

41126
75



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGON**

**CALCULO Y DISEÑO DE LINEAS AEREAS DE
TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA**



E.N.E.P. ARAGON

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICO
P R E S E N T A N :**

**ALEJANDRO MARTÍN ~~MORENO DE LA ROSA~~
ARIEL ARTURO GRANADOS CERECERO**

Compañía de un Disco Compacto

ASESOR: ING. JUAN ANTONIO VILLANUEVA ORTEGA



MEXICO

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2002

A



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

***CALCULO Y DISEÑO
DE LINEAS AEREAS
DE TRANSMISION
DE ENERGIA
ELECTRICA***

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

A mi Madre, quien me inculcó sentido de responsabilidad y que siempre ha tenido fe en mí, dedico a ella mi carrera y el presente trabajo.

A los profesores que a lo largo de la carrera me mostraron que un buen estudiante se forma del 90% de dedicación y 10 % de inspiración.

A Ariel Granados mi compañero en la carrera con quien he compartido vivencias y por supuesto este trabajo con el cual culminamos otra etapa de nuestras vidas.

A María del Carmen, una chica muy especial.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Alejandro Martín Moreno de la Rosa.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que son el principal apoyo para haber llevado a cabo mi carrera y culminarla con el presente trabajo.

Por haberme inculcado el valor de la responsabilidad, la dedicación y a concluir lo que comienzo.

A Alejandro Martín Moreno de la Rosa mi compañero en la carrera y en la vida con quién compartí este proyecto y ayudó a que se hiciera realidad.

Ariel Arturo Granados Cerecero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN.

La electricidad es la forma de energía mas ampliamente utilizada para usos industriales, comerciales y domésticos, de ahí la importancia de generarla en grandes cantidades y transportarla en forma eficiente.

El hecho de transmitir la energía eléctrica en forma óptima conlleva un análisis matemático que involucra varios factores como son:

1. Factores climatológicos.
2. Factores orográficos.
3. Factores mecánicos.
4. Factores eléctricos.

El desarrollo del presente trabajo se enfoca en los factores eléctricos de las líneas de transmisión de esta energía y en específico, de las líneas aéreas de transmisión realizando el análisis matemático necesario para el cálculo de pérdidas, eficiencia y regulación de voltaje, así como la corrección del factor de potencia por medio de bancos de capacitores.

INDICE.	Página
INTRODUCCIÓN	I
INDICE GENERAL	II
INDICE DE TABLAS Y FIGURAS	V
OBJETIVO	VIII
I. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE ENERGIA ELECTRICA	1
1.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA	3
1.2 REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA.	6
1.3 DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA DE POTENCIA.	7
1.4 VALORES EN PU.	10
1.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN	12
II. CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN	13
2.1 ELEMENTOS DE UNA LINEA DE TRANSMISIÓN	15
2.2 CONDUCTORES USADOS EN LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN AEREAS	16
2.3 IMPEDANCIA EN SERIE DE UNA LINEA DE TRANSMISIÓN	19
2.4 CAPACITANCIA EN LA LINEA DE TRANSMISIÓN	23
2.5 EFECTO CORONA	25
III. DISEÑO ELECTRICO DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN	27
3.1 RELACIONES DE VOLTAJE Y CORRIENTE	29
3.2 REPRESENTACION DE UNA LINEA DE TRANSMISIÓN	30
3.3 REGULACION DE VOLTAJE Y EFICIENCIA	35
3.4 EFECTO CORONA	37
3.5 FLUJO DE POTENCIA	40

	Página
3.6 DIAGRAMAS CIRCULARES	42
3.7 POTENCIA MÁXIMA TRANSMITIDA	45
3.8 COMPENSACION REACTIVA EN LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN	46
IV. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN	51
4.1 TIPOS DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN	53
4.2 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN	55
4.3 TENSIONES DE TRANSMISIÓN	58
4.4 CONEXIÓN DE LINEAS	59
4.5 RADIO MEDIO GEOMÉTRICO	61
4.6 CONTROL DE POTENCIA REACTIVA	65
V. DISEÑO DE LINEAS DE TRANSMISIÓN	69
5.1 DISEÑO DEL PROGRAMA	71
5.1.1 INTRODUCCION	71
5.1.2 DISEÑO DEL PROGRAMA DE CALCULO	72
5.2 CALCULO DE LA LINEA CON EL METODO TRDICIONAL	77
5.2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	77
5.2.2 CALCULO DE LA IMPEDAMCIA EN SERIE	79
5.2.3 CALCULO DE LA CAPACITANCIA	81
5.2.4 CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES	84
5.2.5 CALCULO DE POTENCIAS	86
5.2.6 REGULACION DE TENSIÓN	89
5.2.7 CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA	90
5.2.8 CONTROL DE POTENCIA REACTIVA	91
5.2.9 NUEVO CALCULO CON OTRO CONDUCTOR	96
CALCULO DE LA IMPEDACIA EN SERIE	98
CALCULO DE LA CAPACITANCIA	99
CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES	102
CALCULO DE POTENCIAS	103

	Página
REGULACIÓN DE TENSIÓN	105
CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA	106
CONTROL DE POTENCIA RECTIVA	107
5.3 CALCULO DE LA LINEA CON EL PROGRAMA	112
5.3.1 INTRODUCCION DE DATOS	113
5.3.2 SELECCION DE ARREGLO DE FASE	116
5.3.3 SELECCION DE ARREGLO DE LINEA	117
5.3.4 RESULTADOS	118
5.3.5 CALCULO DE BANCO DE CAPACITORES	120
5.3.6 CALCULO CON EL NUEVO FACTOR DE POTENCIA	121
5.3.7 IMPRESIÓN DE RESULTADOS	122
5.4 CALCULO DE LA LINEA CON EL PROGRAMA	123
5.5 MENSAJES DE ERROR PRODUCIDOS DURANTE EL PROCESO	131
CONCLUSIONES	137
BIBLIOGRAFIA	139

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS.

Tabla	Página
1. Símbolos normalizados.	8
2. Conductores de aluminio.	17
3. Valores del coeficiente de forma.	39
4. Valores del coeficiente de superficie	39
5. Voltajes de transmisión.	58

Figura

1. Torre de una línea de transmisión a 230 kV.	5
2. Diagrama de un sistema de potencia básico.	6
3. Diagrama unifilar de un sistema eléctrico.	9
4. Representación de un cto. equivalente monofásico en P.U.	11
5. Sección transversal de un conductor.	18
6. Diagrama vectorial de impedancia.	21
7. Representación de una línea corta.	30
8. Representación de una línea media configuración π	31
9. Representación de una línea media configuración T .	31
10. Representación de una línea larga.	32
11. Vectores de la ecuación $P_R + jQ_R$ dibujados en el plano complejo.	41
12. Diagrama circular con parámetros.	42
13. Diagrama circular lado receptor.	44
14. Diagramas vectoriales del generador.	47
15. Transformador regulante para el control de voltaje	48
16. Transformador regulante para control de ángulo de fase	49
17. Cuadripolos en serie.	55

	Página
18. Cuadripolos en paralelo.	56
19. Líneas de flujo magnético.	60
20. Arreglos de fase.	62
21. Cálculo de distancia equivalente.	63
22. Arreglos de línea.	64
23. Triángulo de potencias.	65
24. Diagrama de flujo del programa.	72
25. Torre utilizada para la línea de transmisión 1.	78
26. Torre utilizada para la línea de transmisión 2.	97
27. Pantalla de inicio del programa.	112
28. Pantalla de datos.	113
29. Pantalla de tabla de características de conductores.	114
30. Pantalla de arreglos de fase.	116
31. Pantalla de arreglos de línea.	117
32. Pantalla de resultados.	118
33. Pantalla de ingreso de nuevo F.P.	120
34. Pantalla de cálculo de banco de capacitores.	120
35. Cuadro de diálogo para calcular con banco conectado.	121
36. Pantalla preliminar de impresión.	122
37. Introducción de datos de línea.	123
38. Selección de arreglo de fase.	124
39. Selección de arreglo de línea.	125
40. Resultados.	126
41. Petición de nuevo F.P.	127
42. Banco de capacitores requerido.	127
43. Cuadro de recálculo de línea.	128
44. Resultados con nuevo F.P.	129

	Página
45. Vista previa de impresión de resultados.	130
46. Mensaje de error en la temperatura de operación.	131
47. Mensaje de error en el F.P.	132
48. Mensaje de error en dato de distancia entre conductores.	133
49. Mensaje de error en dato de distancia entre fases.	133
50. Mensaje de error en unidades.	134
51. Mensaje de error por falta de dato en arreglo de línea.	134
52. Mensaje de error por F.P. menor que el original.	135
53. Mensaje de error por F.P. unitario.	135

OBJETIVO

El objetivo principal del trabajo de tesis es el de desarrollar un programa de computadora que lleve a cabo todos los cálculos necesarios para el diseño de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica en un tiempo mínimo para así hacer mas rápida y eficiente la labor del ingeniero encargado del proyecto.

Un objetivo secundario es el de trabajar sobre una línea ya diseñada y mejorar su rendimiento por medio del cálculo de un banco de capacitores que corrija su factor de potencia.

Todo esto se realiza en pocos minutos debido a que el peso de los cálculos lo lleva la computadora y el diseñador puede invertir tiempo en otros puntos del proyecto.

***I. CARACTERISTICAS
DE LOS SISTEMAS DE
ENERGIA ELECTRICA***

1.1 DEFINICIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA

Un sistema de potencia es aquel que fue diseñado para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

El proceso comienza en la planta generadora que puede ser: **Hidroeléctrica**, esto es, generación por aprovechamiento de la energía potencial del agua generalmente en presas; **Termoeléctrica**, o sea, la generación por medio de vapor producido por la combustión de carbón, gas natural, diesel o combustóleo; **Núcleo eléctrica**, generación de vapor por fisión nuclear controlada para mover las turbinas de vapor; **Geotérmica**, que es el aprovechamiento de los mantos de vapor que existen en zonas volcánicas; **Eólica**, sin lugar a dudas la mas limpia de todas ya que aprovecha la fuerza que se produce por los vientos.

A continuación, la energía generada pasa a los transformadores que elevan el voltaje y ésta pasa a las líneas de transmisión, las líneas están conectadas a otros bancos de transformadores al final de su camino los que realizan el proceso de reducir la tensión a niveles aprovechables para la distribución y de allí se manda a la red de distribución para que sea aprovechada por los usuarios.

Los sistemas modernos de corriente alterna constan por lo general de los siguientes elementos:

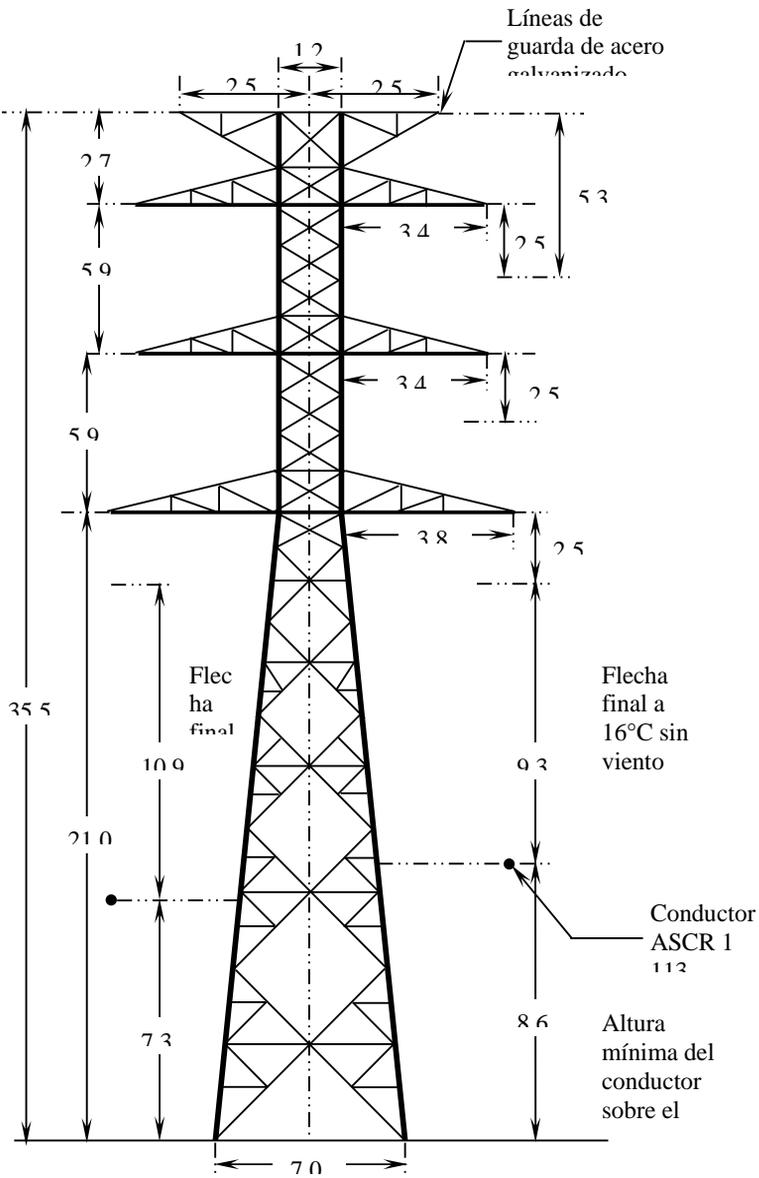
1. Centrales generadoras.
2. Estaciones transformadoras elevadoras.
3. Líneas de transmisión.
4. Estaciones de maniobra.
5. Estaciones transformadoras reductoras.
6. Líneas o redes primarias de distribución.
7. Bancos de transformadores de servicio.
8. Líneas o redes secundarias.

Por lo regular, las estaciones transformadoras elevadoras, líneas de transmisión, estaciones de maniobra y las estaciones transformadoras reductoras constituyen el sistema de transmisión, los restantes constituyen el sistema de distribución.

La diferencia entre ambos sistemas radica principalmente en su función: mientras que el primero tiene la función de transportar grandes cantidades de potencia hacia los centros de consumo e industrias que sobrepasan los límites económicos de las líneas primarias de distribución, la función primordial de las líneas de distribución es la de llevar la energía desde las subestaciones del sistema de transmisión hasta los consumidores.

Una línea de transmisión aérea está constituida por conductores, las estructuras de soporte, aisladores y accesorios para sujeción de conductores a las estructuras (torres) y cables de guarda para protección de la línea contra descargas atmosféricas.

En la figura 1 se muestra una estructura de soporte de una línea de transmisión a 230 kV.



Acotaciones en

Fig.1 Torre de una línea de transmisión

1.2 REPRESENTACIÓN DE UN SISTEMA DE POTENCIA.

Un sistema de potencia puede ser representado con un diagrama utilizando los símbolos normalizados y en una forma muy sencilla para captar el concepto sin entrar en mas detalles técnicos como se muestra en la siguiente figura:

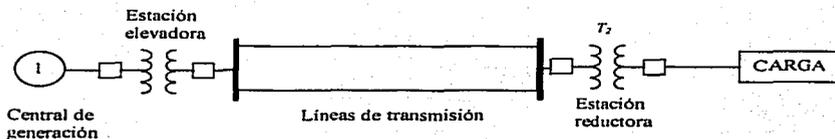


Fig. 2 Diagrama de un sistema de potencia básico.

Esto se hace con el fin de que cualquier persona que observe el dibujo logre entender en lo que consiste un sistema de potencia básico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.3 DIAGRAMA UNIFILAR DE UN SISTEMA DE POTENCIA

Un sistema trifásico equilibrado puede ser representado, por razones de simetría existente entre las fases, por medio de un diagrama unifilar que no es otra cosa sino la representación de una sola fase y el neutro de retorno.

Con frecuencia, se hace otra simplificación suprimiendo el cierre del circuito por el neutro y se indican las partes componentes por medio de símbolos normalizados.

Esto se hace con el objetivo de suministrar de manera concisa los datos mas importantes del sistema. La ANSI (American National Standards Institute) y la IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) publicaron un conjunto de símbolos normalizados para diagramas eléctricos para unificar los criterios en su interpretación.

Es frecuente que se escriba la información del tipo y régimen de las máquinas que aparecen en el diagrama.

Los símbolos mas comunes se muestran en la tabla número 1.

Máquina o inducido giratorio	
Transformador de potencia de dos devanados	
Interruptor de circuitos de potencia en aceite u otro liquido	
Conexión trifásica en Delta	
Conexión trifásica en estrella sin puesta a tierra en el neutro	
Conexión trifásica en estrella con puesta a tierra en el neutro	
Interruptor de circuito en aire	
Fusible	

Tabla 1. Símbolos normalizados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

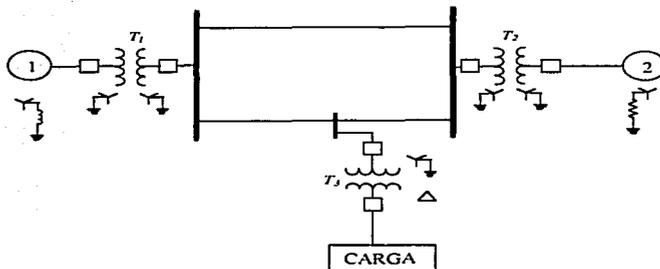


Fig. 3 Diagrama unifilar de un sistema eléctrico.

Donde:

Nº 1, Generador 20 MVA; 6.6 kV; $X'' = 0.655 \Omega$

Nº 2, Generador 10 MVA; 6.6 kV; $X'' = 1.31 \Omega$

T_1, T_2, T_3 , Transformadores en banco trifásico, c/u 10 MVA; 3.81 – 38.1 kV; $X = 14.52 \Omega$, referidos al lado de alta tensión.

Reactancia de las líneas de transporte = 17.4Ω

Carga = 25 MVA; 3.81 kV; $f_p = 0.9$ en atraso.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.4 VALORES EN PU.

El valor por unidad (PU) de una magnitud cualquiera se define como la razón de su valor al valor base, expresado como un decimal.

En este sistema todas las cantidades se expresan como fracciones decimales o tantos por unidad, tiene la ventaja de que con él hay menos posibilidad de equivocación en los cálculos.

El sistema por unidad simplifica muchos de los problemas en el análisis de circuitos, en la forma convencional en la que se emplean Volts y Amperes, la solución de un sistema de líneas de transmisión de diferentes niveles de tensión requiere que todas las impedancias a ser sumadas sean referidas a un mismo nivel de voltaje.

En este sistema, desaparecen completamente estos niveles, por lo tanto, una red constituida por generadores, transformadores y líneas, con diferentes niveles de tensión, se reduce a un sistema de impedancias simples. Así por ejemplo, un transformador de 20 kVA puede tener una reactancia del 6% (0.06 PU), y otro de 200 000 kVA puede tener la misma reactancia de 0.06 PU.

Los voltajes, corrientes, reactancias y potencias están relacionadas entre sí de tal manera que la elección de valores base para dos cualesquiera determina los valores base de las otras dos.

Las relaciones de las diferentes magnitudes están dadas por las siguientes expresiones:

$$\text{Corriente base en Amperes} = \frac{\text{kVA}}{\text{Tensión base en kV}}$$

$$\text{Impedancia base} = \frac{\text{Tensión base en Volts}}{\text{Corriente base en Amperes}}$$

$$\text{Impedancia base} = \frac{(\text{Tensión base en kV})^2 (1\ 000)}{\text{kVA base}}$$

$$\text{Impedancia por unidad de un elemento de circuito} = \frac{\text{Impedancia real en Ohms}}{\text{Impedancia base en Ohms}}$$

$$\text{Potencia base en kW} = \text{kVA base}$$

$$\text{Potencia base en MW} = \text{MVA base}$$

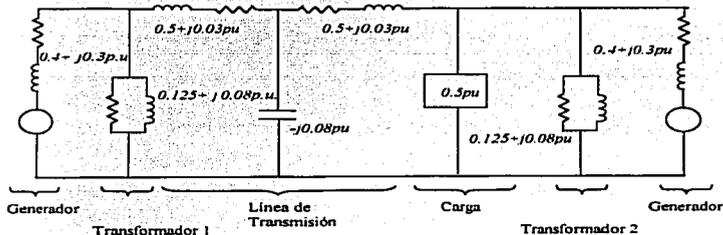


Fig. 4. Representación de un cto. equivalente monofásico en P.U.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.5 CARACTERÍSTICAS DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión de corriente eléctrica debe reunir una serie de características a fin de que realice su función en óptimas condiciones tanto técnicas como económicas; dichas características son:

1. Eficiencia, esto quiere decir que la línea de transmisión debe tener un mínimo de pérdidas de energía.
2. Confiabilidad, no deben existir interrupciones.
3. Trabajar balanceada, los voltajes y corrientes que circulan a través de ella en las tres fases deben tener un defasamiento de 120° .
4. Regulación de voltaje, la tensión eléctrica no debe exceder $\pm 10\%$ de su valor nominal, debe ser constante.
5. Costo, debe ser lo más económica posible sin caer en obras y materiales de baja calidad.
6. No debe causar interferencia debida al efecto corona.

Al conjuntar esta serie de factores, el rendimiento de la línea de transmisión será óptimo y prestará servicio en forma eficaz a lo largo de muchos años amortizando así el costo de inversión inicial y reeditando ganancias económicas así como pérdidas mínimas en el transporte de energía.

***II. CARACTERISTICAS
ELECTRICAS DE LAS
LINEAS DE
TRANSMISION***

2.1 ELEMENTOS DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En una línea de transmisión eléctrica existen cuatro parámetros que influyen en su funcionamiento como parte de un sistema de potencia, dichos parámetros son:

- a) La resistencia
- b) La inductancia
- c) La capacitancia
- d) La conductancia

Los tres primeros serán analizados en capítulos posteriores, la conductancia se presenta entre conductores o entre conductores y la tierra, en la conductancia hay que considerar las corrientes de fuga en los aisladores y a través del aislamiento de los cables.

Por lo general, no se toma en cuenta la conductancia entre conductores de una línea aérea puesto que la fuga de corriente en los aisladores llega a ser despreciable además de ser muy variable según las condiciones atmosféricas y las propiedades conductoras de la contaminación que se deposita sobre los aisladores.

2.2 CONDUCTORES ELÉCTRICOS USADOS EN LAS LINEAS DE TRANSMISION AEREAS.

Se puede definir como conductor eléctrico aquel material o sustancia capaz de permitir el paso continuo de una corriente eléctrica cuando es sometido a una diferencia de potencial entre dos puntos.

En general, todas las sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso poseen un grado de conductividad de energía eléctrica, pero ciertas sustancias son mas conductoras que otras. Así tenemos que los metales son los mejores conductores y otros elementos y sustancias como los óxidos metálicos, sales y materias fibrosas presentan una conductividad mas baja que aquellos.

Para establecer un camino o paso de corriente eléctrica entre dos puntos con diferente potencial se emplea el conductor, cuando se presenta el paso de corriente eléctrica se dice que se ha establecido un circuito.

En general y para nuestros fines, un conductor eléctrico es un cuerpo constituido por un alambre o serie de alambres cableados de material conductor que se utiliza desnudo.

En los inicios de la transmisión de potencia eléctrica se utilizaban principalmente conductores hechos de cobre debido a su alta conductividad, sin embargo, la tendencia a sustituirlos por conductores hechos de aluminio se incrementó debido a que este último es mucho mas ligero y barato que el cobre para un mismo valor de resistencia.

Otra ventaja la representa el mayor diámetro que posee un conductor de aluminio en las mismas condiciones de resistencia que el de cobre, puesto que

con un diámetro mayor, las líneas de flujo eléctrico que se originan en el conductor se encuentran más separadas en su superficie para el mismo voltaje; este hecho genera un menor gradiente de voltaje en la superficie y por lo tanto una menor tendencia a la ionización del aire circundante lo que produce un efecto corona.

Por lo general, para líneas de transmisión aéreas se utilizan conductores desnudos, esto es, sin aislamiento ya que éste lo proporciona la distancia a la que se colocan unos conductores de otros y el aire circundante.

La designación que se hace para los diferentes tipos de conductores de aluminio según la forma en la que se fabrican así como los materiales y aleaciones que se utilizan se muestra en la siguiente tabla:

SIGLAS	DESCRIPCIÓN
AAC	Cable de aluminio puro
AAAC	Cable de aleación de aluminio
ACSR	Cable de aluminio reforzado con alma de acero
ACAR	Cable de aluminio reforzado con alma de aleación de aluminio

Tabla 2. Conductores de aluminio.

El trenzado del cable se hace en capas alternadas de hilos enrolladas en direcciones opuestas con el fin de evitar que se desenrollen, además, proporciona flexibilidad y resistencia a la tensión mecánica producida por el peso mismo del cable.

Es necesario hacer notar que al ser trenzado el cable, la longitud del mismo aumenta (en un rango que va desde el 1 al 5%) y por lo tanto, su resistencia eléctrica.

El cable tipo ASCR consiste de un núcleo central de alambres de acero rodeado por capas de hilos de aluminio. El alma de acero proporciona una alta resistencia mecánica al cable.

En la figura 5 se muestra la sección transversal de un cable de aluminio con alma de acero ASCR con siete hilos de acero y 24 de aluminio especificado como 24/7.

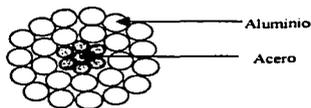


Fig. 5 Sección transversal de un conductor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3 IMPEDANCIA EN SERIE DE UNA LINEA DE TRANSMISIÓN

Cuando un circuito constituido por elementos lineales es excitado por un voltaje que sea una función senoidal en el tiempo, con frecuencia f , circula una corriente a través del circuito que también es una función senoidal de frecuencia f y cuya amplitud depende del voltaje aplicado, la resistencia, inductancia y capacitancia del mismo.

En el caso de una línea de transmisión de energía eléctrica, la resistencia y la inductancia se encuentran en serie y la capacitancia en paralelo con respecto a ellas. La resistencia que se tiene en la línea es causada por la oposición que presentan al paso de la corriente los conductores que es a su vez función de la resistividad del material ρ , la longitud y el área transversal del conductor, lo anterior se expresa de la siguiente manera:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Cuando el conductor está trenzado existe un factor que debe ser tomado en cuenta, para este cálculo se tiene la siguiente expresión:

$$R = \rho \frac{l}{A} (1 + Fc)$$

Donde:

ρ = Resistividad del material, en $\left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$

l = Longitud del conductor, en $[\text{m}]$

A = Área de la sección transversal del conductor, en $[\text{mm}^2]$

F_c = Factor de trenzado.

Como la corriente es una función que varía en el tiempo, también el campo magnético varía en el tiempo, este campo provoca en los conductores una fuerza electromotriz (fem) que se opone a la fem aplicada al principio de la línea y su valor se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

Donde L es una constante llamada constante de autoinducción y que depende de las dimensiones y naturaleza de los conductores y la separación entre ellos.

La impedancia de una línea de transmisión es un número complejo formado por la resistencia y la inductancia y se denomina en forma rectangular como sigue:

$$Z = R + j\omega L$$

$$\omega = 2\pi f$$

Donde:

R = resistencia (parte real).

ω = frecuencia angular.

$j\omega L$ = reactancia inductiva (parte imaginaria).

f = frecuencia en Hz.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En forma polar:

$$Z = |Z| \angle \theta.$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L\omega}{R}$$

Donde:

$|Z|$ = módulo de la impedancia.

$\angle \theta$ = argumento de la impedancia.

Representada con un diagrama vectorial:

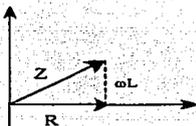


Fig. 6 Diagrama vectorial de impedancia.

Aunque la impedancia en serie en una línea de transmisión se encuentra distribuida a lo largo de ésta, se hace un circuito equivalente con parámetros concentrados para su análisis.

Para la impedancia en serie se necesita calcular la reactancia inductiva y así formar el número complejo que compone a la impedancia.

Primeramente se debe calcular la inductancia de la línea con la siguiente expresión:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{Deq}{RMG} \left[\frac{H}{m} \right]$$

Donde:

L = Inductancia en Henrys / m

Deq = Distancia equivalente entre conductores.

RMG = Radio Medio Geométrico de los conductores.

Una vez calculada la inductancia se obtiene el valor de la reactancia inductiva (X_L) de la siguiente forma:

$$X_L = 2 \pi f L$$

Donde:

X_L = Reactancia inductiva en Ω / m.

f = Frecuencia de la corriente eléctrica. (En México es de 60 Hz).

L = Inductancia en Henrys / m.

Para obtener la reactancia inductiva total de la línea se multiplica la reactancia por la longitud de la línea.

La impedancia serie de la línea se obtiene entonces formando el número complejo que en su parte real tiene la resistencia total de la línea y en su parte imaginaria la reactancia total de la línea.

2.4 CAPACITANCIA EN LA LINEA DE TRANSMISIÓN.

La capacitancia en una línea de transmisión es el resultado de la diferencia de potencial entre los conductores y hace que éstos se comporten como las placas de un capacitor.

La capacitancia entre conductores paralelos es una constante que depende de la distancia entre ellos y su tamaño. Este efecto puede ser despreciado en líneas de poca longitud. (menor a 80 km), pero su importancia aumenta con la longitud y el alto voltaje.

Al aplicar en un extremo de la línea una diferencia de potencial entre dos hilos y se mantiene abierto el otro extremo, ambos conductores adquieren una carga eléctrica q que es proporcional a la diferencia de potencial aplicada v y una constante C conocida con el nombre de capacitancia.

Lo anterior se expresa de la siguiente manera:

$$q = Cv$$

Donde:

q es la carga que adquieren los conductores en coulombs [c].

C es la capacitancia expresada en Farads [F].

v es la diferencia de potencial entre conductores en Volts [V].

La capacitancia de una línea de transmisión se calcula con la siguiente expresión:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_{eq}}{R_{MG}}} \left[\frac{F}{m} \right]$$

Donde:

C = Capacitancia de la línea en Farads / m.

ϵ_0 = Constante dieléctrica en el vacío.

D_{eq} = Distancia equivalente entre conductores de la línea.

RMG = Radio Medio Geométrico.

Se debe calcular la reactancia capacitiva para obtener valores en Ohms, esto se hace de la siguiente manera:

$$X_C = \frac{1}{2\pi(f)C}$$

Donde:

X_C = Reactancia capacitiva en Ω - m.

f = Frecuencia de la corriente eléctrica. (En México es de 60 Hz).

C = Inductancia en Farads/ m.

A diferencia del cálculo de la inductancia, la capacitancia se calcula con el radio nominal del conductor en vez de su Radio Medio Geométrico proporcionado en tablas.

Junto con las cargas eléctricas se forma un campo eléctrico cuyas líneas de flujo terminan en los conductores; esto hace que la línea de transmisión se convierta en un capacitor siendo las placas los conductores y el dieléctrico el aire u otro medio alrededor de ellos.

Por estar en función del voltaje, de la distancia entre conductores y la naturaleza del dieléctrico, la capacitancia de una línea de transmisión debe tomarse en cuenta para el cálculo de la misma debido a que afecta la caída de voltaje, la eficiencia, el factor de potencia y la estabilidad del sistema.

2.5 EFECTO CORONA.

Este se presenta cuando el potencial de un conductor en el aire se eleva hasta valores tales que rompen la rigidez dieléctrica del aire que rodea al conductor.

Por lo general, los conductores utilizados en las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica son desnudos, esto quiere decir que se utiliza el aire circundante como aislamiento.

Se manifiesta visiblemente en forma de penachos azulados alrededor del conductor y se forma debido a la ionización del aire, esta ionización convierte al aire en conductor aunque con alta resistencia. En presencia de humedad produce ácido nítrico.

Este efecto causa pérdidas en el transporte de energía eléctrica y puede llegar a producir corrosión en los conductores por la formación del ácido deteriorándolos y acortando así su vida útil.

Además, causa interferencia en las transmisiones inalámbricas, o sea, radio frecuencias muy utilizadas en las telecomunicaciones modernas.

III. DISEÑO ELECTRICO

DE LAS LINEAS

DE TRANSMISION

3.1 RELACIONES DE VOLTAJE Y CORRIENTE

Una característica esencial que debe ser tomada en cuenta al diseñar una línea de transmisión de energía eléctrica es la conservación de la tensión en varios puntos del sistema dentro de los límites especificados.

Debido a la impedancia propia de la línea, existe una caída de voltaje conforme la electricidad se va alejando de la fuente de generación, esta caída puede llegar a ser tan grande, que al final de la línea ya no es adecuado el nivel de tensión para ser aprovechado en forma óptima, es por esta razón por la que debe calcularse la línea en forma tal que la caída de tensión, también llamada porcentaje de regulación, no exceda el diez por ciento del voltaje nominal de generación.

Para ello, se utilizan fórmulas que permiten conocer los valores de la corriente, el voltaje y el factor de potencia en cualquier punto de la línea conocidos dichos valores en un punto, generalmente en un extremo de la línea.

3.2 REPRESENTACIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

La representación de las líneas de transmisión se divide según la longitud de las mismas. Para una distancia de hasta 80 km, la línea se considera como corta, las líneas que tienen una longitud desde 80 hasta 240 km se consideran como línea media y para líneas con longitud mayor a 240 km se consideran líneas largas.

Las constantes que se utilizan para el cálculo de líneas de transmisión se conocen con el nombre de constantes generalizadas, en general, son números complejos. A y D son adimensionales, las unidades de B y C son en Ohms y Siemens respectivamente. Estas constantes se aplican a circuitos con dos pares de terminales o cuádrupolos.

Para una línea corta, la capacitancia es tan pequeña que se puede omitir sin perjuicio de la exactitud en el cálculo, se representa de la siguiente manera:

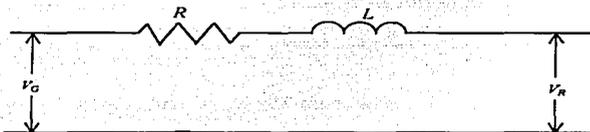


Fig. 7 Representación de una línea corta.

Como se puede apreciar en la figura, la capacitancia no se toma en cuenta por ser muy reducida. Las constantes generalizadas para línea corta son:

$$A = 1$$

$$B = Z$$

$$C = 0$$

$$D = 1$$

Cuando se trata de representar una línea media, la capacitancia se dibuja la capacitancia en el diagrama ya sea con la mitad de la capacitancia en cada extremo de la línea, configuración "π", o con la capacitancia al centro y la mitad de la impedancia en serie a cada extremo del diagrama, configuración "T". las siguientes figuras muestran cada una de las representaciones de línea media:



Fig. 8 Representación de una línea media configuración "π"

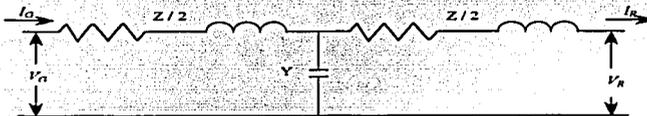


Fig. 9 Representación de línea media configuración "T"

En el cálculo de líneas medias se considera la capacitancia de la línea. Si la admitancia está dividida en los extremos de la línea, se llama configuración π. Las fórmulas se deducen de la siguiente manera:

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

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

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para calcular I_G se tiene:

$$I_G = V_G \frac{Y}{2} + V_R \frac{Y}{2} + I_R$$

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

Para el circuito en T se considera toda la admitancia en el punto medio de la línea y la impedancia en dos ramas.

$$V_G = AV_R + BI_R$$

$$I_G = CV_R + DI_R$$

Donde:

$$A = D = \frac{ZY}{2} + 1$$

$$B = Z$$

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

Para el cálculo de líneas de mas de 320 km de longitud se requiere considerar que los parámetros de la línea no se encuentran concentrados sino distribuidos uniformemente a lo largo de la línea larga.

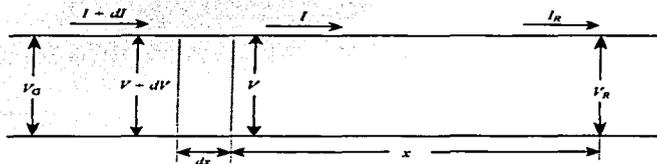


Fig. 10 Representación de una línea larga

Es por ello que se utiliza la forma hiperbólica de las ecuaciones diferenciales aplicadas al cálculo de la corriente y el voltaje, éstas ecuaciones vienen definidas por la forma exponencial por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \sinh \theta &= \frac{e^{\theta} - e^{-\theta}}{2} \\ \cosh \theta &= \frac{e^{\theta} + e^{-\theta}}{2} \end{aligned}$$

Las ecuaciones que dan la tensión y la corriente en cualquier punto de la línea son:

$$\begin{aligned} V &= V_R \cosh \gamma(x) + I_R Z_C \sinh \gamma(x) \\ I &= I_R \cosh \gamma(x) + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma(x) \end{aligned}$$

Para conocer la tensión y la corriente en el extremo generador se sustituye x por l , o sea la longitud, por lo que las ecuaciones quedan:

$$\begin{aligned} V_G &= V_R \cosh \gamma(l) + I_R Z_C \sinh \gamma(l) \\ I_G &= I_R \cosh \gamma(l) + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma(l) \end{aligned}$$

Las constantes generalizadas son:

$$A = \cosh \gamma(l)$$

$$B = Z_c \operatorname{senh} \gamma(l)$$

$$C = \frac{\operatorname{senh} \gamma(l)}{Z_c}$$

$$D = \cosh \gamma(l)$$

Donde:

$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$: es la impedancia característica de la línea.

$\gamma = \sqrt{yz}$: es la constante de propagación.

3.3 REGULACIÓN DE VOLTAJE Y EFICIENCIA

El factor de regulación de voltaje en una línea de transmisión eléctrica es la elevación de la tensión en el extremo receptor, expresado en por ciento de la tensión a plena carga.

La expresión matemática es:

$$\%R = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} * 100$$

Donde:

$|V_{R,NL}|$ = Valor Absoluto de la tensión en el extremo receptor en vacío.

$|V_{R,FL}|$ = Valor Absoluto de la tensión en el extremo receptor a plena carga.

Después de desconectar la carga de la línea de transmisión, el voltaje en el extremo receptor es igual al voltaje del extremo transmisor.

Para mantener la tensión en el extremo receptor, es preciso contar con una corriente mayor en el extremo generador cuando la corriente en el extremo receptor está retrasada con respecto al voltaje, esta situación tiende a desaparecer conforme el extremo receptor se acerca al factor de potencia unitario.

El porcentaje de regulación es máximo con factores de potencia atrasados y mínimo o incluso nulo con factores de potencia en adelante.

La eficiencia de una línea de transmisión es la relación que existe entre la potencia en el lado de recepción y la potencia en el lado de generación expresada en porcentaje.

La ecuación que se utiliza para calcular la eficiencia es la siguiente:

$$\eta = \frac{P_R}{P_G} \times 100$$

Donde:

P_R = Potencia en el lado receptor.

P_G = Potencia en el lado generador.

η = Eficiencia expresada en porcentaje.

3.4 EFECTO CORONA

Es importante reducir el efecto corona para evitar pérdidas excesivas en la transmisión de energía eléctrica, es por ello que se han desarrollado estudios para encontrar una fórmula que permita conocer las consecuencias de este fenómeno en las líneas de transmisión.

La fórmula que calcula en forma aproximada las pérdidas por efecto corona fue deducida por F. W. Peek Jr. quien trabajó para General Electric, sus experimentos arrojaron resultados que indican que a una temperatura ambiente de 25°C y una presión barométrica de 760 mm de Hg aparece la ionización del aire cuando la intensidad del campo eléctrico alcanza un valor de cresta de 30 kV/cm. La expresión es la siguiente:

$$g_0 = 30 \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}} \right) kV / cm$$

Donde:

g_0 es el gradiente de voltaje superficial

r es el radio del conductor en cm.

Existe un factor que se agrega a la expresión anterior que es el factor de densidad del aire el cual se calcula con la siguiente fórmula:

$$\delta = \frac{3.92b}{273 + t}$$

Donde:

b = presión barométrica en cm de Hg.

t = temperatura ambiente en grados Celsius.

Según esta expresión, el gradiente superficial crítico para condiciones atmosféricas dadas es:

$$g_0' = 30\delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}} \right) kV/cm \quad (\text{Valor de cresta}).$$

Donde:

g_0' es el gradiente superficial crítico.

Lo anterior se aplica a conductores de forma cilíndrica de sección perfectamente circular y sin asperezas y completamente limpios.

La realidad es que los conductores están formados por cables constituidos a su vez por varios alambres enrollados en forma de hélice, además, los conductores no están perfectamente limpios y al ser instalados sufren raspaduras lo que hace que la superficie no sea completamente lisa.

Todos estos factores contribuyen a que la intensidad del campo eléctrico aumente localmente, por lo tanto, la ionización en esos puntos se produce con un gradiente de potencial superficial menor, es por eso que se requiere de introducir coeficientes adicionales como son el coeficiente que toma en cuenta la forma general de la sección del conductor m_f y el coeficiente que indica la condición de la superficie del cable m_s .

Estos coeficientes se observan en las tablas 3 y 4 respectivamente.

$m_f = 1$	Para una sección perfectamente circular.
$m_f = 0.85$	Para un cable con 6 hilos en la capa exterior.
$m_f = 0.9$	Para un cable con 12 a 30 hilos en la capa exterior.

Tabla 3. Valores del coeficiente de forma m_f

$m_g = 0.9$	Para cables nuevos.
$m_g = 0.8$	Para cables limpios o envejecidos.
$m_g = 0.7$	Para cables sucios o engrasados.
$m_g = 0.5$	Para cables recubiertos de gotas de agua.

Tabla 4. Valores del coeficiente de superficie m_g

Estos dos coeficientes se multiplican para obtener el factor de superficie m el cual se agrega a la fórmula de Peek, quedando finalmente:

$$g_0 = 30m\delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}} \right) kV/cm$$

Donde:

g_0 es el gradiente de voltaje superficial corregido.

3.5 FLUJO DE POTENCIA

El flujo de potencia de una línea de transmisión se puede calcular conociendo la corriente, el voltaje y el factor de potencia en un punto dado de la misma, utilizando las constantes generalizadas se derivan una serie de ecuaciones que se aplican a un cuadripolo, esto es:

$$V_G = AV_R + BI_R$$

$$I_R = \frac{V_G - AV_R}{B}$$

si:

$$A = |A| \angle \alpha$$

$$B = |B| \angle \beta$$

$$V_R = |V_R| \angle 0^\circ$$

$$V_G = |V_G| \angle \delta$$

obtenemos:

$$I_R = \left[\frac{|V_G|}{|B|} \angle \delta - \beta \right] - \left[\frac{|A| * |V_R|}{|B|} \angle \alpha - \beta \right]$$

Por lo que la potencia compleja $V_R I_R^*$ en la terminal receptora es:

$$P_R + jQ_R = \left[\frac{|V_G| * |V_R|}{B} \angle \beta - \delta \right] - \left[\frac{|A| * |V_R|^2}{|B|} \angle \beta - \alpha \right]$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Las potencias real y reactiva en el lado receptor son:

$$P_R = \left[\frac{|V_G| * |V_R|}{B} \cos(\beta - \delta) \right] - \left[\frac{|A| * |V_R|^2}{B} \cos(\beta - \alpha) \right]$$

$$Q_R = \left[\frac{|V_G| * |V_R|}{B} \text{sen}(\beta - \delta) \right] - \left[\frac{|A| * |V_R|^2}{B} \text{sen}(\beta - \alpha) \right]$$

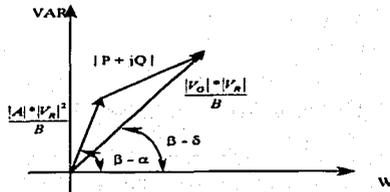


Fig. 11 Vectores de la ecuación $P_R + jQ_R$ dibujados en el plano complejo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.6 DIAGRAMAS CIRCULARES

El análisis gráfico de las variaciones de voltaje, corriente o potencia de un sistema de potencia cuando cambia alguno de sus parámetros, no sólo ahorra tiempo cuando el número de puntos a analizar es grande, sino que también ayuda a la interpretación de los resultados obtenidos.

El lugar geométrico del extremo de un vector de tensión o corriente en un punto del circuito cuando se varía alguno de los parámetros, es una circunferencia en un sistema de coordenadas rectangulares que representan la variación de alguno de los valores del circuito como respuesta al cambio experimentado por otro de los valores involucrados.

A los diagramas resultantes de estos trazos de vectores se les conoce como diagramas de círculo.

Si es tomado el diagrama vectorial de la figura 11 y se desplaza el origen de los ejes coordenados se obtendrá un diagrama de círculo como el que se muestra a continuación:

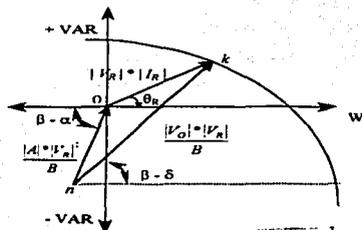


Fig. 12 Diagrama circular con parámetros.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El dibujo es un diagrama de potencia cuya resultante es de magnitud $|V_R|$ $|I_R|$ o $|P_R + jQ_R|$ formando un ángulo θ_R con el eje horizontal y las componentes del vector de potencia son:

$$P_R = |V_R| |I_R| \cos \theta_R$$

$$Q_R = |V_R| |I_R| \operatorname{sen} \theta_R$$

θ_R es el ángulo que V_R adelanta a I_R

Los puntos que interesa analizar de este diagrama son:

1. El punto n , el cual no depende de la corriente I_R y no cambiará mientras V_R permanezca constante.
2. La distancia entre los puntos n y k es constante para valores fijos de $|V_R|$ y $|V_G|$.
3. Al cambiar la carga, varía la distancia $0 - k$, éste último punto, al tener que mantenerse a una distancia constante de n , tiene que desplazarse sobre una circunferencia cuyo centro es n .
4. Si existe un nuevo valor de V_G con el mismo valor de V_R , el punto n queda invariable y se obtiene una nueva circunferencia $n - k$.

Para obtener con mayor precisión las coordenadas del punto n , se utilizan las siguientes expresiones:

$$\text{Horizontal} = -\frac{|A|}{|B|} * |V_R|^2 \cos(\beta - \alpha) [\text{Watts}]$$

$$\text{Vertical} = -\frac{|A|}{|B|} * |V_R|^2 \text{sen}(\beta - \alpha) [\text{VAR}]$$

Si la tensión en el lado receptor se mantiene constante y se trazan diagramas para diferentes valores del voltaje de generación, las circunferencias que se obtienen son concéntricas.

La siguiente figura muestra una familia de circunferencias con diferentes valores de voltaje de generación:

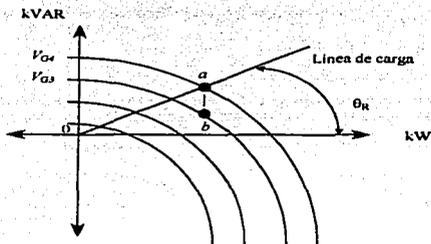


Fig. 13 Diagrama circular lado receptor.

La línea de carga trazada en el diagrama es útil siempre que se varía la carga pero el factor de potencia permanece constante.

El ángulo formado entre la línea de carga y el eje horizontal es aquel cuyo coseno es el factor de potencia de la carga.

3.7 POTENCIA MÁXIMA TRANSMITIDA

Analizando el diagrama de la figura 12, se observa que existe una limitación en la potencia que puede transmitirse a través de la línea.

Un incremento en la potencia entregada significa que el punto k se mueve a lo largo de la circunferencia hasta que el ángulo $\beta - \delta$ sea cero, o sea, que mas potencia se entregará hasta que δ sea igual a β .

Cualquier incremento en δ resultará en una menor potencia recibida. La máxima potencia será:

$$P_{R,Max} = \frac{|V_G| * |V_R|}{|B|} - \frac{|A| * |V_R|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha)$$

La longitud del segmento $a - b$ (fig. 13), es la cantidad de reactancia que los capacitores deberán de extraer sumada en paralelo con la carga para mantener constante V_R cuando el voltaje pasa de V_{G1} a V_{G2} .

3.8 COMPENSACIÓN REACTIVA EN LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN.

Existen tres formas de controlar la potencia reactiva en un sistema de transmisión de potencia, estos son:

- a) Bancos de capacitores.
- b) Máquinas síncronas.
- c) Transformadores.

Los bancos de capacitores son los mas usados en el control de potencia reactiva.

Esencialmente, los condensadores son un medio de suministrar Volt Amperes Reactivos en el punto de instalación, éstos se pueden estar conectados permanentemente, pero como reguladores de voltaje se activan y desactivan según la demanda de carga.

Esta conmutación puede ser manual o automática, ya sea por medio de relojes o como respuesta a cambios de voltaje activados por relevadores.

Cuando están conectados en paralelo con una carga con factor de potencia atrasado, los condensadores son la fuente mas importante de potencia reactiva; así, reducen la corriente de línea necesaria para alimentar la carga y reducen la caída de voltaje en la línea y se mejora el factor de potencia.

Los capacitores reducen los requerimientos reactivos de los generadores y a la salida hay mas potencia real disponible.

Las máquinas síncronas también funcionan como controles de potencia reactiva, esto se logra al variar la excitación de dichas máquinas.

Los diagramas vectoriales de las condiciones del generador se muestran a continuación:

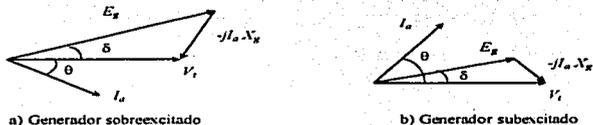


Fig. 14 Diagramas vectoriales del generador.

Si se decide mantener una cierta potencia de salida del generador hacia el sistema, $V_t \cdot I_a \cos \theta$ permanece constante a condición de que se varíe el campo de excitación de c.c. para variar E_g .

El ángulo δ se llama ángulo de torque o de potencia de la máquina. La excitación normal está dada por:

$$|E_g| \cos \delta = V_t$$

Para la condición a) el generador suministra corriente de atraso al sistema, la máquina se considera como extrayendo corriente de adelanto del sistema, está funcionando como capacitor.

En la condición b) el generador suministra corriente de adelanto al sistema, o sea, está suministrando potencia reactiva al sistema.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Existen transformadores que realizan labores de ajuste en la magnitud del voltaje, por lo general en un rango de $\pm 10\%$, otros en los cuales se regula el ángulo de fase de los voltajes de línea.

Estos transformadores se conocen con el nombre de transformadores regulantes, ya sea de voltaje o de fase respectivamente.

A continuación se muestran los diagramas de cada uno de los transformadores antes mencionados:

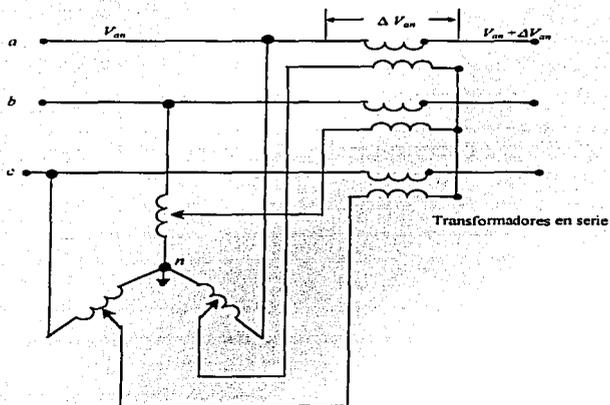


Fig. 15 Transformador regulante para el control de voltaje

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

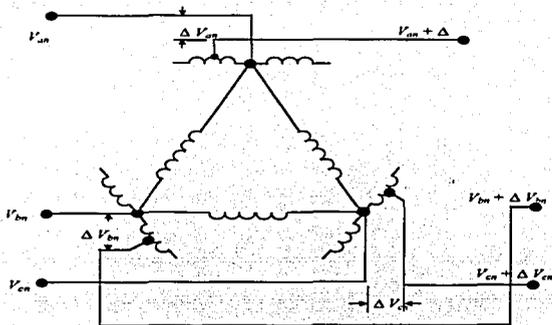


Fig. 16 Transformador regulante para control de ángulo de fase. Los devanados dibujados paralelos entre si están enrollados sobre el mismo núcleo magnético.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1950

IV. SISTEMAS

DE

TRANSMISION

4.1 TIPOS DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN.

Existen tres formas de sistemas de transmisión de energía eléctrica:

1. **Sistemas radiales.** Es la forma mas sencilla y primitiva de sistemas de transmisión, se tenía una central de generación cercana a un centro de consumo, de ahí se tendían líneas de transmisión para otros centros de consumo cercanos.

El servicio brindado por este tipo de conexión es poco confiable ya que existe el riesgo de interrupciones por maniobra.

Para conseguir mayor continuidad en el servicio, se deben interconectar directamente los centros de consumo que se encuentran en los extremos de las líneas radiales.

Este sistema al desarrollarse puede adquirir las características de una red, sin embargo se considera como radial mientras se tenga una sola fuente de alimentación.

Sólo se convierte en una opción viable cuando los consumidores se encuentran esparcidos y distantes.

2. **Sistemas en anillo.** Este tipo de sistemas está por lo general restringido a los grandes centros de población.

Consiste de un anillo de transmisión que rodea a la zona de carga y que es alimentado por una o mas centrales generadoras, a este anillo se conectan las subestaciones transformadoras de reducción desde las cuales se distribuye la energía por zonas.

Esta clase de sistema ofrece mayor continuidad y las interrupciones a las subestaciones quedan reducidas prácticamente a las maniobras propias de la subestación.

3. Sistemas en red. También llamados mallas son, en general, el resultado de ampliaciones de los dos sistemas anteriores.

Un ejemplo es cuando dos sistemas radiales o en anillo crecen hasta encontrarse y se interconectan en dos o más puntos; las subestaciones importantes tendrán dos o más alimentaciones de diferente procedencia, de este modo se consigue un servicio continuo y de gran calidad.

4.2 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

Las ecuaciones de una línea de transmisión, sin importar el procedimiento empleado para su planteamiento, tienen la forma:

$$\begin{aligned}\bar{V}_G &= A\bar{V}_R + B\bar{I}_R \\ \bar{I}_G &= C\bar{V}_R + D\bar{I}_R\end{aligned}$$

A, B, C y D son las constantes generalizadas y dependen de los parámetros de la línea.

Estas ecuaciones no sólo se aplican a líneas de transmisión, sino que se pueden usar en cualquier elemento de un circuito eléctrico pasivo, esto es, que no incluya ninguna fuente de energía, que sea lineal, o sea, que los parámetros R, L, C sean constantes y que esté formado por dos terminales de entrada y dos de salida.

Al elemento que reúne estas características se le llama *cuadripolo*.

Si conocemos las constantes de un cuadripolo y el voltaje y la corriente en un par de terminales, pueden calcularse el voltaje y la corriente del otro par de terminales.

Los cuadripolos pueden ser conectados en serie o en paralelo y las constantes generalizadas para estos arreglos son:

Para una conexión en serie:

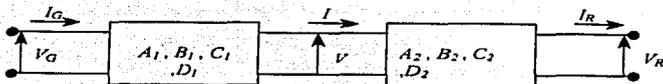


Fig. 17 Cuadripolos en serie

$$A = A_1 A_2 + B_1 C_2$$

$$B = A_1 B_2 + B_1 D_2$$

$$C = C_1 A_2 + D_1 C_2$$

$$D = C_1 B_2 + D_1 D_2$$

Para una conexión en paralelo:

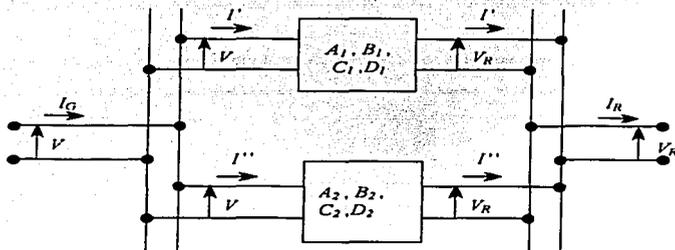


Fig. 18 Cuadripolos en paralelo.

Estos cuadripolos se sustituyen por un cuadripolo equivalente con las constantes generalizadas:

$$A = \frac{A_1 B_2 + A_2 B_1}{B_1 + B_2}$$

$$B = \frac{B_1 * B_2}{B_1 + B_2}$$

$$C = C_1 + C_2 + \frac{(A_1 - A_2)(D_2 - D_1)}{B_1 + B_2}$$

$$D = \frac{B_1 D_2 + B_2 D_1}{B_1 + B_2}$$

4.3 TENSIONES DE TRANSMISIÓN

En nuestro país, la encargada de generar y transmitir casi la totalidad de la energía eléctrica es la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Los voltajes que se deben manejar para la transmisión deben ser altos con el fin de reducir las pérdidas por efecto Joule, al ser elevada la tensión, la corriente en Amperes que circula a través de la línea se reduce resultando una menor cantidad de pérdidas.

A continuación se muestra un cuadro con los voltajes de transmisión manejados por la CFE así como las longitudes de las líneas hasta Diciembre de 2001.

Nivel de tensión (kV)	Longitud (km)
400	13 695
230	22 645
161	508
150	766

Tabla 5. Voltajes de transmisión.

4.4 CONEXIÓN DE LINEAS

Las líneas de transmisión están formadas por arreglos de conductores, esto es, que una fase del sistema trifásico está compuesta por conjuntos de alambres o cables, que pueden ser dos, tres y hasta cuatro.

Esto provoca una inductancia mutua entre los conductores que componen la fase y es necesario calcular esta inductancia para el buen diseño de la línea de transmisión.

Para alambres, la inductancia se calcula con la siguiente expresión:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1 e^{-1/4}}$$

Donde:

$$e^{-1/4} = 0.7788$$

r_1 es el radio del conductor.

$\Rightarrow r_1(0.7788) = r'_1$, o sea, el radio modificado.

D es la distancia que existe entre los centros de los alambres.

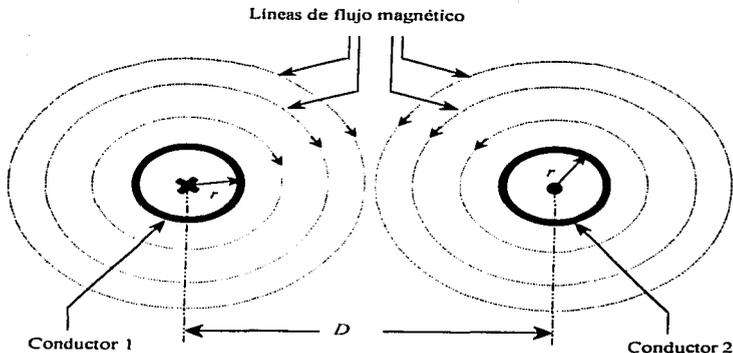


Fig. 19 Líneas de flujo magnético.

Si los alambres son del mismo diámetro, la inductancia total (L_T) es simplemente la suma de ambas, la expresión queda:

$$L_T = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'}$$

En el caso de que se trate de alambres de diferente radio, la expresión que se utiliza es:

$$L_T = 2 \times 10^{-7} \left[\ln \frac{D}{r'_1} + \ln \frac{D}{r'_2} \right] \text{ En Henrys/ metro.}$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

4.5 RADIO MEDIO GEOMÉTRICO (RMG).

Cuando se tiene una línea de conductores compuestos quiere decir que cada fase está formada por más de un alambre o cable, bajo estas circunstancias, la inductancia y la capacitancia deben ser calculadas con la misma fórmula sólo que en vez de utilizar el radio modificado éste se sustituye por el RMG. En el caso de la inductancia se utiliza el D_S y en el caso de la capacitancia debe utilizarse el radio nominal del cable, se calcula de la siguiente manera:

$$RMG = \sqrt[n]{(D_{11} D_{12} D_{13} \dots D_{1n})(D_{21} D_{22} D_{23} \dots D_{2n}) \dots (D_{n1} D_{n2} D_{n3} \dots D_{nn})}$$

Donde:

$D_{12}, D_{23}, D_{34}, D_{2n}, \dots$ son las distancias que existen entre centros de conductores, siendo $D_{11}, = D_{22}, = D_{33}, = D_{nn} = D_S$

El RMG es el que se utiliza para los cálculos de inductancia y capacitancia en el caso de que la línea esté formada por cables y los datos se encuentran en tablas de especificaciones de conductores que elaboran los fabricantes.

En el programa de cálculo, se incluyen arreglos de uno, dos, tres y cuatro conductores por fase en las siguientes formas:

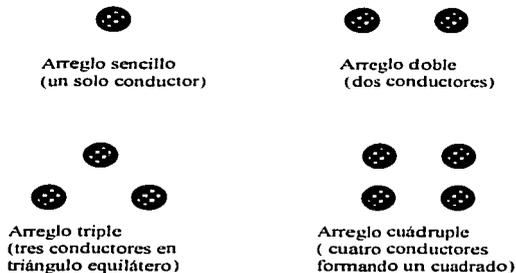


Fig. 20 Arreglos de fase.

Al calcular el RMG lo que se está haciendo es "concentrar" los n conductores que forman una fase en un punto que se encuentra en el centro geométrico del arreglo.

así mismo, las fases de una línea de transmisión están distribuidas en diferentes arreglos. Con el propósito de encontrar un centro geométrico del arreglo de línea, para llevar a cabo un buen diseño, se deben realizar cálculos para encontrar una distancia equivalente, este cálculo se hace con la siguiente expresión:

$$Deq = \sqrt[nm]{(D_{11'} D_{12'} D_{13'} \dots D_{1m})(D_{21'} D_{22'} D_{23'} \dots D_{2m}) \dots (D_{n1'} D_{n12'} D_{n13'} \dots D_{nm})}$$

Donde:

n = Número de conductores de la fase 1

m = Número de conductores de la fase 2

D_{nm} = Distancia entre conductores o grupo de ellos que forman la línea.

Lo anterior se aprecia mas claramente en la siguiente figura:

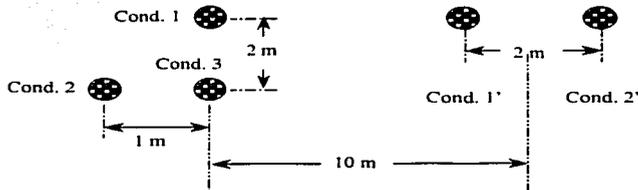


Fig. 21 Cálculo de distancia equivalente.

La distancia equivalente (Deq) de la figura se calculará de la siguiente manera:

$$Deq = \sqrt[3]{(D_{11'}) (D_{12'}) (D_{21'}) (D_{22'}) (D_{31'}) (D_{32'})}$$

$$D_{11'} = 9m$$

$$D_{12'} = 11m$$

$$D_{21'} = 10.198m$$

$$D_{22'} = 12.165m$$

$$D_{31'} = 9.21m$$

$$D_{32'} = 11.18m$$

Las distancias $D_{21'}$, $D_{22'}$, $D_{31'}$ y $D_{32'}$ fueron calculadas por medio el teorema de Pitágoras. Haciendo la sustitución y las operaciones pertinentes:

$$Deq = \sqrt[3]{(9)(11)(10.198)(12.165)(9.21)(11.18)}$$

$$Deq = 10.4m$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Con esto se logra encontrar la distancia equivalente que será utilizada en el cálculo de la inductancia de la línea de transmisión.

Las cinco formas de arreglo de línea se muestran a continuación:

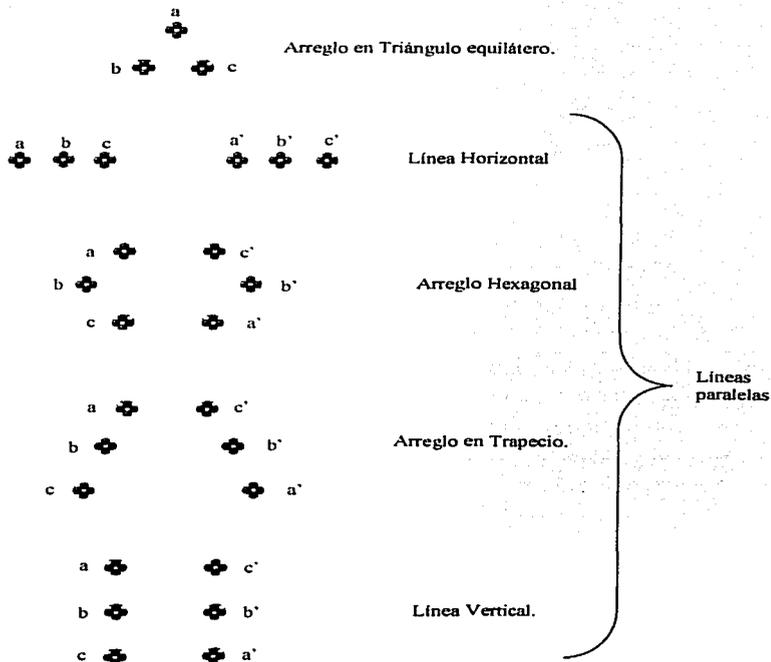


Fig. 22 Arreglos de línea.

4.6 CONTROL DE POTENCIA REACTIVA

El control de la potencia reactiva de una línea de transmisión puede realizarse por los medios mencionados en capítulos anteriores, en este apartado se hará referencia al cálculo de bancos de capacitores, ya que es la práctica más común.

Se parte de la idea de que la potencia transmitida por una línea puede ser representada por un triángulo de potencias el cual está formado por la potencia aparente, la potencia activa y la potencia reactiva, según se ve en la figura:

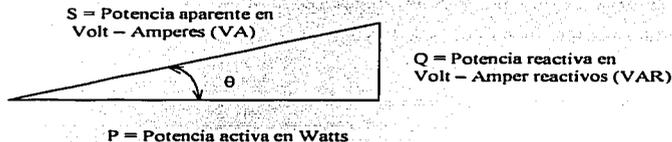


Fig. 23 Triángulo de potencias.

La potencia aparente es aquella que realmente está siendo transmitida, la potencia activa o real es la que está siendo aprovechada por el usuario y la potencia reactiva es la que se genera por los motores y equipos que están consumiendo energía, el ángulo θ es el factor de potencia, es decir, la relación que existe entre la potencia que se transmite y la potencia que se aprovecha.

Con el fin de aprovechar la mayor cantidad posible de potencia, se pretende que el factor de potencia tienda a la unidad, esto es, que el ángulo θ sea cero. Para lograr esto se debe reducir al mínimo la potencia reactiva en el sistema para lo cual se requiere "restar" potencia reactiva (provocada por

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

motores en su mayor parte y por la inductancia de los conductores de la línea), para realizar dicha resta se conectan bancos de capacitores los cuales deben de ser calculados para no exceder su capacidad de compensación.

En la actualidad, las compañías suministradoras de energía eléctrica requieren a los usuarios un factor de potencia de 0.95 o más, de otro modo, con factores de potencia mas bajos, penalizan a los consumidores con multas.

Además, la propia línea de transmisión genera reactivos que hay que disminuir por las razones anteriormente mencionadas.

Observando el triángulo de potencias, se nota que puede descomponerse trigonométricamente para así ser analizado.

$$\tan \theta = \frac{Q}{P}$$
$$\Rightarrow Q = P \tan \theta$$

Como por lo general lo que se conoce de una línea de transmisión es su potencia trifásica en Watts y el factor de potencia expresado en decimales, basta con encontrar el valor de θ con la relación:

$$\cos \theta = \text{Factor de potencia}$$

$$\Rightarrow \theta = \cos^{-1} \text{ F.P.}$$

Una vez encontrado el valor del ángulo en grados, simplemente se obtiene su tangente y se multiplica por la potencia activa; con este resultado se conoce cuanta potencia reactiva tendrá la carga con el nuevo Factor de Potencia.

A continuación, para encontrar la magnitud del Banco de Capacitores, se le restan a los Volt – Amperes Reactivos de la línea trabajando con el Factor de Potencia original los Volt – Amperes Reactivos que se obtuvieron con el nuevo Factor de Potencia, el resultado es la cantidad de Volt – Amperes Reactivos Capacitivos para elevar el Factor de Potencia al nivel deseado.

Expresado matemáticamente:

$$Q_{C(3\phi)} = Q_{(F.P.original)} - Q_{(F.P.nuevo)}$$

***V. DISEÑO DE LINEAS
DE TRANSMISION
DE ENERGIA
ELECTRICA***

5.1 DISEÑO DEL PROGRAMA

5.1.1 INTRODUCCION

¿Por qué Diseñar un programa?

El diseño de un programa que calcule y pueda ser utilizado también para diseñar una línea aérea de transmisión de energía eléctrica, tiene la finalidad principal de reducir el tiempo invertido en este proceso así como obtener una mayor precisión en los cálculos ya que el programa maneja internamente ocho cifras decimales que en un cálculo a mano son de difícil manipulación.

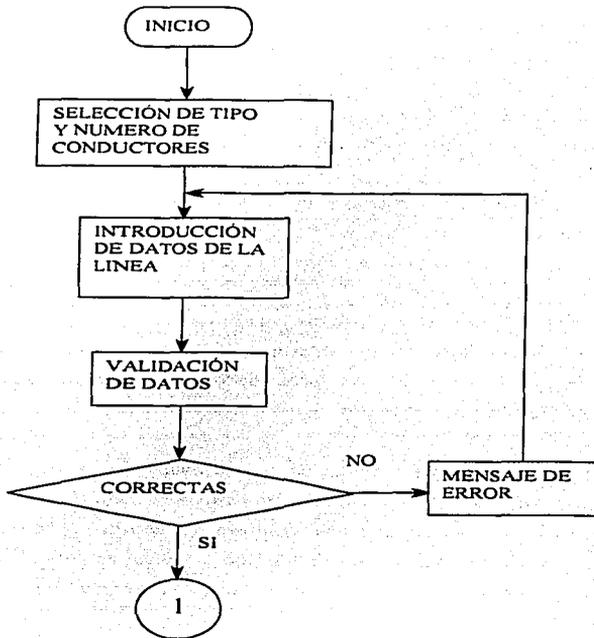
Aún cuando existen métodos para reducirlo, tal es el caso del análisis como una línea corta o una línea media, estos métodos proporcionan parámetros cuya exactitud es menor que si el cálculo se realiza como una línea larga que es el método aplicado al programa.

Como ya se ha explicado anteriormente, los parámetros de la línea larga se encuentran distribuidos a todo lo largo de la línea proporcionando así un cálculo más cercano a la realidad.

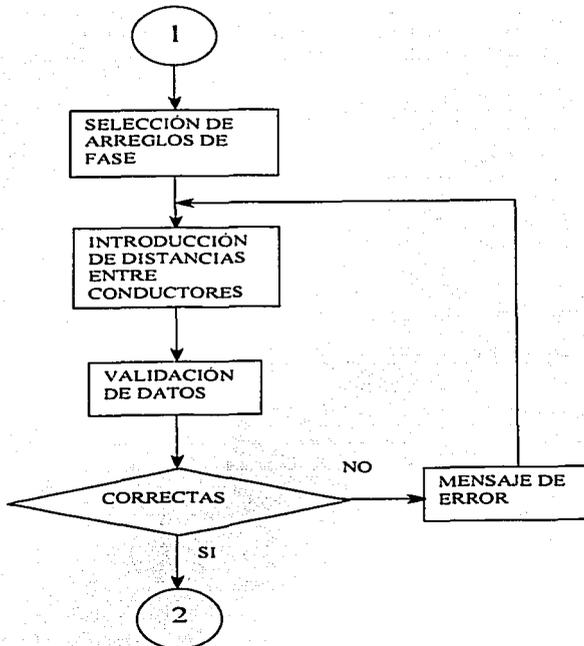
Además, si el primer cálculo no resulta aceptable, se debe recalcular la línea variando sus parámetros lo cual significa hacer todo el proceso de nuevo con la inversión de tiempo que esto conlleva. Al contar con un programa de cálculo, se puede diseñar al mismo tiempo la línea con dos, tres o cuatro conductores diferentes lo que reduce el tiempo necesario para encontrar el conductor idóneo para la línea proyectada.

5.1.2 DISEÑO DEL PROGRAMA DE CÁLCULO

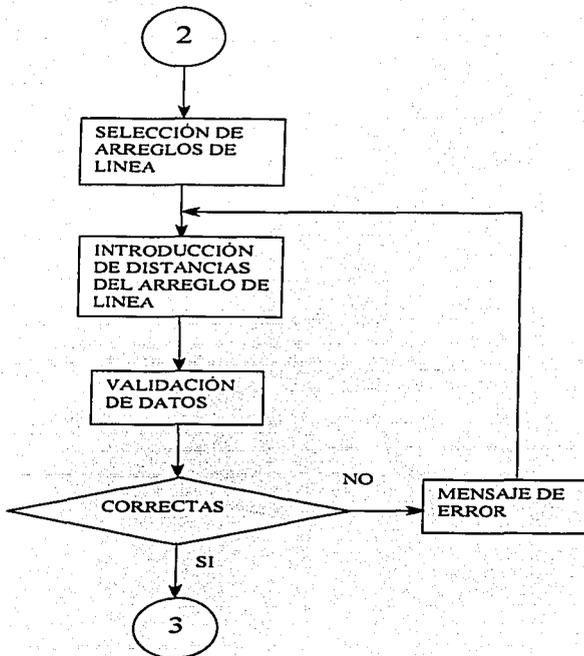
Este programa de cálculo y diseño de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica se basa en el diagrama de flujo siguiente:

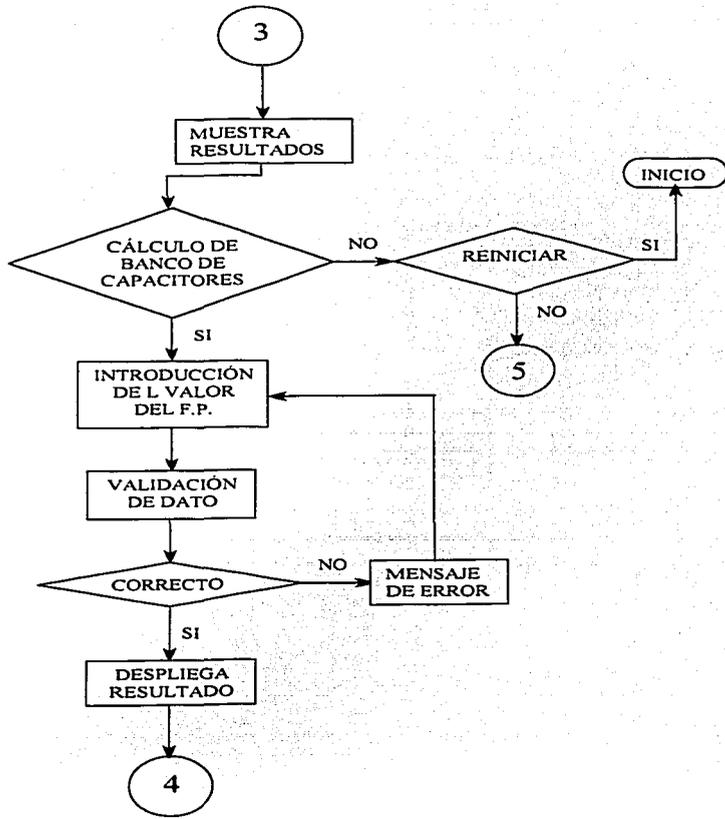


TESIS CON
FALLA EN ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN





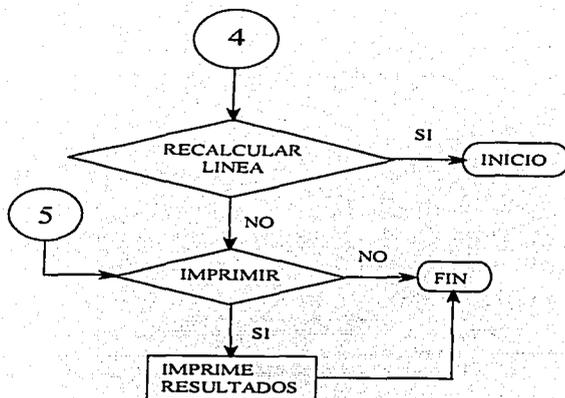


Fig. 24 Diagrama de flujo del programa.

5.2 CÁLCULO DE LA LINEA CON EL METODO TRADICIONAL (LINEA LARGA)

5.2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se llevará a cabo el cálculo completo de la línea de transmisión que fue proyectada por la Subdirección de Construcción de la Comisión Federal de Electricidad en Abril de 1993 con las siguientes características:

Longitud: 200 km.

Temperatura de operación: 50°C.

Potencia: 250 MW

Tensión de transmisión: 400 kV.

Factor de Potencia: 0.8 (-).

Frecuencia: 60 Hz.

Tipo de conductor: Finch (dos conductores por fase).

Datos del conductor:

Radio nominal: 16.421 mm.

RMG: 13.28928 mm.

Resistencia eléctrica: 0.059 Ω / km.

A continuación se muestra el tipo de torre empleado así como el arreglo de fases y conductores:

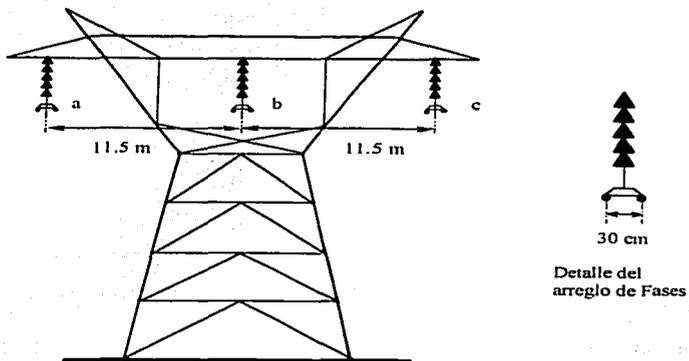


Fig. 25 Torre utilizada para la línea de transmisión I.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2.2 CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA EN SERIE

Primero, se debe calcular el RMG de las fases tanto para la inductancia como para la capacitancia.

$$RMG_l = \sqrt[4]{(0.3)^2(13.28928 \times 10^{-3})^2}$$

$$RMG_l = 0.063141m$$

$$RMG_c = \sqrt[4]{(0.3)^2(16.42 \times 10^{-3})^2}$$

$$RMG_c = 0.070188m$$

Calculando la distancia equivalente de la línea:

$$Deq = \sqrt{(11.5)^2(23)}$$

$$Deq = 14.489m$$

Impedancia en serie formada por la resistencia y la reactancia inductiva:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{Deq}{RMG_l}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{14.489}{0.063141}$$

$$L = 1.0872 \times 10^{-6} \frac{H}{m}$$

$$X_L = 2\pi(f)L$$

$$X_L = 2\pi(60)1.0872 \times 10^{-6}$$

$$X_L = 0.40985 \frac{\Omega}{km}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La resistencia a 50°C es de 0.059 Ω / km, por lo tanto la impedancia Z es:

$$Z = (0.059 + j0.40985) \frac{\Omega}{km}$$

$$Z = 0.414 \angle 81.8^\circ \frac{\Omega}{km}$$

5.2.3 CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA

$$C = \frac{2\pi(\epsilon_0)}{\ln \frac{Deq}{RMCc}}$$

$$C = \frac{2\pi(8.85 \times 10^{-12})}{\ln \frac{14.489}{0.070188}}$$

$$C = 1.0433 \times 10^{-11} \frac{F}{m}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi(f)C}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi(60)1.0433 \times 10^{-11}}$$

$$X_c = 254.45 \times 10^6 \Omega - m$$

Encontrando el valor de la admitancia Y:

$$Y = \frac{1}{X_c}$$

$$Y = \frac{1}{254.45 \times 10^6} \times 1000$$

$$Y = 3.93 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \frac{Mhos}{km}$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Calculando Z_c :

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

$$Z_c = \sqrt{\frac{0.141 \angle 81.8^\circ}{3.93 \times 10^{-6} \angle 90^\circ}}$$

$$Z_c = 324.57 \angle -4.1^\circ$$

Cálculo de γl :

$$\gamma = \sqrt{ZY}$$

$$\gamma = \sqrt{(0.141 \angle 81.8^\circ)(3.93 \times 10^{-6} \angle 90^\circ)}$$

$$\gamma = 1.2755 \times 10^{-3} \angle 85.9^\circ$$

$$\gamma l = 1.2755 \times 10^{-3} \angle 85.9^\circ (200)$$

$$\gamma l = 0.2551 \angle 85.9^\circ$$

$$\gamma l = 18.23 \times 10^{-3} + j0.254$$

La constante de propagación γl , es un número complejo el cual está formado por αl y βl , que son la parte real e imaginaria respectivamente; es necesario descomponer el número complejo en su forma rectangular para así poder calcular el seno hiperbólico y el coseno hiperbólico de la constante de propagación γl con las siguientes expresiones:

$$\cosh \gamma l = [(\cosh \alpha l)(\cos \beta l)] + j[(\operatorname{senh} \alpha l)(\operatorname{sen} \beta l)]$$

$$\operatorname{senh} \gamma l = [(\operatorname{senh} \alpha l)(\cos \beta l)] + j[(\cosh \alpha l)(\operatorname{sen} \beta l)]$$

Sustituyendo los valores de αl y βl y realizando las operaciones necesarias:

$$\begin{aligned} \cosh \gamma l &= [\cosh 18.23 \times 10^{-3} (\cos 0.254)] + j [\sinh 18.23 \times 10^{-3} (\sin 0.254)] \\ \cosh \gamma l &= 0.9681 \angle 0.2711 \\ \sinh \gamma l &= [\sinh 18.23 \times 10^{-3} (\cos 0.254)] + j [\cosh 18.23 \times 10^{-3} (\sin 0.254)] \\ \sinh \gamma l &= 0.2519 \angle 85.98^\circ \end{aligned}$$

A continuación, se calculan las constantes generalizadas A, B, C y D que se utilizarán para el cálculo de voltaje y corriente de generación y se expresan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} A &= \cosh \gamma l \\ B &= Z_C \sinh \gamma l \\ C &= \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} \\ D &= A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= 0.9681 \angle 0.2711^\circ \\ B &= (324.57 \angle -4.1^\circ)(0.2519 \angle 85.98^\circ) \\ B &= 81.759 \angle 81.88^\circ \\ C &= \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} \\ C &= \frac{0.2519 \angle 85.98^\circ}{324.57 \angle -4.1^\circ} \\ C &= 77.61 \times 10^{-3} \angle 90.08^\circ \\ D &= 0.9681 \angle 0.2711^\circ \end{aligned}$$

5.2.4 CÁLCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES

Calculando la corriente de recepción, encontrando el valor del voltaje de fase del lado receptor:

$$V_{\phi} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\phi} = \frac{400kV}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\phi} = 230.94kV$$

Una vez conociendo el valor del voltaje de fase se procede a calcular la corriente de recepción:

$$I_R = \frac{P_{3\phi}}{3V_{\phi}F.P.}$$

$$I_R = \frac{250 \times 10^6 W}{3(230.93kV)(0.8)}$$

$$I_R = 451.06 \angle -36.86^\circ A$$

Calculando el voltaje de generación:

$$V_G = AV_R + BI_R$$

$$V_G = (\cosh \gamma l)V_R + (Z_C \operatorname{senh} \gamma l)I_R$$

$$V_G = [(0.9681 \angle 0.2711^\circ)(230940)] + [(81.759 \angle 81.88^\circ)(451.06 \angle -36.86^\circ)]$$

$$V_G = 251.10894 \angle 6.2^\circ kV$$

Calculando el valor de I_G :

$$I_G = CV_R + DI_R$$

$$I_G = \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} V_R + \cosh \gamma l I_R$$

$$I_G = \left[\left(= \frac{0.2519 \angle 85.98^\circ}{324.57 \angle -4.1^\circ} \right) (230940) \right] + [(0.9681 \angle 0.2711^\circ) (451.06 \angle -36.86^\circ)]$$

$$I_G = 359.65 \angle -13.02^\circ \text{ A}$$

5.2.5 CACULO DE POTENCIAS

Una vez teniendo los valores de voltajes y corrientes en ambos extremos de la línea, se realiza el cálculo de las potencias:

Lado de generación:

$$S_G = V_{G\phi} I_{G\phi}$$

$$S_G = (251.10894 \text{ kV}) (359.65 \text{ A})$$

$$S_G = 90.311 \text{ MVA}$$

$$P_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \cos \theta$$

$$P_G = (251.10894 \text{ kV}) (359.65) \cos (6.2^\circ + 13.02^\circ)$$

$$P_G = 85.278 \text{ MW}$$

$$Q_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \sin \theta$$

$$Q_G = (251.10894 \text{ kV}) (359.65) \sin (6.2^\circ + 13.02^\circ)$$

$$Q_G = 29.73 \text{ MVAR}$$

Lado de recepción:

$$S_R = V_{R\phi} I_{R\phi}$$

$$S_R = (230.94 \text{ kV}) (451.06 \text{ A})$$

$$S_R = 104.17 \text{ MVA}$$

$$P_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \cos \theta$$

$$P_R = (230.94 \text{ kV}) (451.06) \cos (36.86^\circ)$$

$$P_R = 83.345 \text{ MW}$$

$$Q_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \sin \theta$$

$$Q_R = (230.94 \text{ kV}) (451.06) \sin (36.86^\circ)$$

$$Q_R = 62.486 \text{ MVAR}$$

Las pérdidas se calculan de la siguiente manera:

$$S_{PER} = S_G - S_R$$

$$S_{PER} = (90.311 - 104.17) \text{ MVA}$$

$$S_{PER} = - 13.859 \text{ MVA}$$

$$P_{PER} = P_G - P_R$$

$$P_{PER} = (85.278 - 83.345) \text{ MW}$$

$$P_{PER} = 1.933 \text{ MW}$$

$$Q_{PER} = Q_G - Q_R$$

$$Q_{PER} = (29.73 - 62.486) \text{ MVAR}$$

$$Q_{PER} = - 32.756 \text{ MVAR}$$

5.2.6 REGULACIÓN DE TENSIÓN

Cálculo del porcentaje de regulación de voltaje:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_G - V_R}{V_R} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{251.10894 - 230.94}{230.94} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 12.316\%$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_R}{P_G} \times 100$$

$$\eta = \frac{83.345}{85.278} \times 100$$

$$\eta = 97.733\%$$

Observe que la regulación de tensión excede el 10%, por lo tanto, la línea no tendrá un buen desempeño aunque la eficiencia sea cercana al 100%.

5.2.7 CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Cálculo del banco de capacitores para elevar el F.P. a 0.95:

Primero se debe calcular la potencia reactiva que va a tener la carga con el nuevo Factor de Potencia:

$$Q_{(0.95)} = P(\tan\theta)$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.95)$$

$$\theta = 18.195^\circ$$

$$Q_{(0.95)} = (250 \times 10^6) \tan(18.195^\circ)$$

$$Q_{(0.95)} = 82.172 \text{ MVAR}$$

El valor del Banco de Capacitores trifásico es:

$$Q_C = Q_{(0.8)} - Q_{(0.95)}$$

$$Q_C = [(62.486)(3)] - 82.172$$

$$Q_{C(3\phi)} = 105.29 \text{ MVAR}$$

El banco de capacitores calculado es el mismo para todos los tipos de conductores que se utilicen para el diseño de la línea puesto que la corrección del Factor de Potencia se lleva a cabo en el lado de recepción y la potencia real no está siendo modificada.

5.2.8 CONTROL DE POTENCIA REACTIVA.

Conociendo el valor del Banco de Capacitores, se recalcula la línea para analizar como funcionará con el Banco conectado.

Los datos para este nuevo cálculo son:

Potencia: 250 MW

Tensión de transmisión: 400 kV.

Factor de Potencia: 0.95 (-).

Los valores de resistencia, reactancia inductiva y capacitiva del conductor son los mismos que para el ejemplo anterior, por lo tanto, Z_C y γ conservan sus magnitudes, lo mismo sucede con las constantes generalizadas por lo que estos parámetros no tendrán que ser recalculados.

Los cálculos que se deben hacer son para la corriente de recepción, el voltaje de generación y la corriente de generación.

Cálculo de I_R :

$$I_R = \frac{P_R}{3(V_R)FP}$$

$$I_R = \frac{250 \times 10^6}{3(230940)0.95}$$

$$I_R = 379.84 \angle -18.195^\circ A$$

Cálculo de V_G :

$$V_G = AV_R + BI_R$$

$$V_G = (0.9681 \angle 0.2711^\circ)(230940) + (81.759 \angle 81.88^\circ)(379.84 \angle -18.195^\circ)$$

$$V_G = 239090 \angle 6.9413^\circ V$$

Cálculo de I_G :

$$I_G = CV_R + DI_R$$

$$I_G = (0.7761 \times 10^{-3} \angle 90.08^\circ)(230940) + (0.9681 \angle 0.2711^\circ)(379.84 \angle -18.195^\circ)$$

$$I_G = 355.81 \angle 10.7^\circ A$$

Calculando Las potencias y las pérdidas:

Lado de generación:

$$S_G = V_{G\phi} I_{G\phi}$$

$$S_G = (239.09 \text{ kV})(355.81 \text{ A})$$

$$S_G = 85.071 \text{ MVA}$$

$$P_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \cos \theta$$

$$P_G = (239.09 \text{ kV})(355.81) \cos (6.9413^\circ - 10.7^\circ)$$

$$P_G = 84.888 \text{ MW}$$

$$Q_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \sin \theta$$

$$Q_G = (239.09 \text{ kV}) (355.81) \text{ sen } (6.9413^\circ - 10.7^\circ)$$

$$Q_G = - 5.5768 \text{ MVAR}$$

Lado de recepción:

$$S_R = V_{R\phi} I_{R\phi}$$

$$S_R = (230.94 \text{ kV}) (379.84 \text{ A})$$

$$S_R = 87.72 \text{ MVA}$$

$$P_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \cos \theta$$

$$P_R = (230.94 \text{ kV}) (379.84) \cos (18.195^\circ)$$

$$P_R = 83.334 \text{ MW}$$

$$Q_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \text{ sen} \theta$$

$$Q_R = (230.94 \text{ kV}) (379.84) \text{ sen } (18.195^\circ)$$

$$Q_R = 27.391 \text{ MVAR}$$

Las pérdidas se calculan de la siguiente manera:

$$S_{PER} = S_G - S_R$$

$$S_{PER} = (85.071 - 87.72) \text{ MVA}$$

$$S_{PER} = -2.649 \text{ MVA}$$

$$P_{PER} = P_G - P_R$$

$$P_{PER} = (84.888 - 83.334) \text{ MW}$$

$$P_{PER} = 1.554 \text{ MW}$$

$$Q_{PER} = Q_G - Q_R$$

$$Q_{PER} = (-5.5768 - 27.391) \text{ MVAR}$$

$$Q_{PER} = -32.968 \text{ MVAR}$$

Cálculo del porcentaje de regulación de voltaje:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_G - V_R}{V_R} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{239.09 - 230.94}{230.94} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 6.9405\%$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_R}{P_G} \times 100$$

$$\eta = \frac{83.334}{84.888} \times 100$$

$$\eta = 98.169\%$$

Observe que la regulación de tensión ahora es menor al 10%, por lo que la línea funcionará en forma óptima y la eficiencia mejoró.

5.2.9 NUEVO CÁLCULO CON OTRO CONDUCTOR

Ahora se procederá a realizar el cálculo de la misma línea, con el mismo arreglo de línea y fases, con el mismo número de conductores por fase pero cambiando el tipo de conductor.

Longitud: 200 km.

Temperatura de operación: 50°C.

Potencia: 250 MW

Tensión de transmisión: 400 kV.

Factor de Potencia: 0.8 (-).

Frecuencia: 60 Hz.

Tipo de conductor: Falcon.

Datos del conductor:

Radio nominal: 19.622 mm.

RMG: 15.94104 mm.

Resistencia eléctrica: 0.042 Ω / km.

La siguiente figura muestra el tipo de torre empleado así como el arreglo de conductores:

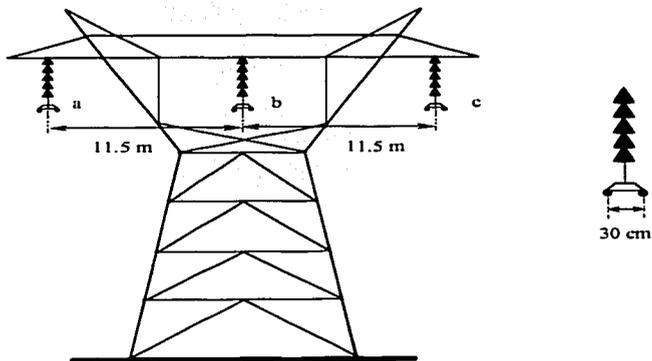


Fig.26 Torre utilizada para la línea de transmisión 2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA EN SERIE

Calculando los RMG:

$$RMG_r = \sqrt[4]{(0.3)^2 (15.94104 \times 10^{-3})^2}$$

$$RMG_r = 0.069154m$$

$$RMG_c = \sqrt[4]{(0.3)^2 (19.622 \times 10^{-3})^2}$$

$$RMG_c = 0.076724m$$

Calculando la distancia equivalente de la línea:

$$Deq = \sqrt{(11.5)^2 (23)}$$

$$Deq = 14.489m$$

Impedancia en serie formada por la resistencia y la reactancia inductiva:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{Deq}{RMG_r}$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{14.489}{0.069154}$$

$$L = 1.069 \times 10^{-6} \frac{H}{m}$$

$$X_L = 2\pi(f)L$$

$$X_L = 2\pi(60)1.069 \times 10^{-6}$$

$$X_L = 0.40299 \frac{\Omega}{km}$$

La resistencia a 50°C es de 0.042 Ω / km, por lo tanto la impedancia Z es:

$$Z = (0.042 + j0.40299) \frac{\Omega}{km}$$

$$Z = 0.40517 \angle 84.05^\circ \frac{\Omega}{km}$$

CÁLCULO DE LA CAPACITANCIA

$$C = \frac{2\pi(\epsilon_0)}{\ln \frac{Deq}{RMG_c}}$$

$$C = \frac{2\pi(8.85 \times 10^{-12})}{\ln \frac{14.489}{0.076724}}$$

$$C = 1.061 \times 10^{-11} \frac{F}{m}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi(f)C}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi(60)1.061 \times 10^{-11}}$$

$$X_c = 250.63 \times 10^6 \Omega - m$$

Encontrando el valor de la admitancia Y:

$$Y = \frac{1}{X_c}$$

$$Y = \frac{1}{250.63 \times 10^6} \times 1000$$

$$Y = 3.99 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \frac{\text{Mhos}}{\text{km}}$$

Calculando Z_c :

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

$$Z_c = \sqrt{\frac{0.40517 \angle 84.05^\circ}{3.99 \times 10^{-6} \angle 90^\circ}}$$

$$Z_c = 318.66 \angle -2.975^\circ$$

Cálculo de γl :

$$\gamma = \sqrt{ZY}$$

$$\gamma = \sqrt{(0.40517 \angle 84.05^\circ)(3.99 \times 10^{-6} \angle 90^\circ)}$$

$$\gamma = 1.2715 \times 10^{-3} \angle 87.025^\circ$$

$$\gamma l = 1.2715 \times 10^{-3} \angle 87.025^\circ (200)$$

$$\gamma l = 0.2543 \angle 87.025^\circ$$

$$\gamma l = 13.198 \times 10^{-3} + j0.25396$$

$$\cosh \gamma.l = [(\cosh \alpha.l)(\cos \beta.l)] + j[(\operatorname{senh} \alpha.l)(\operatorname{sen} \beta.l)]$$

$$\operatorname{senh} \gamma.l = [(\operatorname{senh} \alpha.l)(\cos \beta.l)] + j[(\cosh \alpha.l)(\operatorname{sen} \beta.l)]$$

$$\cosh \gamma.l = [(\cosh 13.198 \times 10^{-3})(\cos 0.25396)] + j[(\operatorname{senh} 13.198 \times 10^{-3})(\operatorname{sen} 0.25396)]$$

$$\cosh \gamma.l = 0.96804 \angle 0.19626^\circ$$

$$\operatorname{senh} \gamma.l = [(\operatorname{senh} 13.198 \times 10^{-3})(\cos 0.25396)] + j[(\cosh 13.198 \times 10^{-3})(\operatorname{sen} 0.25396)]$$

$$\operatorname{senh} \gamma.l = 0.25159 \angle 87.089^\circ$$

$$A = \cosh \gamma.l$$

$$B = Z_c \operatorname{senh} \gamma.l$$

$$C = \frac{\operatorname{senh} \gamma.l}{Z_c}$$

$$D = A$$

$$A = 0.96804 \angle 0.19626^\circ$$

$$B = (318.66 \angle -2.975^\circ)(0.25159 \angle 87.089^\circ)$$

$$B = 80.172 \angle 84.114^\circ$$

$$C = \frac{\operatorname{senh} \gamma.l}{Z_c}$$

$$C = \frac{0.25159 \angle 87.089^\circ}{318.66 \angle -2.975^\circ}$$

$$C = 0.78952 \times 10^{-3} \angle 90.064^\circ$$

$$D = 0.96804 \angle 0.19626^\circ$$

CÁLCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES

Calculando la corriente de recepción, encontrando el valor del voltaje de fase del lado receptor:

$$V_{\phi} = \frac{V_{\phi}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\phi} = \frac{400kV}{\sqrt{3}}$$

$$V_{\phi} = 230.94kV$$

Una vez conociendo el valor del voltaje de fase se hace el cálculo de la corriente de recepción:

$$I_R = \frac{P_{3\phi}}{3V_{\phi}F.P.}$$

$$I_R = \frac{250 \times 10^6 W}{3(230.93kV)(0.8)}$$

$$I_R = 451.06 \angle -36.86^\circ A$$

Calculando el voltaje de generación:

$$V_G = AV_R + BI_R$$

$$V_G = (\cosh \gamma l)V_R + (Z_C \sinh \gamma l)I_R$$

$$V_G = [(0.96804 \angle 0.19626^\circ)(230940)] + [(80.172 \angle 84.114^\circ)(451.06 \angle -36.86^\circ)]$$

$$V_G = 249.61 \angle 6.2841^\circ kV$$

Calculando el valor de I_G :

$$I_G = CV_R + DI_R$$

$$I_G = \frac{\text{senhy} \cdot l}{Z_c} V_R + \cosh \gamma \cdot l I_R$$

$$I_G = \left[\left(\begin{matrix} 0.25159 \angle 87.089^\circ \\ 318.66 \angle -2.975^\circ \end{matrix} \right) (230940) \right] + [(0.96804 \angle 0.19626^\circ) (451.06 \angle -36.86^\circ)]$$

$$I_G = 358.72 \angle -12.624^\circ \text{ A}$$

CACULO DE POTENCIAS

Una vez teniendo los valores de voltajes y corrientes en ambos extremos de la línea, se calculan las potencias:

Lado de generación:

$$S_G = V_{G\phi} I_{G\phi}$$

$$S_G = (249.61 \text{ kV}) (358.72 \text{ A})$$

$$S_G = 89.54 \text{ MVA}$$

$$P_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \cos \theta$$

$$P_G = (249.61 \text{ kV}) (358.72) \cos (6.2841^\circ + 12.624^\circ)$$

$$P_G = 84.708 \text{ MW}$$

$$Q_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \text{sen} \theta$$

$$Q_G = (249.61 \text{ kV}) (358.72) \text{ sen } (6.2841^\circ + 12.624^\circ)$$

$$Q_G = 29.016 \text{ MVAR}$$

Lado de recepción:

$$S_R = V_{R\phi} I_{R\phi}$$

$$S_R = (230.94 \text{ kV}) (451.06 \text{ A})$$

$$S_R = 104.17 \text{ MVA}$$

$$P_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \cos \theta$$

$$P_R = (230.94 \text{ kV}) (451.06) \cos (36.86^\circ)$$

$$P_R = 83.345 \text{ MW}$$

$$Q_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \text{ sen} \theta$$

$$Q_R = (230.94 \text{ kV}) (451.06) \text{ sen } (36.86^\circ)$$

$$Q_R = 62.486 \text{ MVAR}$$

Las pérdidas se calculan de la siguiente manera:

$$S_{PER} = S_G - S_R$$

$$S_{PER} = (89.54 - 104.17) \text{ MVA}$$

$$S_{PER} = - 14.63 \text{ MVA}$$

$$P_{PER} = P_G - P_R$$

$$P_{PER} = (84.708 - 83.345) \text{ MW}$$

$$P_{PER} = 1.363 \text{ MW}$$

$$Q_{PER} = Q_G - Q_R$$

$$Q_{PER} = (29.016 - 62.486) \text{ MVAR}$$

$$Q_{PER} = - 33.47 \text{ MVAR}$$

REGULACIÓN DE TENSIÓN

Cálculo del porcentaje de regulación de voltaje:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_G - V_R}{V_R} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{249.61}{230.94} - 230.94 \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 11.653\%$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_R}{P_G} \times 100$$

$$\eta = \frac{83.345}{84.708} \times 100$$

$$\eta = 98.391\%$$

Se aprecia que la regulación de voltaje rebasa el 10%, por lo que la línea se debe recalcular con un Factor de Potencia mas elevado que será proporcionado por el Banco de Capacitores calculado.

CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

Como se mencionó en el ejercicio anterior, el banco de capacitores es el mismo para cualquier tipo de conductor que se utilice en el diseño de la línea de transmisión.

El valor del Banco de Capacitores para la corrección del Factor de Potencia a 0.95 es de 105.29 MVAR.

Conociendo el valor del Banco de Capacitores, se recalcula la línea para analizar como funcionará con el Banco conectado.

CONTROL DE POTENCIA REACTIVA

Los datos para este nuevo cálculo son:

Potencia: 250 MW

Tensión de transmisión: 400 kV.

Factor de Potencia: 0.95 (-).

Los valores de resistencia, reactancia inductiva y capacitiva del conductor son los mismos que para el ejemplo anterior, por lo tanto, Z_C y γ conservan sus magnitudes, lo mismo sucede con las constantes generalizadas por lo que estos parámetros no tendrán que ser recalculados.

Los cálculos que se deben hacer son para la corriente de recepción, el voltaje de generación y la corriente de generación.

Cálculo de I_R :

$$I_R = \frac{P_R}{3(V_R)FP}$$

$$I_R = \frac{250 \times 10^6}{3(230940)0.95}$$

$$I_R = 379.84 \angle -18.195^\circ A$$

Cálculo de V_G :

$$V_G = AV_R + BI_R$$

$$V_G = (0.96804 \angle 0.19626^\circ)(230940) + (80.172 \angle 84.114^\circ)(379.84 \angle -18.195^\circ)$$

$$V_G = 237710 \angle 6.9024^\circ V$$

Cálculo de I_G :

$$I_G = CV_R + DI_R$$

$$I_G = (0.78952 \times 10^{-3} \angle 90.064^\circ)(230940) + (0.96804 \angle 0.19626^\circ)(379.84 \angle -18.195^\circ)$$

$$I_G = 356.2 \angle 11.122^\circ \text{ A}$$

Calculando Las potencias y las pérdidas:

Lado de generación:

$$S_G = V_{G\phi} I_{G\phi}$$

$$S_G = (237.71 \text{ kV})(356.2 \text{ A})$$

$$S_G = 84.672 \text{ MVA}$$

$$P_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \cos \theta$$

$$P_G = (237.71 \text{ kV})(356.2) \cos (6.9024^\circ - 11.122^\circ)$$

$$P_G = 84.443 \text{ MW}$$

$$Q_G = V_{G\phi} I_{G\phi} \sin \theta$$

$$Q_G = (237.71 \text{ kV})(356.2) \sin (6.9024^\circ - 11.122^\circ)$$

$$Q_G = -6.2301 \text{ MVAR}$$

Lado de recepción:

$$S_R = V_{R\phi} I_{R\phi}$$

$$S_R = (230.94 \text{ kV}) (379.84 \text{ A})$$

$$S_R = 87.72 \text{ MVA}$$

$$P_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \cos \theta$$

$$P_R = (230.94 \text{ kV}) (379.84) \cos (18.195^\circ)$$

$$P_R = 83.334 \text{ MW}$$

$$Q_R = V_{R\phi} I_{R\phi} \sin \theta$$

$$Q_R = (230.94 \text{ kV}) (379.84) \sin (18.195^\circ)$$

$$Q_R = 27.391 \text{ MVAR}$$

Las pérdidas se calculan de la siguiente manera:

$$S_{PER} = S_G - S_R$$

$$S_{PER} = (84.672 - 87.72) \text{ MVA}$$

$$S_{PER} = -3.048 \text{ MVA}$$

$$P_{PER} = P_G - P_R$$

$$P_{PER} = (84.672 - 83.334) \text{ MW}$$

$$P_{PER} = 1.109 \text{ MW}$$

$$Q_{PER} = Q_G - Q_R$$

$$Q_{PER} = (-6.2301 - 27.391) \text{ MVAR}$$

$$Q_{PER} = -33.621 \text{ MVAR}$$

Cálculo del porcentaje de regulación de voltaje:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_G - V_R}{V_R} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{237.71 - 230.94}{230.94} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 6.3298\%$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{P_R}{P_G} \times 100$$

$$\eta = \frac{83.334}{84.443} \times 100$$

$$\eta = 98.687\%$$

5.3 CÁLCULO DE LA LINEA CON EL PROGRAMA

El programa comienza mostrando una pantalla inicio (Fig. 27) la cual contiene el nombre del programa, versión, la plataforma en la cual funciona y derechos de autor (para evitar la piratería). Esta pantalla es mostrada por un tiempo de 10 segundos y concluido este lapso desaparece dando paso a la pantalla de Datos. La pantalla de inicio solo aparece cuando se arranca el programa.

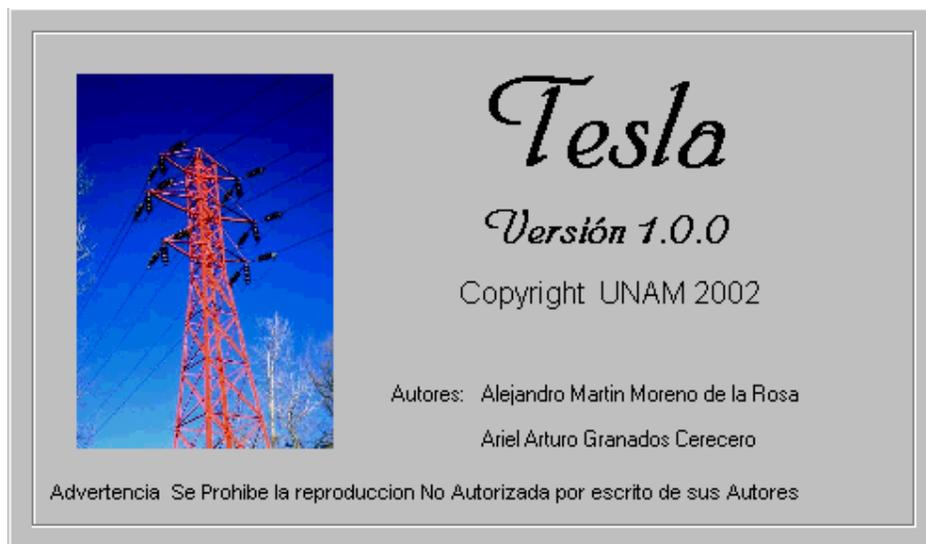


Fig. 27 Pantalla de inicio del programa.

5.3.1 INTRODUCCION DE DATOS

La pantalla de Datos es en la cual se comienza a trabajar con el programa, ya sea calculando una línea o diseñándola para lo cual se requiere que sean proporcionados los datos. En esta pantalla se pueden seleccionar de uno a cuatro tipos de conductores, además se introducen los datos propios de la línea como son:

Voltaje de recepción, potencia de recepción, temperatura de operación, longitud de la línea y el Factor de Potencia; para todos los datos vienen indicadas las unidades en las cuales deben de ser proporcionados.

The screenshot shows a software window titled "Tesla" with a menu bar containing "Lista de Conductores" and "Ayuda". The main interface is a data entry form with the following fields:

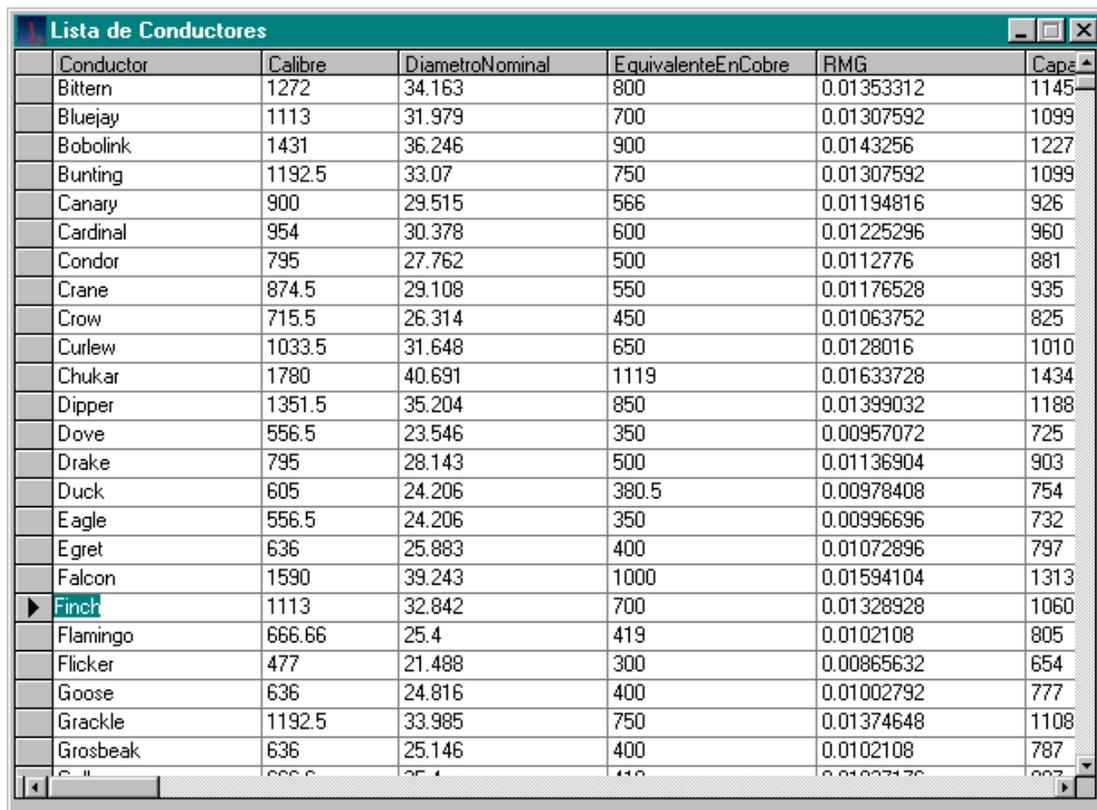
Field Name	Unit
VOLTAJE DE RECEPCION	kV
POTENCIA DE RECEPCION	MW
TEMPERATURA	°C
LONGITUD DE LINEA	km
FACTOR DE POTENCIA	(-)

A "Siguiete" button is located at the bottom right of the form.

Fig. 28 Pantalla de datos.

Cuando se diseña una línea con el método tradicional habría que hacer los cálculos para cada tipo de conductor que se desea utilizar, con el programa se realizan los cálculos para hasta cuatro conductores con diferentes características al mismo tiempo.

En caso de no contar con las características de otros conductores o si solo se desea consultar las de algún otro se puede consultar una tabla en la que se encuentran todos los conductores que maneja el programa con sus respectivas características. Para visualizar esta tabla hay que entrar en el menú que se encuentra en la parte superior izquierda de la pantalla de datos y hacer clic en “Ver...”. Esta pantalla puede permanecer durante todo el uso del programa o desaparecerla dando clic en la esquina superior derecha de dicha pantalla.



Conductor	Calibre	DiametroNominal	EquivalenteEnCobre	RMG	Capa
Bittern	1272	34.163	800	0.01353312	1145
Bluejay	1113	31.979	700	0.01307592	1099
Bobolink	1431	36.246	900	0.0143256	1227
Bunting	1192.5	33.07	750	0.01307592	1099
Canary	900	29.515	566	0.01194816	926
Cardinal	954	30.378	600	0.01225296	960
Condor	795	27.762	500	0.0112776	881
Crane	874.5	29.108	550	0.01176528	935
Crow	715.5	26.314	450	0.01063752	825
Curlew	1033.5	31.648	650	0.0128016	1010
Chukar	1780	40.691	1119	0.01633728	1434
Dipper	1351.5	35.204	850	0.01399032	1188
Dove	556.5	23.546	350	0.00957072	725
Drake	795	28.143	500	0.01136904	903
Duck	605	24.206	380.5	0.00978408	754
Eagle	556.5	24.206	350	0.00996696	732
Egret	636	25.883	400	0.01072896	797
Falcon	1590	39.243	1000	0.01594104	1313
Finch	1113	32.842	700	0.01328928	1060
Flamingo	666.66	25.4	419	0.0102108	805
Flicker	477	21.488	300	0.00865632	654
Goose	636	24.816	400	0.01002792	777
Grackle	1192.5	33.985	750	0.01374648	1108
Grosbeak	636	25.146	400	0.0102108	787

Fig. 29 Pantalla de tabla de características de Conductores.

Es necesario tener cuidado cuando se introducen los datos, ya que no están limitados a un rango de valores (a excepción del factor de potencia y la temperatura), el valor proporcionado será considerado como válido y obtener un resultado incorrecto.

Es por ello, que se indican las unidades de cada uno de los datos, el usuario solamente debe poner atención a ellas y así evitar que tenga que repetir el cálculo.

5.3.2 SELECCION DE ARREGLO DE FASE

Una vez proporcionados todos los datos correctamente y haciendo clic en el botón “siguiente” de la pantalla de datos, aparece la Pantalla de Arreglos de Fase, la cual contiene cuatro diferentes tipos de arreglos, los cuales son los mas usados en las líneas de transmisión, para seleccionar alguno se debe hacer clic en el botón de opción que se encuentra cercano al arreglo elegido y escribir la distancia que existe entre un hilo y otro (a excepción del primer arreglo). Esta distancia debe ser proporcionada en metros.

Si por alguna razón se introdujo un dato mal en la pantalla de datos, se desea modificar o verificar que se haya escrito el correcto, se puede regresar a ella haciendo un clic en el botón “Atrás”.

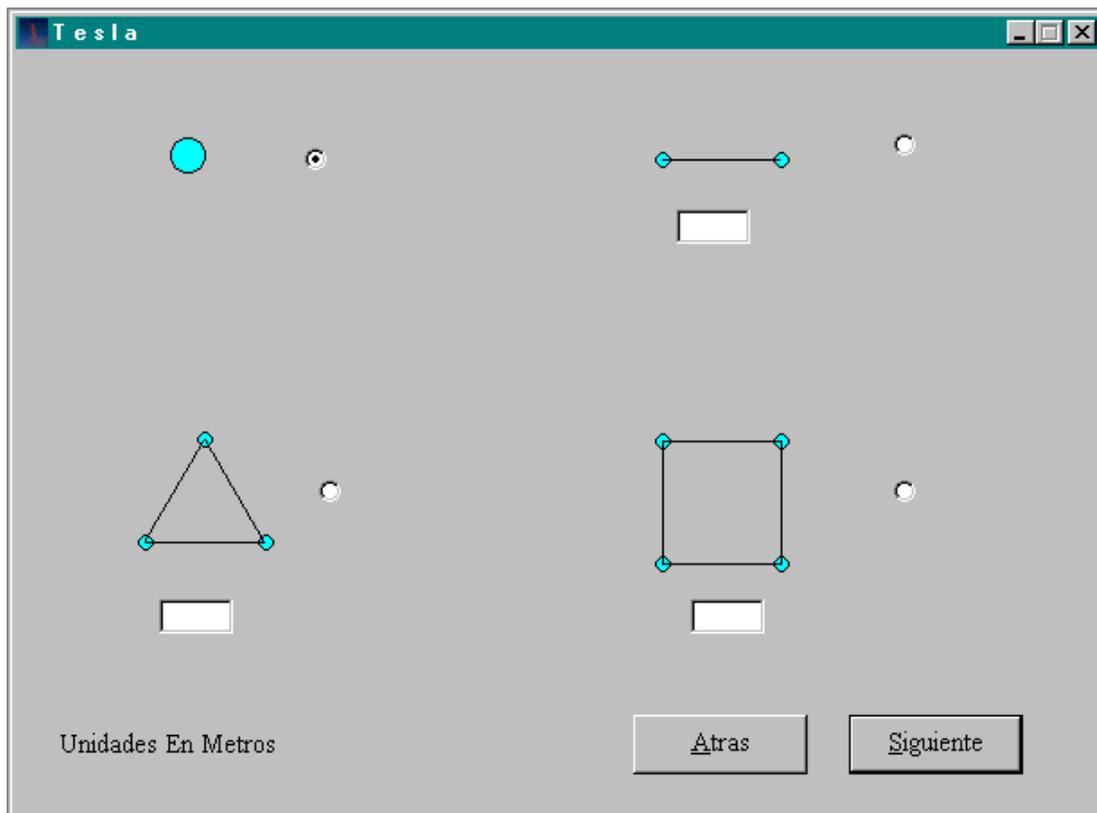


Fig. 30. Pantalla de arreglos de Fase.

5.3.3 SELECCION DE ARREGLO DE LINEA

La pantalla siguiente es la de Arreglos de Línea y el funcionamiento es idéntico al de la pantalla de arreglos de fase, solo que esta pantalla contiene seis opciones, por lo demás, el resto del procedimiento es el mismo.

En esta pantalla se encuentra un botón nombrado “Atrás”, al hacer clic en éste se regresa a la pantalla anterior.

Esta pantalla tiene el botón “Calcular”; si se hace clic en este botón ya no se podrá regresar a la pantalla anterior ya que se realizarán todos los cálculos de la línea apareciendo inmediatamente la pantalla de resultados.

Si se desea corregir o cambiar un dato habrá que reiniciar todo el proceso.

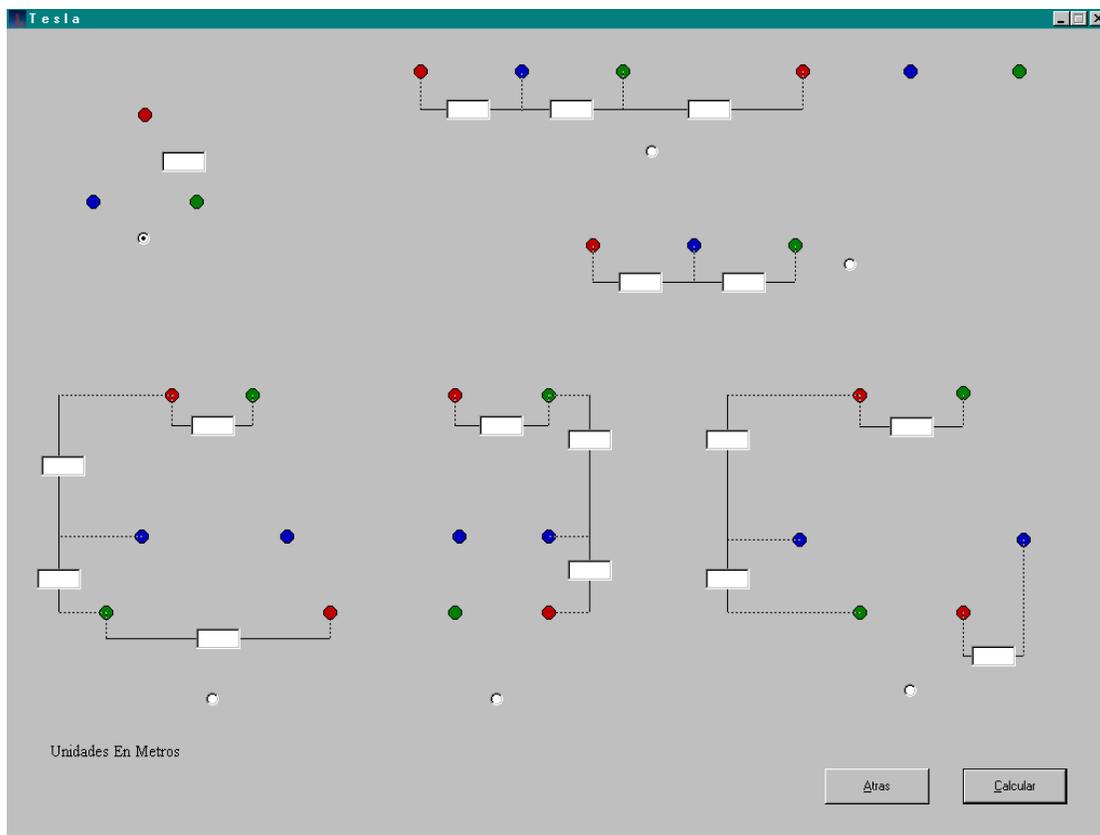


Fig. 31 Pantalla de arreglos de Línea.

5.3.4 RESULTADOS

Una vez que se tienen todos los datos necesarios y haciendo clic en el botón calcular, aparecerá la pantalla con los resultados.

En esta pantalla se despliega el nombre del conductor seleccionado, las pérdidas de potencia aparente, real y reactiva, la regulación de voltaje y la eficiencia de la línea. En cada apartado se indican las unidades de los resultados mostrados.

Label	Field 1	Field 2	Field 3	Field 4
CONDUCTOR				
APARENTE (kVA)				
ACTIVA (kW)				
REACTIVA (kVAR)				
% REGULACION				
EFICIENCIA (%)				

Buttons:

Fig. 32 Pantalla de Resultados.

Esta pantalla contiene cuatro botones:

1. "Terminar". Finaliza el programa cerrándolo definitivamente.
2. "Reiniciar". Regresa a la pantalla de Datos, ya sea para modificar algún dato o para cambiar o agregar otro conductor.
3. "Imprimir". Muestra una pantalla en la que se muestran los resultados, los cuales van a ser impresos, estos no pueden ser modificados.
4. "Cálculo de Banco de Capacitores". Abre el cuadro de diálogo para calcular el banco de capacitores requerido para la corrección del factor de potencia en la carga.

5.3.5 CÁLCULO DE BANCO DE CAPACITORES

El botón “Cálculo de Banco de Capacitores” se usa para la corrección del factor de Potencia.

Primero se despliega una pantalla en la cual se pide el valor del factor de potencia deseado al conectar un banco de capacitores.

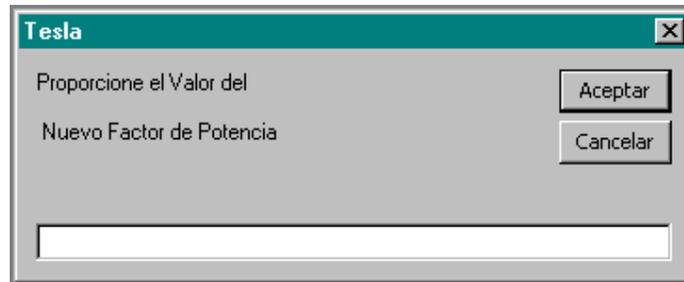


Fig. 33. Pantalla de ingreso de nuevo F.P.

Al dar clic en “Aceptar”, inmediatamente aparece la pantalla con el resultado del banco calculado.

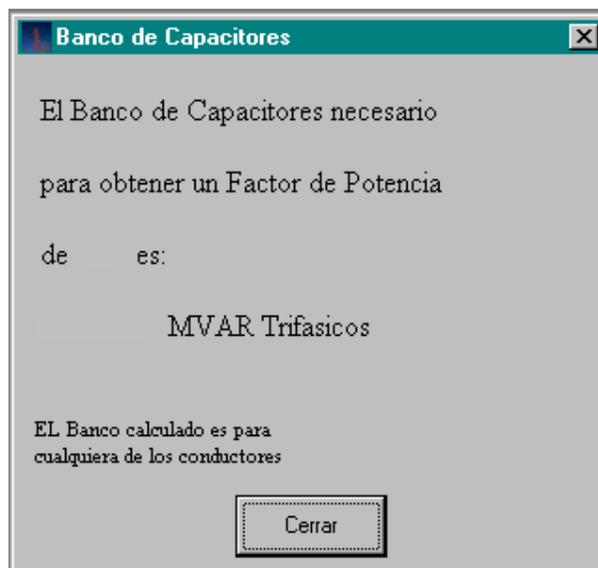


Fig. 34. Pantalla de cálculo de banco de capacitores.

5.3.6 CÁLCULO CON EL NUEVO FACTOR DE POTENCIA

Al dar clic en “Cerrar” en la pantalla que despliega el resultado del banco de capacitores se da paso al cuadro que pregunta si se desea calcular la línea con el banco conectado.

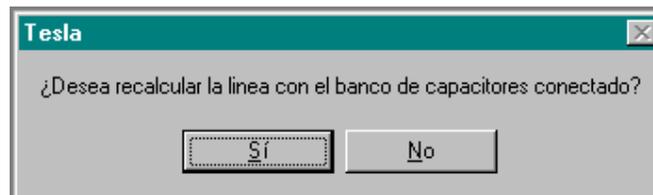


Fig. 35. Cuadro de diálogo para calcular con banco conectado.

Al hacer clic en “Aceptar, automáticamente se calcula la línea nuevamente con el banco de capacitores conectado.

5.3.7 IMPRESIÓN DE RESULTADOS

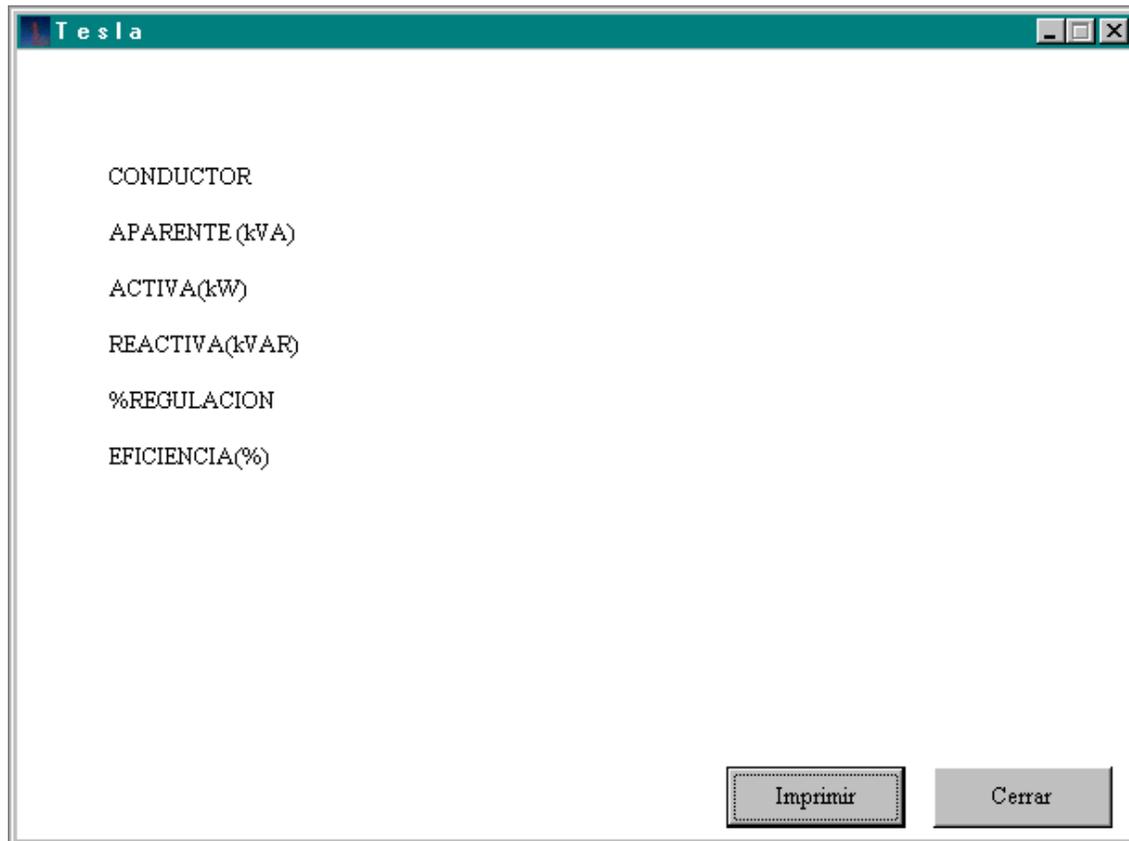


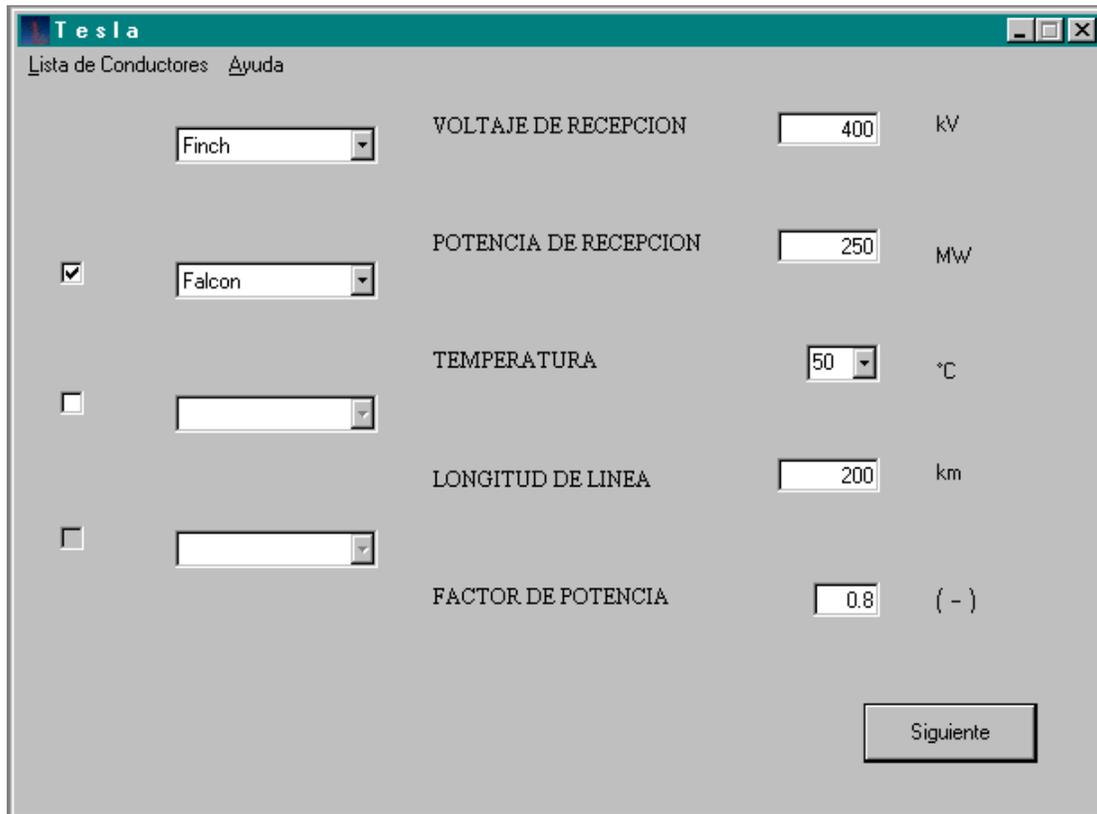
Fig.36. Pantalla preliminar de impresión.

Esta pantalla muestra los resultados del último cálculo realizado, esto es, si la línea no se ha recalculado, muestra los resultados de la línea con el factor de potencia original; si la línea ha sido recalculada, muestra los resultados de la línea con banco de capacitores conectado.

A fin de imprimir los resultados, se debe dar doble clic en el botón para enviar la pantalla a la impresora, la cual debe ser la predeterminada por el equipo en el que se está trabajando.

5.4 CÁLCULO DE LA LÍNEA CON EL PROGRAMA

Ahora serán calculados los dos ejemplos del trabajo de tesis con el programa.



The screenshot shows a software window titled "Tesla" with a menu bar containing "Lista de Conductores" and "Ayuda". The main area contains several input fields and checkboxes for configuring line parameters:

- A dropdown menu with "Finch" selected.
- A checkbox that is checked, followed by a dropdown menu with "Falcon" selected.
- A checkbox that is unchecked, followed by an empty dropdown menu.
- A checkbox that is unchecked, followed by another empty dropdown menu.

On the right side, the following parameters are entered:

- VOLTAJE DE RECEPCION: 400 kV
- POTENCIA DE RECEPCION: 250 MW
- TEMPERATURA: 50 °C
- LONGITUD DE LINEA: 200 km
- FACTOR DE POTENCIA: 0.8 (-)

A "Siguiete" button is located at the bottom right of the window.

Fig. 37. Introducción de datos de Línea.

Observe que los datos son los mismos para ambos conductores seleccionados.

Se deben introducir todos los datos requeridos porque si falta alguno aparecerá un mensaje de error.

Los mensajes de error serán detallados en un apartado especial mas adelante.

En la pantalla de Arreglos de Fase solo es necesario escribir la distancia entre conductores que se encuentra en el diagrama del ejemplo.

Verifique que el dato esté en metros.

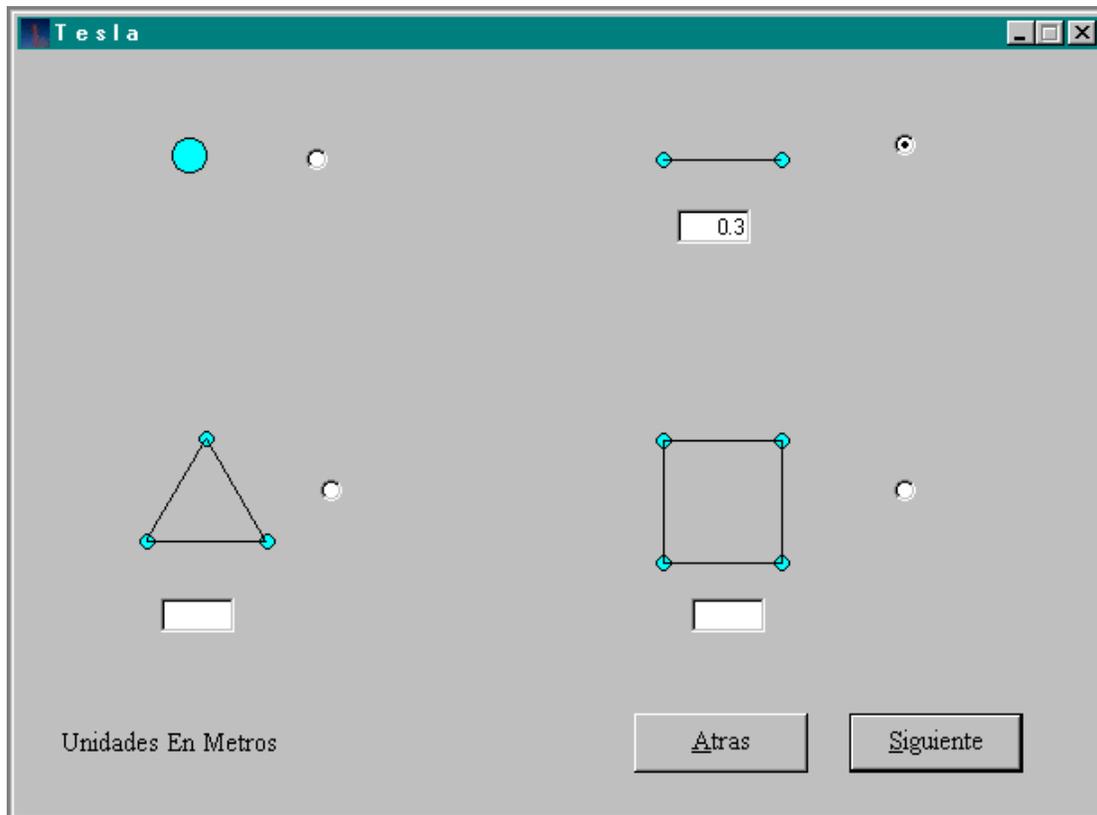


Fig. 38. Selección del arreglo de Fase.

En la pantalla de selección de arreglo de línea se hace clic en el arreglo de acuerdo al que tiene la línea del ejercicio, en este caso es horizontal.

Los colores de los puntos indican las fases A, B, y C con rojo, azul y verde respectivamente.

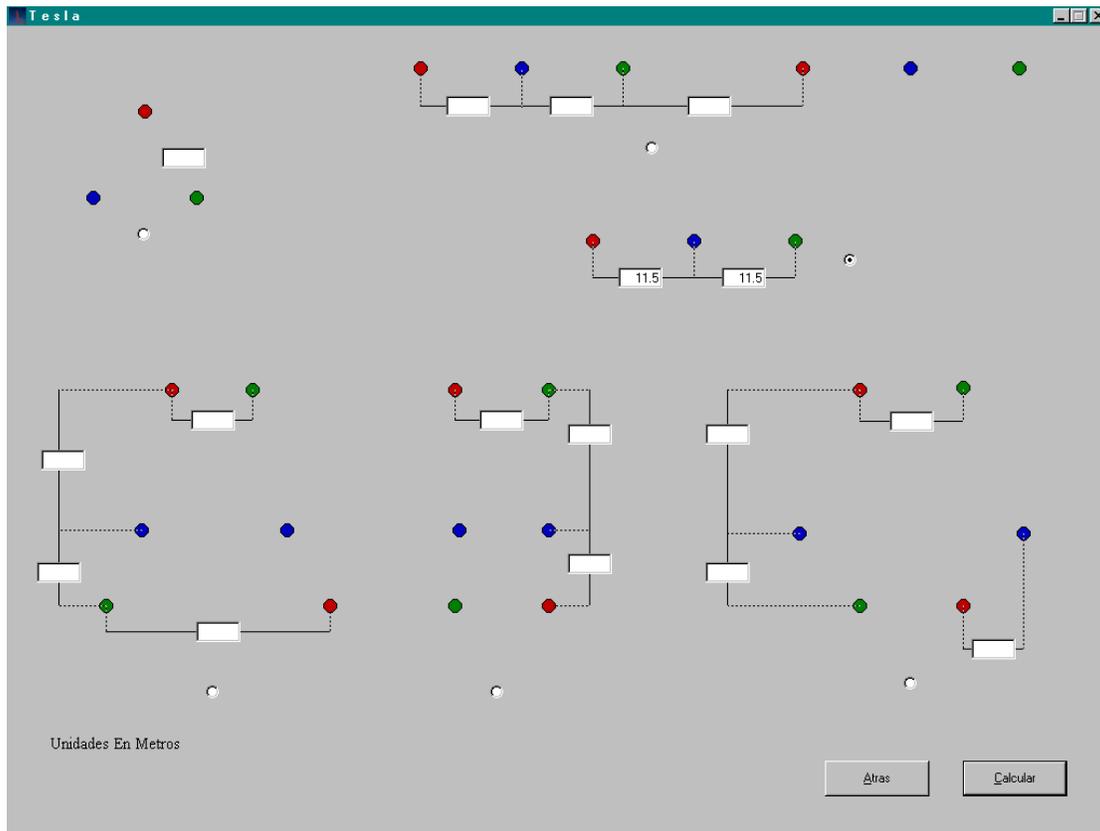


Fig. 39. Selección de arreglos de línea.

En la pantalla de Resultados el nombre del conductor se muestra en color rojo para este ejemplo específico, esto se debe a que la regulación de voltaje es superior al diez por ciento, lo cual indica que la línea de transmisión no se comportará satisfactoriamente.

CONDUCTOR	Finch	Falcon		
APARENTE (kVA)	-13953.82	-14708.11		
ACTIVA (kW)	1997.671	1416.982		
REACTIVA (kVAR)	-33225.84	-33860.56		
% REGULACION	12.29459	11.61526		
EFICIENCIA (%)	97.65891	98.32805		

Fig. 40. Resultados.

Se procede a calcular el banco de capacitores necesario para la corrección del factor de potencia requerido por el diseño. Este paso se consigue dando clic en el botón “Cálculo de Banco de Capacitores”.

Proporciono el Valor del
 Nuevo Factor de Potencia

Fig. 41. Petición de nuevo F.P.

El cuadro de diálogo pide que se escriba el factor de potencia deseado. Al hacer clic en aceptar aparece la pantalla con el resultado.

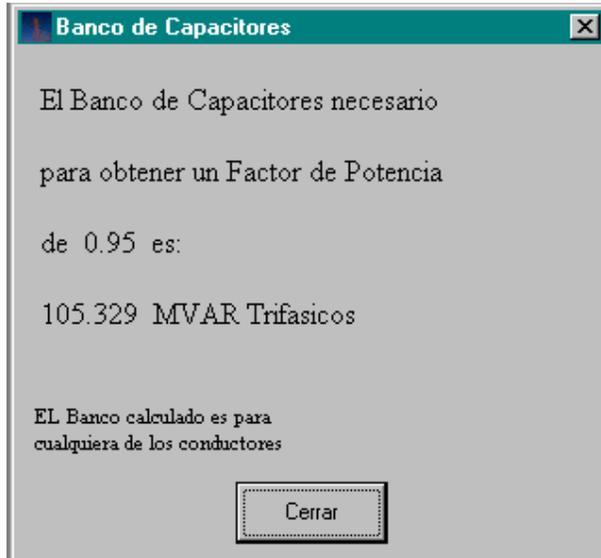


Fig. 42. Banco de capacitores requerido.

Al cerrar esta ventana aparecerá un mensaje en cual se pregunta si se quiere recalcular la línea, si se elige "NO" se cierra dicha pantalla quedando la pantalla de resultados del valor del Banco de capacitores.

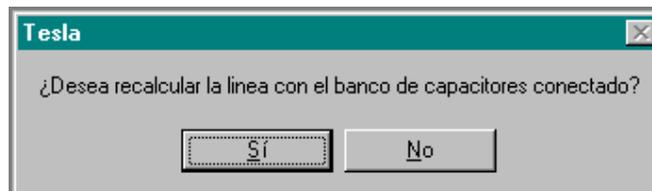


Fig. 43. Cuadro de recálculo de línea.

En caso de elegir “Si” aparecerá la pantalla de resultados con nuevos valores, ya que con el dato de factor de potencia proporcionado anteriormente se recalcula la línea automáticamente.

Se debe poner atención en el valor del nuevo F.P., porque si se ingresa un valor menor al original aparecerá un mensaje de error.

CONDUCTOR	Finch	Falcon		
APARENTE (kVA)	-2693.525	-3079.441		
ACTIVA (kW)	1477.129	1048.397		
REACTIVA (kVAR)	-33437.47	-33995.57		
% REGULACION	6.898628	6.288116		
EFICIENCIA (%)	98.25832	98.75755		

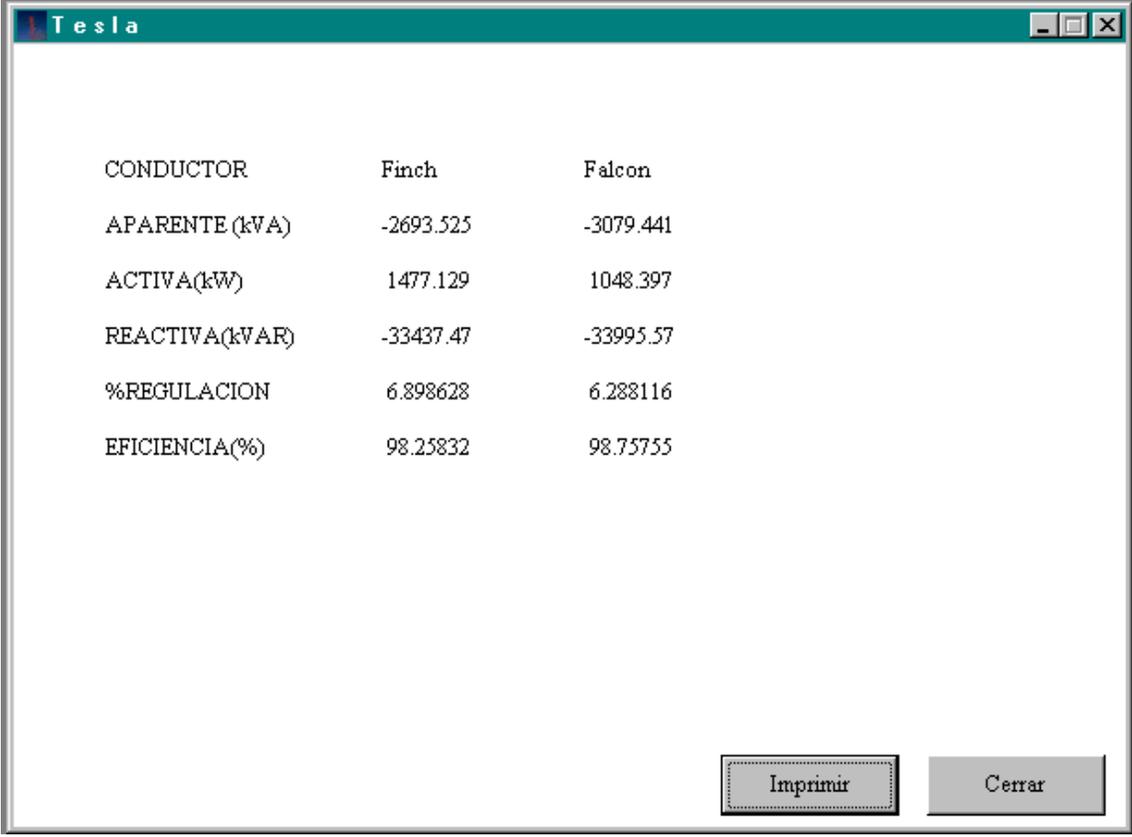
Buttons:

Fig. 44. Resultados con nuevo F.P.

Aquí se puede apreciar cómo la regulación de voltaje disminuyó, note que el color que tienen los nombres de los conductores ha cambiado a verde.

Esto quiere decir que el porcentaje de regulación está por debajo del 10%, lo que indica que la línea funcionará correctamente con el banco de capacitores conectado.

Si se desea imprimir los resultados se hace clic en el botón correspondiente apareciendo una pantalla similar a una vista previa. Para enviar a la impresora predeterminada en la computadora se hace nuevamente clic en el botón “Imprimir”.



CONDUCTOR	Finch	Falcon
APARENTE (kVA)	-2693.525	-3079.441
ACTIVA(kW)	1477.129	1048.397
REACTIVA(kVAR)	-33437.47	-33995.57
%REGULACION	6.898628	6.288116
EFICIENCIA(%)	98.25832	98.75755

Fig. 45. Vista preliminar de impresión de resultados.

Para imprimir los resultados obtenidos, es necesario hacer clic en el botón correspondiente.

De este modo se tendrán los resultados en papel para su comparación en el desarrollo del proyecto.

5.5 MENSAJES DE ERROR PRODUCIDOS DURANTE EL PROCESO.

Es muy común que durante el proceso de ingreso de datos se produzcan errores.

Es por esta razón que el programa incluye mensajes que indican al usuario que algún error se ha producido en el procedimiento, esto se hace con la finalidad de evitar que el cálculo sea erróneo con la pérdida de tiempo que esto conlleva.

Este apartado está dedicado a dichos errores en los cuales puede incurrir el usuario así como la solución a los mismos.

ERROR EN EL DATO DE TEMPERATURA DE OPERACIÓN.

Es probable que el usuario ingrese un dato de temperatura que no esté contemplado por el programa. Es en esta circunstancia aparece el mensaje de error.

Para enmendar el error y proseguir con el cálculo, se da clic en “Aceptar” y se ingresa el dato correcto.

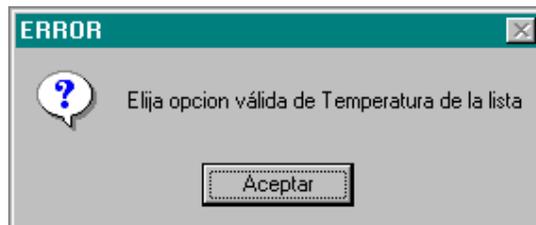


Fig. 46. Mensaje de error en temperatura de operación.

ERROR EN EL FACTOR DE POTENCIA

Un factor de potencia mayor a la unidad es imposible de conseguir, es por ello que si se ingresa un factor de potencia mayor o igual a uno, si el factor de potencia es igual a uno, el programa realiza una división por cero y marca error automáticamente (porque el coseno de uno es cero), por lo tanto, el programa despliega el siguiente mensaje de error:

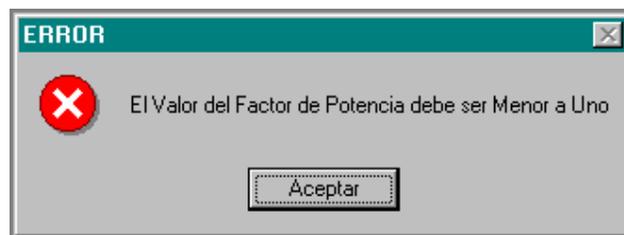


Fig. 47. Mensaje de error en el F.P.

Para proseguir con el cálculo se da “Aceptar” y se introduce un factor de potencia adecuado.

ERROR POR FALTA DE DATO

Si por alguna razón no se introdujo alguno de los datos de la línea, aparecerá el siguiente mensaje de error:



Fig. 48. Mensaje de error en dato de distancia entre conductores.

La solución a este percance es dar clic en “Aceptar” e introducir el dato o datos faltantes.

ERROR POR FALTA DE DATO DE DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES

Si por error u omisión no se introdujo el valor de la distancia entre conductores que componen la fase, aparecerá el siguiente mensaje de error:

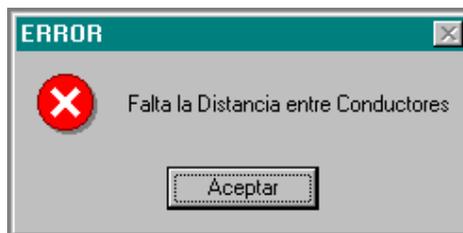


Fig. 49. Mensaje de error en dato de distancia entre fases.

Como en los casos anteriores, la solución es dar clic en “Aceptar” y posteriormente ingresar el dato correspondiente.

Existe también la posibilidad de introducir un dato que no esté dado en metros, como lo requiere el programa, si es el caso aparecerá el siguiente cuadro de error:



Fig. 50. Mensaje de error en unidades.

La solución es dar clic en “Aceptar” e introducir el dato correcto.

ERROR POR FALTA DE DATO DE DISTANCIA EN ARREGLO DE LINEA

Al igual que en el caso anterior, es posible que se omita uno de los datos de distancia en el arreglo de la línea de transmisión, en tal caso, aparecerá el mensaje de error que se muestra en la figura.



Fig. 51. Mensaje de error por falta de dato en arreglo de línea.

La solución es dar clic en “Aceptar” e introducir el dato faltante.

Es importante mencionar que este parámetro no está restringido, por lo tanto, debe ponerse atención en escribir datos coherentes con la realidad.

ERROR POR INGRESAR F.P. MENOR AL ORIGINAL

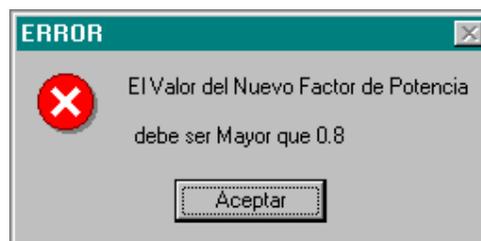


Fig. 52. Mensaje de error por F.P. menor que el original.

Al introducir un factor de potencia menor al original, se despliega el mensaje de la figura 52; si se introduce un F.P. igual a la unidad sucede lo mismo que en el cálculo regular, por lo tanto, se genera un error y aparece el siguiente mensaje:

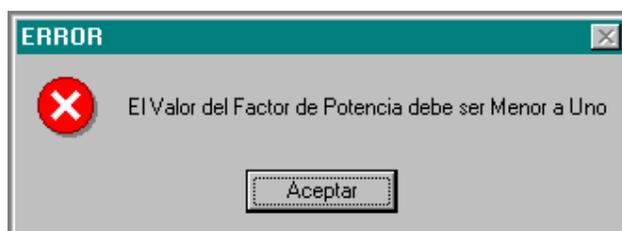


Fig. 53. Mensaje de error por F.P. unitario.

CONCLUSIONES

Como se ha observado, el cálculo de una línea de transmisión de energía eléctrica es un procedimiento largo y tedioso que, al ser llevado a cabo en forma tradicional, consume una gran cantidad de tiempo así como una perfecta organización en cuanto a llevar un control de los datos que van surgiendo a lo largo del proceso; además, la exactitud del mismo con respecto al número de cifras decimales que se manejan es limitado con el cálculo a mano.

Con los ejemplos desarrollados en el trabajo de tesis, se pone de manifiesto la gran ventaja que representa contar con un programa de computadora que lleve a cabo la parte del desarrollo matemático en fracciones de segundo comparado con la gran cantidad de cálculos y acarreo de datos que tienen que ser escritos en un procedimiento tradicional que representan más de una docena de páginas.

Este ahorro en tiempo proporciona al diseñador la oportunidad de poner más énfasis en la elección del conductor adecuado para el proyecto optimizando así el trabajo y la ventaja de calcular la línea con más de un conductor a la vez y una exactitud mayor.

Queda demostrado que el programa de cálculo desarrollado será una herramienta sumamente útil para la comunidad estudiantil para quien fue desarrollado.

BIBLIOGRAFÍA.

Checa Luis María.

1998.

Lineas de Transporte de Energía.

Editorial Marcombo Bixareu Editores.

España.

Nasar Syed A.

1999.

Electric Power Systems.

Editorial CRC.

Boca Ratón, Florida, USA.

Stevenson William D.

1979.

Sistemas Eléctricos de Potencia.

Editorial Mc. Graw Hill.

México.

Viqueira Landa Jacinto.

1993.

Redes Eléctricas en Régimen Permanente Equilibrado.

Ediciones Alfaomega. S.A de C.V.

México.