



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**“CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LINEAS DE
TRANSMISION USANDO MEDICIONES
SINCROFASORIALES”**

Propuesta de TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERIA
CON OPCION TERMINAL EN
SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

Leonardo Mendoza Viveros

Asesor de tesis:

Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

Co-Asesor

Dr. Martín Salazar Villanueva

Puebla, Pue.

Agosto 2020

“CÁLCULO DE PARÁMETROS DE LINEAS DE TRANSMISION USANDO MEDICIONES SINCROFASORIALES”

INDICE

CAPITULO I.- INTRODUCCION.

1.1.-Introducción	4
1.2.- Antecedentes	5
1.2.1.-Planteamiento del problema	5
1.2.2.-Objetivo general	6
1.2.3.-Objetivo específico	6
1.2.4.-Hipótesis	6
1.3.-Justificación	6
1.4.-Estado del Arte	7
1.4.1.-Modelo para aproximar líneas de transmisión medianas y cortas.	8
1.4.2- Características eléctricas y la transferencia de potencia.	9
1.4.3.- Técnicas de estimación de parámetros en líneas de transmisión.	9

CAPITULO II.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1.-Definición de los parámetros eléctricos de la linea de transmisión.	11
2.2.-Impedancia serie de líneas de transmisión.	11
2.3.-Modelado y cálculo de los parámetros de la línea de transmisión.	12
2.3.1.-Resistencia.	12
2.3.2.- Inductancia de una linea aérea versus flujo interno.	13
2.3.3- Capacitancia de líneas de transmisión.	16
2.3.4.- Campo eléctrico de un conductor largo y recto.	17
2.3.5.- Diferencia de potencial entre dos puntos debida a una carga.	18
2.3.6.- Capacitancia de una línea de dos conductores..	20
2.4.-Modelos de Líneas de Transmisión.	23
2.4.1.- Representación de líneas	23
2.4.2.- La línea de trasmisión corta.	25
2.4.3.- La línea de longitud media.	28

2.4.4.- Solución de las ecuaciones diferenciales.	28
2.4.5.- Modelo de línea de transmisión larga y la solución de las ecuaciones diferenciales.	30
2.4.6.- La línea de transmisión larga.	33
2.4.7.-Modelo de línea de transmisión larga: Ecuaciones en forma hiperbólica.	34
2.4.8.- El circuito equivalente de una línea larga.	37
2.5-Unidad de Medición Fasorial	40
2.5.1.-Funcionamiento de una PMU.	40
2.5.2.-Cantidad fasorial y sincronización de tiempo.	41
2.5.3.-Medición de sincrofasores.	42
2.5.4.-Definición del sincrofasor.	43
2.5.5.-Sincronización de la hora de medición.	47
CAPITULO III.- DESARROLLO.	
3.1.-Métodos existentes para líneas transpuestas.	48
3.2.- Método de medición individual.	48
CAPITULO IV.-RESULTADOS Y CONCLUSIONES	
4.1.-Resultados	50
4.2.-Conclusiones	50
4.3.-Gráficas	51
APÉNDICE A.-Programa. Cálculo de parámetros	57
BIBLIOGRAFIA.	64

CAPITULO I. INTRODUCCION.

1.-Introducción.

En el mundo moderno los sistemas eléctricos de potencia juegan un papel central en el desarrollo de las naciones, se han convertido en motor de desarrollo económico ya que el día de hoy no se puede concebir prácticamente ninguna actividad económica productiva sin la intervención directa o indirecta de la energía eléctrica.

La energía eléctrica se transfiere de las plantas de generación a los centros de consumo a través de líneas aéreas y cables. Las líneas aéreas se utilizan para largas distancias en campo abierto y áreas rurales, mientras que los cables se utilizan para transmisión subterránea en áreas urbanas y enlaces intercontinentales en cables vía submarina. Para la misma clasificación, los cables son de 10 a 15 veces más caros que las líneas aéreas y, por lo tanto, por optimización de la relación costo/beneficio solo se utilizan en situaciones especiales en las que no se pueden utilizar líneas aéreas; las distancias en tales aplicaciones son cortas. [6][1]

La necesidad de la estimación de parámetros en tiempo real de una Línea de Transmisión (LT) surge de la constante modificación de las condiciones reales de la línea versus el modelo idealizado de la línea con las que se calcularon los parámetros de modelo π , tales como: condiciones físicas del terreno y de la disposición o topología de las líneas de transmisión.

Por esas razones se deberá esperar siempre que los cambios generados en sus parámetros eléctricos son debido a fluctuaciones en temperatura, humedad, altura o disposición física, así como la elongación del conductor de la línea debido a cambios ambientales. Si bien, tales cambios se esperan que sean mínimos, y para el caso en el que la línea transmite energía a un porcentaje de su capacidad nominal no resulta tan crítico desde el enfoque de la cargabilidad. Sin embargo, el problema empieza a volverse crítico e importante cuando la línea se encuentra transmitiendo energía cerca de este límite de operación por lo que siempre será relevante conocer estos parámetros de la manera más precisa posible.

En este trabajo se aborda específicamente el tema del cálculo de los parámetros eléctricos de una línea de transmisión usando mediciones obtenidas de una Unidad de Medición Fasorial (PMU) también conocidos como sincrofasores. Tales dispositivos tecnológicos se encargan de medir de manera sincronizada los voltajes y corrientes de un nodo y los expresan en forma de fasores de secuencia positiva. Las mediciones son sincronizadas mediante un reloj GPS que como su nombre lo indica utiliza el sistema de posicionamiento global (GPS, Global Positioning System) para la sincronización horaria de sus datos. [1][6]

El tema, además toma relevancia al considerar que la exactitud de estos parámetros representa un dato fundamental a partir del cual se pueden abordar tópicos tales como el ajuste de protecciones de una línea de transmisión, el cálculo de flujos de potencia o el despacho económico en un sistema eléctrico de potencia, por mencionar solo algunas posibilidades.

1.2.- Antecedentes.

Una LT se puede caracterizar por cuatro parámetros eléctricos: Capacitancia, Resistencia, Conductancia e Inductancia los cuales serán definidos más adelante.

Dichos parámetros se pueden obtener mediante las técnicas de estimación de parámetros las cuales utilizan algoritmos matemáticos para implementar técnicas de cálculo que se encargan de estimar los parámetros eléctricos de la LT a partir de otras mediciones proporcionadas por equipos que se encuentran conectados directamente en la red.

Estos datos pueden ser obtenidos desde equipos de medición tradicionales como los multimedidores o bien desde una Unidad de Medición Fasorial (PMU) los cuales proporcionarán mediciones en tiempo real.

Para implementar estas técnicas a partir de las mediciones obtenidas se requiere del uso de alguno de los 3 modelados de LT dependiendo de la longitud de la misma, estos son:

- Modelado de LT corta
- Modelado de LT media
- Modelado de LT larga

En este trabajo se analizarán los conceptos básicos de los parámetros eléctricos y posteriormente se dará paso a la explicación de los modelos de LT en seguida estos se utilizarán en la implementación del cálculo de parámetros.

Se espera que los resultados obtenidos se puedan proporcionar para ajustar y corregir ajustes de relevadores de protección permitiendo hacer más dinámica la operación y protección de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Valle de México (GRTVM).

1.2.1.-Planteamiento del problema.

Tradicionalmente, se asume que los parámetros de una línea de transmisión (LT) son correctos, bien estimados y resguardados a salvo de cualquier perturbación o cambio, sin embargo, los datos que obran en poder de las empresas de energía eléctrica a veces contienen datos inexactos debido a:

- Parámetros inexactos o equivocados proporcionados por el fabricante
- Modificaciones de trayectorias sin la debida corrección de los valores

- Modificación de los valores por envejecimiento de materiales
- La constante modificación de las condiciones reales de la línea versus el modelo idealizado de la línea con las que se calcularon los parámetros de modelo pi. [3].

Según las investigaciones en la materia, se pueden observar errores que podrían estar entre un 25% y 30% de su valor real en el cálculo de parámetros debido a los valores ideales que se usan en el modelado. [1] [6]

1.2.2.- Objetivo general. - Realizar el cálculo de la impedancia de una línea de transmisión utilizando mediciones sincrofasoriales.

1.2.3.- Objetivo específico.

- Proponer el algoritmo que mejor se adecue a las condiciones imperantes de las LT para el cálculo de la impedancia serie, con base al estado del arte actual y las condiciones predominantes en el ámbito de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- Utilizar mediciones sincrofasoriales con los datos de campo obtenidos de las Unidades de Medición Fasoriales (PMU) disponibles en esta zona.

1.2.4.- Hipótesis.

Actualmente en la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el proyecto de Monitoreo de Área Amplia (Wide Area Monitoring, WAM), conocido como Sistema de Medición Fasorial Supervisorio (SIMEFAS), está conformado por más de 280 PMU, Registradores de disturbio (RD) o relés con funciones de PMU instalados a lo largo del territorio Nacional y son monitoreados por las diferentes gerencias regionales de la CFE. [2]

La existencia de dicha infraestructura abre una gama de posibilidades de aplicaciones para el análisis del comportamiento de la red tales como la estimación de parámetros de una línea de transmisión usando mediciones sincrofasoriales.

Esto permite obtener mediciones de la línea en ambos extremos en el mismo instante de tiempo, lo anterior, permitiría calcular mediante modelos existentes los parámetros eléctricos de las líneas de transmisión y proporcionar a los ingenieros de operación a través del Sistema de Control Supervisorio parámetros más cercanos a los reales, comparados con los obtenidos de las tablas del fabricante.

1.3.-Justificación.

A partir de algunas muestras tomadas en campo mediante dispositivos tecnológicos se puede obtener una tendencia del comportamiento de los parámetros físicos de una línea

de transmisión , de esta manera tomando estos muestreos y mediante procedimientos matemáticos que conforman un algoritmo podemos obtener valores aproximados muy cercanos a los parámetros reales de las líneas de transmisión, esta propuesta: estimación de parámetros de líneas de transmisión surge de la necesidad de identificar y corregir los errores en estos parámetros. [4]

Dentro de las áreas consideradas sustantivas dentro del proceso de Transmisión de Energía que se verían beneficiadas, se encuentra el Departamento de Protección y Medición, ya que se establecerían condiciones para mejorar la precisión en la configuración de ajustes de relevadores de protección lo cual disminuiría la probabilidad de disparos incorrectos, así como la localización más rápida de fallas con la consecuente restauración de la misma.

Otra instancia que resultaría beneficiada sería la referente a las Zonas de Operación de Transmisión ya que una estimación más precisa de parámetros de una línea de transmisión incide directamente en la cargabilidad dinámica de la LT, que maximiza el uso de la línea al tiempo que garantiza fiabilidad / estabilidad del sistema.

La aplicación de esta propuesta permitiría brindar a los despachos de operación por medio del *Sistema de Control Supervisorio de Adquisición de Datos* (SCADA acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition) parámetros más fiables, comparados con los del fabricante.

1.4.-Estado del Arte.

Con el objetivo de mejorar el cálculo de los parámetros de las líneas, a través de los años y basados en mediciones de PMU se han propuesto variados métodos para el identificar parámetros de LTs.

Mediante la implementación de la Tecnología PMU en las redes de transmisión, los fasores sincronizados ofrecen la posibilidad de realizar la estimación de los parámetros eléctricos de una línea de transmisión haciendo uso de las mediciones sincronizadas.

El conocimiento preciso de los parámetros de impedancia de líneas de transmisión ayuda a:

- Mejorar la precisión en la configuración de relevadores de protección
- Mejorar la ubicación de fallas posteriores un evento y, por lo tanto, conducir a una restauración más rápida de los sistemas.
- Mejorar el modelado de líneas de transmisión para simulaciones de sistemas, como cálculos de estimación de estado.

- Determinar cuándo el modelo de una línea de transmisión en la base de datos centralizada no ha seguido el ritmo de las modificaciones a esa línea de transmisión, como la inserción de condensadores en serie, extensión de la línea. [10]

1.4.1.-Modelo para aproximar líneas de transmisión medianas y cortas.

Para representar una línea de transmisión desde un punto de vista didáctico, se realiza mediante el modelo de una red bipuertos que se muestra en la figura 1.1, en donde V_S e I_S son el voltaje y corriente en el extremo fuente y V_R e I_R son la voltaje y corriente en el extremo de recepción.

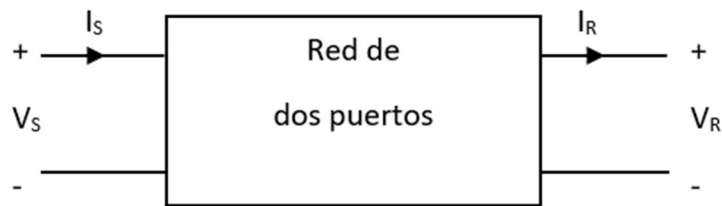


Fig. 1.1.-Representación de una red de dos puertos.

La siguiente expresión muestra la manera en la que se relacionan las variables del extremo fuente y el extremo receptor:

$$V_S = AV_R + BI_R \text{ [volts]} \quad (1.1)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \text{ [amperes]} \quad (1.2)$$

O bien, en su forma matricial[15]

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

1.4.2.- Características eléctricas y la transferencia de potencia.

En una línea de transmisión la regulación de la transferencia de potencia real y reactiva es ajustada mediante factores físicos entre los que encontramos la impedancia de la línea, las magnitudes de los voltajes, y la diferencia angular de los voltajes y corrientes en los extremos de la línea. La estabilidad del sistema en presencia de contingencias dinámicas dependerá del nivel de autorregulación existente.

Las fronteras de transferencia de potencia se establecen principalmente por tres indicadores importantes.

Nivel Térmico. – Este se encuentra definido por las ampacidades de una línea de transmisión las cuales determinarán el límite físico inherente a la transmisión de energía.

Nivel de flujo de potencia no controlado: La física, determinara fronteras determinadas por el flujo natural de potencia con dinámica estable no asegurada

Nivel de estabilidad: límite impuesto por lineamientos establecidos de tal manera que se asegure tener una transferencia segura de potencia, dinámicamente estable.

En los sistemas eléctricos de potencia la transferencia de energía se ve limitada por la prioridad que representa la estabilidad de tensión y /o potencia en régimen transitorio. Este tipo de restricciones limitan el uso de los llamados corredores de transmisión. [15]

1.4.3.- Técnicas de estimación de parámetros en líneas de transmisión.

Tradicionalmente se han propuesto diversos métodos para determinar la impedancia serie de las líneas de transmisión utilizando medidas fasoriales sincronizadas.

Podemos citar los siguientes:

[8] plantea la posibilidad de usar medidas obtenidas del SCADA combinándolas con parámetros obtenidos de los PMU para dar un mayor nivel de redundancia a los datos utilizados para estimar los parámetros de la línea de transmisión, sin embargo, mediante este enfoque se pierde la perspectiva de que la impedancia varía en periodos de tiempo diferentes y bajo diferentes condiciones de carga.

D. Shi *et al* [9] hace la propuesta de 4 metodologías basadas en determinado número de ecuaciones, estas pueden ser lineales o no lineales y además considera el análisis de la relación error/ruido la cual determinará la precisión de las mediciones fasoriales.

El autor de [10], hace la propuesta de un modelo para el sistema esta desbalanceado y una línea que no se encuentre totalmente transpuesta.

En [11], se considera modelar la línea de transmisión como un sistema de dos puertos, primeramente, se resuelven sus parámetros ABCD considerando dos conjuntos de medidas en diferentes condiciones de carga y partiendo de ahí podemos obtener cualquier parámetro.

En [12] se plantea la solución del cálculo de los parámetros de impedancia distribuida de la línea de transmisión a través de la solución de un sistema de dos ecuaciones lineales.

La referencia [13] se plantea la utilización de un algoritmo basado en mínimos cuadrados

Finalmente, un método extendido del Filtro de Kalman se propone en [14].

Se debe considerar que el uso de mediciones PMU exige que las mismas tengan elevada calidad y exactitud para que sea posible utilizarlas en la identificación de parámetros de líneas de transmisión.

Es decir, pequeñas desviaciones en las mediciones fasoriales podrían originar grandes divergencias en los parámetros de impedancia serie estimada, por lo anterior, últimamente se han desarrollado metodologías que permiten analizar la calidad en los datos obtenidos mediante los PMU y la calibración de los mismos.¹

¹

Zhao, Xuanyu & Zhou, Huafeng & Shi, Di & Zhao, Huashi & Jing, Chaoyang & Jones, Chris. (2015). On-line PMU-based transmission line parameter identification. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 1. 68-74. 10.17775/CSEEJPES.2015.00021.

CAPITULO II.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1.-Definición de parámetros eléctricos de la línea de transmisión.

Una línea de transmisión puede caracterizarse por cuatro parámetros:

Resistencia en serie (R). La resistencia serie en la línea esta relacionada con las perdidas por efecto joule debido a la resistividad del conductor; las resistencias de las líneas que tienen en cuenta el aislamiento y el efecto de piel es posible determinarlas a partir de las tablas de los fabricantes.

Conductancia de derivación (G). Este parámetro representa las pérdidas que son ocasionadas por las corrientes de fuga entre las fases y tierra a lo largo de las cadenas de aisladores y las debidas al efecto corona. En las líneas eléctricas, su efecto es pequeño y generalmente se desprecia para el análisis de líneas aéreas.

Inductancia en serie (L). Un conductor que transporta corriente está rodeado de un campo magnético que reacciona con las corrientes en este y otros conductores. La inductancia de la línea depende de los enlaces de flujo parcial dentro del área del conductor y de los enlaces de flujo externos. Para las líneas aéreas, las inductancias de las tres fases son diferentes entre sí, a menos que los conductores tengan un espaciado equilátero, sin embargo, esa praxis no es común. Las inductancias de las tres fases con espaciamiento no equilátero se pueden igualar transponiendo las líneas de tal manera que cada fase se encuentre de manera alternada en una de las tres posiciones posibles. [15]

Capacitancia en derivación (C). Debida a la tensión eléctrica y campo entre conductores. La capacitancia en las líneas de transmisión es el resultado de la diferencia de potencial entre conductores lo que origina que se carguen de igual manera que lo hace un capacitor de placas paralelas. La capacitancia entre los conductores es la carga por unidad de potencial y esta depende del tipo de conductor y la distancia que exista entre ellos. Para las líneas cortas (menores de 80 km) este efecto se puede despreciar, pero para líneas largas, este efecto crece en forma significativa. [15]

2.2.-Impedancia serie de líneas de transmisión.

La impedancia serie se considera constituida por la distribucion homogénea de los parámetros de resistencia e inductancia a lo largo de una linea. Esta a su vez es la causante de las caídas de tensión en serie en una linea de transmisión [18]

La admitancia paralela o de dispersión se encuentra constituida por la capacitancia y la conductancia entre conductores de una linea monofásica o bien desde un conductor al neutro para el caso de una trifásica.

Aunque la resistencia, inductancia y capacitancia son parámetros que se encuentran distribuidos en toda la longitud de la línea, el circuito equivalente de una línea se hace con parámetros concentrados, la conductancia se presenta entre conductores o entre conductores y la tierra.

El parámetro de la conductancia considera a través del aislamiento del conductor las corrientes de fuga existentes, incluso en los aisladores de líneas elevadas

Las condiciones atmosféricas juegan un papel preponderante en las magnitudes de las corrientes de fuga que se presentan en aisladores, origen principal de la conductancia, la cual varía de manera significativa según los contaminantes que debido al entorno se lleguen a depositar sobre los aisladores pues afecta las propiedades conductoras de los mismos. El efecto corona, resultado de la fuga entre líneas es un factor que también se ve afectado por las condiciones atmosféricas imperantes en el entorno.

Comúnmente la magnitud de la corriente de fuga en los aisladores de líneas aéreas es un parámetro poco significativo para el cálculo de la admitancia en paralelo o de dispersión razón por la cual no se considera la conductancia entre conductores de una línea aérea.

2.3.-Modelado y cálculo de los parámetros de la línea de transmisión.

2.3.1.- Resistencia.

En términos de transferencia de potencia el término que más afecta la eficiencia de la línea es la resistencia. Entiéndase por “*resistencia*” a la resistencia efectiva del conductor, la cual podemos expresar de la siguiente manera:

$$R = \frac{\textit{pérdida de potencia en el conductor}}{|I|^2} [\Omega] \quad (2.1)$$

En esta expresión expresamos la potencia en watts la I es la corriente eficaz (corriente r.m.s) en el conductor expresada en amperes. Solo cuando la distribución de corriente por medio del conductor se manifiesta uniforme se puede considerar que la resistencia efectiva es equivalente a la resistencia de corriente directa (cd). Adicional a esta característica de la resistencia de cd de distribuirse uniformemente debemos considerar que se debe tomar en cuenta una temperatura específica.

En la siguiente expresión se define la resistencia de corriente directa:

$$R_0 = \frac{\rho l}{A} [\Omega] \quad (2.2)$$

donde:

ρ = resistividad del conductor

l = longitud

A = área o sección transversal

2.3.2.- Inductancia de una línea aérea versus flujo interno.

Para realizar el cálculo de la inductancia de una línea de transmisión debida a los enlaces de flujo magnético interno se debe considerar el flujo por ampere. Dada la condición de permeabilidad μ constante, la corriente sinusoidal producirá flujos que variaran sinusoidalmente en fase con la corriente

Dadas esas condiciones, podemos expresar los enlaces de flujo resultantes como el fasor λ , y entonces:

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (2.4)$$

Observemos que sustituyendo el valor instantáneo de la corriente i por el fasorial I en la ecuación (2.4), λ deber representar el enlace de flujo instantáneo producido por i , este parámetro se expresa en unidades de *Webers-vuelta, Wbv.*

Recordemos también que el voltaje inducido en el circuito también será proporcional a las líneas de flujo cambiantes dentro de los conductores y, por lo tanto, a la inductancia.

Es posible calcular el valor de la inductancia debida al flujo interno considerando la correspondencia de los enlaces de flujo a la corriente, para ello es preciso considerar que cada línea de flujo interno se relaciona sólo con una fracción de la corriente total. Ahora bien, a efecto de obtener el valor aproximado de la inductancia de una línea de transmisión, considérese el flujo interno y externo de cada conductor. Sea un conductor cilíndrico largo con sección transversal tal como se muestra en la figura 2.1

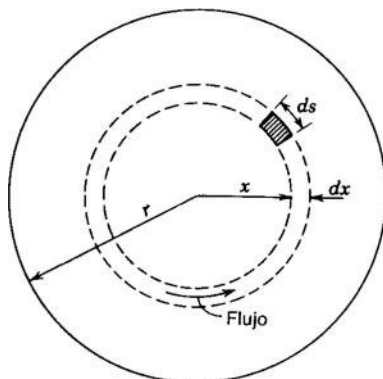


FIGURA 2.1.-Sección transversal de un conductor cilíndrico.

Suponiendo que el campo magnético de este conductor no es afectado de manera apreciable debido a que el retorno de la corriente de este conductor se encuentra lejos del mismo, entonces las líneas de flujo serían concéntricas al conductor.

La fuerza magnetomotriz (fmm) alrededor de una trayectoria cerrada, es proporcional a la corriente total circulante en esa trayectoria, según la ley de Ampere.

Es decir que si lo interpretamos de forma analítica podemos traducirlo a que la fmm es igual a la integral de línea alrededor de la trayectoria cerrada de la componente de la intensidad de campo magnético que es tangente a la trayectoria, dicho lo anterior lo podemos expresar en la ecuación (2.5):

$$fmm = \oint H \cdot ds = I [A_v] \quad (2.5)$$

donde: H = intensidad del campo magnético, $[A_v/m]$

s = distancia a lo largo de la trayectoria, $[m]$

I = corriente encerrada, $[A]$

Notemos que H e I son mostrados como fasores a efecto de representar cantidades alternas senoidales dado que el trabajo aquí se aplica de la misma manera a corriente alterna o directa. Siendo pragmáticos podemos decir que I se puede interpretar como corriente directa y H como número real.

Adviértase que el punto entre H y ds en la expresión 2.5 nos indica que el valor de H es la componente de la intensidad de campo que es tangente a ds .

Por tanto, si consideramos H_x la intensidad de campo desde el centro del conductor a una distancia de x metros, H_x será constante en todos los puntos equidistantes desde el centro del conductor debido a que el campo es simétrico y radial.

Resolviendo la integral que se indica en la ecuación (2.5) alrededor de una trayectoria circular concéntrica, con el conductor a x metros desde el centro, H_x es una constante sobre la trayectoria y tangente a ella.

La ecuación (2.5) da

$$\oint H_x ds = I_x \quad (2.6)$$

y

$$2\pi x H_x = I_x \quad (2.7)$$

donde I_x es la corriente circulante en una trayectoria cerrada. Suponiendo, entonces una densidad de corriente uniforme.

$$I_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} \quad (2.8)$$

donde I_x es la corriente total en el conductor. Sustituyendo la ecuación (2.8) en la (2.7) y resolviendo para H_x , se llega a la expresión:

$$H_x = \frac{x}{2\pi r^2} I \quad [Av/m] \quad (2.9)$$

La densidad de flujo a x metros desde el centro del conductor es

$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} [Wb/m^2] \quad (2.10)$$

Donde μ es la permeabilidad del conductor.³ En el elemento tubular de espesor dx , el flujo $d\Phi$ es B_x por el área de la sección transversal del elemento normal a las líneas de flujo, y el área es igual a dx por la longitud axial. El flujo por metro de longitud es

$$d\Phi = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} dx \quad [Wb/m] \quad (2.11)$$

Los enlaces de flujo $d\lambda$ por metro de longitud (que son originados por el flujo en el elemento tubular) son el producto del flujo por metro de longitud y la fracción de la corriente enlazada. Así,

$$d\lambda = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\Phi = \frac{\mu I x^3}{2\pi r^4} dx \quad [Wbv/m] \quad (2.12)$$

3

En las unidades SI, la permeabilidad del espacio libre es $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, y la permeabilidad relativa es $\mu_r = \mu/\mu_0$

Resolviendo la integral que define el área desde el centro del conductor hasta el borde exterior, lo cual nos permitirá encontrar λ_{int} , es decir, los enlaces de flujo totales dentro del conductor se obtienen

$$\lambda_{int} = \int_0^r \frac{\mu I x^3}{2\pi r^4} dx = \frac{\mu I}{8\pi} [Wbv/m] \quad (2.13)$$

Para una permeabilidad relativa de 1, $\mu = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ y

$$\lambda_{int} = \frac{I}{2} \times 10^{-7} [Wbv/m] \quad (2.14)$$

$$L_{int} = \frac{I}{2} \times 10^{-7} [H/m] \quad (2.15)$$

Lo anterior representa el calculo de la inductancia por unidad de longitud (*henrys* por metro) , solo debida a la influencia del flujo en el interior de un conductor cilíndrico. Convenientemente, en lo sucesivo, solo nombraremos a esta inductancia por unidad de longitud simplemente inductancia, sin desatender el uso de as unidades correctas.

2.3.3.- Capacitancia de líneas de transmisión.

Cuando dos conductores cilíndricos tienen una diferencia de potencial V , adquieren cargas $+Q$ y $-Q$, entonces decimos que tienen una capacitancia C por centímetro entre sí de:

$$C = Q/V$$

Existe un parámetro llamada capacitancia la cual varia dependiendo del espacio entre dos conductores paralelos y el tamaño de los conductores, de tal manera que, tratándose de líneas de alto voltaje, la capacitancia crecerá en importancia dependiendo la longitud, de la misma manera, para líneas pequeñas, menores a 80 km de longitud / efecto de la capacitancia puede ser pequeño o prácticamente despreciable.

Un voltaje alterno en una línea de transmisión tiene como consecuencia que la carga en los conductores en un punto dado aumente o disminuya directamente proporcional al valor instantáneo de voltaje entre los conductores en ese punto. La corriente es el flujo de carga, y la corriente que se origina por la carga y descarga alternadas de una línea debidas al voltaje alterno, se conoce como corriente de carga de la línea. Como

la capacitancia es una derivación entre conductores, la corriente de carga fluye en la línea de transmisión aun cuando esté en circuito abierto.

La naturaleza de un voltaje alterno ocasionara que la carga promedio entre los conductores de una línea de transmisión aumente o disminuya de manera proporcional al valor instantáneo de voltaje entre conductores en el punto dado. Para el caso de la corriente, sabemos que ésta representa el flujo de carga y se origina debido a los ciclos de carga y descarga ocasionados por el voltaje alterno de la línea, esta corriente se conoce como corriente de carga de la línea. Además, este efecto de capacitancia visto por la línea, es una derivación entre conductores lo cual determina que la corriente de carga fluya en la línea de transmisión aun cuando permanezca en circuito abierto

Este efecto de capacitancia influye en aspectos como la caída de tensión a lo largo de la línea, la eficiencia, el factor de potencia y consecuentemente la estabilidad del sistema al cual intrínsecamente la línea pertenece.

Recordemos de la Ley de Gauss para campos eléctricos que la carga total dentro de una superficie cerrada es determinada por la integral de superficie sobre la componente normal de la densidad de flujo eléctrico. Es decir que la carga eléctrica total dentro de una superficie cerrada será igual al flujo eléctrico total que sale de la superficie.

Las líneas de flujo eléctrico se originan en las cargas positivas y terminan en las negativas. La densidad de carga perpendicular a la superficie se designa D_f es igual a kE , donde k es la permitividad del material que rodea a la superficie y E es la intensidad de campo eléctrico.

2.3.4.- Campo eléctrico de un conductor largo y recto.

Sea una superficie cilíndrica concéntrica con un conductor con x metros de radio. Si consideramos que, dadas estas condiciones, todos los puntos de la superficie descrita son equidistantes al conductor, entonces la superficie cilíndrica se puede considerar equipotencial y la densidad de flujo eléctrico solo se deberá al flujo que abandona el conductor por metro de longitud, dividido por el área de la superficie en una longitud axial de l m. La densidad de flujo eléctrico se expresa:

$$Df = \frac{q}{2\pi x} [C/m^2] \quad (2.16)$$

Sabemos que:

- Q = carga en coulomb por metro
- x = distancia en metros del conductor al punto de cálculo del flujo eléctrico.

La densidad de flujo eléctrico dividida entre la permitividad del medio nos expresa un valor que es conocido como intensidad de campo eléctrico o también el negativo del gradiente de potencial. De manera analítica lo expresaríamos de la siguiente manera:

$$E = \frac{q}{2\pi x} [V/m] \quad (2.17)$$

E y q pueden ser valores instantáneos, fasoriales o de corriente directa.

2.3.5.- Diferencia de potencial entre dos puntos debida a una carga.

El trabajo necesario en *joules* para mover una carga de un coulomb de un punto a otro es conceptualizado como la diferencia de potencial entre esos dos puntos. Por otro lado, la intensidad del campo eléctrico es una magnitud que dimensiona la fuerza que se ejerce sobre una carga que se encuentra en el campo.

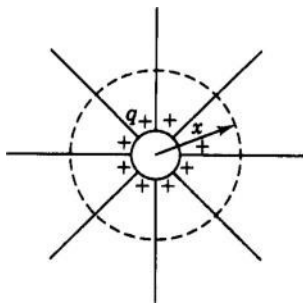


FIGURA 2.2 Líneas del flujo eléctrico que se originan en las cargas positivas distribuidas uniformemente sobre la superficie de un conductor cilíndrico aislado.

La fuerza en Newtons que actúa sobre un coulomb de carga en determinado punto es conocida como la intensidad de campo eléctrico dimensionada en volts por metro. La manera de calcular el trabajo realizado para mover una carga desde el punto de mas bajo nivel de potencial al punto del mas alto nivel de potencial dentro de ese campo eléctrico es resolviendo la integral de línea entre ellos y físicamente es igual la diferencia de potencial entre esos dos puntos.

Para ilustrar este hecho, considérese la figura (2.3) en la que se tiene un conductor largo y recto en donde queremos transportar una carga de q C/m desde el punto P_1 al punto P_2 , los cuales están ubicados respectivamente en las distancias en metros D_1 y D_2 desde el centro del conductor. Como ya se explicó anteriormente el conductor se considera que es una superficie equipotencial y podemos asumir que la carga esta distribuida de manera uniforme sobre el equivale a la carga concentrada en su centro.

Para el caso que nos ocupa y tomando como referencia la figura (2.3) D_2 es mayor que D_1 , por lo que si deseamos desplazarla de P_2 a P_1 , considerando que P_1 se encuentra a un potencial mayor que P_2 , se debe realizar trabajo sobre la carga positiva para moverla de P_2 a P_1

Como ya se dijo la diferencia de potencial es una magnitud que representa la cantidad de trabajo necesaria para mover un coulomb de carga, si este coulomb de carga se mueve desde P_1 al punto P_2 , se libera energía, la cantidad de trabajo que se ejecuta o energía liberada es la caída de tensión desde P_1 al punto P_2 y se *dimensiona en newtons-metro*.

Dado que la diferencia de potencial o trabajo es independiente a la trayectoria seguida, la manera más pragmática de calcular la caída de tensión entre dos puntos se traduce a calcular el voltaje entre las superficies equipotenciales que pasan por P_1 y P_2 mediante la integración de la intensidad de campo sobre la trayectoria radial entre estas superficies equipotenciales.

De esta forma, la caída de tensión instantánea entre P_1 y P_2 es

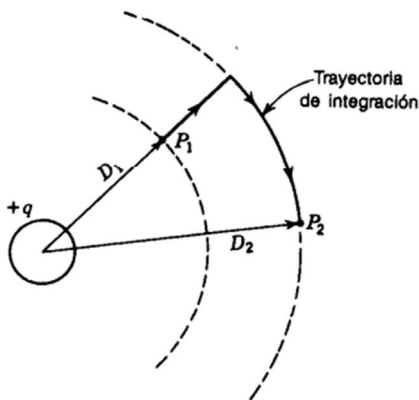


FIGURA 2.3.- Trayectoria de integración entre dos puntos externos a un conductor cilíndrico que tiene una carga positiva distribuida uniformemente.

$$v_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2\pi kx} dx = \frac{q}{2\pi kx} \ln \frac{D_2}{D_1} [V] \quad (2.18)$$

En esta expresión (2.18), identificamos a q como la carga instantánea en coulomb por metro de longitud, obsérvese que el signo con que se exprese la caída de tensión entre los dos puntos dependerá del signo que posea la carga que ocasiona la diferencia de potencial y además si esta tensión es calculada desde el punto mas alejado o el más cercano.

El signo de q puede ser positivo o negativo y el término logarítmico es positivo o negativo dependiendo de que D_2 sea mayor o menor que D_1 .

2.3.6.- Capacitancia de una línea de dos conductores.

La carga sobre los conductores por unidad de diferencia de potencial entre ellos se define como la capacitancia de una línea de dos conductores. En forma de ecuación, la capacitancia por unidad de longitud de la línea es

$$C = \frac{q}{v} = [F/m] \quad (2.19)$$

donde q es la carga sobre la línea en coulombs por metro y v es la diferencia de potencial entre los conductores en volts.

En lo sucesivo, la capacitancia por unidad de longitud solo se referirá como capacitancia, con el correcto dimensionamiento para las ecuaciones.

La capacitancia entre dos conductores la podemos hallar sustituyendo en la expresión (2.19) v en términos de q obtenida en (2.18) puede hallarse el voltaje entre a y b v_{ab} entre los conductores de la figura (2.4),

Aplicando el principio de superposición, la caída de tensión debida a las cargas en el conductor a al b se debe a la suma de las caídas de tensión debidas a las cargas de ambos por separado y calculamos en primera instancia la caída de tensión debida a la carga q_a en el conductor a y después la caída de voltaje debida a la carga q_b sobre el conductor b .

La carga q_a sobre el conductor a de la figura 2.4 origina superficies equipotenciales en la cercanía del conductor b como se muestra en la figura 2.5. Se evitan las superficies equipotenciales distorsionadas si se integra la ecuación (2.18) a lo largo de la trayectoria alterna, en lugar de la directa, de la figura 2.5. Para determinar v_{ab} , debida a q_a , se sigue la trayectoria a través de la región no distorsionada y se observa que la distancia D_1 en la ecuación (2.18) es el radio r_a del conductor a y la distancia D_2 es la distancia de centro a centro de los conductores a y b . De igual forma, para determinar v_{ab} debida a q_b , se observa que las distancias D_2 y D_1 son r_b y D , respectivamente. Se convierte a la notación fasorial (q_a y q_b son fasores), y se obtiene

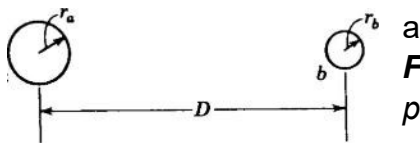


FIGURA 2.4.- Área de una línea con conductores paralelo

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D}{r_a} + \frac{q_b}{2\pi k} \ln \frac{r_b}{D} \quad (2.20)$$

Para una línea con dos conductores $q_a = -q_b$,

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \left(\ln \frac{D}{r_a} \ln \frac{r_b}{D} \right) [V] \quad (2.21)$$

Al reducir los términos logaritmos tendremos

$$V_{ab} = \frac{q_a}{2\pi k} \ln \frac{D^2}{r_a r_b} [V] \quad (2.22)$$

La capacitancia entre los conductores es

$$C_{ab} = \frac{q_a}{V_{ab}} = \frac{2\pi k}{\ln(D^2/r_a r_b)} [F/m] \quad (2.23)$$

Si $r_a = r_b = r$

$$C_{ab} = \frac{q_a}{V_{ab}} = \frac{\pi k}{\ln(D/r)} [F/m] \quad (2.24)$$

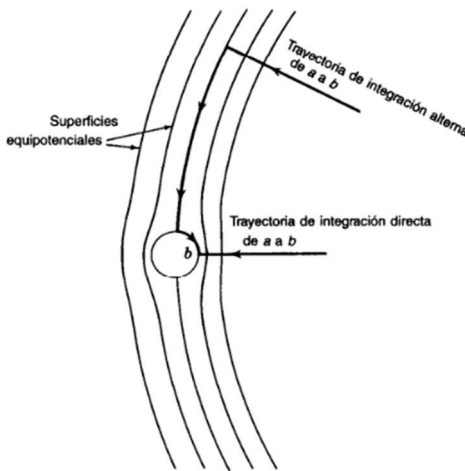


FIGURA 2.5.- Superficies equipotenciales de una porción de campo eléctrico originado por un conductor a cargado (este último no se observa). El conductor b causa que las superficies equipotenciales se distorsionen. Las flechas indican las trayectorias opcionales de integración entre un punto sobre la superficie equipotencial del conductor b y el conductor a, cuya carga q_a , es el origen de las superficies equipotenciales mostradas.

Sea la ecuación (2.24) que nos permite calcular la capacitancia entre conductores para una línea de dos conductores, ahora bien, si la línea se alimenta desde un transformador con derivación central a tierra, la diferencia de potencial entre conductores y tierra será la mitad de la diferencia de potencial entre los conductores, por otro lado la capacitancia a tierra o capacitancia al neutro será:

$$C_n = C_{an} = C_{bn} = \frac{q_a}{V_{ab}/2} = \frac{2\pi k}{\ln(D/r)} [F/m] \quad \text{al neutro} \quad (2.25)$$

El concepto de capacitancia al neutro es ilustrado en la siguiente figura:



FIGURA 2.6

a.- Representación de la capacitancia línea a línea

b) Representación de la capacitancia línea a neutro

Debemos de considerar, que las ecuaciones (2.20) a (2.25), fueron obtenidas partiendo de la ecuación (2.18), con la consideración de que existía una distribución de carga uniforme sobre el conductor, sin embargo, también es posible que se de el caso de que otras cargas estén presentes sobre la superficie del conductor lo cual volvería la superficie no uniforme y las ecuaciones obtenidas no serían estrictamente correctas.

Aun así, podemos considerar que el error en líneas aéreas es despreciable ya que este es de tan solo 0.01 %, aún para distancias tan próximas como aquéllas en las que $D/r = 50$.

Toda vez que hemos determinado la capacitancia al neutro estaremos facultados para encontrar la reactancia capacitiva existente entre un conductor y el neutro para una permitividad relativa $k_r = 1$ (en él vacío), esto mediante la ecuación para C de (2.25), y mediante ella conseguir:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{2.862}{f} \times 10^9 \ln \frac{D}{r} \quad [\Omega] \quad (2.26)$$

Dado que C esta en Faraday por metro, las unidades correctas para dimensionar la reactancia capacitiva X_c serán ohm-metro, no se debe perder de vista que (2.26), expresa la reactancia de línea a neutro para un metro de línea.

Puesto que la reactancia capacitiva esta en paralelo a lo largo de la línea, si deseamos obtener la reactancia capacitiva en ohms al neutro para toda la longitud de la línea. se debe dividir X_c en ohms-metro entre la longitud total de la línea.

2.4.-Modelos de Líneas de Transmisión.

Cuando se diseña un sistema eléctrico de potencia uno de los retos a vencer en el diseño para su operación adecuada dentro de los límites especificados en el sistema es la conservación del voltaje en varios puntos del sistema.

Nos centraremos en esta parte en desarrollar métodos que nos permitan conocer parámetros eléctricos tales como voltaje y corriente o bien la potencia en cualquier parte de la línea de transmisión, partiendo del conocimiento de estos valores en un punto, típicamente uno de los extremos de la línea.

No obstante, es importante conocer los métodos que nos ayudaran a desarrollar las ecuaciones que modelan una línea, también es importante entender cuáles son los efectos que producen los parámetros de la línea sobre los voltajes de barra y el flujo de potencia.

2.4.1.- Representación de líneas.

Las ecuaciones que caracterizan una línea de transmisión y que establecen la relación corriente/voltaje nos permiten ver claramente la interrelación que guardan entre sí los cuatro parámetros de una LT, los cuales, dicho sea de paso, están distribuidos de manera uniforme a lo largo de una LT.

Inicialmente utilizaremos un análisis de parámetros concentrados para validar ciertos resultados en líneas cortas y medias con una exactitud aceptable. Para líneas aéreas cortas deberemos asumir que la capacitancia en derivación es tan pequeña que se puede omitir por completo con una ligera pérdida de exactitud, dado lo anterior solo se requiere considerar la resistencia R y la inductancia L en serie para la longitud total de la línea.

Analizando la figura 2.8, para una línea de longitud media es posible representarla con bastante precisión asumiendo R y L como parámetros concentrados y con la mitad de la capacitancia al neutro de la línea en cada terminal del circuito equivalente.

Como ya se dijo, para el caso de la conductancia en derivación, G , es posible despreciarla cuando se calcula el voltaje y la corriente de líneas de transmisión de potencia. Para el caso de líneas cortas los capacitores se omiten en el modelo de la línea.

Hablando específicamente de la capacitancia, podemos considerar que una línea corta es aquella cuya longitud es menor a 80 Km, las líneas medias se encuentran

entre los 80 y 240 km de longitud y las líneas que van más allá de los 240 km de longitud se consideran como líneas largas , para el último caso los cálculos se requieren hacer mediante un modelo de parámetros distribuidos si es que se requiere un elevado grado de precisión , dependerá del propósito del calculo ya que algunos de ellos toleran el uso de los modelos de parámetros concentrados incluso para líneas de hasta 320 km de largo.

Es práctica común que las líneas trifásicas operen con cargas balanceadas, además aun cuando las líneas no se encuentren espaciadas de manera equilátera y no se encuentren transpuestas a cada tercio de su longitud, la asimetría que se obtiene es ligera y para efectos prácticos se consideran las fases balanceadas.

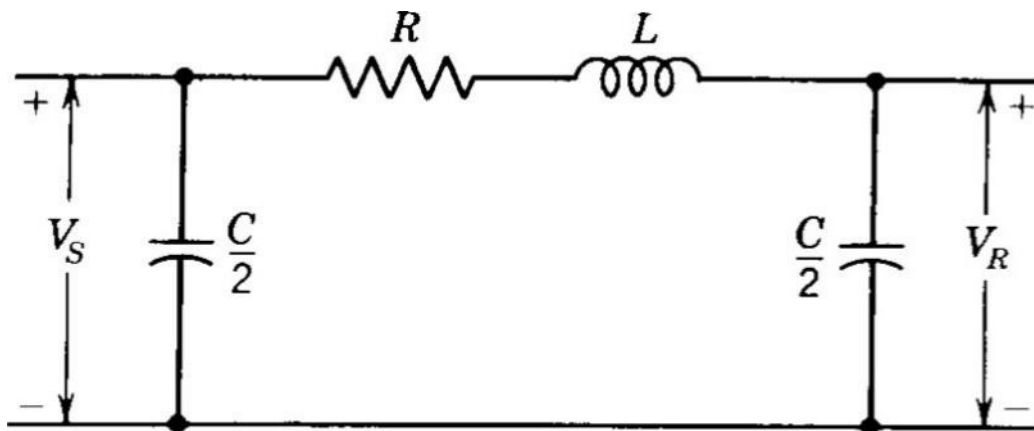


FIGURA 2.8.- Modelo equivalente de línea monofásica de longitud media.
Los capacitores deben omitirse para modelar una línea corta.

Adoptaremos la siguiente nomenclatura, lo cual nos permitirá distinguir entre la impedancia serie total de una línea y la impedancia serie por unidad de longitud:

Z = impedancia serie por unidad de longitud por fase

y = admitancia paralelo (o en derivación) por unidad de longitud por fase al neutro

l = longitud de la línea

$Z = z l$ = impedancia serie total por fase

$Y = y l$ = admitancia en paralelo (o derivación) total por fase al neutro

2.4.2.- La línea de transmisión corta.

En la figura 2.9 se muestra el circuito con el que se modela la línea de transmisión corta, para este caso I_S e I_R son las corrientes en los puntos emisor y receptor, respectivamente, y V_S y V_R son para los mismos puntos terminales los voltajes de línea a neutro.

La resolución del circuito se lleva a cabo de la misma manera que lo haríamos para uno de corriente alterna serie simple.

De esta forma:

$$I_S = I_R \quad (2.29)$$

$$V_S = V_R + I_R Z \quad (2.30)$$

donde Z es $z'l$, la impedancia serie total de la línea.

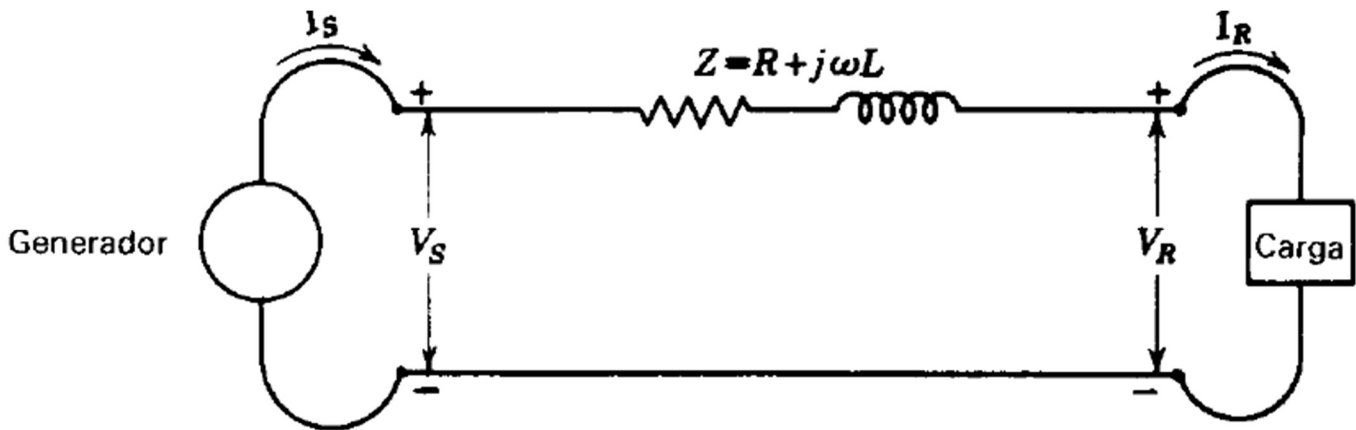
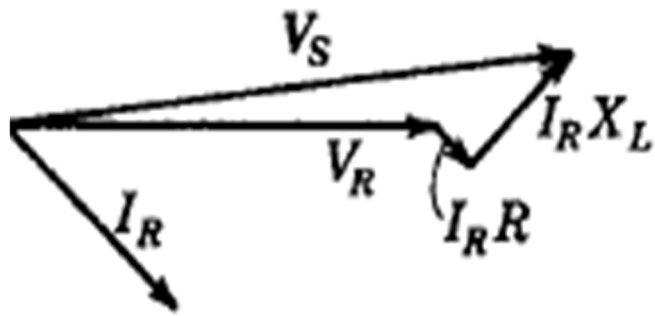
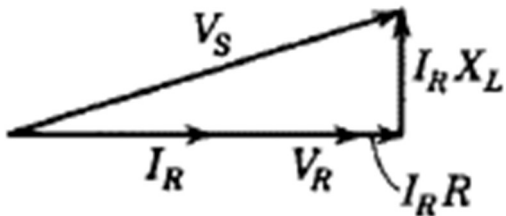


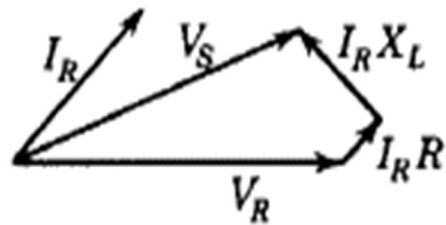
FIGURA 2.9.-Circuito ideal de una línea de transmisión corta los valores de la resistencia R y la inductancia L son valores concentrados que representan estos efectos para la longitud total línea.



a) *f.p. de la carga = 70% en atraso*



b) *f.p. de la carga — 100%*



c) *f.p. de la carga — 70% en adelanto*

FIGURA 2.10.- Diagramas fasoriales para una línea de trasmisión corta.
 Todos los diagramas se representan para las mismas magnitudes de V_R e I_R .

Cuando variamos el factor de potencia de la carga sobre la regulación del voltaje de la línea se produce un efecto, el cual es mejor entendido para las líneas cortas. La regulación de voltaje de una línea de trasmisión es la elevación en el voltaje en el punto terminal receptor, expresada en por ciento del voltaje a plena carga, cuando se quita la plena carga a un factor de potencia específico mientras se mantiene constante el voltaje en el punto terminal generador.

Es posible escribir:

$$\% \text{ de regulación} = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (2.31)$$

donde $|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|$ representa la magnitud de la tensión en el punto terminal receptor cuando no hay carga y $|V_{R,FL}|$ es la magnitud de la tensión en el *punto terminal receptor a plena carga, manteniendo constante la magnitud de $|V_S|$. Posterior al momento al que se retira la carga en una línea de transmisión corta (ilustrada por el circuito de la figura 2.9), la tensión en el punto terminal receptor es igual al del punto terminal generador. Cuando la carga se encuentra acoplada, situación representada por la figura 2.9, la tensión en el punto terminal receptor se designa mediante V_R , y $|V_R| - |V_{R,FL}|$. El la tensión en el punto terminal generador designada por V_S , es igual a $|V_S| = |V_{R,NL}|$

En la figura 2.10 mediante los diagramas fasoriales, los cuales fueron realizados para los mismos valores de tensión y corriente, es posible apreciar que es necesario un valor de tensión mayor en el punto terminal generador para mantener el voltaje dado en el punto terminal receptor para el caso en el que la corriente atrasa a la tensión, no así para cuando la misma corriente y tensión están en fase.

Por otro lado, también es posible advertir que se requiere menor tensión en el extremo emisor para mantener una determinada tensión en el extremo receptor para el caso en el que la corriente en este punto terminal adelanta a la tensión.

El efecto de la caída de tensión debido a la impedancia es el mismo para todos los casos, no obstante, debido a los diferentes factores de potencia, la caída de tensión se sumará a la tensión del punto terminal receptor con un ángulo diferente en cada caso.

Finalmente podemos concluir que la regulación de tensión será mayor para los factores de potencia en atraso y menor o incluso negativa para factores de potencia en adelanto, lo anterior nos demuestra que la reactancia inductiva de una línea de transmisión supera el valor de la resistencia arrojando como resultado que el principio de regulación que se ilustra mediante la figura 2.10 aplica para cualquier carga alimentada por un circuito que es mayormente inductivo.

No se omite comentar que, al realizar los diagramas fasoriales, las magnitudes para las caídas de tensión I_{RR} e I_{RXL} para una línea corta, se han exagerado respecto a V_R , con la intención de ilustrar de manera clara los puntos a destacar en nuestro análisis conceptual. Ahora bien, es importante remarcar que a pesar de que la relación entre el factor de potencia y la regulación para líneas largas funciona de manera similar que para las cortas no resulta tan evidente.

2.4.3.- La línea de longitud media.

Para el modelado de la línea de longitud media generalmente se incluye capacitancia pura en el parámetro de admitancia paralelo, Normalmente se toma la admitancia paralelo total de la línea y se divide en dos partes iguales las cuales se colocan en los extremos de la línea, así se obtiene el modelo de circuito T nominal. Haremos referencia a la figura 2.11 y a partir de esta desarrollaremos las ecuaciones de este modelo. Lo anterior con la finalidad de obtener una expresión para V_S , podemos observar que es apropiado asumir que la corriente en la capacitancia en el extremo receptor es $(V_R Y)/2$ y la corriente en la rama serie es $I_R + (V_R Y)/2$. De lo anterior desprendemos que:

$$V_S = \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) Z + V_R \quad (2.32)$$

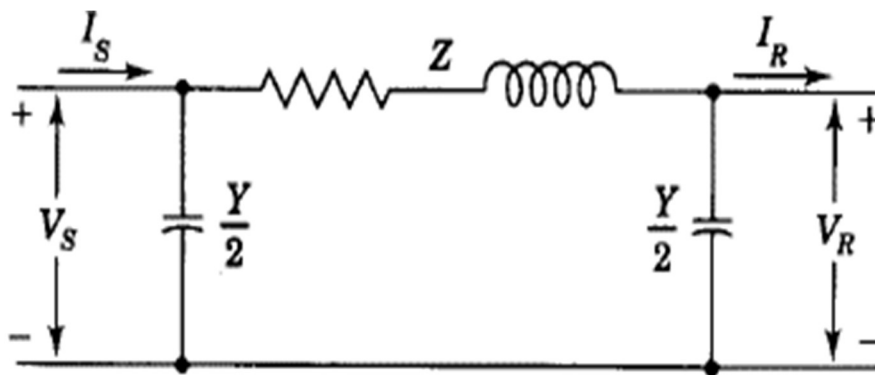


FIGURA 2.11.- Modelo nominal pi para línea de transmisión de longitud media.

2.4.4.- Solución de las ecuaciones diferenciales.

$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R \quad (2.33)$$

Con la finalidad de hallar I_S , observemos que la corriente en la capacitancia en derivación en el punto terminal generador es $V_S Y/2$, si la sumamos a la corriente de la rama serie obtenemos:

$$I_S = V_S \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R \quad (2.34)$$

Al sustituir V_S , de la ecuación (2.33), en la ecuación (2.34), se obtiene:

$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R \quad (2.35)$$

Las ecuaciones (2.33) y (2.35) se pueden expresar en la forma general

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.36)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.37)$$

Donde:

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1 \quad (2.38)$$

$$B = Z \quad C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right)$$

Las constantes obtenidas de esta manera se les conoce como constantes ABCD o bien constantes generalizadas de circuito de la LT. Se trata de números complejos, A y D son magnitudes adimensionales e iguales entre ellas. Las dimensiones de las magnitudes B y C son los Ohms y Mhos o Siemens respectivamente. Dichas constantes aplican a cualquier red lineal pasiva y con dos terminales en cada extremo, dicho circuito lo conocemos como una red de dos puertos.

Lo importante de estos resultados es en sí, el significado físico que podemos dar a estas constantes. Cuando en la ecuación (2.36) I_R es cero, observamos que A es la relación V_S/V_R sin carga. Así también, B es la relación V_S/I_R cuando el punto terminal receptor está en cortocircuito. A es útil en el cálculo de la regulación. Si $V_{R,FL}$ es la tensión en el punto terminal receptor a plena carga para una tensión en el punto terminal generador V_S , obtenemos de (2.31) lo siguiente:

$$\% \text{ de regulación} = \frac{|V_S| |A| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \quad (2.39)$$

2.4.5.- Modelo de línea de transmisión larga y la solución de las ecuaciones diferenciales.

Para obtener una solución con alto grado de precisión para una línea que supera los 230 km de longitud, deberemos asumir que los parámetros no se deben de considerar concentrados en un punto de la línea, sino que se deberá de adoptar un modelo de parámetros distribuidos de manera uniforme a lo largo de la línea.

Para efectos ilustrativos se muestra la figura 2.12 en donde solo se considera una fase y la conexión a neutro de una línea trifásica. No se hace alusión a parámetros concentrados ya que se considerará el caso de la línea con impedancia y admitancia uniformemente distribuidas a lo largo de la línea.

De esta forma en la figura 2.12 consideramos una sección diferencial de longitud dx en la línea, a una distancia x desde el extremo receptor de la línea. Sea, $z dx$ y $y dx$ respectivamente la impedancia serie y la admitancia en paralelo de la sección diferencial, V e I son los fasores que varían con x .

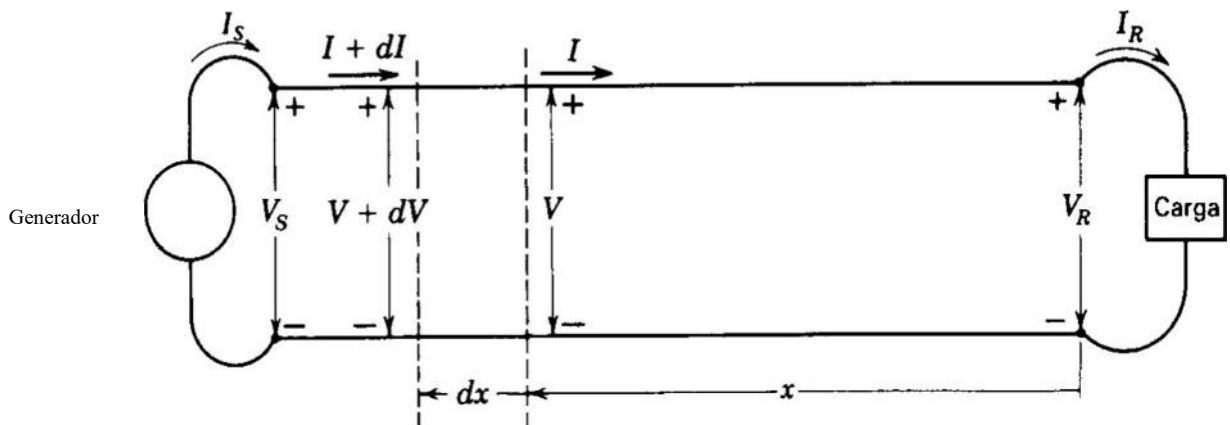


FIGURA 2.12.- Diagrama representativo de una línea de transmisión larga con parámetros distribuidos con una fase y el neutro de regreso. Se indican la nomenclatura para la línea y el elemento de longitud.

El cálculo de la corriente en la línea es $(I + I + dI)/2$ y el incremento de V para una distancia dx es posible expresarlo como:

$$dV = \frac{I + I + dI}{2} z dx = Iz dx \quad (2.40)$$

Despreciando los productos de las cantidades diferenciales. Obtenemos,

$$dI = \frac{V+V+d}{2} y dx = Vy dx \quad (2.41)$$

$$\frac{dV}{dx} = I_z \quad (2.42)$$

$$\frac{dI}{dx} = V_y \quad (2.43)$$

Derivando las ecuaciones (2.42) y (2.43) con respecto a x , queda:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} \quad (2.44)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx} \quad (2.45)$$

Sustituyendo los diferenciales dI/dx y dV/dx de las expresiones (2.43) y (2.42) en las ecuaciones (2.44) y (2.45), obtenemos:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yzV \quad (2.46)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = yzI \quad (2.47)$$

De esta manera llegamos a obtener la expresión (2.46) en la que sólo son variables V y x y, por otro lado, la expresión (2.47) cuyas únicas variables son I y x .

La solución de estas expresiones debe ser tales que al obtener la segunda derivada respecto a la variable x obtengamos como resultado a la constante yz multiplicando a la expresión original. Verbigracia, cuando se deriva dos veces con respecto a x la

solución para V, se debe obtener yzV. Si lo analizamos esto nos infiere que la solución se puede expresar de manera exponencial. Asumiremos que la solución de la ecuación (2.46) es:

$$V = A_1 \varepsilon^{\sqrt{yzx}} + A_2 \varepsilon^{-\sqrt{yzx}} \quad (2.48)$$

Calculando, respecto a la variable independiente x la segunda derivada de V en la expresión (2.48) llegamos a:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yz [A_1 \varepsilon^{\sqrt{yzx}} + A_2 \varepsilon^{-\sqrt{yzx}}] \quad (2.49)$$

En donde observamos que la solución supuesta para V es multiplicada por el factor yz.

Esto nos permite determinar que la ecuación (2.46) es la solución de la expresión (2.48). Sustituyendo en la ecuación (2.42) el valor de V dado por la ecuación (2.48), se concluye que:

$$I = \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_1 \varepsilon^{\sqrt{yzx}} - \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_2 \varepsilon^{-\sqrt{yzx}} \quad (2.50)$$

Usando las condiciones iniciales en el punto terminal receptor de la línea; o sea, cuando $x = 0$, $V = V_R$ e $I = I_R$ podemos determinar el valor de las constantes A_1 , A_2 y A_I al sustituir estos valores en las ecuaciones (2.48) y (2.50) da:

$$V_R = (A_1 + A_2)$$

y

$$I_R = \frac{1}{\sqrt{z/y}} (A_1 - A_2)$$

Sustituyendo $Z_c = \sqrt{z/y}$ y solucionando para A_1 , A_2 :

$$A_1 = \frac{V_R + I_R Z_c}{2} \quad \text{y} \quad A_2 = \frac{V_R - I_R Z_c}{2}$$

Finalmente, sustituimos los valores hallados para A_1 y A_2 en las expresiones (2.48) y (2.50) y al hacer $-y = Gz$, llegamos a:

$$V = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} \varepsilon^{\gamma x} + \frac{V_R - I_R Z_C}{2} \varepsilon^{-\gamma x} \quad (2.51)$$

$$I = \frac{V_R / Z_C + I_R}{2} \varepsilon^{\gamma x} - \frac{V_R / Z_C - I_R}{2} \varepsilon^{-\gamma x} \quad (2.52)$$

donde $Z_c = \sqrt{z/y}$ es conocida como *impedancia característica* de la línea y el cociente bajo el radical z/y se le conoce como constante de propagación.

A partir de las ecuaciones (2.51) y (2.52) podemos obtener los valores *RMS* de V e I además de sus ángulos de fase, lo anterior es posible determinarlo en cualquier punto específico de una línea de una distancia x , tomando como punto de referencia u origen el punto terminal receptor hasta un punto determinado, lo anterior, será posible cuando que estén dados los valores de V_R , I_R así como los parámetros de la línea.

2.4.6.- La línea de transmisión larga.

La parte real de la constante de propagación es conocida como constante de atenuación α , la parte compleja se llama constante de fase β , las unidades en las que son dimensionadas son nepers y radianes por unidad de longitud respectivamente.

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.53)$$

Sustituyendo el valor de la constante de propagación en las expresiones (2.51) y (2.52) obtenemos las siguientes formas desarrolladas para el V e I

$$V = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} \varepsilon^{\alpha x} \varepsilon^{j\beta x} + \frac{V_R - I_R Z_C}{2} \varepsilon^{-\alpha x} \varepsilon^{-j\beta x} \quad (2.54)$$

$$I = \frac{V_R / Z_C + I_R}{2} \varepsilon^{\alpha x} \varepsilon^{j\beta x} - \frac{V_R / Z_C - I_R}{2} \varepsilon^{-\alpha x} \varepsilon^{-j\beta x} \quad (2.55)$$

El hecho de obtener las expresiones desarrolladas de la forma anterior nos permite observar de mejor manera el comportamiento de las variables, es decir nos facilita la interpretación física ya que las propiedades de $\varepsilon^{\alpha x}$ y $\varepsilon^{j\beta x}$ ayudan a explicar la

variación de los valores fasoriales del voltaje y la corriente como una función de la distancia a lo largo de la línea.

$\varepsilon^{\alpha x}$ evoluciona en magnitud en la misma medida que x cambia, pero $\varepsilon^{j\beta x}$ siempre se mantiene con la magnitud de 1 lo cual origina un desfase de β radianes por unidad de longitud de la línea. El término $\varepsilon^{\alpha x}$ cambia en magnitud conforme x cambia, pero $\varepsilon^{j\beta x}$ (que es idéntico a $\cos \alpha x + j \operatorname{sen} \beta x$) siempre tiene una magnitud de 1 y origina un desfase de β radianes por unidad de longitud de la línea.

Tomando la referencia desde el punto terminal receptor observamos en la ecuación (2.54) , $[(V_R + I_R Z_C)/2]\varepsilon^{\alpha x}\varepsilon^{j\beta x}$ que el primer término se incrementa directamente proporcional en magnitud y fase conforme la distancia x aumenta, Por el contrario si se toma como referencia el punto terminal generador hacia el extremo terminal receptor , la magnitud disminuye y se atrasa la fase.

Esta es la característica de una onda viajera y es similar al comportamiento de una onda en el agua, la cual varía en magnitud con el tiempo en cada punto, mientras que su fase está retrasada y su valor máximo disminuye con la distancia desde el origen. La variación en el valor instantáneo no se expresa en el término, pero está implícito ya que V_R e I_R son fasores. El primer término en la ecuación (2.54) se llama *voltaje incidente*.

Este comportamiento característico de una onda viajera, se asemeja a una onda en el agua, la magnitud cambia con el tiempo para cada punto, al tiempo que la fase se retrasa y el valor máximo decremente con la distancia desde el origen. El primer término de la expresión no muestra la variación del valor instantáneo, pero se halla implícito puesto que V_R e I_R son fasores. El primer término en la expresión (2.54) es conocido como *voltaje incidente*.

2.4.7.-Modelo de línea de transmisión larga: Ecuaciones en forma hiperbólica.

Una manera mas apropiada para el manejo analítico de las ecuaciones de I y V para la línea de transmisión la podemos hallar al sustituir las formas hiperbólicas de las funciones seno y coseno para las formas exponenciales.

$$\operatorname{senh} \theta = \frac{\varepsilon^{\theta} - \varepsilon^{-\theta}}{2} \quad (2.56)$$

$$\operatorname{cosh} \theta = \frac{\varepsilon^{\theta} + \varepsilon^{-\theta}}{2} \quad (2.57)$$

El hecho de sustituir en (2.51) y (2.52) las funciones hiperbólicas por los términos exponenciales, nos permiten encontrar un nuevo conjunto de ecuaciones las cuales también nos pueden proporcionar en cualquier punto a lo largo de la línea los valores de voltaje y corriente.

$$V = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_C \sinh \gamma x \quad (2.58)$$

$$I = I_R \cosh \gamma x + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma x \quad (2.59)$$

A efecto de poder obtener el voltaje y corriente en el punto terminal generador, consideramos $x=l$

$$V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l \quad (2.60)$$

$$I_S = I_R \cosh \gamma l + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma l \quad (2.61)$$

Observando estas ecuaciones podemos determinar que para una línea larga, las constantes generalizadas son

$$A = \cosh \gamma l$$

$$B = Z_C \sinh \gamma l$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_C}$$

$$D = \cosh \gamma l$$

Resolviendo las expresiones (2.60) y (2.61) para V_R e I_R en función de V_S e I_S , obtenemos:

$$V_S = V_S \cosh \gamma l - I_S Z_C \sinh \gamma l \quad (2.62)$$

$$I_R = I_S \cosh \gamma l - \frac{V_S}{Z_c} \sinh \gamma l \quad (2.63)$$

En las ecuaciones anteriores, las corrientes son de línea y los voltajes son al neutro, siempre que estemos hablando de líneas trifásicas balanceadas, esto es, los voltajes de línea divididos entre $\sqrt{3}$.

A fin de resolver las ecuaciones, es necesaria la evaluación de las funciones hiperbólicas, derivado de que γl es generalmente un número complejo, las funciones hiperbólicas también resultan ser un número complejo, sin embargo, su evaluación no debiera representar mayor dificultad cuando nos apoyamos de herramientas computacionales.

En caso de que nos planteáramos resolver las ecuaciones sin la ayuda de una computadora, es posible utilizar expresiones equivalentes tales como las siguientes expansiones de los senos y cosenos hiperbólicos de los argumentos complejos en términos de funciones circulares e hiperbólicas de argumentos reales:

$$\cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh \alpha l \cos \beta l + j \sinh \alpha l \sin \beta l \quad (2.64)$$

$$\sinh(\alpha l + j\beta l) = \sinh \alpha l \cos \beta l + j \cosh \alpha l \sin \beta l \quad (2.65)$$

Las expresiones anteriores nos facilitan el cálculo de funciones hiperbólicas de argumentos complejos. Como ya se mencionó, las unidades correctas para el término βl es el radian. Una manera de comprobar las ecuaciones anteriores sería sustituir las formas exponenciales de las formas hiperbólicas y los equivalentes exponenciales de las funciones circulares.

Otra posibilidad para la evaluación de las funciones hiperbólicas de tipo complejo, sería sustituir $\alpha + j\beta$ por θ :

$$\cosh(\alpha + j\beta) = \frac{\varepsilon^{\alpha} \varepsilon^{j\beta} + \varepsilon^{-\alpha} \varepsilon^{-j\beta}}{2} = \frac{1}{2} (\varepsilon^{\alpha} \cos \beta + \varepsilon^{-\alpha} \cos \beta) \quad (2.66)$$

$$\sinh(\alpha + j\beta) = \frac{\varepsilon^{\alpha} \varepsilon^{j\beta} - \varepsilon^{-\alpha} \varepsilon^{-j\beta}}{2} = \frac{1}{2} (\varepsilon^{\alpha} \sin \beta - \varepsilon^{-\alpha} \sin \beta) \quad (2.67)$$

2.4.8.- El circuito equivalente de una línea larga.

Cuando usamos el modelo nominal π para representar a una línea de transmisión, debemos de estar conscientes que éste no representa de la mejor manera a una línea larga ya que el modelo no tiene en cuenta que los parámetros de la línea se encuentran distribuidos uniformemente, a medida que la longitud de la línea se incrementa, las divergencias entre el modelo de circuito nominal π y la línea real se hace mayor.

Es posible representar a una línea larga con precisión (al menos en cuanto a las medidas en los extremos de la línea se refiere) por medio de un modelo de red de parámetros concentrados.

Para realizar el manejo analítico supondremos que la figura 2.11 ilustra el circuito π equivalente para una línea larga, solo que cambiaremos la nomenclatura para distinguirlas del circuito nominal π , identificaremos entonces con Z' como la rama serie y $Y'/2$ como la rama paralela.

La expresión (2.33) nos permite calcular el voltaje en el extremo generador de un circuito simétrico π , este es calculado partiendo de sus ramas serie y paralelo, además de que es posible que nos entregue la corriente y el voltaje en el extremo receptor.

Al sustituir en la ecuación (2.33) Z' y $Y'/2$ en lugar de Z y de $Y/2$, se obtiene el voltaje en el extremo generador del circuito equivalente en términos de sus ramas serie y paralelo, así como el voltaje y la corriente en el extremo receptor:

$$V_S = \left(\frac{Z'Y'}{2} + 1 \right) V_R + Z'I_R \quad (2.68)$$

Para obtener el factor de equivalencia entre el modelo nominal π y el modelo de la línea de transmisión larga, los coeficientes de V_R e I_R en la ecuación (2.68) deben ser iguales entre de manera respectiva, a los coeficientes de V_I e I_R en la ecuación (2.60). Si igualamos los coeficientes de I_R

$$Z' = Z_c \operatorname{senh} \gamma l \quad (2.69)$$

$$Z' = \sqrt{\frac{z}{y}} \sinh \gamma l = z l \frac{\sinh \gamma l}{\sqrt{z l}} \quad (2.70)$$

$$Z' = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$$

donde Z es igual a $z l$ y este resultado es conocido como la impedancia serie total de la línea. El factor $(\sinh \gamma l)/\gamma l$ es por el que se debe multiplicar la impedancia serie del circuito nominal π , para poder para convertirlo al circuito equivalente π .

Una manera de demostrar que el circuito nominal π es una muy buena aproximación para la línea de longitud media referente a la rama serie, es el hecho de que para valores pequeños de γl , los términos $\sinh \gamma l$ y γl deben ser casi iguales.

En lo que respecta a la rama paralelo del circuito equivalente π se procede a igualar coeficientes de V_R en las ecuaciones (2.60) y (2.68) y así obtenemos:

$$\frac{Z' Y'}{2} + 1 = \cosh \gamma l \quad (2.71)$$

Sustituyendo $Z_c \sinh \gamma l$ por Z' :

$$\frac{Y' Z_c \sinh \gamma l}{2} + 1 = \cosh \gamma l \quad (2.72)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l} \quad (2.73)$$

Sustituyendo en la ecuación (2.73) a la tangente hiperbólica por su identidad, obtenemos la expresión de la admitancia en paralelo expresada en función de funciones de sen y coseno hiperbólicos

$$\tanh \frac{\gamma l}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l} \quad (2.74)$$

Dicha identidad es posible verificarla si sustituimos las formas exponenciales de las ecuaciones (2.56) y (2.57) para las funciones hiperbólicas, recordemos que $\tanh \theta = \sinh \theta / \cosh \theta$.

Así,

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh \frac{\gamma l}{2} \quad (2.75)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y \tanh (\gamma l/2)}{2 \frac{\gamma l}{2}} \quad (2.76)$$

Donde la admitancia paralelo total de la línea es igual a $Y = \gamma l$.

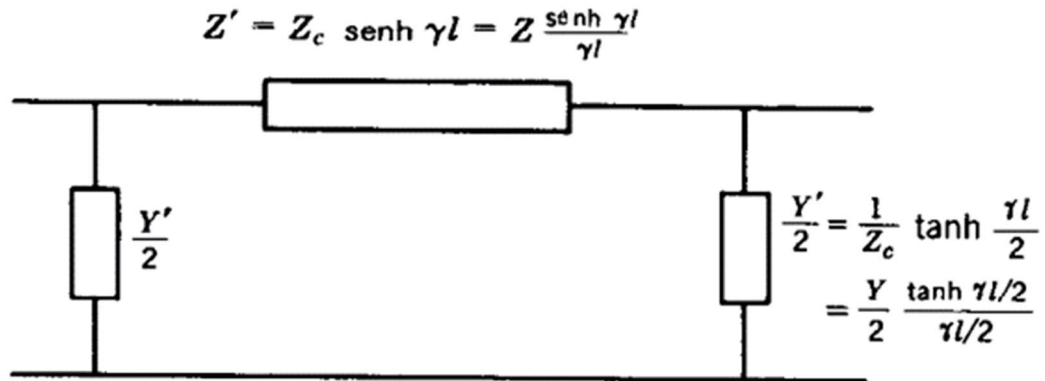


FIGURA 2.13.-Circuito equivalente π de una línea de transmisión

Finalmente en la ecuación (2.76) podemos observar el factor de corrección al que llegamos y que se utiliza para hacer la conversión de la admitancia de las ramas paralelo del circuito nominal π en las del circuito equivalente π . Se observa que el modelo representa de manera bastante aproximada a líneas de longitud media, ya que dichos factores son aproximadamente iguales para valores pequeños de $\tanh (\gamma l/2)$ y $\gamma l/2$, y como previamente lo comentamos para líneas de longitud media el factor de corrección para la rama serie es despreciable.

2.5.-Unidad de Medición Fasorial.

Las mediciones fasoriales sincronizadas resultan extremadamente convenientes para el monitoreo y control de los parámetros dinámicos de un sistema eléctrico de potencia, particularmente en sistemas de alto estrés. Las PMU se introdujeron en la década de 1980 y el sistema de medición de área amplia recopila datos de medición en tiempo real en amplias áreas geográficas. PMU es una grabadora digital con capacidad de sincronización, ya sea una unidad autónoma o parte de otro dispositivo de protección como el relé y puede marcar la hora, registrar y almacenar mediciones fasoriales de la potencia. eventos del sistema.

Según la definición del estándar IEEE, IEEE C37.118, Estos dispositivos producen estimaciones fasores de voltaje y frecuencia y tasa de cambio de frecuencia (ROCOF) partiendo de señales de corriente y voltaje y una fuente de sincronización vía sistema GPS.

2.5.1.-Funcionamiento de una PMU.

Al valor fasorial obtenido de voltaje o corriente de formas de onda y referenciada con precisión a una base de tiempo común se le conoce como sincrofasor. El PMU extrae la magnitud del parámetro, el ángulo de fase, la frecuencia y el ROCOF de las señales que aparecen en sus terminales de entrada con precisión mayor a 1 ms de sincronización obtenida del sistema de posicionamiento global (GPS), estos dispositivos pueden proporcionar mediciones directas, en tiempo real y altamente sincronizadas de los fasores de voltaje en los buses instalados, así como también de los fasores de corriente de las ramas de potencia.

En la figura 2.3.1 se ilustra el diagrama de bloques de un PMU, en este dispositivo, las entradas analógicas (corrientes y tensiones de los transformadores de medida campo) se convierten a voltajes con derivaciones o instrumentos apropiados transformadores (típicamente dentro del rango de 10 V) para que cumplan con los requisitos del convertidor de analógico a digital.

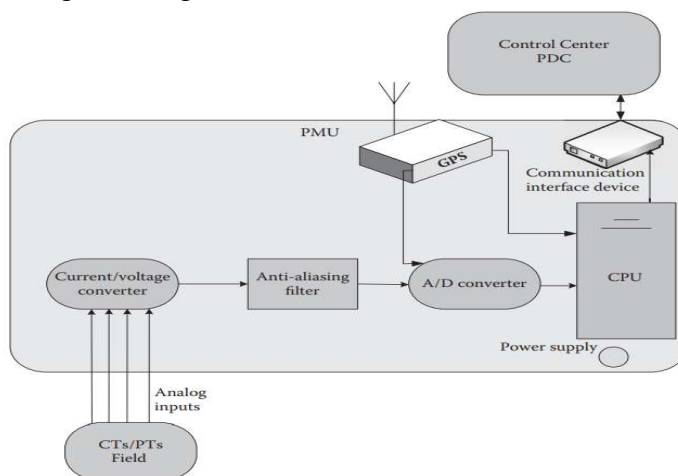


FIGURA 2.3.1.-Diagrama a bloques de un PMU

Las funciones de cada una de las etapas ilustradas son las siguientes:

- El **filtro anti-aliasing** (paso bajo) es usado para separar solo señales de frecuencia de potencia
- El **crystal oscilador** en el módulo GPS proporciona la frecuencia del reloj de muestreo, que es enganchada por fase con el pulso del reloj GPS
- El **convertidor A / D**, utiliza filtrado de frecuencia de muestreo reducida para convertir los valores analógicos a los valores digitales.
- El **módulo del CPU** calcula estimaciones de secuencia positiva de todas las señales de corriente y tensión y lo estampa con la hora universal coordinada suministrada por el módulo GPS. Desde el módulo del CPU, los datos se envían a través del módulo de interfaz de comunicación al centro de control.
- El módulo de **fuentes de alimentación** suministra energía al PMU.

2.3.2.-Cantidad fasorial y sincronización de tiempo.

El fasor es una cantidad con magnitud y fase, con respecto a una referencia que representa una forma de onda sinusoidal. En una línea eléctrica que conecta los bus 1 y bus 2, los voltajes V_1 y V_2 son dos formas de onda sinusoidales con una diferencia de fase de δ_1 y δ_2 con respecto a una referencia señal como se muestra en la figura 2.3.2.

Los dos voltajes, si se miden con sus respectivos desplazamientos angulares con respecto a la señal de referencia, puede representarse como cantidades fasoriales en una ubicación centralizada como se muestra en la figura 2.3.2, que muestra claramente la diferencia angular entre los dos extremos de la línea.

Se puede obtener una representación similar para más buses, y los diagramas darán información sobre los cambios de fase entre los buses en un sistema de energía interconectado, como se explica más adelante en esta sección.

Para lograr una referencia de temporización común para el proceso de adquisición de PMU, es esencial tener una fuente de señales de temporización precisas (es decir, una fuente de sincronización) que pueda ser interna o externa a la PMU.

Para interna, la fuente de sincronización está integrada (incorporada) en la PMU (todavía se requiere antena GPS externa), y para externa, la señal de temporización se proporciona a la PMU por medio de una fuente externa, que puede ser local o global, y una infraestructura de distribución (basada en broadcast o conexiones directas).

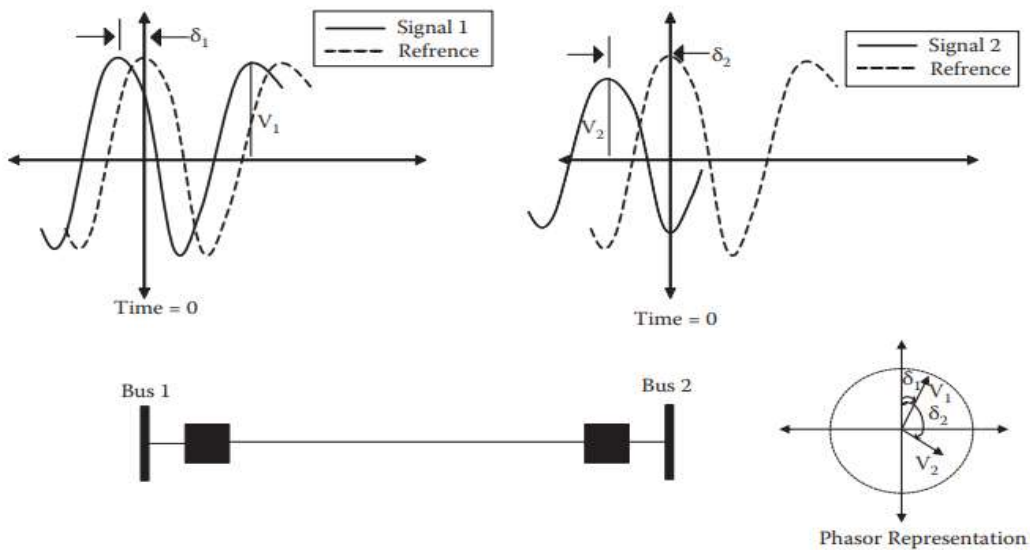


FIGURA 2.3.2.-Representación fasorial de voltajes senoidales al final de una línea.

De acuerdo con los estándares IEEE, un fasor se define como "un complejo equivalente de una cantidad de onda sinusoidal tal que el módulo complejo es la amplitud de la onda del coseno, y el ángulo complejo (en forma polar) es el ángulo de fase de la onda cosenoidal".

Dentro de una PMU, se utiliza un oscilador de fase bloqueada para generar el tiempo de etiquetas dentro del segundo. La etiqueta de tiempo se envía con los fasores. El paquete de información fasorial llega desordenado a un PDC (datos fasoriales concentrador), la respuesta de tiempo fasorial aún se puede ensamblar correctamente.

Sin embargo, si el pulso GPS no se recibe durante un tiempo, el etiquetado de tiempo el error puede resultar en un error de fase significativo

2.3.3.-Medición de sincrofasores.

Definición de fasores La representación fasorial de señales sinusoidales se usa cada vez de forma más habitual en análisis de sistemas de potencia. La forma de onda sinusoidal definida en la ecuación (2.77):

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \quad (2.77)$$

se representa comúnmente como el fasor como se ve en (2.78):

$$X = (X_m/\sqrt{2})e^{j\phi} \quad (2.78)$$

$$= \left((X_m/\sqrt{2})(\cos \phi + j\sin\phi) \right)$$

$$X_r + jX_i$$

donde la magnitud es el valor cuadrático medio (rms), $X_m/\sqrt{2}$, de la forma de onda, y los subíndices r e i expresan partes reales e imaginarias de un número complejo en componentes rectangulares. El valor de ϕ depende de la escala de tiempo, particularmente donde $t = 0$. Debemos notar que este fasor está definido para la frecuencia angular ω . Si desea realizarse evaluación versus otros fasores, estos deberán estar dimensionados en la misma escala de frecuencia y tiempo.

2.3.4.-Definición del sincrofasor.

El valor de X en la expresión (2.78) donde ϕ es el ángulo de fase instantáneo relacionado a una función coseno a la frecuencia nominal del sistema y sincronizado con UTC es la representación fasorial de la señal $x(t)$.

Según esta definición, ϕ es el desplazamiento de una función coseno a la frecuencia nominal del sistema sincronizada con UTC. Un coseno tiene un máximo en $t = 0$, por lo que el ángulo sincrofasor es 0 grados cuando el máximo de $x(t)$ ocurre en el segundo vuelco UTC (señal de tiempo de 1 PPS), y -90 grados cuando el cruce por cero positivo ocurre en el segundo cambio de UTC (forma de onda sinusoidal). La figura 2.3.4 ilustra la relación entre el ángulo de fase y la hora UTC.

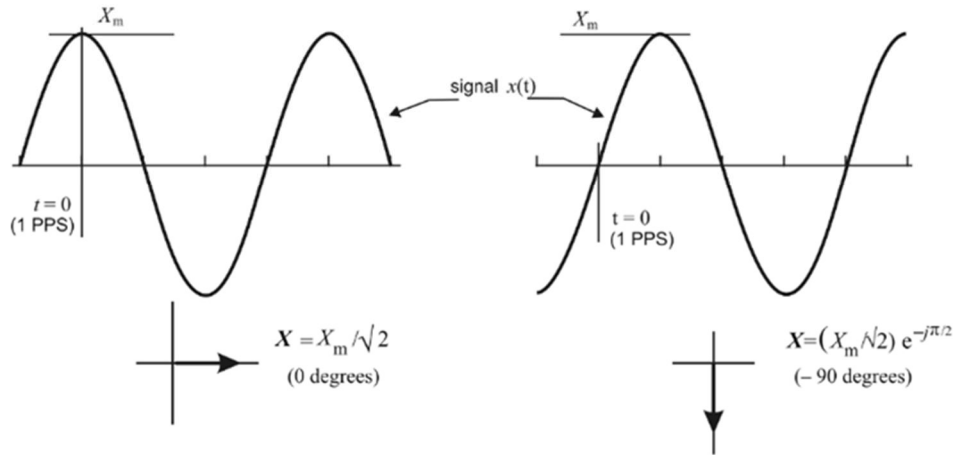


FIGURA 2.3.3.-Convención para la representación de un sincrofasor.

La sinusoide se muestra en la ecuación (2.79):

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) = X_m \cos(2\pi f_0 t + \phi) \quad (2.79)$$

donde f_0 es la frecuencia angular nominal del sistema (50 Hz o 60 Hz) directamente representada el fasor en la ecuación (2.78). En el caso general donde la amplitud es función del tiempo $X_m(t)$ y la frecuencia sinusoide también es función del tiempo $f(t)$, podemos definir la función $g = f - f_0$ donde f_0 es la frecuencia nominal y g es la diferencia entre las frecuencias reales y nominales (tenga en cuenta que g también será una función del tiempo, por ejemplo, $g(t) = f(t) - f_0$). La sinusoide se puede escribir como se muestra en la ecuación (2.80)

$$\begin{aligned} x(t) &= X_m(t) \cos(2\pi \int f dt + \phi) & (2.80) \\ &= X_m(t) \cos(2\pi \int (f_0 + g) dt + \phi) \\ &= X_m(t) \cos(2\pi f_0 t + (2\pi \int g dt + \phi)) \end{aligned}$$

La ecuación (2.81) muestra la representación del sincrofasor para esta forma de onda.

$$X(t) = (X_m(t)/\sqrt{2})e^{j(2\pi \int g dt + \phi)} \quad (2.81)$$

Para el caso especial donde $X_m(t) = X_m$ es constante y $g = \Delta f$ es un desplazamiento constante de la frecuencia nominal, $\int g(t) dt = \int \Delta f dt = \Delta f t$, por lo que el sincrofasor es simplemente como se muestra en la ecuación (2.82) :

$$X(t) = (X_m(t)/\sqrt{2})e^{j(2\pi \Delta f t + \phi)} \quad (2.82)$$

que rotará a la tasa uniforme Δf , la diferencia entre la frecuencia real y fuera de la nominal.

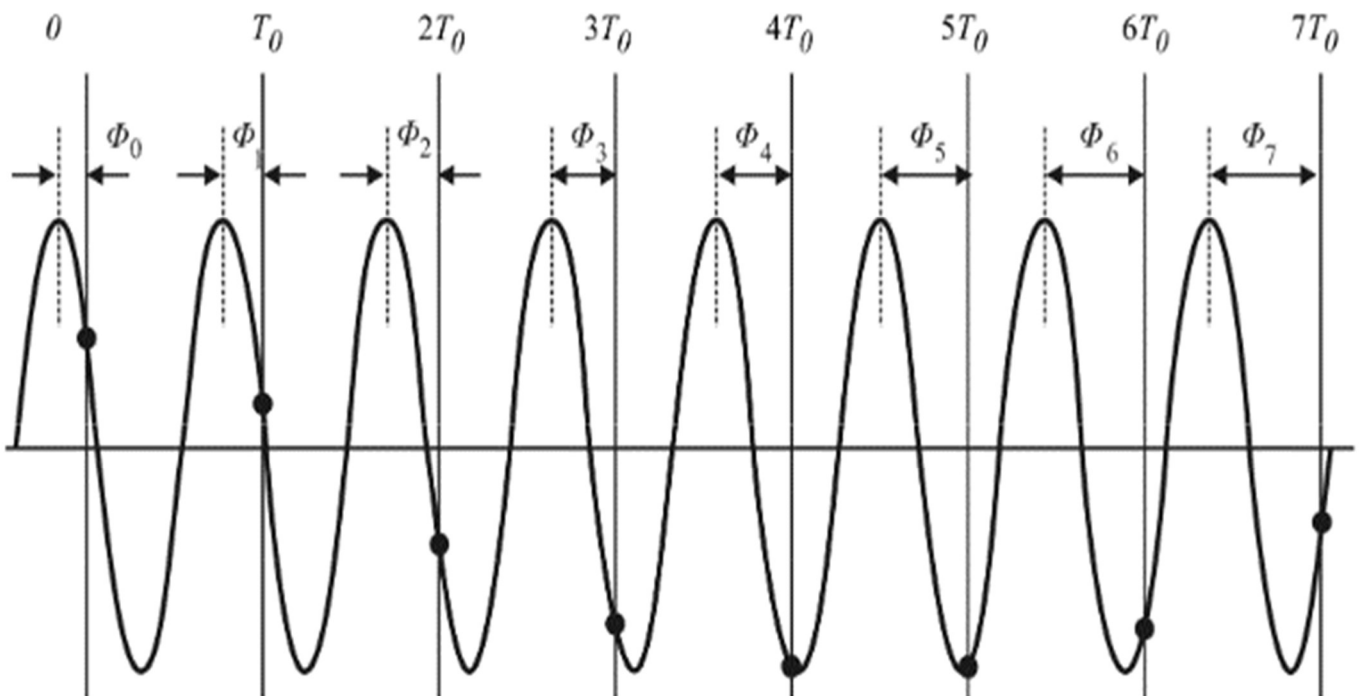


FIGURA 2.3.4.-Una senoide con una frecuencia $f > f_0$ al instante que son T_0 segundos. , el ángulo de fase Φ incrementa uniformemente en relación a la diferencia de frecuencia, $f-f_0$

Este concepto se ilustra en la figura 2.3.4, ahí se observa una frecuencia del sistema sinusoide fuera de la nominal en los intervalos $\{0, T_0, 2T_0, 3T_0, \dots, nT_0, \dots\}$ donde $T_0 = 1 / f_0$ (la potencia nominal período del sistema) y las representaciones fasoriales correspondientes son $\{ X_0, X_1, X_2, X_3, \dots, X_n, \dots\}$.

Si la frecuencia sinusoide $f \neq f_0$ y $f < 2f_0$, el fasor observado tendrá una magnitud constante, pero los ángulos de fase de la secuencia de fasores $\{X_0, X_1, X_2, X_3, \dots, X_n, \dots\}$ cambiarán uniformemente a una tasa $2\pi (f - f_0) T_0$, como se ilustra.

Si estos valores se informaran a lo largo del tiempo, aumentarían continuamente hasta alcanzar los 180 grados, donde se enrollarían a -180 grados y continuarían aumentando como se muestra en la figura 2.3.5 (los sincrofasores se informan comúnmente en ángulos de -180 grados a +180 grados en lugar de 0 de a 360 grados).

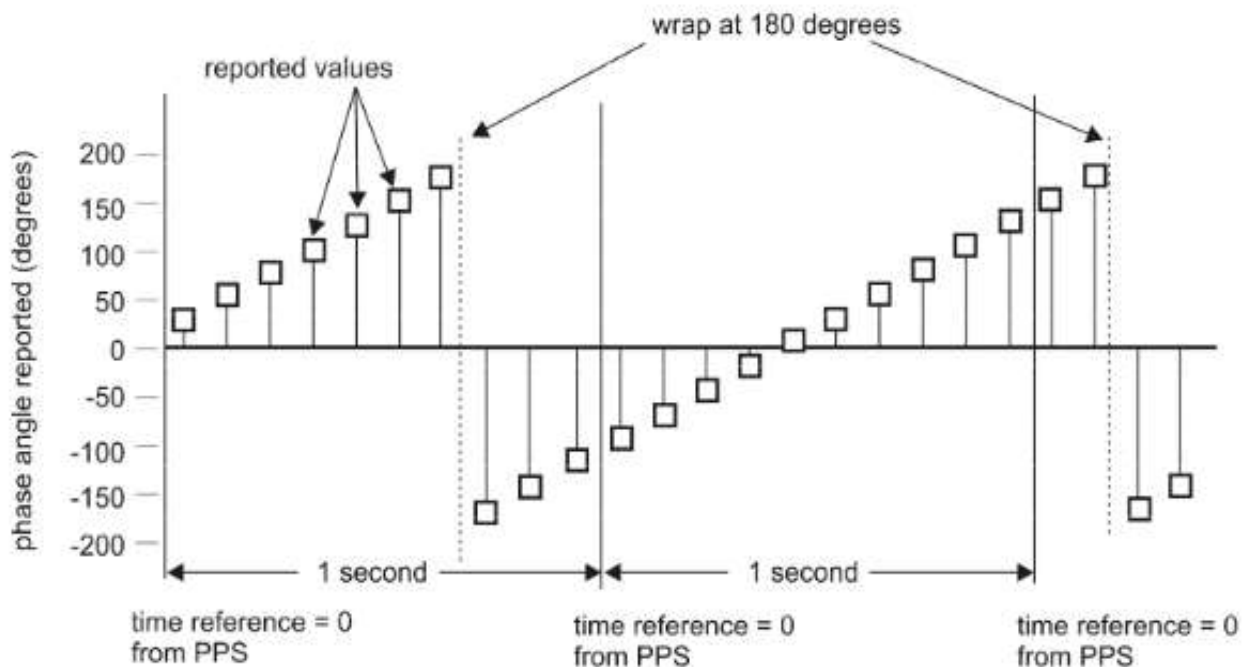


FIGURA 2.3.5.-Muestreo de una sinusoide de potencia a la frecuencia nominal.

Se enfatizarán varios detalles de la definición de sincrofasor. Todas las mediciones se realizan en una base de tiempo común y están relacionadas con una frecuencia común, por lo que las mediciones del ángulo de fase son directamente comparables.

Las diferencias en la frecuencia real se incluyen en la estimación del ángulo de fase.

La estimación del sincrofasor también incluye los efectos de todas las demás contribuciones de la señal, como oscilaciones y oscilaciones de frecuencia local. Los sincrofasores son funciones del tiempo y cambiarán de un valor al siguiente a menos que la señal sea una senoide pura a la frecuencia nominal del sistema. Se requiere una referencia de tiempo precisa (reloj) para proporcionar la hora UTC para determinar el ángulo de fase ϕ .

2.3.5.-Sincronización de la hora de medición.

El PMU deberá ser capaz de recibir la hora de una fuente confiable y precisa, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que puede proporcionar la hora trazable a UTC con suficiente precisión para mantener el error vectorial total (TVE), el error de frecuencia (FE) y la tasa de cambio de error de frecuencia (ROCOF) (RFE) dentro de los límites requeridos.

Todas las mediciones se sincronizarán con la hora UTC con una precisión suficiente para cumplir con los requisitos de esta norma. Debe tenerse en cuenta que un error de tiempo de 1 μ s corresponde a una fase de error del sincrofasor de 0.022 grados para un sistema de 60 Hz y de 0.018 grados para un sistema de 50 Hz. Un error de fase de 0.57 grados (0.01 radianes) causará por sí mismo 1% TVE como se define en la ecuación (2.85).

Esto corresponde a un error de tiempo de $\pm 26 \mu$ s para un sistema de 60 Hz y $\pm 31 \mu$ s para un sistema de 50 Hz. Una fuente de tiempo FE de 0,083 MHz en un sistema de 60 Hz o 0,1 MHz en un sistema de 50 Hz provocará la FE máxima permitida en estado estable de 0,005 Hz.

De manera similar, una fuente de tiempo con una frecuencia variable provocará un error correspondiente en ROCOF (la relación no es tan directa como las anteriores). Se recomienda encarecidamente una fuente de tiempo que proporcione de manera confiable estabilidad de tiempo, frecuencia y frecuencia al menos 10 veces mejor que estos valores correspondientes al 1% de TVE. La fuente de tiempo también proporcionará una indicación de trazabilidad a UTC y cambios de segundos intercalares. Para cada medición, la PMU asignará una etiqueta de tiempo que incluya el tiempo y la calidad del tiempo en el momento de la medición. La etiqueta de tiempo resolverá con precisión el tiempo de medición en al menos 1 μ s dentro de un período especificado de 100 años. El estado del tiempo incluirá la calidad del tiempo que indique claramente la trazabilidad a UTC, la precisión del tiempo y el estado del segundo intercalar. El tiempo y la calidad del tiempo para los informes y el registro se derivarán de la etiqueta de tiempo de PMU y se convertirán al formato y contenido según sea necesario. [19].

3.- DESARROLLO.

3.1.-Métodos existentes para líneas transpuestas.

Se han concebido infinidad de métodos para la estimación de los parámetros de las líneas de transmisión transpuestas, todos estos métodos utilizan el modelo π para líneas transpuestas

3.2.- Método de Medición individual.

Este método es considerado el más simple de todos los métodos existentes para líneas transpuestas con el cual podemos calcular la impedancia serie de secuencia positiva. Para su implementación solo se requieren un conjunto de mediciones obtenidas por medio de un PMU en cada uno de los extremos de la línea, en este método se aplica la Ley de Voltajes de Kirchoff (KVL) y la Ley de Corrientes de Kirchoff (KCL) al modelo π nominal, el método de medición única se propone en [20] y mediante el planteamiento de este modelado es posible obtener las siguientes expresiones:

$$V_1^S - V_1^R = Z \left[\frac{1}{2} Y (V_1^R) + I_1^R \right] \quad (3.1)$$

$$I_1^S - I_1^R = \frac{1}{2} Y [V_1^S + V_1^R] \quad (3.2)$$

Reordenando la ecuación (3.1) y expresándola en términos de la admitancia Y obtenemos la ecuación 3.2, sustituyendo la ecuación 3.3 en la ecuación 3.1 obtenemos una expresión en términos de Z esta esta dada por la expresión 3.4

$$Y = 2 \left[\frac{I_1^S - I_1^R}{V_1^S + V_1^R} \right] \quad (3.3)$$

$$Z = \frac{(V_1^S)^2 - (V_1^R)^2}{I_1^R V_1^S + I_1^S V_1^R} \quad (3.4)$$

El método anterior se aplica por medio del Software MATLAB y archivos con datos de EXCEL, posterior a que se realiza el procesamiento de los datos que se obtuvieron de los PMUs en tiempo real. Las muestras con la que se trabajó para obtener las gráficas son obtenidas por el PMU el cual realiza la medición cada 50 milisegundos por lo tanto se obtuvo una colección de 1200 muestras las cuales representan el comportamiento de la LT durante 20 minutos. Derivado de los muestreos y los recursos de procesamiento que se requieren no se puede llevar a cabo en tiempo real ya que esto impone la exigencia de una alta capacidad de procesamiento.

Adicional a esto no se logró obtener el acceso libre a los PDC's los cuales se encuentran centralizados y no son accesibles de manera explícita ya que se consideran equipos con datos estratégicos por lo que la obtención de estas muestras requirió de gestión ante la Subgerencia de la especialidad de Protección y medición.

Una vez obtenidas las mismas se encontró el inconveniente de que el extremo emisor si contaba con la medición de un TP de LINEA, sin embargo en el extremo Receptor no se cuenta con TP de LINEA lo cual nos deja con la única alternativa de usar la medición del TP de BUS en una Barra en la que llegan 2 LT's específicamente se trata de la A3Z10 y la A3Z20 por lo que la medición del TP de BUS en el extremo receptor nos impide obtener datos fieles del comportamiento de la línea , se intenta optar por otra alternativa en otra línea de transmisión sin embargo personal del área correspondiente comenta que no existe una instalación con la característica de que en ambos extremos se cuente con TP de LINEA.

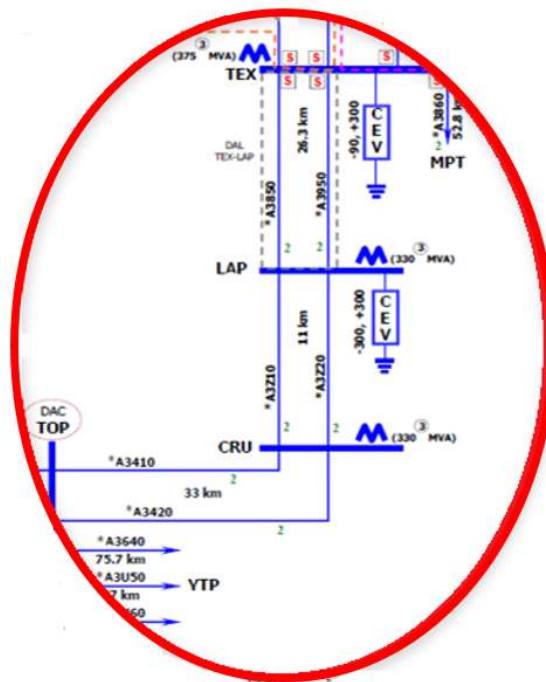


FIGURA 2.3.6.-Segmento del anillo de 400 KV donde se encuentra localizada la línea de prueba .

4.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

4.1.-Resultados

La expectativa del comportamiento de la gráfica de impedancia de la línea es que se comporte con ligeras desviaciones de un punto o tendencia central de manera que tienda a ser una dispersión a lo largo de una línea recta puesto que las fluctuaciones de la impedancia en la Lt de 400 KV se esperan mínimas y no se considera que debieran ser abruptas, sin embargo, de la figura 1, se puede observar que en el rango comprendido de los primeros 300s, hay una inversión de fases (cambio de signo positivo a negativo), debido a que hay una mayor aportación en el extremo receptor, ya que en la barra del extremo receptor tenemos conectada otra línea en paralelo. Además, las caídas de tensión varían debido a lo irregular del terreno, y cambios no homogéneos del material con el que está hecho el conductor entre otros factores como temperatura, humedad, elongación, calibre del conductor, etc.

Existen diversos métodos que nos pudieran llegar a aportar resultados para la obtención de los valores de voltajes y corrientes de la LT en cuestión, podría por ejemplo tomarse la opción de que a través de la solución analítica del problema de flujos de potencia para el sistema de 400KV se obtuviera la potencia compleja y partiendo de esta obtener los valores de corriente y voltaje de cada una de las líneas con lo cual se estaría en posibilidades de calcular la impedancia de la LT que se desee, sin embargo la hipótesis que se plantea originalmente es que de la aplicación directa de las mediciones de un PMU aplicado en ambos extremos de la línea nos permitirá obtener el valor de la impedancia dinámica de la misma en tiempo real, partiendo de la infraestructura existente en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Valle de México, lo cual partiendo de las condiciones con las que actualmente se están obteniendo los datos, no resulta posible realizarlo de manera directa, ya que los cálculos se desvirtúan debido a que tenemos la medición de un TP de Bus en vez de un TP de línea como ya se explicó anteriormente.

4.2.-Conclusiones.

Otra característica que se observa al hacer el cálculo tanto de los valores de la impedancia como de la admitancia de la línea es que el valor obtenido en las gráficas difiere de manera notable contra el valor teórico que se tiene por parte de la empresa, la circunstancia que se encuentra en este caso es que los valores de impedancia y admitancia que se calculan en este caso corresponden a valores dinámicos los cuales están sujetos a ruido y este afecta su precisión, habrá que considerar la implementación de una metodología que reduzca la incertidumbre en la medición por medio de por ejemplo valores de ponderación basados en la desviación de los valores esperados contra los valores medidos, mínimos cuadrados ponderados podría ser una buena opción, toda vez que se determine cual pudiera ser el tipo de función al que se ajusta el comportamiento de la impedancia de la línea.

Como un trabajo futuro se considera que se puede ampliar el tema a implementar métodos alternos o complementarios como los que ya se han mencionado y estos nos permitan salvar esta particularidad que se encontró en la infraestructura de la medición por medio de los PMU.

Como aportación adicional, se generó un programa con base en el código Matlab, este calcula los siguientes parámetros eléctricos: profundidad de penetración, Inductancia Geométrica, inductancia de retorno por tierra, Capacitancia Geométrica, Inductancia Total, Admitancia en derivación, Impedancia total, Impedancia geométrica, constante delta, impedancia de alta frecuencia, resistencia propia del conductor, Impedancia del conductor, e impedancia generalizada del conductor (ver apéndice a). Lo anterior, para ser comparado con los correspondientes obtenidos por PMUs.

4.3.-Graficas

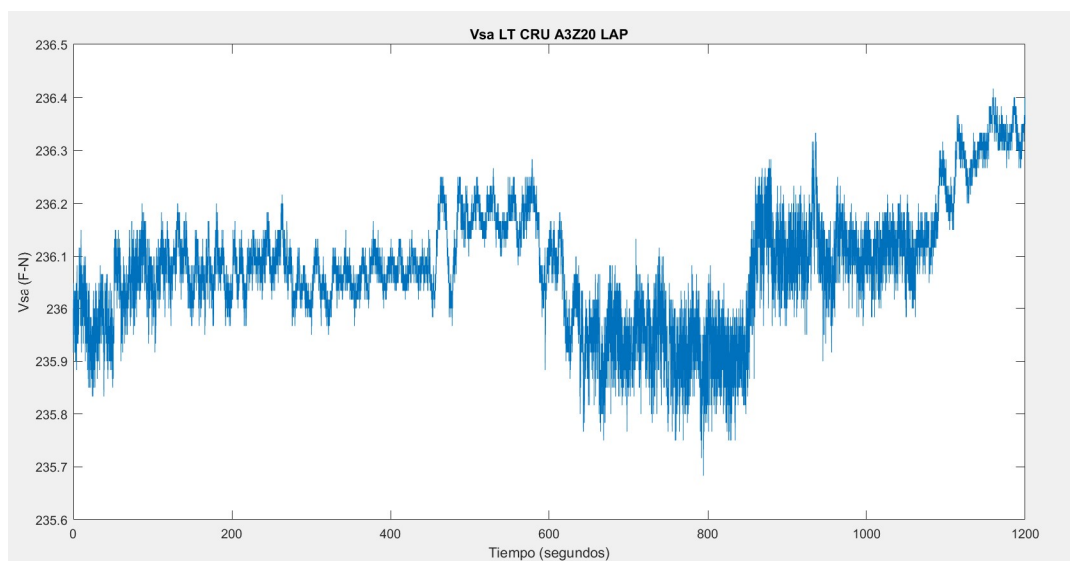


Fig. 4.1.- Voltaje en el extremo emisor Fase A

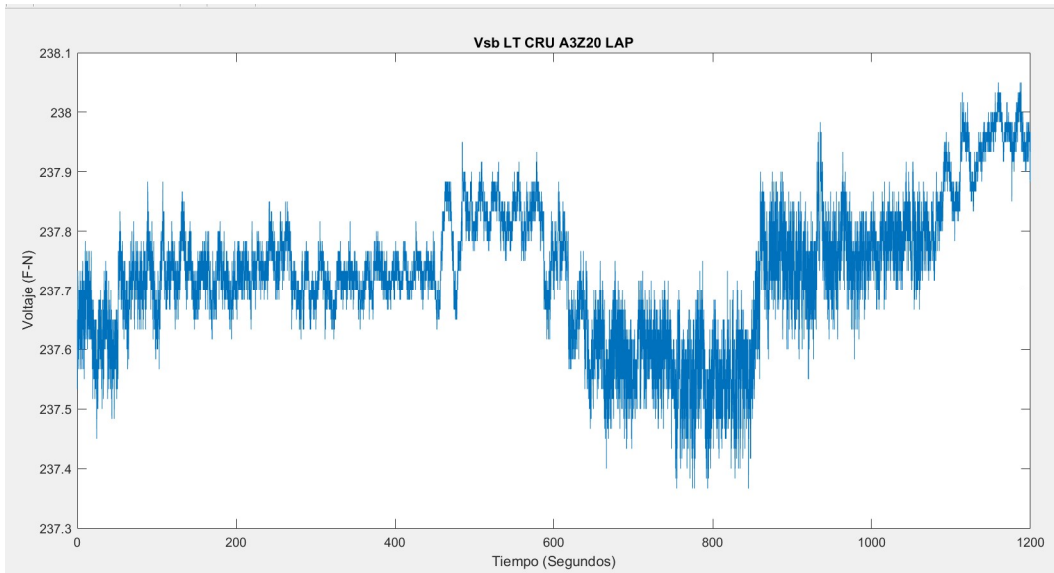


Fig.- 4.2 Voltaje en el extremo emisor Fase B

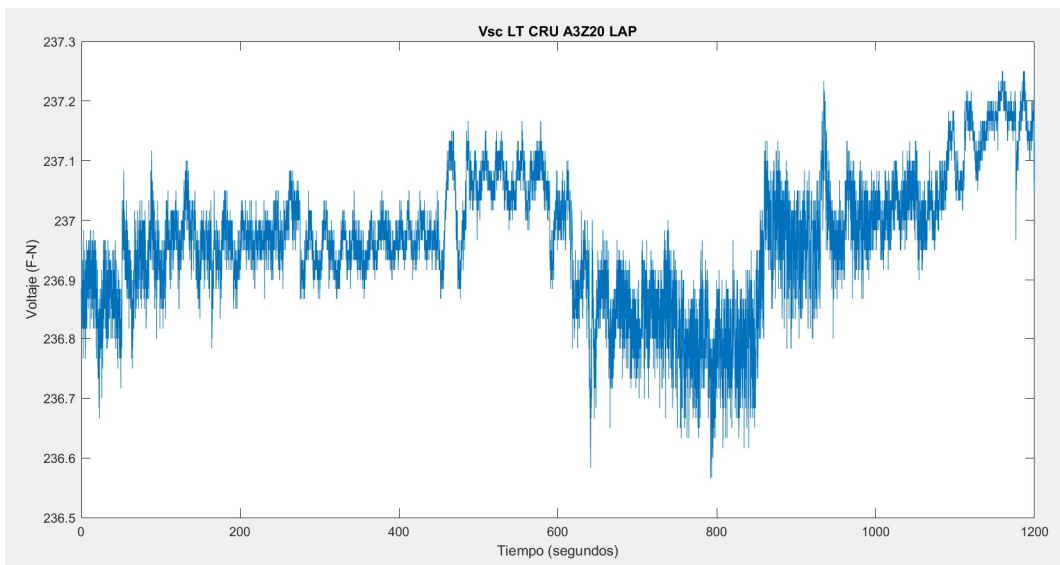


Fig.-4.3 Voltaje en el extremo emisor Fase C

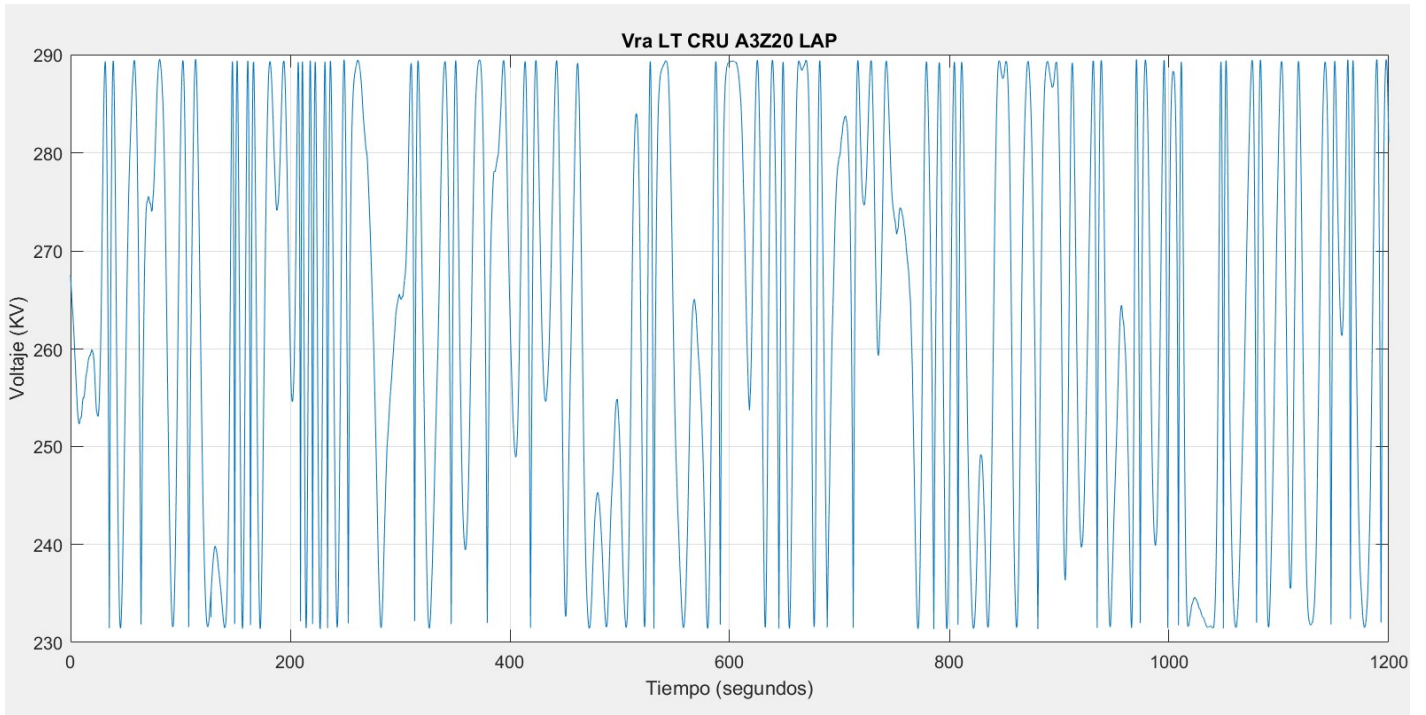


Fig.-4.4 Voltaje en el extremo receptor Fase A

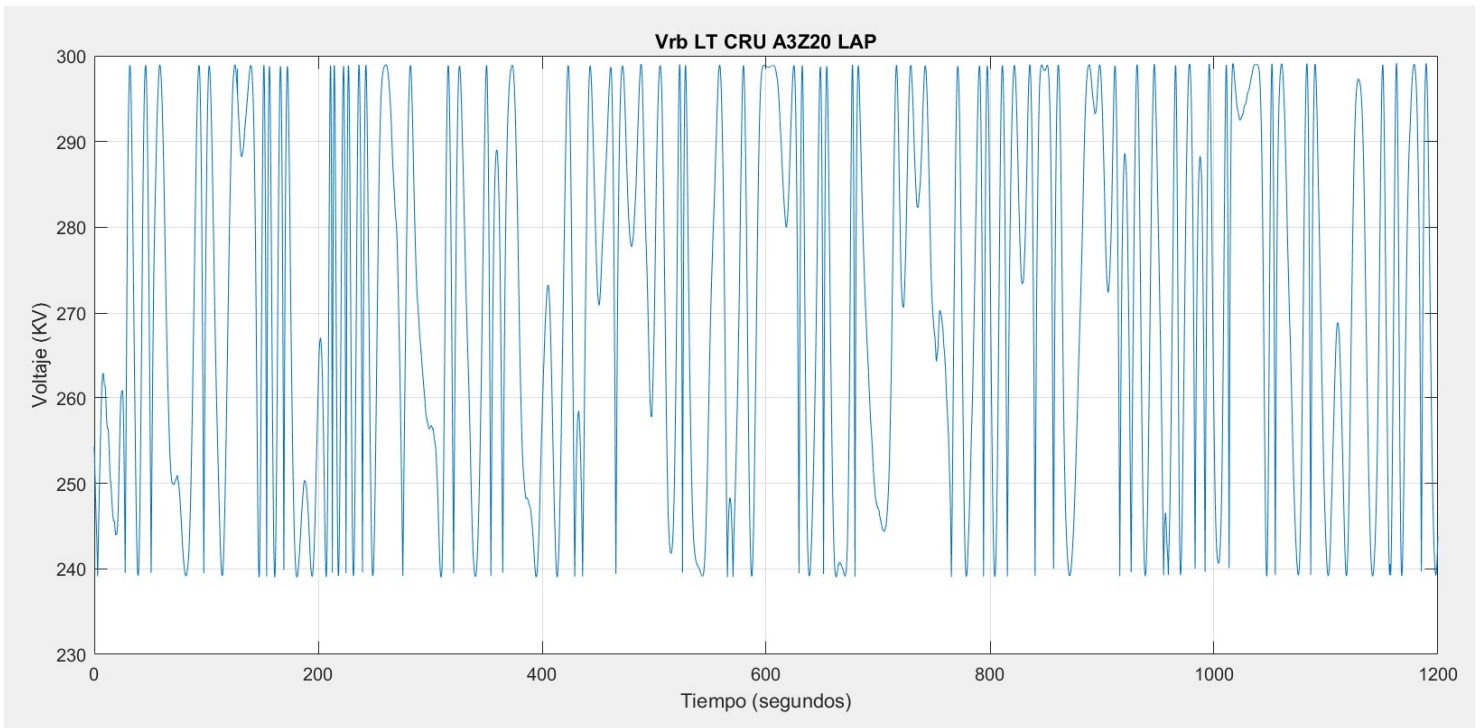


Fig.-4.5 Voltaje en el extremo receptor Fase B

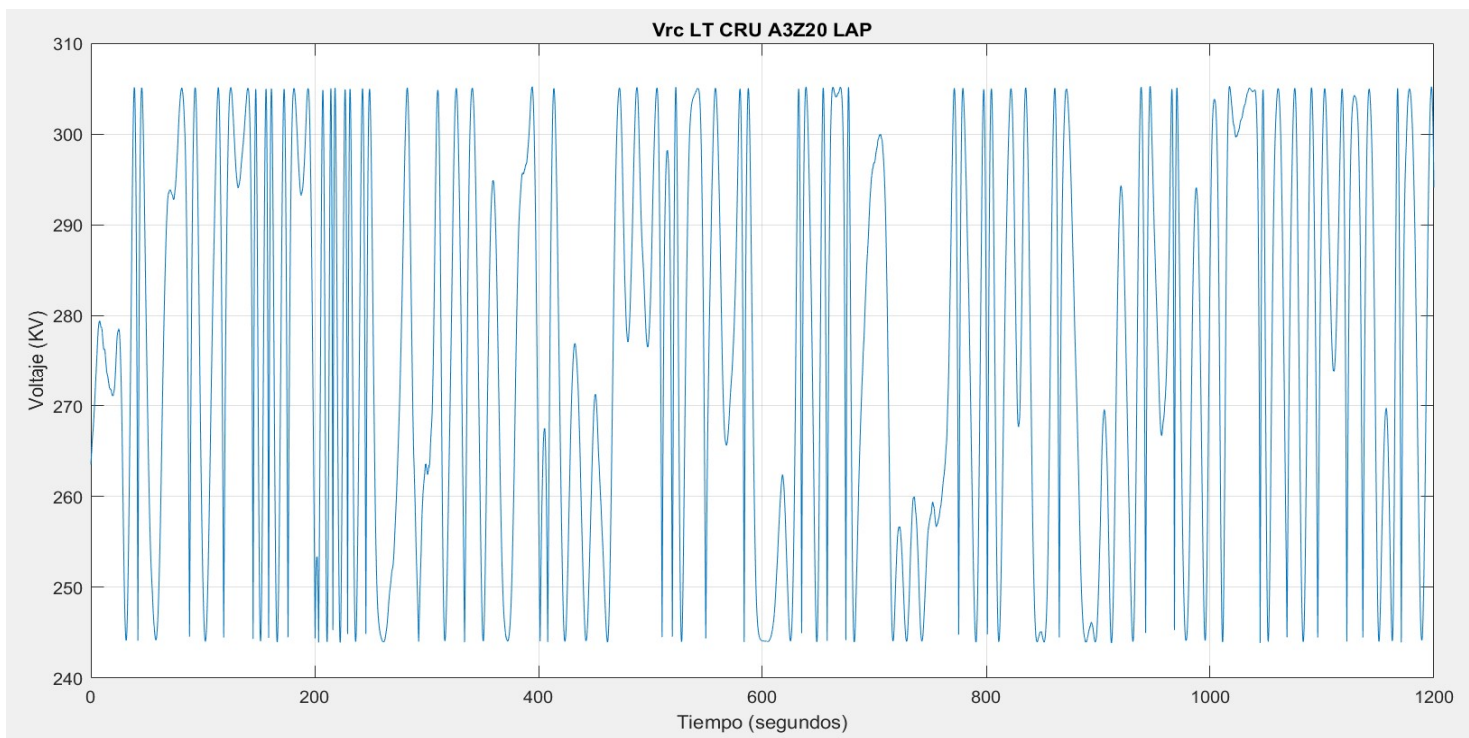


Fig.-4.6 Voltaje en el extremo receptor Fase C

400 kV								
No.	Línea o cable	Nombre	kV	Impedancia Serie	Admitancia paralela	Longitud km	# conductores por fase Material Calibre Configuración	Hilo de Guarda Disposición # circuitos por torre
6	CRU LAP	A3Z10	400	$Z(+)= 0.00021 + j0.00246$ $Z(0) = 0.00175 + j0.00892$	$B(+)/2 = 0.0395$ $B(0)/2 = 0.02219$	10.8	2 ACSR 1113 11	3'3" Vertical 2
7	CRU LAP	A3Z20	400	$Z(+)= 0.00021 + j0.00246$ $Z(0) = 0.00175 + j0.00892$	$B(+)/2 = 0.0395$ $B(0)/2 = 0.02219$	10.8	2 ACSR 1113 11	3'3" Vertical 2

Fig 7.-Impedancia de LT CRU A3Z20 LAP

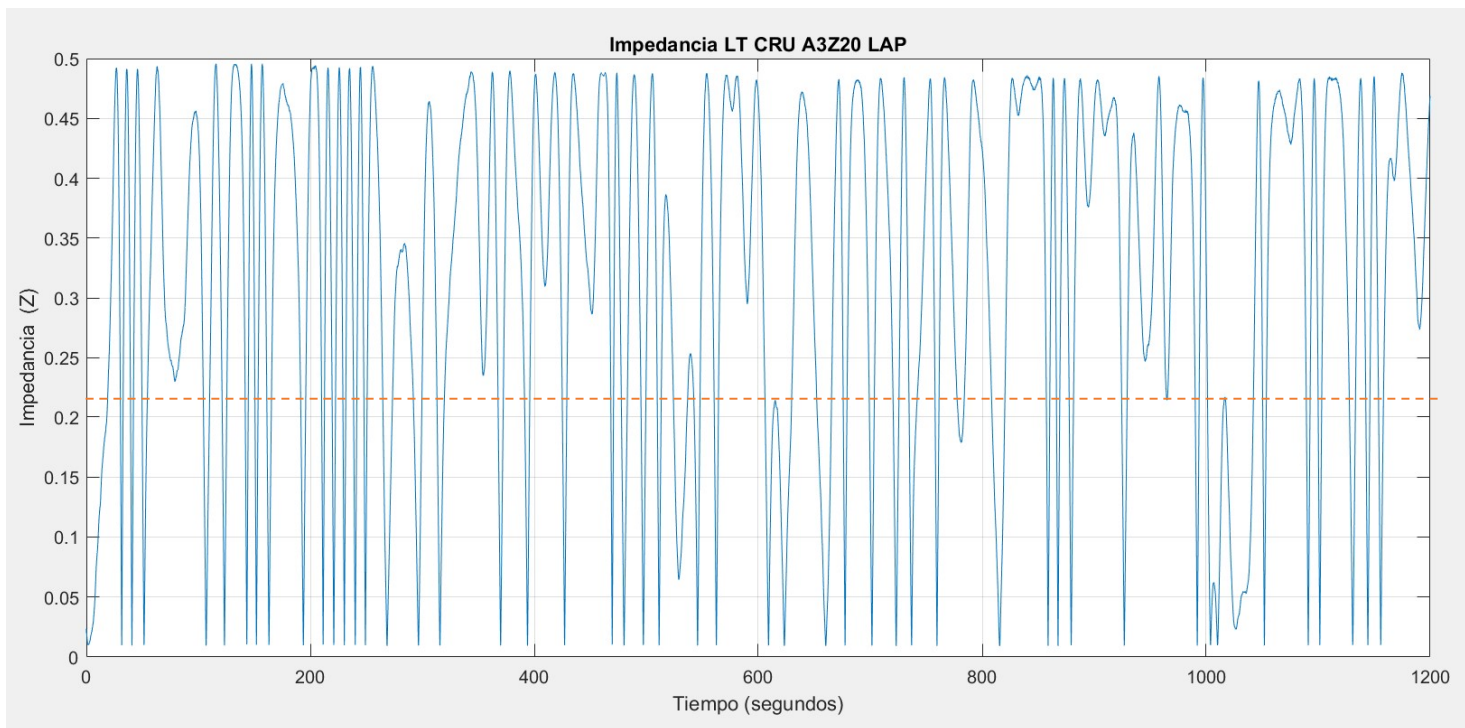


Fig.-8 Impedancia de LT CRU A3Z20 LAP

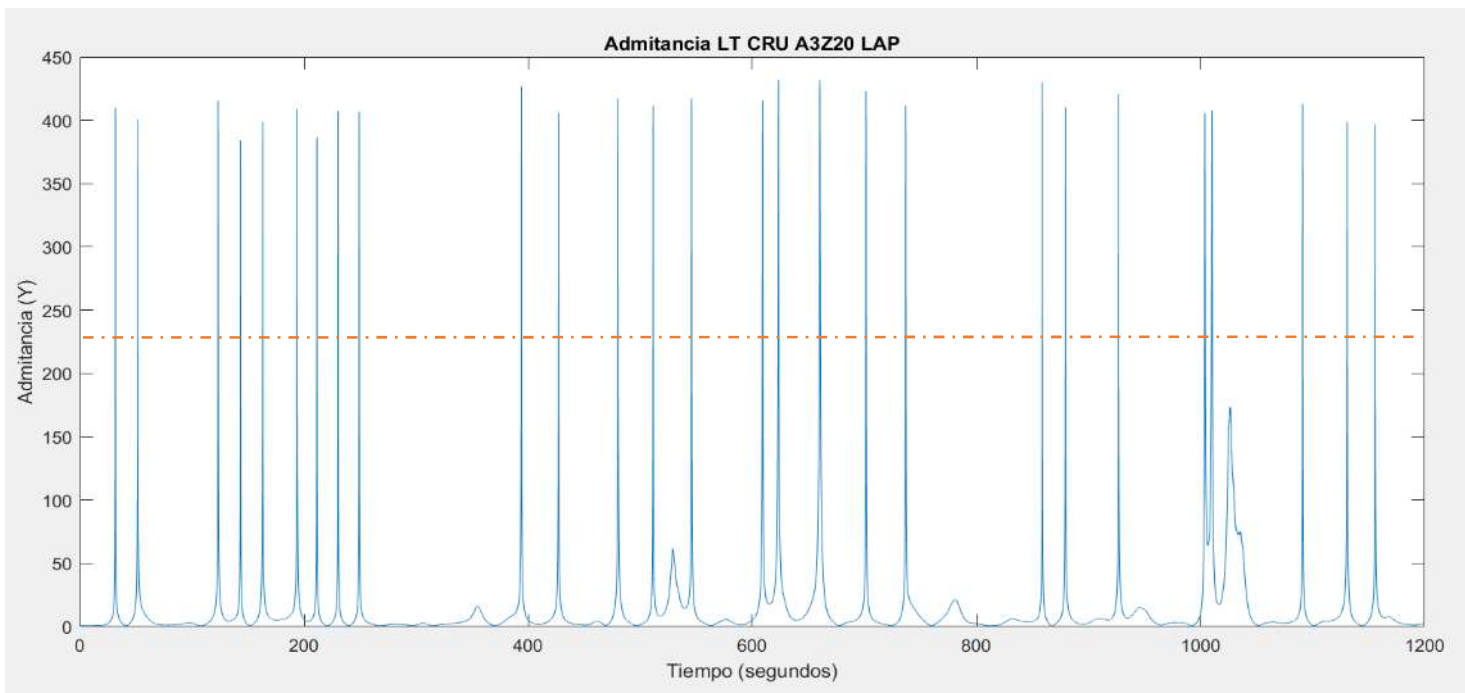


Fig 9.-Admitancia de LT CRU A3Z20 LAP

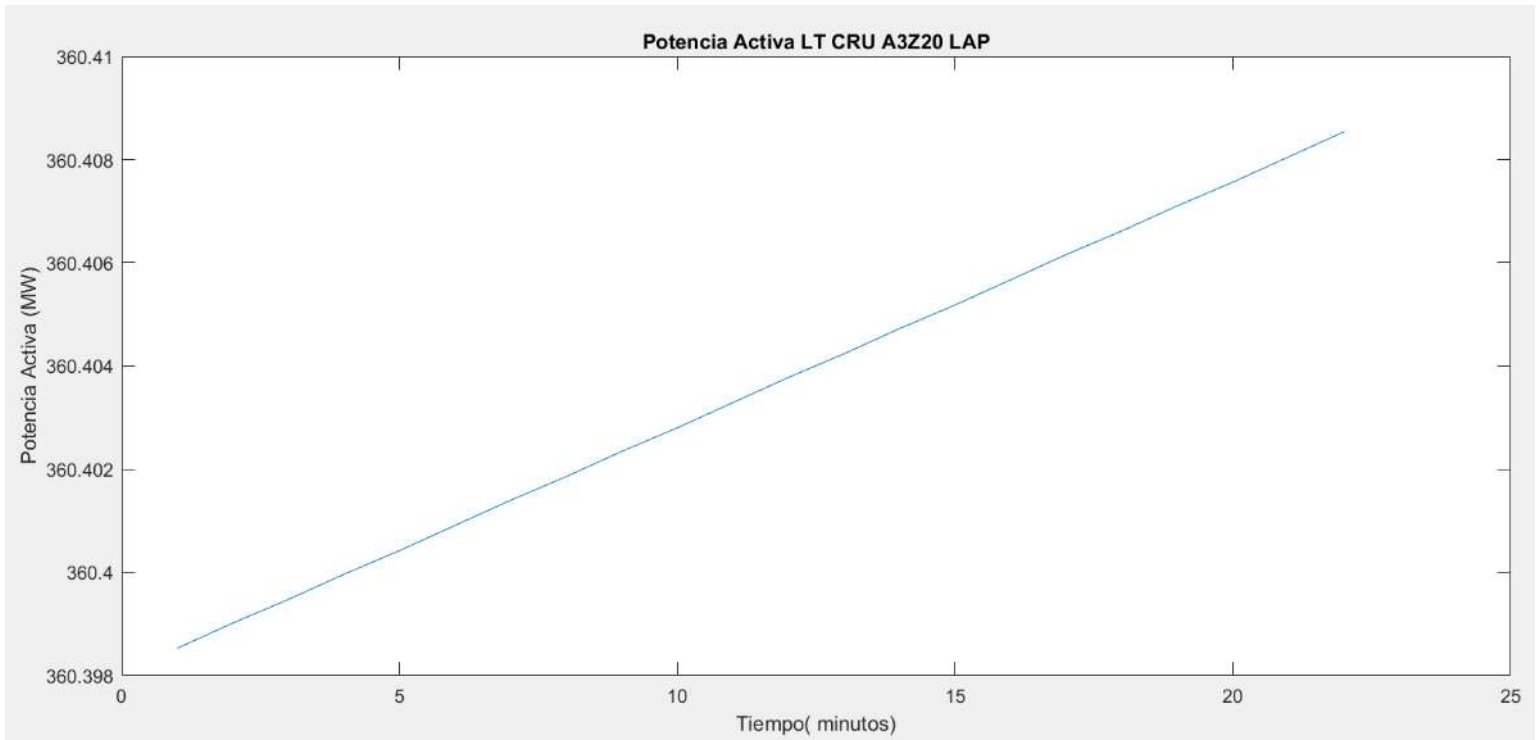


Fig.10.- Potencia activa de LT CRU A3Z20 LAP

APÉNDICE A.-Programa.-Cálculo de parámetros.

```

% Realiza el cálculo de parametros electricos de una lt monofasica
% Función      :   calcula_parametros_lt_mono
% Programó    :   Leonardo Mendoza Viveros.

function [ Z,Y,C,Lg,Lt,Lgt,Zc,Zhf] =calcula_parametros_lt_mono(H,rad,s)

% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % %
% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Definicion de Constantes %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % %
% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % %
% % Mo = 4*pi*1e-7;           % permeabilidad del vacio           % %
% % Eo = 1e-9/(36*pi);       % permitividad del vacio           % %
% % Me = 4*pi*1e-7 ;         % Me permeabilidad del terreno           % %
% % Mc = 4*pi*1e-7;         % Mc permeabilidad del conductor           % %
% % Pe=100;                   % Resistividad del suelo           % %
% % Pc=2.71e-8;              % Resistividad del conductor           % %
% % w=2*pi*f;                 % Frecuencia angular           % %
% % p = sqrt(Pe/(j*w*Me));    % Profincdidad de penetracion compleja % %
% % d=sqrt(Pc/(j*w*Mc));      % Constante de efecto Skin           % %
% % l=1000;                   % Longitud de la linea           % %
% % n =3;                     % Numero de fases           % %
% % X=0;                       % Distancia entre conductores           % %
% % h=[16];                   % Alturas de condutores [m]           % %
% % r=[0.0132];              % radio de los conductores           % %
% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % %
% % Formas de onda en el dominio de la frecuencia           % %
% % F = Yf./(s); % Escalón           % %
% % F= Yf./(s.^2); % Rampa           % %
% % F = Yf.*(k./(s.^2+k^2)); % Seno           % %
% % F = Yf.*(s./(s.^2+k^2)); % Coseno           % %
% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % %
% % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% % %
Pe=100;           % resistividad del suelo
Epsilon=(1/(36*pi))*1e-9; % permitividad del vacio
permeabilidad_mag=(4*pi)*1e-7; % Me permeabilidad del terreno
Pc=2.71e-8;      % Pc resistividad del conductor

```

```

Mc = 4*pi*1e-7; % Mc permeabilidad del conductor
% l=1000; % l longitud de la linea
% Rg=1e-5; %Resistencia del generador % Rg Impedancia del generador
% Zc=1e5; %Impedancia de la carga % Zc Impedancia
de la carga
% Yf =1e1 ; % admitancia de la fuente
% YL=1e-8; % admitancia de la carga
% p=1;

prof= sqrt(Pe./(s.*permeabilidad_mag)); % Cálculo de profundidad de penetración
Lg=((permeabilidad_mag/(2*pi))*log(2*H)) % Cálculo de Inductancia Geometrica
Lt=((permeabilidad_mag/(2*pi))*log(1+(2*H+prof))) % Cálculo de la inductancia de retorno
por tierra Lt=Lgt-Lg;
C=(2*pi*Epsilon)/(log((2*H))) % Cálculo de Capacitancia Geométrica
Lgt=((permeabilidad_mag/(2*pi))*log(2*(H+prof))) % Cálculo de Inductancia Total
Y=s*C % Cálculo de la Admitancia en derivación
Zt=s.*Lt; % Cálculo de la Impedancia total
Zg=s.*Lg ; % Cálculo de la Impedancia geométrica
deltha=sqrt(Pc./(s.*Mc)); % Cálculo de la constante delta
Zhf=Pc./(2*pi*rad.*deltha); % Cálculo de la impedancia de alta
frecuencia
Rcd=Pc./(pi*rad^2); % Cálculo de la resistencia propia del
conductor
Zc=sqrt((Zhf).^2+(Rcd).^2); % Cálculo de la Impedancia del conductor
Z=(Zc+Zt+Zg) % Cálculo de la Impedancia generalizada
del conductor

```

Función Gamma

```

function[Gamma,Yo,Zo]=calculo_Z0_Y0_Gamma_monofasica(Z,Y)
%*****
Gamma=sqrt(Z.*Y); % Calcula el valor de gamma para cada valor de frecuencia
Yo=sqrt(Y./Z); % Cálcula de la Admitancia caracteristica
Zo=sqrt(Z./Y); % Cálcula de la Impedancia caracteristica
%*****
end

```

```

%Funcion calculo de YBUS de una línea monofásica
function[Yss,Ysr,Y_Bus]=YBUS_linea_monofasica(l, Gamma, Yo, Yf, YL)

Yss=Yo.*coth(Gamma*l); % Cálcula el valor del elemento Yss de la Ybus Yss=Yrr
Ysr=Yo.*csch(Gamma*l); % Cálcula el valor del elemento Ysr de la Ybus Yrs=Ysr

Y_Bus(1,1,:)= (Yss+Yf); % Ingresa el valor del elemento Ysr+Yf de la Ybus Y_Bus(1,1,:)=Yss
Y_Bus(1,2,:)= -Ysr;
Y_Bus(2,1,:)= -Ysr;
Y_Bus(2,2,:)= (Yss+YL); % Ingresa el valor del elemento Ysr+Yf de la Ybus Y_Bus(2,2,:)=Yrr
Y_Bus;

```

End

%Función cálculo de parámetros de una línea multiconductora

```

function
[LT,CT,Z,Y]=Parametros_Linea_Multiconductora(n_fases,n_cond,r_haz,r_cond,s,x,h)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OBJETIVO
% Calcula los Parámetros de la Línea Multiconductora con Barrido en la Frecuencia
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% n_fases: Número de Fases
% n_cond: Número de Conductores por Fase
% r_haz: Radio del Haz de Conductores
% r_cond: Radio de los Conductores
% rmg: Radio Medio Geométrico
% s: Barrido en la Frecuencia
% x: Vector de Posición
% h: Vector de Altura
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SALIDAS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PROPIEDADES DE LOS MATERIALES
pmo=4*pi*1e-7; % Permeabilidad del Vacío Mo = 4*pi*1e-7; %
permeabilidad del vacio % %

```

```

        pvo=(1e-9)/(36*pi);      % Permitividad del Vacío           Eo = 1e-9/(36*pi);      %
permitividad del vacio

        res_terreno=100;        % Resistividad del Terreno           Pe=100;                  %
Resistividad del suelo

        res_cond=2.85714e-8;    % Resistividad del Conductor        Pc=2.71e-8;             %
Resistividad del conductor

        pm=pmo*pm_cond;        % Permeabilidad de Conductor        Mc = 4*pi*1e-7;        %
Mc permeabilidad del conductor

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% VARIABLES

% RADIO MEDIO GEOMÉTRICO

if n_cond==1
    rmg=r_cond;
end

% En caso de tener varias conductores por fase
if n_cond~=1
    rmg=(n_cond*r_haz^(n_cond-1)*r_cond)^(1/n_cond);
end

% PROFUNDIDADES DE PENETRACIÓN

% P_suelo=profundidad de penetración del suelo
P_suelo=sqrt((res_terreno)/(s*pmo)); %OK

% P_conductor=profundidad de penetración del conductor
P_conductor=sqrt((res_cond)/(s*pm)); %OK

% CÁLCULO DE DISTANCIAS

% #####

d=zeros(n_fases,n_fases);      %INICIALIZACION DE LA MATRIZ d DE DISTANCIAS
ENTRE CONDUCTORES REALES

D=zeros(n_fases,n_fases);      %INICIALIZACION DE LA MATRIZ D DE DISTANCIAS
ENTRE CONDUCTORES REALES Y SUS IMAGENES

Dc=zeros(n_fases,n_fases,length(s)); %INICIALIZACION DE LA MATRIZ D DE DISTANCIAS
ENTRE CONDUCTORES REALES Y SUS IMAGENES INCLUYENDO PENETRACION COMPLEJA

for i=1:n_fases
    for j=1:n_fases
        for k=1:length(s);
            if i~=j
                d(i,j)=sqrt((x(i)-x(j))^2+(h(i)-h(j))^2);
                D(i,j)=sqrt((x(i)-x(j))^2+(h(i)+h(j))^2);
            end
        end
    end
end

```

```

        Dc(i,j,k)=sqrt((x(i)-x(j))^2+(h(i)+h(j)+(2*P_suelo(k)))^2);

    end

end

end

end

% CÁLCULO DE MATRIZ DE INDUCTANCIAS LT
% #####
% Cálculo de Inductancias propias y mutuas, geométricas y de retorno por tierra
% LT: Inductancia Total (Despreciando Inductancia Interna del haz de conductores)
% Lg: Inductancia Geométrica
% Lti=Inductancia Debida a Retornos por Tierra
LT=zeros(n_fases,n_fases,length(s));
Lg=zeros(n_fases,n_fases);
Lti=zeros(n_fases,n_fases,length(s));
for i=1:n_fases
    for j=1:n_fases
        for k=1:length(s)
            if i==j % Elementos Propios
                LT(i,j,k)=(pmo/(2*pi))*log((2*(h(i)+P_suelo(k)))/(rmg));
                Lg(i,j)=(pmo/(2*pi))*log((2*h(i))/rmg);
                Lti(i,j,k)=(pmo/(2*pi))*log(1+(P_suelo(k)/h(i)));
            elseif i~=j % Elementos Mutuos
                LT(i,j,k)=(pmo/(2*pi))*log(Dc(i,j,k)/d(i,j));
                Lg(i,j)=(pmo/(2*pi))*log(D(i,j)/d(i,j));
                Lti(i,j,k)=(pmo/(2*pi))*log(Dc(i,j,k)/D(i,j));
            end
        end
    end
end

end

end

% CÁLCULO DE MATRIZ DE CAPACITANCIAS CT
% #####
Pot=zeros(n_fases,n_fases);% Pot: Matriz de coeficientes de potencial de Maxwell
for i=1:n_fases

```

```

for j=1:n_fases
    if i==j      % Elementos Propios
        Pot(i,j)=(1/(2*pi*pvo))*log((2*h(j))/rmg);
    elseif i~=j % Elementos Mutuos
        Pot(i,j)=(1/(2*pi*pvo))*log(D(i,j)/d(i,j));
    end
end
end
end
CT=inv(Pot);

% CÁLCULO DE MATRIZ DE IMPEDANCIAS Z
% #####
% Z: Impedancia
% Rcd=Resistencia de corriente directa
Rcd=res_cond/(pi*((r_cond)^2));
% Znf=Impedancia de alta frecuencia
Znf=res_cond./(2*pi*r_cond*P_conductor);
% zc=impedancia interna del conductor
zc=zeros(n_fases,n_fases,length(s));
for i=1:n_fases
    for j=1:n_fases
        for k=1:length(s)
            if j==i % Elementos Propios
                zc(i,j,k)=sqrt((Rcd)^2+(Znf(k))^2);
            else % Elementos Mutuos
                zc(i,j,k)=0;
            end
        end
    end
end
end
end
Z=zeros(n_fases,n_fases,length(s));
for k=1:length(s)
    Z(:, :, k)=s(k)*(Lg+Lti(:, :, k))+zc(:, :, k);
end

% CÁLCULO DE MATRIZ DE ADMITANCIAS Y
% #####

```


Bibliografía.

[1] C. Borda, (2009), Desarrollo de un algoritmo de identificación de parámetros de líneas de transmisión y de la posición del cambiador de tomas (taps), usando técnicas de estimación de estado y mediciones fasoriales sincronizadas.

Bogotá, Colombia.

https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7050326_0521

[2] Análisis de Oscilaciones de Baja Frecuencia en el Sistema Interconectado Nacional Basado en el Sistema de Medición Sincronizada de Fasores SIMEFAS Off-Line
Velasco Ramírez E, Martínez Martínez E, Ángeles-Camacho.

[3] Desarrollo de un Algoritmo de Identificación de Parámetros de Líneas de Transmisión y de la Posición del Cambiador de Tomas (Taps), Usando Técnicas de Estimación de Estado y Mediciones Fasoriales Sincronizadas.

C. E. B. Zapata y H. D. Morales,

Universidad Nacional de Colombia: Tesis de Maestría, Mayo 2009.

[4] Identificación de parámetros de líneas de transmisión usando Estimación de estado.
Fredy Andrés Olarte, Carlos Eduardo Borda y Hernando Díaz
Ingeniería e investigación vol. 30 no. 1, abril de 2010 (56-63).

[5] Reta-Hernández, Manuel, Electric Power Generation, Transmission, and Distribution ,Ch. 13 | Universidad Autónoma de Zacatecas, Ed. Leonard L. Grigsby, 1st Edition 2007 CRC Press

[6] Prabha Kundur, "Power system stability and Control", Ed. Mc Graw Hill ,1994

[7] Orquera, D.; Cepeda, J.; Vásquez, P.; De la Torre, A. (2018). "Metodología basada en Sincrofasores para la Identificación de Parámetros de Líneas de Transmisión". Revista Técnica "energía". No. 14, Pp. 168-177 ISSN 1390-5074

[8] Measurement of transmission line parameters from SCADA data. 2004 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. 1. 440 - 445 vol.1. 10.1109/PSCE.2004.1397479. Kusic, G.L. & Garrison, D.L. (2004).

[9] D. Shi, D. J. Tylavsky, N. Logic, y K. Koellner. ,

(2008). "Identification of short transmission-line parameters from synchrophasor measurements". 40th North American Power Symposium. IEEE, pp. 1–8.

<https://downloads.hindawi.com/journals/jece/2018/8719670.pdf>

- [10] D. Shi, D. J. Tylavsky, K. M. Koellner, N. Logic, y D. E. Wheeler. (2011). "Transmission line parameter identification using PMU measurements". *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, no. 4, pp. 1574–1588.
- [11] A. Murphy, D. Mah, R. Wilson, y G. Zevenbergen. (1999). "Calculation of transmission line parameters from synchronized measurements". *Electric Machines & Power Systems*, vol. 27, no. 12, pp. 1269–1278.
- [12] M. Wang, J. Bao, X. Qi, y Z. Zhang. (2010) "Online estimation of transmission line parameters based on PMU measurements". *Automation of Electric Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 25–31.
- [13] J. Lu y L. Zhang. (2012). "Line parameter identification algorithm based on PMU measurements," *Power System and Clean Energy*, vol. 28, no. 11, pp. 25–31.
- [14] E. Janecek, P. Hering, P. Janecek, y A. Popelka. (2011). "Transmission line identification using PMUs". *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp.
- [15] Glover, J. Duncan, *Sistemas de potencia: análisis y diseño* /J. Duncan Glover; traducción Francisco Sánchez Fragosó., 3a. ed., México : Thomson Editores, 2004.656 pp.
- [16][https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/125369/mod_resource/content/4/2019%20Sin crofasores.%20Presentaci%C3%B3n.%20Curso%20ESEP%20y%20CAPSEP%20v8.pdf](https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/125369/mod_resource/content/4/2019%20Sin%20crofasores.%20Presentaci%C3%B3n.%20Curso%20ESEP%20y%20CAPSEP%20v8.pdf)
- [17] <http://smartgridcenter.tamu.edu/resume/pdf/1/C37.118.1-2011.pdf>,
- [18] John J. Grainger, William D. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*, México 1996 Ed. Mc Graw Hill,740pp
- [19] Mini S. Thomas *Jamia Millia Power system SCADA and smart grids*, Islamia University New Delhi, India John D. McDonald *GE Energy Management - Digital Energy* Atlanta, Georgia, USA, Ed. CRC Press 2015
- [20]. P. Zarco and A. Gómez Expósito. *Power system parameter estimation: A survey*. *IEEE Trans. Power Syst* 15.2000. N°1.216-222