

Modelado de cables de potencia para estudio de inducción electromagnética en pantalla electrostática

E. Guerrero-Arriaga¹, F.S. Sellschopp-Sánchez¹, R. Loera-Palomo¹

Resumen— En el presente artículo se realiza el modelo de cables de potencia para diversos fenómenos dependientes de la frecuencia. El modelo incluye la representación de los cables subterráneos y submarinos que componen la red eléctrica y la preparación de los datos de entrada al programa computacional PSCAD/EMTDC para estudiar el comportamiento transitorio. Además se aborda la importancia que se tiene sobre la calidad de la energía en los sistemas eléctricos. Finalmente se realiza una simulación sobre un circuito subterráneo para observar el efecto que tiene una sobretensión sobre la pantalla electrostática del cable.

Temas claves—Cables de potencia, Calidad de la energía, PSCAD/EMTDC, Sobretensión.

Abstract— In this paper a power cable modeling considering different frequency dependent phenomena is presented. The modeling includes undersea and underground cables from the electric system and the input data preparation to the PSCAD/EMTDC, in order to analyze the transient behavior. Further, the importance power quality in electrical systems is discussed. Finally, a simulation of an underground cable system is done to observe the effect of overvoltage on the sheath cable.

Keywords— Power cables, Energy quality, PSCAD/EMTDC, Overvoltage.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de cables subterráneos y submarinos de tipo coaxial se componen alternadamente por capas de materiales conductores y dieléctricos. La combinación de estos elementos hace que los parámetros electromagnéticos del cable sean altamente dependientes de la frecuencia. Por lo cual, se debe realizar un proceso diferente al de líneas aéreas, aunque basados en los mismos fundamentos eléctricos, para determinar los parámetros electromagnéticos que conforman al sistema eléctrico, los cuales son mostrados en el presente artículo.

Actualmente existe una gran tendencia a realizar instalaciones subterráneas, por lo cual es importante realizar diferentes estudios de los fenómenos eléctricos a

los cuales pueden estar sometidos, ya que cualquier daño provocado en alguna cubierta de un cable, podría ocasionar el mal funcionamiento del cable o podría ocasionar el corte de suministro eléctrico al usuario. Estos estudios deben ser llevados de la mano con la calidad de la energía eléctrica, debido a que un sistema operando en condiciones óptimas, prolonga su vida útil y evita posibles daños que limiten la operación del circuito.

Una razón más para poner interés sobre la calidad de la energía es la economía. Existe un impacto económico tanto en la empresa suministradora de energía como en los usuarios. La calidad de la energía puede tener un impacto económico directo en algunos usuarios industriales. Se ha tenido un gran énfasis en una industria revitalizante con más automatización y equipos más modernos. Esto usualmente significa control electrónico, equipos energéticamente eficientes que a menudo son más sensibles a las variaciones en el suministro de tensión que sus antecesores electromecánicos. Por lo tanto, los usuarios industriales están conscientes de la importancia de tener menos disturbios en el sistema de potencia. Además, se tiene una gran cantidad de dinero asociado con los problemas de calidad de energía eléctrica.

II. MODELADO DE CABLE

A. Comportamiento transitorio

Las líneas y cables contienen parámetros distribuidos, es decir, se dividen en pequeñas secciones con cierto valor de impedancia y admitancia. Después de transcurrir Δt tiempo, cierta longitud Δx ha sido cargada. Si la capacitancia C está dada en F/m , una carga $Q = CV\Delta x$ habrá sido impartida en la línea. Como la corriente es la variación de la carga con respecto al tiempo tenemos

$$I = CV \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde $\Delta x/\Delta t$ es la razón a la cual el disturbio se propaga por la línea o el cable, es decir, $I = CVv$.

Una fuerza electromotriz, f.e.m., igual a la razón de cambio del flujo, λ , se induce entre los conductores y el frente de onda, por lo tanto:

$$\lambda = LI\Delta x = L CVv \Delta x \quad (2)$$

$$f. e. m. = \frac{d\lambda}{dt} = L CVv \frac{\Delta x}{\Delta t} = LCVv^2 \quad (3)$$

¹ Ing. Enrique Guerrero Arriaga (ieguerrero@hotmail.com), Dr. Francisco Sergio Sellschopp Sánchez (sellschopp@hotmail.com), Dr. Rodrigo Loera Palomo (rodrigo.loera@gmail.com). Instituto Tecnológico de la Laguna, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Blvd. Revolución S/N, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

La ecuación (3) se puede reescribir como $V = LCVv^2$, para poder obtener (4) que es la velocidad a la cual se propaga la onda viajera a través de la línea o cable:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

Por lo cual dependerá de la geometría y las propiedades de los materiales electromagnéticos de la línea o el cable. También es importante calcular el valor de la impedancia característica del sistema, Z_0 debido a que determina que tanto tendrá variación de amplitud de la onda al atravesar por esa sección, partiendo de (1) obtenemos [1]:

$$\frac{v}{l} = \frac{\sqrt{LC}}{c} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0 \quad (5)$$

El comportamiento de ondas viajeras puede ser descritas por las ecuaciones de onda:

$$-\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = LC \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (6)$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (7)$$

La ecuación (6) describe la tensión y (7) la corriente, para determinada longitud de la línea. Estas ecuaciones surgen a partir de un análisis matemático de los parámetros distribuidos del sistema con fundamento en las leyes de Kirchhoff. Luego se determina la solución general para la tensión, dada por la ecuación de D'Alambert:

$$U = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) \quad (8)$$

Esta ecuación establece que habrá una función que responderá en dirección positiva de la formación de onda, y otra en dirección negativa, f_1 y f_2 , respectivamente.

Considerando que la corriente está dada por $I = (-U_1 + U_2)/Z_0$, tendremos como solución general de la corriente:

$$I = -\frac{1}{Z_0} f_1(x - vt) + \frac{1}{Z_0} f_2(x + vt) \quad (9)$$

B. Representación del cable

La representación de cables de potencia para simulaciones requiere del cálculo de parámetros del cable a partir de ciertos datos, los cuales son [2]:

➤ Geométricos

- Ubicación de cada conductor (coordenadas x-y).
- Radio interno y externo de cada cubierta del cable.
- Profundidad del sistema de cables.

➤ Propiedades de los materiales

- Resistividad, ρ , y permeabilidad relativa μ_r , de todos los materiales conductores (μ_r es la unidad para todos los materiales magnéticos).

- Resistividad y permeabilidad relativa del medio que lo rodea, ρ , μ .
- Permitividad relativa de cada material aislante, ϵ_r .

A partir de estas constantes se realiza el cálculo de las matrices de impedancia y admitancia, que a diferencia de las líneas aéreas, se realiza por medio de las ecuaciones de Pollaczek, las cuales nos proporcionan las matrices de manera Cartesiana de la siguiente forma:

$$Z_{ij} = R_{ij} + j\omega X_{ij} \quad (10)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + j\omega B_{ij} \quad (11)$$

Z es el valor de impedancia, R la resistencia, X la reactancia, Y la admitancia, G la conductancia y B la susceptancia.

C. Cálculo de matriz de impedancia.

La matriz de impedancia serie de un cable parte de la relación de impedancias de un conductor hueco, para luego reordenarse en una matriz de impedancia que represente las diferentes partes conductoras del cable.

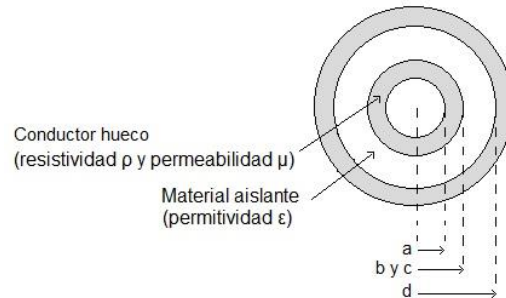


Figura 1. Diámetros de un conductor hueco y material aislante.

Se realiza el cálculo de la impedancia interna del material conductor Z_{aa} y la parte externa Z_{bb} .

$$Z_{aa} = \frac{\rho m I_0(ma) K_1(mb) + K_0(ma) I_1(mb)}{2\pi a I_1(mb) K_1(ma) - K_1(mb) I_1(ma)} \quad (12)$$

$$Z_{bb} = \frac{\rho m I_0(mb) K_1(ma) + K_0(mb) I_1(ma)}{2\pi b I_1(mb) K_1(ma) - K_1(mb) I_1(ma)} \quad (13)$$

Donde $m = \sqrt{j\omega\mu/\rho}$

Siendo ρ y μ la resistividad y la permeabilidad del material conductor, respectivamente; I_n y K_n , son las funciones modificadas de Bessel de orden n , del primero y segundo grado, respectivamente; a y b son los radios del interno y externo del conductor hueco, respectivamente.

También se requiere obtener la impedancia que está limitada entre las dos superficies mencionadas, Z_{aa} y Z_{bb} , con:

$$Z_{ab} = \frac{\rho}{2\pi ab} \frac{1}{I_1(mb) K_1(ma) - K_1(mb) I_1(ma)} \quad (14)$$

Se debe conseguir, además, la impedancia entre dos partes conductoras:

$$Z_i = \frac{j\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{d}{c} \quad (15)$$

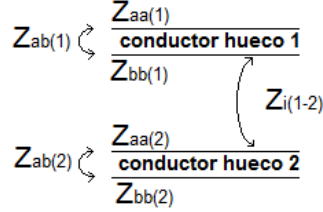


Figura 2. Impedancias de un conductor hueco

Una vez obtenidos estos valores considerando que el cable se compone de tres partes conductoras, el conductor principal, la pantalla electrostática y la armadura, podemos obtener la matriz de impedancia de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{12} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{13} & Z_{23} & Z_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{bb(c)} + Z_{i(c-p)} + Z_{aa(p)}, \\ Z_{22} &= Z_{bb(p)} + Z_{i(p-a)} + Z_{aa(a)}, \\ Z_{33} &= Z_{bb(a)} + Z_{i(a-tierra)}, \\ Z_{12} &= -Z_{ab(p)}, \\ Z_{23} &= -Z_{ab(a)} \text{ y } Z_{13} = Z_{23}. \end{aligned}$$

Considerando que los subíndices entre paréntesis son respectivamente (c) para el conductor, (p) para la pantalla electrostática y (a) para la armadura.

D. Cálculo de matriz de admitancia.

En el cálculo de la matriz de admitancias se pueden despreciar las pérdidas del dieléctrico, considerando entonces la admitancia de (11) como $Y_{ij} = j\omega C_{ij}$. Por lo tanto, se calcula la capacitancia de una capa aislante entre dos conductores huecos con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{d}{c}} \quad (17)$$

Donde ϵ es la permitividad del material aislante; d y c son los radios interno y externo del material aislante, respectivamente.

Realizando los cálculos para cada parte del cable, obtenemos la matriz de admitancias:

$$\begin{bmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + Y_2 & -Y_2 \\ 0 & -Y_2 & Y_2 + Y_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Donde Y_1 es la admitancia entre conductor y pantalla, Y_2 entre pantalla y armadura y Y_3 entre armadura y tierra.

Tanto para la matriz de impedancia, como la de admitancia, el tamaño $n \times n$ dependerá del número de cubiertas conductoras que contenga el cable, los casos

anteriores son de 3×3 porque constan de conductor principal, pantalla electrostática y armadura.

E. Preparación de datos de entrada al PSCAD/EMTDC.

Para colocar los valores obtenidos del cable en el simulador PSCAD/EMTDC se tiene que considerar cálculos adicionales, ya que el simulador no considera cubiertas semiconductoras, ni otro tipo de cubierta que llegará a requerir; además de que los materiales conductores los considera sólidos, y la mayoría de los cables tienen conductores de alambres trenzados.

El primer cálculo que se debe realizar, es modificar la resistividad del conductor principal, el cual se determina con la siguiente ecuación:

$$\rho_c = \rho_c' \frac{\pi r_1^2}{A_c} \quad (19)$$

Donde r_1 es el radio del conductor, ρ_c' es la resistividad del material conductor, el cual se puede tomar de la tabla 2 y A_c es el área de la sección transversal dado por el fabricante.

El segundo cálculo debe considerar el radio las cubiertas semiconductoras y del aislamiento para obtener un nuevo radio r_2 , para la pantalla electrostática. A partir de esto se obtiene una nueva permitividad relativa:

$$\epsilon_{r_1} = C \ln \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\epsilon_0} \quad (20)$$

Donde C es la capacitancia dada por el fabricante, r_1 es el radio del conductor principal y r_2 es el radio previamente calculado, y ϵ_0 es la permitividad en el vacío.

El tercer y último cálculo que se debe realizar es con cualquier cubierta que esté compuesta por alambres, ya sea la pantalla electrostática o la armadura. Esto es, obtener un nuevo radio externo, r_3 , de dicha cubierta a partir de su radio interno r_2 y el área uno de los alambres que lo compone A_s :

$$r_3 = \sqrt{\frac{A_s}{\pi} + r_2^2} \quad (21)$$

III. CALIDAD DE LA ENERGÍA

Tanto las empresas suministradoras como los usuarios de energía eléctrica están cada vez más preocupados por la calidad de la energía eléctrica. Esto se debe a varios factores entre ellos la nueva generación de equipos de carga que están basados de microprocesadores, controles y dispositivos electrónicos de potencia, que son más sensibles a la degradación de la calidad de la energía que los equipos utilizados en el pasado.

La calidad de la energía, como la calidad en cualquier otro bien y servicio, es difícil de cuantificar. Para ello se tienen estándares para la tensión y otros criterios técnicos que podrían ser medidos, pero la última medida de calidad de energía está determinada por el desempeño y la productividad del equipo del usuario. Si la potencia

eléctrica es inadecuada para esas necesidades, entonces la calidad es carente [4].

Entre los diversos problemas de calidad de la energía se encuentran las interrupciones, sags, transitorios por descargas atmosféricas o por maniobras de equipo primario en el sistema eléctrico, armónicos, entre otros.

En condiciones de resonancia, los cables de transporte de energía están sometidos a sobretensiones y al efecto corona que pueden causar fallos del aislamiento. Incluso fuera de esas condiciones, la presencia de armónicos de corriente ocasionará calentamiento adicional con respecto al de la corriente eficaz nominal, debido a los efectos piel y de proximidad; ambos efectos, que dependen de la frecuencia, geometría y sección de conductores, afectan a la resistencia efectiva y, por tanto, a las pérdidas I^2R .

Para un diseño efectivo del cable es preciso tener en cuenta el sobrecalentamiento debido a los armónicos, lo que se consigue por medio de factores de reducción de la capacidad nominal [5].

Se pueden tener dos tipos sobretensiones en el sistema eléctrico:

- Temporales
- Transitorias

Ambas son elevaciones de tensión, lo que las hace diferentes es su duración. Las sobretensiones temporales tienen una duración relativamente larga, de varios segundos, mientras que las sobretensiones transitorias se encuentran en el rango de los milisegundos o menos. Estas últimas pueden ser generadas por maniobras en el sistema eléctrico o por descargas atmosféricas, las cuales llamaremos por impulso.

Las sobretensiones transitorias se caracterizan por ser variaciones de sobretensión muy rápidas, y pueden provocar graves daños a los diferentes dispositivos eléctricos. Por tanto, los cables de potencia pueden ser sometidos a una gran cantidad de estrés eléctrico en las diferentes cubiertas, y provocar el daño permanente de algunos de ellos.

IV. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

El estudio que se presenta a continuación es sobre el efecto que se tiene en la pantalla electrostática de un circuito subterráneo debido a la aplicación de un impulso por maniobra. Los datos del circuito se presentan en el apéndice 2. Se realizó la simulación del circuito comparando dos situaciones, con y sin transposición de pantallas electrostáticas. Esta transposición o cruce se realiza a menudo en la práctica, para disminuir las corrientes circulantes en las pantallas electrostáticas.

El circuito fue sometido a un impulso como se muestra en la figura 3, el cual es un impulso de frente lento, debido a una maniobra en el circuito. La amplitud del impulso está dada por norma a 175% de la tensión nominal, y al ser de

frente lento se considera con un tiempo de frente de $250\mu s$.

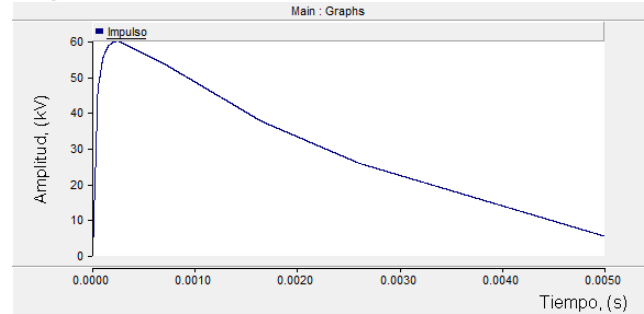


Figura 3. Sobretensión por maniobra en red de 34.5 kV.

Se tomaron los resultados de las tensiones inducidas en las pantallas electrostáticas, en los empalmes donde se realiza la transposición de pantallas. Algunas gráficas obtenidas se muestran en las figuras 4, 5, 6 y 7.

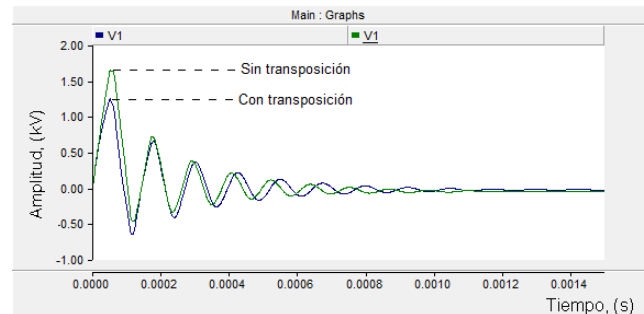


Figura 4. Tensión inducida en pantalla electrostática al principio del circuito.

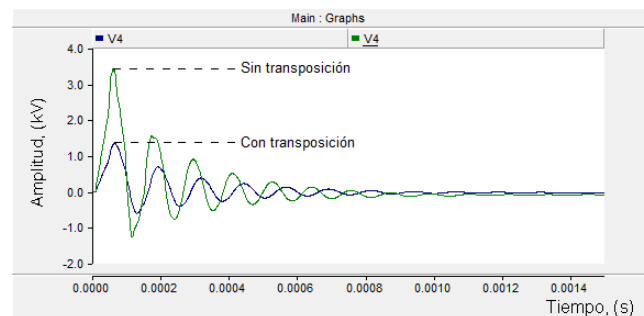


Figura 5. Tensión inducida en pantalla electrostática a 1500 metros.

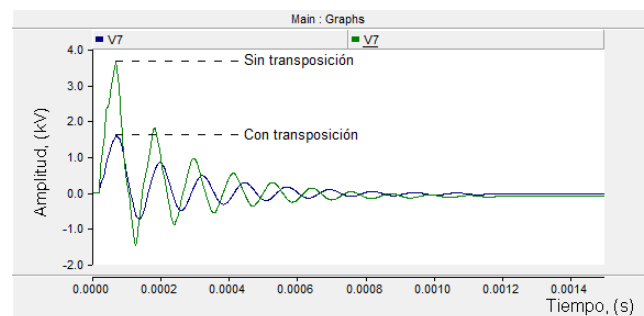


Figura 6. Tensión inducida en pantalla electrostática a 3150 metros.

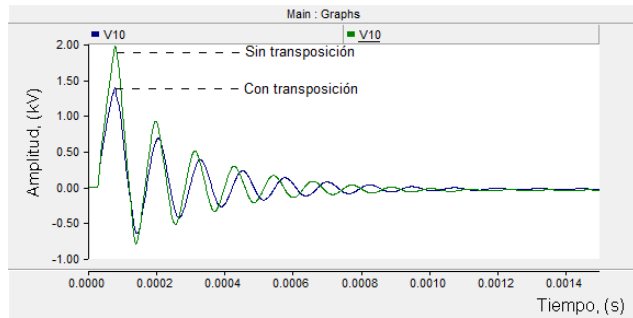


Figura 7. Tensión inducida en pantalla electrostática al final del circuito.

Para tener una visualización de los resultados, se realizó la siguiente tabla.

TABLA 1. TENSIONES INDUCIDAS EN PANTALLA ELECTROSTÁTICA.

| Distancia (m) | Tensión inducida sin transposición (V) | Tensión inducida con transposición (V) | Reducción de tensión (%) |
|---------------|--|--|--------------------------|
| 0 | 1641.01 | 1253.37 | 23.62 |
| 440 | 2652.52 | 1532.48 | 42.23 |
| 950 | 3148.69 | 1746.79 | 44.52 |
| 1500 | 3417.43 | 1340.57 | 60.77 |
| 2050 | 3702.34 | 1562.9 | 57.79 |
| 2600 | 3786.59 | 1663.21 | 56.08 |
| 3150 | 3100.59 | 1610.33 | 48.06 |
| 3700 | 2958.33 | 1656.2 | 44.02 |
| 4250 | 2713.32 | 1660.46 | 38.80 |
| 4800 | 2372.94 | 1386.83 | 41.56 |

La tabla 1 refiere al porcentaje que se reduce la tensión inducida en la pantalla electrostática al realizarse la transposición de pantallas electrostáticas.

V. CONCLUSIONES

Los resultados nos demuestran que realizar un análisis de la inducción electromagnética en el cable, permite comprender los esfuerzos eléctricos a los que se somete un cable, y que al realizar la transposición de pantallas electrostáticas durante la instalación del circuito, se reduce considerablemente, permitiendo así, darle más tiempo de vida al cable. Se observa una disminución considerable de la tensión inducida en la pantalla electrostática, lo cual refiere a que, dependiendo del gradiente de campo eléctrico del material aislante, esta disminución podrían reducir los esfuerzos eléctricos a los que se somete al aislamiento.

Es recomendable realizar diferentes estudios de calidad de energía, para así poder determinar las condiciones óptimas de operación de un circuito eléctrico, ya que se podrían prevenir diversos daños a equipos, en el caso particular del artículo, se enfoca en el daño producido en los cables potencia. Si el cable de potencia sufre daños, la empresa suministradora podría tardar varios días en resolver el

problema, y eso afectaría los procesos de una industria, o dejar sin suministro eléctrico a una ciudad entera.

VI. APÉNDICE

A. Apéndice 1.

Para el cálculo de los parámetros del cable se requiere la resistividad del material conductor dado en ohm-metro.

TABLA 2. RESISTIVIDAD DE MATERIALES CONDUCTORES.

| Material | Cobre | Aluminio | Plomo | Acero |
|------------------------|---------|----------|-------|-------|
| $\rho(\Omega \cdot m)$ | 1.72E-8 | 2.83E-8 | 22E-8 | 18E-8 |

Así como la permitividad de los materiales aislantes.

TABLA 3. PERMITIVIDAD RELATIVA DE LOS MATERIALES AISLANTES.

| Material | XLPE | Impregnada de aceite | Lleno de fluido |
|--------------|------|----------------------|-----------------|
| Permitividad | 2.3 | 4.2 | 3.5 |

B. Apéndice 2.

TABLA 4. DATOS DE DIMENSIONES Y MATERIALES DEL CABLE.

| Dimensiones y materiales | Valor |
|--|-----------|
| Radio conductor principal r_1 (m) | 0.0116 |
| Radio interno de pantalla r_2 (m) | 0.021 |
| Radio externo de pantalla r_3 (m) | 0.0211 |
| Radio total del cable r_4 (m) | 0.0255 |
| Resistividad del cobre (Ω/m) | 1.72E-8 |
| Resistividad modificada del conductor principal (Ω/m) | 1.8177E-8 |
| Permeabilidad relativa entre conductor principal y pantalla | 1 |
| Permitividad relativa de aislamiento sobre conductor principal | 3.093 |
| Permitividad relativa del aislamiento sobre pantalla | 4 |
| Longitud del cable (km) | 4.8 |

Estos datos son la parte subterránea de un circuito con cable subterráneo y submarino a 34.5 kV, el cual, para los fines del estudio solo se tomó la porción subterránea. El cable tiene un tamaño nominal de $400mm^2$, de cobre recocido sin recubrimiento, redondo compacto, para una tensión nominal de 34.5 kV. La pantalla electrostática consta de una cinta de cobre de 0.1mm de grosor.

VII. REFERENCIAS

- [1] Greenwood, A. (1991). *Electrical transients in power systems*. Second Ed., Wiley Interscience, New York.
- [2] Martínez, J. (2010). *Power system transients: parameter determination*. Boca Ratón, Florida.
- [3] Ametani, A. (1980) "A general formulation of impedance and admittance of cables," IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems.
- [4] Dugan, R.; McGranaghan, M.; Santoso, S.; Wayne, H. (2004). *Electrical power systems quality*. Second Ed. McGraw Hill.

- [5] Arrillaga, J. Eugfluz, L. (1994). *Armónicos en sistemas de potencia*. Universidad de Cantabria, Electra de Viesgo.
- [6] Zalani, M. (2009). *Transient behaviour modelling of underground high voltage cable systems*. Master by research thesis, Faculty of informatics, University of Wollongong.

VIII. BIOGRAFÍA



Ing. E. Guerrero Arriaga. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Mérida en 2012. En la actualidad cursa la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Sus áreas de interés de investigación son calidad de la energía, transitorios electromagnéticos y redes eléctricas, entre otras.



Dr. F. S. Sellschopp Sánchez. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Tepic en 1994. Obtuvo el grado de M.C. en Ingeniería Eléctrica en 1999 en el Instituto Tecnológico de La Laguna y el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el mismo instituto en 2003. Es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de La Laguna y sus áreas actuales de investigación son estimadores en redes eléctricas, máquinas y redes eléctricas hacia el análisis de la calidad y ahorro de la energía eléctrica.



Dr. Rodrigo Loera Palomo. Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica en 2007 en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en 2013 en la misma institución. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de la Laguna. Sus áreas de investigación corresponden a los sistemas electrónicos de potencia, reguladores conmutados de alta frecuencia y teoría de control aplicada a sistemas electrónicos de potencia.