

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA APLICABLE A LINEAS SUBTERRANEAS

4.1. Diagrama unifilar del anillo de 400 kV de la zona metropolitana del Valle de México.

En la figura 4.1, se ilustra el diagrama unifilar para la red de 400 kV que se ubica en la ZMVM actualmente administrada por la Comisión Federal de Electricidad.

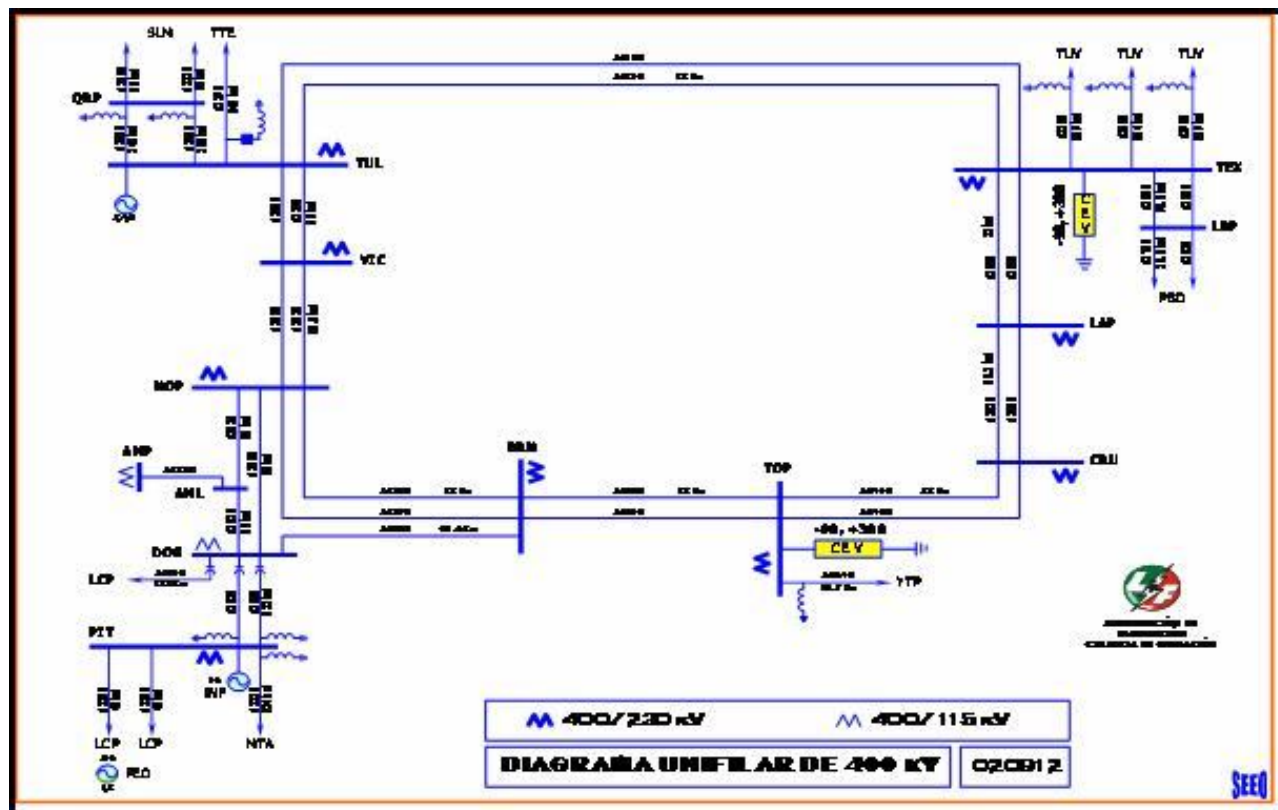


Figura 4.1 Diagrama Unifilar de 400 kV de la ZMVM.

La energía eléctrica se genera y se transporta en forma de corriente alterna. La razón básica del uso de corriente alterna como forma de energía eléctrica es la facilidad que ésta ofrece para poder transformarse a otros valores de tensión y corriente. El objetivo de tal transformación es el conseguir una pérdida mínima de energía en el transporte.

Ello se consigue por medio de una elevación del valor de tensión a la salida principalmente en 400 kV o 230 kV, de los centros de producción. Las subestaciones que se ilustran en el diagrama unifilar se enlazan en una configuración en anillo, siendo estas subestaciones reductoras de 400/230 kV.

La tensión de servicio o nominal, se expresa en voltios y resulta ser la principal característica de los sistemas eléctricos, siendo la que determina el nivel de aislamiento de los elementos que los integran.

La frecuencia a la que opera el sistema se expresa en Hertzios (ciclos/segundo). Siendo 60 Hz el valor normalizado para México.

Dada la amplitud del concepto de sistema eléctrico, conviene dividir a éste en subsistemas para una mejor comprensión.

- **Subsistema de producción:** que comprende las centrales generadoras.
- **Subsistema de transporte:** comprende las estaciones transformadoras elevadoras, las líneas de transporte y las estaciones o subestaciones transformadoras.
- **Subsistema de distribución:** consta de las redes de reparto, de las estaciones transformadoras de distribución, redes de distribución en media tensión, centros de transformación y redes de distribución en baja tensión.
- **Centrales generadoras:** cuya misión es la de generar electricidad a partir de otras fuentes de energía. Las tensiones más habituales de generación, oscilan entre 3 y 23 kV, y la potencia generada en una central tipo medio-alto ronda los 500 y 1000 MVA.
- **Estaciones transformadoras elevadoras:** Es el primer paso de transformación que encuentra la energía eléctrica a su salida de las centrales generadoras, la tensión de transporte (230 ó 400 kV).
- **Líneas de transporte:** son las líneas aéreas que unen las estaciones elevadoras con las subestaciones transformadoras, y por lo tanto, las encargadas de realizar los transportes de energía a muy larga distancia. Los valores de tensión a los que trabajan estas líneas son los correspondientes a los de salida de las estaciones elevadoras. En el mapa de la figura 4.2 se muestran las centrales, subestaciones y líneas que se dirigen al anillo de la ZMVM.

Estos subsistemas están integrados en el anillo de 400 kV de la ZMVM

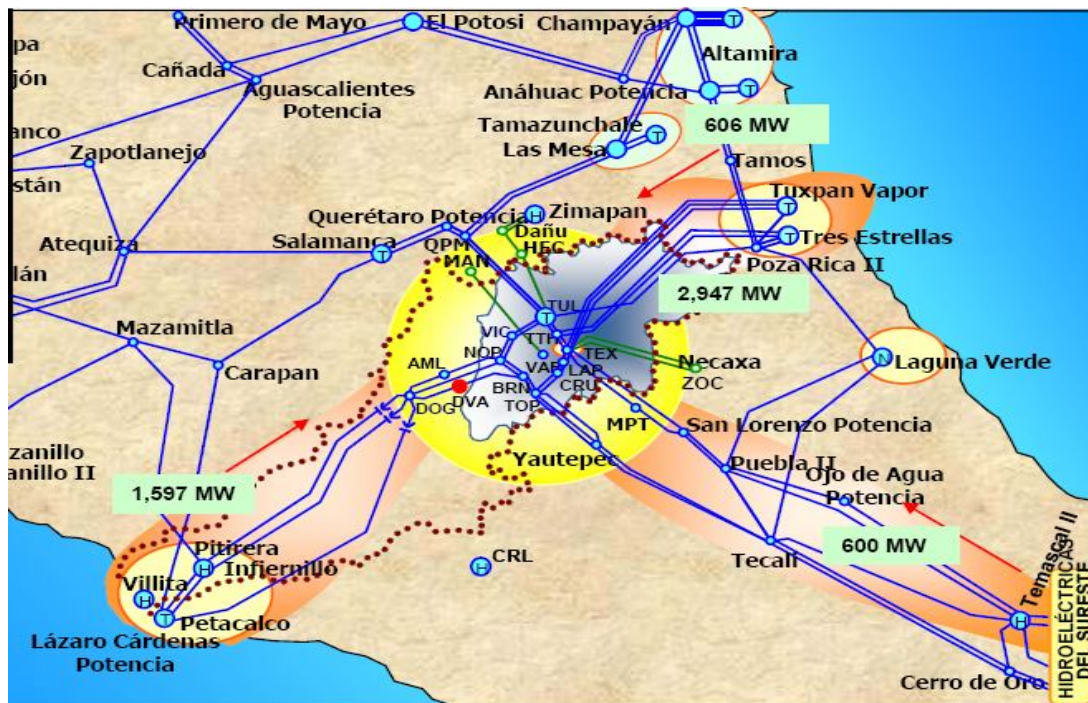


Figura 4.2 Sistema Eléctrico Nacional

4.1.1. Líneas alimentadoras que parten de una sola fuente.

Es aquella cuya configuración es en anillo; las líneas alimentadoras parten de una sola fuente de alimentación siguiendo una misma trayectoria. Opera en forma cerrada para alimentar determinada carga como se muestra en el esquema de la figura 4.3.



Figura 4.3. Esquema de líneas alimentadoras partiendo de una sola fuente.

4.1.2 Líneas alimentadoras que parten de dos o más fuentes.

Es aquella cuya configuración es en anillo; las líneas alimentadoras parten de dos ó más fuentes de alimentación. Opera en forma cerrada para alimentar determinada carga mostrada en el esquema de la siguiente figura 4.4.

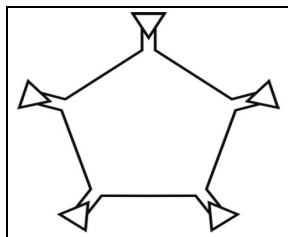


Figura 4.4. Esquema de líneas alimentadoras partiendo de dos o más fuentes.

Este esquema es el que se encuentra en el anillo de 400 kV de la ZMVM, las fuentes de generación lejana y cercana, llegan en líneas a las diversas subestaciones (ver figura 2.6), esto permite administrar la generación en función de las demandas que se presenten en la zona. En las figuras 4.1 y 4.2 se puede observar los enlaces que aportan energía

4.2 Cálculos eléctricos en cables de potencia subterráneos.

En los sistemas de cables de potencia subterráneos, las principales variables para garantizar un correcto funcionamiento son la tensión y la corriente nominales. Como ocurre en los sistemas eléctricos de todo el mundo, existen fallas y maniobras de mantenimiento que llevan al sistema a operar fuera de los valores nominales. Por ejemplo, las corrientes de corto circuito y las sobretensiones por la operación o maniobras de interruptores, deben estar perfectamente definidas, ya que estos eventos pueden ser destructivos y dañar parcial o permanentemente los cables de potencia; estos valores, depende del tipo de instalación y se deben realizar los ajustes necesarios (ver figura 1.11).

Para determinar las corrientes de corto circuito se realiza el análisis al corto circuito monofásico o falla de fase a tierra utilizando las componentes simétricas. Se necesitan las tres redes de secuencia: positiva y negativa (que se supondrán iguales por simplicidad) y la red de secuencia cero. Las precauciones de seguridad y prácticas en diseño, construcción, operación y mantenimiento se pueden analizar con base a la tensión que existe en la pantalla de un cable de potencia.

4.2.1 Sección transversal de conductores.

El calibre o sección de un conductor requerido para una aplicación específica se determina por la corriente requerida por la carga y por la caída de tensión permisible así como la corriente de corto circuito que pudiera recorrer el conductor y deberá siempre ser lo suficientemente grande para conducir la sobrecorriente de cortocircuito o sobrecarga durante un tiempo que no permita que se rebasen las temperaturas máximas establecidas.

De acuerdo con las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional el área de la sección recta de los conductores eléctricos se expresa en milímetros cuadrados. Sin embargo en Estados Unidos y en varios países de América sigue siendo usual expresar el área en “circular mil” que se representan abreviadamente por CM. Un “circular mil” es el área de un círculo cuyo diámetro mide una milésima de pulgada; por lo tanto:

$$1CM = \frac{0.001^2 * \pi}{4} = 0.785 \times 10^{-6} [pulgadas]$$
$$1CM = 0.7854 \times 10^{-6} \times 25.4^2 = 0.0005067 [mm^2]$$

El área de la sección recta de un cable formado por cierto número de alambres trenzados es la suma de las áreas correspondientes a cada alambre. Cuando el cable es de sección grande se suele expresar el área en mil “circular mil” que se abrevia MCM.

Dependiendo del tipo de material del conductor y del número de segmentos del mismo, es el diámetro del conductor resultante, por lo que existen diferencias entre los fabricantes de cables de potencia para un misma área de sección transversal, por ejemplo para 2000 mm² o 2500 mm² que son las áreas de sección transversal que se utilizan en sistemas de potencia a 400 kV, varían levemente los diámetros.

Para mayor referencia, consultar los catálogos de los fabricantes para obtener los datos más actualizados. Para el fin de esta tesis, en el Anexo A, se incluyen las tablas utilizadas como referencia técnica de los fabricantes ABB y BRUGG Cables.

4.2.2 Capacidad de conducción de corriente (Ampacidad)

La Ampacidad se define como la corriente en amperes que un conductor puede transportar continuamente bajo las condiciones normales de uso sin exceder la temperatura permitida para ello. Para entender mejor el concepto de Ampacidad, se requiere examinar como se transfiere el calor y entender el circuito térmico del cable.

Cuando se transporta corriente por un conductor, necesariamente debe vencer la resistencia eléctrica del mismo. Si esto ocurre, se genera calor. Este calor generado en el conductor, atraviesa diferentes resistencias térmicas por medio de los siguientes mecanismos: Conducción y Convección.

La transferencia de calor por *conducción* es debida a las interacciones entre las partículas en el interior de un material. Se calcula mediante la siguiente ecuación que relaciona a los gradientes de temperatura dentro del cuerpo:

$$Q = q''_{cond} A = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde: k: Conductividad térmica del material en [S/m].
 A: Sección transversal en la posición x en [mm²].

El signo menos es necesario, ya que por *convección*, la densidad de flujo de calor se supone positiva cuando la energía se transfiere por conducción en el sentido de temperaturas decrecientes.

Cuando el tiempo deja de ser una variable, la distribución de temperatura en una pared plana de conductividad térmica uniforme será la línea recta.

Bajo estas condiciones, el gradiente de temperatura puede escribirse en función de las temperaturas de las dos superficies, T1 y T2, y del espesor de la pared L, siendo el flujo de calor como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q = -kA \left(\frac{T_2 - T_1}{L} \right)$$

Donde:

k:	Es la conductividad térmica del material en [S/m].
A:	Es la sección transversal en la posición x en [mm ²]
T1, T2:	Temperaturas del material en [°C].
L:	Espesor de la pared en [mm].

Este es el flujo de calor en la superficie 1 y 2 en cualquier posición dentro de la pared.

La transferencia de calor por convección es la transferencia de energía entre la superficie de un sólido y un líquido o un gas debido al movimiento del fluido. El mecanismo real es una combinación de conducción en la entre fase sólido-fluido y el movimiento del fluido que se lleva la energía.

Para calcular el flujo de calor por convección se utiliza el modelo Ley de Enfriamiento de Newton:

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_{amb})$$

Donde:

h:	coeficiente de transferencia de calor por convección
A:	área de la superficie en [mm ²].
Ts:	Temperatura de la superficie en [°C].
T amb:	Temperatura del fluido en [°C].

Conocer la Ampacidad de los cables de potencia es de gran importancia, el calor al que se someten los elementos termoplásticos y/o termofijos de los cables de potencia, influye en la longevidad del sistema de cables y afecta parámetros eléctricos como la resistencia en C.A. en el conductor y pantalla metálica (ver capítulo 3, Fig. 3.11). Como se observó en el capítulo 1, existen sistemas que necesitan de ventilación forzada para despejar el calor por convección y no afectar el rendimiento eléctrico del sistema. Estas transferencias de energía en forma de calor se pueden cuantificar como pérdidas. A partir de las pérdidas, se definirá la ecuación de la Ampacidad.

4.3 Pérdidas.

Las pérdidas que existen en los cables XLPE se deben a la conversión de energía eléctrica a energía en forma de calor, estas pérdidas ocurren en tres elementos que conforman el cable: *aislante*, *conductor* y *pantalla metálica*; más adelante mencionamos los métodos especiales de conexión de pantallas para disminuir pérdidas y mejorar la eficiencia de los sistemas de potencia.

El flujo de calor o la pérdida de potencia se miden en (W) Watts, la diferencia de temperatura en grados Celsius y la resistencia térmica en Celcius/Watts. En ocasiones la resistencia térmica se mide por kilómetro del cable y esta expresada con las unidades km/W. Una relación similar entre la resistividad y la resistencia que existe en los cálculos térmicos y eléctricos esta representada en la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\rho_T l}{A}$$

Donde:

T: Resistencia térmica en [km/W].

A: Área de la sección transversal en [mm²].

ρ_T : Resistividad térmica de un material [Ω-m].

l: Longitud del material [m].

La capacidad de carga actual de un cable de potencia depende de la tasa de producción de calor en el cable y la resistencia térmica de los materiales del mismo. Cuando el calor fluye a través de una resistencia térmica, se produce un aumento de temperatura. En el caso de un cable de potencia, la temperatura del conductor no debe exceder la temperatura máxima de funcionamiento del cable de potencia, ya sea valores nominales de operación o en sobrecarga, a continuación se muestran una serie de resistencias térmicas que definen a los cables de potencia en alta tensión:

Tabla 4.3. Resistencias térmicas en el cable de potencia.

Resistencia Térmica [km/W]	Definición
T1	Resistencia térmica por unidad de longitud entre el conductor y la pantalla.
T2	Resistencia térmica por unidad de longitud entre la pantalla y la armadura.
T3	Resistencia térmica por unidad de longitud entre la superficie del cable y el medio circundante.

Enseguida se mostraran las fórmulas típicas de resistencias térmicas en los cables de un solo conductor:

Resistencia térmica entre el conductor y la pantalla por unidad de longitud (T1).

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

Donde:

ρ_T : Resistividad térmica del material en [Ω-m].

t1: Espesor del aislamiento entre el conductor y la pantalla en [mm].

d_c: Diámetro del conductor en [mm].

T2- Resistencia térmica entre la pantalla y la cubierta por unidad de longitud.

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left[1 + \frac{2t_2}{d_s} \right]$$

Donde:

ρ_T : Resistividad térmica del material en [Ω-m].

t₂: Espesor del material entre la pantalla y la cubierta en [mm].

d_s: Diámetro externo de la pantalla en [mm].

T3- La resistencia térmica entre la superficie del cable y el medio circundante por unidad de longitud.

Es la resistencia térmica entre el cable de potencia (o grupo de cables de potencia) y el terreno circundante. En los cables establecidos en una formación plana no todos funcionan a la misma temperatura y en este caso la resistencia térmica T3 se aplica al cable de potencia más caliente.

Tres cables unipolares en formación plana y equidistantes esta representado por la siguiente ecuación:

$$T_s = \frac{\rho_T}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2L}{d_e} + \sqrt{\left(\frac{2L}{d_e} \right)^2 - 1} \right) + \ln \left(1 + \left(\frac{2L}{s} \right)^2 \right) \right]$$

Donde:

ρ_T : Resistividad del terreno en [Ω -m].

L: Distancia desde la superficie de la tierra a los cables en [m].

d_e : Diámetro exterior de un cable en[mm].

S: Separación entre cables en [mm].

Tres cables unipolares en *formación plana* o en contacto esta representado por la siguiente ecuación:

$$T_s = \rho_T \left[0.475 \ln \left(\frac{4L}{d_e} \right) - 0.346 \right]$$

Donde:

ρ_T : Resistividad del terreno en [Ω -m].

L: Distancia desde la superficie de la tierra a los cables en[m].

d_e : Diámetro exterior de un cable en[mm].

En la tabla 4.4 se muestra las resistividades típicas térmicas para una amplia gama de materiales.

Tabla 4.4. Resistividades térmicas de una gama de materiales

Material	Resistividad térmica (ρ) (km/W)
Aislamiento XLPE	3.5
Aislamiento PE	3.5
Aislamiento EPR para cables mayores a 3 kV	5.0
Cubiertas protectoras de PVC mayores a 35 kV	5.0-6.0
Cubiertas de PE	3.5
Instalación de ductos de concreto	1.0
Ductos de asbesto	2.0

4.3.1 Pérdidas en el conductor

La temperatura del conductor del cable de potencia debe ser mantenida por debajo de la temperatura nominal del aislamiento de los cables de potencia.

En la figura 4.5 se muestra el aumento de la temperatura del conductor del cable de potencia considerando la resistencia térmica y el flujo de calor a través del conductor y el aislamiento.

La fuente que genera el calor es el conductor, agregando las capas constituyentes del propio cable, es como se determinan las temperaturas por medio de la siguiente ecuación:

$$I^2 R(T_1 + T_2 + T_3)$$

Donde:

I = Corriente en [A].

R = Resistencia en [Ω].

- T1 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre el conductor y la pantalla en [km/W].
 T2 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la pantalla y la armadura en [km/W].
 T3 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la superficie del cable y el medio circundante en [km/W].

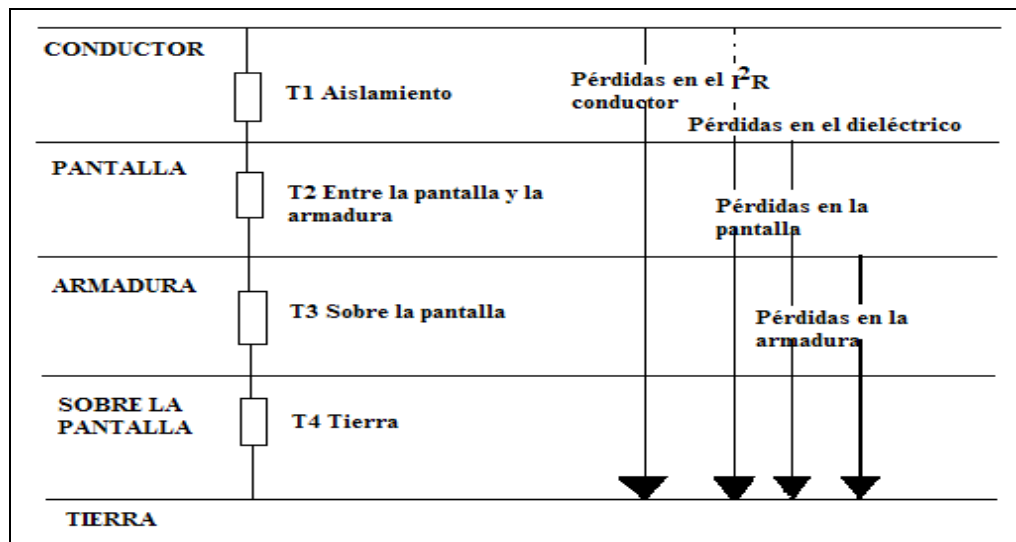


Figura 4.5 Modelo de las fuentes de calor térmico y resistencia térmica.

4.3.2 Pérdidas en el aislamiento XLPE.

Las pérdidas dieléctricas se forman dentro de una resistencia térmica. Si bien todas las pérdidas dieléctricas pasan a través de las resistencias térmicas T2, y T3, el cálculo del aumento de la temperatura debido al movimiento de las pérdidas dieléctricas a través de T1 es menos evidente. El aumento de temperatura debido al movimiento de las pérdidas dieléctricas a través del cable de potencia está dado por la siguiente ecuación:

$$W_d(0.5T_1 + T_2 + T_3)$$

Donde:

W_d = Pérdidas en el aislamiento de un cable de energía ó calor generado en el aislamiento por unidad de longitud en [W/m].

T1 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre el conductor y la pantalla en [km/W].

T2 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la pantalla y la armadura en [km/W].

T3 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la superficie del cable y el medio circundante en [km/W].

4.3.3 Pérdidas en las pantallas o cubiertas metálicas.

Las pérdidas en la pantalla se describen como una relación entre el conductor de I^2R y las pérdidas en el aumento de temperatura debido al paso de éstos a través del cable de potencia se presenta la siguiente ecuación:

$$\lambda_1 I^2 R (T_2 + T_3)$$

Donde:

λ_1 = Pérdidas de potencia en la pantalla causadas por la circulación de corriente ó razón de pérdidas, o calor generado, en la pantalla entre las pérdidas del conductor sin unidades.

I = Corriente en [A].

R = Resistencia en [Ω].

- T2 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la pantalla y la armadura en [km/W].
 T3 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la superficie del cable y el medio circundante en [km/W].

Sumando todas estas pérdidas conduce a la ecuación que se describe como aumento de la temperatura de un cable de potencia.

$$\Delta\theta = (I^2 R + 0.5 W_d) T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_3$$

En esta ecuación, n se utiliza para representar el número de conductores de corriente en el cable de potencia.

$\Delta\theta$ = Es la diferencia de temperatura entre el conductor del cable de potencia y el terreno circundante ($\theta_{\text{conductor}} - \theta_{\text{tierra}}$).

Por lo tanto la ecuación que describe la *corriente máxima (Ampacidad)* en el cable de potencia es la siguiente:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d [0.5 T_1 + n(T_2 + T_3)]}{R T_1 + n R (1 + \lambda_1) T_2 + n R (1 + \lambda_1) T_3}}$$

Donde:

$\Delta\theta$ = Es la diferencia de temperatura entre el conductor del cable de potencia y el terreno circundante, conductor-Tierra.

W_d = Pérdidas en el aislamiento de un cable de energía ó calor generado en el aislamiento por unidad de longitud en [W/m].

T1 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre el conductor y la pantalla en [km/W].

I = Corriente en [A].

R = Resistencia en $[\Omega]$.

λ_1 = Pérdidas de potencia en la pantalla causadas por la circulación de corriente.

T2 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la pantalla y la armadura en [km/W].

T3 = Resistencia térmica por unidad de longitud entre la superficie del cable y el medio circundante en [km/W].

n = Se utiliza para representar el número de conductores de corriente en el cable de potencia.

4.4 Regulación de tensión

El concepto de regulación se define de la siguiente manera: La regulación de tensión de una línea es el incremento de tensión en el extremo de recepción, expresado como un porcentaje de la tensión a plena carga, cuando se retira la carga a un cierto factor de potencia mientras que la tensión en el extremo de envío permanece constante. En forma de ecuación:

$$\% \text{regulación} = \frac{|V_{sc}| - |V_{pc}|}{|V_{pc}|} \times 100$$

Donde:

$$\begin{aligned} |V_{sc}| &= E_g = \text{tensión sin carga} \\ |V_{pc}| &= E_r = \text{tensión a plena carga} \end{aligned}$$

En los diagramas fasoriales de la figura 4.6 se puede observar que se requiere una tensión de envío (E_g) mayor (fig. 4.6a) para mantener constante la tensión recibida (E_r), cuando la corriente requerida por la carga está desfasada en atraso con respecto a la tensión, en comparación con la misma corriente en fase con E_r (fig. 4.6b). Se requiere una tensión de envío todavía menor para mantener la tensión recibida, cuando la corriente tomada por la carga está desfasada en adelanto.

Se dice que, en el primer caso (factor de potencia atrasado) la regulación es mayor, mientras que es menor (factor de potencia unitario) o incluso negativa, cuando el factor de potencia está en adelante. Por lo tanto, la regulación de la tensión está ligada al factor de potencia de la carga.

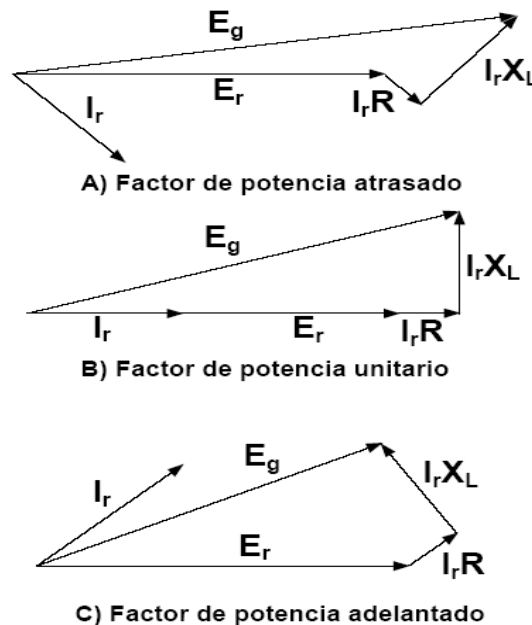


Figura 4.6. Diagramas fasoriales. Factores de Potencia

Los cables a emplear deben cumplir con la especificación CFE E0000-17. La tensión de operación entre fases puede exceder la tensión nominal entre fases de los cables, en 5% durante la operación continua del cable ó en 10% en emergencias de una duración no mayor a 15 minutos.

Este criterio se aplica para líneas de alta tensión de mediana y gran longitud, en base a la expresión siguiente:

$$(PVR) \frac{V^2}{Z_e} 2.005 \cdot 0.002082 L$$

Donde:

V= Tensión nominal de la línea en [kV].
 Z_e = Impedancia característica de la línea en [Ω].

$$Z_e = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$

Z= Impedancia serie de la línea en [Ω /Km].

Y= Admitancia total de la línea.

L= Longitud en [km] de la línea.

PVR= Capacidad de transmisión por regulación de tensión en [MW].

Es importante mencionar que las subestaciones Texcoco, Topilejo y próximamente Santa Cruz, cuentan con Compensadores Estáticos de potencia reactiva (CEV's), estos dispositivos se utilizan para mantener estable la tensión inyectando a la red potencia reactiva capacitiva o inductiva, para la tensión de 400 kV, por lo que podemos considerar que la regulación de tensión, se controla por medio de CEV's independientemente de la caída de tensión que pueda presentar una línea en específico.

4.5 Corto circuito

Uno de los aspectos a los que se les pone mayor atención en el diseño de los sistemas eléctricos, es el control adecuado de los cortos circuitos o fallas, ya que éstas pueden producir interrupciones de servicio indeseables. En cualquier sistema eléctrico, para los fines del diseño, construcción y operación se deben realizar los estudios de corto circuito principalmente con los objetivos siguientes:

- a) Dimensionar o determinar las capacidades interruptivas de los dispositivos de protección para fines de especificación.
- b) Calcular los valores de las corrientes de corto circuito de efectos dinámicos y térmicos como información para el diseño de equipos y aparatos eléctricos.
- c) Dar valores de fallas para el diseño de redes de tierra en subestaciones eléctricas, centrales y líneas de transmisión (datos de referencia).
- d) Ajustar y coordinar los dispositivos de protección.
- e) Analizar el comportamiento de algunas componentes de los sistemas.
- f) Los valores mínimos de falla se usan para establecer la sensibilidad requerida de los relevadores de protección.

Para los fines de los estudios de corto circuito, se deben considerar los diferentes tipos de fallas y la principal para el cálculo y obtención de la corriente de corto circuito monofásico que es el más común y a suceder en cables aislados, principalmente en los empalmes.

4.6 Componentes simétricas

El método de componentes simétricas es una técnica poderosa para analizar sistemas trifásicos desbalanceados, es básicamente una técnica de modelado que permite llevar a cabo análisis y diseños sistemáticos de sistemas trifásicos.

En general los cálculos son muy prácticos para diseño de sistemas y selección de equipo y para las distintas aplicaciones en protecciones mediante relevadores. El método de componentes simétricas fue desarrollado por Charles L. Fortescue de Westinghouse cuando investigaba matemáticamente la operación de los motores de inducción bajo condiciones desbalanceadas. El trabajo de Fortescue prueba que un sistema desbalanceado de n fasores relacionados, se puede resolver con n sistemas de fasores balanceados llamadas componentes simétricas de los fasores originales.

Los conjuntos balanceados de componentes son:

- Componentes de secuencia positiva: formado por tres fasores de igual magnitud, desfasados 120° entre si y con la misma secuencia de fase que el sistema original.
- Componentes de secuencia negativa: formado por tres fasores de igual módulo, con desfase de 120° uno de otro y con la secuencia de fases opuesta a la de los fasores originales.
- Componentes de secuencia cero: formada por tres fasores de igual módulo y con desfase nulo.

Cuando se resuelve un problema utilizando componentes simétricas, se acostumbra designar las tres fases del sistema como a, b y c, de forma que la secuencia de fase de las tensiones y las corrientes en el sistema es abc. Así, la secuencia de fase de las componentes de secuencia positiva es abc y la secuencia de fase de las componentes de secuencia negativa es acb. Si los fasores originales de tensión se designan como V_a , V_b y V_c , los tres conjuntos de componentes simétricas se designan agregando un subíndice (o superíndice) adicional 1 para las componentes de secuencia positiva, 2 para las de secuencia negativa y 0 para las de secuencia cero. Una vez obtenidos los resultados en el

dominio de las componentes simétricas, los valores reales en cantidades de fase se calculan haciendo uso de una transformación inversa adecuada.

La figura 4.7 muestra los tres sistemas equilibrados de vectores (considerándolos como tensiones) y la suma gráfica de los componentes para obtener los fasores desbalanceados.

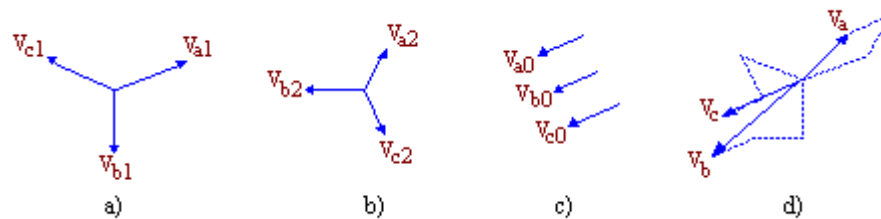


Figura 4.7. Componentes de secuencia: a) positiva, b) negativa, c) cero. d) Suma gráfica de ellas

Como cada uno de los vectores desequilibrados originales es igual a la suma de sus componentes, se puede escribir:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \end{aligned}$$

Si se consideran como referencia los fasores V_{a1} , V_{a2} y V_{a0} , respectivamente se tiene:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_{a1} \angle 0^\circ & V_{a2} &= V_{a2} \angle 0^\circ & V_{a0} &= V_{a0} \angle 0^\circ \\ V_{b1} &= V_{a1} \angle 240^\circ & V_{b2} &= V_{a2} \angle 120^\circ & V_{b0} &= V_{a0} \angle 0^\circ \\ V_{c1} &= V_{a1} \angle 120^\circ & V_{c2} &= V_{a2} \angle 240^\circ & V_{c0} &= V_{a0} \angle 0^\circ \end{aligned}$$

Designando como "a", al operador que origina un desplazamiento de 120° , es decir:

$$a = 1 \angle 120^\circ = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Esta última se puede escribir como:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\ V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \end{aligned}$$

La ecuación anterior se puede escribir en forma matricial, tal como se muestra en la expresión siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Ó bien:

$$\begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación T permite obtener las componentes de fase abc a partir de las de secuencia 012. Esta matriz es no singular y por lo tanto existe su inversa, de manera que es posible obtener las componentes de secuencia 012 a partir de las de fase abc. Premultiplicando por la inversa de T, se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 0,1,2 \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} = [\mathbf{T}]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}$$

En que:

$$[\mathbf{T}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix}$$

Y la ecuación queda:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a0} \\ \mathbf{V}_{a1} \\ \mathbf{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones anteriores son válidas también para las corrientes, es decir:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{a0} \\ \mathbf{I}_{a1} \\ \mathbf{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{a0} \\ \mathbf{I}_{a1} \\ \mathbf{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix}$$

Se puede concluir que si en un sistema trifásico no existen conductor neutro o conexiones a tierra, o si el sistema está balanceado, la corriente de secuencia cero es nula.

4.7 Potencia en función de las componentes simétricas

Si se conocen las componentes de secuencia de la corriente y tensión, se puede calcular directamente la potencia suministrada en un circuito trifásico a partir de las componentes.

La potencia compleja total transmitida en un circuito trifásico por 3 líneas; a, b y c viene dada por:

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{P} + j\mathbf{Q} = \mathbf{V}_a \mathbf{I}_a^* + \mathbf{V}_b \mathbf{I}_b^* + \mathbf{V}_c \mathbf{I}_c^*$$

En que $\mathbf{V}_a$, $\mathbf{V}_b$ y $\mathbf{V}_c$ son las tensiones respecto al neutro en los terminales e $\mathbf{I}_a$, $\mathbf{I}_b$ e $\mathbf{I}_c$ las corrientes que entran al circuito por las tres líneas. Puede existir o no neutro.

Matricialmente se tiene:

$$\dot{\mathbf{S}} = [\mathbf{V}_a \mathbf{V}_b \mathbf{V}_c] \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^* \\ \mathbf{I}_b^* \\ \mathbf{I}_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \\ \mathbf{V} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}^*$$

Haciendo las operaciones correspondientes se obtiene:

$$\dot{\mathbf{S}} = 3(\mathbf{V}_{a0} \mathbf{I}_{a0}^* + \mathbf{V}_{a1} \mathbf{I}_{a1}^* + \mathbf{V}_{a2} \mathbf{I}_{a2}^*)$$

Es decir, esta transformación no es invariante a la potencia compleja.

4.8 Sistema por unidad

El sistema por unidad es una herramienta que es de mucha utilidad al momento de realizar análisis en sistemas de potencia con tensiones y corrientes diferentes, este método se explicará y aplicará para realizar el análisis entre las subestaciones Santa Cruz y La Paz.

Se define un valor por unidad (pu), al cociente de una cantidad cualquiera entre un valor base.

$$\text{cantidad en por unidad} = \frac{\text{cantidad real}}{\text{cantidad base}}$$

La cantidad y el valor base deberán tener las mismas unidades y el valor por unidad será una cantidad adimensional. Asimismo, el valor base siempre es un número real. Por lo tanto, el ángulo de la cantidad por unidad es igual al ángulo de la cantidad real.

4.8.1 Cantidades base.

Para el análisis de sistemas eléctricos se utilizan cuatro cantidades base:

Tabla 4.5. Cantidades base

Cantidad base	Unidades
Potencia	MVA
Tensión	kV
Corriente	A
Impedancia	Ω

Estas cantidades están relacionadas de tal manera que la selección de valores para dos de ellas, determina los valores base para las otras dos.

En un sistema trifásico, seleccionamos una potencia base trifásica y una tensión línea a línea, la corriente base y la impedancia base pueden calcularse como:

$$I_{Base} = \frac{KVA_{Base}}{KV_{Base} \times \sqrt{3}} [A]$$

$$Z_{Base} = \frac{1,000 \times (KV_{Base})^2}{KVA_{Base} [\Omega]} = Z_{Base} = \frac{(KV_{Base})^2}{MVA_{Base} [\Omega]}$$

La potencia base seleccionada no cambia en todos los puntos del sistema eléctrico, no así la tensión base, que al seleccionarlo en un punto cualquiera, afecta a todas las demás tensiones en el sistema a través de la relación de transformación de los transformadores.

Se definirán los siguientes valores para realizar el análisis de corto circuito en la tabla 4.6:

Tabla 4.6

Cantidad base		Unidades
Potencia	100	MVA
Tensión	400	kV
Corriente	144.33	A
Impedancia	1600	Ω

Es la potencia y tensión base utilizadas por la CFE al realizar cálculos de corto circuito con el Equivalente de Thevenin de la red. En la tabla 4.7 se muestran los valores en P.U. de impedancias de secuencia positiva y cero así como las corrientes de corto circuito para las subestaciones Santa Cruz (CRU-400) y La Paz (LAP-400).

Tabla 4.7 a Condición de demanda mínima, Diciembre de 2004

CLAVE	NOMBRE	VALORES DE CORRIENTES DE FALLA (A)				SECUENCIA POSITIVA		SECUENCIA CERO		RELACIONES		VOLTAJE Vb (P.U.)
		TRIFASICA		MONOFASICA		R1	X1	R0	X0	R0/X1	X0/X1	
		MAGNITUD	ANGULO	MAGNITUD	ANGULO	(P.U.)	(P.U.)	(P.U.)	(P.U.)			
BNR-400	Bernabe (San)	18 998,4	-86,38	19 002,8	-84,89	0,0004797	0,0075822	0,0010702	0,0075318	0,1411451	0,9933501	0,9988911
CRU-400	Cruz (Santa)	19 728,3	-86,38	20 782,1	-85,34	0,0004807	0,0073025	0,0007730	0,0061820	0,1058498	0,8485880	0,9741687
LAP-400	La Paz	20 434,8	-86,52	21 112,9	-85,28	0,0004287	0,0070503	0,0008373	0,0063387	0,1187591	0,8990639	0,9830541
TTH-400	Teotihuacan	23 181,7	-87,13	22 180,7	-84,71	0,0003118	0,0062186	0,0011780	0,0070193	0,1894294	1,1287640	1,0211998
VIC-400	Victoria	20 257,5	-86,72	20 075,9	-85,19	0,0004077	0,0071135	0,0009932	0,0072659	0,1396282	1,0214310	1,0035653

Tabla 4.7 b Condición de demanda máxima, Diciembre 2004

CLAVE	NOMBRE	VALORES DE CORRIENTES DE FALLA (A)				SECUENCIA POSITIVA		SECUENCIA CERO		RELACIONES		VOLTAJE Vb (P.U.)
		TRIFASICA		MONOFASICA		R1	X1	R0	X0	R0/X1	X0/X1	
		MAGNITUD	ÁNGULO	MAGNITUD	ÁNGULO	(P.U.)	(P.U.)	(P.U.)	(P.U.)			
BNR-400	Bernabe (San)	25 716,0	-86,16	23 717,5	-84,47	0,0003756	0,0056002	0,0010076	0,0069718	0,1798236	1,2449360	1,0397981
CRU-400	Cruz (Santa)	25 396,4	-86,07	24 649,9	-84,91	0,0003895	0,0056700	0,0007795	0,0061572	0,1374688	1,0859185	1,0142077
LAP-400	La Paz	26 386,2	-86,21	25 044,9	-84,80	0,0003616	0,0054582	0,0008438	0,0063018	0,1545981	1,1545672	1,0253773
TTH-400	Teotihuacan	29 829,7	-86,88	26 014,2	-84,13	0,0002634	0,0048315	0,0011756	0,0068946	0,2433210	1,4270544	1,0677738
VIC-400	Victoria	25 888,2	-86,44	23 702,0	-84,73	0,0003448	0,0055433	0,0009883	0,0071053	0,1782810	1,2817897	1,0455798

Tabla 4.7 c Condición de máxima disponibilidad, Diciembre 2005

CLAVE	NOMBRE	VALORES DE CORRIENTES DE FALLA (A)				SECUENCIA POSITIVA		SECUENCIA CERO		RELACIONES		VOLTAJE
		TRIFÁSICA		MONOFÁSICA		R1	X1	R0	X0	R0/X1	X0/X1	[Eb]
		MAGNITUD	ÁNGULO	MAGNITUD	ÁNGULO	(P.U.)	(P.U.)	(P.U.)	(P.U.)			(P.U)
BNR-400	Bernabe (San)	26 494,8	-86,16	25 106,5	-84,59	0,0003648	0,0054355	0,0008964	0,0062991	0,1649148	1,1588750	1,0260723
CRU-400	Cruz (Santa)	25 665,9	-86,08	25 013,4	-84,86	0,0003845	0,0056106	0,0007820	0,0060205	0,1393780	1,0730648	1,0120974
DVA-400	Deportiva	15 678,2	-86,31	12 902,0	-84,20	0,0005925	0,0091872	0,0022066	0,0150155	0,2401840	1,6343979	1,0977353
LAP-400	La Paz	26 580,0	-86,21	25 363,4	-84,80	0,0003589	0,0054184	0,0008294	0,0061652	0,1530735	1,1378140	1,0226678
TTH-400	Teotihuacan	30 136,4	-86,92	26 584,4	-84,29	0,0002573	0,0047826	0,0011059	0,0066423	0,2312333	1,3888551	1,0620319
VIC-400	Victoria	26 157,8	-86,44	23 995,9	-84,74	0,0003426	0,0055073	0,0009690	0,0069547	0,1759561	1,2628108	1,0426098

Las consideraciones que se tomaron para elaborar estos datos son los siguientes:

- El cálculo de las corrientes de falla y de sobretensiones temporales, se realizó considerando tensiones de prefalla unitarios.
- El cálculo de la magnitud de la tensión de la fase B, consideró una falla a tierra sólida en la fase A
- Los equivalentes de Thevenin y la magnitud de la tensión Vb se determinaron mediante la utilización de hojas de cálculo en Excel a partir de los valores de las corrientes de fallas trifásicas y monofásicas obtenidas mediante el simulador PSS/E.

4.9 Análisis de fallas de corto circuito

Los tipos de fallas más comunes son las siguientes:

- Fallas trifásicas
- Fallas monofásica (fase a tierra)
- Fallas bifásica (fase a fase)

La falla trifásica se considera como una falla simétrica, el sistema se mantiene balanceado por lo que sólo se considera las componentes de secuencia positiva, en el cual las corrientes están desfasadas 120° en secuencia ABC.

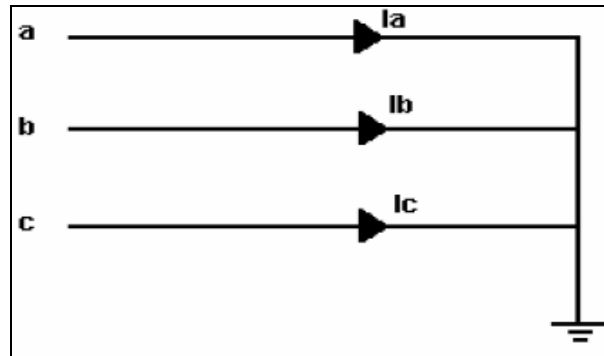


Figura 4.9. Falla trifásica sólida

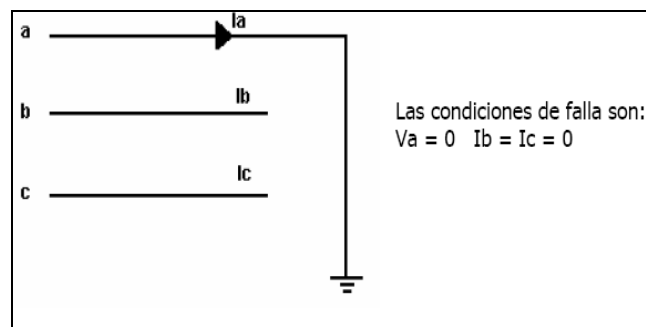


Figura 4.10. Falla Monofásica (Línea a tierra)

Las componentes simétricas de la corriente son:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_a}{3} \\ \frac{I_a}{3} \\ \frac{I_a}{3} \end{bmatrix}$$

Como se observa, existen tres corrientes de secuencia, además $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$ significa que las tres redes están conectadas en serie como se muestra en la figura 4.11.

Por lo tanto:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad V_a = V_f - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a2} - Z_0 I_{a0}$$

Como $V_a = 0$, entonces:

$$0 = V_f - Z_1 I_{a1} - Z_2 I_{a2} - Z_0 I_{a0}$$

$$V_f = Z_1 I_{a1} + Z_2 I_{a2} + Z_0 I_{a0}$$

$$V_f = I_{a1} (Z_1 + Z_2 + Z_0)$$

$$I_{a1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

La corriente de falla total sería:

$$I_a = I_f = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}, \text{ entonces:}$$

$$I_f = I_{a1} + I_{a1} + I_{a1} = 3 I_{a1}$$

$$I_f = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Si la falla ocurre en un sistema con neutro conectado a tierra a través de reactancia Z_n

$$I_f = \frac{3 V_f}{Z_1 + Z_2 + (Z_0 + 3 Z_n)}$$

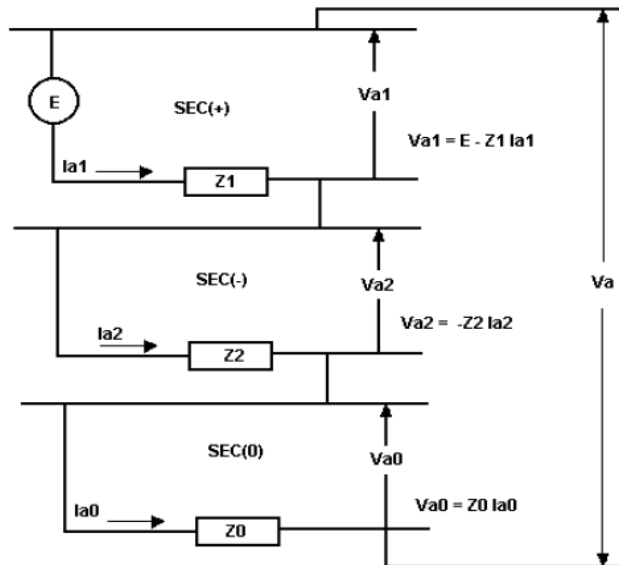


Figura 4.11. Conexión de las redes de secuencia. Falla monofásica (línea a tierra).

4.10 Cálculo de corrientes de corto circuito en un cable de potencia.

Para determinar la corriente de corto circuito en un cable de potencia, se debe conocer la impedancia del cable y el tipo de conexión de la pantalla metálica. Como se observó en el capítulo 1, los sistemas de cables de potencia con aislamiento XLPE a 400 kV y longitudes mayores a 10 km, están instalados en galerías o túneles y con las pantallas aterrizadas en Cross-Bonding, este método se explica en el tema 4.12.

Tomando como referencia los antecedentes del capítulo 1, se analizarán las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero para cables monopolares en caso de falla monofásica. Para ello se utilizarán las expresiones utilizadas por el fabricante de cables NEXAN para determinar las impedancias.

En la teoría de las componentes simétricas, las corrientes de secuencia positiva y de secuencia negativa constituyen sistemas trifásicos balanceados y por lo tanto no circulan corrientes a tierra, es decir:

Secuencia positiva:

$$I_{a1} + I_{b1} + I_{c1} = 0$$

Por lo tal, la corriente de neutro será:

$$I_n = I_{a1} + I_{b1} + I_{c1} = 0$$

Secuencia negativa:

$$I_{a2} + I_{b2} + I_{c2} = 0$$

Por lo tal, la corriente de neutro será:

$$I_n = I_{a2} + I_{b2} + I_{c2} = 0$$

Por otro lado, en secuencia cero, las corrientes I_{a0} , I_{b0} e I_{c0} tienen la misma magnitud y el mismo ángulo, es decir:

$$|I_{a0}| \angle \theta^\circ = |I_{b0}| \angle \theta^\circ = |I_{c0}| \angle \theta^\circ$$

Por lo tanto, la corriente de neutro será:

$$I_n = I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}$$

$$I_n = 3I_{a0}$$

Cuando existe una corriente de secuencia cero, ésta necesita de una trayectoria por donde circular o fluir.

Cuando la corriente de secuencia cero fluye a través de los conductores de un circuito trifásico, se presentan tres posibles trayectorias:

- 1.- Que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga únicamente por tierra. En éste caso, se presentan cuando los cables no tienen pantallas metálicas.
- 2.- Que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga por la pantalla metálica del o de los cables y por tierra, en paralelo. Ver Figura 4.12
- 3.- Que el regreso de la corriente de secuencia cero se haga únicamente por la pantalla metálica del o de los cables.

En el caso 3, puede presentarse cuando las pantallas metálicas están aisladas de tierra, además, las pantallas metálicas sirven de conductor de regreso a las corrientes de secuencia cero que circulan por los tres conductores.

Es por esto, que los valores de impedancia de secuencia cero, para los tres casos, será diferente dependiendo de la construcción del cable; trifásico o monofásico, así como, de la composición de los conductores y de las características físicas del propio cable.

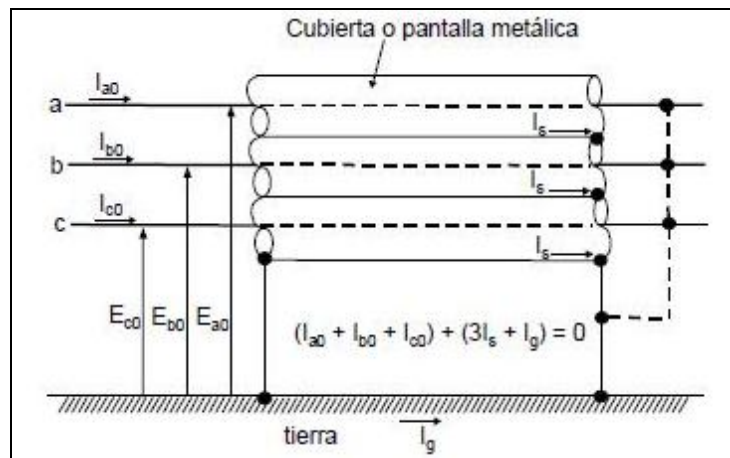


Figura 4.12 Circuito real de tres cables monofásicos con cubierta o pantalla metálica individual

El circuito equivalente que representa el cable con la pantalla conectada en dos puntos a tierra es

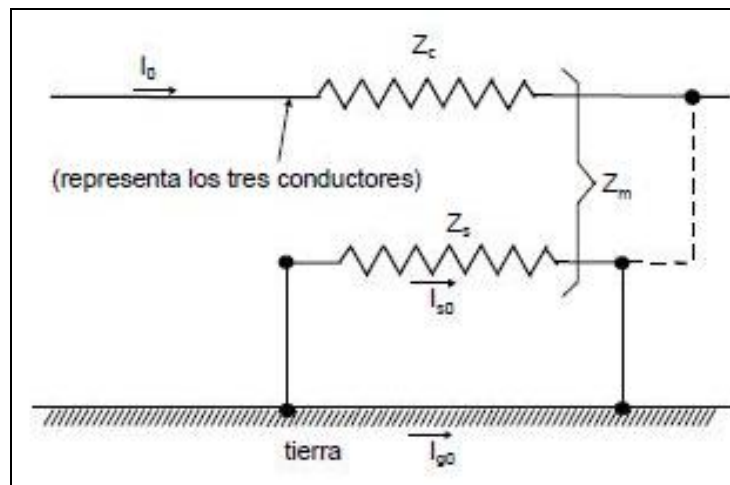


Figura 4.13 Circuito equivalente

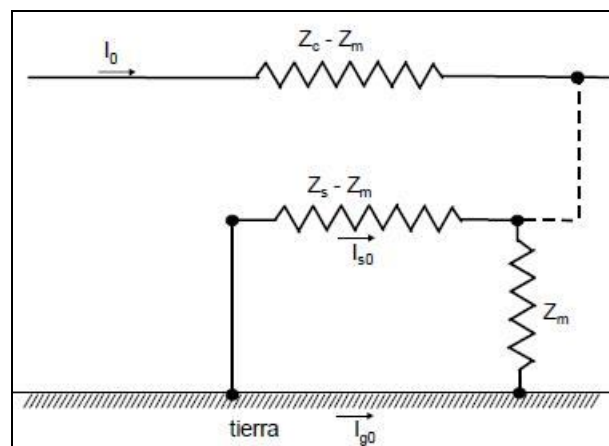


Figura 4.14 Circuito equivalente modificado con las impedancias expresadas en términos de secuencia cero

Para el caso de cables instalados en formación *plana con transposición de fases*, la impedancia de secuencia positiva y negativa por parte del fabricante de cables de potencia NEXAN, es la siguiente:

$$Z^+ = Z^- = R_1 + j\omega \cdot \left[0.5 + 2 \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot S}{r_0} \right]$$

Donde:

R1: Resistencia del conductor en C.A.
W: $2\pi \cdot f$ ($f = 60 \text{ Hz}$)
S: separación entre cables
 r_0 : radio del conductor

Para los diferentes casos en los que puede retornar la corriente de secuencia cero, se utilizan las siguientes expresiones:

- a) Retorno únicamente por pantalla metálica: $Z_0 = Z_a + Z_e - 2Z_m$
- b) El retorno es únicamente por tierra: $Z_0 = Z_a$

c) Retorno por pantalla y por tierra: $Z_0 = Z_a - \frac{Z_m^2}{Z_e}$

Donde:

Z_a : Impedancia en el conductor

Z_m : Impedancia mutua entre el conductor y la pantalla metálica

Z_e : Impedancia de la Pantalla Metálica

Impedancia en el conductor:

$$Z_a = R + 3 * R_s + j\mu_0 * f * \ln \left(\frac{2 * h^3}{0.779 * d_c * a_m^2} \right)$$

Donde:

R = Resistencia del conductor en c.a. a 90°C

R_s = Resistencia de tierra (ver tabla 4.8)

R_e = Resistencia de la pantalla metálica en c.a

h = Profundidad equivalente. (ver tabla 4.8)

d_c = Diámetro del conductor

d_m = Diámetro de la pantalla

a_m = Distancia geométrica entre conductores

f = frecuencia del sistema 60[Hz]

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [Henry/m]

Impedancia de la pantalla metálica:

$$Z_e = R_e + 3 * R_s + j\mu_0 * f * \ln \left(\frac{2 * h^3}{d_m * a_m^2} \right)$$

Impedancia mutua entre el conductor y la pantalla:

$$Z_m = 3 * R_s + j\mu_0 * f * \ln \left(\frac{2 * h^3}{d_m * a_m^2} \right)$$

Tabla 4.8 Profundidad equivalente del regreso por tierra e impedancia de la tierra a 60 Hz.

Resistividad de la tierra (ohm-m)	Profundidad equivalente D_e (m)	Resistencia equivalente de la tierra R_e (ohm/km)	Reactancia equivalente de la tierra X_e (ohm/km)
1	8.53×10^1	0.178	1.27
5	1.89×10^2	0.178	1.45
10	2.68×10^2	0.178	1.54
50	6.10×10^2	0.178	1.72
100	8.53×10^2	0.178	1.80
500	1.89×10^3	0.178	1.98
1 000	2.68×10^3	0.178	2.06
5 000	6.10×10^3	0.178	2.24
10 000	8.53×10^3	0.178	2.32

En el Anexo B, se muestra a manera de ejercicio, el cálculo preliminar de las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero, para un cable monopolar con aislamiento XLPE de 2000 mm² con datos de catálogo del fabricante ABB y las fórmulas del fabricante NEXAN.

4.11 Conexiones de pantallas.

Existen tres métodos básicos para conectar las pantallas metálicas de los cables de potencia, siempre cumpliendo su función electrostática.

- 1.- Conexión en un solo punto (solo en un extremo)
- 2.- Conexión en dos puntos (dos extremos de un tramo de cable)
- 3.- Cross-bonding o conexión entrecruzada de pantallas.

4.11.1 Conexión en un solo punto

Las pantallas metálicas se conectan a tierra en uno de los dos extremos del circuito, interrumpiendo la circulación de corrientes, la tensión inducida puede alcanzar valores peligrosos en el extremo no conectado a tierra. En este caso se recomienda el uso de Limitadores de tensión (LV's) en el extremo abierto.

En este método siempre debe existir un conductor de tierra paralelo, para evitar que la corriente regrese por el terreno en caso de fallas a tierra, ya que esto induce tensiones muy altas en el extremo no aterrizado de la pantalla. Esto se debe a que si no existe el conductor de tierra paralelo, la profundidad equivalente de regreso por tierra de la corriente es muy grande, porque en general la resistividad eléctrica del terreno es alta. El conductor de tierra paralelo también tiene la función de igualar los potenciales eléctricos en los dos extremos de la instalación. El conductor de tierra paralelo debe trasponerse a la mitad de la longitud de la instalación, para evitar que se induzcan corrientes en él como se muestra en la figura 4.15

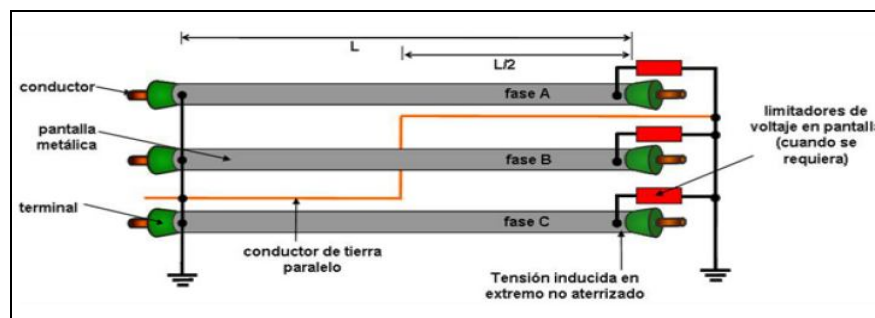


Figura 4.15. Conexión de pantalla en un solo punto.

La ventaja de este método, ausencia de corrientes inducidas en la pantalla metálica, por lo que no se genera calor por parte de la pantalla metálica y por consecuencia no hay pérdidas por efecto joule en la pantalla. Este método es utilizado para transmitir gran potencia en tramos relativamente cortos (< 5 km) ya que al no haber pérdidas en la pantalla metálica, la Ampacidad del cable mejora considerablemente.

4.11.2 Conexión en dos puntos.

Este método consiste en conectar a tierra los dos extremos de la pantalla metálica, en la pantalla se generan tensiones y corrientes inducidas, la pantalla también funciona como conductor de la corriente de corto circuito.

Este tipo de conexión de pantalla es utilizada en formación triangular o trébol con los conductores juntos, esto disminuye las pérdidas en la pantalla por las corrientes inducidas.

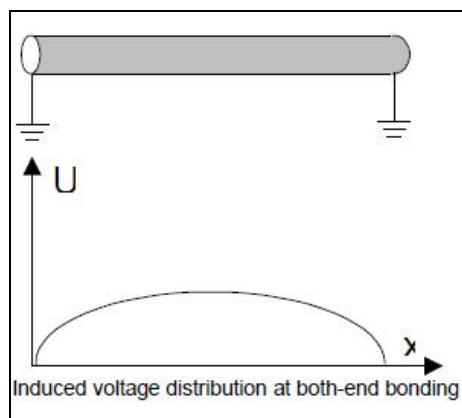


Figura 4.16 Tensión inducida con aterrizamiento en ambos extremos.

La tensión inducida decrece en los extremos (ver figura 4.16), lo cual representa un mayor seguridad para las personas. Las corrientes inducidas circulan entre los dos extremos conectados a tierra y es proporcional a la corriente que es transportada por el conductor del cable, lo cual genera pérdidas en la pantalla y disminuye la Ampacidad.

4.12 Pantallas cruzadas (Cross-bonding).

Este método consiste en intercambiar las pantallas entre las fases, en los empalmes, a $1/3$ y $2/3$ de la longitud total de la instalación. De esta forma cada pantalla metálica es sometida a tres flujos magnéticos desfasados 120° uno del otro, por lo que las corrientes inducidas son muy bajas. Para que la corriente inducida en cada pantalla sea igual a cero, los puntos de intercambio de las pantallas (cross-bonding), deben dividir a la instalación en tres partes de igual longitud, y la configuración de los cables debe ser plana con transposición física de fases (ver figuras 4.13 y 4.14) en los puntos de cross-bonding. Para llevar a cabo el cross-bonding se deben emplear empalmes con interrupción de pantalla semiconductora externa.

Esta configuración tiene las siguientes ventajas:

- 1.- Las tensiones y corrientes inducidas son atenuadas por la transposición de fases (conductores) y pantallas metálicas en circuitos balanceados.
- 2.- El retorno de la corriente de corto circuito se da por pantalla y tierra, la trayectoria que sigue en las pantallas, se divide en el punto de interconexión.
- 3.- Al haber menores corrientes inducidas, se mejora la Ampacidad del cable de potencia.

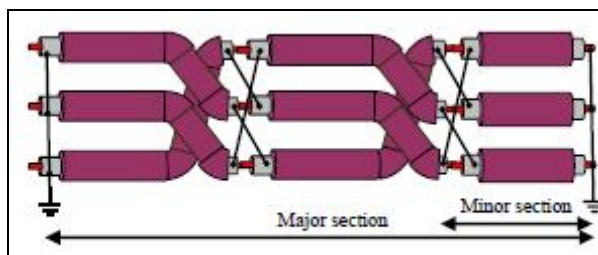


Figura 4.13 Transposición de fases en una sección mayor de circuito con cross-bonding.

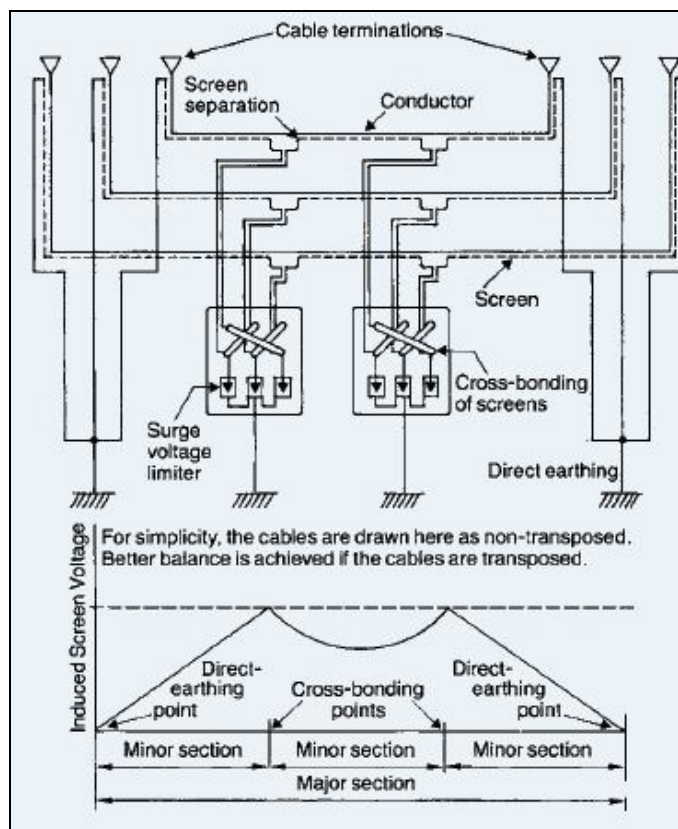


Figura 4.14 Método de aterrizamiento de pantallas cross-bonding.

En la tabla 4.9 se hace un pequeño resumen de la aplicación de los diversos sistemas de aterrizamiento y en la figura 4.15 se ilustra el comportamiento de la tensión inducida y ampacidad.

Tabla 4.9

Método de aterrizamiento	Tensión inducida en los extremos de la pantalla	Limitadores de Tensión	Aplicación típica
Conexión en dos puntos	No	No	Subestaciones, enlaces cortos, ampliamente utilizado en cables de alta, media y baja tensión
Conexión en un punto	Si	Si	Comúnmente utilizado para circuitos de hasta 1 km.
Cross-bonding	Solamente en los puntos de interconexión del cross-bonding	Si	Circuitos largos con múltiples empalmes.

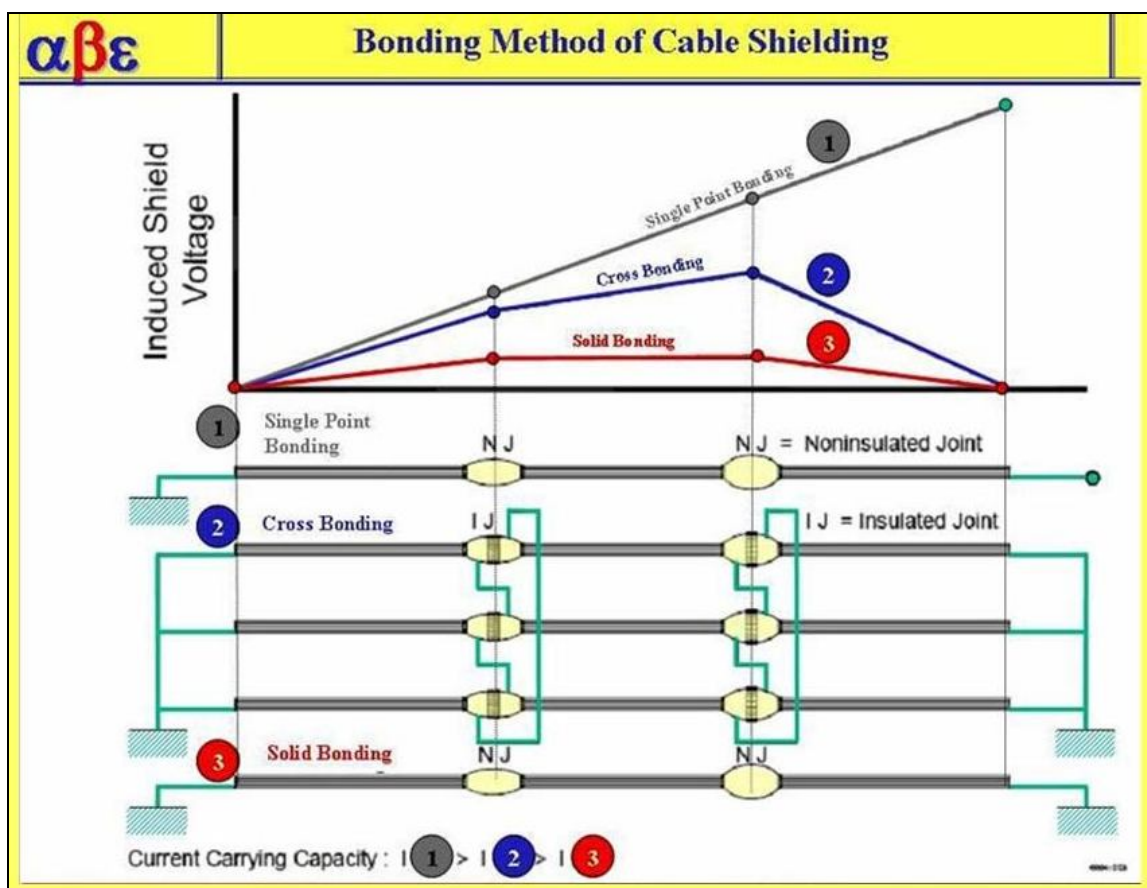


Figura 4.15.

Retomando las instalaciones hechas en los proyectos de “London Connection” y del aeropuerto en Barajas, España (ver capítulo 1), el método de aterrizamiento utilizado es la combinación de dos métodos; en los extremos del circuito, se hace la conexión en un solo punto para que el cable en esos tramos tenga una ampacidad óptima y en los tramos de cable intermedios, se hace cross-bonding con transposición de fases (ver figura 4.16), para optimizar y mantener tensiones y corrientes inducidas al mínimo posible.

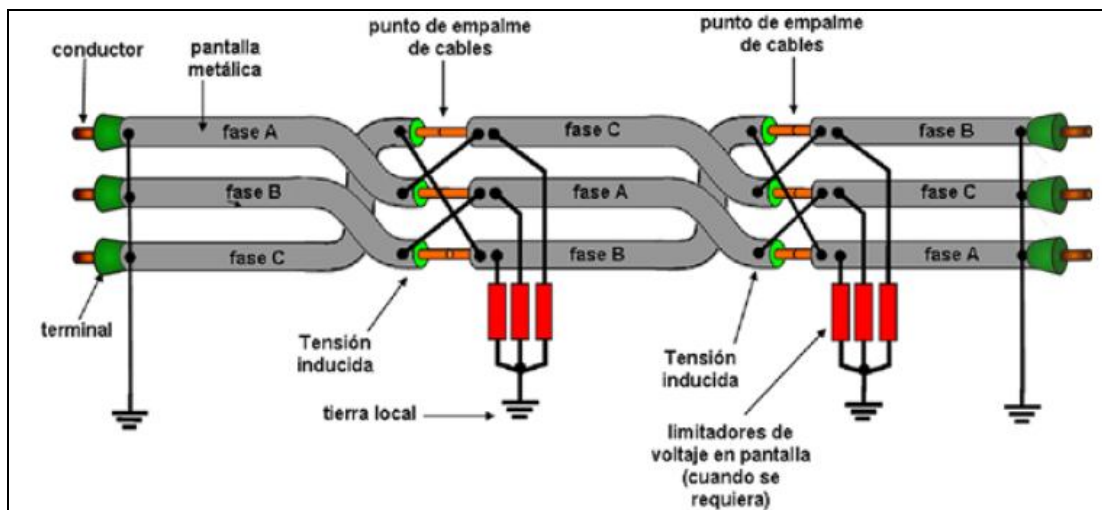


Figura 4.16. Transposición de fases con pantallas en cross-bonding y limitadores de Tensión.

En estos circuitos, son necesarios la utilización de limitadores de tensión, éstos deben cumplir con una tensión considerada segura, según la reglamentación que cada país o ciudad este vigente, en la norma NOM001-SEDE-2005, en el artículo 923-3, cables Subterráneos, inciso d), Tensiones inducidas en la pantalla metálica indica “Se recomienda que las tensiones inducidas en condiciones normales de operación no sean mayores de 55 V”.

Con las características de este método de conexión de pantalla y con los siguientes parámetros

- Intensidad de corto circuito monofásico:
 - Santa Cruz: 25,013.4 [A]*
 - La Paz: 25,363.4 [A]*
- Área de sección transversal de la pantalla metálica:
 - 95 [mm²]*
- Intensidad de corto circuito admisible en la pantalla metálica:
 - Hasta 33.5 [kA] durante 0.2 segundos*
- Intensidad de corto circuito admisible en la conductor (cobre, 2000 mm²):
 - Hasta 639.51 [kA] durante 0.2 segundo.*
- Capacidad de conducción de corriente en formación plana “Ver tablas A1 y A6a (De +170 [mm])” “al aire libre”:
 - Hasta 2145 [A]*
- Sobretensiones temporales:
 - Santa Cruz: 1.012097 [Vpu]*
 - La Paz: 1.022667 [Vpu]*
 - *Con 1.05 [Vpu] (420 kV) o más el cable sufre daño.*

Se puede afirmar que un sistema de cable subterráneo cumple eléctricamente con la funcionalidad y no presentaría daño destructivo en caso de una falla. Los valores de falla referidos son del año 2005 (Tablas 4.7). Como el valor de corto circuito se incrementa conforme crece la demanda (y la infraestructura), el dimensionamiento de la pantalla se puede ajustar el área de sección transversal de la pantalla a 150 [mm²] (con una intensidad admisible de corto circuito de 51 [kA] para 0.2 segundos), hasta 300 [mm²]; los fabricantes pueden construir cables con un valor óptimo para economizar materiales y costos. No así los niveles de sobretensión, tema que debe controlar y regular, en este caso CFE en la red.

En resumen:

Los dos circuitos aéreos actuales que conectan a las subestaciones Santa Cruz y La Paz, (formados cada uno por dos conductores por fase de 1113 KCM), y con una capacidad térmica de (2x1110 [A]); pueden ser sustituidos por cables de potencia subterráneos con las siguientes características:

Área de sección transversal de conductor de cobre:	2000 [mm ²]
Espesor de aislamiento XLPE (Um= 420 kV):	27 [mm]
Diámetro externo del cable:	131-135 [mm]
Área Sección transversal de pantalla metálica de cobre:	150 [mm ²]
Temperatura de operación nominal:	90°C
Temperatura en caso de corto circuito:	250°C
Temperatura de operación en sobrecarga:	105°C
Instalados en Galería o Túnel	
Conexión de pantallas metálicas en cross-bonding y en un solo punto en los extremos	
Conducción de corriente dentro del límite térmico: 1845[A] por circuito	
Costo aproximado de 6.1 millones de dólares estadounidenses por kilómetro de cable.	
Trayectoria aproximada de 11 kilómetros.	