

# Comportamiento de la fase librada por disparo monopolar de línea de transmisión con falla monofásica

E. Gonzalez-Dominguez<sup>1\*</sup>, F.S.Sellschopp-Sanchez<sup>1</sup>, V.M.Cabrera-Morelos<sup>1</sup>, R. Loera-Palomo<sup>2</sup>, H.Ramirez-

## Datos de Adscripción:

<sup>1</sup> TecNM / Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución y, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Col. Centro, 27000 Torreón, Coahuila, México.

<sup>2</sup> CONACYT-TecNM / Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución y, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Col. Centro, 27000 Torreón, Coahuila, México.

<sup>3</sup> TecNM / Instituto Tecnológico de la Laguna, Depto. Eléctrica-Electrónica-Renovables, Blvd. Revolución y, Av. Instituto Tecnológico de La Laguna s/n, Col. Centro, 27000 Torreón, Coahuila, México.

\* m.egonzalezd@correo.itlalaguna.edu.mx

**Resumen** – En este trabajo de investigación se analiza el comportamiento de la tensión inducida en una de las fases de una línea de transmisión que se encuentra librada debido al disparo monopolar por causa de una falla monofásica. La fase fallada se abre en ambos extremos de la línea provocando que ésta sea susceptible a las inducciones electromagnéticas y electrostáticas de las fases sanas, contribuyendo a la aparición de una tensión en dicho conductor. Para evaluar dicha tensión, se estudiaron dos líneas de transmisión con la misma longitud, pero una de ellas con transposiciones, donde la falla monofásica se aplicó a diferentes distancias, por lo que la fase debe librarse después de un tiempo mediante el esquema de disparo monopolar y de esta manera medir las tensiones que se inducen debidas a la interrupción de la corriente de corto circuito aplicados en los diferentes tramos de la fase fallada propuestos en esta investigación. De acuerdo a los resultados obtenidos, la mayor tensión inducida en ambas líneas de transmisión se obtuvo cuando la falla es más cercana a la fuente eléctrica, y la menor severidad se encontró con el esquema de las líneas transpuestas. Este estudio se realizó utilizando el software PSCAD/EMTDC, modelando líneas de transmisión largas empleando parámetros distribuidos utilizando tres segmentos para la aplicación de las fallas, con el caso de transposición y sin transposición de la línea de transmisión.

**Palabras Clave** – *falla monofásica, línea de transmisión, PSCAD/EMTDC, transposición.*

**Abstract** – In this paper, the behavior of the induced voltage in one of the phases of a transmission line that is released due to a single-pole trip due to a single-phase fault is analyzed. The faulty phase opens at both ends of the line, being it susceptible to electromagnetic and electrostatic inductions from the healthy phases, contributing to the presence of a voltage in that conductor. To evaluate this voltage, the single-phase fault was applied at different distances, so the phase must be released after a while using the single-pole tripping scheme and, in this way, measure the voltages that are induced due to the interruption of the short-circuit current from different sections of the faulted phase proposed in this investigation. According to the results

obtained, the highest induced voltage in both transmission lines was obtained when the fault is closer to the electrical source, and the lowest severity was found with the transposed lines scheme. This study was performed using PSCAD/EMTDC software, modeling long transmission lines employing distributed parameters using three segments for the application of faults, with the case of transposition and without transposition of the transmission line.

**Keywords** – *PSCAD/EMTDC, single-phase fault, transmission line, transposition.*

## I. INTRODUCCIÓN

Las líneas de transmisión en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) son elementos simples en su estructura física, pero constituyen la mayor parte del sistema y desempeñan un papel fundamental al transportar la energía eléctrica desde las centrales de generación hasta los puntos de consumo (yuan et al. 2007). Estas redes eléctricas se clasifican en aéreas, subterráneas y submarinas, siendo las redes aéreas las predominantes en los sistemas de transmisión (Braun et al. 2017). La adecuada modelación de las líneas de transmisión es crucial para realizar un análisis, operación y control preciso del sistema eléctrico en su conjunto (yuan et al. 2007).

El estudio de una línea de transmisión se divide según el tipo de análisis requerido. En el análisis transitorio electromagnético, se representan las líneas mediante modelos en el dominio de la fase y el dominio modal, realizando transformaciones entre estos dominios utilizando matrices que consideran los efectos transitorios. La línea se caracteriza por una serie de parámetros que describen su comportamiento en el tiempo, mientras que, en estado estable, la representación es independiente del tiempo. Al analizar una línea de transmisión o distribución que consta de múltiples conductores, es necesario emplear parámetros como la impedancia característica y la impedancia mutua, los cuales dependen de las especificaciones de los conductores y su espaciado. Para obtener estos parámetros, se pueden aplicar simplificaciones y supuestos que reducen la complejidad del modelo.

En los SEP, y en general en las líneas de transmisión, se presentan fenómenos transitorios como sobrevoltajes temporales, sobrevoltajes por maniobra y sobrevoltajes por descargas atmosféricas. Aunque estos fenómenos tienen una duración muy corta, pueden tener consecuencias significativas en los componentes del sistema. Comprender el comportamiento de estos fenómenos es crucial para coordinar el aislamiento del sistema y determinar los tiempos necesarios para ajustar las protecciones de los equipos.

El estudio de los modelos de líneas permite comprender el comportamiento de estos fenómenos mediante modelos matemáticos que son suficientemente precisos para un rango específico de frecuencias (Restrepo et al. 2008).

En este trabajo de investigación se evalúa el comportamiento de una línea de transmisión para un sistema eléctrico de potencia donde se le aplica una falla monofásica a tierra. Debido al tipo de falla considerado, se realiza una maniobra para los sistemas de línea de transmisión llamada Disparo y Recierre Monopolar (DRM); esta maniobra es utilizada la mayoría de las veces cuando ocurre esta falla en las líneas de transmisión, ya que entre el 80% y 90% de las fallas son del tipo fase a tierra, (Turnip, S. 1995).

El presente artículo tiene como finalidad el estudio y la comparativa de la tensión inducida en la fase librada de una línea de transmisión con transposición y sin transposición aplicando la falla fase-tierra a diferentes distancias, buscando los resultados de mayor y menor severidad de ese fenómeno inducido.

## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

Los sistemas considerados son modelados en PSCAD/EMTDC, y están compuestos por unidades generadoras de 500 kV por lo que están clasificados como Sistemas Eléctricos de Potencia de Extra alto voltaje, con una línea de transmisión trifásica de 1 conductor por fase con longitud de 344 km dividida en 3 segmentos transpuestos para el primer escenario. El segundo escenario no se considera la transposición en la línea de transmisión con la finalidad de analizar los voltajes y corrientes inducidos en la fase librada. Cada segmento de la línea de transmisión tiene una longitud de 114.666 km, los sistemas cuentan con unidades de carga alimentadas a 288 kV por fase, y la línea está diseñada empleando el modelado con parámetros dependientes de la frecuencia J. Martí.

### A. Modelado de línea de Transmisión para transitorios electromagnéticos.

El modelo de J. Martí (Martí, J. R. 1982). utiliza matrices de transformación constantes en el dominio real para la descomposición Fase-Modo. Sin embargo, este enfoque presenta problemas de precisión cuando se aplican a líneas desbalanceadas. Debido a la distribución de las pérdidas a lo largo de la línea y a la dependencia de los parámetros con la frecuencia, resulta más conveniente desarrollar las ecuaciones de la línea en el dominio de la frecuencia (Restrepo et al. 2008). Esto se ilustra en las ecuaciones (1) y (2):

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega)I_k(\omega) + E_{kh}(\omega) \quad (1)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega)I_m(\omega) + E_{mh}(\omega) \quad (2)$$

Donde

$$E_{kh} = A(\omega)F_{pk} = [V_k(\omega) + Z_c(\omega)I_k(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad (3)$$

$$E_{mh} = A(\omega)F_{pm} = [V_m(\omega) + Z_c(\omega)I_m(\omega)]e^{-\gamma(\omega)l} \quad (4)$$

Son las fuentes de voltaje historiales en los nodos  $k$  y  $m$ . La impedancia característica  $Z_c$  y la constante de propagación  $\gamma$  de las ecuaciones (3) y (4), se ilustran en las ecuaciones (5) y (6):

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{G'(\omega) + j\omega C'(\omega)}} \quad (5)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j\omega L'(\omega))(G'(\omega) + j\omega C'(\omega))} \quad (6)$$

El circuito equivalente de las ecuaciones (1) y (2) en el dominio de la frecuencia, se ilustra en la figura 1. Transformando las ecuaciones (1) y (2) al dominio del tiempo, se obtienen las ecuaciones (7) y (8):

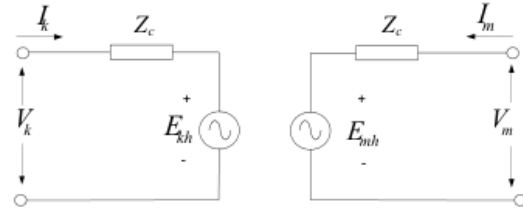
$$v_k(t) = Z_c * i_k(t) + [v_m(t) + Z_c * i_m(t)] \quad (7)$$

$$v_m(t) = Z_c * i_m(t) + [v_k(t) + Z_c * i_k(t)] \quad (8)$$

La evaluación de las ecuaciones (7) y (8) requiere de sintetizar la impedancia característica  $Z_c$  y la función de propagación  $A$ , debido a la naturaleza irracional de  $\gamma$  y  $Z_c$ , con lo cual se obtienen exponenciales en el dominio del tiempo, para aplicar técnicas recursivas para obtener rápidamente una solución, (Martí, J. R. 1982).

Figura 1.

Circuito equivalente del modelo de J. Martí en el dominio de la frecuencia.



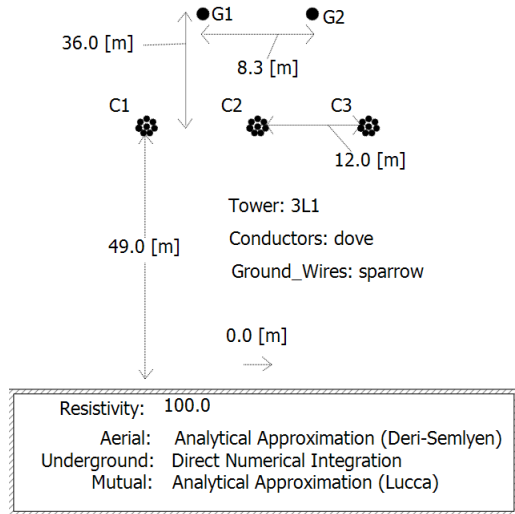
El modelo de J. Martí no es muy exacto en bajas frecuencias y para secciones de línea muy cortas, debido a las imprecisiones presentes para los cálculos en el dominio del tiempo (Noda et al. 1996).

### B. Línea de Transmisión.

El sistema de transmisión debe asegurarse de no introducir ningún desequilibrio en la energía transportada. Sin embargo, debido a la geometría de las torres de transmisión, se crean desequilibrios debido a que las distancias entre fases y entre las fases y tierra no son iguales, como se muestra en la Figura 2. Como resultado, se generan desequilibrios en los flujos de energía.

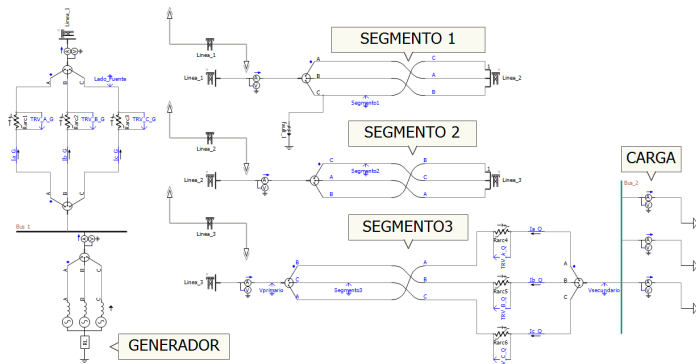
Por lo tanto, la geometría de las torres en las líneas de transmisión de alta tensión crea una asimetría en la impedancia, lo cual a su vez provoca desequilibrios correspondientes en la tensión y corriente en el extremo de la línea.

**Figura 2.** Geometría de la torre y configuración de los conductores en (PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3).



La asimetría de la línea puede ser eliminada en la frecuencia fundamental mediante la técnica de transposición de fase, que implica dividir la línea en secciones múltiples de tres. Como resultado, las transposiciones son comúnmente utilizadas en líneas de transmisión largas como un método para equilibrar la impedancia y admitancia de la línea a la frecuencia fundamental. La transposición en las líneas de transmisión implica cambiar la posición de las fases en el circuito, tal como se ilustra en la Figura 3. En la figura 4 se muestra la misma línea de transmisión, pero sin las transposiciones.

**Figura 3.** Sistema eléctrico de potencia modelado en (PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3). con 3 segmentos transpuestos, falla ubicada en el segmento 1, elaboración propia.

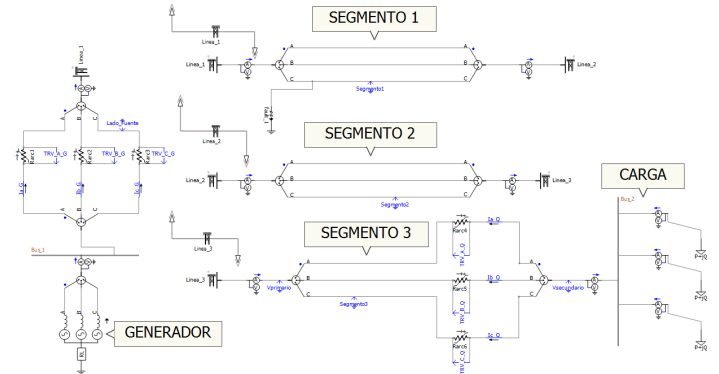


En general, en los estudios de transitorios electromagnéticos, es común representar las líneas de transmisión como si estuvieran idealmente transpuestas. Sin embargo, una línea con una sección de transposición real puede considerarse como si estuviera idealmente transpuesta solo a la frecuencia fundamental, pero no para todo el rango de frecuencias. Dommel, H. W. (1992), (Portela et al. 2002). Los detalles del conductor utilizado en la línea de transmisión y sus características se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Conductor utilizado en la línea de transmisión.

Nombre	Radio (mm)	dc.res. (Dc ohms/km)	No, Trenzados	Radio de Trenzado (mm)	Permeabilidad
Dove	23.5458	0.10094	28	3.71602	1

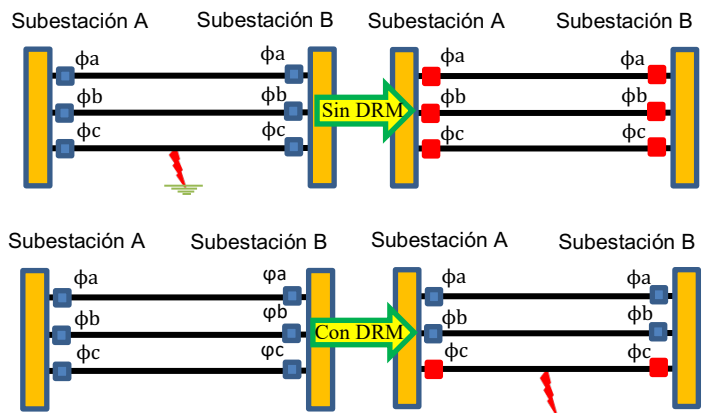
**Figura 4.** Sistema eléctrico de potencia modelado en PSCAD, con 3 segmentos No transpuestos, falla ubicada en el segmento 1, elaboración propia.



**C. Maniobra de protección ante una falla monofásica, DRM.**

Ante una falla monofásica, se puede emplear el esquema DRM para evitar la interrupción total de la línea de transmisión. Mediante la implementación de este esquema, las fallas de fase a tierra se solucionan abriendo ambos extremos de la fase afectada, mientras que las otras dos fases permanecen cerradas, como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5.** Esquema de la maniobra de protección de los sistemas de transmisión para falla monofásica a tierra DRM.



- Sin DRM: En ausencia del esquema DRM, las fases de la línea de transmisión se abren de manera tri-polar para eliminar la falla, lo que resulta en la interrupción total del flujo de potencia.
- Con DRM: Con la implementación del esquema DRM, solo se abre la fase afectada, lo que permite resolver la falla sin interrupción completa de la línea. Sin embargo, el flujo de potencia posterior a la falla es menor que el flujo previo, aproximadamente alrededor del 60%.

**D. Acoplamiento Electroestático y Electromagnético hacia la fase librada.**

En un esquema DRM se aísla la fase afectada al abrir los interruptores en ambos extremos de la línea, lo que teóricamente debería eliminar la corriente de falla. Sin embargo, el conductor de la fase fallada aún permanece energizado debido al acoplamiento electromagnético y electrostático con las fases paralelas que están energizadas. Esto implica que se mantiene una tensión en el punto de falla, lo que puede mantener la corriente de falla. Anderson, P. M. (1999).

La fase afectada se acopla tanto electromagnética como electrostáticamente con las fases no afectadas, siendo el acoplamiento capacitivo el más significativo. La transposición de las líneas afecta esta capacitancia, y si la transposición es completa, se logran capacitancias iguales, como se muestra en la Figura 6. Anderson, P. M. (1999).

La fuente que alimenta una línea de transmisión completamente transpuesta y simétrica puede ser dividida en dos componentes: uno real y otro imaginario. Kimbark, E. W. (1964).

$$V_a = E \tag{9}$$

$$V_b = -0.5 E - j 0.866 E \tag{10}$$

Primer grupo:

$$V_{a^1} = E \tag{11}$$

$$V_{b^1} = -0.5 E \tag{12}$$

$$V_{b^1} = -0.5 E \tag{13}$$

Segundo grupo:

$$V_{a^2} = 0 \tag{14}$$

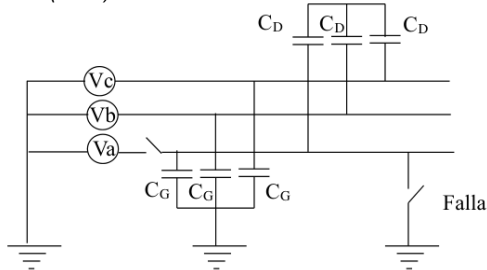
$$V_{b^2} = -j 0.866 E \tag{15}$$

$$V_{b^2} = +j 0.866 E \tag{16}$$

Debido a la simetría del segundo grupo con respecto a la fase A, esta fase está exactamente a un potencial a tierra.

**Figura 6.**

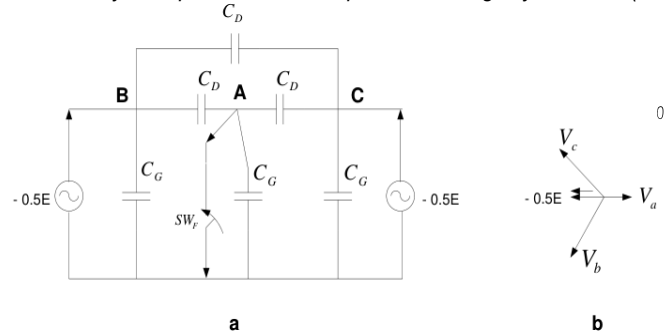
Diagrama de línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta Kimbark, E. W. (1964).



En el segundo grupo de fuentes, no hay tensión a lo largo de la trayectoria de la falla cuando la fase A está abierta, y no hay corriente cuando la trayectoria de la falla está cerrada (Yanque Montufar, M. 2014). La figura 7.a representa un esquema monofásico de una línea completamente transpuesta y simétrica. En este ejemplo, la fase A se encuentra en condición abierta, con una capacitancia  $C_D$  entre cada par de fases y una capacitancia  $C_G$  de cada fase a tierra. La conexión de la fase A a tierra se muestra como  $SW_F$ . El fasor de la tensión efectiva se ilustra en la Figura 7.b.

**Figura 7.**

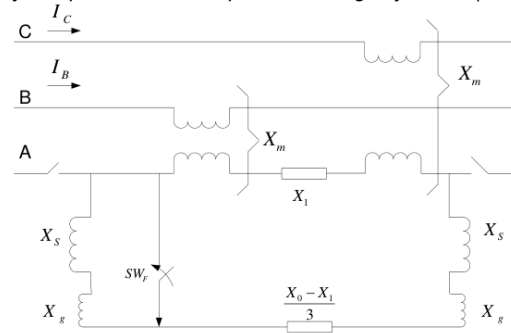
Diagrama del acoplamiento electroestático de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta. Eztergaloy et al. (1992).



Por otro lado, los acoplamientos magnéticos de las fases contribuyen también en el fenómeno, figura 8, induciendo corriente en la fase A cuando está abierta. La determinación precisa de todos estos parámetros involucra el análisis de los transitorios electromagnéticos, ya que la inducción mutua es la suma de múltiples variables dinámicas que incluyen las corrientes que circulan por las fases no afectadas, la carga de la línea adyacente, el método utilizado para extinguir el arco secundario, entre otros factores, (Yanque Montufar, M. 2014).

**Figura 8.**

Diagrama del acoplamiento electromagnético de una línea de transmisión simétrica y completamente transpuesta. Eztergaloy et al. (1992).

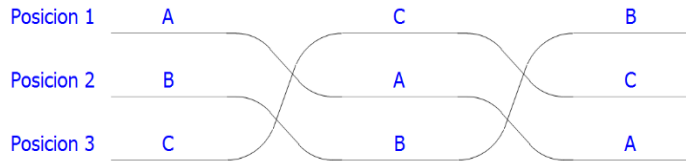


**E. Impedancia de Líneas Transpuestas.**

Para lograr la igualación de las impedancias mutuas, se lleva a cabo un intercambio regular de posiciones entre los conductores a lo largo de la línea. De esta manera, cada conductor ocupa la posición original de los otros conductores a una distancia uniforme. Este intercambio de posiciones de los conductores se conoce como transposición. Si se divide una línea en tres segmentos de igual longitud, separados por rotaciones de los conductores, se dice que la línea está completamente transpuesta o que existe una transposición simétrica. En la Figura 9 se muestra una línea con dos transposiciones aplicadas.

**Figura 9.**

Ciclo práctico de transposición de un circuito de 3 fases elaboración propia utilizando PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3.



Puede observarse que las impedancias no dependen de la designación de fase de los conductores, sino de la posición que ocupan en la línea. Entonces se tiene que para la sección 1:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z = R + R_g + j\omega kln \frac{D_e}{R_{MG}} \quad (17)$$

$$Z_{ab} = M1 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{12}} \quad (18)$$

$$Z_{ac} = M2 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{13}} \quad (19)$$

$$Z_{bc} = M3 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{23}} \quad (20)$$

Para la sección 2:

$$Z_{cc} = Z_{cc} = Z_{bb} = Z = R + R_g + j\omega kln \frac{D_e}{R_{MG}} \quad (21)$$

$$Z_{ca} = M1 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{12}} \quad (22)$$

$$Z_{cb} = M2 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{13}} \quad (23)$$

$$Z_{ab} = M3 = R_g + j\omega kln \frac{D_e}{D_{23}} \quad (24)$$

Para la sección 3:

$$Z_{bb} = Z_{cc} = Z_{aa} = Z \quad (25)$$

$$Z_{bc} = M_1 \quad (26)$$

$$Z_{ba} = M_2 \quad (27)$$

$$Z_{bc} = M_1 \quad (28)$$

Por lo tanto, la ecuación para encontrar la matriz de impedancias después de aplicar la transposición es:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_{M1} & Z_{M2} \\ Z_{M1} & Z_s & Z_{M3} \\ Z_{M2} & Z_{M3} & Z_s \end{bmatrix} \quad (30)$$

Donde:

$$Z_s = l \cdot Z \quad (31)$$

$$Z_{M1} = l_1 M_1 + l_2 M_3 + l_3 M_2 \quad (32)$$

$$Z_{M2} = l_1 M_2 + l_2 M_1 + l_3 M_3 \quad (32)$$

$$Z_{M1} = l_1 M_3 + l_2 M_2 + l_3 M_1 \quad (32)$$

En el caso especial en que las longitudes de los tramos de línea sean  $l_1 = l_2 = l_3 = l$ , se trata de una línea completamente transpuesta. Para este caso se cumple que las impedancias son  $Z_{M1} = Z_{M2} = Z_{M3} = Z_M$ . La matriz de impedancias al efectuar una transposición completa es:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_s & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_s \end{bmatrix} \quad (33)$$

Es decir, el efecto de realizar transposición completa en una línea es la de balancear la matriz de impedancias. Si existe carga y generación balanceada, la línea no incluirá desbalance en el sistema, Stevenson Jr., W. D. (1996).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este trabajo se proponen varios casos de estudio considerando dos líneas de transmisión: un sistema con transposición y otro sin transposición. Los casos de estudio constan de aplicar una falla monofásica en los diferentes segmentos de la fase C de ambas líneas de transmisión considerando siempre aplicar la falla en el valor máximo de la tensión de fase fallada buscando obtener las mismas condiciones de aplicación de cortocircuito en los sistemas.

La falla monofásica aplicada tiene una duración de 25 milisegundos, donde posterior a ello opera el esquema DRM abriendo ambos extremos de la fase fallada. Durante la apertura de la fase C, se libera el cortocircuito aplicado a la fase y se registra la tensión inducida, con la finalidad de analizar los valores de tensión pico alcanzados en ese lapso de tiempo. El esquema de recierre del DRM no se considera dentro de este estudio ya que se propone analizar la tensión inducida que se presenta en la fase librada.

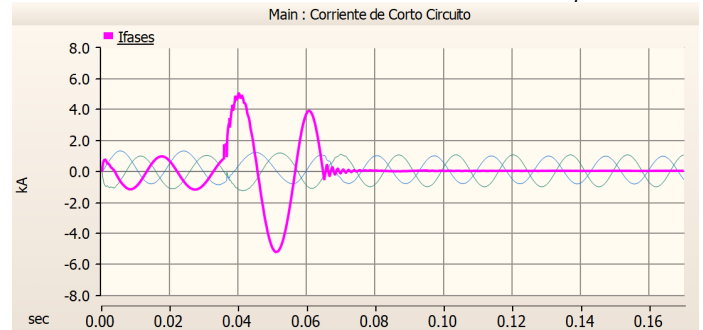
A continuación se mostraran los escenarios de falla de los 2 sistemas de línea de transmisión, aplicando la falla monofásica de fase C a tierra en los diferentes segmentos, mostrando las mediciones de corriente de cortocircuito y la tensiones inducidas en cada segmento de la fase librada.

#### CASO 1: Falla aplicada en Fase C, segmento 1.

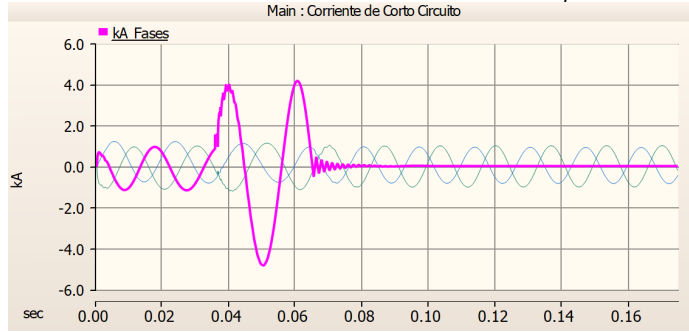
En la figura 10 y 11, se muestra el comportamiento de la corriente de corto circuito ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición.

**Figura 10.**

Corriente de corto circuito en línea de transmisión con transposición.

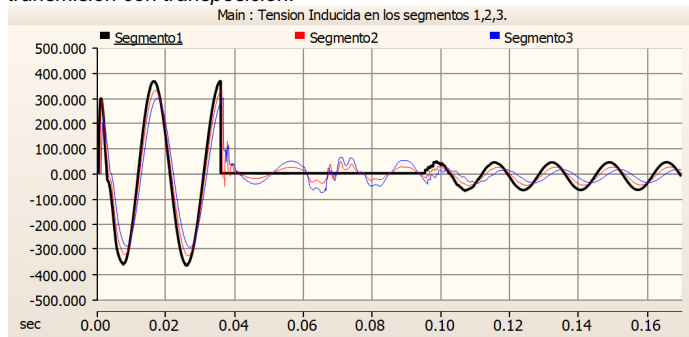


**Figura 11.**  
Corriente de corto circuito en línea de transmisión sin transposición.

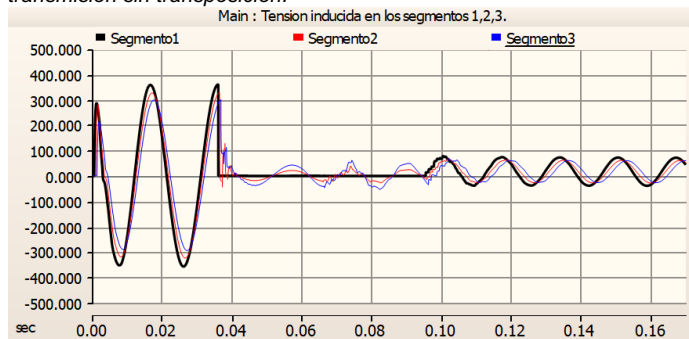


En la figura 12 y 13, se muestra el comportamiento de la tensión inducida ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición como se menciona en el caso 1 esta es Falla aplicada en la Fase C, segmento 1.

**Figura 12.**  
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión con transposición.



**Figura 13.**  
Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión sin transposición.



La falla en fase C aplicada en el segmento 1 ocurre a los 0.035910 seg y se libera a los 0.05945 seg, observándose los siguientes valores:

**Tabla 2.**  
Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida.

L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	4.63	43.41	24.47	15.33
Sin transposición	-4.84	73.45	62.54	61.23

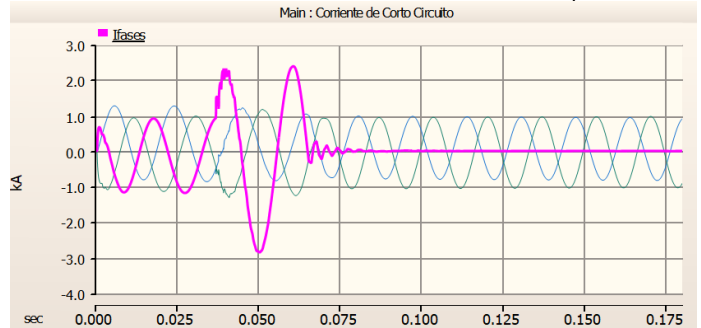
Como se observa en la Tabla 2, el sistema con mayor tensión inducida en todos los segmentos en la fase librada es la línea de transmisión sin transposición.

CASO 2: Falla aplicada en Fase C, segmento 2.

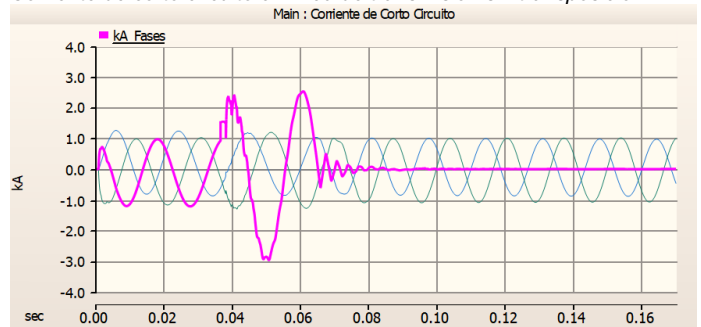
En una línea de transmisión no transpuesta, los conductores están dispuestos de manera paralela y separados entre sí. Cuando se produce un cortocircuito en esta configuración, la corriente de cortocircuito tiende a fluir predominantemente en el conductor más cercano al punto de falla.

Esto puede ocasionar un desequilibrio en la distribución de corriente entre los conductores, lo que puede resultar en altas tensiones y posibles daños en el sistema en la figura 14 y 15 se muestran dichos comportamientos ante las disposiciones mencionadas anteriormente.

**Figura 14.**  
Corriente de corto circuito en línea de transmisión con transposición.

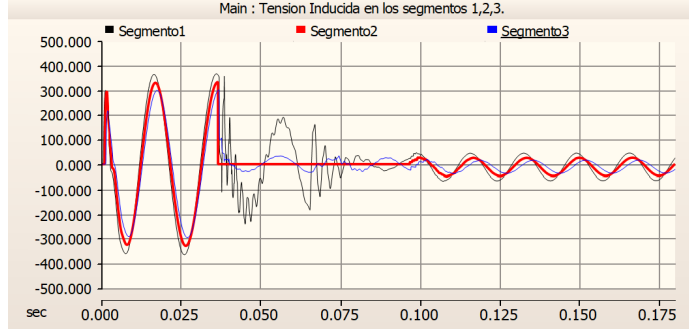


**Figura 15.**  
Corriente de corto circuito en línea de transmisión sin transposición.

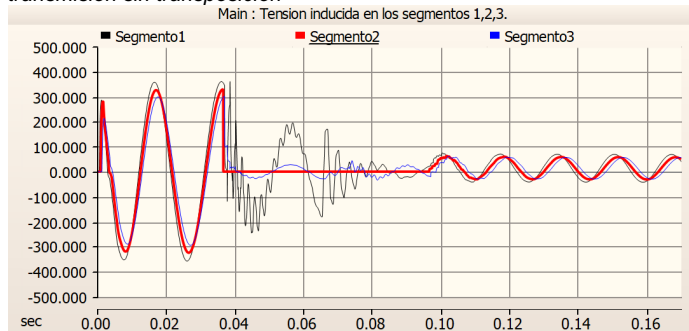


En la figura 16 y 17, se muestra el comportamiento de la tensión inducida ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición.

**Figura 16.**  
*Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión con transposición.*



**Figura 17.**  
*Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión sin transposición.*



La falla en fase C aplicada en el segmento 2 ocurre a los 0.0365 seg y se libera a los 0.06004 seg. Como se puede apreciar en la Tabla 3, en la línea de transmisión sin transposición se genera la mayor tensión inducida en cada segmento de la fase liberada. Además, se observa que la tensión en el sistema sin transposición presenta componente de CD con una ligera reducción en la tensión máxima con respecto al Caso 1.

**Tabla 3.**  
*Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida.*

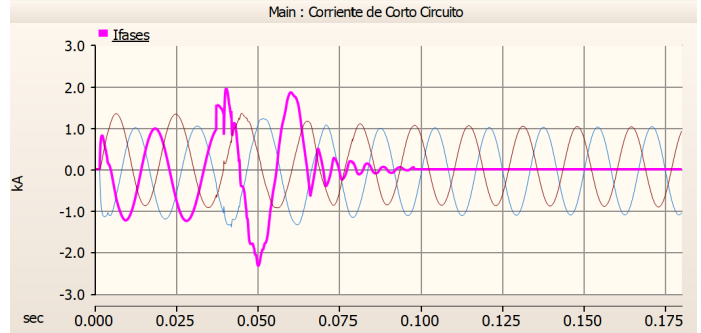
L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	2.85	44.41	25.67	16.18
Sin transposición	2.95	70.64	59.76	58.18

**CASO 3: Falla aplicada en Fase C, segmento 3.**

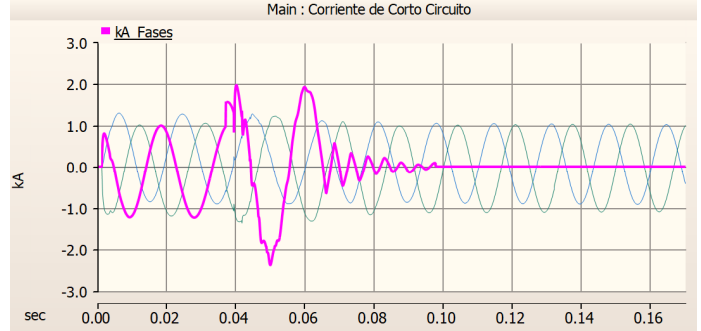
En la figura 18 y 19, se muestra el comportamiento de la corriente de corto circuito ante una línea de transmisión con una disposición transpuesta y una línea de transmisión convencional, sin transposición.

En una línea de transmisión no transpuesta, los conductores están dispuestos de forma paralela y separados entre sí. Cuando se produce una falla en una fase, la tensión inducida tiende a concentrarse principalmente en esa fase en particular. Esta alta concentración de tensión puede causar problemas, como aislamiento inadecuado y posibles daños en el sistema.

**Figura 18.**  
*Corriente de corto circuito en línea de transmisión con transposición.*

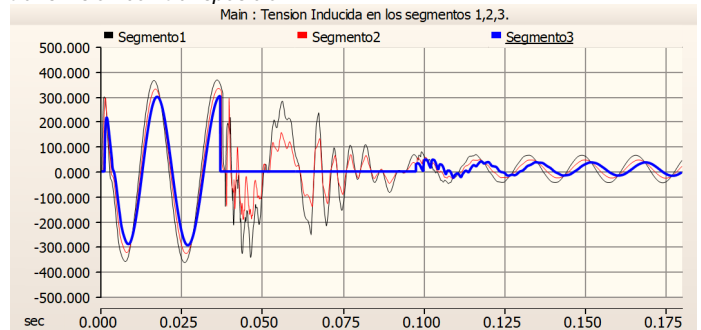


**Figura 19.**  
*Corriente de corto circuito en línea de transmisión sin transposición.*

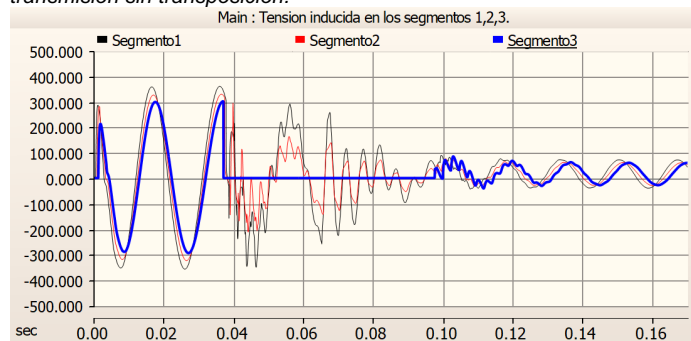


Por otro lado, en una línea de transmisión transpuesta, los conductores se entrelazan en forma de hélice o se cruzan entre sí a lo largo de la longitud de la línea. Debido a esta disposición entrelazada, la tensión inducida se distribuye de manera más equilibrada entre las fases afectadas por la falla. Esto ayuda a reducir la concentración de tensión en una sola fase y, por lo tanto, disminuye los posibles daños y problemas asociados. En las figuras 20 y 21, se muestra el comportamiento de la tensión inducida en una línea de transmisión con las disposiciones mencionadas anteriormente.

**Figura 20.**  
*Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión con transposición.*



**Figura 21.**  
*Tensiones inducidas en fase librada, segmentos 1, 2 y 3 en línea de transmisión sin transposición.*



La falla en fase C aplicada en el segmento 3 ocurre a los 0.0370 seg y se libera a los 0.06054 seg. Como se observa en la Tabla 4, el sistema con mayor tensión inducida en todos los segmentos en la fase librada es la línea de transmisión sin transposición. También se observa que las tensiones inducidas alcanzadas son mayores que las obtenidas en los Casos 1 y 2, a pesar de que la corriente de cortocircuito alcanzada es aun de menor amplitud que los casos anteriores. Así mismo se observa la componente de CD en ambos casos.

**Tabla 4.**  
*Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida.*

L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	2.32	66.62	47.48	40.0
Sin transposición	2.37	75.49	64.87	67.64

Con la finalidad de evaluar los comportamientos con los escenarios de falla monofásica en las otras dos fases A y B, se aplica la misma metodología de aplicación de falla. Las tablas 5 y 6 muestran los siguientes resultados.

**Tabla 5.**  
*Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida*

Fase fallada A				
L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	4.13	52.20	44.58	23.65
Sin transposición	4.54	85.80	77.58	56.65
Tiempo de aplicación (s)		0.0425	0.04308	0.04360

**Tabla 6.**  
*Valores máximos alcanzados para corriente de falla y tensión inducida*

Fase fallada B				
L.T.	C.C. kA	kV seg. 1	kV seg. 2	kV seg. 3
Con transposición	3.49	49.28	35.38	29.51
Sin transposición	4.12	57.25	43.32	38.91
Tiempo de aplicación (s)		0.04965	0.05	0.0505

#### IV. CONCLUSIONES

El estudio realizado en dos sistemas eléctricos con líneas de transmisión con y sin transposición arroja resultados en los que

la fase librada por el esquema DRM presenta importantes inducciones de tensión cuando la fase está abierta. La mayor afectación entre los dos sistemas se origina con la línea de transmisión sin transposición, logrando siempre las mayores tensiones pico inducidas. Así mismo, la afectación máxima se da cuando la falla se origina en el segmento 1, el escenario más crítico en una línea de transmisión con transposición y sin transposición ocurre en el primer segmento cercano a la unidad generadora debido a la menor impedancia de la línea en ese punto. La capacidad de la fuente generadora para suministrar corriente en caso de una falla monofásica se ve influenciada por esta baja impedancia, lo que resulta en una alta corriente de falla en ese segmento. Como el segmento 1 se encuentra al 33% de la línea lo cual conduce alta corriente con bajo efecto capacitivo y más inductivo dejando un 67% de la línea donde se encuentra potencial cero recibiendo las inducciones de las 2 fases sanas. Este sería un efecto de divisor de tensión y atribuyéndole una menor la inducción cuando se encuentra la falla monofásica a tierra en el segmento 2 y 3.

Por otro lado, la línea de transmisión con transposición resultó con menores tensiones inducidas, pero con un patrón de comportamiento similar a los casos sin transposición, por lo que esto puede ser atribuible al desbalance que se presenta durante la operación de falla y esquema DRM. Finalmente, en ambos casos se aprecia que la tensión inducida llega a tener valores importantes de tensión, los cuales pueden originar nuevas descargas eléctricas en caso de que la falla de fase no se haya librado totalmente.

#### V. AGRADECIMIENTOS

El alumno del Tecnológico Nacional de México y de la División de estudios de posgrado e investigación, Emilio González Domínguez, agradece por la ayuda otorgada de parte de la institución y de la división, al igual que a su familia y Docentes. De igual manera se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para la obtención de este artículo de investigación.

#### VI. REFERENCIAS

Yuan, L., & Nguyen, T. (2007). Alternative way to derive equivalent PI circuit model of transmission lines. *in Proceedings of the Annual Southeast Symposium on System Theory* (pp. 186-188). <http://dx.doi.org/10.1109/SSST.2007.352345>.

Braun, C., Rahman, M., & Cecchi, V. (2017). A transmission line model with non-uniformly distributed line impedance. *in 2017 North American Power Symposium (NAPS 2017)* (Vol. 2). <http://dx.doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107223>.

Kurokawa, S., Daltin, R. S., Prado, A. J., & Pissolato, J. (2007). An alternative modal representation of a symmetrical nontransposed three-phase transmission line. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1), 500-501. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2006.889117>.

Restrepo, L. H., Caicedo Delgado, G., & Castro-Aranda, F. (2008). Modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia (Informe técnico). [Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Eléctrica y electrónica, Cali, Colombia].



- <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10893/1471/V.16No.1-p.21-32.pdf?sequence=2>.
- Turnip, S. (1995). Analysis of Single Pole Auto Reclosure In Extra-High Voltage Systems. University Of Tasmania. Thesis.  
<https://doi.org/10.25959/23241038.v1>.
- Marti, J. R. (1982). Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(1), 147-155. Jan. 1982.  
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317332>.
- Noda, T., Nagaoka, N., & Ametani, A. (1996). Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an-ARMA model. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), 401-411.  
<https://doi.org/10.1109/61.484040>.
- PSCAD/EMTDC v5.0.1 Update 3, G. Fortran v4.6, G. Fortran v8.1 (64-bit) Educational.
- Dommel, H. W. (1992). EMTP Theory Book (2da ed., p. 4-34). Microtran Power System Analysis Corporation.  
<https://www.scribd.com/doc/212398005/Theory-Book>.
- Portela, C., & Tavares, M. C. (2002). Modelling simulation and optimization of transmission line. Applicability and limitations of some used procedures. *En IEEE Transmission and Distribution Latin América 2002* (pp. 38). SP, Brazil.  
<https://www.dsce.fee.unicamp.br/~crisrina/palestras/TD2002/CPortelaMCTavaresTD2002artcnvidador2CCcpc.pdf>.
- Anderson, P. M. (1999). Power System Protection. *IEEE Press Power Engineering Series*. Mc Graw-Hill.  
<https://archive.org/download/POWERSYSTEMPROTECTIONP.M.Anderson/POWER%20SYSTEM%20PROTECTION%2C%20P.%20M.%20Anderson.pdf>
- Kimbark, E. W. (1964). Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole-Switched EHV Lines by Shunt Reactors, " in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, no. 3, pp. 285-290, March 1964.  
<https://doi.org/10.1109/TPAS.1964.4766000>.
- Yanque Montufar, M. (2014). *Análisis de la corriente de arco secundario para recierres monofásicos en líneas de extra alta tensión*, [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú].  
<https://1library.co/document/z1dkml8z-analisis-corriente-sekundario-recierres-monofasicos-lineas-extra-tension.html>
- Eztergaloy, J., Andrichack, J., Colwell, D. H., & Dawson, D. C. (1992). Single Phase Tripping and Auto reclosing of Transmission Lines. *IEEE Committee Report. Transactions on Power Delivery*, 7(1).
- Stevenson Jr., W. D. (1996). Analysis of electrical power systems. North Carolina State University.  
<https://catedras.facet.unt.edu.ar/sep/wpcontent/uploads/sites/20/2020/03/An%C3%A1lisis-de-Sistemas-de-Potencia-Grainger-Stevenson.pdf>.