



Estudio de cortocircuito



SC 7134-1
SC 7134-1



Resolución 1612512 del MEN, 29 de junio de 2012 - 6 años.

Tradición
Transformación
Innovación



Alcaldía de Medellín
Distrito de
Ciencia, Tecnología e Innovación



Estudio de cortocircuito

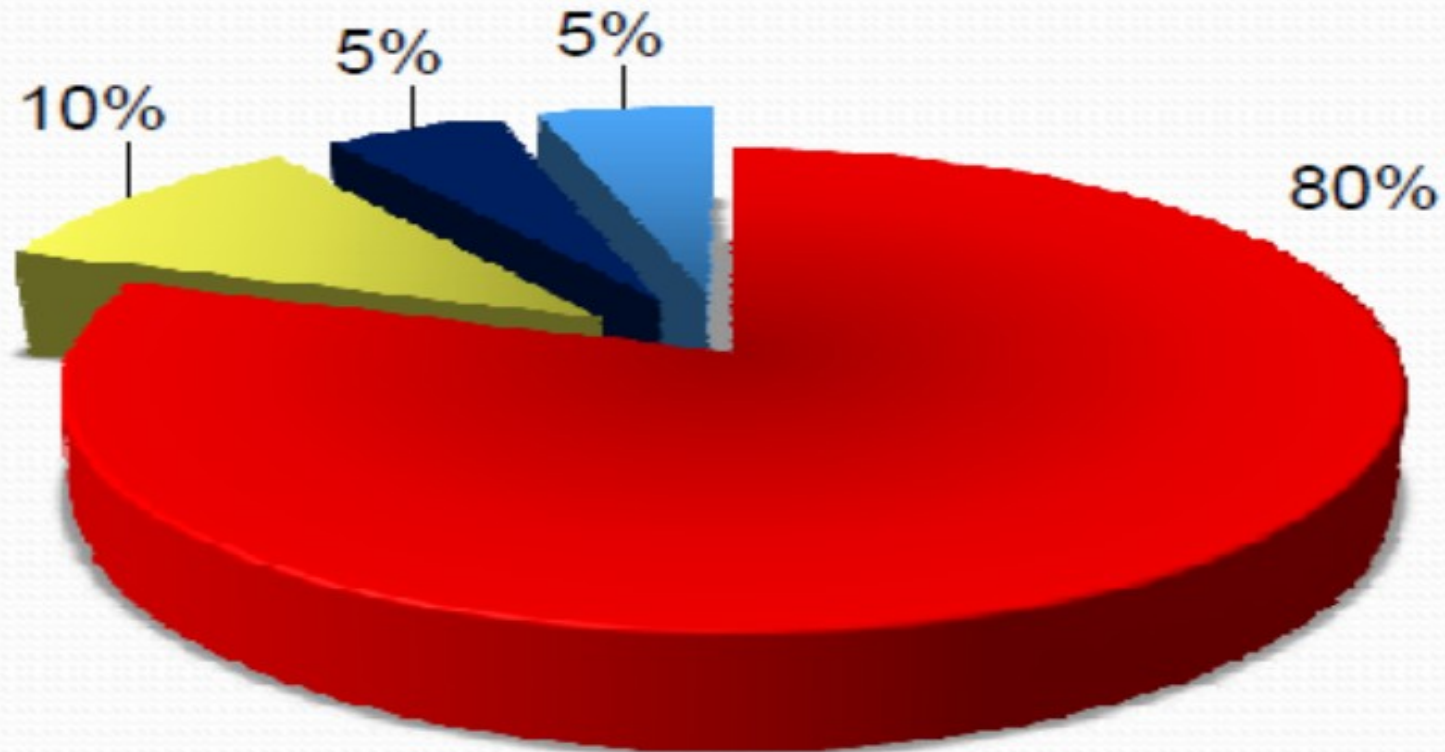
- Un sistema eléctrico puede estar expuesto a fallas o cortocircuitos, en tal situación se debe aislar en forma segura de manera que se minimice la falla. La selección correcta de los dispositivos y la coordinación apropiada requiere los cálculos de las corrientes de cortocircuito esperadas para los distintos tipos de fallas y condiciones de operación.

El propósito de los cálculos de cortocircuito es:

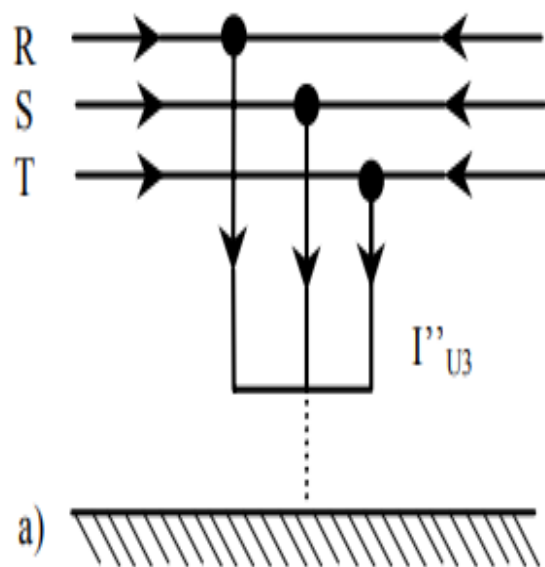
- Dimensionar las capacidades interruptivas de los dispositivos de protección.
- Aplicar los resultados a relevadores y dispositivos de protección.
- Determinar los esfuerzos mecánicos y térmicos sobre los cables, barras, ductos, entre otros.
- Determinar la mínima corriente de cortocircuito para hallar la sensibilidad de los relés.



Principales fuentes de cortocircuito



■ Monofásica a tierra ■ Bifásica a tierra ■ Bifásica ■ Trifásica

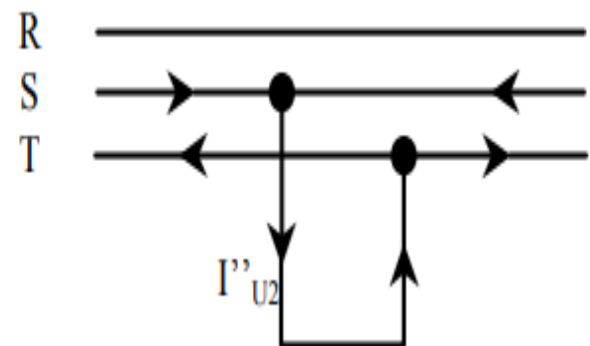


Cortocircuito trifásicos

Los cortocircuitos trifásicos, son los únicos cortocircuitos que se comportan como sistemas equilibrados, ya que todas las fases están afectadas por igual. Las tensiones en el punto de cortocircuito, tanto si el cortocircuito se cierra a través de tierra como si está aislado de ella, son nulas, presentando las intensidades igual módulo pero con argumentos desfasados 120° .

Es uno de los cortocircuitos más violentos y de obligado cálculo.

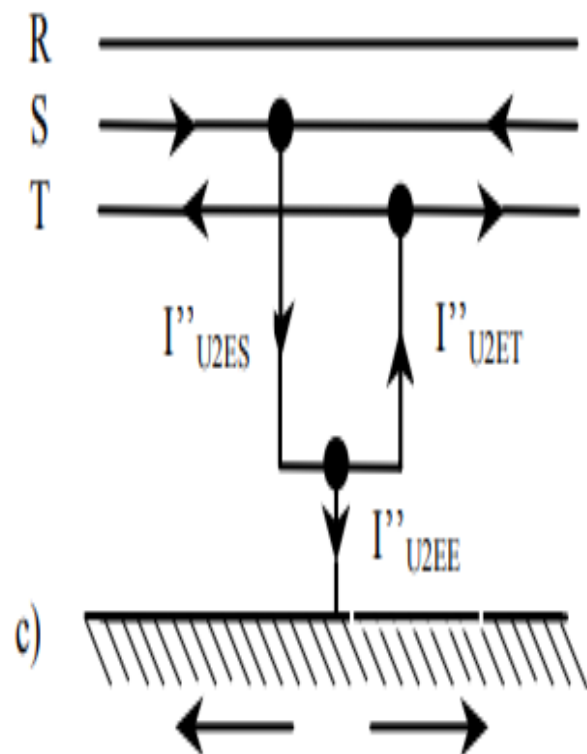
Al ser un sistema equilibrado, para su cálculo sólo será necesario utilizar la red de secuencia directa.



Cortocircuito bifásicos sin contacto a tierra

Generalmente las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito son menores que las del fallo trifásico, aunque si el cortocircuito se produce en las inmediaciones de máquinas síncronas o asíncronas de cierta potencia, las corrientes de esta falta pueden llegar a presentar valores incluso mayores que las del cortocircuito trifásico.

Al presentarse en dos de las tres fases del sistema, este cortocircuito ya no es equilibrado, obligando su cálculo a la utilización tanto de la red de secuencia directa como a la red de secuencia inversa.



Cortocircuito bifásico con contacto a tierra

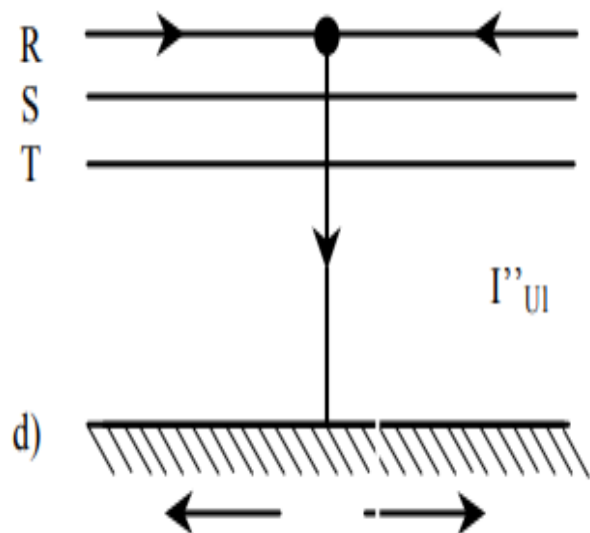
Dispone de las mismas características que el cortocircuito bifásico sin contacto a tierra, pero en este caso, con pérdida de energía hacia tierra. Es necesario considerar para este fallo, además de las redes de secuencia directa e inversa, la red de secuencia homopolar debido a la pérdida de energía.

Cortocircuito monofásico a tierra

Este es el cortocircuito más frecuente y violento, produciéndose con mayor frecuencia en redes rígidamente puestas a tierra, o mediante impedancias de bajo valor.

Su cálculo es importante, tanto por lo elevado de sus corrientes como por su conexión a tierra, lo que permite calcular las fugas a tierra, las tensiones de contacto o de paso, o valorar las interferencias que estas corrientes puedan provocar.

Para su cálculo, al ser desequilibrado y con pérdida de energía, son necesarias las tres redes de secuencia (directa, inversa y homopolar).



Preparación de un sistema para estudio de cortocircuito y análisis de protecciones.

- Preparar el diagrama unifilar del sistema en estudio. Donde se incluyen los datos significativos de cada componente como: potencia, voltaje e impedancia. El diagrama puede ser simplificado, pero debe representar las partes de interés de estudio.

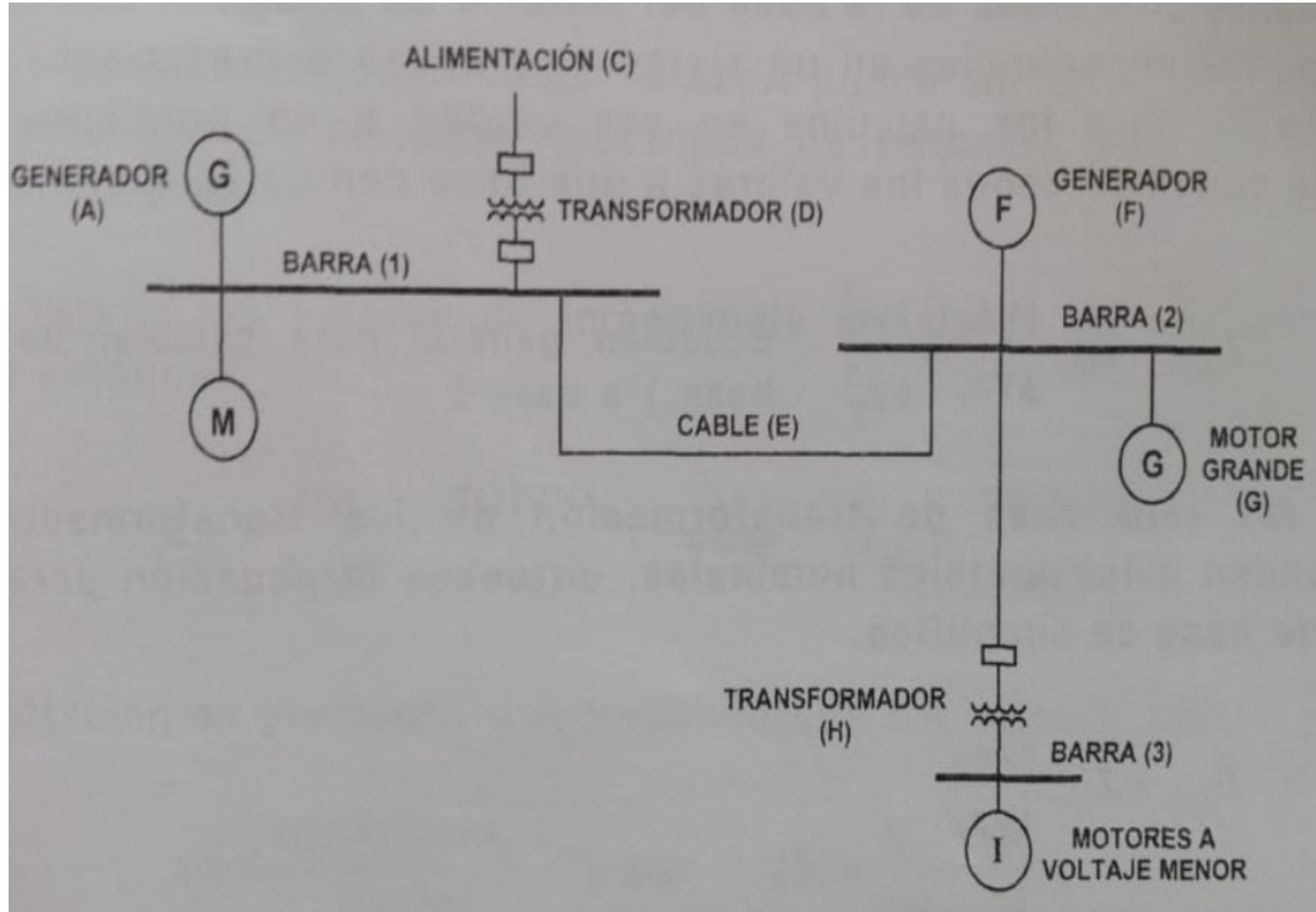
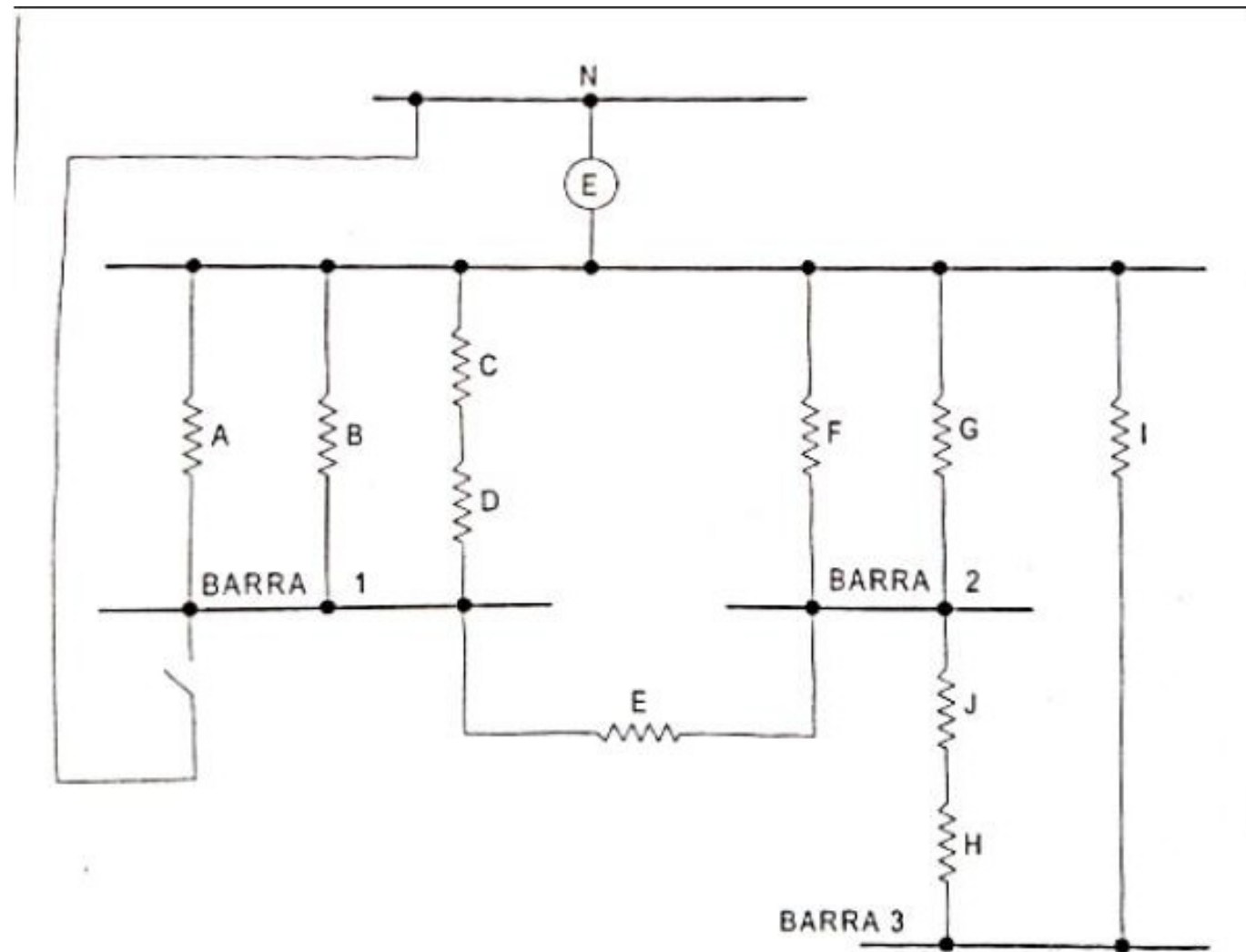
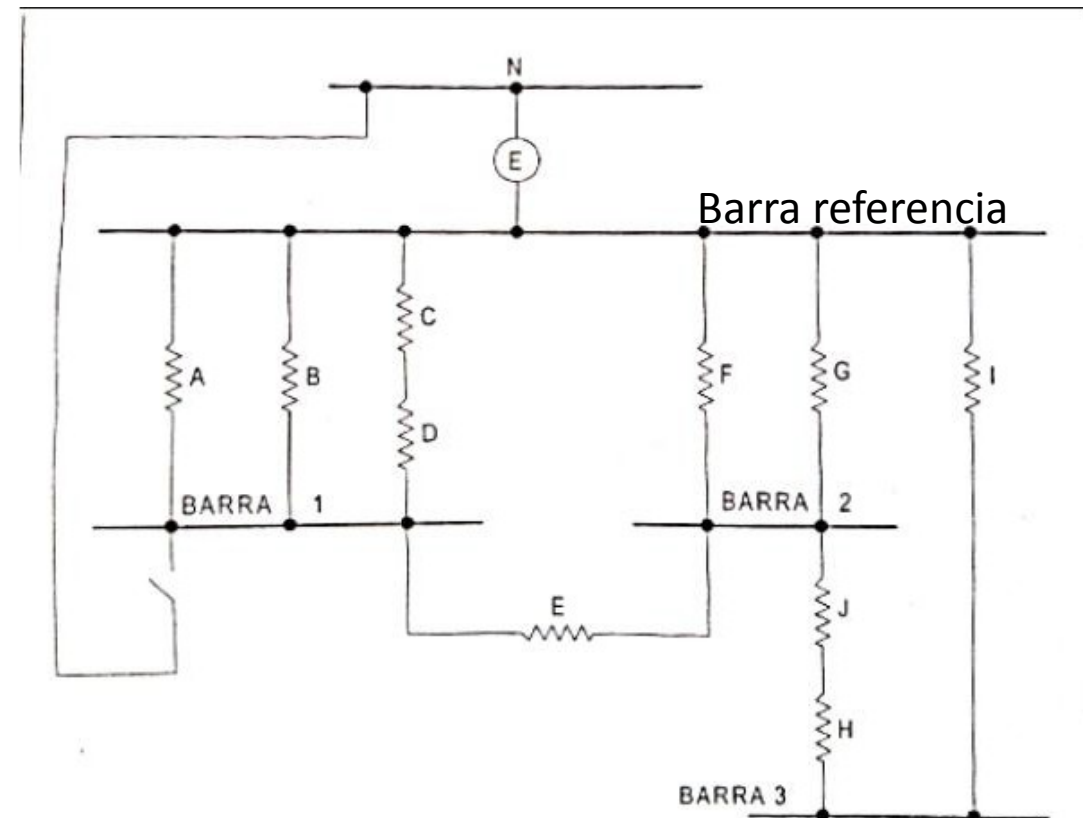
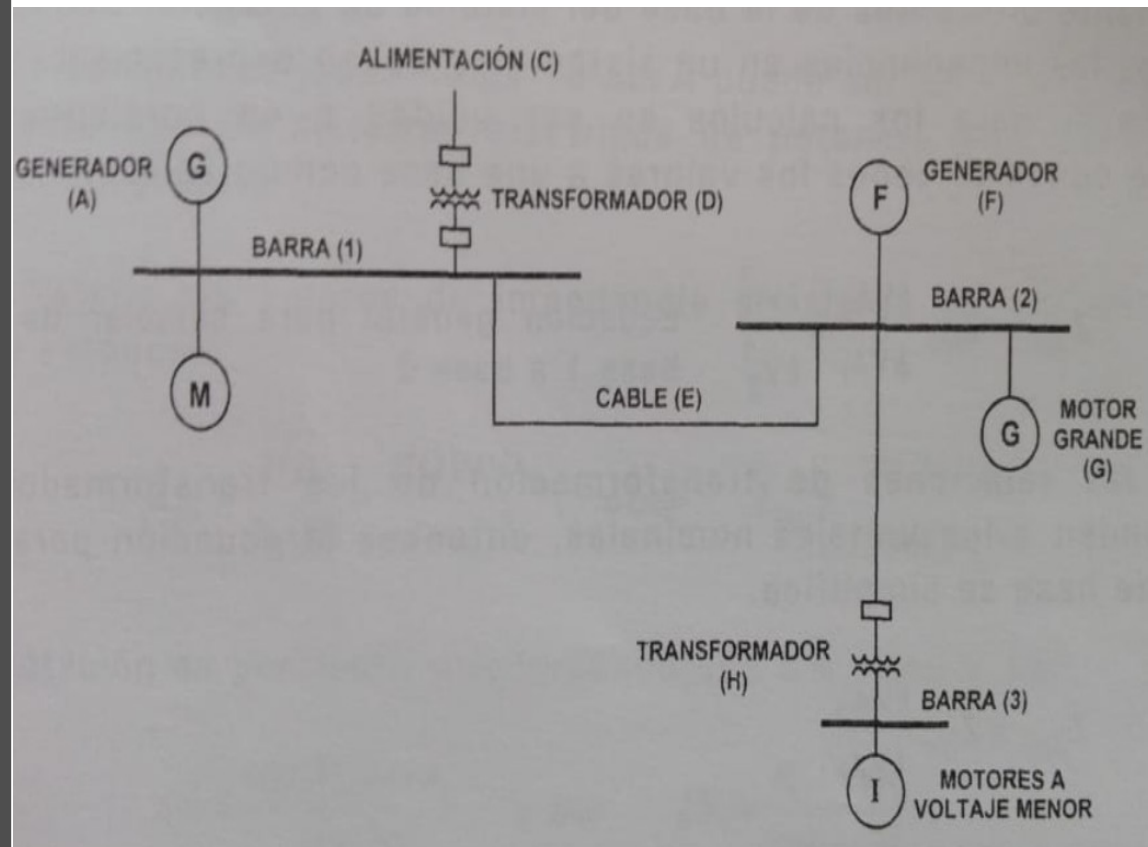


Diagrama unifilar simplificado

- 2. Preparar el diagrama de impedancias. Este se obtiene del diagrama unifilar para el sistema reemplazando cada elemento por su impedancia, conservando su interconexión. Estos pueden estar expresados en:
- Ohmios
- Por ciento, referidos a sus datos nominales de potencia y voltaje.
- Por unidad, referidos a una base común en KVA.



En el diagrama de impedancias aparece una fuente equivalente para el sistema de alimentación de la compañía. Esta es una fuente equivalente Thévenin que se representa como una fuente de voltaje en serie con una impedancia. La fuente E por lo general vale 1p.u.



Ejemplos

1. El valor de la potencia de cortocircuito trifásico en el punto de alimentación a una industria es 500 MVA, se desea obtener el valor de la reactancia en por unidad referida a una base de 10 MVA.

$$X_{p.u} = \frac{KVA_{base}}{KVA_{cc}} = \frac{10}{500} = 0,02 \text{ p.u}$$

Para el ejemplo anterior, el valor de cortocircuito a un voltaje de 13,8 KV, se indica en amperes como $I_{cc} = 20940 \text{ A}$ trifásicos. Calcular la reactancia de la fuente equivalente referida a una potencia base de 10 MVA y referirla a una potencia de 100 MVA.

$$X_{pu} = \frac{KVA_{base}}{\sqrt{3} I_{cc} (KV)} = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 20940 \times 13,8} = 0,02 \text{ pu}$$

Refiriendo a la potencia de 100 MVA:

$$X_{p.u. 2} = X_{p.u 1} \left(\frac{KVA_{b2}}{KVA_{b1}} \right) = 0,02 \left(\frac{100}{10} \right) = 0,2$$



Obtención de los valores de impedancias de algunas componentes

Para los estudios de cortocircuito, en el diagrama de impedancias es necesario representar los valores de impedancias o reactancias; algunas veces se obtienen directamente de placa, en otras ocasiones es necesario hacer algunos cálculos.

Transformadores: La reactancia o impedancia en los transformadores se expresa en por ciento (%Zr) referida a la potencia nominal del transformador en KVA.

Ej : Se tiene un transformador de 500 KVA, con una impedancia de 5% referida al valor nominal de su potencia.

a) Calcular su valor en pu a la base de 10000KVA.

$$Z_{p.u} = \frac{\%Z_t}{100} \left(\frac{KVAb}{KVAtrafo} \right)$$

$$Z_{p.u} = \frac{5}{100} \left(\frac{10000}{500} \right) = 1$$



CLASE DE MÁQUINA

EXPRESIÓN MATEMÁTICA

Todas

$$\frac{V_{\text{nominal}} \times I_{\text{nominal}}}{1000}$$

(valor exacto)

**Motores de inducción
y motores síncronos
a 0.8 m factor de potencia.**

Valor de potencia nominal en HP
(valor aproximado)

**Motores síncronos
a factor de potencia unitario 1.0)**

0.8 x HP nominales
(valor aproximado)



Valores aproximados de reactancias para motores de inducción de mas de 600 V

Los motores de 1000 HP o potencias mayores del orden de miles de HP, se deben considerar como elementos individuales, por lo que se debe determinar su reactancia antes de inicial el estudio de cortocircuito.

La reactancia de cortocircuito de un motor de inducción (o de un generador de inducción) expresada en porciento a su propia base en KVA, se puede tomar en porciento como:

$$X''d = \frac{100}{\text{Numero de veces la corriente a rotor bloqueado}}$$

El valor de reactancias de estas maquinas, cae aproximadamente (expresada en porciento) dentro de los siguientes valore:

$X''D$

Rango	Valor mas común
15 - 25	25



Motores de 600 Volts o menores

Estos motores se pueden representar en forma individual o bien se pueden agrupar con los motores pequeños para representar los grupos completos como un motor equivalente en el diagrama de impedancias. Los motores muy pequeños, por lo general se dejan fuera de los cálculos, ya que en el estudio de cortocircuito es difícil predecir cuánto pueden contribuir y si seguro agregan complejidad al cálculo. Una solución alternativa es agrupar los motores pequeños y representar una reactancia equivalente de ellos

Algunas reglas simples son:

1. Sistemas industriales que operen con tensiones de 600, 440 o 480 V trifásicos tienen una reactancia del 25 % a una base en KVA igual al 100 % de la capacidad del transformador.
2. En todos los sistemas de 220 V y las instalaciones comerciales de 440 o 480 V, una parte importante de la carga es el alumbrado, por lo tanto se puede suponer que todos los motores están agrupados en el secundario del transformador y tienen una reactancia del 25% referidos a una base en KVA del 50% de la potencia nominal del Trafo.
3. Los grupos de pequeños motores de inducción que están alimentados por un centro de control de motores se pueden representar suponiendo que el grupo tiene una reactancia del 25%

Se tiene un motor de inducción de 500 HP a factor de potencia 0,8 atrasado, que tiene una reactancia subtransitoria (X''_d) del 15%. Calcular el valor de la reactancia en por unidad a la base de 10000KVA.

$$X''_{dp.u} = \frac{X''_d(\%)}{100} \left(\frac{KVAb}{KVA \text{ del motor}} \right)$$

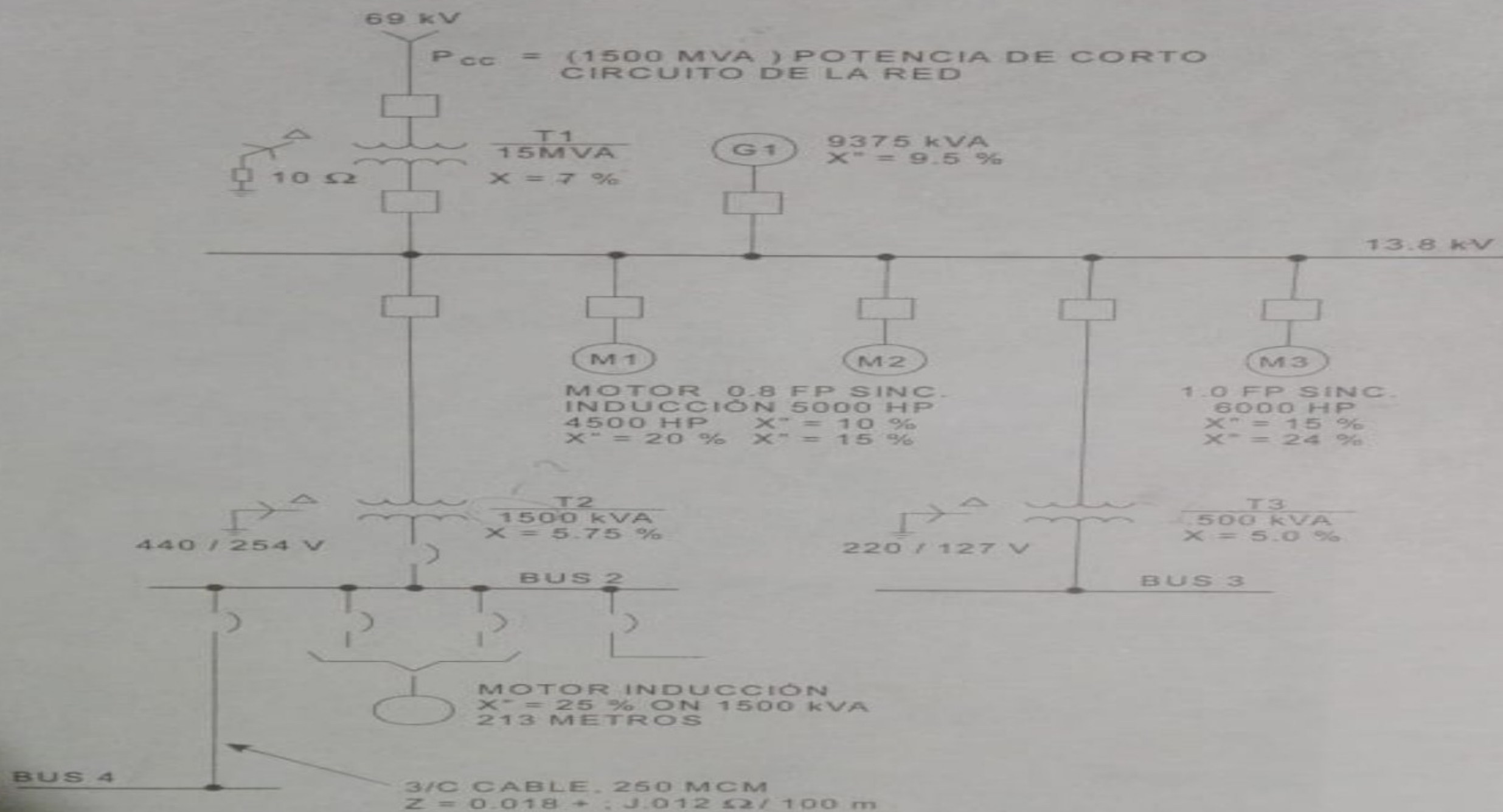
$$X''_{dp.u} = \frac{15}{100} \left(\frac{1000}{500} \right) = 3,0$$

En el diagrama unifilar se muestra la información básica que identifica cada uno de los componente su interconexión.

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

Si se selecciona como base de potencia 15000 KVA y los valores de referencia son 13,8 KV, 440 V y 220 V. Calcular los valores de reactancias en por unidad

ALIMENTACIÓN DE LA COMPAÑÍA SUMINISTRADORA



1. La reactancia equivalente de la compañía suministradora.

$$X_s = \frac{KV_{Abase}}{KV_{Acc}} = \frac{15000}{1500000} = 0,01 \text{ pu}$$

2. Trafo T1.

$$X = \frac{7}{100} \left(\frac{15000}{15000} \right) = 0,07 \text{ pu}$$

3. Generador G1

$$X = \frac{9,5}{100} \left(\frac{15000}{9375} \right) = 0,152 \text{ pu}$$

4. Motor M1

$$X = \frac{20}{100} \left(\frac{15000}{4500} \right) = 0,666 \text{ pu}$$

5. Motor M2

$$X = \frac{10}{100} \left(\frac{15000}{5000} \right) = 0,30 \text{ pu}$$

6. Motor M3

$$X = \frac{15}{100} \left(\frac{15000}{6000 \times 0,8} \right) = 0,468 \text{ pu}$$

7. Motores a 440 V

$$X = \frac{25}{100} \left(\frac{15000}{1500} \right) = 2,5 \text{ pu}$$

8. Transformador T2.

$$X = \frac{5,75}{100} \left(\frac{15000}{1500} \right) = 0,575 \text{ pu}$$

9. Transformador T3.

$$X = \frac{5}{100} \left(\frac{15000}{500} \right) = 1,5 \text{ pu}$$

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

$$Z_c = (0,018) + j0,012 \frac{213}{100}$$

$$Z_c = 0,03834 + j0,02556 \Omega/\text{fase}$$

$$R = \frac{0,03834 \times 15000}{1000 \times 0,44^2} = 2,97 \text{ pu}$$

$$X = \frac{0,02556 \times 15000}{1000 \times 0,44^2} = 1,98 \text{ pu}$$

TORES

(2.5)

E

E

E

E

E

E

UTIL
(J.01)

G1
(J.152)

M1
(J.666)

M2
(J.3D)

M3
(J.458)

T1
(J.07)

13.8 kV

BUS 1

T2
(J.575)

T3
(J.1.5)

440 V

BUS 2

220 V

BUS 3

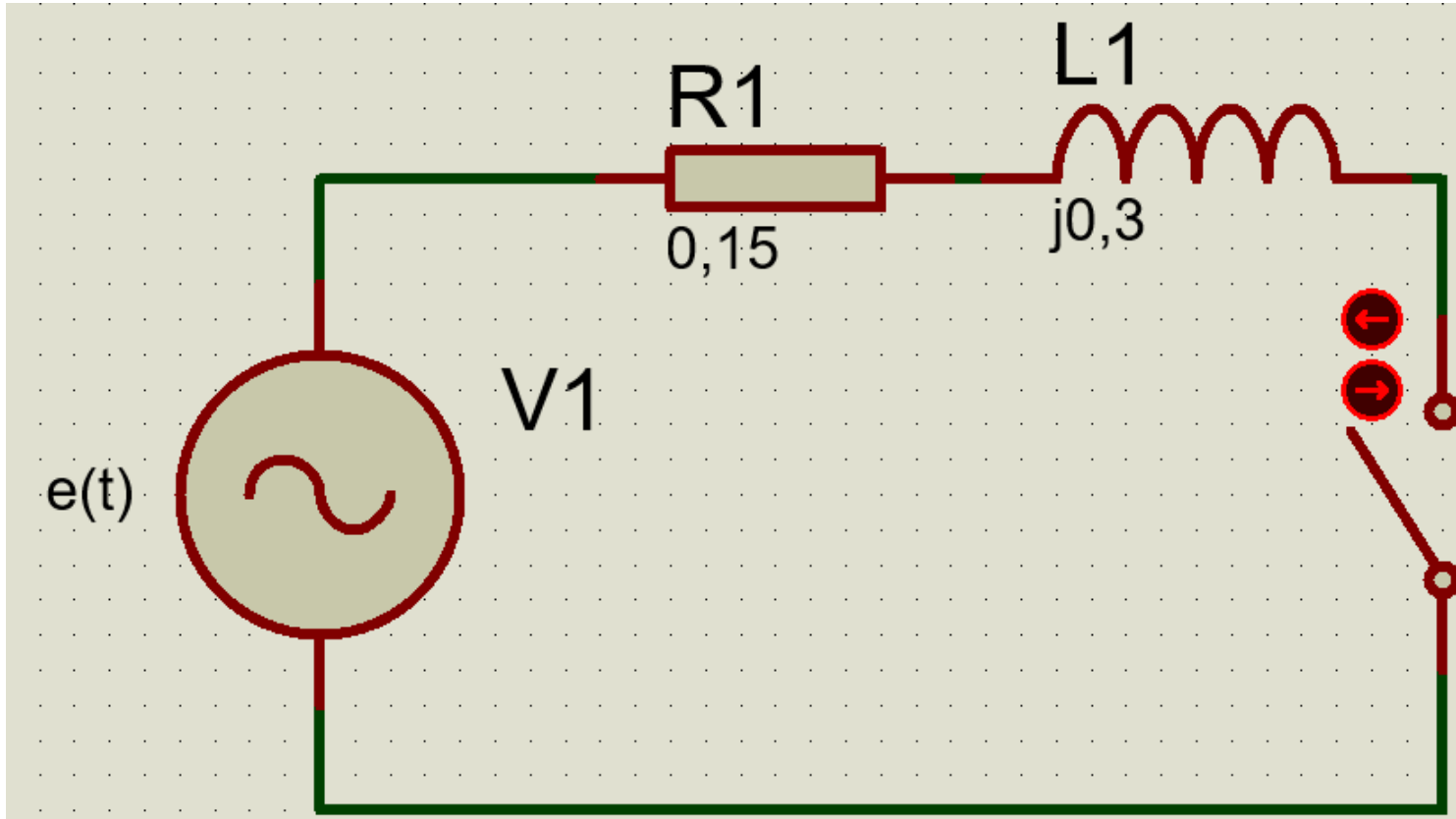
CABLE
 $Z_e = 2.97 + j 1.98 \text{ p.u.}$

440 V

BUS 4

BASE kVA = 15,000

Análisis equivalente por fase



$$e(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \alpha)$$

$$e(t) = i(t)R + L \frac{di}{dt}$$

$$i(t) = i_{ca}(t) + i_{cd}(t)$$

$$i_{ca}(t) = \sqrt{2} I_{ac} \sin(\omega t + \alpha - \theta)$$

Componente alterna

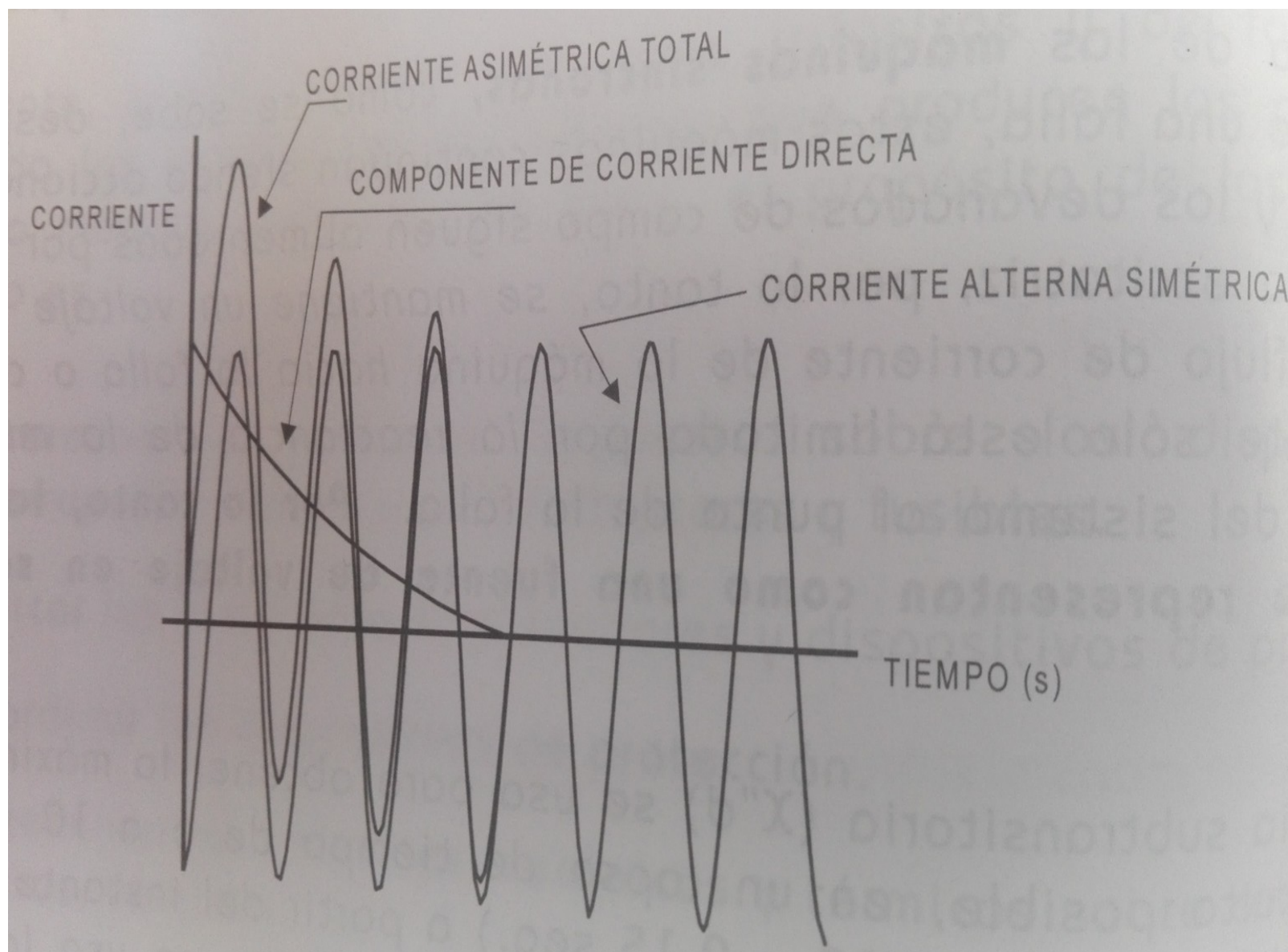
$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$$

$$X = 2 \pi f L$$

$$I_{ac} = \frac{V}{|Z|}$$

$$|Z| = \sqrt{2} I_{ac} \sin(\alpha - \theta) \cdot e^{-t/T}$$

$$T = \frac{L}{R}$$



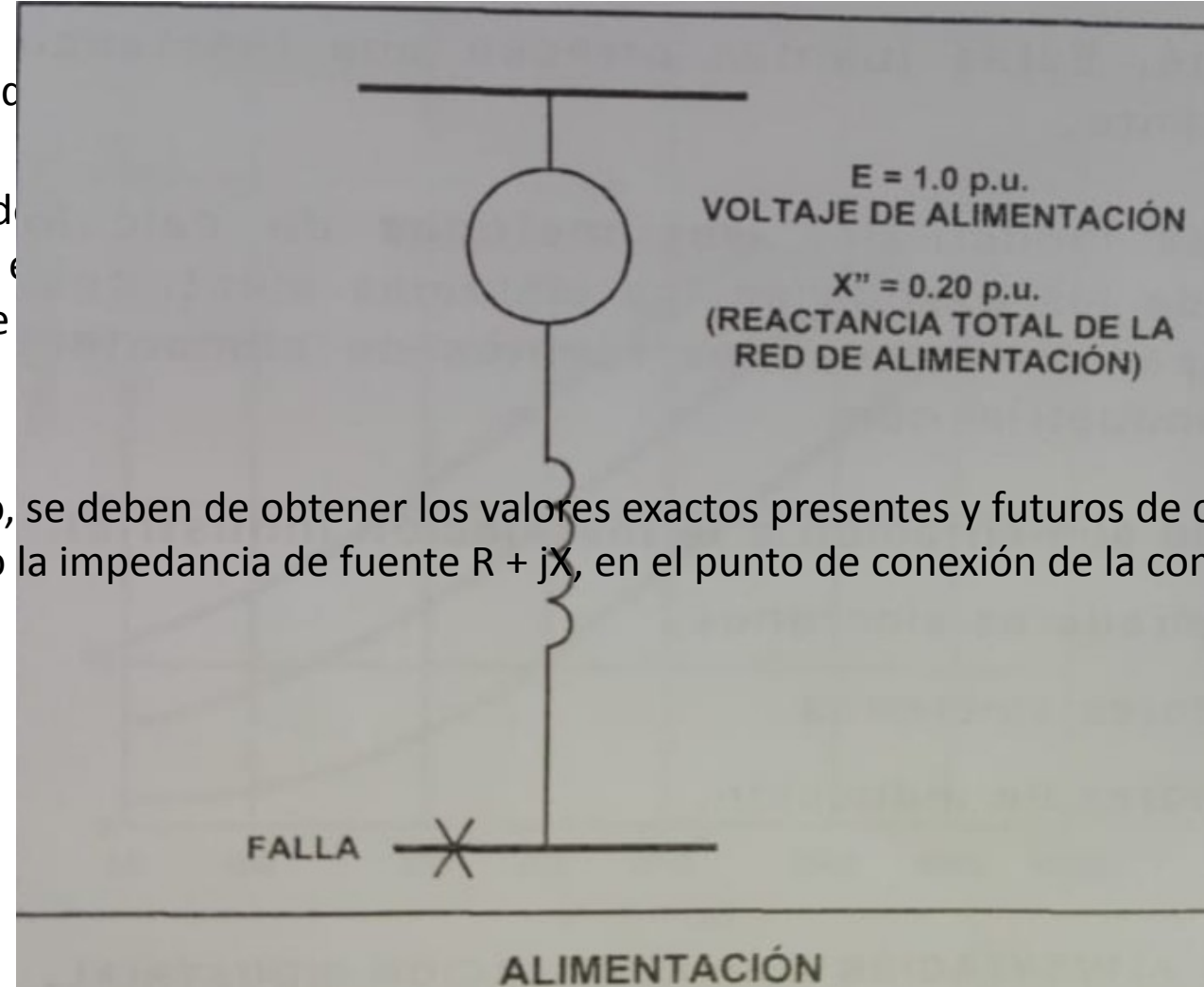
Fuentes de cortocircuito

A) La red de alimentación

La red de alimentación es una red

En un sistema típico, sus generadores son de potencia industrial, sino un incremento pequeño de carga, y es representado por un equivalente como se muestra en la imagen:

Antes de ejecutar algún cálculo, se deben de obtener los valores exactos presentes y futuros de corrientes de cortocircuito y la relación X/R o la impedancia de fuente $R + jX$, en el punto de conexión de la compañía.



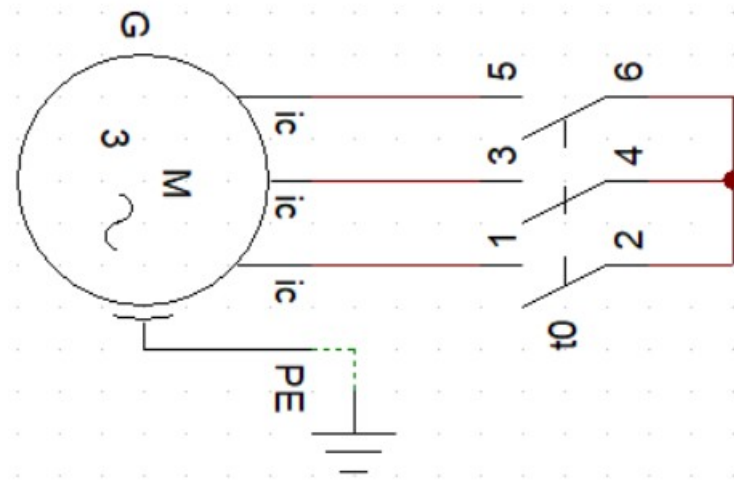
de distribución.

industrial, sino un
lo tanto el sistema es
de conexión, como

Fuentes de cortocircuito

B) Generadores

Los generadores eléctricos están accionados por turbinas o primo-motores, de modo que cuando ocurre un cortocircuito en el circuito alimentador alimentado por el generador, este tiende a seguir produciendo voltaje, debido a que la excitación del campo se mantiene y el primotor continua accionando el 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 limitada solo por la impedancias del generador y la del circuito del generador y el punto de la falla.



$$i_a(t) = i_{ca}(t) + i_{cd}(t)$$

Corriente
Cortocircuito
simétrica

Corriente
Cortocircuito
continua

$$i_{ca}(t) = \sqrt{2} \left(I''_d e^{-\frac{t}{T}} + I'_d e^{-\frac{t}{T}} + I_s \right) \sin(\omega t + \theta - 90)$$

Subtransiente

Transiente

Permanente



Fuentes de cortocircuito

B) Generadores

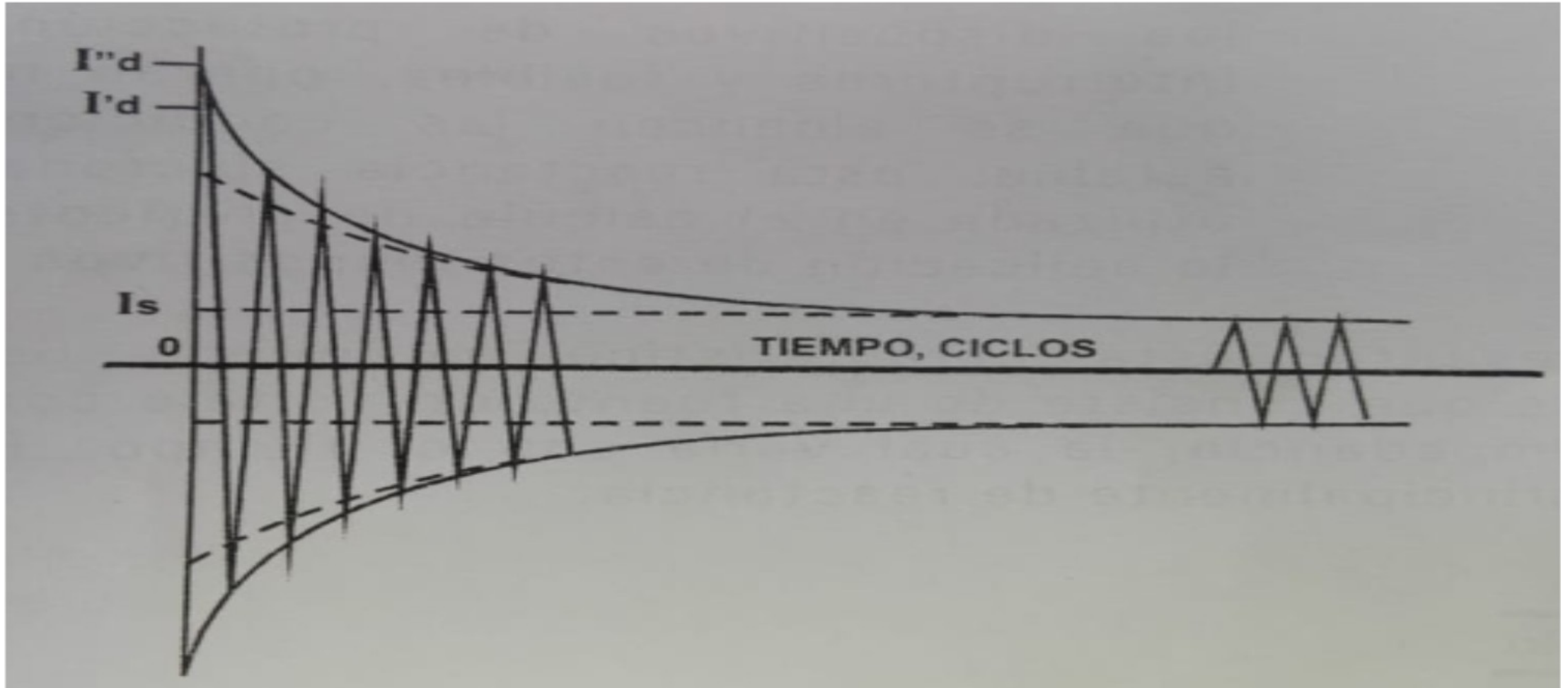
I''_d = Corriente de cortocircuito subtransitoria o de primer ciclo es determinada por X''_d . Su duración es aproximadamente de 1 ciclo.

I'_d = Corriente de cortocircuito transitoria, y es determinada por X'_d . Su duración es aproximadamente de entre 1 a 6 ciclos. Esta es la corriente que se usa para los estudios de la protección o el calculo de las capacidades interruptivas de los dispositivos.

I_s = Corriente de estado permanente, y es determinada por X_s . Esto se debe a que la corriente se tiende a estabilizar después de unos seis ciclos, cuyo valor medio es el que determina los esfuerzos térmicos en las instalaciones. Como la mayoría de los dispositivos de protección, tales como interruptores y fusibles, operan mucho antes que se alcancen las condiciones de estado estable, esta reactancia es raramente utilizada en el calculo de corrientes de falla para la aplicación de dispositivos.

Fuentes de cortocircuito

B) Generadores





Fuentes de cortocircuito

B) Generadores

Un generador de 15 MVA a 13.8 KV tiene un valor de reactancia subtransitoria de 0,20 pu y transitoria de 0,30 pu, referida a su propia base

Transitoria

$$I'_d = \frac{E}{X'_d} = \frac{1}{0,30} = 3,33 \text{ pu}$$

$$I_{base} = \frac{15 * 10^3}{\sqrt{3} * 13,8} = 627,5 A$$

$$I'_d = 3,33 * 627,5 = 2090 A$$

Subtransitoria

$$I''_d = \frac{E}{X''_d} = \frac{1}{0,20} = 5 \text{ pu}$$

$$I''_d = 5 * 627,5 = 3173,5 A$$

Los valores en amperes se tienen a partir de la corriente base:

Fuentes de cortocircuito

C) Motores síncronos

Estos motores requieren de una alimentación AC en el estator y CD en el rotor. Cuando ocurre un cortocircuito en el sistema de AC, este disminuye, sin embargo debido a la inercia rotor y a la carga que alimenta, continua girando, con el campo magnético formado por la I_{dc} se comporta en unos instantes como un generador. Estos motores contribuyen a la falla por unos cuantos ciclos, hasta que se detenga en motor.



Fuentes de cortocircuito

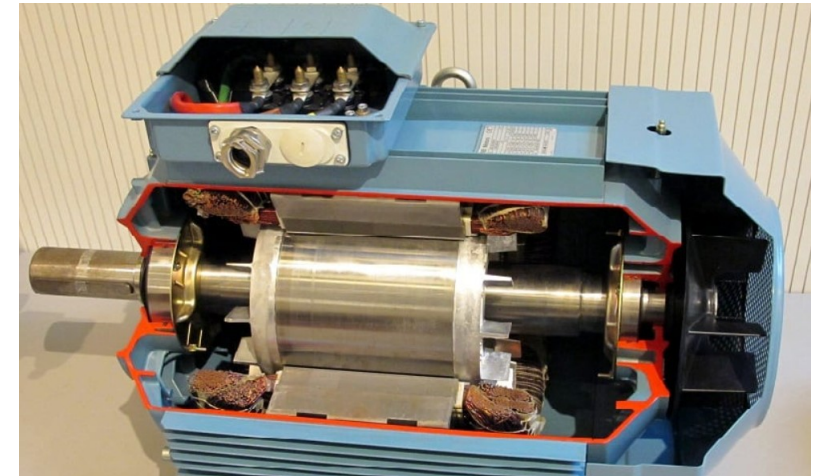
D) Motores de inducción

Motor “Jaula de ardilla” aporta corriente de falla al sistema por la inercia del motor en presencia del flujo magnético, producido por inducción del estator. Ya que el flujo decae, por la pérdida de fuente de voltaje provocada por la falla en las terminales del motor, la contribución de un motor de inducción se reduce de forma exponencial rápida y desaparece aprox. 3-4 ciclos. Como consecuencia a los motores de inducción se les asigna únicamente un valor de reactancia subtransitoria X''_d , este valor es casi igual a la reactancia de rotor bloqueado.

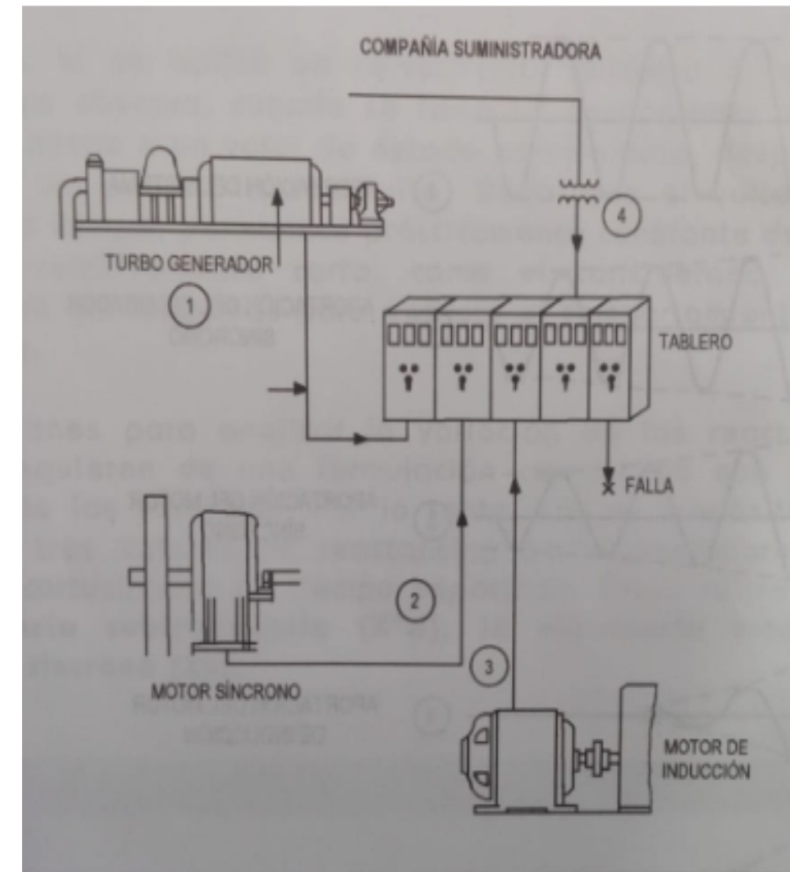
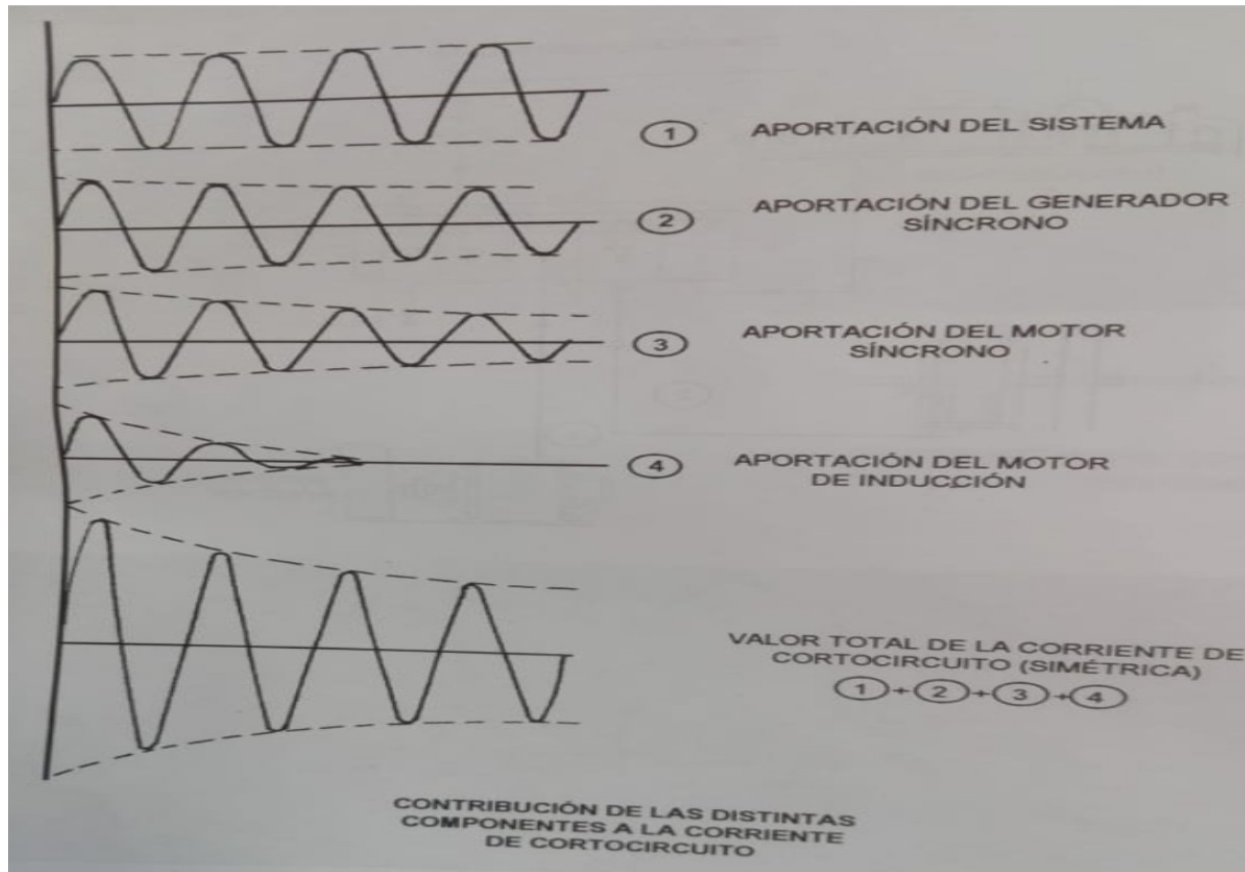
Por lo tanto, los motores de inducción son los elementos que menor contribución tienen en corrientes de falla, por lo que se pueden hacer algunas simplificaciones en los cálculos:

Motores de mas de 500 HP se representan como fuentes individuales, haciendo $HP = 1KVA$

Motores menores de 500 HP se considera que: $HP = 1KVA$ pero se agrupan todos los motores conectados a una misma barra, como si fuera un motor equivalente, siendo la suma total de cada uno de ellos.



Fuentes de cortocircuito





Reactancia en maquinas rotatorias

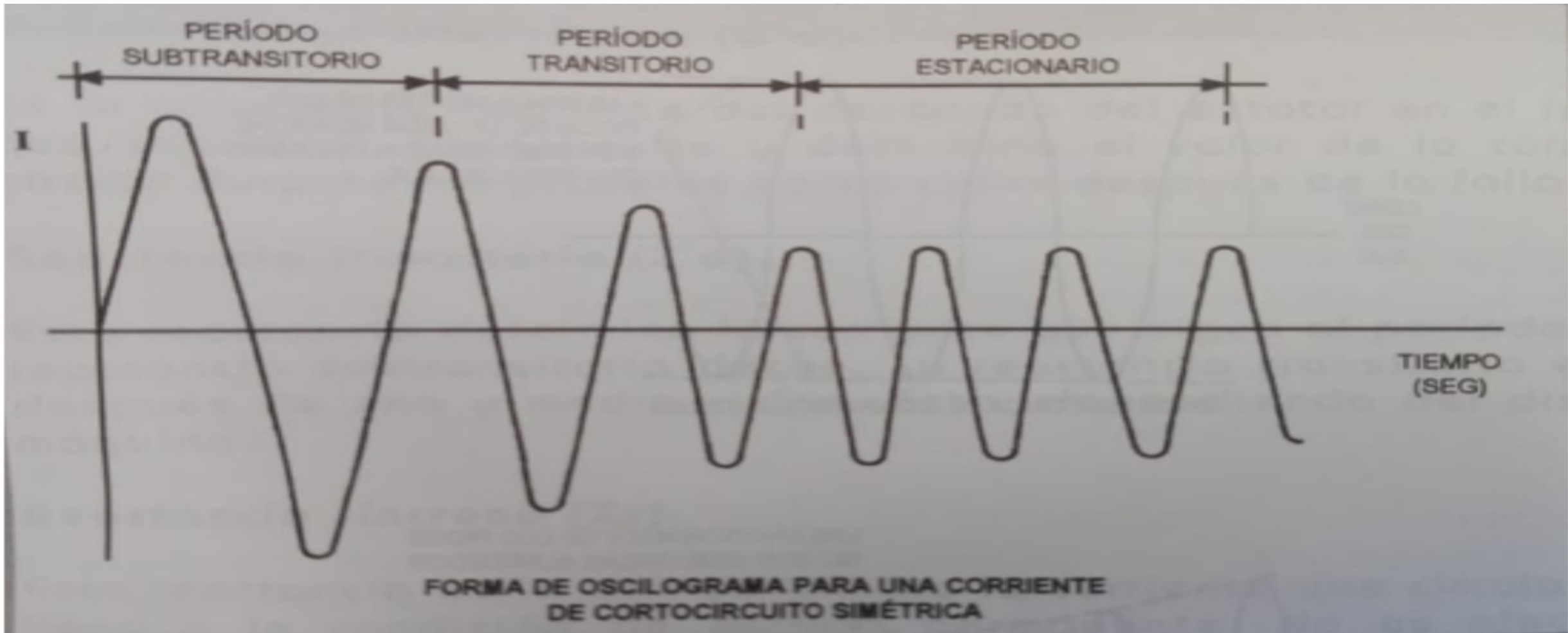
La impedancia de maquinas rotatorias no son tan simples como la de los transformadores o de los cables, ya que es un valor complejo y variable en el tiempo.

Con el propósito de simplificar, se consideran tres valores de reactancias para generadores y motores en el calculo de cortocircuito, Estos valores se conocen como: La reactancia subtransitoria (X''_d), la reactancia transitoria (X'_d) y la reactancia síncrona (X_s).

- a) **Reactancia subtransitoria (X''_d)** : Es la reactancia aparente del devanado del estator en el instante que ocurre el cortocircuito y determina el valor de la corriente que circula durante los primeros pocos ciclos después de la falla.
- b) **Reactancia transitoria (X'_d)** : Esta reactancia determina la corriente que sigue al periodo cuando la reactancia subtransitoria decae. La reactancia transitoria es efectiva despues de uno y medio ciclos, esto depende del diseño de la maquina.
- c) **Reactancia síncrona (X_s)** : Esta reactancia determina la corriente que circula cuando llega al estado permanente. Normalmente no se usa en estudios de cortocircuito.

Fuentes de cortocircuito

A) Generadores





¡Gracias!

Dependencia de electrica



IUPascualBravo

