

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**

## **ESCUELA DE INGENIERIA EN ENERGIA**

**CURSO: SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**  
**VIII CICLO SEMANA 13**

### **PROTECCION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE** **POTENCIA**

#### **OBJETIVO**

Conocer y calcular la protección de los Sistemas Eléctricos de Potencia

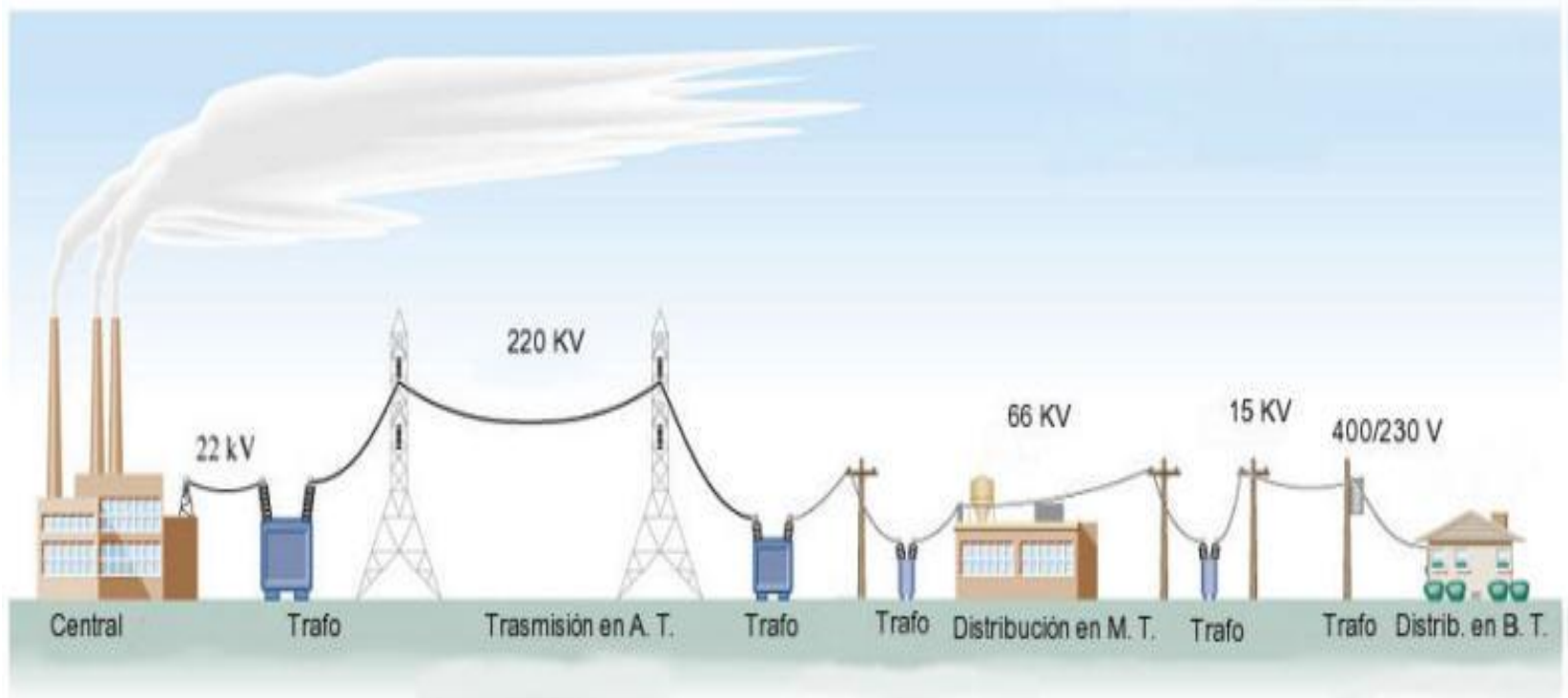
#### **BIBLIOGRAFIA**

Ramón M. Mujal Rosas. Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia

# CONTENIDO

- 1. INTRODUCCION A FALLOS ELECTRICOS**
- 2. TIPOS DE CORTOCIRCUITO.**
- 3. PARAMATROS ELECTRICOS EN LOS CORTOCIRCUITOS.**
- 4. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITOS. MAGNITUDES Y VARIACIONES TEMPORALES.**
- 5. IMPEDANCIAS DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR**
- 6. EJEMPLO**
- 7. PRACTICA DOMICILIARIA**

# **1. INTRODUCCION A LOS FALLOS ELECTRICOS**



Sea nuestro Sistema Eléctrico de Potencia como el descrito en la figura. Puede producirse un cortocircuito, es decir la unión de cualquiera de las fases entre sí o de las fases a tierra. Este cortocircuito puede ocurrir en la Máquina: Generador, Transformador, Motor; o en la Línea, a diferente nivel de tensión.



Linea de Transmisión de Potencia, Chimbote Sur –Nepeña: 138 Kv.

Los cortocircuitos no son frecuentes y, cuando se producen, apenas duran unas décimas de segundo, pero sus consecuencias son tan graves e imprevisibles que obligan a un constante estudio y mejora de los dispositivos de protección a ellos destinados.

La mayor parte de las normas de protección de las instalaciones eléctricas nos indican que no sólo deben considerarse las corrientes y tensiones debidas a las cargas de servicio, sino también las debidas a sobrecargas producidas por los cortocircuitos. Las corrientes de cortocircuito presentan valores mayores a los nominales, provocando sobrecargas térmicas y electrodinámicas elevadas aparte, las corrientes de cortocircuito que circulan por tierra pueden ser causa de tensiones e interferencias inadmisibles.

Pero no sólo son importantes las corrientes máximas de cortocircuito, sino también las corrientes mínimas de cortocircuito, ya que éstas, en definitiva, son las que permiten dimensionar los dispositivos de protección de las redes.

Este comportamiento de los cortocircuitos se hace especialmente peligroso en contactos con las personas, pudiendo ocasionar lesiones de gravedad y causar daños en los instrumentos o máquinas de las instalaciones afectadas. Es por tanto de suma importancia conocer los valores que en un punto determinado del circuito puedan adoptar las corrientes máximas y mínimas de cortocircuito, ya que sólo de esta forma será posible proteger eficazmente a las instalaciones de tan graves consecuencias.

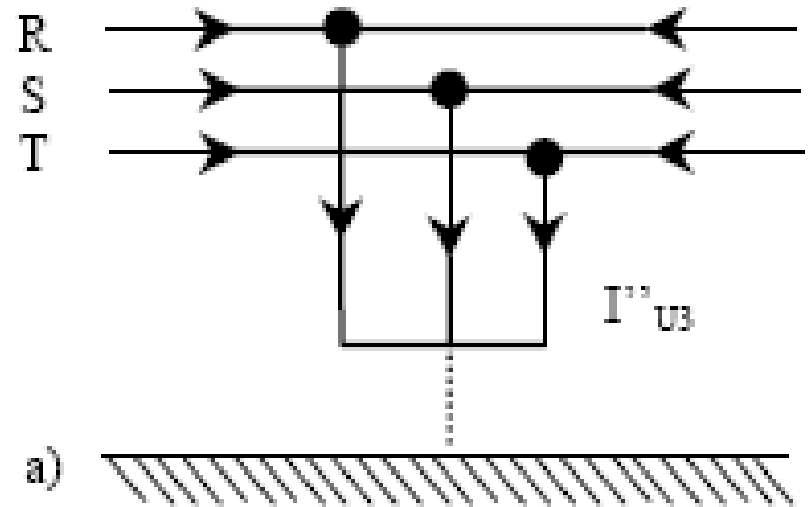
## **2. TIPOS DE CORTOCIRCUITO**



## a) CORTOCIRCUITOS TRIFASICOS

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  $120^\circ$ .

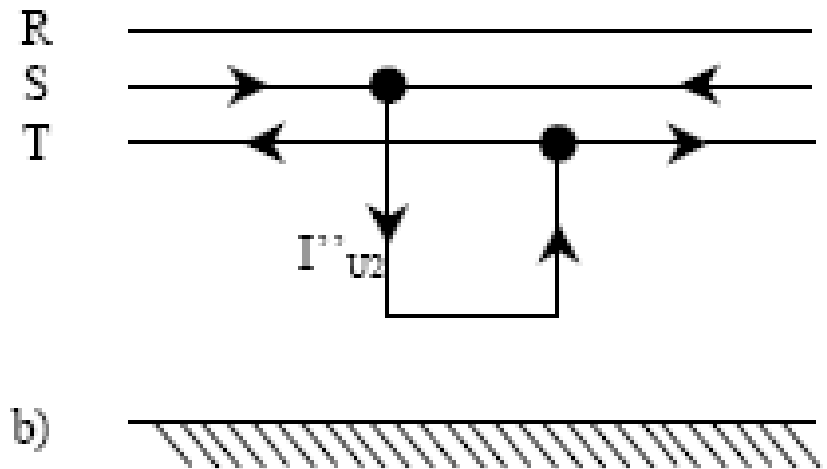
Es uno de los cortocircuitos más violentos y de obligado cálculo. Al ser un sistema equilibrado, para su cálculo sólo será necesario utilizar la red de **secuencia directa**



## b) CORTOCIRCUITOS BIFASICOS SIN CONTACTO A TIERRA

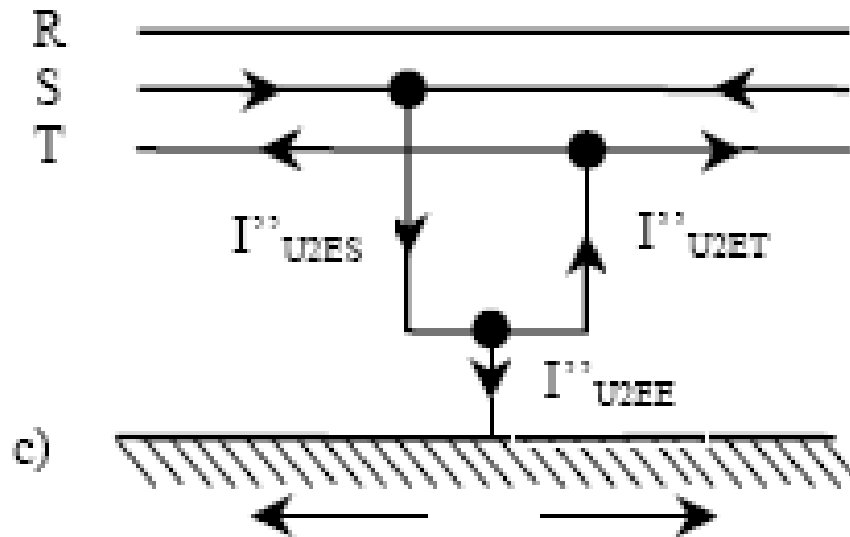
Generalmente las corrientes iniciales simétricas de cortocircuito son menores que las del fallo trifásico, aunque si el cortocircuito se produce en las inmediaciones de máquinas síncronas o asíncronas de cierta potencia, las corrientes de esta falta pueden llegar a presentar valores incluso mayores que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



## c) CORTOCIRCUITOS BIFASICOS 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

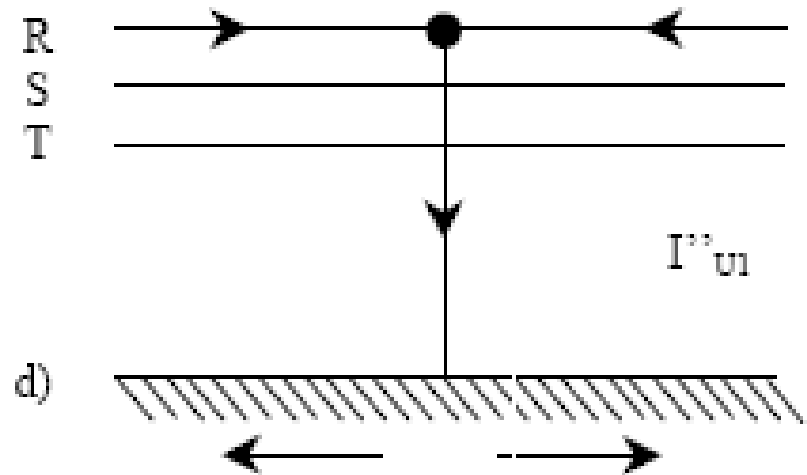


## d) CORTOCIRCUITOS MONOFASICO A TIERRA

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.

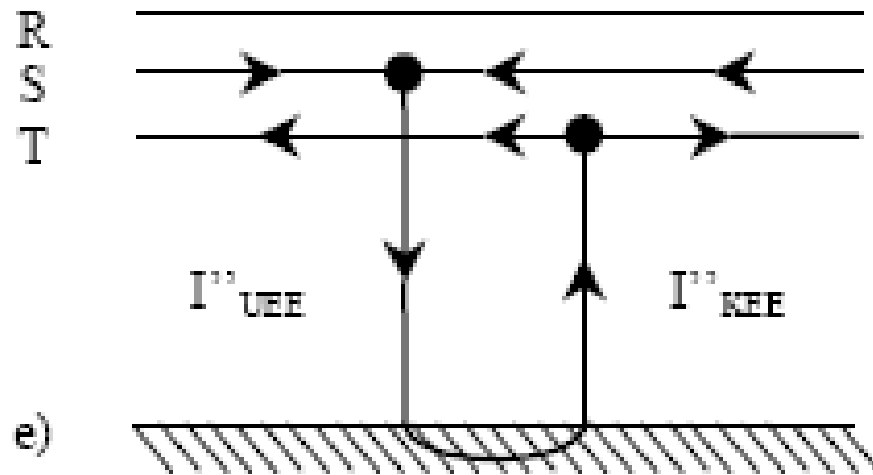
Para su cálculo, al ser desequilibrado y con pérdida de energía, son necesarias las tres redes de secuencia (directa, inversa y homopolar).



### e) CORTOCIRCUITO CON DOBLE CONTACTO A TIERRA

En redes con neutro aislado o puesta a tierra con impedancias de gran valor, puede aparecer el doble contacto a tierra.

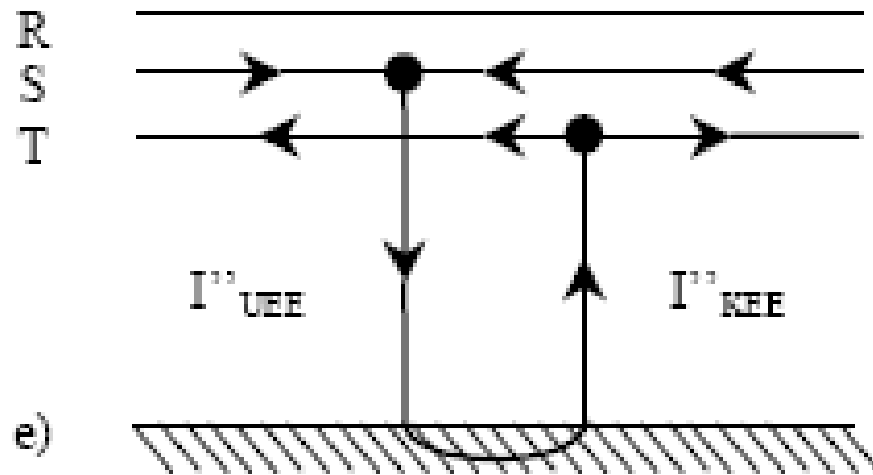
Este cortocircuito presenta valores de corriente inferiores al resto de los cortocircuitos. Si consideramos que es poco frecuente y la complejidad que representa su cálculo, se comprenderá que sea el más escasamente analizado.



## e) CORTOCIRCUITO CON DOBLE CONTACTO A TIERRA

En redes con neutro aislado o puesta a tierra con impedancias de gran valor, puede aparecer el doble contacto a tierra.

Este cortocircuito presenta valores de corriente inferiores al resto de los cortocircuitos. Si consideramos que es poco frecuente y la complejidad que representa su cálculo, se comprenderá que sea el más escasamente analizado.



### **3. PARAMATROS ELECTRICOS EN LOS CORTOCIRCUITOS.**

Para el estudio de los cortocircuitos han de considerarse diferentes parámetros y magnitudes como son: las intensidades, las impedancias, las potencias o los tiempos de retardo en el disparo de los dispositivos de protección. Estos parámetros se definen y simbolizan de la siguiente forma:

- **Corriente instantánea** total de cortocircuito ( $i_k$ ).
- **Corriente instantánea simétrica de cortocircuito** ( $i \sim$ ). *Es la componente de la corriente instantánea total de cortocircuito que presenta la frecuencia de servicio.*
- **Corriente aperiódica de cortocircuito** ( $i_g$ ). *Es la componente de la corriente instantánea total de cortocircuito que representa al efecto inductivo de la bobina (a mayor inductancia, mayor permanencia de esta corriente).*
- **Corriente subtransitoria simétrica de cortocircuito** ( $I_k''$ ). *Valor eficaz de la corriente de cortocircuito en el instante de producirse la falta.*



- **Corriente transitoria simétrica de cortocircuito** ( $I_k'$ ). Valor eficaz de la corriente de cortocircuito cuando han transcurrido 0.1 segundos desde que se produjo el fallo.
- **Corriente permanente simétrica de cortocircuito** ( $I_k$ ). *Valor eficaz de la corriente de cortocircuito que perdura después de los fenómenos transitorios (normalmente el estado permanente aparece a partir de los 5 seg posteriores al cortocircuito).*
- En los cortocircuitos trifásicos próximos a generadores con excitación constante, la corriente permanente de cortocircuito es menor que la corriente transitoria, y ésta, a la vez, es menor que la corriente subtransitoria ( $I_k'' > I_k' > I_k$ ).
- En los cortocircuitos trifásicos alejados de los generadores, coinciden prácticamente las tres corrientes de cortocircuito ( $I_k'' = I_k' = I_k$ ). *Esto es debido a que con las distancias se amortiguan los efectos de la corriente aperiódica de cortocircuito producidos por las bobinas.*

- Corriente simétrica de corte ( $I_a$ ). Valor eficaz de la corriente simétrica de cortocircuito que circula por un interruptor en el momento que se inicia la separación de los contactos (corriente de corte).
- **Impedancia directa** ( $Z_1$ ). Impedancia equivalente de la red de secuencia directa vista desde el punto de cortocircuito.
- **Impedancia inversa** ( $Z_2$ ). Impedancia equivalente de la red de secuencia inversa vista desde el punto de cortocircuito.
- **Impedancia homopolar** ( $Z_0$ ). Impedancia equivalente de la red homopolar vista desde el punto de cortocircuito.
- **Fuerza electromotriz inicial** ( $E''$ ) subtransitoria. Valor eficaz de la fuerza electromotriz de una máquina síncrona en el instante de producirse el cortocircuito. Es un valor que debe expresarse como tensión entre fase y neutro.

- **Tensión de servicio de la red** ( $U_b$ ). Valor medio de las tensiones de línea con las que se explota la red en condiciones normales.
- **Tensión nominal de la red** ( $U_N$ ). Tensión de línea con el que se designa la red.
- **Potencia aparente subtransitoria de cortocircuito** ( $S_k''$ ). Es el valor de la potencia aparente de línea considerando el régimen subtransitorio.
- **Retardo mínimo de desconexión** ( $t_v$ ). Tiempo que transcurre desde que se produce el cortocircuito hasta que se desconectan los polos del interruptor. Es la suma del tiempo mínimo de actuación del relé y de la apertura del mismo (sin tener en cuenta los retardos ajustables de forma voluntaria).

# 4. CORRIENTES DE CORTOCIRCUITOS. MAGNITUDES Y VARIACIONES TEMPORALES

Cuando se produce un cortocircuito se presentan variaciones de los parámetros de servicio, cambiando las condiciones de la red. Este cambio va acompañado de fenómenos electromagnéticos y electromecánicos transitorios, de los que dependen la magnitud y las variaciones temporales de la corriente de cortocircuito

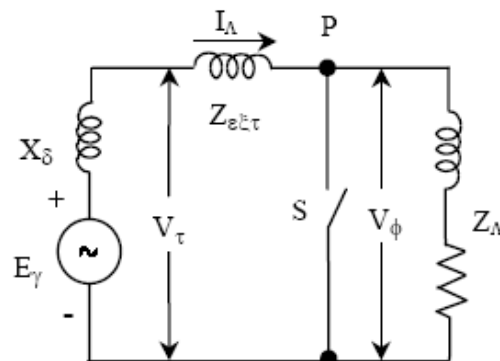
Los fenómenos transitorios dependen además de otras muchas características como pueden ser: del tipo de cortocircuito, del instante en que se produce, de las fuentes de energía implicadas, del estado previo de carga, de la duración del cortocircuito y de la estructura de la red. También influyen las características y comportamiento de los aparatos y componentes implicados.

La situación del punto de cortocircuito en la red indica la forma que influirán las máquinas síncronas y asíncronas en el mismo.

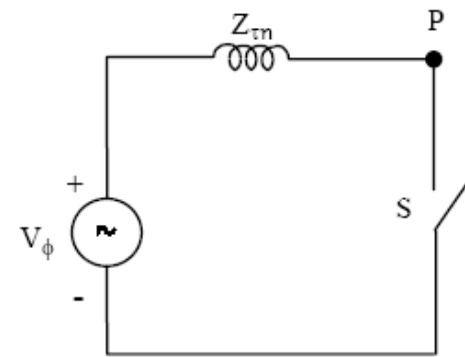
Además, la posición del punto de cortocircuito nos determina el valor del módulo y del ángulo de la impedancia de cortocircuito, valores que influyen de forma definitiva en la corriente final de cortocircuito.

El instante en que se produce el cortocircuito depende del azar, pero es de suma importancia, ya que de él depende el valor que tomará la corriente en el momento de producirse el fallo. La referencia respecto a la variación temporal de tensión influye de forma determinante en el máximo que alcanzará la intensidad (valor importante para determinar el poder de corte y poder de cierre de los dispositivos de protección).

*Figura. 1.1 Cambio de los parámetros y circuito eléctrico equivalente para el cortocircuito*



a) Circuito original



b) Circuito equivalente de Thevenin en el fallo

Las fuentes de generación de energía son generalmente máquinas síncronas (como los turbogeneradores o las máquinas con rotor de polos salientes). Pero también son frecuentes las máquinas asíncronas (motores de inducción), así como los accionamientos alimentados por convertidores estáticos con régimen ondulatorio. Finalmente, las redes externas, bien sea una red regional de suministro de energía o redes industriales, pueden proporcionar asimismo energía al punto de cortocircuito en la corriente final de cortocircuito.

La duración del cortocircuito depende fundamentalmente de los dispositivos de protección y de los aparatos de corte empleados en la red. También introducen modificaciones en los fenómenos transitorios, los reenganches rápidos, que cuentan el tiempo sin paso de corriente y las secuencias de maniobras.

El estado previo de carga de una red nos determina si nos encontramos ante cargas débiles o elevadas. Es decir, nos informa tanto del número y la potencia de los generadores y cargas trabajando en paralelo como del valor de la fuerza electromotriz de las fuentes de corriente que afectan al cortocircuito.

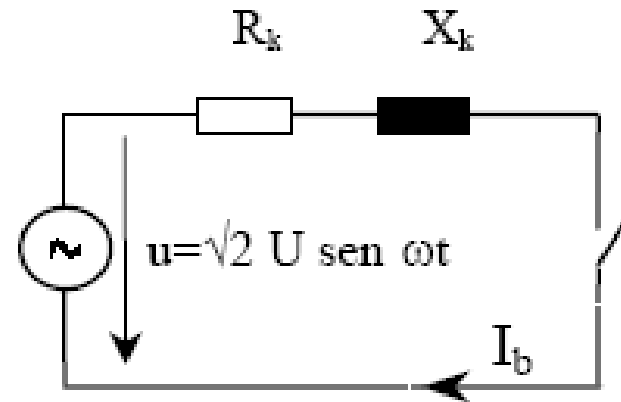
La forma de la red nos indica los caminos por donde discurrirá la corriente en caso de cortocircuito, y por tanto nos informa de las impedancias implicadas en su cálculo. Su estructura depende del tipo de transporte (líneas aéreas, subterráneas o cables) y del tipo de distribución (malla, antena o radial).

El punto de avería en la red repercute en las variaciones que las cc experimentan con el curso del tiempo. Si el punto de la avería está situado en las proximidades de un generador síncrono (bobinas y por tanto inductancia), la corriente instantánea inicial de cortocircuito presentará un valor elevado respecto al nominal y será asimismo más duradera



Veamos primeramente cómo se comporta un sistema monofásico sin carga con un cortocircuito alejado del generador. La siguiente figura representa el esquema equivalente de un circuito monofásico que incluye una fuente ideal generadora de tensión senoidal (valor de cresta  $\sqrt{2} \cdot V$ , con una frecuencia y pulsación  $\omega = 2\pi f$  constantes). La resistencia efectiva ( $R_k$ ) y la reactancia inductiva ( $X_k = \omega L_k$ ) se consideran también constantes y lineales. El cortocircuito se produce actuando sobre el interruptor sin resistencia en el instante ( $t=0$ ) al pasar por cero la tensión

Figura . Esquema monofásico equivalente de un circuito unipolar sin carga



$I_k''$  = Corriente inicial simétrica de cortocircuito

$I_k$  = Corriente permanente de cortocircuito

$I_s$  = Corriente máxima asimétrica de cortocircuito

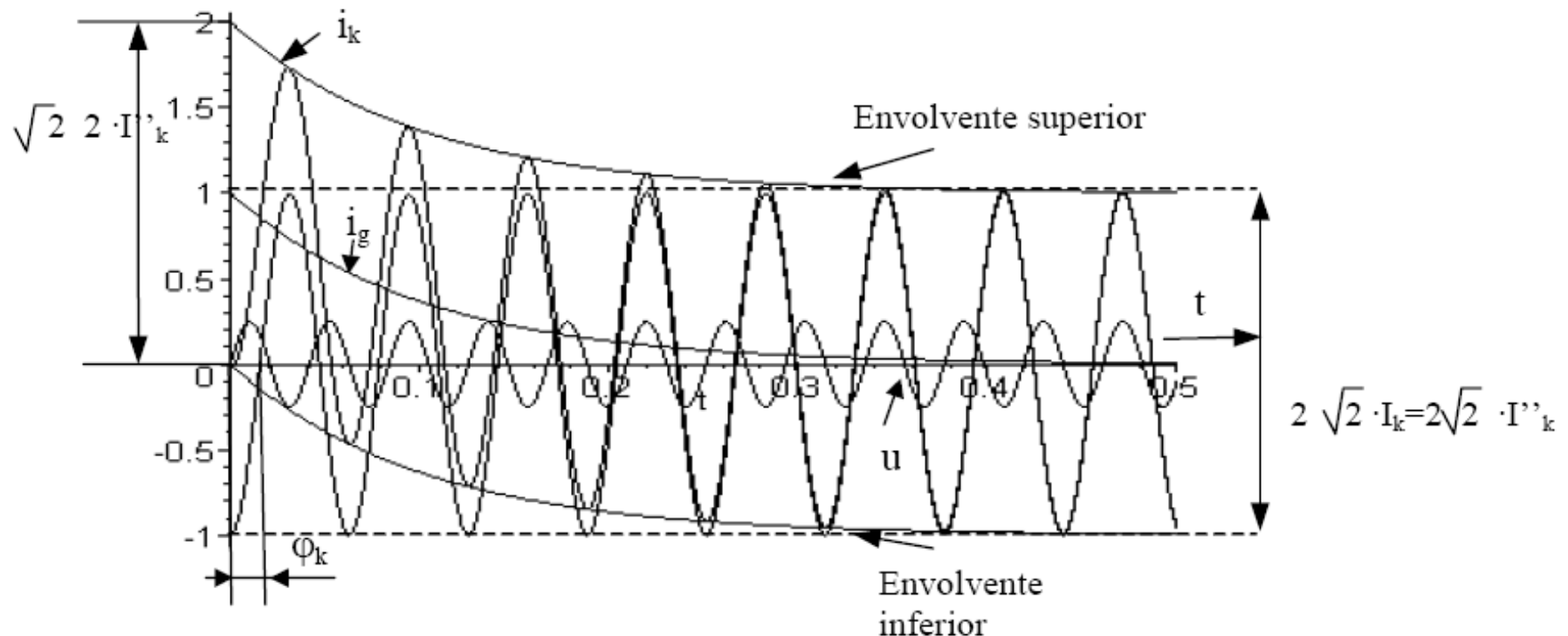
$A$  = Valor inicial de la componente aperiódica de la corriente

$i_K$  = Corriente instantánea total de cortocircuito

$i_g$  = Componente aperiódica de la corriente instantánea total de cortocircuito

$i_{\sim}$  = Corriente instantánea simétrica de cortocircuito

$\phi_k$  = Ángulo de la impedancia de cortocircuito de la red



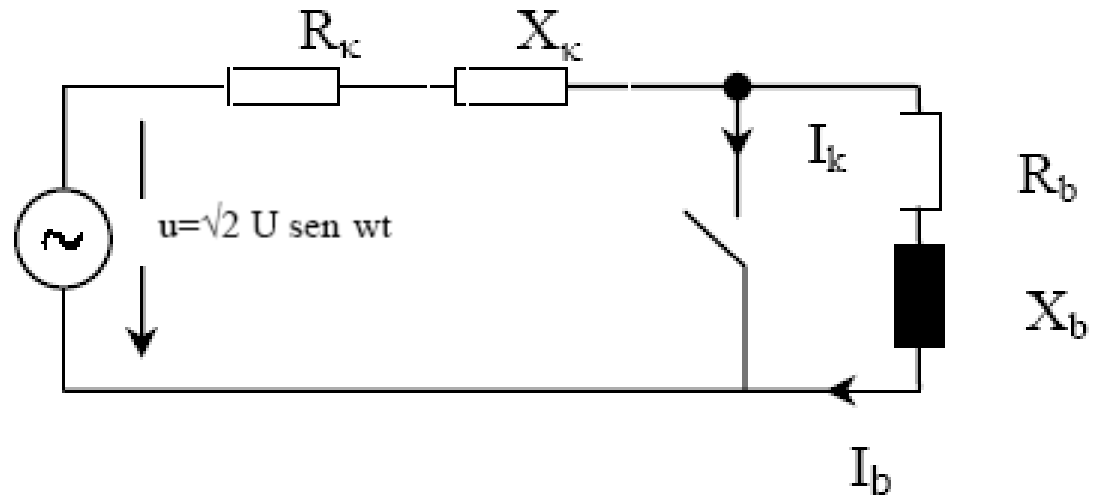
Analicemos las variaciones que sufre la corriente de cortocircuito ( $i_k$ ) a lo largo de todo el proceso. Pero, en primer lugar, veamos los pormenores que facilitarán la comprensión del proceso:

- En este caso, no existía corriente de carga en el instante ( $t=0$ ), ya que el circuito está en vacío.
- El instante en que se produce el cortocircuito (valor debido al azar) coincide con el paso por cero de la tensión de línea.
- El punto de cortocircuito nos determina el módulo y ángulo de la impedancia equivalente. Normalmente estas impedancias suelen ser altamente inductivas por la presencia de las máquinas eléctricas.
- La tensión no varía su valor a lo largo de todo el tiempo que dura la falta

Hasta el momento se ha considerado el sistema trabajando en vacío. Si ahora consideramos **una carga específica**, la expresión de las intensidades instantáneas se incrementará con la corriente de carga denominada ( $i_c$ ).

La carga de la figura anterior está representada por una impedancia constante de valor  $Z_b=(R_b+jX_b)$ , por la que circula una intensidad ( $i_k$ ), considerándose que se ha producido un cortocircuito cuando se cumple la condición de ( $i_k=i_b$ ).

Figura . Esquema equivalente de un sistema eléctrico **monofásico en carga**



# **5 IMPEDANCIAS DIRECTA, INVERSA Y HOMOPOLAR**

Las impedancias a tener presentes en los cálculos de cualquier cortocircuito se engloban tres grandes denominaciones:

- **Impedancia directa ( $Z_1$ )**: *Es el cociente entre la tensión entre fase y neutro y la corriente de fase en el caso de de circuitos alimentados mediante un sistema simétrico trifásico de secuencia directa ( $RST$ ). Corresponde a la impedancia de servicio de líneas, a la impedancia de cortocircuito de los transformadores, bobinas y condensadores, y a la impedancia que aparece en los generadores y motores en el instante de producirse el cortocircuito.*
- **Impedancia inversa ( $Z_2$ )**: *Es el cociente entre la tensión entre fase y neutro y la intensidad de fase en el caso de circuitos alimentados por un sistema simétrico trifásico de secuencia inversa ( $RTS$ ). Al no influir el sentido del flujo giratorio en los elementos estáticos (transformadores, bobinas, condensadores, líneas, cables, etc) las impedancias inversas coinciden con las impedancias directas.*

Por el contrario, las máquinas giratorias (motores y generadores) variarán su valor si son máquinas con el rotor de polos salientes.

- Impedancia homopolar ( $Z_0$ ): *Es el cociente entre la tensión entre fase y neutro y la intensidad de fase en el caso de que la alimentación provenga de una fuente de tensión monofásica. No hay forma de hallar con exactitud el valor de la impedancia homopolar si no es de forma práctica. La impedancia homopolar es similar a la impedancia directa en dispositivos como bobinas y condensadores, prácticamente igual en los transformadores y mucho menor en las máquinas giratorias. Donde realmente cambia de valor la impedancia homopolar es en las líneas de transporte de energía eléctrica, ya que la corriente homopolar es monofásica y por tanto debe de disponer de un camino de retorno, el cual se produce normalmente a través de tuberías, hilos de protección, neutro, etc. lo que hace que las*

impedancias homopolares de las líneas aumenten, al menos en el doble o en el triple, respecto a los valores que presentarían las mismas en secuencia directa o inversa.



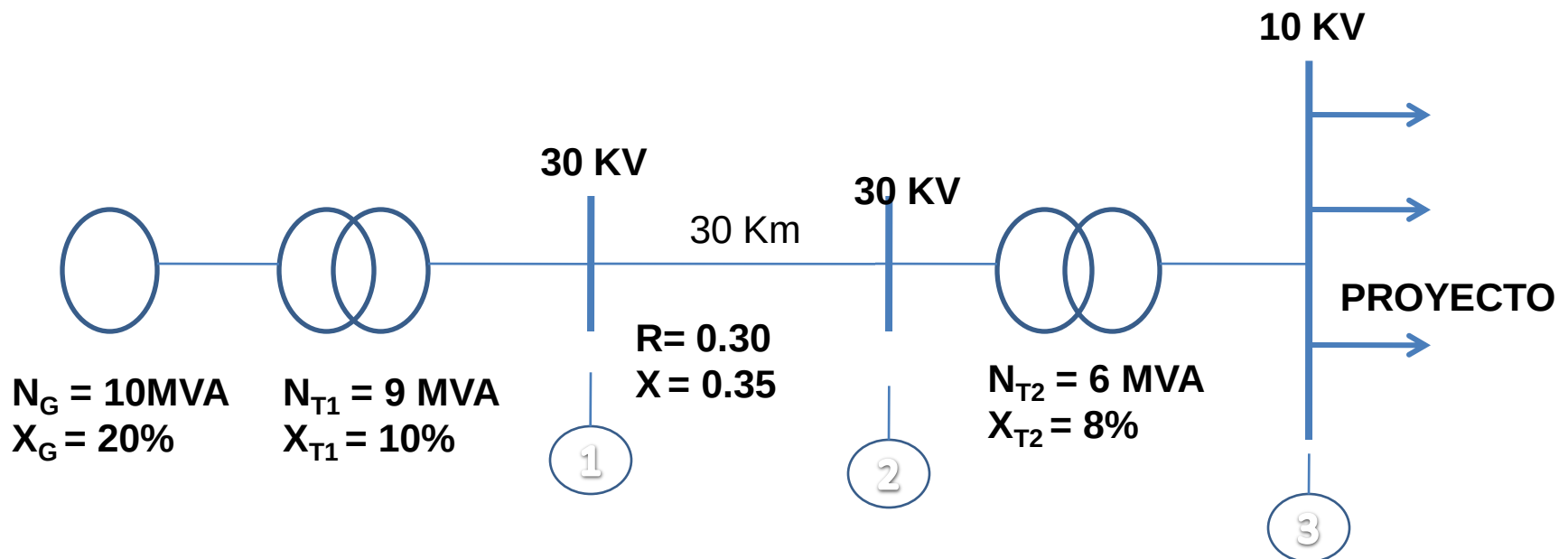
## 6. EJEMPLO

Sea el siguiente Sistema Eléctrico de Potencia, como se muestra en la figura. Calcular la Potencia de cortocircuito en las barras 1, 2 y 3, así como la corriente transitoria.

a) Calculamos la Impedancia  $Z_g$  para el generador a 30 Kv y 10 MVA. Aplicamos la fórmula.

$$Z = \frac{(X)V^2}{100N_G}$$

$$Z_g = 0.20(30^2/10) = 18 \text{ Ohm}$$



b) Calculamos la Impedancia  $Z_{T1}$  para el transformador  $T_1$  a 30 Kv y 9 MVA. Están a la misma tensión.

$$Z_g = 0.10(30^2/9) = 10 \text{ Ohm}$$

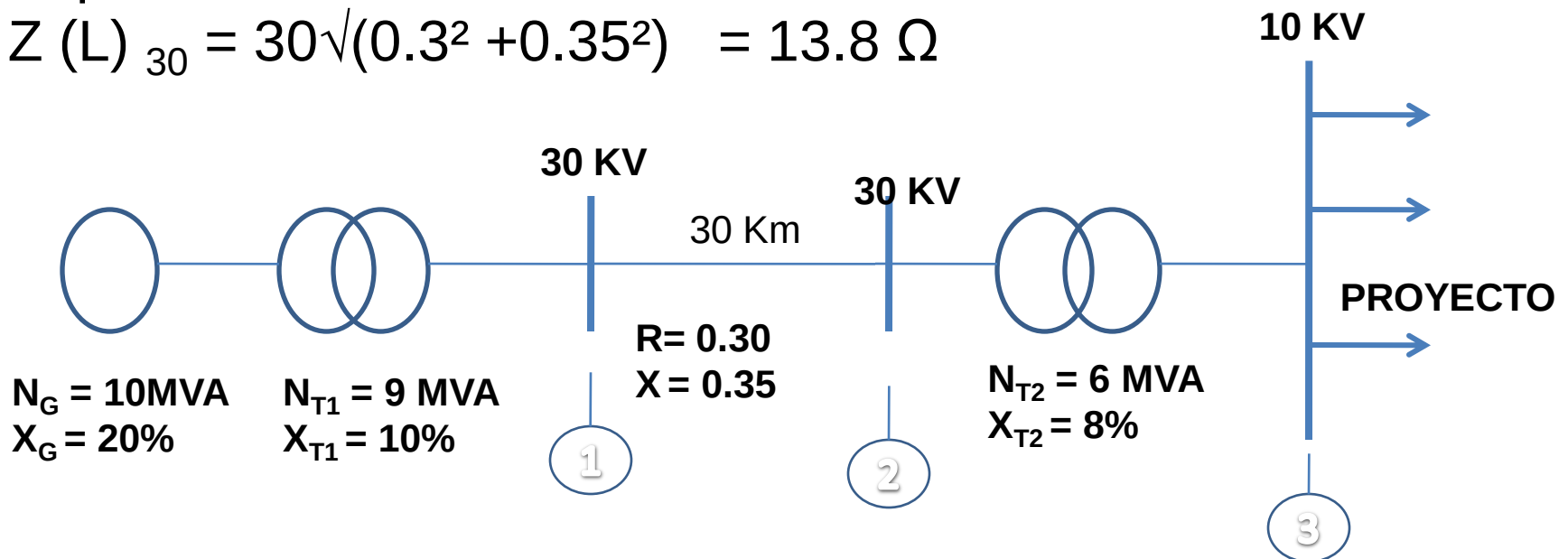
c) La Impedancia del Grupo Generador-Transformador1 es:

$$Z (G+T_1)_{30} = 18+10 = 28 \Omega$$

d) La Impedancia del Grupo Generador-Transformador 1 a 10 Kv es:  $Z (G+T_1)_{10} = 28 \times \frac{10^2}{30^2} = 3.11 \Omega$

e) Impedancia de la línea a 30 Kv

$$Z (L)_{30} = 30\sqrt{(0.3^2 + 0.35^2)} = 13.8 \Omega$$



f) Calculamos la Impedancia de Línea a 10 Kv.

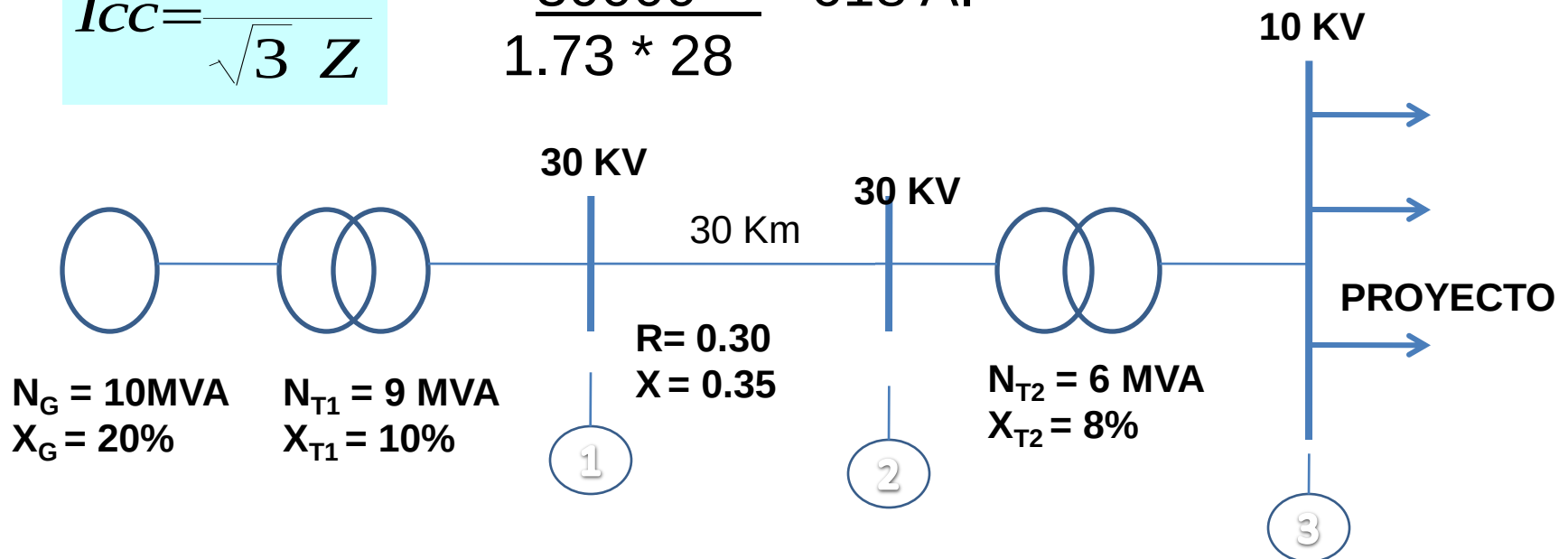
$$Z(L)_{10} = 13.8 \times \frac{10^2}{30^2} = 1.53 \Omega$$

g) La Impedancia del Transformador 2 es:

$$Z(T_2)_{30} = \frac{8}{100} \times \frac{30^2}{6} = 12 \Omega \quad Z(T_2)_{10} = 12 \times \frac{10^2}{30^2} = 1.33 \Omega$$

h) El cortocircuito en la barra 1 estará limitada únicamente por  $Z = 28 \Omega$ ; aplicamos la fórmula :

$$I_{cc} = \frac{V}{\sqrt{3} Z} = \frac{30000}{1.73 \times 28} = 618 \text{ A.}$$



i) La corriente máxima transitoria, valor práctico es:  $I_s = \sqrt{2} * \tau * I_{cc}$   
Para  $\tau = 1.8$   $I_s = 1.4142 * 1.8 * 618 \text{ A} = 1546.5 \text{ A}$

j) La potencia de cortocircuito :  $P_{cc} = \sqrt{3} I_{cc} V_n$   
 $P_{cc} = 1.73 * 618 * 30 \text{ Kv} = 32.07 \text{ kVA}$

k) El cortocircuito en la barra 2 estará limitada únicamente por  
 $Z = 28 + 13.8 = 41.8 \Omega$

$$I_{cc_2} = \frac{30000}{1.73 * 41.8} = 414.4 \text{ A} \quad I_{s_2} = 1.8 * 1.44 * I_{cc} = 1036 \text{ A}$$
$$N_{cc} = 1.73 * V * I_{cc} = 21.53 \text{ MVA}$$

l) El cortocircuito en la barra 3 estará limitada únicamente por  
 $Z = 3.11 + 1.53 + 1.33 = 5.97 \Omega$

$$I_{cc_3} = \frac{10000}{1.73 * 5.97} = 967 \text{ A} \quad I_{s_3} = 1.8 * 1.44 * I_{cc} = 2417.5 \text{ A}$$
$$N_{cc} = 1.73 * V * I_{cc} = 16.75 \text{ MVA}$$

Los interruptores deberán tener un poder de ruptura de valor de la potencia de cortocircuito, los seccionadores y reductores de corriente tendrán que ser garantizadas para una corriente dinámica mayor a la corriente transitoria. Los aisladores en las barras deben ser diseñadas considerando la corriente dinámica.

## 7. PRACTICA DOMICILIARIA

Sea el siguiente Sistema Eléctrico de Potencia, como se muestra en la figura. Calcular la Potencia de cortocircuito en las barras 1, 2 y 3, así como la corriente transitoria, para los siguientes valores:

### GRUPO

|                          | A    | B    | C    | D:   |
|--------------------------|------|------|------|------|
| Tensión Barra 1 y 2 (Kv) | 22.9 | 33   | 66   | 138  |
| Tensión Barra 3 (KV)     | 13.2 | 13.2 | 22.9 | 22.9 |

Fecha de presentación: Durante la sesión Teórica

