volts, con una elevación máxima de temperatura de 40 °C con rotor devanado, se hacen las siguientes consideraciones:

- Debido a que el motor tiene rotor devanado, se usa fusible de tiempo no retardado como dispositivo de protección del circuito derivado, el valor de este dispositivo no se puede ajustar a más del 150% de la corriente a plena carga, que este caso de tablas se sabe es: 42 amperes, es decir, que el 150% es entonces;

$$1.5 \times 42 = 63 \text{ A.}$$

En este caso, probablemente sea recomendable usar un arrancador de 30 HP con medio de desconexión.

En el caso del motor de 50 HP a 440 volts, se trata de un motor de jaula de ardilla. De tablas, la corriente a plena carga es: 68 amperes, se debe usar un arrancador de 50 HP y el dispositivo de protección no se debe ajustar a un valor mayor de:

$$1.15 \times 68 = 78.2 \text{ A.}$$

Un resumen de los cálculos necesarios para los alimentadores de este grupo de motores, se da a continuación en la tabla que se indica.

TIPO DE MOTOR a 60 Hz	TIPO DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DEL CIRCUITO DERIVADO	CORRIENTE A PLENA CARGA	CAPACIDAD MÍNIMA DEL DESCONECTOR	CAPACIDAD MÁXIMA DEL DISPOSITIVO DE PROTECCIÓN	CAPACIDAD MÍNIMA PARA EL CÁLCULO DE CONDUCTORES	TIPO Y CALIBRE DEL CONDUCTOR (COBRE)	TAMAÑO DEL CONTROLADOR	MÁXIMA CAPACIDAD DEL DISPOSITIVO DE SOBRECARGA
5 HP, letra de código a 220 volts	Interruptor Termomagnético de Tiempo Inverso	15.9	Para 5 HP la capacidad es: 1.15 x 15.9 = 18.29 A	1.5 x 1.9 = 23.85	1.25 x 15.9 = 19.87A	No. 12 AWG	5 HP	1.15 x 15.9 = 18.29 A
25 HP, 440 volts, jaula de ardilla factor de servicio 1.2	Fusible sin Retardo de Tiempo	36 A	Para 5 HP la capacidad del interruptor es: 1.15 x 36 = 41.4	3 x 36 = 108 A	3 x 36 = 45 A	No. 8 AWG	25 HP	1.25 x 36 = 45 A
30 HP, 440 volts, rotor devanado con elevación de temperatura 40 grados C.	Fusible sin Retardo de Tiempo	42 A	Para 30 HP la capacidad del interruptor es: 1.5 x 42 = 48.3	1.5 x 42 = 63A	1.25 x 42 = 52.5 A	No. 8 AWG	30 HP	1.25 x 42 = 52.5 A
50 HP, 440 volts, jaula de ardilla	Fusible sin Retardo de Tiempo	68 A	Para 50 HP la capacidad del interruptor es: 1.15 x 68 = 78.2 A	3 x 68 = 204A	1.25 x 68 = 85 A	No. 4 AWG	50 HP	1.15 x 68 = 78.2 A

Se tiene un motor trifásico de inducción de 5 HP, 220 volts, con letra de código H, se desea calcular:

- La capacidad máxima de un fusible de tiempo retardado para la protección del circuito derivado.
- La capacidad máxima que tendría un interruptor termomagnético de tiempo inverso para proteger el circuito derivado.

n) La corriente máxima a plena carga se calculó en el ejemplo 3.6 de acuerdo con la letra de código H, los kVA a rotor bloqueado varían de 6.3 a 7.09 kVA/HP, tomando el valor máximo.

$$\text{kVA}_{\text{máximos}} = \frac{7.09 \text{ kVA}}{\text{HP}} \times 5 \text{ HP} = 35.45$$

La corriente máxima (correspondiente a esta potencia) es:

$$\text{kVA}_{\text{máximos}} = \frac{\text{VA}_{\text{máx.}}}{\sqrt{3} \times V} = \frac{35.45 \times 1000}{\sqrt{3} \times 200} = 93.03 \text{ A}$$

De la tabla de capacidad máxima o ajuste de los dispositivos de protección, para letra de código H y corriente nominal de 15 A (de tabla) para uso de fusible con tiempo retardado, la capacidad máxima, es 175% de la corriente a plena carga, es decir:

$$1.75 \times 15.9 = 27.83 \text{ A.}$$

El fusible recomendado es entonces de 30 A.

o) Si se usa interruptor termomagnético, la capacidad máxima de la tabla correspondiente es 250% de la corriente a plena carga, es decir:

$$2.5 \times 15.9 = 39.75 \text{ A.}$$

Por lo que se puede usar un interruptor de 40 A.

Se trata de determinar el tamaño de alimentador y especificar su protección para cuatro motores de inducción que operan a 440 V, tres fases, 60 Hz, con las siguientes características:

- 1 Motor de inducción de 50 HP, jaula de ardilla con arranque a pleno voltaje.
- 1 Motor den inducción rotor devanado.
- 2 Motores de inducción jaula de ardilla.

NOTA: el procedimiento se muestra en las siguientes páginas.

De acuerdo con la tabla 3.2, la corriente a plena carga para los motores es:

→ Motor 50 HP:  $I_{pc} = 68 \text{ A}$

→ Motor 30 HP:  $I_{pc} = 42 \text{ A}$

→ Motores de 10 HP:  $I_{pc} = 15 \text{ A}$

De acuerdo con las normas técnicas para instalaciones eléctricas (430-24), los conductores del alimentador deben conducir una corriente de:

$$I_A = 1.25 I_{pc} \text{ motor mayor} + \Sigma I_{pc} \text{ otros motores}$$

$$I_A = 1.25 \times 68 + 42 + (2 \times 15) = 157 \text{ amperes}$$

Si se usan conductores tipo TW, de acuerdo con la tabla 3.8, el calibre del conductor necesario es el número 3/0 AWG.

Considerando que los motores se protegen por medio de fusibles, la protección de sobrecorriente se selecciona de acuerdo con los siguientes valores:

Motor 50 HP, jaula de ardilla, arranque a voltaje pleno, se toma el 300% de  $I_{pc}$

$$300\% \times 68 = 204 \text{ A, fusible 200 A}$$

Motor de 30 HP, de rotor devanado, se toma el 150% de  $I_{pc}$

$$150\% \times 42 = 63 \text{ A, fusible 60 A}$$

Motores de 10 HP, jaula de ardilla, arranque a voltaje pleno, se toma 300% de la corriente a plena carga:

$$300\% \times 15 = 45 \text{ A, fusible 45 A}$$



De acuerdo con las normas técnicas para instalaciones eléctricas, el dispositivo de protección para el alimentador puede tener una capacidad máxima o ajuste igual a la capacidad del mayor dispositivo de protección de los circuitos derivados, más la suma de las corrientes a plena carga de los otros motores.

Por lo tanto, el tamaño del fusible del alimentador puede ser:

$$200 + 42 + 15 + 15 = 272 \text{ A máximos}$$

La capacidad comercial estándar más próxima que no exceda al valor anterior es 250 A.

Para trazar la curva de los elementos de protección del alimentador, se usa papel log-log de 4 décadas multiplicando la escala por 10 para dar las magnitudes requeridas.

Las curvas se trazan de acuerdo a las siguientes indicaciones:

**Curva del motor.** Como se trata de la protección del alimentador, se toma un motor equivalente de los alimentados por este alimentador al mismo voltaje, la corriente a plena carga es la suma de las corrientes a plena carga individuales, es decir:

$$I_{PC} = 68 + 42 + (2 \times 15) = 140 \text{ amperes}$$

La corriente a rotor bloqueado se puede tomar como:

$$I_{Rb} = 6I_{PC} = 6 \times 140 = 840 \text{ A}$$

Se puede considerar un tiempo de atascamiento de 12 seg.

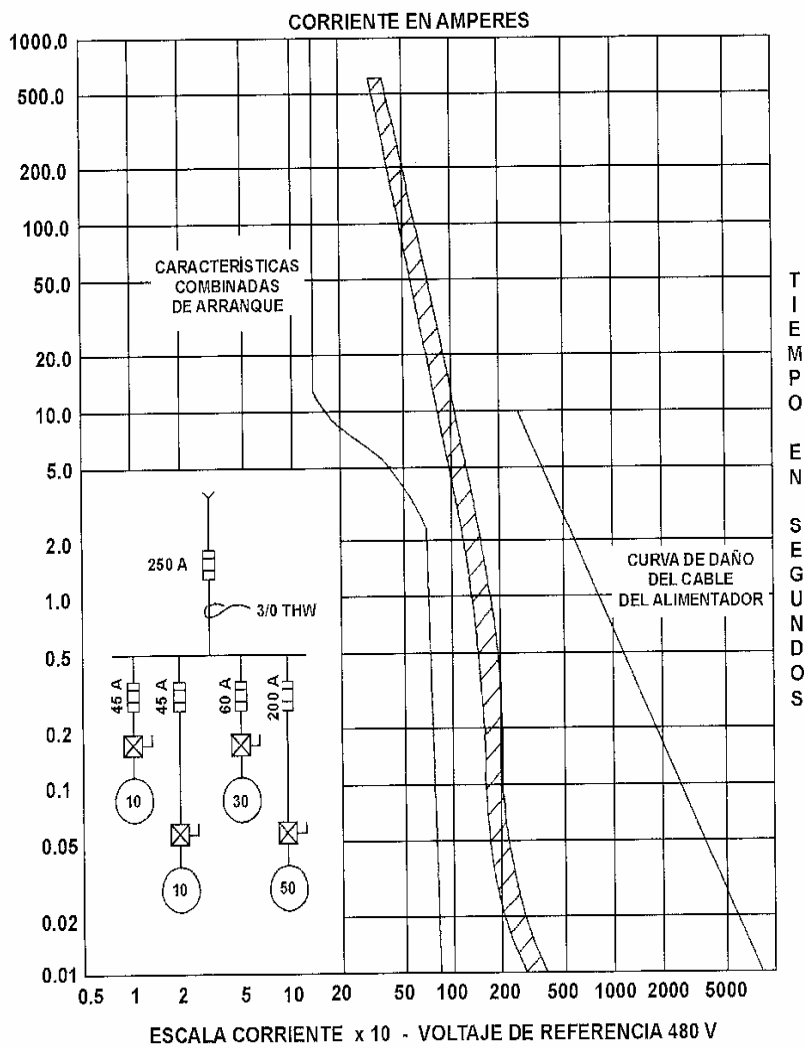
**Fusible:** La curva del fusible se toma del catálogo del fabricante y se traslada al papel log-log a la escala correspondiente.

**Cable de potencia.** Para trazar en el papel log-log la curva del cable de potencia se aplica la expresión:

$$\left[ \frac{I}{CM} \right]^2 t = 0.0297 \log \frac{(T_2 + 234)}{(T_1 + 234)}$$

Donde:

- $I$  = Corriente de cortocircuito en A.
- $CM$  = Área del conductor en Circular-Mils.
- $T$  = Tiempo del cortocircuito en segundos.
- $T_1$  = Temperatura máxima de operación 75 °C.
- $T_2$  = Temperatura máxima del cortocircuito 150 °C.



## NÚMEROS CONVENCIONALES PARA DESIGNACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN



### APENDICE A



1. ELEMENTO PRINCIPAL.
2. RELÉ DE TIEMPO RETARDADO PARA ARRANQUE O CIERRE.
3. RELÉ DE ENTRELACE O VERIFICACIÓN.
4. CONTACTOR PRINCIPAL.
5. ELEMENTO DE PARAR.
6. INTERRUPTOR DE ARRANQUE.
7. INTERRUPTOR DE ÁNODO.
8. ELEMENTO DE DESCONEXIÓN DE LA FUENTE DE CONTROL.
9. ELEMENTO REVERSIBLE.
10. SWITCH DE SECUENCIA UNITARIA.
11. APLICACIÓN FUTURA.
12. ELEMENTO DE SOBREVELOCIDAD.
13. ELEMENTO DE VELOCIDAD SÍNCRONA.
14. ELEMENTO DE BAJA VELOCIDAD.
15. ELEMENTO DE CORRESPONDENCIA DE VELOCIDAD Y FRECUENCIA.
16. APLICACIÓN FUTURA.
17. SWITCH DE DESCARGA O DE CONEXIÓN EN SHUNT.
18. ELEMENTO DE ACELERACIÓN O DE DESACELERACIÓN.
19. CONTACTOR DE TRANSICIÓN ENTRE EL ARRANQUE Y MARCHA.



- 
- 
- 35.** ELEMENTO DE OPERACIÓN DE ESCOBILLAS O PARA CONECTAR EN CORTOCIRCUITO LOS ANILLOS DESLIZANTES.
  - 36.** ELEMENTO DE POLARIDAD.
  - 37.** RELÉ DE BAJA POTENCIA O BAJA CORRIENTE.
  - 38.** ELEMENTO DE PROTECCIÓN DE CHUMACERA.
  - 39.** APLICACIÓN FUTURA.
  - 40.** RELÉ DE CAMPO.
  - 41.** INTERRUPTOR DE CAMPO.
  - 42.** INTERRUPTOR DE MARCHA.
  - 43.** ELEMENTO SELECTOR DE TRANSFERENCIA MANUAL.
  - 44.** RELÉ DE ARRANQUE DE SECUENCIA UNITARIA.
  - 45.** APLICACIÓN FUTURA.
  - 46.** RELÉ DE CORRIENTE PARA FASE INVERSA O DE BALANCE.
  - 47.** RELÉ DE VOLTAJE DE SECUENCIA DE FASE.
  - 48.** RELÉ DE SECUENCIA INCOMPLETA.
  - 49.** RELÉ TÉRMICO DE TRANSFORMADOR O DE MÁQUINA.
  - 50.** RELÉ SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEA.
  - 51.** RELEVADOR DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO (C.A.)
  - 52.** INTERRUPTOR DE CORRIENTE ALTERNA.
  - 53.** RELÉ DE EXCITADOR O DE GENERADOR (C.D.)
  - 54.** INTERRUPTOR DE C.D. DE ALTA VELOCIDAD.

- 
- 
55. RELÉ DE FACTOR DE POTENCIA.
  56. RELÉ DE APLICACIÓN DE CAMPO.
  57. ELEMENTO DE CORTOCIRCUITO O DE CONEXIÓN O APERTURA.
  58. RELÉ DE FALLA PARA RECTIFICADOR DE POTENCIA.
  59. RELÉ DE SOBREVOLTAJE.
  60. RELÉ DE VOLTAJE BALANCEADO.
  61. RELÉ DE CORRIENTE BALANCEADO.
  62. RELÉ DE TIEMPO RETARDADO PARA ARRANQUE O APERTURA.
  63. RELÉ DE PRESIÓN DE LÍQUIDO O DE GAS, DE NIVEL O DE FLUJO (BUCHHOLZ).
  64. RELÉ DE PROTECCIÓN A TIERRA.
  65. GOBERNADOR.
  66. ELEMENTO DE ACELERACIÓN INTERMITENTE.
  67. RELEVADOR DIRECCIONAL DE SOBRECORRIENTE (A.C.).
  68. RELÉ DE BLOQUEO.
  69. DISPOSITIVO DE OPCIÓN.
  70. REÓSTATO OPERADO ELÉCTRICAMENTE.
  71. APLICACIÓN FUTURA.
  72. INTERRUPTOR DE CORRIENTE DIRECTA.
  73. CONTACTOR DE RESISTOR DE CARGA.
  74. RELÉ DE ALARMA.

75. MECANISMO DE CAMBIO DE POSICIÓN.
76. RELÉ DE SOBRECARGA DE (C.D.).
77. TRANSMISOR DE PULSACIONES.
78. RELÉ DE MEDICIÓN DE ÁNGULO DE FASE O PÉRDIDA DE SINCRONISMO.



---

---

# Guía de Prácticas

## Prácticas de la unidad 1

### PRÁCTICA No. \_\_

---

Fecha	Grupo	
No de alumnos por práctica	No. de alumnos por reporte	
Nombre y firma del profesor		
Nombre (s) del alumno (s)		
Tiempo estimado	Hrs	Calificación

---

#### 1. Objetivo.

Escribir el objetivo de la práctica

#### 2. Materiales y/o equipos.

Listar los materiales y equipo en caso de requerirse.

#### 3. Desarrollo general.

Escribir el desarrollo que llevará el alumno en la actividad.

#### 4. Resultados y conclusiones de la práctica por parte del alumno.



**BIBLIOGRAFÍA**

**TÍTULO: PROTECCIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS INDUSTRIALES Y COMERCIALES**

**AUTOR: E. HARPER**

**EDITORIAL: LIMUSA**

**TÍTULO: MANUAL DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

**AUTOR: HARPER**

**EDITORIAL: LIMUSA**

**TÍTULO: REGLAMENTO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

**AUTOR: ANDRADE**

**EDITORIAL:**

**TÍTULO: INSTALACIONES ELÉCTRICAS PRÁCTICAS**

**AUTOR: O. BECERRIL**

**EDITORIAL: I.P.N.**

**TÍTULO: INSTALACIONES COMERCIALES E INDUSTRIALES**

**AUTOR: HARPER**

**EDITORIAL: LIMUSA**

**TÍTULO: MANUAL DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS RESIDENCIALES E INDUSTRIALES**

**AUTOR: HARPER**

**EDITORIAL: LIMUSA**