



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE
CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Facultad de Ingeniería

Presenta:

ING. OMAR RAMIREZ PAZ

Director de Tesis:
M.C. Ismael Albino Padilla

Co-director de tesis
Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

Co-director de tesis
M.C. Víctor Galindo López

Asesor externo
M.I. German Pedro Antonio

Ciudad de México

Septiembre 2020



Agradecimientos

A Dios, que me ha permitido realizar este sueño, el cual puedo realizar con gran satisfacción.

A mi querida y admirable madre y abuela, María Silvestra Paz Ramírez e Isabel Ramírez Ramírez por su luz, sus consejos y su enorme amor. Dios las bendiga por siempre.

A mis hermanos Alma, Abel, Adán, Nancy, Nelly, Josué, Christian e Isael por ser parte de esta historia y su apoyo incondicional.

A mi Tío Donato por obsequiarme ese gran ejemplo de superación, disciplina y trabajo.

Agradezco a mi esposa Liliana por creer en mí y su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida profesional junto con mis pequeños hijos Maximiliano y Leopoldo, quienes me han enseñado a ver la vida de una nueva manera a través de su inocencia impulsándome a esforzarme para ser mejor cada día. “tres más tres igual a seis y ¡listo papá!”.

A mis asesores, M.C. Ismael Albino Padilla y Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez por su apoyo incondicional y paciencia brindada para la elaboración de esta tesis.

A mi amigo y colega M.I. German Pedro Antonio por regalarme parte de su tiempo de asesoramiento.

A mis compañeros de maestría y amigos: Julio, Aaron, Heriberto, Natanael, Ernesto, Andrés, Alfonso, Jorge y Roger por brindarme su amistad y los buenos momentos durante esta etapa.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por permitirme ser parte de esta prestigiosa institución y brindarme la oportunidad de superarme.



Resumen

El estudio de los transitorios producidos por las maniobras necesarias para la operación de un sistema eléctrico de potencia son sumamente importantes ya que los componentes del sistema eléctrico de potencia se someten a excesivos niveles de voltajes que en casos extremos pueden generar daños severos dependiendo de los elementos involucrados, pudiendo provocar la salida de operación de un equipo primario y causar anomalías en la subestación, incluso dejar a ciudades completas sin suministro de energía eléctrica.

En el presente trabajo se presentaron los criterios para el modelado en ATP de los elementos que constituyen el anillo de 230 kV TYA-SNG perteneciente a la Zona de Transmisión Valle de México Sur y Centro, con la finalidad de analizar las sobretensiones por maniobras que se generan durante su operación normal.

Partiendo del equivalente de red del anillo TYA-SNG modelado en la base de datos de cortocircuito de la GRTC en Aspen OneLiner y mediante el modelo de onda viajera de Bergeron disponible en ATP se modelaron las líneas tanto aérea en cable ASCR como subterráneas con cables de potencia del tipo XLP y PIPE que conforman el anillo; por su parte las cargas obtenidas del perfil de carga anual de cada transformador considerando para este estudio la demanda máxima, son conectadas en el devanado de baja de los modelos trifásicos BECTRAN con la finalidad de considerar sus pérdidas y obtener una buena aproximación del modelo, por lo que se realizan comparaciones de parámetros de secuencia de los modelos de línea en ATP con sus correspondientes parámetros en la red de Aspen modelados a partir de mediciones en campo.

Las simulaciones realizadas con las maniobras de operación consideradas demostraron las máxima sobretensiones alcanzadas para esta configuración de red anillada y el comportamiento de los diferentes tipos de líneas que forman parte de la red de estudio.



Abstrac

The study of the transients produced by the maneuvers necessary for the operation of an electrical power system are extremely important since the components of the electrical power system are subjected to excessive levels of voltages that in extreme cases can generate severe damage depending on the elements. involved, being able to cause the shutdown of a primary equipment and cause anomalies in the substation, even leaving entire cities without electricity supply.

In the present work, the criteria for the ATP modeling of the elements that make up the 230 kV TYA-SNG ring belonging to the Zona de Transmisión Valle de México Sur y Centro, in order to analyze the overvoltages due to maneuvers that are generate during normal operation.

Starting from the network equivalent of the TYA-SNG ring modeled in the GRTC short-circuit database in Aspen OneLiner and using the Bergeron traveling wave model available at ATP, both overhead lines in ASCR and underground cables were modeled. XLP and PIPE type power that make up the ring; On the other hand, the loads obtained from the annual load profile of each transformer, considering the maximum demand for this study, are connected in the low winding of the BECTAN three-phase models in order to consider their losses and obtain a good approximation of the model, by what is carried out comparisons of sequence parameters of the line models in ATP with their corresponding parameters in the Aspen network modeled from measurements in the field.

The simulations carried out with the operating maneuvers considered showed the maximum overvoltages reached for this ringed network configuration and the behavior of the different types of lines that are part of the study network.



Contenido General

Agradecimientos	i
Resumen.....	ii
Abstrac	iii
Índice de figuras	vii
Índice de Tablas.....	xi
Capítulo I	13
Protocolo de Tesis	13
1.1 Introducción	13
1.2 Planteamiento del problema	14
1.3 Justificación	15
1.4 Objetivo general.....	15
1.5 Objetivos específicos.....	15
Capítulo II	17
2.1 Marco histórico	17
2.1.1 Antecedentes del corredor de 230 kV TYA-SNG.....	17
2.1.3 Ubicación en la red nacional.....	18
2.1.4 Ubicación geográfica.....	20
2.1.5 Configuración del anillo de 230 Kv TYA-SNG	21
2.1.6 Características generales del anillo de 230 kV TYA-SNG.....	21
2.2 Marco Teórico	23
2.2.1 Análisis de transitorios en líneas de transmisión	23
2.2.1.1 Los Sobrevoltajes transitorios y su origen	23
2.2.1.2 Clasificación de los sobrevoltajes transitorios.....	23
2.2.1.3 Transitorios electromagnéticos por maniobra.....	25
2.2.1.4 Modelos para el estudio de transitorios de líneas de transmisión	25
2.2.1.4.1 Modelos de parámetros concentrados.....	26
2.2.1.4.2 Modelos de parámetros distribuidos.....	26
2.2.1.4.3 Modelo de parámetros distribuidos constantes.....	27
2.2.2 Modelo de línea para el modelado del anillo de 230 TYA-SNG.....	27
2.2.3 Modelo de línea Bergeron	29
2.2.3.1 Ecuaciones del Telegrafista	29



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

2.2.3.2 Desarrollo del Modelo de Bergeron.....	33
2.2.3.3 Determinación de los primeros valores de una sobretensión transitoria por el Modelo de Bergeron.....	38
2.2.4 Características de las líneas de transmisión de anillo de 230 kV TYA-SNG.....	46
2.2.4.1 Líneas de transmisión	46
2.2.4.2 Líneas de transmisión aéreas	46
2.2.4.3 Cables de transmisión.....	49
2.2.4.4 Cable de Potencia tipo seco.....	49
2.2.4.5 High-pressure fluid-filled (HPFF) pipe-type.....	51
2.2.4.5.1 Esquema de Control del sistema de cable HPFF (Tipo PIPE)	52
2.2.5 Herramienta computacional ATP-EMTP.....	54
2.2.6 Proceso de para el análisis de sobretensiones del corredor de 230 TYA-SNG	55
2.2.5 Simulación de transitorios.....	55
Capítulo III	57
Modelado en ATP del anillo de 230 kV TYA – SNG.....	57
3.1 Equivalente de red del anillo de 230 kV TYA-SNG en Aspen OneLiner	57
3.2 Modelamiento del equipamiento	58
3.2.1 Modelado del equivalente de red	58
3.2.2 Modelado de transformadores de potencia.....	61
3.2.2.1 Resumen de parámetros para modelado de transformadores en ATP mediante la rutina BCTRAN.....	65
3.2.3 Modelado de líneas Transmisión	68
3.2.3.1 Modelado de línea de transmisión aérea	68
3.2.3.2 Modelado de línea de transmisión subterránea con cable de potencia XLP.....	73
3.2.3.3 Modelado de línea de transmisión subterránea con cable de potencia tipo PIPE.....	80
3.2.3.4 Resumen de especificaciones técnicas y parámetros de modelado de cables de potencia de líneas subterráneas.....	84
3.2.3.5 Aproximación de los modelos de línea obtenidos en ATP.....	86
3.2.3.6 Determinación de la frecuencia de oscilación para los modelos de línea Bergeron.	87
3.2.4 Modelado de cargas	87
3.2.5 Modelo en APT del corredor de 230 kV TYA-SNG.....	91
CAPITULO IV	92
Simulaciones.....	92



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

4.1 Condiciones generales de la red.....	92
4.2 Parámetros generales en ATP para simulación	92
4.2.1 Energización en vacío de las líneas de transmisión del anillo de 230 kV TYA-SNG.....	92
4.2.1.2 Energización en vacío de la L.T. TYA-93H60-CDS (Línea subterránea con cable de potencia tipo XLP).....	92
4.2.1.3 Energización en vacío de la L.T. TYA-93E40-SNG (Línea subterránea con cable de potencia tipo PIPE).....	95
4.2.1.4 Energización en vacío de la L.T. SNG-93E70-TYA (Línea aérea con cable ACSR)	96
4.2.2 Cierre con carga de las líneas de transmisión del anillo de 230 kV TYA-SNG.....	101
4.2.3 Apertura con carga de las líneas de transmisión del anillo de 230 kV TYA-SNG	103
Conclusiones	104
Sugerencias para trabajos futuros	105
Referencias.....	106
Anexos.....	108



Índice de figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1 Ubicación en la Red Nacional del Anillo de 230 kV del Corredor TYA-SNG.....	18
Figura 2. 2 Ubicación del Corredor TYA-COY en la Red Troncal de 230 kV de la ZTVMS	19
Figura 2. 3 Disposición del Corredor TYA-SNG en la Red Troncal de 230 kV de la ZTVMS	19
Figura 2. 4 Zonas de Influencia del Anillo de 230 kV del Corredor TYA-SNG.....	20
Figura 2. 5 Configuración del Corredor de 230 kV TYA-SNG.....	21
Figura 2. 6 Clasificación de los modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos	26
Figura 2. 7 Esquema de solución de ecuaciones de línea en el dominio modal [13]	27
Figura 2. 8 Circuito equivalente del modelo de Bergeron [14]	28
Figura 2. 9 Circuito representativo de una línea de transmisión para determinar las ecuaciones del telegrafista [18].....	29
Figura 2. 10 Modelo de línea con parámetros distribuidos [18]	30
Figura 2. 11 Línea de transmisión con longitud L para determinar ecuaciones representativas del Modelo de Bergeron.....	33
Figura 2. 12 Circuito dual de Norton para una línea de transmisión	34
Figura 2. 13 Circuito equivalente de una línea de transmisión utilizado por el Modelo de Bergeron	34
Figura 2. 14 Ilustración sobre la forma en que se obtiene la solución del Modelo de Bergeron	36
Figura 2. 15 Posición de las corrientes de historia y las ondas de energía durante el tiempo de observación	37
Figura 2. 16 Posición de la fuente de voltaje con respecto al diagrama de las ondas viajeras	38
Figura 2. 17 Determinación de los primeros valores de corriente de historia	39
Figura 2. 18 Torre Autoportada de doble circuito de 230 kV para la L.T. TYA-93E70-SNG	47
Figura 2. 19 Torre normalizada tipo Autoportada de 230 kV (LyFC).....	48
Figura 2. 20 Sección transversal de un cable de alta tensión.....	50
Figura 2. 21 Características constructivas de un cable de potencia tipo XLPE.....	50
Figura 2. 22 Características de los conductores del cable Tipo Pipe (HPFF)	51
Figura 2. 23 Características del cable Tipo PIPE (HPFF)	52



Figura 2. 24 Esquema de control del Sistema del cable Tipo PIPE (HPFF).....	53
Figura 2. 25 Terminales de transición de línea de Transmisión Tipo PIPE SNG-93E40-COY.....	53
Figura 2. 26 Líneas de Transmisión Tipo PIPE SNG-93E40-COY y SNG-93E50-COY Tipo PIPE	54
Figura 2. 27 Proceso para el análisis de las sobretensiones por maniobra del anillo de 230 kV TYA-SNG	55
Capítulo 3	
Figura 3. 1 Equivalente de red del corredor de 230 kV TYA-SNG a partir de la base de datos en Aspen OneLiner.....	57
Figura 3. 2 Parámetros en Aspen OneLiner de secuencia del equivalente de Thévenin para el nodo de la S.E. SNG	58
Figura 3. 3 Parámetros en Aspen OneLiner de secuencia del equivalente de Thévenin para el nodo de la S.E. TYA	58
Figura 3. 4 Parámetros de modelado en ATP para la fuente de voltaje del equivalente de red	59
Figura 3. 5 Parámetros de modelado en ATP de impedancia de equivalente de red en el nodo S.E. TYA	60
Figura 3. 6 Ventana de parámetros en ATP del modelo de transformador BCTRAN	61
Figura 3. 7 Parámetros de modelado ATP del transformador NAR-T01.....	62
Figura 3. 8 Formato normalizado CFE “Características de Transformadores”	62
Figura 3. 9 Perdidas de vacío al 100 % de la tensión nominal del transformador NAR-T01	63
Figura 3. 10 Perdidas de cortocircuito del transformador NAR-T01.....	64
Figura 3. 11 Ventana de parámetros en ATP del modelo de línea aérea.....	68
Figura 3. 12 Líneas paralelas a la L.T. TYA-93E70-SNG a partir de Aspen OneLiner.....	69
Figura 3. 13 Acoplamiento mutuo de la L.T. TYA-93E70-SNG con la L.T. TYA-93B50-AGU.....	70
Figura 3. 14 Modelado en ATP de parámetros geométricos y eléctricos para la L.T. TYA-93E70-SNG	71
Figura 3. 15 Modelado en ATP de parámetros de la L.T. TYA-93E70-SNG	72
Figura 3. 16 Impedancias de secuencia a 60 Hz en ATP de L.T. TYA-93E70-SNG.....	72
Figura 3. 17 Impedancias de secuencia a 60 Hz en Aspen OneLiner de L.T. TYA-93E70-SNG.....	73
Figura 3. 18 Ventana de parámetros en ATP del modelo de cable subterráneo XLP	74
Figura 3. 19 Modelo de cable monopolar en rutinas de ATP-EMTP	75
Figura 3. 20 Modelado en ATP de parámetros de la L.T. TYA-93H60-CDS.....	78



Figura 3. 21 Disposición geométrica de los conductores modelados en ATP de la L.T. TYA-93H60-CDS.....	79
Figura 3. 22 Impedancias de secuencia a 60 Hz en ATP de L.T. TYA-93H60-CDS.....	79
Figura 3. 23 Impedancias de secuencia a 60 Hz en Aspen OneLiner de L.T. TYA-93H60-CDS	80
Figura 3. 24 Ventana de parámetros en ATP del modelo de cable subterráneo PIPE.....	81
Figura 3. 25 Modelado en ATP de parámetros de la L.T. SNG-93E40-COY	83
Figura 3. 26 Disposición geométrica de Impedancias de secuencia a 60 Hz en ATP de L.T. TYA-93H60-CDS	83
Figura 3. 27 Impedancias de secuencia a 60 Hz en Aspen OneLiner de L.T. SNG-93E40-COY	84
Figura 3. 28 Perfiles de carga máxima 2019 para transformadores del anillo de 230 kV TYA-SNG	88
Figura 3. 29 Modelado y comprobación en ATP de carga para el transformador TYA-T01	90
Figura 3. 30 Modelado y comprobación en ATP de carga conectada al transformador TYA-T01.....	90
Figura 3. 31 Modelo en ATP del anillo de 230 kV TYA-SNG.....	91
Capítulo 4	
Figura 4. 1 Parámetros generales de simulación en ATP.....	92
Figura 4. 2 Energización en vacío de la L.T. 93H60 hacia S.E. CDS.	93
Figura 4. 3 Oscilografía de energización en vacío de la L.T. 93H60 hacia S.E. CDS.	94
Figura 4. 4 Energización en vacío de la L.T. 93E40 hacia S.E. SNG.....	95
Figura 4. 5 Oscilografía de energización en vacío de la L.T. 93E40 hacia S.E. SNG	96
Figura 4. 6 Energización en vacío de la L.T. 93E70 hacia S.E. TYA.....	97
Figura 4. 7 Oscilografía de Energización en vacío de la L.T. 93E70 hacia S.E. TYA	98
Figura 4. 8 Tensiones transitorias por energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG	99
Figura 4. 9 Tiempos de oscilación de transitorios por energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG	100
Figura 4. 10 Tensiones transitorias por energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG	100
Figura 4. 11 Oscilografía de cierre con carga de las líneas del anillo de 230 kV TYA-SNG.....	101
Figura 4. 12 Oscilografía de apertura con carga de las líneas del anillo de 230 kV TYA-SNG	103
Anexo A	
Figura A. 1 Medición de pruebas de en vacío del transformador NAR-T01.....	108
Figura A. 2 Figura A. 4 Medición de pérdidas a la carga e impedancia mutua Z X-T del transformador NAR-T01.....	108
Figura A. 3 Medición de pérdidas a la carga e impedancia mutua Z H-X del transformador NAR-T01	109
Figura A. 4 Medición de pérdidas a la carga e impedancia mutua Z H-T del transformador NAR-T01	109
Anexo B	



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Figura B. 1 Especificaciones técnicas de cable de potencia tipo XLP de la L.T. TYA-93H60-CDS	110
Figura B. 2 Dimensionamiento y especificaciones técnicas de cable de potencia tipo XLP de la L.T. TYA-93H60-CDS.....	111
Anexo C	
Figura C. 1 Especificaciones técnicas de cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY.....	112
Figura C. 2 Dimensionamiento y especificaciones técnicas de cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY.....	113



Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1 Características generales de los transformadores del corredor de 230 kV TYA-SNG.....	21
Tabla 2. 2 Características de los cables de potencia asociados al corredor de 230 kV TYA-SNG.....	22
Tabla 2. 3 Características generales de las subestaciones eléctricas del corredor de 230 kV TYA-SNG	22
Tabla 2. 4 Clasificación de los Transitorios electromagnéticos de acuerdo a su forma y duración según la Norma IEC 60071-2.....	24
Tabla 2. 5 Clasificación de bandas de frecuencias para Transitorios electromagnéticos según CIGRE (International Council on Large Electric Systems)	24
Tabla 2. 6 Características técnicas de conductores ACSR/AS y cables de guarda más comunes empleados en la red de Transmisión CFE	47

Capítulo 3

Tabla 3. 1 Parámetros base para la red de 230 kV.....	60
Tabla 3. 2 Parámetros se secuencia en Aspen de equivalentes de Thévenin para la red de 230 kV...60	
Tabla 3. 3 Parámetros se secuencia en ATP de equivalentes de Thévenin para la red de 230 kV	60
Tabla 3. 4 a) Parámetros de modelado en ATP de transformadores del anillo de 230 kV TYA-SNG	65
Tabla 3. 5 Características de cables ACSR y cable de Guarda para modelado de L.T. TYA-93E70-SNG	70
Tabla 3. 6 Aproximación de modelo de la L.T. TYA-93E70-SNG a modelado de Aspen medido en campo.....	73
Tabla 3. 7 Características de fabrica generales del cable de potencia de la L.T. TYA-93H60-CDS.....	74
Tabla 3. 8 Valores típicos de resistividad de materiales	77
Tabla 3. 9 Valores típicos de permitividad relativa de materiales aislantes	78
Tabla 3. 10 Aproximación de modelo de la L.T. TYA-93H60-SNG a modelado de Aspen medido en campo.....	80
Tabla 3. 11 Características de fabrica generales del cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY	81
Tabla 3. 12 Aproximación de modelo de la L.T. SNG-93E40-COY a modelado de Aspen medido en campo.....	84
Tabla 3. 13 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. NAR-93H30-COY	84
Tabla 3. 14 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. TYA-93H60-CDS	85



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Tabla 3. 15 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. DAA-93H70-CDS	85
Tabla 3. 16 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. DAA-93H80-NAR	85
Tabla 3. 17 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. SNG-93E40-COY y L.T. SNG-93E40-COY.....	86
Tabla 3. 18 Aproximación de los modelos de línea obtenidos en ATP.....	86
Tabla 3. 19 Frecuencias para los modelos de línea Bergeron	87
Tabla 3. 20 Perfiles de Carga máxima 2019 de transformadores del anillo de 230 kV TYA-SNG en parámetros de ATP	89
Tabla 3. 21 Perfiles de Carga 2019 del transformador TYA-T01 en parámetros de ATP.....	89
Capítulo 4	
Tabla 4. 1 Resumen de resultados de energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG	98
Anexo C	
Tabla C. 1 Tabla de dimensiones para el tubo envolvente de 12" cedula 40 del cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY	114



Capítulo I

Protocolo de Tesis

1.1 Introducción

Uno de los fenómenos no deseados pero inevitables que se presentaran durante la operación de un sistema eléctrico de potencia son los transitorios electromagnéticos. Un transitorio es el tiempo que transcurre entre dos estados estacionarios en el cual las variables eléctricas de tensión, corriente y frecuencia se ven alteradas temporalmente, los transitorios pueden ir acompañados de huecos de tensión o de sobretensiones dependiendo del fenómeno que los provoque siendo este último uno de los más destacados ya que introduce grandes esfuerzos a los aislamientos de los equipos.[12]

Las sobretensiones transitorias son picos de tensión de corta duración cuyo origen se puede atribuir a descargas atmosféricas, maniobras de conmutación de grandes cargas inductivas o capacitivas de la red del sistema eléctrico de potencia [1], por ello el estudio de estos fenómenos es un aspecto de gran relevancia en los sistemas eléctricos para la determinación del nivel de aislamiento de los equipos el cual debe estar dimensionado para soportar las solicitudes que efectivamente se presentarán en servicio de lo contrario podrían generarse colapsos de la aislación y en consecuencia daños y/o pérdida del servicio.

Las sobretensiones por maniobra para los niveles de tensión de 230 kV normalizados en México corresponden a magnitudes cuyo análisis es prevaeciente para la coordinación de aislamientos, existiendo hoy en nuestro país redes con una tensión máxima normalizada de 400 kV y en otros países del mundo de hasta 800 kV. [2]

Los transitorios de sobretensión por maniobra son generados ante los cambios bruscos de configuración de la red, asociadas a cierres y aperturas de interruptores con cargas reactivas de líneas, de trasformadores o a fallas en el sistema eléctrico, propagándose a lo largo de la línea de transmisión viajando desde el punto donde se originan hasta los extremos de la línea abierta o puntos de variación de impedancia dando como resultado ondas reflejadas y refractadas en un nodo de transición.[5]

Existen diversas maniobras en un sistema eléctrico de potencia dependiendo de las características de diseño y equipos que componen la red de trasmisión, por lo que es de suma importancia determinar el nivel de sobretensión máxima que puede presentarse en cualquiera de las maniobras ya sea de cierre o apertura para determinar el nivel de aislamiento de los equipos conectados a la red.



El análisis de estos fenómenos es muy complicado es por ello que estos estudios se tienen que realizar con programas computacionales que incluyen modelos para cálculo numérico que resuelven las ecuaciones diferenciales que corresponden al sistema eléctrico como lo es EMTP-ATP (ElectroMagnetic Transient Program - Alternative Transient Program) el cual se ha convertido en una de las herramientas más empleadas para este tipo de análisis [8].

En el presente trabajo se estudia el corredor de 230 kV TYA-SNG perteneciente a la Zona de Trasmisión Valle de México Sur con el objetivo de analizar las sobretensiones de corta duración máximas provocadas por maniobras, a partir del modelado ATP de los componentes de esta subred.

1.2 Planteamiento del problema

Analizar las sobretensiones transitorias en los nodos del corredor de 230 kV TYA-SNG generadas por las maniobras necesarias durante su operación en condiciones normales en un escenario de demanda máxima implica realizar un modelo de red en ATP que pueda reproducir con una buena aproximación el comportamiento de los elementos componentes de la red para lo cual se deberán tener en cuenta los siguientes procedimientos:

- Obtener los equivalentes de red del corredor de 230 kV TYA-SNG a partir de la base de datos de cortocircuito ASPEN OneLiner de la Gerencia Regional de Trasmisión Central en su última versión V190528 del archivo “SIN(MAX-MAX)GRTC_17-AGOSTO-2018_V190528”.
- Reunir los parámetros reales para la modelación de las componentes del sistema (Líneas de trasmisión aéreas/subterráneas y transformadores) que reproduzcan resultados significativos y dar la interpretación apropiada de estos parámetros para dar forma al esquema representativo del sistema en ATP.
- Seleccionar el modelo de línea disponible en ATP aplicable tanto a líneas aéreas como a cables subterráneos que nos permita obtener resultados confiables para el análisis de los transitorios de interés.
- Realizar comparativos de los parámetros de línea calculados en ATP con los parámetros modelados en la base de datos de cortocircuito Aspen OneLiner para verificar la aproximación del modelo con los valores reales medidos.
- Modelado de cargas de los transformadores a partir del análisis de los perfiles de carga máxima registradas durante el último año corrido.
- Realizar simulaciones y analizar los transitorios obtenidos a partir de las maniobras comprendidas para la operación en condiciones normales de la red.



1.3 Justificación

Debido a la creciente demanda de suministro de energía en la zona metropolitana la CFE tiene el compromiso de expandir su infraestructura con nuevas subestaciones estableciéndose así nuevas configuraciones de interconexión en la red de transmisión, pero su construcción exclusivamente para el caso de la ciudad de México está condicionada por la mínima disposición de espacio teniendo que emplear tecnologías diferentes a lo convencional tal es el caso las subestaciones encapsuladas en gas SF6 (tipo GIS).

En el presente año 2019 con la puesta en servicio de la nueva subestación Condesa se crea una nueva configuración en la red de transmisión de la ZTVMS a partir de la formación de un anillo de 230 kV constituido por las subestaciones Tacubaya (TYA), Condesa (CDS), Diana (DAA), Narvarte (NAR), Coyoacán (COY) y San Ángel (SNG), todas del tipo GIS interconectadas mediante cable de potencia tipo XLP, PIPE y ACSR, motivo por el cual surge el interés por desarrollar el presente análisis que pretende determinar los niveles de sobretensiones de corta duración máximas que podrían presentarse y comprender el comportamiento de este fenómeno en la nueva configuración red que estará expuesta a diferentes condiciones de operación generándose maniobras de cierre o apertura pudiendo representar un riesgo para la estabilidad del corredor a partir del transitorio generado al poner a prueba los niveles de aislamiento del equipo que conforma este corredor.

1.4 Objetivo general

El presente trabajo tiene como objetivo determinar y analizar los transitorios de sobretensión originados por las maniobras de las líneas de transmisión del corredor de 230 kV TYA-SNG a partir de simulaciones con el software ATP-EMTP en condiciones de operación normal con un escenario de demanda máxima.

1.5 Objetivos específicos

1. Determinar los máximos niveles de sobretensión transitoria originados por maniobras en las líneas de transmisión del anillo de 230 kV del corredor TYA-SNG en condiciones normales de operación en un escenario de demanda máxima.
 - Energización de líneas en vacío.
 - Cierre de líneas con carga.
 - Apertura de líneas con carga.



2. Contribuir al estudio y análisis de los transitorios de sobretensión por maniobra en redes de transmisión de 230 kV a partir del uso del software ATP-EMTP.
3. Realizar en ATP un modelo aproximado del anillo de 230 kV del corredor TYA-SNG con la información técnica real de los equipos proporcionada por el fabricante y que pueda ser usado como base para el desarrollo de estudios posteriores de análisis de transitorios relacionados.
4. Comprender metodologías para manejo los datos de los cables, líneas y transformadores proporcionados por el fabricante de tal manera que puedan ser ingresados en el programa ATP.



Capítulo II

2.1 Marco histórico

2.1.1 Antecedentes del corredor de 230 kV TYA-SNG

De acuerdo al plan de desarrollo de nuevos proyectos de ampliación de la red troncal de 230 kV la Comisión Federal de Electricidad pretendiendo garantizar en corto y mediano plazo el suministro de energía eléctrica en el 2014 acuerda la construcción e instalación de 5 nuevas subestaciones bajo el proyecto de contratación 309 SLT 1820, distribuidas en la ciudad de México y Estado de México: 1) S.E. Xochitla; 2) S.E. Lago de Guadalupe; 3) S.E. Condesa; 4) S.E. Toluca (Ampliación) y 5) S.E. Tacubaya (Ampliación).

Con la puesta en servicio de la subestación S.E. CDS en el año 2019 al ser repotenciada siendo una subestación eléctrica de 85/23 kV paso actualmente a operar con una de tensión de 230/23 kV y capacidad instalada de 60 MVA's.

Esta puesta en servicio trajo consigo el cierre del anillo de 230 kV llamado corredor TYA-SNG formado desde la S.E. TYA conectando con CDS (Condesa), DAA (Diana), NAR (Narvarte), COY (Coyoacán) y SNG (San Ángel) como se muestra en la Figura 2.1. Las subestaciones TYA y SNG serán las dos fuentes principales tanto para el flujo de carga como para las aportaciones ante fallas que se presenten en cualquier punto del anillo.

De las 6 subestaciones que conforman el anillo de 230 kV del corredor TYA-SNG las Subestaciones TYA, CDS, NAR, COY y SNG pertenecen a la Zona de Transmisión Valle de México Sur (ZTVMS) y así mismo al sector SUR, mientras que la S.E. DAA pertenece a la Zona de Transmisión Valle de México Centro (ZTVMC).

El sector sur actualmente cuenta con 10 subestaciones con una capacidad total instalada de 2610 MVA's.

2.1.3 Ubicación en la red nacional

El anillo 230 kV TYA-SNG se encuentra ubicado geográficamente al centro de la red nacional en la Zona del Valle de México perteneciente a la Gerencia de Control Regional Central.

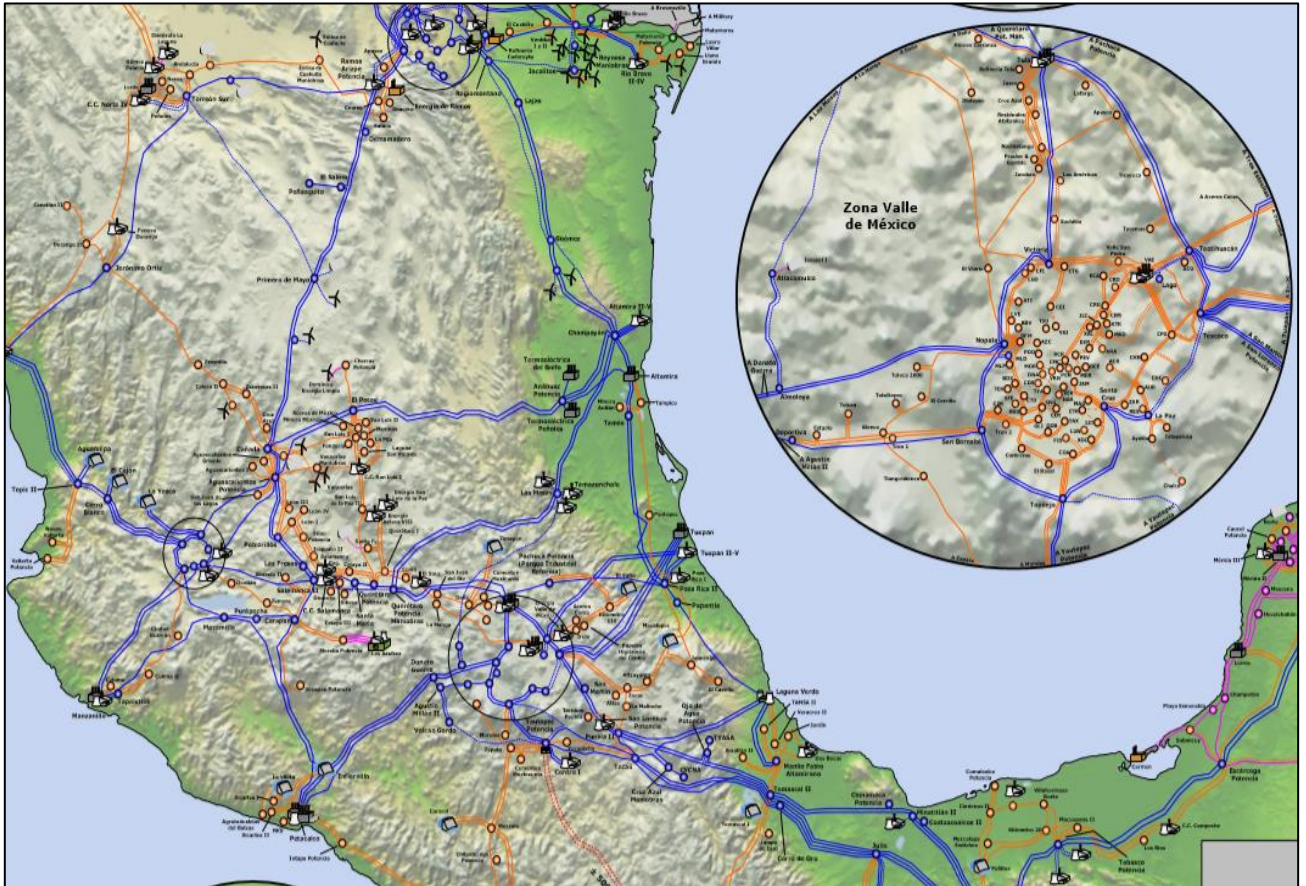


Figura 2. 1 Ubicación en la Red Nacional del Anillo de 230 kV del Corredor TYA-SNG

Se encuentra rodeado por el anillo de red de 400 kV y a su vez pertenece a la red troncal de 230 kV de la Zona de Transmisión Valle de México Sur y de la Zona de Transmisión Valle de México Centro debido a la S.E. DAA.

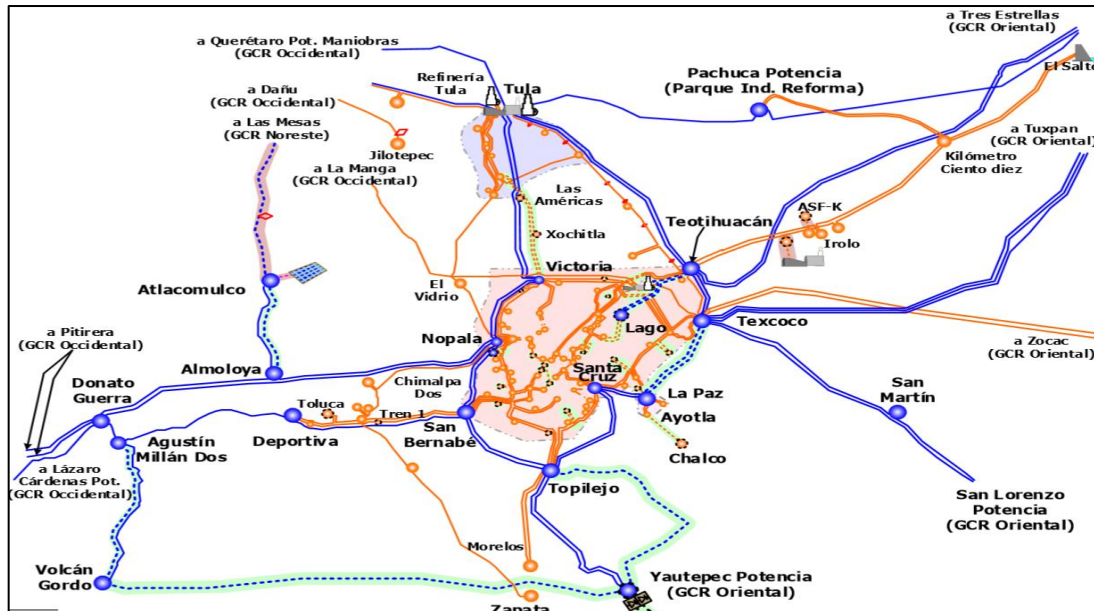


Figura 2. 2 Ubicación del Corredor TYA-COY en la Red Troncal de 230 kV de la ZTVMS

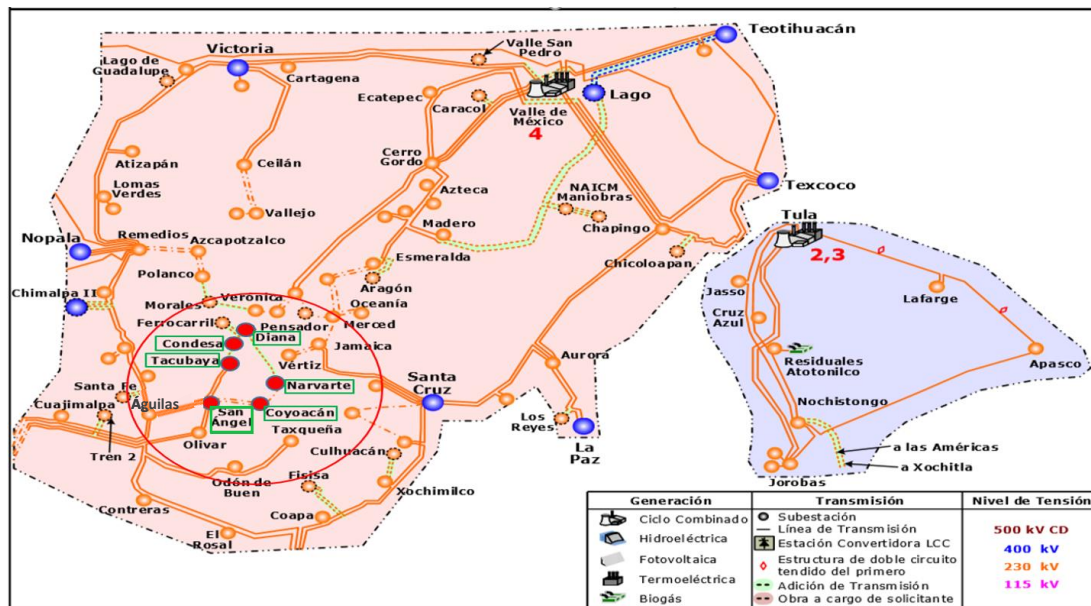


Figura 2. 3 Disposición del Corredor TYA-SNG en la Red Troncal de 230 kV de la ZTVMS



2.1.4 Ubicación geográfica

Debido a su ubicación geográfica la carga conectada al anillo es en su mayoría del tipo residencial, corporativa, comercial y en minoría carga del tipo industrial.

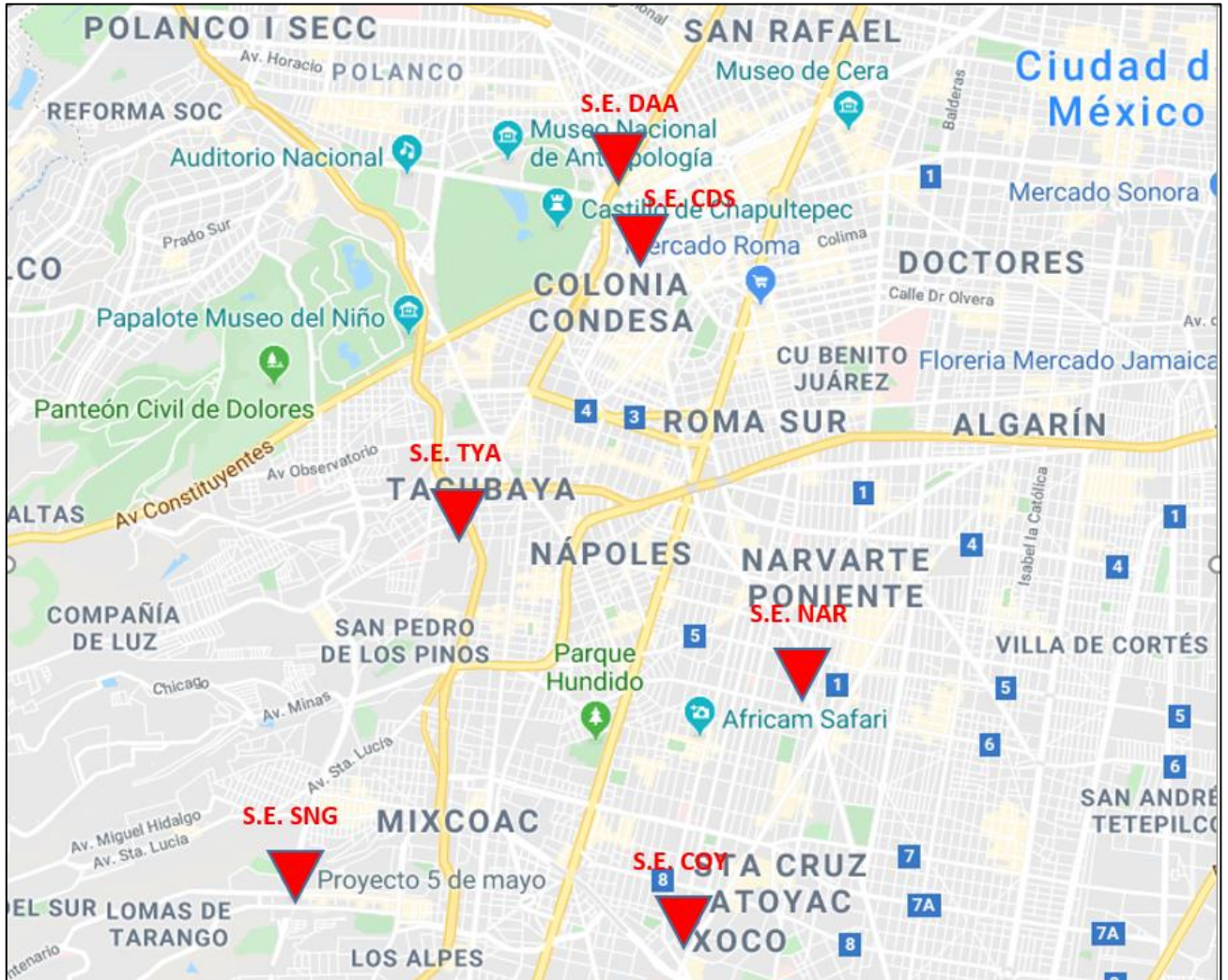


Figura 2. 4 Zonas de Influencia del Anillo de 230 kV del Corredor TYA-SNG

Las subestaciones de esta subred brindan suministro eléctrico a delegaciones de alto impacto económico para la capital del país, estas delegaciones son Miguel Hidalgo Benito Juárez, Cuauhtémoc y Álvaro Obregón.



2.1.5 Configuración del anillo de 230 Kv TYA-SNG

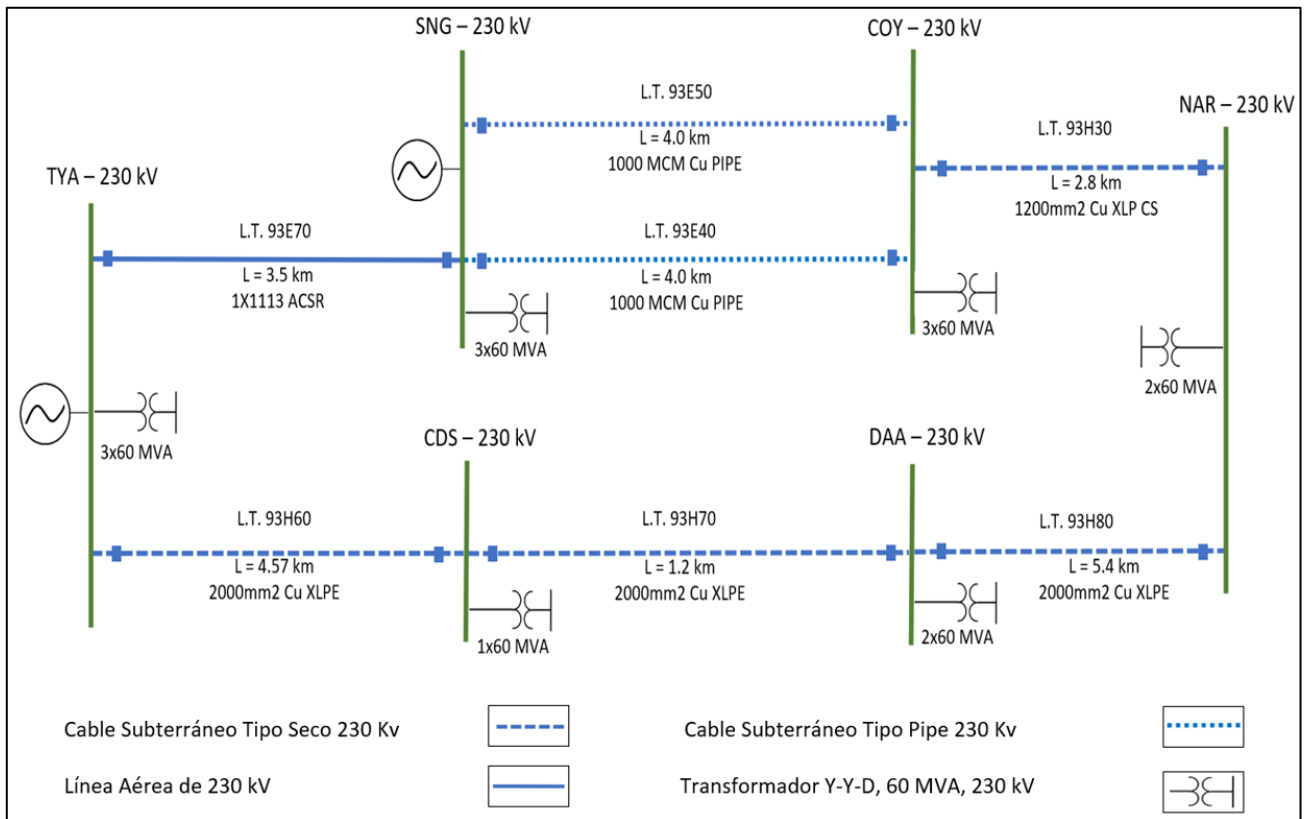


Figura 2. 5 Configuración del Corredor de 230 kv TYA-SNG

2.1.6 Características generales del anillo de 230 kv TYA-SNG

En la siguiente tabla se muestran las características generales de los transformadores asociados a las subestaciones del corredor de 230 kv TYA-SNG.

SUBESTACION	CAPACIDAD INSTALADA EN MVA	No. TRANSFORMADORES	CAPACIDAD EN MVA	CONEXIÓN	RELACION Kv
TYA	180	3	60	Y-Y-D	230/23
SNG	180	3	60	Y-Y-D	230/23
COY	180	3	60	Y-Y-D	230/23
NAR	120	2	60	Y-Y-D	230/23
DAA	120	2	60	Y-Y-D	230/23
CDS	60	1	60	Y-Y-D	230/23

Tabla 2. 1 Características generales de los transformadores del corredor de 230 kv TYA-SNG

Tabla de características de los cables de potencia de las líneas de transmisión que enlazan con las subestaciones asociadas al corredor de 230 kv TYA-SNG.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

LINEA DE TRANSMISION	LONGITUD (km)	CALIBRE	TIPO	CAPACIDAD (A)
TYA-93H60-DAA	4.57	2000 mm ²	Cu XLPE	760
DAA-93H70-CDS	1.2	2000 mm ²	Cu XLPE	760
DAA-93H80-NAR	5.4	2000 mm ²	Cu XLPE	760
NAR-93H30-COY	2.8	1200 mm ²	Cu XLP CS	1135
COY-93E40-SNG	4	1000 MCM Cu	Cu Aceite	650
COY-93E50-SNG	4	1000 MCM Cu	Cu Aceite	650
SNG-93E70-TYA	3.5	1X1113 Kcmil	ASCR	1100

Tabla 2. 2 Características de los cables de potencia asociados al corredor de 230 kV TYA-SNG

A continuación, se muestran las características generales de las subestaciones eléctricas del corredor de 230 kV TYA-SNG

SUBESTACION	DIRECCION	TIPO	MARCA	ARREGLO	CARACTERISTICAS DE INTERRUPTOR
TYA	Felipe Angeles Colonia Bellavista Delegacion Alvaro Obregón (Avestruz) 1140 Alvaro Obregon, Distrito Federal México	GIS	ABB	Barra pincipal con barra transferencia e interruptor de amarre	Mecanismo de operación Hidraulico Medio de extincion Gas SF6 Tension nominal 245 kV Tension de impulso al rayo 1050 kV Corriente nominal 2000 A Capacidad Interruptiva 40 kA
SNG	5 de Mayo, Merced Gómez, Alvaro Obregón, 01600 Ciudad de México, CDMX	GIS	ALSTOM	Barra pincipal con barra transferencia e interruptor de amarre	Mecanismo de operación Resorte Medio de extincion Gas SF6 Tension nominal 245 kV Tension de impulso al rayo 950 kV Corriente nominal 2000 A Capacidad Interruptiva 40 kA Tiempo de apertura 50 ms
COY	Martin Mendalde 1790, Acacias, Benito Juárez, 03240 Ciudad de México, CDMX	GIS	ALSTOM	Barra pincipal con barra transferencia e interruptor de amarre	Mecanismo de operación Resorte Medio de extincion Gas SF6 Tension nominal 245 kV Tension de impulso al rayo 950 kV Corriente nominal 2000 A Capacidad Interruptiva 40 kA Tiempo de apertura 50 ms
NAR	Calle J. Enrique Pestalozzi 1029, Col del Valle Centro, Benito, Juarez, 03100, Ciudad de México, CDMX	GIS	SIEMENS	Barra pincipal con barra transferencia e interruptor de amarre	Mecanismo de operación Resorte Medio de extincion Gas SF6 Tension nominal 245 kV Tension de impulso al rayo 1050 kV Corriente nominal 2000 A Capacidad Interruptiva 40 kA
CDS	Avenida Mazatlan 10, Colonia Condesa, Cuauhtémoc, 06140 Ciudad de México, CDMX	GIS	SIEMENS	Barra pincipal con barra transferencia e interruptor de amarre	Mecanismo de operación Resorte Medio de extincion Gas SF6 Tension nominal 245 kV Tension de impulso al rayo 1050 kV Corriente nominal 2000 A Capacidad Interruptiva 50 kA
DAA	Calz. Melchor Ocampo 469, Anzures, 11590 Miguel Hidalgo, CDMX	GIS	SIEMENS	Barra pincipal con barra transferencia e interruptor de amarre	Mecanismo de operación Resorte Medio de extincion Gas SF6 Tension nominal 245 kV Tension de impulso al rayo 1050 kV Corriente nominal 2000 A Capacidad Interruptiva 40 kA

Tabla 2. 3 Características generales de las subestaciones eléctricas del corredor de 230 kV TYA-SNG



2.2 Marco Teórico

2.2.1 Análisis de transitorios en líneas de transmisión

El estudio de los fenómenos transitorios en sistemas eléctricos de potencia es en esencia el estudio de la distribución de energía electromecánica y electromagnética entre los elementos que componen una red, mientras que el estado estable el intercambio de energía no necesita ser modelado debido a que este puede ser representado por medio de fasores de tensión y de corriente, en tanto que el estado transitorio el intercambio de energía entre los componentes de un sistema estará afectado por los disturbios generados interna o externamente por corriente y tensiones excesivas es por ello que la predicción de estas magnitudes se obtienen a partir de modelos para la simulación de estos fenómenos transitorios.

2.2.1.1 Los Sobrevoltajes transitorios y su origen

Los transitorios son manifestaciones físicas independientes del control humano y se originan debido a cambios repentinos en la configuración de un circuito energizado, los cuales generalmente ocasionan sobrevoltajes transitorios de magnitudes imprescindibles que, a pesar de lo breve de su duración, pueden ser peligrosos por las amplitudes que se producen y pueden originar la ruptura o el deterioro del aislamiento.

Los sobrevoltajes transitorios son toda alteración de voltaje en función del tiempo entre conductor de fase y tierra o entre 2 conductores de fase, su magnitud es elevada y su naturaleza transitoria cuyo valor de cresta sobrepasa el valor de la tensión máxima de servicio (V_n) o la tensión máxima para el aislamiento (V_m) en un sistema eléctrico. [19]

2.2.1.2 Clasificación de los sobrevoltajes transitorios

La manera más común de clasificar los transitorios electromagnéticos es por medio del rango del tiempo de estudio, el cual está directamente relacionado con el fenómeno bajo investigación.

En Tabla 2.4 podemos apreciar la clasificación establecida por la Norma IEC 60071-2 de los transitorios electromagnéticos de acuerdo a la forma y duración de su onda característica.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Clases de sobrevoltajes	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_t \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Parámetros de voltaje estandarizado					
	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ T_t^a	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Ensayo de voltaje tolerado normalizado		Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	

Tabla 2. 4 Clasificación de los Transitorios electromagnéticos de acuerdo a su forma y duración según la Norma IEC 60071-2

De esta forma los transitorios producidos por maniobra asociadas a la operación de interruptores corresponden a la clasificación de transitorios de frente lento cuyo análisis se encuentra típicamente en el rango de tiempo de entre los 20 ms.

Además, cada tipo de transitorio electromagnético de acuerdo al tipo de fenómeno que lo produjo, este se genera en un rango de frecuencia característico de acuerdo con el CIGRE (International Council on Large Electric Systems).

CLASIFICACIÓN BANDA DE FRECUENCIAS (CIGRÉ)			
Grupo	Gama de frecuencias	Tipo de Onda	Representación
I	0,1 Hz - 3 kHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Sobrevoltajes temporales
II	50 Hz - 20 kHz	Ondas de frente lento	Sobrevoltajes por maniobra
III	10 kHz - 3 MHz	Ondas de frente rápido	Sobrevoltajes por rayos
IV	100 kHz - 50 MHz	Ondas de frente muy rápido	Sobrevoltajes por recebado en GIS

Tabla 2. 5 Clasificación de bandas de frecuencias para Transitorios electromagnéticos según CIGRE (International Council on Large Electric Systems)

Por tanto, el tipo de fenómeno transitorio que se pretende analizar en el presente trabajo se presenta para frecuencias típicas no mayores a 20 kHz.



2.2.1.3 Transitorios electromagnéticos por maniobra

Los transitorios producidos por maniobra son originados por la operación de cierre o apertura de un interruptor, a su vez estos accionamientos son causados generalmente por:

- Energización en vacío de líneas
- Reenergización de líneas
- Libramiento de fallas
- Rechazos de carga
- Conexión y desconexión de cargas

Los sobrevoltajes producidos por estas conexiones y desconexiones son sustancialmente de mayor duración que las producidas por descargas atmosféricas, sus valores de cresta pueden alcanzar hasta 4 veces la tensión nominal dependiendo del nivel de tensión del sistema, siendo este tipo de transitorios más peligrosos debido a su mayor duración y forma de onda. [17].

La energización de líneas en vacío suele generar sobretensiones de maniobra de mayor magnitud, produciendo una sobretensión máxima en cada una de las fases con una magnitud diferente debido al valor instantáneo de la tensión al momento del cierre del interruptor.

A partir de sistemas eléctricos con voltajes de operación de 230 kV y superiores es necesario considerar el análisis de las sobretensiones originadas por maniobras. [12]

2.2.1.4 Modelos para el estudio de transitorios de líneas de transmisión

Una línea de transmisión de energía eléctrica presenta 4 parámetros que afectan su capacidad para cumplir su función como parte de un sistema eléctrico de potencia, estos parámetros son: resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia.

Las líneas de transmisión pueden ser representadas a partir de diferentes modelos conocidos como: sección en π mediante parámetros concentrados, sección en T con parámetros concentrados o distribuidos, siendo los modelos de parámetros distribuidos los más precisos para la simulación transitoria de las líneas de transmisión.

La siguiente figura muestra la clasificación de los modelos de línea de transmisión para el estudio de transitorios electromagnéticos.

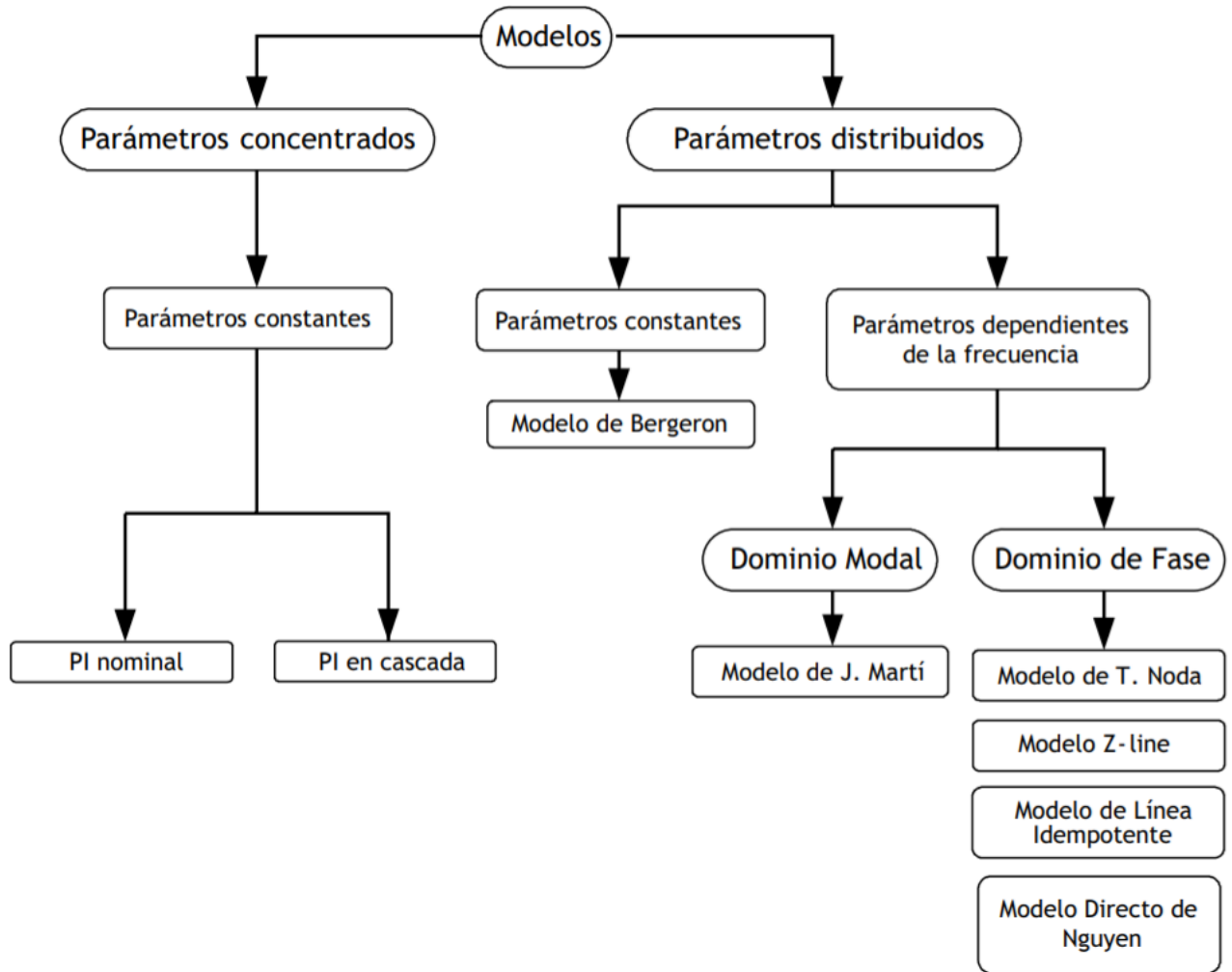


Figura 2. 6 Clasificación de los modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos

2.2.1.4 .1 Modelos de parámetros concentrados

Consiste de circuitos polifásicos π acoplados donde los parámetros R, L y C son calculados a una frecuencia dada (normalmente la frecuencia de estado estable). La principal desventaja es que presenta una pobre respuesta de la frecuencia más allá de la frecuencia a la cual fueron evaluados los parámetros, Para estudios de frente lento y rápido estos modelos no son aplicables; su utilidad se enfoca a estudios de estado estable, armónicos, resonancias entre otros.[15]

2.2.1.4.2 Modelos de parámetros distribuidos

Toman en cuenta la naturaleza distribuida de los parámetros de la línea de transmisión, basados en la teoría de onda viajera. En programas como ATP las

ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de una línea aérea o un cable con n conductores en cantidades de fase tienen un primer tratamiento que consiste en desacoplar estas cantidades de fase en n ecuaciones diferenciales sin acoplamiento en el dominio modal por medio de una matriz de transformación lineal (cambio de referencia) Q de componentes real e imaginaria, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones. El sistema de ecuaciones es solucionado en el dominio modal. Luego, la misma transformación lineal es usada para convertir la solución modal a cantidades de fase y esta transformación es la que mayor complejidad matemática presenta en su implementación debido a que Q es dependiente de la frecuencia, por lo que resulta necesario, para disminuir la carga computacional, calcular Q con un solo valor de frecuencia y usar únicamente su parte real, (las columnas de Q son rotadas para minimizar las partes imaginarias de sus elementos y los términos imaginarios resultantes son descartados). [13]

$$V_{modal} = Q^{-1} \cdot V_{fase} \tag{2.1}$$

$$I_{modal} = Q^{-1} \cdot I_{fase} \tag{2.2}$$

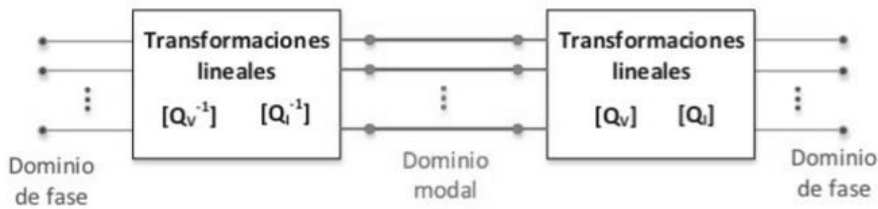


Figura 2. 7 Esquema de solución de ecuaciones de línea en el dominio modal [13]

2.2.1.4.3 Modelo de parámetros distribuidos constantes

Los parámetros R, L y C se asumen constantes y la conductancia G en paralelo es ignorada. La matriz Q se asume constante y real. Como el modelo está basado en una representación de la línea sin pérdidas, únicamente L y C son distribuidos y R está concentrada en las tres fases.

2.2.2 Modelo de línea para el modelado del anillo de 230 TYA-SNG

El modelo de línea de parámetros distribuidos que se empleara para el análisis del corredor de 230 kV TYA-SNG disponible en ATP aplicable tanto para líneas aéreas como para cables subterráneos es el modelo de onda viajera de Bergeron, desarrollado por Hermann Dommel, debido a su exactitud y excelente tiempo de respuesta computacional y el cual está basado en la propagación de las ondas en una

línea de transmisión sin pérdidas y con parámetros L y C constantes distribuidos a través de la línea de transmisión.

La figura 2.8 presenta el modelo de Bergeron para una línea de transmisión, donde las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes en los extremos de la línea esta representadas por las siguientes ecuaciones:

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_c} V_k(t) i_{kh}(t) \tag{2.3}$$

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_c} V_m(t) i_{mh}(t) \tag{2.4}$$

Donde:

$$i_{kh}(t) = \frac{1}{Z_c} V_m(t - \tau) - i_m(t - \tau) \tag{2.5}$$

$$i_{mh}(t) = -\frac{1}{Z_c} V_k(t - \tau) - i_k(t - \tau) \tag{2.6}$$

τ = Tiempo de desplazamiento de la onda viajera

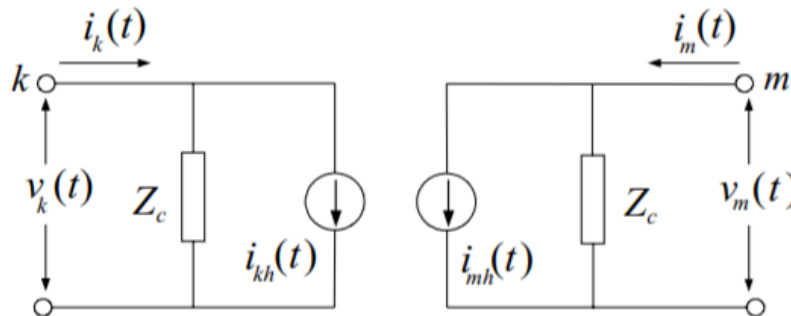


Figura 2. 8 Circuito equivalente del modelo de Bergeron

La impedancia característica Z_c se representa mediante la siguiente ecuación:

$$Z_c = \sqrt{L/C} \tag{2.7}$$

En este modelo para sistemas M-fásicos, como se mencionó en la definición del modelo de parámetros distribuidos, las líneas se desacoplan por medio del método de descomposición modal para estudiar cada modo como una línea monofásica. Esta descomposición se realiza por medio de matrices de transformación constantes con componentes reales. Debido a que los componentes de este modelo presentan dependencia de la frecuencia es necesario tener en consideración la frecuencia del fenómeno de estudio para obtener resultados exactos. [14]



2.2.3 Modelo de línea Bergeron

El modelo de línea de Bergeron en un método de estudio de transitorios electromagnéticos que se basa en soluciones en el tiempo, por ello es necesario describir las ecuaciones que rigen el comportamiento de la línea de transmisión bajo este dominio.

2.2.3.1 Ecuaciones del Telegrafista

Se trata de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales respecto a la distancia x y tiempo t , que relacionan a la corriente $i(x, t)$ con la tensión eléctrica $v(x, t)$ a lo largo de la línea y que, al resolverse, definen el comportamiento de una línea eléctrica en estado transitorio.

Al tomar en cuenta los fenómenos eléctricos tales como resistencia, inductancia y capacitancia, se puede construir el circuito equivalente en el tramo de línea $(x, x + \Delta x)$ de la Figura 2.9, con parámetros distribuidos por unidad de longitud: R , L y C respectivamente, ver Figura 2.10 [18].

Donde:

$$i(x + \Delta x, t) \neq i(x, t) \tag{2.8}$$

$$v(x + \Delta x, t) \neq v(x, t) \tag{2.9}$$

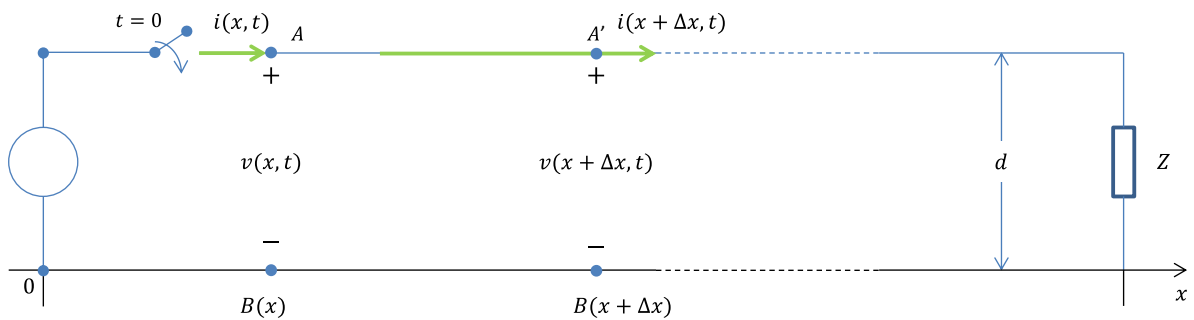


Figura 2.9 Circuito representativo de una línea de transmisión para determinar las ecuaciones del telegrafista [18]

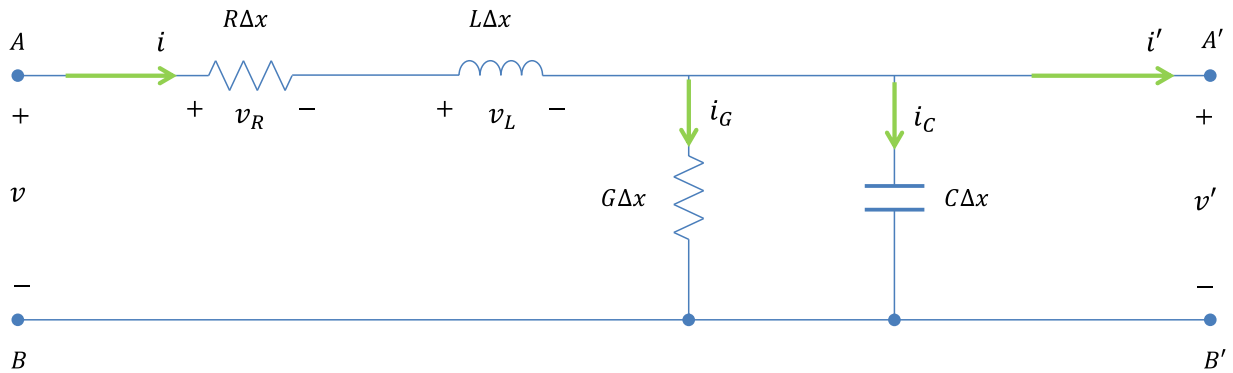


Figura 2. 10 Modelo de línea con parámetros distribuidos [18]

Para la deducción de las ecuaciones se utilizan las siguientes igualdades:

$$i(x, t) = i \tag{2.10}$$

$$i(x + \Delta x, t) = i' \tag{2.11}$$

$$v(x, t) = v \tag{2.12}$$

$$v(x + \Delta x, t) = v' \tag{2.13}$$

De la Figura 2.10:

$$i = i_G + i_C + i' \tag{2.14}$$

Considerando:

$$i_G = G\Delta x \cdot v \tag{2.15}$$

$$i_C = C\Delta x \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \tag{2.16}$$

Entonces sustituyendo (2.15) y (2.16) en (2.14):

$$i = G\Delta x \cdot v + C\Delta x \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + i' \tag{2.17}$$

Sustituyendo las igualdades (2.10) y (2.11) en (2.17):

$$i(x, t) = G\Delta x \cdot v + C\Delta x \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + i(x + \Delta x, t) \tag{2.18}$$

Reagrupando a (2.18) y dividiendo entre Δx :



$$\frac{i(x, t) - i(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = \frac{G\Delta x \cdot v + C\Delta x \cdot \frac{\partial v}{\partial t}}{\Delta x} \quad (2.19)$$

$$\frac{i(x, t) - i(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = G \cdot v + C \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.20)$$

Aplicando a (2.20) el límite cuando $\Delta x \rightarrow 0$:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{i(x, t) - i(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = G \cdot v + C \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.21)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = G \cdot v + C \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.22)$$

De forma similar a la corriente se tiene para el voltaje:

$$v = v_R + v_L + v' \quad (2.23)$$

Pero.

$$v_R = R\Delta x \cdot i \quad (2.24)$$

$$v_L = L\Delta x \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.25)$$

Sustituyendo (2.25) y (2.24) en (2.23).

$$v = R\Delta x \cdot i + L\Delta x \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + v' \quad (2.26)$$

Sustituyendo las igualdades (2.12) y (2.13) en (2.26):

$$v(x, t) = R\Delta x \cdot i + L\Delta x \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + v(x + \Delta x, t) \quad (2.27)$$

Reagrupando a (4.27) y dividiendo entre Δx :

$$\frac{v(x, t) - v(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = \frac{R\Delta x \cdot i + L\Delta x \cdot \frac{\partial i}{\partial t}}{\Delta x} \quad (2.28)$$

$$\frac{v(x, t) - v(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.29)$$

Aplicando a (4.29) el límite cuando $\Delta x \rightarrow 0$:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{v(x, t) - v(x + \Delta x, t)}{\Delta x} = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.30)$$



$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.31)$$

Considerando el Modelo de Bergeron para líneas ideales, entonces para las ecuaciones (2.22) y (2.31), $R = 0$, por lo que:

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.32)$$

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.33)$$

Sustituyendo las relaciones (2.11) y (2.12) en (2.32) y (2.33):

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = C \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} \quad (2.34)$$

$$-\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = L \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.35)$$

La solución de las ecuaciones diferenciales parciales (2.34) y (2.35) son respectivamente [17]:

$$v(x, t) = v^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + v^- \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2.36)$$

$$i(x, t) = \frac{v^+}{Z_c} \left(t - \frac{x}{v} \right) - \frac{v^-}{Z_c} \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2.37)$$

Donde v es la velocidad de propagación de las ondas viajeras a través de la línea [2].

Ahora al multiplicar a (4.37) por la impedancia característica, se tiene:

$$Z_c i(x, t) = v^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) - v^- \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2.38)$$

Sumando (2.38) a (2.36).

$$v(x, t) + Z_c i(x, t) = 2v^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (2.39)$$

Restando (2.38) a (2.36).

$$v(x, t) - Z_c i(x, t) = 2v^- \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2.40)$$

Considerando que la onda que entra es igual a la que sale de (2.40) y (2.39).

$$2v^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) = 2v^- \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad (2.41)$$

Sustituyendo la igualdad (2.40) con (2.39) y (2.38):

$$v(x, t) + Z_c i(x, t) = v(x, t) - Z_c i(x, t) \quad (2.42)$$

2.2.3.2 Desarrollo del Modelo de Bergeron

De forma similar al diagrama de Lattice, se considera un circuito donde existen ondas viajeras al inicio con una reflexión al final, ver Figura 2.11.

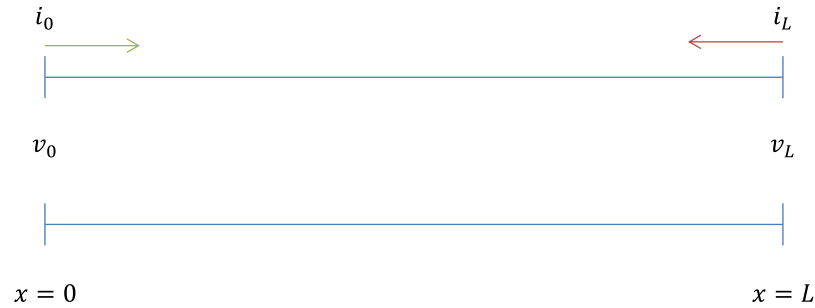


Figura 2. 11 Línea de transmisión con longitud L para determinar ecuaciones representativas del Modelo de Bergeron

Recordando la igualdad (2.41) ahora se tiene:

$$v^+(x, t) + Z_c i(x, t) = v^+(x, t) - Z_c i(x, t) \quad (2.43)$$

Para la onda que va hacia delante se sustituyen las condiciones de frontera mostradas en la Figura 2.11 en (2.43):

$$v^+(0, t - \tau) + Z_c i(0, t - \tau) = v^+(L, t) - Z_c i(L, t) \quad (2.44)$$

De forma similar, para la onda hacia atrás:

$$v^+(L, t - \tau) + Z_c i(L, t - \tau) = v^+(0, t) - Z_c i(0, t) \quad (2.45)$$

Siendo constante la longitud L , entonces para (2.44) y (2.45), se tiene respectivamente:

$$v_0^+(t - \tau) + Z_c i_0(t - \tau) = v_L^+(t) - Z_c i_L(t) \quad (2.46)$$

$$v_L^+(t - \tau) + Z_c i_L(t - \tau) = v_0^+(t) - Z_c i_0(t) \quad (2.47)$$

Despejando $i(t)$ de (2.46) y (2.47):

$$i_L(t) = \frac{v_L^+}{Z_c} - \frac{v_0^+(t - \tau)}{Z_c} - i_0(t - \tau) \quad (2.48)$$

$$i_0(t) = \frac{v_0^+}{Z_c} - \frac{v_L^+(t - \tau)}{Z_c} - i_L(t - \tau) \quad (2.49)$$

Renombrando (2.48) y (2.49):

$$i_L(t) = Y_c v_L^+ + I_{Hist}^0 \quad (2.50)$$

$$i_0(t) = Y_c v_0^+ + I_{Hist}^L \quad (2.51)$$

Donde:

$$I_{Hist}^0 = -\frac{v_0^+(t - \tau)}{Z_c} - i_0(t - \tau) \quad (2.52)$$

$$I_{Hist}^L = -\frac{v_L^+(t - \tau)}{Z_c} - i_L(t - \tau) \quad (2.53)$$

A través de las ecuaciones (2.50), (2.51), (2.52) y (2.53) se forma el circuito dual de Norton para una línea de transmisión. Ver Figura 2.12.

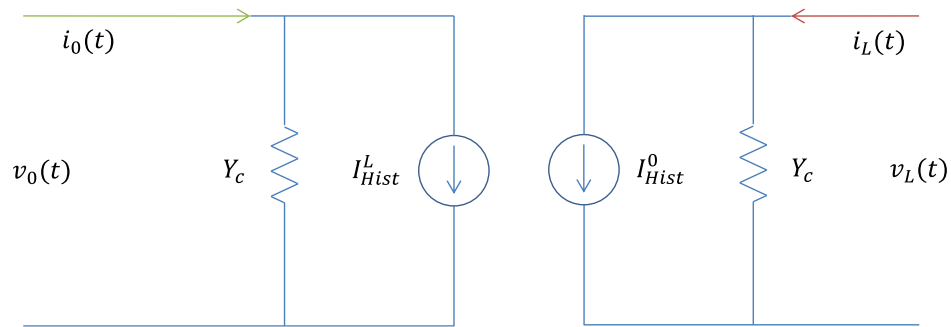


Figura 2. 12 Circuito dual de Norton para una línea de transmisión

La Figura 2.12 muestra la parte equivalente de la línea de transmisión obtenida a través de las ecuaciones de Bergeron, de forma adicional es necesario colocar la fuente de energía y la carga que se encuentre al final de línea en el punto $x = L$. Debido a que se está trabajando con fuentes de Corriente de Historia, para facilitar el cálculo solo basta con hacer un arreglo en la fuente de voltaje convirtiéndolo a fuente de corriente con una admitancia en paralelo. Ver Figura 2.13.

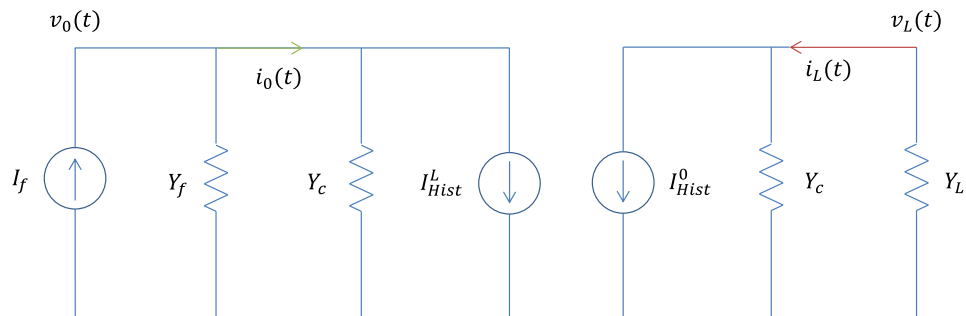


Figura 2. 13 Circuito equivalente de una línea de transmisión utilizado por el Modelo de Bergeron



La solución al circuito de la Figura 2.13 la se obtiene por medio de las siguientes ecuaciones:

Para $v_0(t)$

Se suman las fuentes de corriente y por otra parte las admitancias en paralelo, posteriormente se aplica Ley de Ohm.

$$v_0(t) = (I_f - I_{Hist}^L) * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.54)$$

Para v_L

De forma similar a lo hecho para v_0 .

$$v_L = (-I_{Hist}^0) * inv(Y_c + Y_L) \quad (2.55)$$

Para que ambas partes del circuito sean resueltas simultáneamente, se forma un sistema de ecuación de 2×2 .

$$[v] = inv[Y][I] \quad (2.56)$$

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_L \end{bmatrix} = inv \begin{bmatrix} Y_f + Y_c & 0 \\ 0 & Y_c + Y_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f - I_{Hist}^L \\ -I_{Hist}^0 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Ahora, como se pudo notar en el circuito de la Figura 2.13, las fuentes de corriente de historia se encuentran posicionadas en el lado opuesto a su nomenclatura, es decir, I_{Hist}^0 se encuentra en el lado del circuito perteneciente al final de la línea, siendo que esta fuente de corriente corresponde al inicio, lo mismo pasa con I_{Hist}^L que se coloca en su lado opuesto; lo anterior se hace con el propósito de enlazar la solución dado a que el circuito no presenta una unión entre las dos partes.

De forma similar al Diagrama de Lattice el Modelo de Bergeron puede ser visualizado a manera de ondas viajeras.

En la Figura 2.14 se encuentran dos líneas paralelas las cuales representaran el inicio y fin de la línea, lo que corresponde a la sección sombreada del circuito colocado en la parte inferior de la misma figura, donde:

t_{obs} = tiempo durante el cual se observará el comportamiento transitorio de la línea.

τ = es el tiempo que tarda la onda la energía en llegar de la fuente a la carga y se determina por medio de (2.58).

$$\tau = L/u \quad (2.58)$$

L = longitud de la línea, también indica el fin de esta.



u = velocidad de propagación de la energía, aproximadamente igual a la velocidad de la luz.

I_f = corriente de la fuente.

Y_f = admitancia de la fuente.

Y_L = admitancia de la carga.

Y_c = admitancia característica de la línea.

I_{Hist}^L = corriente de historia calculada en al final de la línea.

I_{Hist}^0 = corriente de historia calculada en al inicio de la línea.

A su vez se pueden notar líneas horizontales de color verde, estas son las partes en las que es dividido τ , donde:

$$\Delta t = \frac{\tau}{s} \quad (2.59)$$

Δt = incremento del tiempo en segundos.

s = numero arbitrario en el que es dividido a τ , para obtener mejores resultados es conveniente que $s > 1$.

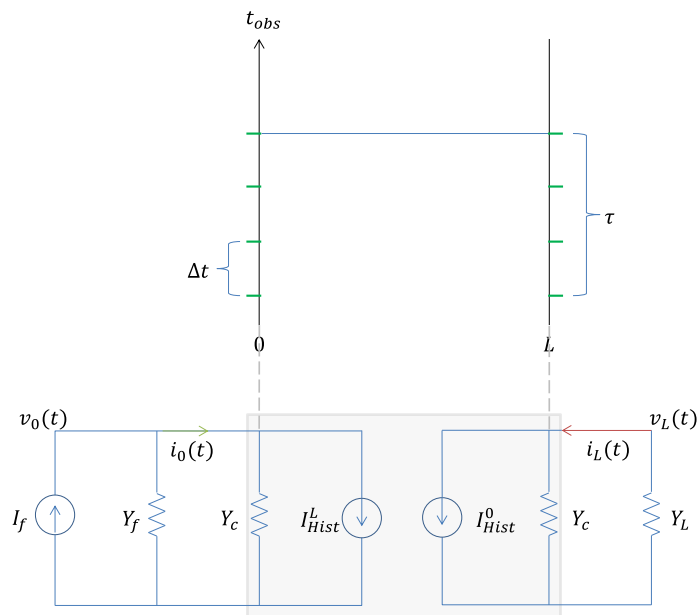


Figura 2. 14 Ilustración sobre la forma en que se obtiene la solución del Modelo de Bergeron

En la Figura 2.15 a) y b) se encuentran las dos líneas verticales ilustradas en la Figura 2.14, en ambos extremos se adiciona una sucesión numérica que va desde 1 hasta n cuyo valor se obtiene a través de (2.60).

$$Secciones = \frac{t_{obs}}{\Delta t} + s \quad (2.60)$$

Cada uno de estos números representa un valor de corriente de historia en una posición del tiempo de observación. En (2.60) se adiciona s debido a que en las ecuaciones (2.52) y (2.53) se dice que las corrientes de historia se calculan con valores de voltaje con un tiempo $(t - \tau)$ y s son las partes equivalentes de τ .

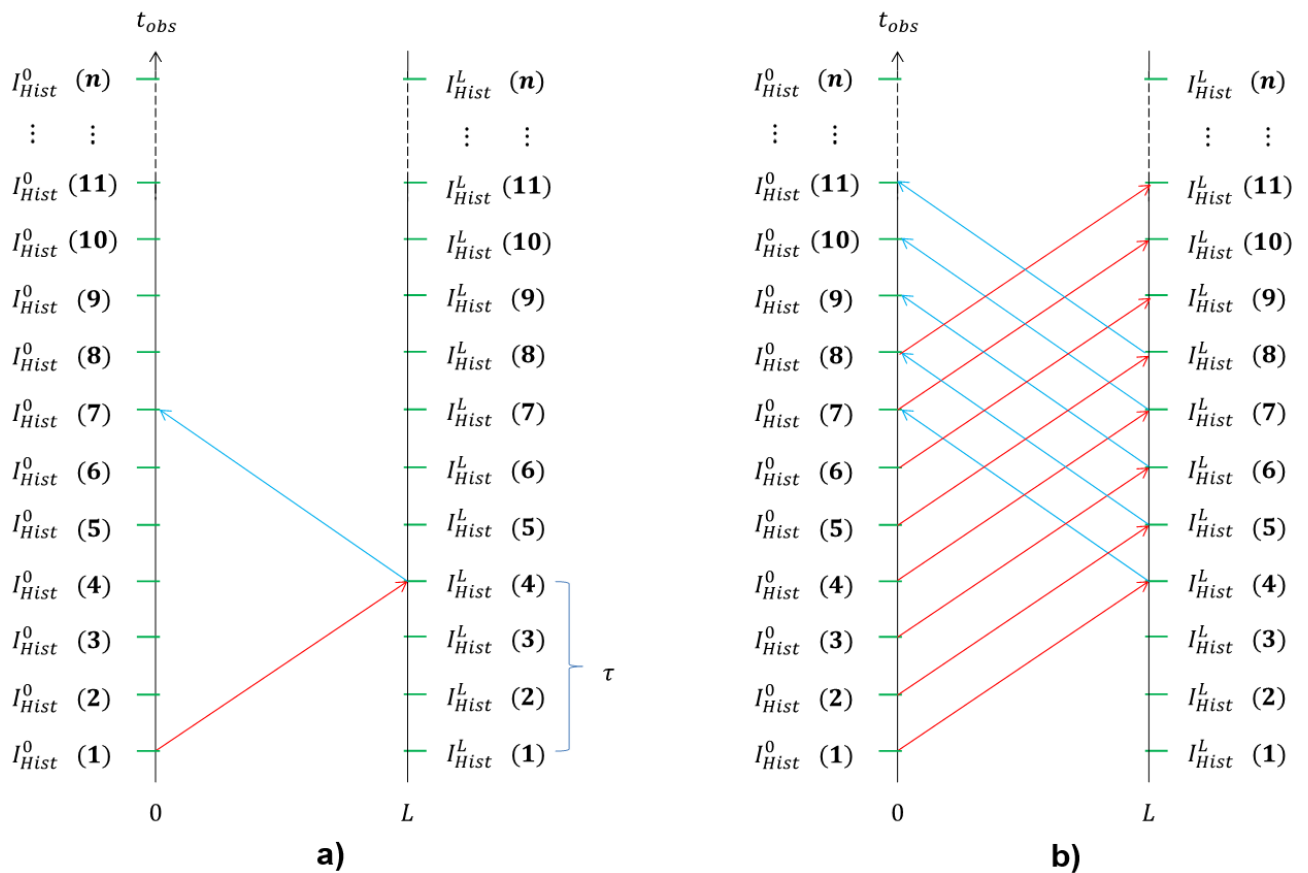


Figura 2. 15 Posición de las corrientes de historia y las ondas de energía durante el tiempo de observación

Por otra parte, se encuentra una línea roja la cual va de izquierda a derecha partiendo de la posición (1) a la (4), lo que quiere decir que para ese caso $s = 3$, esta representa una onda de energía que al llegar a (4) rebotara y regresara en un tiempo τ a la fuente, es entonces por lo que la flecha azul toca en el punto (7). Bergeron toma en cuenta que la fuente continúa inyectando energía, es decir la fuente no sólo da un impulso

en el tiempo, sino que esta continuara por cada división del tiempo de observación y por consiguiente existirán las mismas ondas reflejadas. Ver Figura 2.15 b).

Con lo antes descrito, es posible comprender de mejor manera el cómo se comportan las ecuaciones que componen al sistema indicado en (2.57). En la Figura 2.16 ahora se nota que en el lado izquierdo se añade una gráfica que muestra la forma del voltaje de la fuente, con fines explicativos se utiliza una función escalón de magnitud igual a 1 p.u. sin embargo esta fuente también puede tener forma cosenoidal.

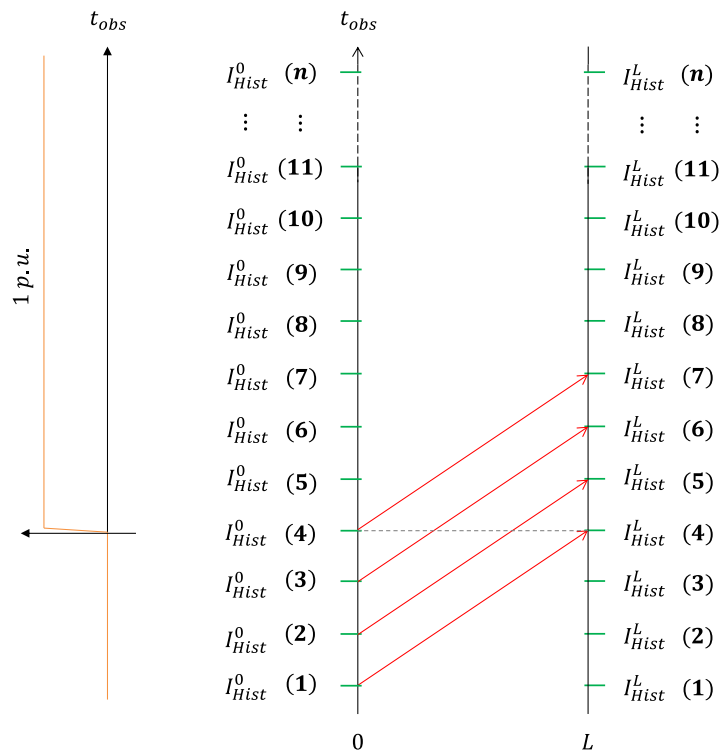


Figura 2. 16 Posición de la fuente de voltaje con respecto al diagrama de las ondas viajeras

2.2.3.3 Determinación de los primeros valores de una sobretensión transitoria por el Modelo de Bergeron

Un aspecto importante a considerar es que la fuente no adquiere valores al inicio del diagrama eso es debido a que las corrientes de historia se basan en voltajes en función de un tiempo $(t - \tau)$ por lo que cuando el tiempo es igual a cero el voltaje estará en función de $(-\tau)$ pero siendo este negativo no es posible asignar un valor diferente de cero a corrientes y voltajes, no obstante, en el diagrama se toman en cuenta. Sera hasta que $t > \tau$ cuando la fuente empiece a inyectar energía a la línea, es la razón por la que en la Figura 2.16 la función escalón inicia en el punto (4) del tiempo de observación, claro siguiendo con el ejemplo de que τ es dividido en tres partes, el valor en los puntos (1) al (4) se consideran como condiciones iniciales.

Es conveniente aclarar que el tiempo indicado en $(t - \tau)$ es diferente del tiempo de observación (t_{obs}) dado a que (t) se referirá a cada una de las partes en las que es dividido el tiempo de observación determinado por (2.60) y siendo que (t) describe a las posiciones con respecto al tiempo de observación resulta útil que (τ) se exprese de la misma manera por lo que este es reemplazado por (s) que son las partes equivalentes de (τ) . Entonces ahora de (2.52) y (2.53) se tiene:

$$I_{Hist}^0 = -\frac{v_0^+(t-s)}{Z_c} - i_0(t-s) \quad (2.61)$$

$$I_{Hist}^L = -\frac{v_L^+(t-s)}{Z_c} - i_L(t-s) \quad (2.62)$$

Para la determinación de los primeros valores de corriente de historia no es necesario resolver ninguna ecuación pues basta con observar que al no existir una fuente de excitación al inicio de la línea por consiguiente al final de la misma tampoco se tendrá tensión y corriente. Ver Figura 2.17.

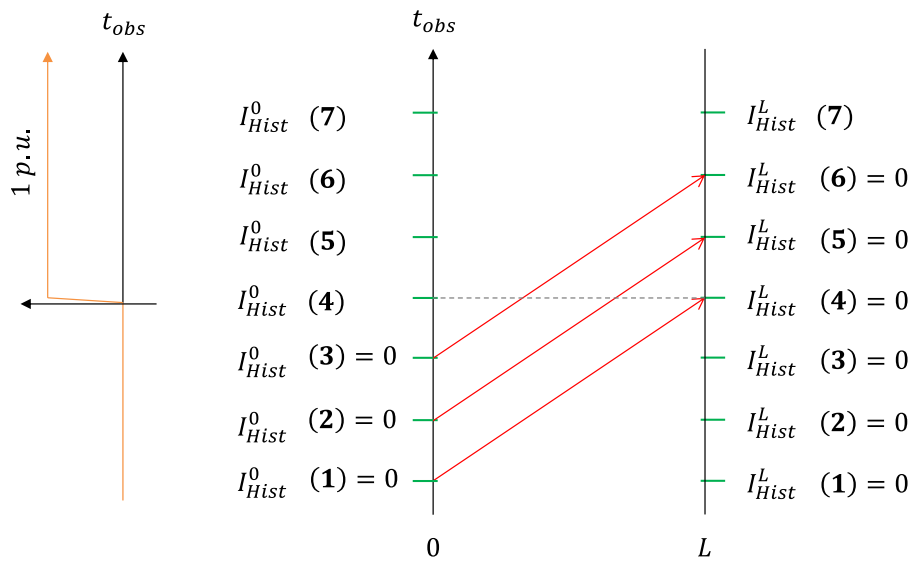


Figura 2. 17 Determinación de los primeros valores de corriente de historia

Entonces de la Figura 2.17, es posible formar los siguientes grupos de vectores:

Lado de la fuente.

$$\begin{aligned} t &= [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7] \\ I_{Hist}^0 &= [0 \ 0 \ 0] \\ v_0(t) &= [0 \ 0 \ 0] \end{aligned} \quad (2.63)$$



$$i_0(t) = [0 \ 0 \ 0 \]$$

Lado de la carga.

$$\begin{aligned} t &= [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \] \\ I_{Hist}^L &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \] \\ v_L(t) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \] \\ i_L(t) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \] \end{aligned} \tag{2.64}$$

Como se observa en los vectores (2.63), a diferencia de (6.64), sólo se colocaron valores hasta $t = 3$, es debido a que en la Figura 2.17 se dice que la fuente inicia precisamente $t = 4$, por lo que en este punto ya no se puede decir que las corrientes y voltajes serán igual a cero. A continuación, se muestra cómo se obtienen los siguientes valores hasta para $t = 7$ en el lado de la fuente.

Para $t = 4$

1. I_{Hist}^0

La ecuación de corriente de historia al inicio de la línea se encuentra en función de $v_0^+(t - s)$ e $i_0(t - s)$, por lo que es necesario resolverlas. Primero se encuentra que v_0^+ se refiere al voltaje de la fuente. Entonces:

$$v_0^+(t - s) = v_0^+(4 - 3) = v_0^+(1) = 0 \tag{2.65}$$

En el caso de la corriente i_0 , se tiene:

$$i_0(t - s) = i_0(4 - 3) = i_0(1) \tag{2.66}$$

Sólo queda determinar $i_0(1)$.

$$i_0(1) = Y_c v_0^+ + I_{Hist}^L \tag{2.67}$$

En el caso de $I_{Hist}^L(1)$ basta con observar en (2.64) para ver que tiene un valor igual a cero, lo mismo que $v_0^+(1)$ en (2.63).

Por lo tanto:

$$I_{Hist}^0(4) = 0 \tag{2.68}$$

2. $v_0(t)$

La ecuación para este parámetro solo está en función de I_{Hist}^L . Por lo tanto, es suficiente con definir los valores de sus variables:



$$v_L^+(4 - 3) = v_L^+(1) = 0 \quad (2.69)$$

$$i_L(4 - 3) = i_L(1) = 0 \quad (2.70)$$

Es entonces que $I_{Hist}^L(4) = 0$, y:

$$v_0(4) = (I_f - I_{Hist}^L) * inv(Y_f + Y_c) = I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.71)$$

3. $i_0(t)$.

La corriente de historia $I_{Hist}^L(4)$ ya ha sido calculada y debido a que en (4) la fuente empieza a inyectar energía a la línea entonces $v_0^+(4) = v_0(4) = I_f * inv(Y_f + Y_c)$.

$$i_0(4) = Y_c v_0^+(4) + I_{Hist}^L(4) = Y_c (I_f * inv(Y_f + Y_c)) + 0 = Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.72)$$

Los valores encontrados en (2.68), (2.71) y (2.72) se agregan a (2.63), para formar los grupos vectoriales que estarán almacenando los valores de voltaje y corriente que se utilizaran en los cálculos posteriores.

$$\begin{aligned} t &= [1 \quad 2 \quad 3 \quad \quad 4 \quad \quad 5 \quad 6 \quad 7] \\ I_{Hist}^0 &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad] \\ v_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad I_f * inv(Y_f + Y_c)] \\ i_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c)] \end{aligned} \quad (2.73)$$

Para $t = 5$

1. I_{Hist}^0

Realizando los mismos pasos que $t = 4$:

$$v_0^+(t - s) = v_0^+(5 - 3) = v_0^+(2) = 0 \quad (2.74)$$

En el caso de la corriente i_0 , se tiene:

$$i_0(t - s) = i_0(5 - 3) = i_0(2) \quad (2.75)$$

Determinando $i_0(2)$.

$$i_0(2) = Y_c v_0^+ + I_{Hist}^L \quad (2.76)$$

En el caso de $I_{Hist}^L(2)$ basta con observar en (2.64) para ver que tiene un valor igual a cero, lo mismo que $v_0^+(2)$ en (2.63). Por lo tanto:



$$I_{Hist}^0(5) = 0 \quad (2.77)$$

2. $v_0(t)$

Para $I_{Hist}^L(5)$.

$$v_L^+(5-3) = v_L^+(2) = 0 \quad (2.78)$$

$$i_L(5-3) = i_L(2) = 0 \quad (2.79)$$

Es entonces que $I_{Hist}^L(5) = 0$, y:

$$v_0(5) = (I_f - I_{Hist}^L) * inv(Y_f + Y_c) = I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.80)$$

3. $i_0(t)$.

La corriente de historia $I_{Hist}^L(5)$ al igual que para $v_0^+(5)$.

$$i_0(5) = Y_c v_0^+(5) + I_{Hist}^L(5) = Y_c (I_f * inv(Y_f + Y_c)) + 0 = Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.81)$$

Los valores encontrados en (2.77), (2.80) y (2.81) se agregan a (2.73).

$$\begin{aligned} t &= [1 \quad 2 \quad 3 \quad \quad 4 \quad \quad \quad 5 \quad \quad 6 \quad 7] \\ I_{Hist}^0 &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad \quad 0 \quad \quad] \\ v_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad I_f * inv(Y_f + Y_c)] \\ i_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c)] \end{aligned} \quad (2.82)$$

Para $t = 6$

1. I_{Hist}^0

Realizando los mismos pasos que $t = 5$:

$$v_0^+(t-s) = v_0^+(6-3) = v_0^+(3) = 0 \quad (2.83)$$

En el caso de la corriente i_0 , se tiene:

$$i_0(t-s) = i_0(6-3) = i_0(3) \quad (2.84)$$

Determinando $i_0(3)$.

$$i_0(3) = Y_c v_0^+ + I_{Hist}^L \quad (2.85)$$

En el caso de $I_{Hist}^L(3)$ basta con observar en (2.64) para ver que tiene un valor igual a cero, lo mismo que $v_0^+(3)$ en (2.63).

Por lo tanto:



$$I_{Hist}^0(6) = 0 \quad (2.86)$$

2. $v_0(t)$

Para $I_{Hist}^L(6)$.

$$v_L^+(6-3) = v_L^+(3) = 0 \quad (2.87)$$

$$i_L(6-3) = i_L(3) = 0 \quad (2.88)$$

Es entonces que $I_{Hist}^L(6) = 0$, y:

$$v_0(6) = (I_f - I_{Hist}^L) * inv(Y_f + Y_c) = I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.89)$$

3. $i_0(t)$.

La corriente de historia $I_{Hist}^L(6)$ ya ha sido calculada y $v_0^+(6)$.

$$i_0(6) = Y_c v_0^+(6) + I_{Hist}^L(6) = Y_c (I_f * inv(Y_f + Y_c)) + 0 = Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.90)$$

Los valores encontrados en (2.86), (2.89) y (2.90) se agregan a (2.82).

$$\begin{aligned} t &= [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7] \\ I_{Hist}^0 &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad] \\ v_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad] \\ i_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad] \end{aligned} \quad (2.91)$$

Para $t = 7$

1. I_{Hist}^0

Realizando los mismos pasos que $t = 6$:

$$v_0^+(t-s) = v_0^+(7-3) = v_0^+(4) = I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.92)$$

En el caso de la corriente i_0 , se tiene:

$$i_0(t-s) = i_0(7-3) = i_0(4) \quad (2.93)$$

Determinando $i_0(4)$.

$$i_0(4) = Y_c v_0^+ + I_{Hist}^L \quad (2.94)$$

En el caso de $I_{Hist}^L(4)$ basta con observar en (2.64) para ver que tiene un valor igual a cero, por otro lado $v_0^+(4) = I_f * inv(Y_f + Y_c)$. Por lo tanto:



$$I_{Hist}^0(7) = -\frac{I_f * inv(Y_f + Y_c)}{Z_c} - Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) = -2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.95)$$

2. $v_0(t)$

Para $I_{Hist}^L(7)$.

$$v_L^+(7 - 3) = v_L^+(4) = 0 \quad (2.96)$$

$$i_L(7 - 3) = i_L(4) = 0 \quad (2.97)$$

Entonces:

$$I_{Hist}^L = 0 \quad (2.98)$$

$$v_0(7) = I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.99)$$

3. $i_0(t)$.

La corriente de historia $I_{Hist}^L(7)$ ya ha sido al igual que $v_0^+(7)$.

$$i_0(7) = Y_c v_0^+(7) + I_{Hist}^L(7) = Y_c (I_f * inv(Y_f + Y_c)) - 0 = Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.100)$$

Los valores encontrados en (2.95), (2.99) y (2.100) se agregan a (2.91).

$$\begin{aligned} t &= [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7] \\ I_{Hist}^0 &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c)] \\ v_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad I_f * inv(Y_f + Y_c)] \\ i_0(t) &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c)] \end{aligned} \quad (2.101)$$

Ahora para el lado de la carga.

Para $t = 7$, en el lado de la carga

1. I_{Hist}^L

De forma análoga al lado de la fuente.

$$v_L^+(t - s) = v_L^+(7 - 3) = v_L^+(4) = 0 \quad (2.102)$$

En el caso de la corriente i_0 , se tiene:

$$i_L(t - s) = i_L(7 - 3) = i_L(4) = 0 \quad (2.103)$$



Entonces

$$I_{Hist}^L(7) = 0 \quad (2.104)$$

2. $v_L(t)$

Para $I_{Hist}^0(7)$.

$$v_0^+(7 - 3) = v_0^+(4) = I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.105)$$

$$i_0(7 - 3) = i_0(4) = Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.106)$$

Entonces:

$$I_{Hist}^0 = -\frac{I_f * inv(Y_f + Y_c)}{Z_c} - Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.107)$$

$$v_L(7) = 2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) * inv(Y_c + Y_L) \quad (2.108)$$

3. $i_L(t)$.

La corriente de historia $I_{Hist}^0(7)$ ya ha sido calculada al igual que $v_L^+(7)$.

$$i_L(7) = Y_c \left(2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) * inv(Y_c + Y_L) \right) - 2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \quad (2.109)$$

Los valores encontrados en (2.104), (2.108) y (2.109) se agregan a (2.64).

$$\begin{aligned} t &= [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \qquad \qquad \qquad 7 \qquad \qquad \qquad] \\ I_{Hist}^L &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \qquad \qquad \qquad 0 \qquad \qquad \qquad] \\ v_L(t) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \qquad \qquad \qquad 2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) * inv(Y_c + Y_L) \qquad] \\ i_L(t) &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \qquad \qquad \qquad Y_c (2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) * inv(Y_c + Y_L)) - 2Y_c * I_f * inv(Y_f + Y_c) \qquad] \end{aligned} \quad (2.110)$$

Para obtener la gráfica que muestre el comportamiento del voltaje al final y al inicio de la línea basta con retomar los valores obtenidos por $v_0(t)$ y $v_L(t)$ con respecto a t .



2.2.4 Características de las líneas de transmisión de anillo de 230 kV TYA-SNG

2.2.4.1 Líneas de transmisión

La línea de transmisión es el conjunto de elementos constituyen las arterias a través de las cuales fluye la energía eléctrica desde centros de generación hasta centros de consumo, de acuerdo al diseño de la línea puede ser de transmisión aérea o subterránea y dependiendo del nivel de voltaje al cual se realiza la transmisión de energía eléctrica en México se tienen clasificadas a las redes en tres categorías: transmisión (>115 kV), subtransmisión (66 kV - 115 kV) y redes de distribución (<34.5 kV), así mismo teniendo en cuenta que nuestro objeto de estudio recae en las redes de transmisión podemos agregar una tercera clasificación debido a su longitud por lo que las líneas de transmisión puede ser cortas ($L < 80$ Km), medianas ($L < 240$ Km) y largas ($L > 240$ Km), por lo que podemos incluir nuestras líneas consideradas dentro del corredor de TYA-SNG a la clasificación de líneas cortas debido a que la mayor longitud apenas alcanza los 5.4 Km. (Ver tabla 2.2).[16]

2.2.4.2 Líneas de transmisión aéreas

Infraestructura empleada por CFE en el proceso de transmisión de energía eléctrica para su transporte a partir de conductores generalmente de aluminio desnudos suspendidos en su mayoría por torres auto soportadas tipo estructurales o postes tubulares habitualmente de acero. El aislamiento entre conductores es proporcionado por el aire y el aislamiento entre conductores y tierra se obtiene por medio de cadenas de aisladores. Puesto que la mayoría del aislamiento es proporcionado por el aire, las líneas aéreas de alta tensión son generalmente el método más barato para la transmisión de energía en grandes proporciones sin embargo cuenta con limitaciones por la disponibilidad de espacio suficiente y derechos de vía para su instalación como es el caso habitual de la Zona de Transmisión Valle de México al estar inmersa en el centro de la Ciudad de México.

Los componentes principales de las líneas de transmisión aérea son:

- Estructuras
- Conductores eléctricos y cables de guarda
- Aislamiento
- Herrajes

En el proceso de transmisión la CFE usa normalmente conductores que están compuestos por almas de acero, que tienen funciones mecánicas principalmente, y externamente una o más capas de aluminio, devanadas en forma de espiral (ACSR).

Los calibres de conductores normalmente empleados en las líneas de transmisión de la CFE, son los siguientes:

- En 400 kV: 2x1113 kCM
- En 230 kV 1x1113 kCM
- En 115 kV 1x795 kCM

La siguiente tabla muestra las características técnicas del cable ACSR Cal. 1113 kCM así como de los cables de guarda más empleados para las líneas de 230 kV de acuerdo con las especificaciones CFE-E0000-18/22.

Designación	Calibre AWG o Kcmil	Hilos de aluminio Núm.	Diametro nominal	Hilos de acero Num.	Diametro nominal	Diametro nucleo de acero	Area nominal de la seccion transversal	Diametro total nominal	Peso Aprox.	Capacidad de conduccion de corriente.	Carga nominal de ruptura por tensión	Resistencia electrica de CD a 20 °C	Calibre equivalente en Cu
			mm		mm	mm	mm ²	mm	kg/km	Ampere	kg	Ohms/km	AWG/kcmil
CONDUCTOR DE ALUMINIO DESNUDO CON ALMA DE ACERO RECUBIERTOS CON ALUMINIO (ACSR/AS)													
BLUEJAY	1113	45	4	7	3	7.99	564	31.98	1819	1095	130	0.0524	700
CABLE DE GUARDA DE ACERO GALVANIZADO ALTA RESISTENCIA													
J420			9.52 (3/8")	7	3.04				406.25			4.18805	
CABLE DE GUARDA DE ACERO GALVANIZADO ALTA RESISTENCIA													
7 # 8			9.78	7	3.26				390			1.463	

Tabla 2. 6 Características técnicas de conductores ACSR/AS y cables de guarda más comunes empleados en la red de Transmisión CFE

Para los fines involucrados en el presente trabajo se muestra el tipo de torre auto soportada de doble circuito para 230 kV que forma parte de la infraestructura de la L.T. TYA-93E70-SNG, la figura 2.19 indica su dimensionamiento normalizado según el “Compendio de estructuras para líneas de transmisión de 230 kV y 400 kV” de LyFC.



Figura 2. 18 Torre Autosoportada de doble circuito de 230 kV para la L.T. TYA-93E70-SNG



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

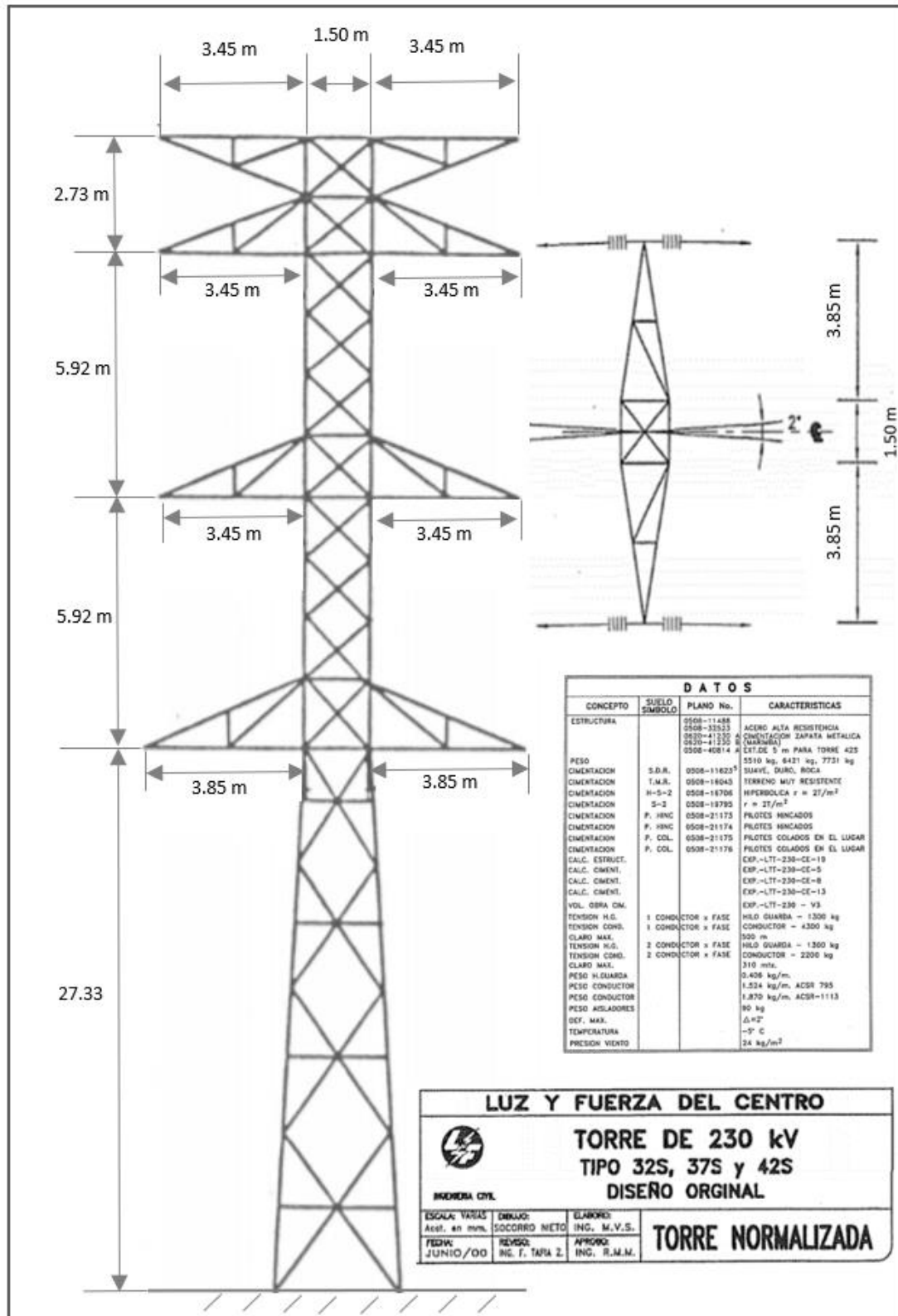


Figura 2. 19 Torre normalizada tipo Autosoportada de 230 kV (LyFC)



2.2.4.3 Cables de transmisión

En el año de 1980 el primer proyecto de cables subterráneos importante desarrollado en México, fue en una subestación de Guadalajara JAL, con un cable de 750 kCM de AL con nivel de tensión de 69 kV actualmente en operación sin fallas.

En los últimos 10 años a nivel nacional, se ha manifestado un incremento significativo en la construcción de redes subterráneas, el aumento obedece principalmente a las necesidades impuestas por el tipo de carga donde se hace importante la confiabilidad y el mejoramiento del entorno.

Los cables subterráneos de alto voltaje de C.A. tienen características eléctricas significativamente diferentes que las líneas de transmisión aérea. Las características de diseño de los cables, así como el tipo del aislamiento dieléctrico, la pantalla, en algunos casos la armadura y el espacio pequeño entre los conductores de fases, causa estas diferencias.

Debido al método de envoltura (tubo) del cable o el aterrizamiento de la pantalla tiene un impacto importante en la impedancia de secuencia cero de los cables subterráneos.

Los cables de transmisión subterráneos tienen envoltura o pantalla que son aterrizadas en una o en varias localizaciones a lo largo de la longitud del cable. Las corrientes de tierra pueden retornar a través de la pantalla o solamente por tierra, a través de la pantalla y tierra en paralelo o a través de la tierra y la pantalla de los cables adyacentes, lo cual representa una gran complejidad para su modelado debido a que sus parámetros de secuencia dependen en mucho del método de unión y aterrizado de las envolturas o pantallas, la resistividad del cable en el foso o trinchera de instalación, y la presencia de circuitos paralelos de cables, tuberías de gas, y tuberías de agua. [11]

Los fenómenos transitorios que se presentan en los sistemas de transmisión subterráneos se deben básicamente a maniobras de interruptores y fallas de aislamiento. El modelado de los sistemas subterráneos de transmisión tiene cierta similitud con los sistemas de tierra, ya que ambos se encuentran enterrados a cierta profundidad del nivel del suelo y sus campos electromagnéticos se ven afectados por la resistividad y permitividad del medio. [11]

2.2.4.4 Cable de Potencia tipo seco

Un sistema de transmisión de energía eléctrica subterráneo a partir de cables tipo seco consta de tres cables coaxiales concéntricos, enterrados a cierta profundidad del nivel del suelo, cada cable está compuesto por dos conductores metálicos

concéntricos en el cual uno es el conductor central y el otro la pantalla conductora o armadura, separados por aislantes.

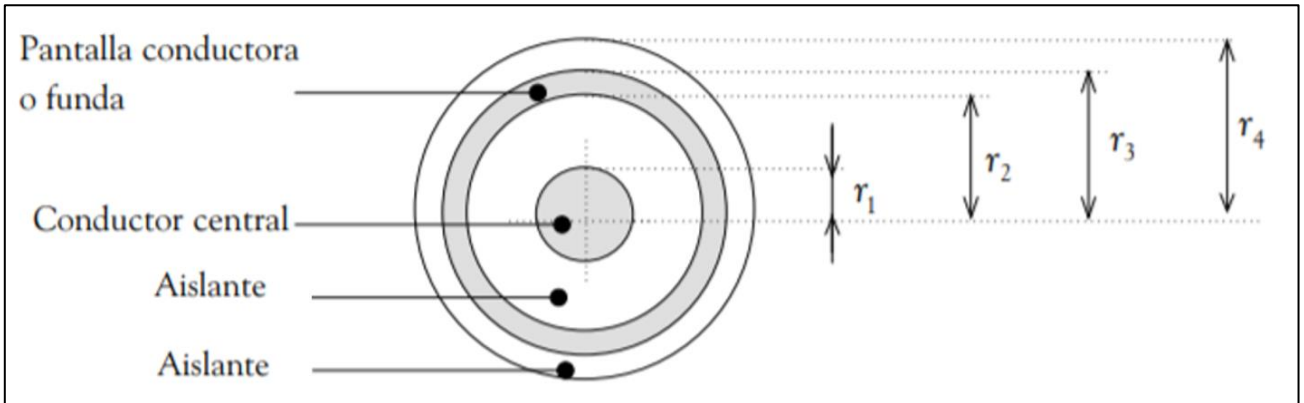


Figura 2. 20 Sección transversal de un cable de alta tensión

En la figura 2.21 se muestra la configuración geométrica de los cables de potencia tipo seco. Los aislantes utilizados en los cables de alta tensión se caracterizan por presentar bajas pérdidas dieléctricas. Entre los materiales aislantes más comúnmente utilizados se encuentra el cloruro de polivinilo (PVC), el polietileno (PE) y el polietileno de cadena cruzada (XLPE). [9]



Figura 2. 21 Características constructivas de un cable de potencia tipo XLPE

2.2.4.5 High-pressure fluid-filled (HPFF) pipe-type

Los cables HPFF (PIPE) en un rango de 200 a 275 KV han estado en operación desde 1950.

Estos tipos de cables disponen de tres núcleos individuales impregnados de líquido con aislamiento de papel protegidos por una pantalla de alambre en espiral. Las tres fases son almacenadas en una configuración equilátera dentro de un tubo de acero enterrado en el suelo y presurizado con un fluido de hidrocarburo.

La siguiente figura muestra la constitución del cable tipo PIPE a partir de sus elementos generales, además se muestra el corte de una sección de cable retirado propiedad de la CFE en la cual es posible apreciar el núcleo del conductor, el aislamiento de papel impregnado, cintas semiconductoras y pantalla a base de cinta de lámina de Cu.

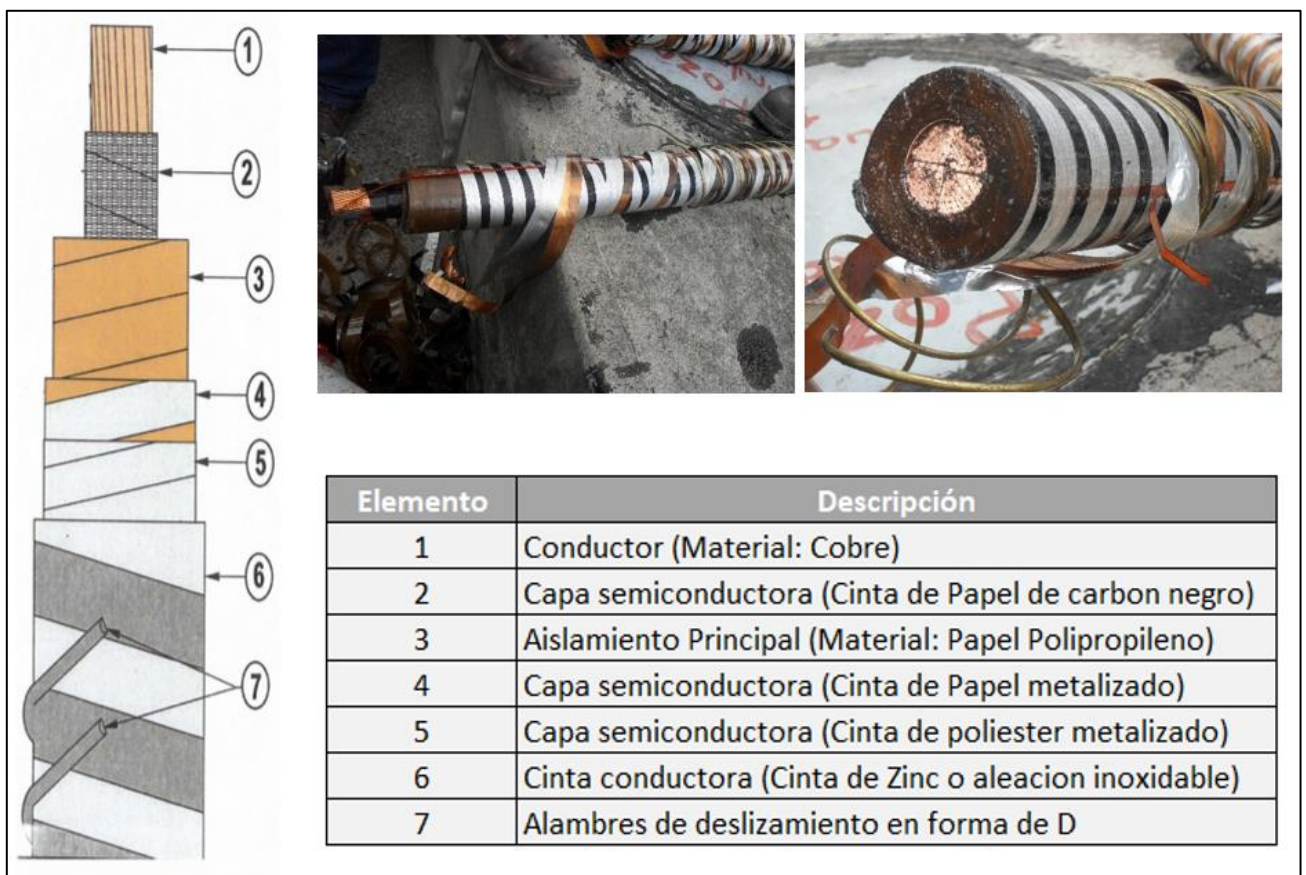


Figura 2. 22 Características de los conductores del cable Tipo Pipe (HPFF)

El tubo que aloja a los cables es de acero al alto carbón de ¼ pulgada de espesor y su diámetro varía dependiendo el calibre del cable, ya sea de 5 ¼, 6 1/8, 8 1/8 o hasta

12 pulgadas, y cuenta además con un recubrimiento exterior de polietileno amarillo de alta densidad como protección primaria contra daños físicos y electroquímicos.

En la figura 2.23 se esquematiza la sección transversal del cable tipo PIPE con el tubo envolvente y la disposición de los cables conductores en formación equilátera.

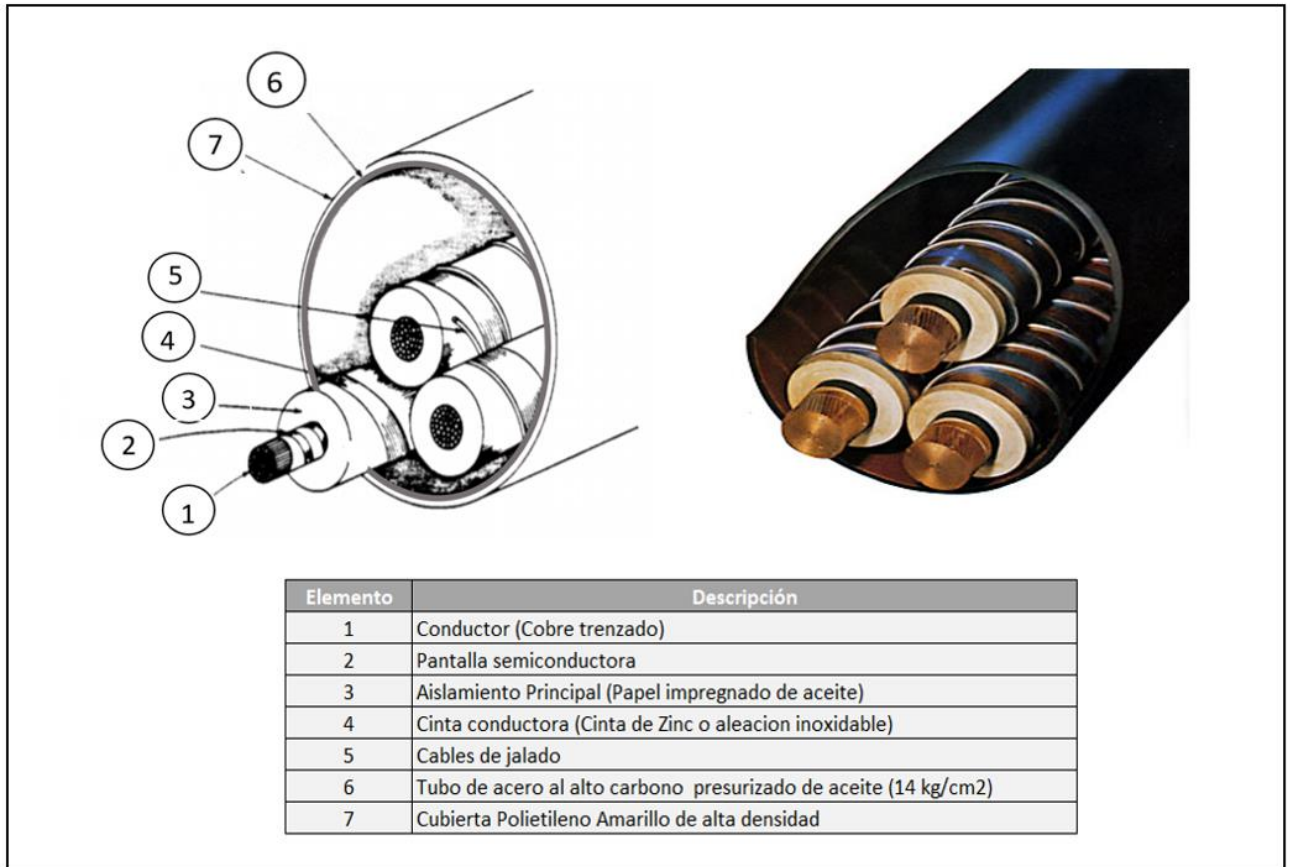


Figura 2. 23 Características del cable Tipo PIPE (HPFF)

Comparado con la geometría un cable tipo seco la geometría del tipo PIPE es más complicado. Por lo tanto, es más complicado la obtención de sus impedancias por dos razones debido a que los cables de un solo núcleo dentro de la tubería no son concéntricos con respecto a la tubería la cual al ser de acero es magnética y está sujeta a efectos de saturación dependientes de la corriente.[20]

2.2.4.5.1 Esquema de Control del sistema de cable HPFF (Tipo PIPE)

En forma general el sistema consta de 3 terminales en cada una de las subestaciones que conecta y a través de un trifurcador se integran dentro del tubo principal que los contendrá, mientras una estación de bombeo se encarga de inyectar aceite dieléctrico manteniendo una presión constante de aproximadamente 14 kg/cm² ; por su parte

un sistema de tanques conservadores presurizados con N₂ suministra el fluido aislante o almacena el excedente del mismo, mientras que un sistema de protección catódica conectado a la tubería aplica un voltaje de - 0.85 V de CD evitando la corrosión del tubo.

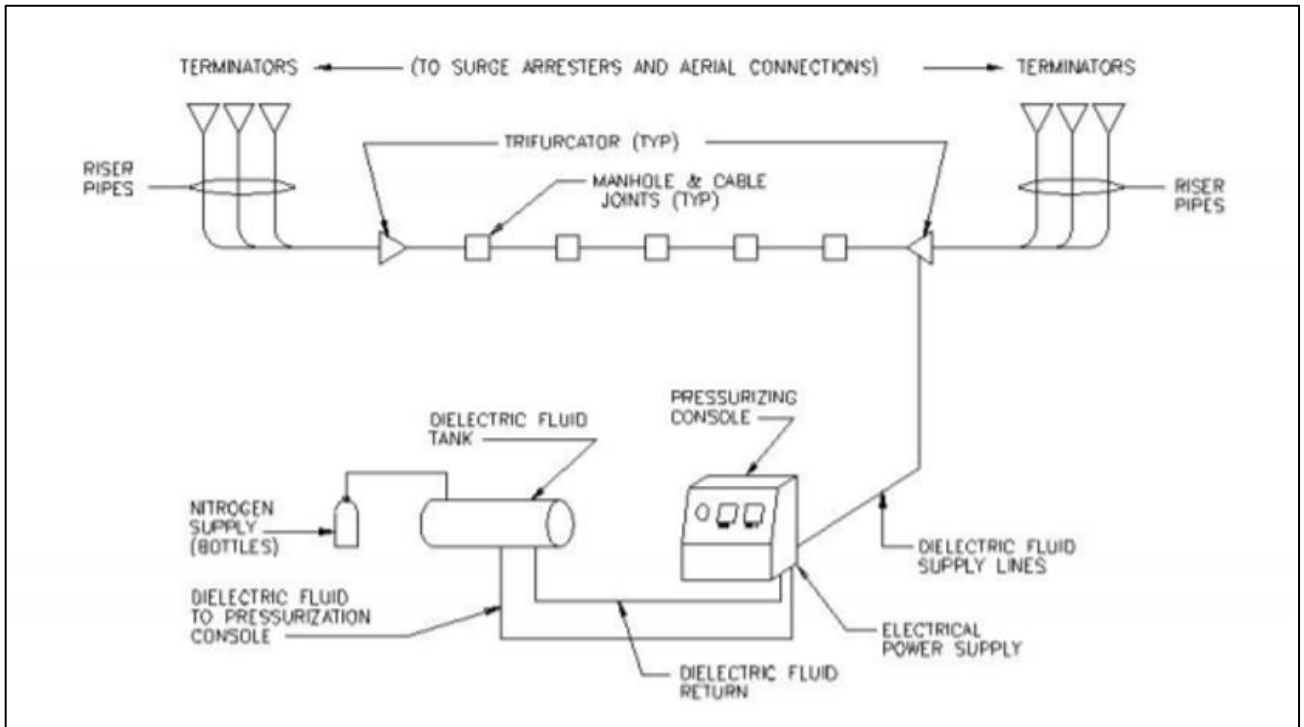


Figura 2. 24 Esquema de control del Sistema del cable Tipo PIPE (HPFF)

La presente figura muestra las terminales de transición del cable PIPE de la L.T. SNG-93E40-TYA a su llegada a la subestación Coyoacán.



Figura 2. 25 Terminales de transición de línea de Transmisión Tipo PIPE SNG-93E40-COY

En la figura 2.2 se pueden observar las líneas de 230 kV SNG-93E40-COY y SNG-93E50-COY las cuales conectan las subestaciones San Ángel y Coyoacán por medio de cable tipo PIPE distanciadas por 4 km.



a) L.T. Tipo PIPE SNG-93H40-COY y SNG-93H50-COY



b) Consolas de bombeo y contenedor presurizado



c) Protección Catódica



d) Trifurcador, toma de presurización y cable de protección catódica.

Figura 2. 26 Líneas de Transmisión Tipo PIPE SNG-93E40-COY y SNG-93E50-COY Tipo PIPE

2.2.5 Herramienta computacional ATP-EMTP

En general los problemas de transitorios electromagnéticos no pueden resolverse analíticamente, excepto en circuitos muy simples que contienen un número pequeño de elementos, para ello una de las herramientas computacionales más efectiva es el programa computacional ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP-EMTP), el cual emplea un preprocesador gráfico para ATP, ATPDraw, este crea un archivo de entrada con extensión .ATP a ser procesado por el programa, una vez leído y

procesado, ATP crea archivos .LIS y .PL4 que son reportes impresos de la visualización gráfica respectivamente.[15]

En CFE transmisión este programa es empleado como método de comprobación de las impedancias de secuencia características de líneas aéreas necesarias para el modelado de red de cortocircuito Aspen OneLiner las cuales son determinadas primeramente mediante pruebas eléctricas en campo; con un modelado apropiado ATP presenta una excelente aproximación para la determinación de parámetros de líneas aéreas.

2.2.6 Proceso de para el análisis de sobretensiones del corredor de 230 TYA-SNG

Proceso general para el análisis en ATP de las sobretensiones transitorias generada en los nodos del anillo de 230 Kv TYA-SNG.

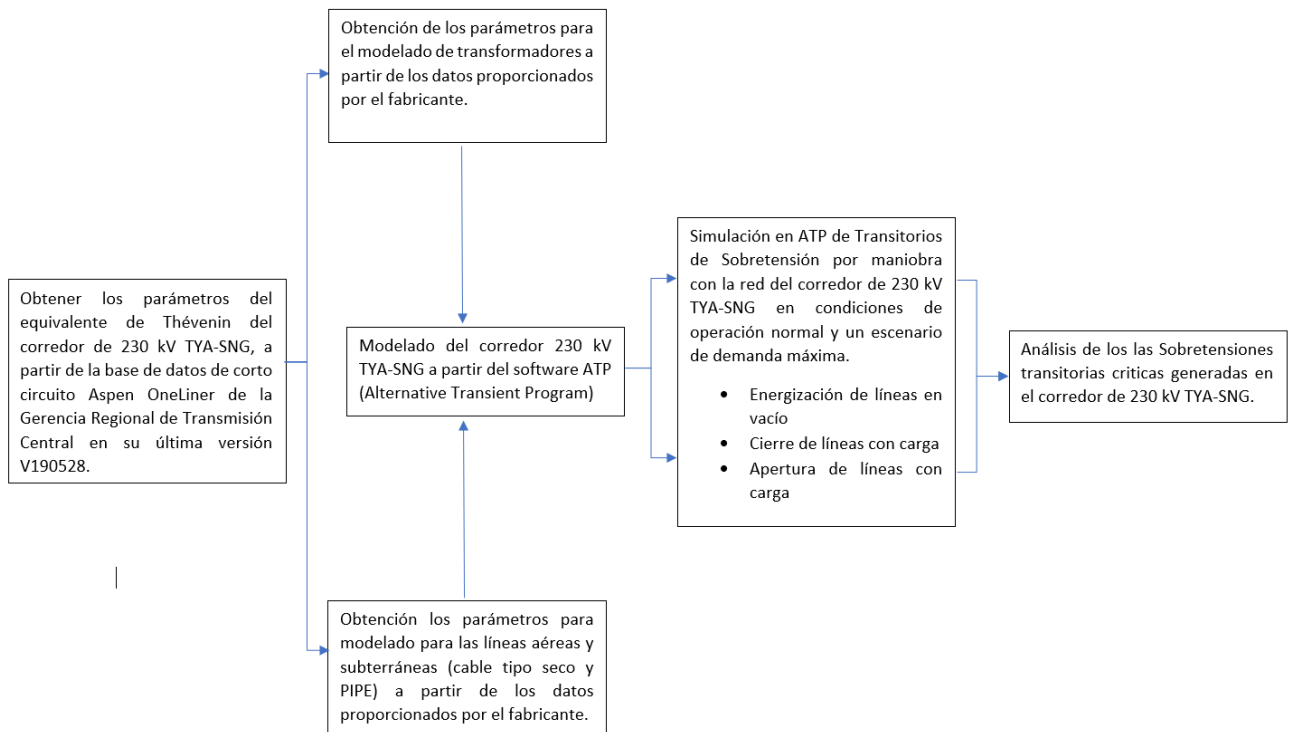


Figura 2. 27 Proceso para el análisis de las sobretensiones por maniobra del anillo de 230 kV TYA-SNG

2.2.5 Simulación de transitorios

Los fenómenos transitorios han obligado a que se desarrollen modelos matemáticos detallados para que se puedan reproducir con la mayor exactitud posible el comportamiento de los elementos componentes de los sistemas de potencia de



interés. En el presente trabajo es de nuestro interés observar cómo se aplica la utilización del Software ATP para la simulación de los transitorios en el anillo de 230 kV TYA-SNG.

La tarea de simulación implica el conocimiento del sistema a simular y la obtención de parámetros reales para la modelación de las componentes del sistema que reproduzcan resultados significativos. Sobre este último punto se basa el mayor desafío, pues puede llegar a ser muy difícil contar con toda la información necesaria y aún más difícil será dar la interpretación de estos parámetros para dar forma al modelo o esquema representativo del sistema.

Capítulo III

Modelado en ATP del anillo de 230 kV TYA - SNG

3.1 Equivalente de red del anillo de 230 kV TYA-SNG en Aspen OneLiner

Para el presente estudio de transitorios de sobretensión por maniobra se considera el equivalente de red del corredor de 230 kV TYA-SNG de la base de datos de cortocircuito ASPEN OneLiner de la Gerencia Regional de Transmisión Central en su última versión V190528 del archivo “SIN(MAX-MAX)GRTC_17-AGOSTO-2018_V190528”.

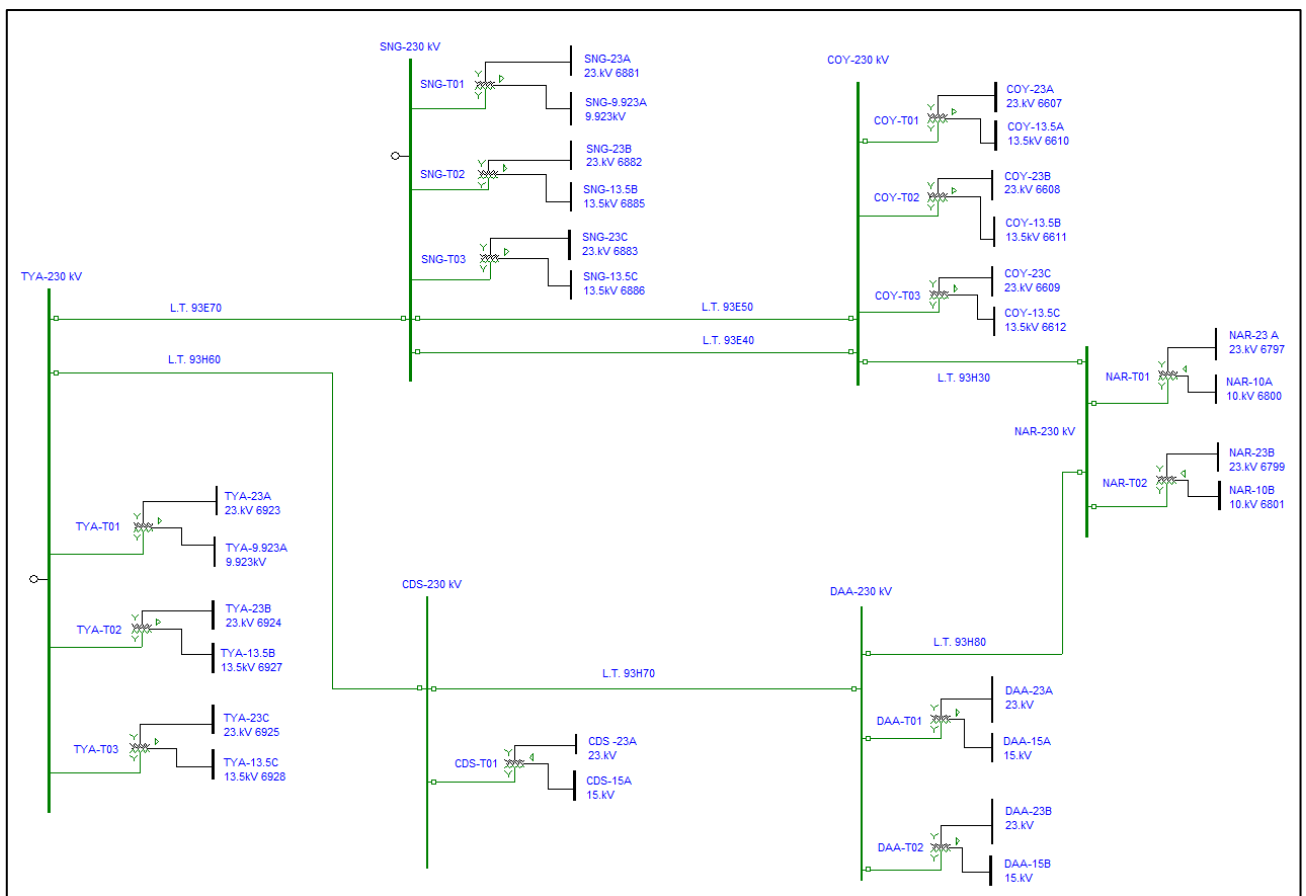


Figura 3. 1 Equivalente de red del corredor de 230 kV TYA-SNG a partir de la base de datos en Aspen OneLiner

A partir del presente equivalente de red se realizará el modelado de los elementos que la constituyen (Fuentes, transformadores líneas y cargas) para el programa computacional ATP-EMTP.

3.2 Modelamiento del equipamiento

En esta parte del presente trabajo se describen los modelos utilizados para la realización de los estudios de transitorios electromagnéticos generados por maniobra y las consideraciones tomadas para la elección de los modelos y sus parámetros.

3.2.1 Modelado del equivalente de red

A partir del equivalente de red en Aspen OneLiner de la figura 3.1 se obtiene los respectivos parámetros de secuencia (+) y (0) para los equivalentes de Thévenin en los nodos de la S.E. San Angel (SNG) y la S.E. Tacubaya (TYA) respectivamente.

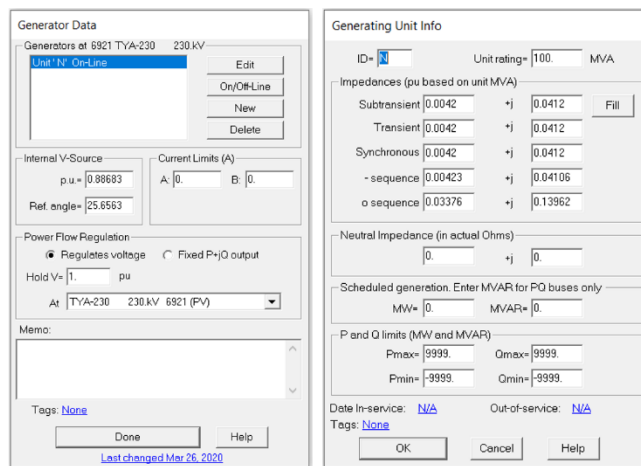


Figura 3. 2 Parámetros en Aspen OneLiner de secuencia del equivalente de Thévenin para el nodo de la S.E. SNG

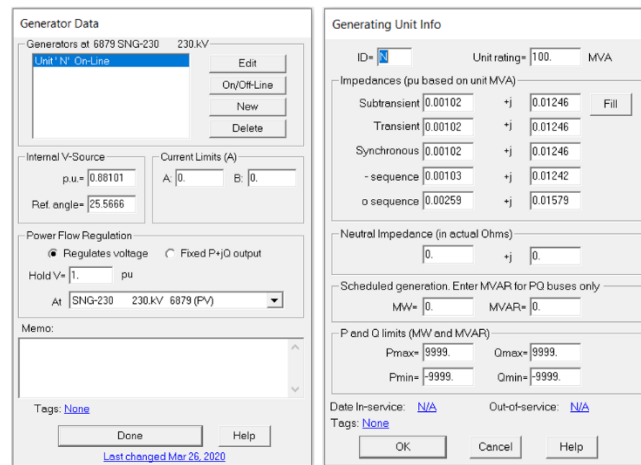


Figura 3. 3 Parámetros en Aspen OneLiner de secuencia del equivalente de Thévenin para el nodo de la S.E. TYA

El equivalente Thevenin será representado en ATP por medio una fuente trifásica senoidal (Type 14, AC 3PH Steady-State) constituida por tres fuentes monofásicas en conexión estrella, en la cual se modelan los parámetros de voltaje de la red (230 kV), como se observa en la figura 3.4 para las fuentes de los nodos en las subestaciones TYA y SNG.

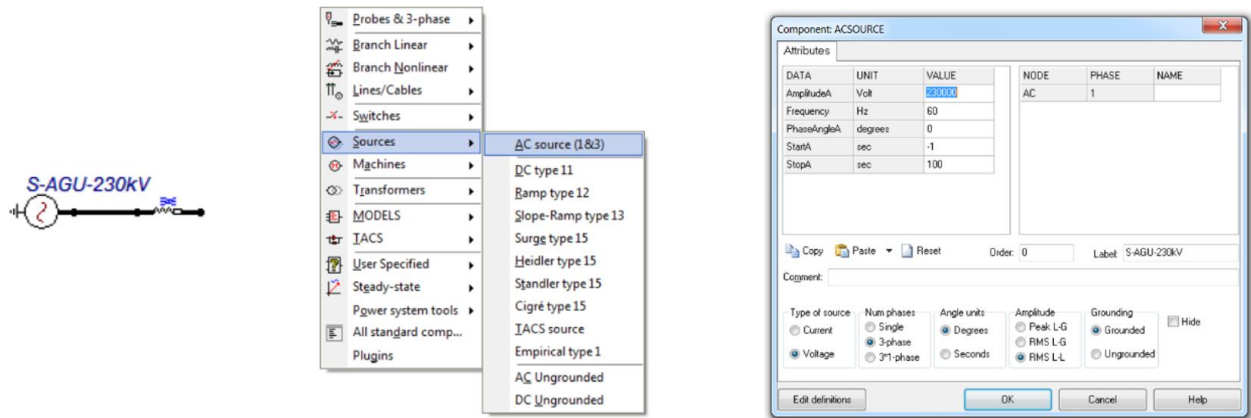


Figura 3. 4 Parámetros de modelado en ATP para la fuente de voltaje del equivalente de red

Por su parte las impedancias de secuencia positiva y cero del equivalente se modelan acoplando en serie con la fuente un modelo LR de parámetros concentrados, en el cual los valores de secuencia positiva y cero obtenidas en por unidad para las fuentes equivalentes se deben pasar a Ohms (Ω) en cuanto a la parte resistiva y en mili-henrios (mH) para la reactancia.

Empleando las siguientes ecuaciones obtendremos los valores referidos necesarios para el modelado de las fuentes de voltaje en ATP:

$$Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} \tag{3.1}$$

$$Z_{p.u.} = \frac{Z}{Z_{base}} \tag{3.2}$$

$$X_L = 2\pi fL \tag{3.3}$$

Considerando como parámetros base para la red de 230 kV los mostrados en la siguiente tabla:

PARAMETROS BASE		
MVA base	100	MVA
VL-L base	230	kV
Z base	529	Ω

Tabla 3. 1 Parámetros base para la red de 230 kV

De esta manera los parámetros de secuencia para los equivalentes de Thévenin de la red de Aspen OneLiner en p.u. de las tablas 3.2 son convertidos a parámetros de ATP mostrados en la tabla 3.3.

PARAMETROS D EQUIVALENTE DE THEVENIN EN NODO DE S.E. TYA 230 kV			
Impedancias (Valores en p.u. a una potencia base de 100 MVA)			
Z Subtransitoria	0.0042	+j	0.0412
Z Transitoria	0.0042	+j	0.0412
Z Sincrona	0.0042	+j	0.0412
Z Secuencia Negativa	0.00423	+j	0.04106
Z Secuencia Cero	0.03376	+j	0.13962

PARAMETROS D EQUIVALENTE DE THEVENIN EN NODO DE S.E. SNG 230 kV			
Impedancias (Valores en p.u. a una potencia base de 100 MVA)			
Z Subtransitoria	0.00102	+j	0.01246
Z Transitoria	0.00102	+j	0.01246
Z Sincrona	0.00102	+j	0.01246
Z Secuencia Negativa	0.00103	+j	0.01242
Z Secuencia Cero	0.00259	+j	0.01579

Tabla 3. 2 Parámetros de secuencia en Aspen de equivalentes de Thévenin para la red de 230 kV

PARAMETROS R Y L DEL EQUIVALENTE DE THEVENIN EN EL NODO DE LA S.E TYA 230 kV		
Impedancia	Ω	mH
Z secuencia Positiva	2.2218	57.81250256
Z secuencia Cero	17.85904	195.9170293

PARAMETROS R Y L DEL EQUIVALENTE DE THEVENIN EN EL NODO DE LA S.E SNG 230 kV		
Impedancia	Ω	mH
Z secuencia Positiva	0.53958	17.48407238
Z secuencia Cero	1.37011	22.15678193

Tabla 3. 3 Parámetros de secuencia en ATP de equivalentes de Thévenin para la red de 230 kV

La figura 3.5 muestra los valores de impedancia introducidos para para el modelado del equivalente de red en el nodo de la subestación TYA.

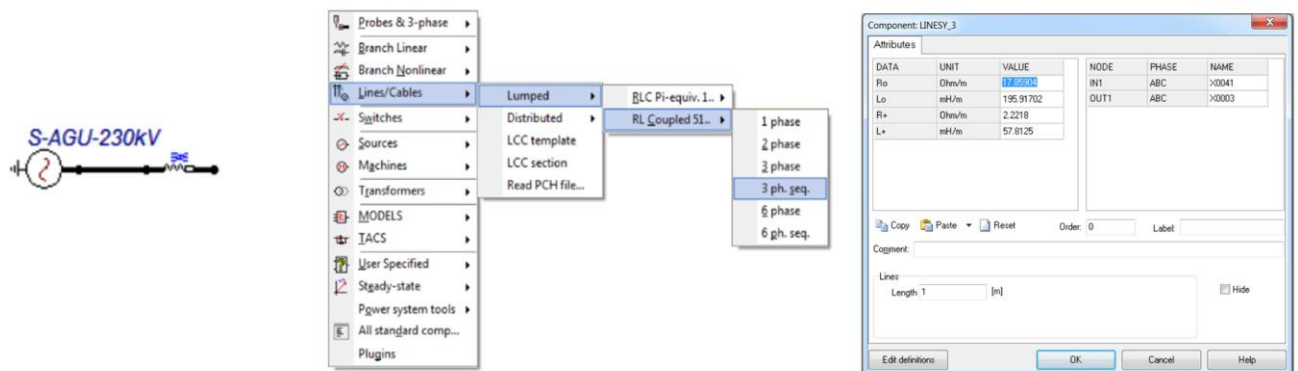


Figura 3. 5 Parámetros de modelado en ATP de impedancia de equivalente de red en el nodo S.E. TYA

3.2.2 Modelado de transformadores de potencia

ATP nos ofrece la posibilidad de trabajar con diferentes modelos de transformadores, para llevar a cabo el estudio de diferentes transitorios electromagnéticos, según la necesidad y también da la posibilidad de configurar la constitución de nuestro transformador.

Para el modelado de los transformadores de potencia se empleará la subrutina de modelado BCTRAN disponible en ATP.

Este modelo surge para completar las carencias que tiene el modelo saturable cuando se usa en estudios de transformadores trifásicos. Este tipo de modelo tiene la peculiaridad de realizar una representación lineal del núcleo en forma de matrices de impedancias o admitancias en derivación, teniendo en cuenta los acoplamientos entre devanados y las pérdidas de histéresis.

El modelo de BCTRAN solicita los datos del transformador de manera muy estándar, voltaje de línea, potencias por devanado, grupo de conexión, impedancias de cortocircuito, perdidas en corto y perdidas en vacío, además permite introducir tanto impedancias de secuencia positiva como de secuencia cero si se cuenta con ellas de lo contrario se asume que son igual a las de secuencia positiva.[15]

La figura 3.6 muestra la opción del transformador BCTRAN y sus ventanas de configuración.

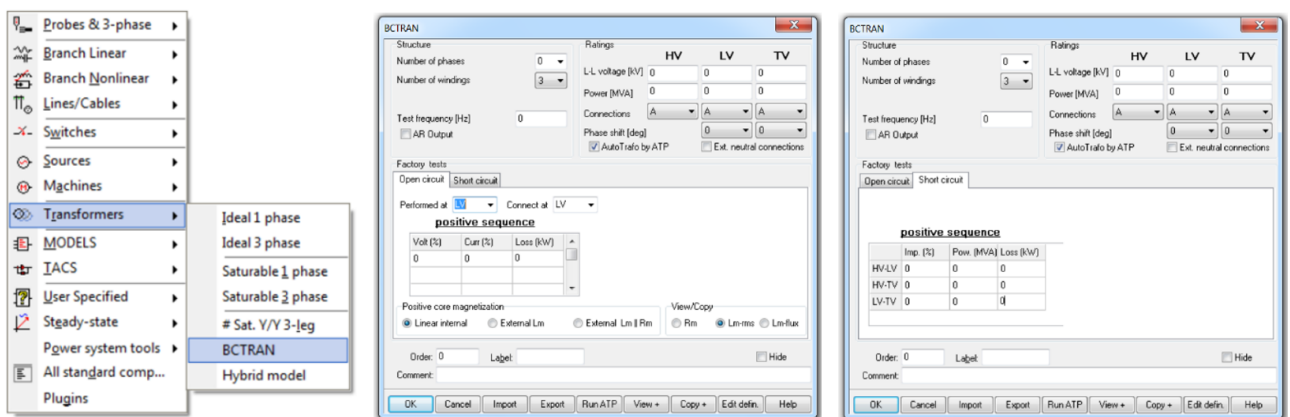


Figura 3. 6 Ventana de parámetros en ATP del modelo de transformador BCTRAN

A continuación, se muestra la configuración del modelo BCTRAN para el transformador NAR-T01 de 220/23/10 kV; Y-Y-D de 60 MVA.

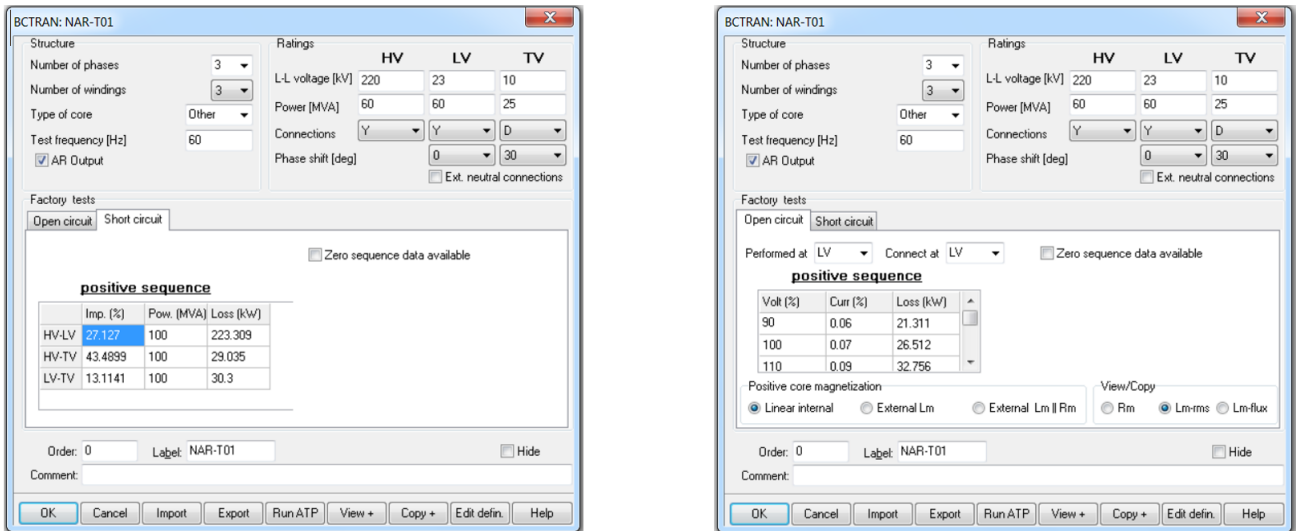


Figura 3. 7 Parámetros de modelado ATP del transformador NAR-T01

Los datos generales y valores de las impedancias requeridas para el modelado son obtenidas a partir del formato normalizado “Características de Transformadores” de la base de datos de la Subgerencia de Análisis de Redes ZTVMS (figura 3.8), los cuales su vez son elaborados de acuerdo con la información proporcionada en las placas de datos del transformador.

COORDINADORA DE PROTECCIONES, COMUNICACIONES Y CONTROL SUBGERENCIA DE ANÁLISIS DE REDES					
CARACTERÍSTICAS DE TRANSFORMADORES					
Nombre de la instalación	Nomenclatura	Transformador	X	Marca	N° de Serie
BARVARTE	NVR-T01	Autotransformador		IEH	24-7384
Año de fabricación	2009				
Tensión de operación (kV)	Forma de núcleo	N° Fases	N° Devanados		
230	COLUMNAS	3	3		
Nivel de Impulso Onda Completa (kV)	Pesos Aprox. (Kg)				
Primario 900	Núcleo 60450				
Secundario 150	Tanque 43910				
Terciario 110	Aceite 56864				
Neutro 150	Total 161224				
Conceptos	Primario (H)	Secundario (X)	Terciario (T)		
Voltaje nominal (kV)	220	23	10		
Corriente nominal (Amp)	157.46	1506.14			
Conexión	Y	Y	D		
N° de taps					
BIL					
Impedancia @ MVA Nominal	H-X	H-T	X-T		
% de impedancia	17.79	7.13	2.15		
Potencia (MVA)	60.0	15.0	15.0		
M a V a A	OA	FA1	FA2		
5	38	45	60		
5	45	60	25		
5	60	25			
TAPS	CONEXIÓN	VOLTAJE (kV)	AMPS (OA)	AMPS (FA1)	AMPS (FA2)
Cálculo Impedancias	H-X	H-T	X-T		
% Z @100 MVA	27.1278	43.4899	13.1141		
pu Z @100 MVA	0.27128	0.43490	0.13114		
pu Z Devanado @100 MVA	H	X	T		
	0.2875	-0.0162	0.1474		
Observaciones: Impedancias de secuencia positiva. Nota: Se modifica potencia base de Z-HX (+) a 60 MVA de acuerdo con datos del protocolo de pruebas de fabrica debido a inconsistencia con la placa de datos.					
Elaboró: ORP				Fecha: 19-mar-20	

Diagrama Trifásico

Diagrama Vectorial

Figura 3. 8 Formato normalizado CFE “Características de Transformadores”



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Las impedancias para el modelado en ATP son introducidas referidas a un valor base de 100 MVA.

Mientras que los valores referidos a las pérdidas en vacío (circuito abierto) se obtienen de los formatos de prueba de fabrica del equipo entregados durante su adquisición, para el caso de este transformador se tienen los siguientes datos:

- Pérdidas de Vacío

11. MEDICION DE PERDIDAS DE VACIO A 60 Hz.					Instrumentos Utilizados: Series:			
Normas Aplicada: NMX - J - 169, IEEE57.12.90.					Equipo: LMS 4000 / 100			
Método de Prueba: Excitación con una fuente trifásica en el devanado de B.T.					Instructivo: IACT - 217			
Prueba 2 al 100% de su tensión nominal					23 000 V			
Lectura	Tensión Media en Volts	Tensión Eficaz en Volts	Corriente en Amperes	Potencia en Watts	Cálculos Finales			
					W Reales	26 512	% Iexc	0,07
					W Gar.	26 800	%IexcGar	0,10
X 1	23 022	23 001	0,772	9 048	Diferencia	288	Diferencia	0,03
X 2	22 966	22 952	1,339	9 766	2		2	
X 3	23 030	23 038	1,050	7 688	.....Resultado : SATISFACTORIO			
	23 006	22 997	3,162	26 502				

Figura 3. 9 Pérdidas de vacío al 100 % de la tensión nominal del transformador NAR-T01

Del formato de pruebas de fabrica se obtiene los valores referentes a las pérdidas en Watts así como la corriente asociada en % de la corriente nominal del devanado en el cual se efectúa la prueba de pérdidas de vacío aplicando un voltaje al 90%, 100% y 110 % del su voltaje nominal en el devanado de baja tensión. En este caso la figura mostrada corresponde a las pérdidas de circuito abierto al aplicar el 100 % de la tensión nominal (23 kV), midiendo una pérdida de 26,512 W y registrando una corriente de excitación que representa el 0.07 % de la corriente nominal en baja. (Ver anexo A)

- Pérdidas de cortocircuito

Estas pérdidas se determinan durante las pruebas de cortocircuito de fábrica como se muestra en el siguiente formato proporcionado para el transformador NAR-T01.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

14. PERDIDAS DEBIDAS A LA CARGA E IMPEDANCIA A 60 Hz. Normas Aplicada : NMX - J - 169, IEEE57.12.90. Método de Prueba: Fuente trifasica en alta tensión, corto circuito en baja tensión. Instructivo : IACT - 218					Instrumentos Utilizados: Series: Equipo : LMS 4000 / 100 Termómetro. 4594				
Cap. kVA.	36 000	Lectura	Corriente	Tensión	Potencia	Capacidad kVA.	36 000	45 000	60 000
Pos. AT	17	H1	94,08	23 409	30 194	W Medidos	79 445	124 437	223 309
Pos. BT	3	H2	94,58	23 492	23 485	I2R Ambiente	59 276	92 619	164 657
I nom.	94,48	H3	94,84	23 531	25 766	Ind. Ambiente	20 169	31 818	58 652
Temp.° C	22,9		94,50	23 477	79 445	Ind. a 75° C	16 774	26 462	48 779
						I2R a 75° C	71 274	111 366	197 984
						Wr a 75° C	88 048	137 828	246 764
						W en Vacío	26 512	26 512	26 512
						W Totales	114 560	164 340	273 276
						W Garantía.	114 640	164 050	270 800
						Diferencia	80	290	2 476
						Resultado :			
						.....SATISFACTORIO			
						% Z a 75° C	10,67	13,33	17,79
						% Z Gar.	10,80	13,50	18,00
						% Diferencia	1,19	1,24	1,18
						Resultado :			
						.....SATISFACTORIO			
Este informe solo cubre los resultados de prueba realizados al transformador indicado. Se prohíbe la reproducción parcial o total del informe, sin autorización escrita de Industrias IEM, S.A. de C.V.									
 Oscar Hinojosa Wences Elaboró : Piso de Pruebas (Nombre y Firma)		 Raúl Cruz Arrieta Revisó : Proyectos de Ingeniería (Nombre y Firma)		 Carlos Selvin Pérez Aprobó : Aseg. de la Calidad. (Nombre y Firma)		 Rogelio Ramírez Ramírez Aprobó : Inspector CIDECA (Nombre y Firma)			

Figura 3. 10 Perdidas de cortocircuito del transformador NAR-T01

En el protocolo de pruebas de fábrica (Ver anexo A), la selección de las pérdidas de la impedancia de acoplamiento mutuo se realiza en correspondencia con la posición del tap de los cambiadores de derivación y la potencia a la cual fue tomada la impedancia considerada para el modelado. Para el caso del equipo NAR-T01 las pérdidas medidas para la impedancia de acoplamiento Z H-X medida a una potencia de 60 MVA con el cambiador de derivaciones en sus posiciones nominales tanto en alta (Pos. 17) como en baja (Pos.3) es de 223.309 kW.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

3.2.2.1 Resumen de parámetros para modelado de transformadores en ATP mediante la rutina BCTRAN

SUBESTACION	TRANSFORMADOR	DATOS DE MODELADO EN ATP											
		Marca	No. Fases	No. Devanados	Frecuencia (Hz)	Voltaje L-L (kV)			Potencia nominal (MVA)			Conexión	
						HV	LV	TV	H	L	T		
NARVARTE	NAR T01	IEM	3	3	60	220	23	10	60	60	25	Y-Y-D	
		DATOS DE PRUEBA EN FABRICA											
		Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)	Loss (KW)			
							90		0.06	21.311			
							100		0.07	26.512			
		110		0.09	32.756								
		Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)	Curr (%)	Loss (KW)			
	HV-LV					27.1278	100	223.309					
	HV-TV					43.4899	100	29.035					
	LV-TV					13.1141	100	30.300***					
	CONDESA	CDS T01	SIEMENS	3	3	60	230	23	15	60	60	25	Y-Y-D
			DATOS DE PRUEBA EN FABRICA										
			Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)	Loss (KW)		
								90		0.054***	21.878***		
100								0.0827	28.66				
110			0.095***	34.914***									
Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)	Curr (%)	Loss (KW)					
				HV-LV		29.5278	100	77.58					
				HV-TV		63.8889	100	26.7					
				LV-TV		103.8889	100	30.3					
DIANA		DAA T01	WEG	3	3	60	230	23	15	60	60	25	Y-Y-D
			DATOS DE PRUEBA EN FABRICA										
			Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)	Loss (KW)		
								90		0.056	22.873		
	100							0.072	28.99				
	110		0.111	37.747									
	Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)	Curr (%)	Loss (KW)				
					HV-LV		29.033	100	221.707				
					HV-TV		42.883	100	28.959***				
					LV-TV		8.95	100	30.300***				
	DAA T02	WEG	3	3	60	230	23	15	60	60	25	Y-Y-D	
		DATOS DE PRUEBA EN FABRICA											
		Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)	Loss (KW)			
							90		0.056	22.873			
100							0.072	28.99					
110		0.111	37.747										
Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)	Curr (%)	Loss (KW)					
				HV-LV		29.033	100	221.707					
				HV-TV		42.883	100	28.959***					
				LV-TV		8.95	100	30.300***					

Tabla 3. 4 a) Parámetros de modelado en ATP de transformadores del anillo de 230 kV TYA-SNG



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

SUBESTACION	TRANSFORMADOR	DATOS DE MODELADO EN ATP												
		Marca	No. Fases	No. Devanados	Frecuencia (Hz)	Voltaje L-L (kV)			Potencia nominal (MVA)			Conexión		
						HV	LV	TV	H	L	T			
TACUBAYA	TYA T01	IEM	3	3	60	220	23	9.923	60	60	25	Y-Y-D		
		DATOS DE PRUEBA EN FABRICA												
		Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)			
							90		0.054 ***		21.878 ***			
							100		0.071 ***		27.725 ***			
		Pruebas de Corto Circuito					Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)	
							HV-LV		28.302		100		226.270 ***	
	HV-TV						43.8802		100		28.959 ***			
						LV-TV		10.6864		100		30.300 ***		
	TYA T02	WEG	3	3	60	220	23	13.5	60	60	25	Y-Y-D		
		DATOS DE PRUEBA EN FABRICA												
		Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)			
							90		0.051		22.643			
							100		0.058		28.508			
		Pruebas de Corto Circuito					Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)	
HV-LV							27.6005		100		237.892			
HV-TV							43.1544		100		28.959 ***			
					LV-TV		10.0948		100		30.300 ***			
TYA T03	IEM	3	3	60	220	23	13.5	60	60	25	Y-Y-D			
	DATOS DE PRUEBA EN FABRICA													
	Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)				
						90		0.054 ***		21.878 ***				
						100		0.071 ***		27.725 ***				
	Pruebas de Corto Circuito					Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)		
						HV-LV		29.0491		100		226.270 ***		
HV-TV						40.9433		100		28.959 ***				
					LV-TV		11.1622		100		30.300 ***			
SAN ANGEL	SNG T01	IEM	3	3	60	220	23	9.923	60	60	25	Y-Y-D		
		DATOS DE PRUEBA EN FABRICA												
		Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)			
							90		0.054 ***		21.878 ***			
							100		0.071 ***		27.725 ***			
		Pruebas de Corto Circuito					Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)	
							HV-LV		28.9119		100		226.270 ***	
	HV-TV						44.4292		100		28.959 ***			
						LV-TV		10.906		100		30.300 ***		
	SNG T02	IEM	3	3	60	220	23	13.5	60	60	25	Y-Y-D		
		DATOS DE PRUEBA EN FABRICA												
		Pruebas de Circuito Abierto					Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)			
							90		0.054 ***		21.878 ***			
							100		0.071 ***		27.725 ***			
		Pruebas de Corto Circuito					Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)	
HV-LV							29.1559		100		226.270 ***			
HV-TV							40.787		100		28.959 ***			
					LV-TV		10.975		100		30.300 ***			

Tabla 3.4 b) Parámetros de modelado en ATP de transformadores del anillo de 230 kv TYA-SNG



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

SUBESTACION	TRANSFORMADOR	DATOS DE MODELADO EN ATP												
		Marca	No. Fases	No. Devanados	Frecuencia (Hz)	Voltaje L-L (kV)			Potencia nominal (MVA)			Conexión		
HV	LV					TV	H	L	T					
SAN ANGEL	SNG T03	IEM	3	3	60	220	23	13.5	60	60	25	Y-Y-D		
		DATOS DE PRUEBA EN FABRICA												
		Pruebas de Circuito Abierto				Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)				
						90		0.054***		21.878***				
						100		0.071***		27.725***				
		Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)		
						HV-LV		29.8421		100		226.270***		
						HV-TV		44.0541		100		28.959***		
		LV-TV		10.842		100		30.300***						
		COYOACAN	COY T01	IEM	3	3	60	220	23	13.5	60	60	25	Y-Y-D
DATOS DE PRUEBA EN FABRICA														
Pruebas de Circuito Abierto				Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)						
				90		0.054***		21.878***						
				100		0.071***		27.725***						
Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)				
				HV-LV		29.2779		100		237.892				
				HV-TV		41.247		100		28.959***				
LV-TV			10.4		100		30.300***							
COY T02	IEM		3	3	60	220	23	13.5	60	60	25	Y-Y-D		
	DATOS DE PRUEBA EN FABRICA													
	Pruebas de Circuito Abierto				Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)					
					90		0.054***		21.878***					
					100		0.071***		27.725***					
	Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)			
HV-LV					28.8967		100		226.270***					
HV-TV					40.257		100		28.959***					
LV-TV			11.131		100		30.300***							
COY T03	IEM	3	3	60	220	23	13.5	60	60	25	Y-Y-D			
	DATOS DE PRUEBA EN FABRICA													
	Pruebas de Circuito Abierto				Volt (%)		Curr (%)		Loss (KW)					
					90		0.054***		21.878***					
					100		0.071***		27.725***					
	Pruebas de Corto Circuito				Acoplamientos		Imp (%)		Curr (%)		Loss (KW)			
HV-LV					28.8967		100		226.270***					
HV-TV					40.806		100		28.959***					
LV-TV		11.131		100		30.300***								

Tabla 3.4 c) Parámetros de modelado en ATP de transformadores del anillo de 230 kV TYA-SNG

Nota: (***) Hace referencia a valores obtenidos a partir del promedio de los datos técnicos correspondientes disponibles en los protocolos de fábrica de los transformadores que cuentan con esta documentación y que comparten las mismas especificaciones y características constructivas, esto debido a que algunos de los transformadores por su antigüedad no cuentan con la información completa.

Los transformadores de las subestaciones Tacubaya, San Ángel, Coyoacán presentan reactor de neutro con una impedancia de $0+j0.4 \Omega$.

3.2.3 Modelado de líneas Transmisión

Para este equipamiento se empleará el modelo de onda viajera (Modelo de Clark) que ATP-Draw identifica como el modelo Bergeron, para líneas con parámetros constantes y distribuidos a lo largo de la línea de transmisión.

El ATP cuenta con la rutina ATP_LCC (LINE/CABLE CONSTANTS) disponible para calcular los parámetros de la línea de transmisión tanto aéreas como subterráneas, y se realiza en base a la geometría de la estructura de la línea de transmisión, las propiedades físicas y eléctricas características de los conductores y medios aislantes, de la longitud de la línea de transmisión y otras consideraciones de cálculo como se verá en este apartado.

3.2.3.1 Modelado de línea de transmisión aérea

La figura 3.11 muestra a la rutina ATP_LCC para la configuración de parámetros de líneas aéreas.

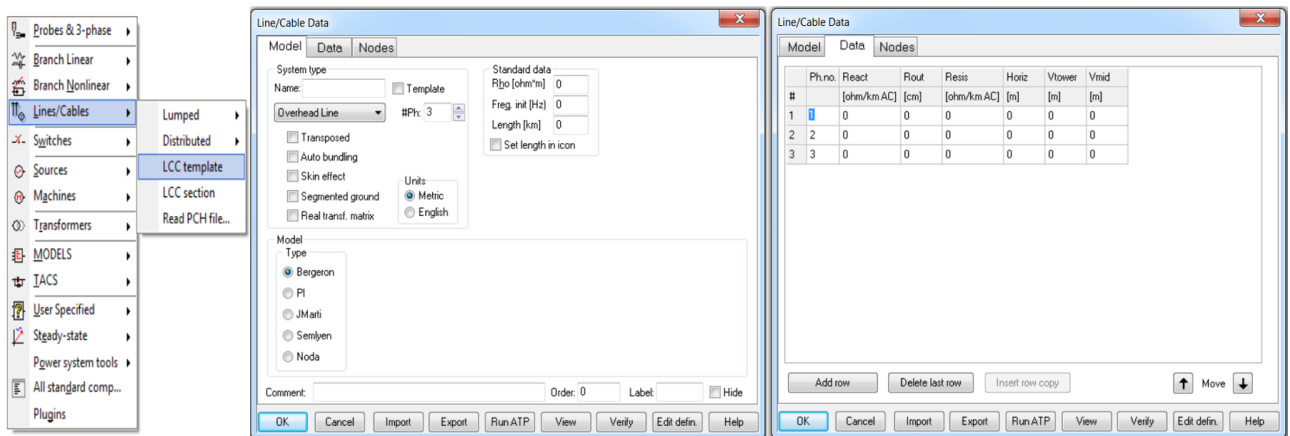


Figura 3. 11 Ventana de parámetros en ATP del modelo de línea aérea

En nuestra red objeto de estudio se cuenta con la línea de transmisión aérea TYA-93E70-SNG, que consta de un solo cable por fase tipo ACSR (Cable de aluminio duro con refuerzo de acero) y cable de guarda de acero de 1/8" a lo largo de una longitud de 3.5 km en estructura auto soportada de celosía.



A partir de la base de datos de corto circuito Aspen OneLiner que nos permite verificar si la L.T. TYA-93E70-SNG es paralela con alguna otra línea en la misma estructura, se encuentra que esta es comparte torre con la L.T. TYA-93B50-AGU por lo que para un correcto modelado en ATP se deberá considerar esta condición debido al acoplamiento de impedancias.

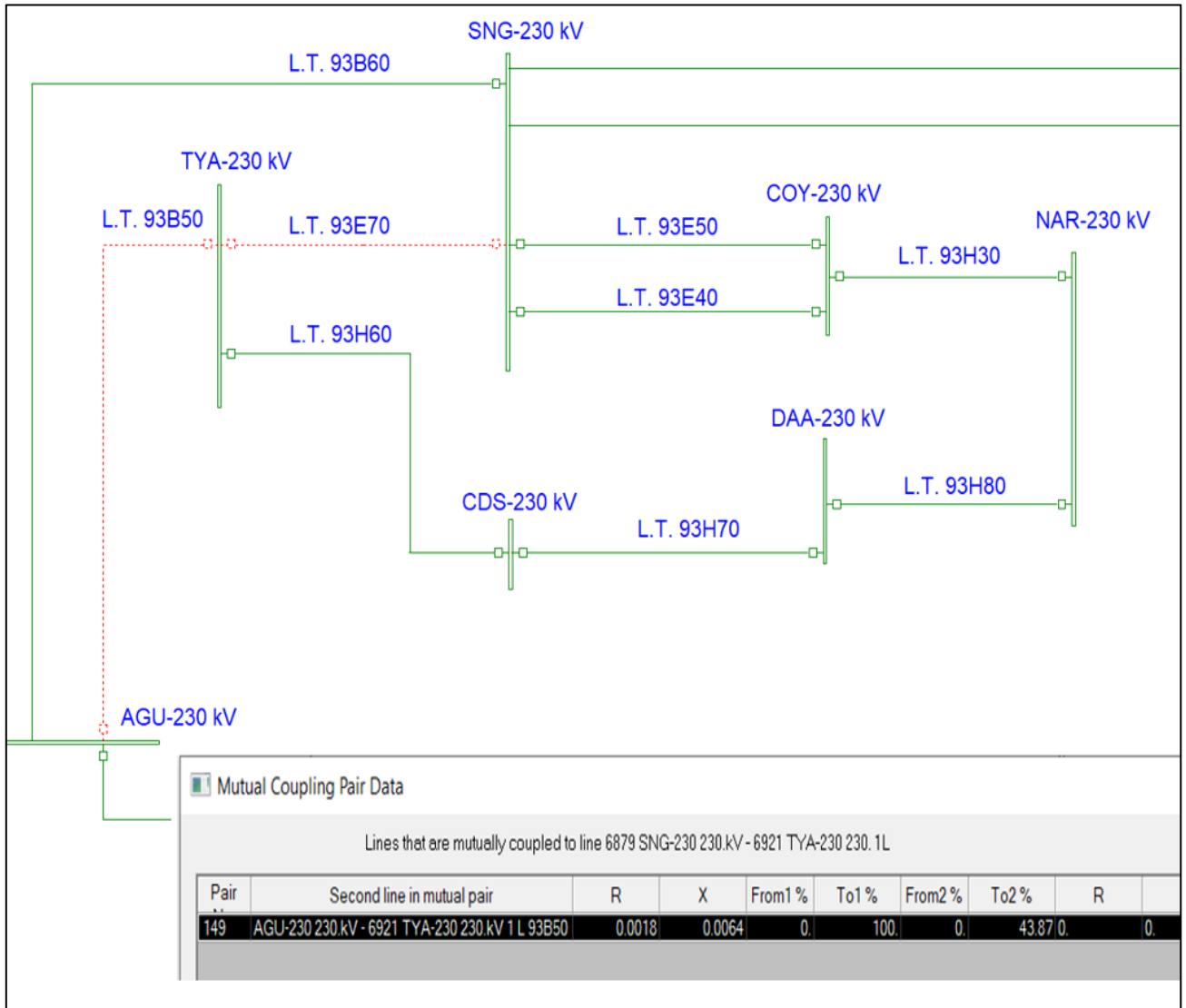


Figura 3. 12 Líneas paralelas a la L.T. TYA-93E70-SNG a partir de Aspen OneLiner

Aspen OneLiner a partir de su herramienta nos indica que la L.T. TYA-93E70-SNG presenta acoplamiento mutuo debido a que comparte el 100 % de su longitud con la L.T. TYA-93B50-AGU mientras que para esta última solo representa un 43.87 % de su longitud al ser más larga como se ilustra en la figura 3.12.

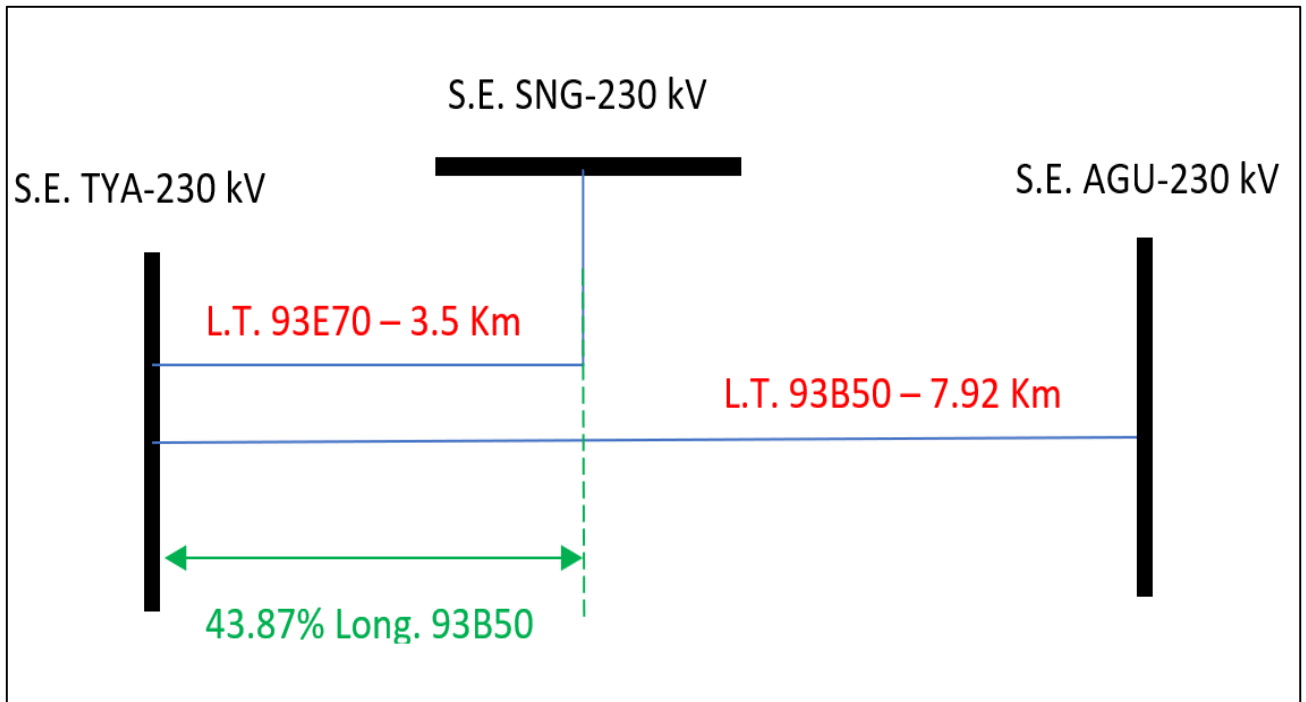


Figura 3. 13 Acoplamiento mutuo de la L.T. TYA-93E70-SNG con la L.T. TYA-93B50-AGU

Por lo tanto, debido a que la L.T. TYA-93E70-SNG y la L.T. TYA-93B50-AGU emplean el mismo tipo de conductor y cable de guarda se modelaran con las siguientes características de los conductores empleados de acuerdo con la especificación de CFE para cables de cables ACSR e hilos de guarda E00018 y E00022 respectivamente.

Designación	Calibre AWG o Kcmil	Hilos de aluminio Núm.	Diametro nominal	Hilos de acero Num.	Diametro nominal	Diametro nucleo de acero	Area nominal de la seccion transversal	Diametro total nominal	Peso Aprox.	Capacidad de conduccion de corriente.	Carga nominal de ruptura por tensión	Resistencia eléctrica de CD a 20 °C	Calibre equivalente en Cu
			mm		mm	mm	mm ²	mm	kg/km	Ampere	kg	Ohms/km	AWG/kcmil
CONDUCTOR DE ALUMINIO DESNUDO CON ALMA DE ACERO RECUBIERTOS CON ALUMINIO (ACSR/AS)													
BLUEJAY	1113	45	4	7	3	7.99	564	31.98	1819	1095	130	0.0524	700
CABLE DE GUARDA DE ACERO GALVANIZADO ALTA RESISTENCIA													
J420			9.52 (3/8")	7	3.04				406.25			4.18805	

Tabla 3. 5 Características de cables ACSR y cable de Guarda para modelado de L.T. TYA-93E70-SNG

A partir de las presentes especificaciones de conductores y características de la estructura auto soportada para 230 kV normalizada en el “Compendio de estructuras para líneas de transmisión de 230 kV y 400 kV” de LyFC del año 1977, y la consideración del acoplamiento mutuo existente con la L.T. TYA-93B50-AGU, se cargarán los parámetros en el modelo de línea aérea ATP como se muestra en la figura 3.14.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

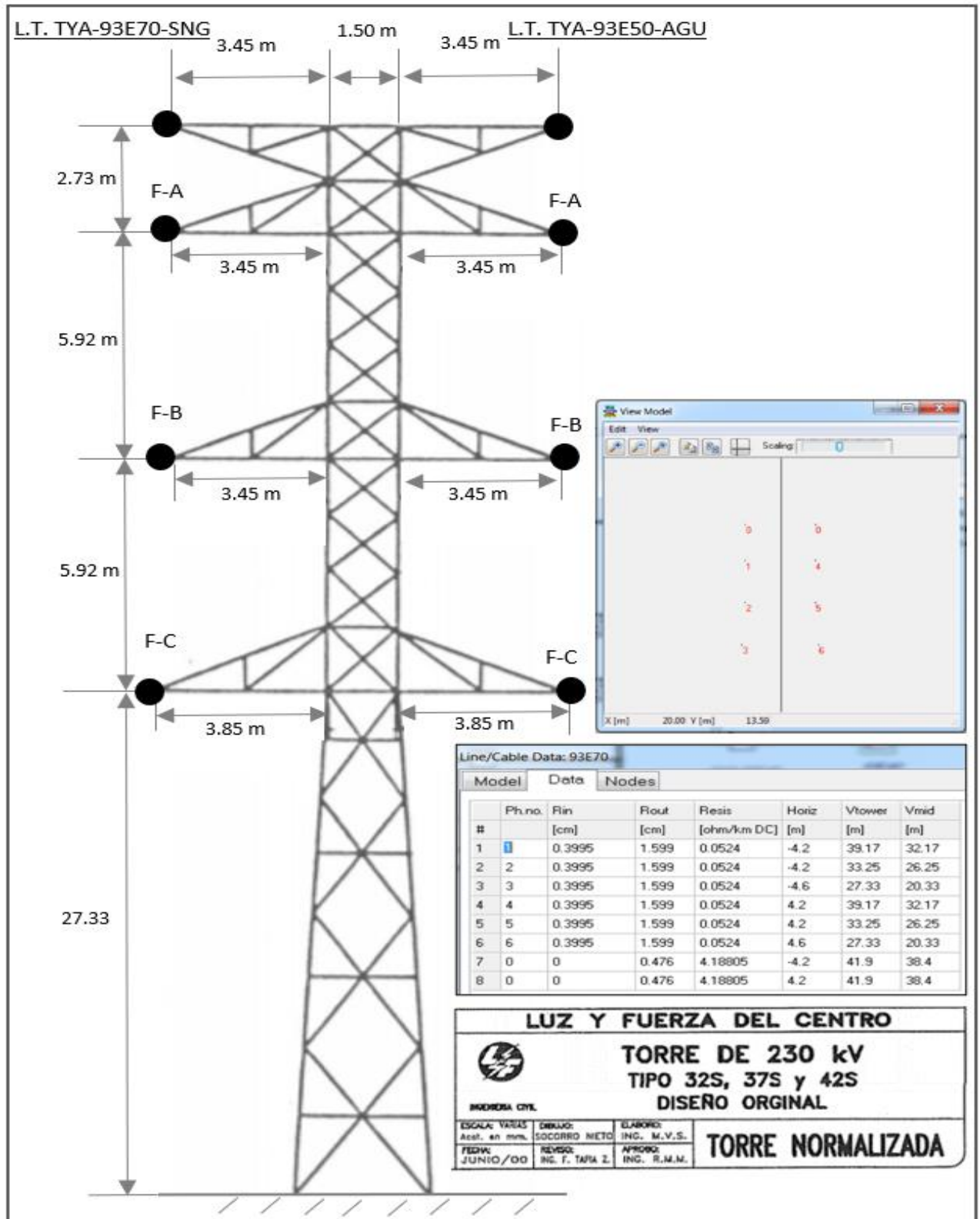


Figura 3. 14 Modelado en ATP de parámetros geométricos y eléctricos para la L.T. TYA-93E70-SNG

De esta manera los parámetros para la L.T. TYA-93E40-SNG quedarán definidos en la figura 3.15 en la cual se considera también para este modelo el efecto piel de los cables, una resistividad homogénea para el suelo de $100 \Omega\text{-m}$ [20], y una altura del conductor a la mitad del vano (V_{mid}) determinada por una flecha de catenaria de 7 m para los conductores y 3.5 m para cables de guarda de acuerdo con la especificación CFE-DCDLTA01 de diseño de líneas de transmisión aéreas.

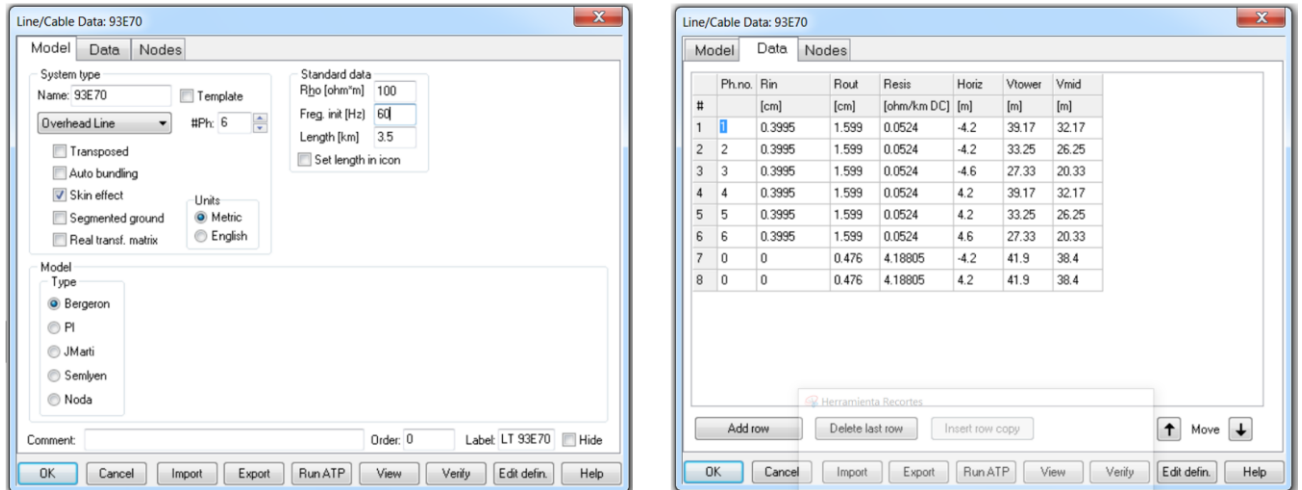


Figura 3. 15 Modelado en ATP de parámetros de la L.T. TYA-93E70-SNG

Una vez modelada la línea con sus parámetros se ejecuta y verifica el modelo de línea a 60 Hz y a la tensión nominal de nuestra red de 230 kV obteniendo de esta manera la impedancia característica de nuestro modelo para la L.T TYA-93E70-SNG.

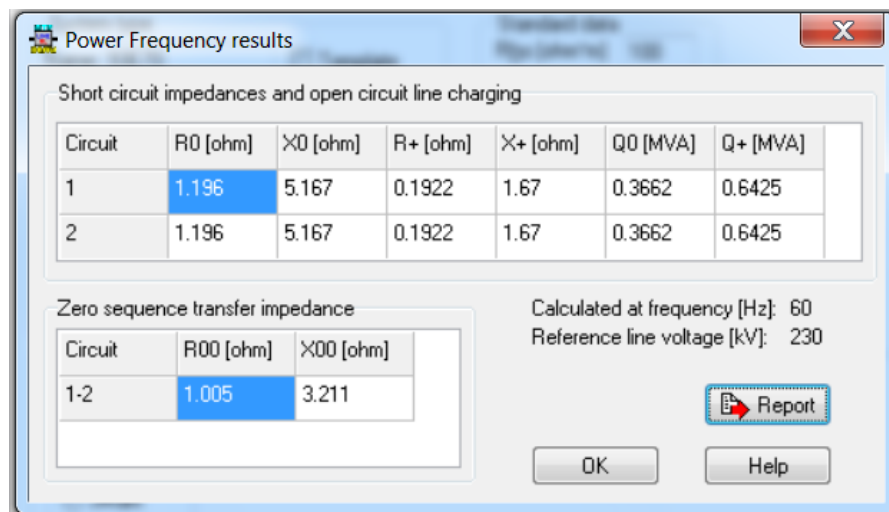


Figura 3. 16 Impedancias de secuencia a 60 Hz en ATP de L.T. TYA-93E70-SNG



Estos parámetros serán comparados con los parámetros de impedancia medidos en campo y modelados en la base de datos de corto de a Aspen OneLiner para 60 Hz para de esta manera conocer la certeza de nuestro modelo de línea aérea en ATP.

Figura 3. 17 Impedancias de secuencia a 60 Hz en Aspen OneLiner de L.T. TYA-93E70-SNG

Haciendo la conversión de las impedancias de secuencia de ATP en p.u. a una potencia base de 100 MVA y 230 kV para poder realizar la comparativa, se obtiene la siguiente aproximación del modelo.

LINEA	COMPONENTE	PARAMETROS DE ATP EN OHMS		PARAMETROS DE ATP EN P.U.			PARAMETROS MODELADOS EN ASPEN EN P.U.			DIFERENCIA ATP VS ASPEN		
		IMPEDANCIA Z		IMPEDANCIA Z			IMPEDANCIA Z			% DIFERENCIA		
		R (Ohms)	X (Ohms)	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
TYA-93E70-SNG	Sec (+)	0.1922	1.67	0.00036	0.00316	0.00318	0.0004	0.0032	0.00322	-9.17	-1.35	-1.46
	Sec (0)	1.196	5.167	0.00226	0.00977	0.01003	0.0022	0.0097	0.00995	2.77	0.70	0.80

Tabla 3. 6 Aproximación de modelo de la L.T. TYA-93E70-SNG a modelado de Aspen medido en campo

Por lo que podemos decir que nuestro modelo tiene una muy buena aproximación respecto a los valores medidos en campo.

3.2.3.2 Modelado de línea de transmisión subterránea con cable de potencia XLP

Para el modelado de los cables de potencia se empleará igualmente la rutina ATP_LCC y el modelo de Bergeron con la siguiente ventana de configuración de parámetros.

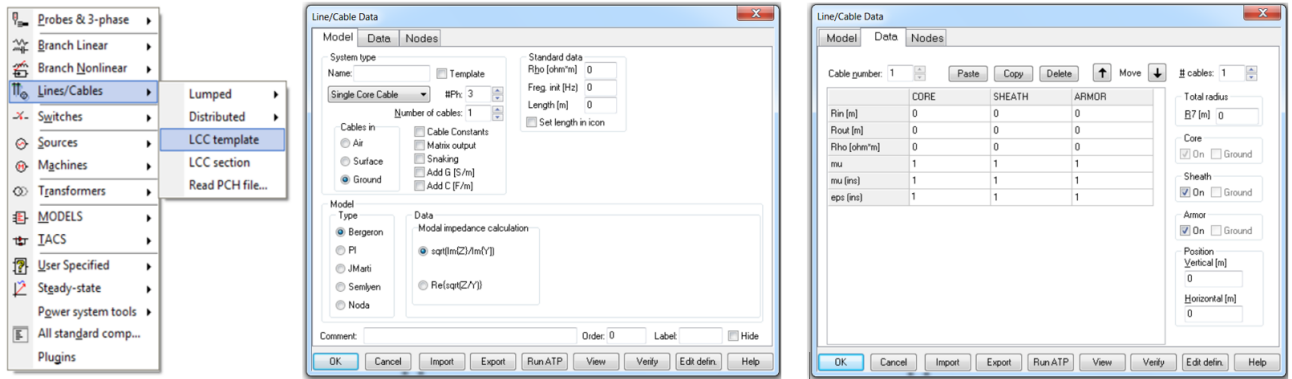


Figura 3. 18 Ventana de parámetros en ATP del modelo de cable subterráneo XLP

Para este modelo aplicado a cables tipo seco XLP es necesario definir los parámetros geométricos y propiedades físicas de la sección transversal constituida por núcleo, pantalla y armadura en caso de contar con ella, sin embargo, es necesario aclarar que para el caso de los cables de potencia que conforma el anillo de 230 kV TYA-SNG ninguno cuenta con armadura.

A continuación, se realiza la parametrización del modelo de parámetros distribuidos aplicado al cable de potencia de la L.T TYA-93H60-CDS la cual posee las siguientes características acorde a los datos proporcionados por el fabricante (Ver anexo B).

Características Generales de Cable de Potencia LT TYA-93H60-CDS		
Fabricante	LS CABLE & SYSTEM	
Tipo	2000 mm ² -XLPE-Cu-CS	
Tensión Nominal	230 kV	
Nivel de Impulso BIL	1050 kV	
Longitud	4.57	km
Resistencia eléctrica CD a 20 ° C	0.009	Ω/Km
Capacitancia	2.62E-07	F/km
Diámetro de conductor	54.3	mm
Espesor pantalla semiconductora interna	1.5	mm
Espesor de aislamiento principal	20	mm
Espesor pantalla semiconductora externa	1.3	mm
Espesor pantalla metálica de Aluminio	0.9	mm
Espesor cubierta externa	6	mm
Diámetro general del cable	126	mm

Tabla 3. 7 Características de fabrica generales del cable de potencia de la L.T. TYA-93H60-CDS

Debido a que la rutina de para cables de potencia no considera ciertas características del cable como pantallas semiconductoras o pantallas formadas por hilos de conductores, es por ello que los datos proporcionados por el fabricante deben llevar

un tratamiento apropiado para obtener un modelo más exacto. Para simplificar los parámetros a definir de la sección transversal del cable de potencia consideraremos el modelo de cable monopolar empleado por esta rutina de ATP. [8]

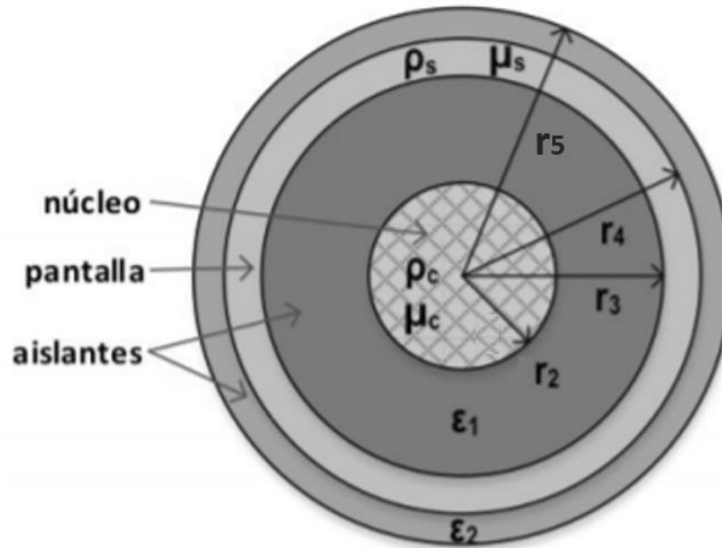


Figura 3. 19 Modelo de cable monopolar en rutinas de ATP-EMTP

La figura 3.19 muestra los parámetros que deben ser cargados en la rutina de ATP para lo cual r_2 es el radio del conductor proporcionado directamente por el fabricante, para este caso $r_2=0.02715$ m sin embargo, r_3 debe ser un radio que comprende desde el centro del conductor hasta la última pantalla sobre el aislamiento principal debido a que las pantallas semiconductoras pueden tener un efecto apreciable en las características de propagación de un cable en términos de la velocidad de la onda, impedancia de la onda y la atenuación de la misma. Las rutinas de ATP no establecen una representación explícita de las pantallas semiconductoras por lo que, para tener en cuenta su efecto, es necesario aplicar los datos proporcionados a la ecuación (3.4).[8]

$$r_3 = r_2 + S_{PSI} + S_{AP} + S_{PSE} \tag{3.4}$$

Donde r_2 es el radio del conductor del núcleo, S_{PSI} es el espesor de la pantalla semiconductora interna mientras que S_{AP} corresponde al espesor del aislamiento principal y S_{PSE} es el espesor del aislante semiconductor externo, es decir la capa semiconductora encima del aislamiento principal.



Por lo tanto

$$r_3 = 0.02715m + 0.0015m + 0.02m + 0.0013m = 0.04995 m$$

Continuando con el modelo de cable mostrado en la figura 3.20, el radio r_3 corresponde al medido desde el centro del conductor hasta el radio externo de la pantalla metálica, esto es:

$$r_4 = r_3 + S_{PM} \quad (3.5)$$

Donde S_{PM} es el espesor de la pantalla metálica, así tendremos para esta línea:

$$r_4 = 0.04995 m + 0.0009 m = 0.05085 m$$

Cuando la pantalla está formada por hilos conductores, el procedimiento consiste en reemplazarlos mediante un conductor tubular que tenga su área de sección transversal igual al área total de los conductores que forman la pantalla A_s con un radio interno de pantalla de r_3 , el radio externo se obtiene según la ecuación 3.6.

$$r_4 = \sqrt{\frac{A_s}{\pi} + r_3^2} \quad (3.6)$$

En cuanto a r_5 este representa el radio desde el centro del conductor hasta el radio externo del cable completo y es proporcionado directamente en la ficha técnica del fabricante, por lo que para el cable de la línea L.T TYA-93H60-CDS, $r_5 = 0.063 m$.

De esta manera se obtendremos los parámetros requeridos por ATP para el modelado geométrico de la sección transversal del cable.

En cuanto a los parámetros de propiedades de los materiales, la resistividad del conductor principal a partir de la resistencia DC proporcionada por el fabricante puede calcularse de acuerdo a:

$$\rho_c = R_{DC} \frac{\pi r_2^2}{l} \quad (3.7)$$

Donde l es la longitud de la línea, por lo que así obtendremos una resistividad para el núcleo de

$$\rho_c = 2.084E - 8 \Omega.m$$



En lo que respecta a la resistividad del material conductor de la pantalla metálica la tabla 3.8 [9] presenta las resistividades de los materiales más comunes que componen las pantallas metálicas y armaduras de cables de potencia.

Valores típicos de resistividad y coeficiente de temperatura para metales		
Materiales	Resistividad microΩ-cm a 20 °C	Coficiente de temperatura por K a 20 °C
a) Conductores		
Cobre	1.7241	0.00393
Aluminio	2.8264	0.00403
b) Pantallas y Armaduras		
Plomo o aleación de plomo	21.4	0.004
Acero	13.8	0.0045
Bronce	3.5	0.003
Acero inoxidable	70	0
Aluminio	2.84	0.00403

Tabla 3. 8 Valores típicos de resistividad de materiales

Este conductor posee una pantalla conductora de aluminio continua por lo cual le corresponde una resistividad de $2.83E-8 \Omega.m$.

La permitividad relativa para el aislamiento principal se determinará por medio de la siguiente ecuación:

$$\epsilon_1 = \frac{C \ln(r_3/r_2)}{2\pi\epsilon_0} \tag{3.8}$$

Donde C es el valor de la capacitancia del cable dado por el fabricante y $\epsilon_0=8.854E-12$.

Por tanto, este cable como especificación de fabrica posee una $C =2.62E-7 F/km$ por lo que:

$$\epsilon_1 = \frac{(2.62 \times 10^{-10} F/m)(0.04995m/0.02715 m)}{2\pi(8.854 \times 10^{-12})} = 2.872$$

En cuanto a la permitividad ϵ_2 de la cubierta exterior, que para este tipo de cables se trata en general de PVC y al referirnos la tabla 3.9 de valores de permitividad relativa se selecciona un valor de 4.

Permitividad relativa y factores de perdida de materiales aislantes		
Material Aislante	Permitividad relativa a 20 °C	Factor de perdidas tanδ (50 Hz y 20 °C)
Goma de butilo	3.0 - 4.0	0.05
Aceite Aislante	2.2 - 2.8	0.001 - 0.002
Papel Impregnado en Aceite	3.3 - 4.2	0.003 - 0.008
Cloruro de Polivinilo (PVC)	3.0 - 4.0	0.002 - 0.10
Polietileno	2.3	0.0002
Polietileno de cadena Cruzada	2.4	0.0004

Tabla 3. 9 Valores típicos de permitividad relativa de materiales aislantes

La permeabilidad relativa del conductor, pantallas y los aislamientos sobre los mismos se consideran igual a la unidad ya que es el valor para materiales no magnéticos. [8].

De esta manera los parámetros para el modelo de la línea L.T TYA-93H60-CDS en ATP se muestran en la figura 3.20.

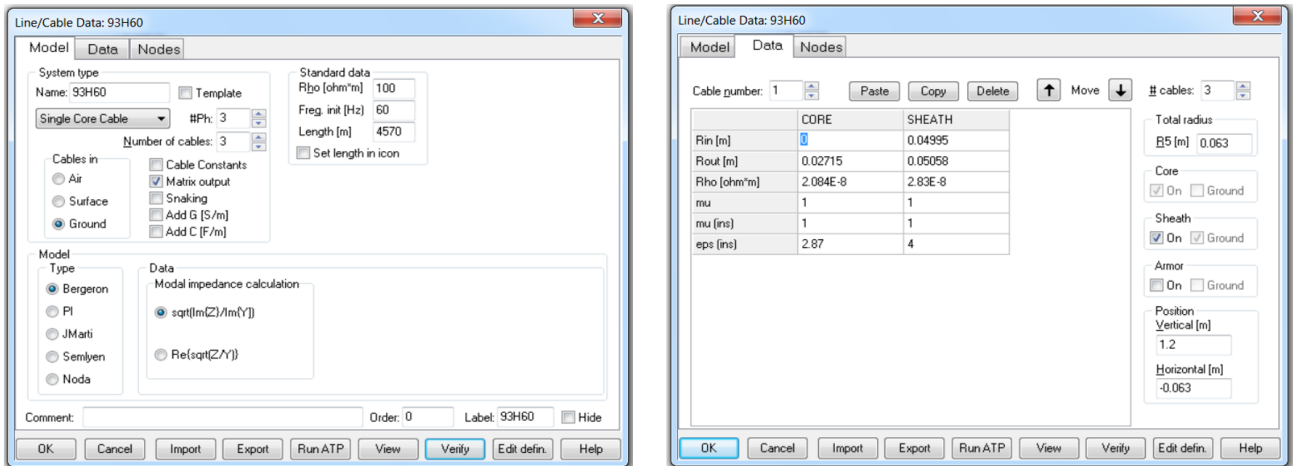


Figura 3. 20 Modelado en ATP de parámetros de la L.T. TYA-93H60-CDS

Se considera que se encuentra enterrado a una profundidad 1.2 m y un suelo con resistividad homogénea de 100 Ω.m. de acuerdo con la especificación CFE DCCSSUT de construcción de sistemas subterráneos, además de una disposición de los cables en delta como se puede observar en la figura 3.21 a partir de la herramienta de visualización que nos presenta ATP para el modelo.

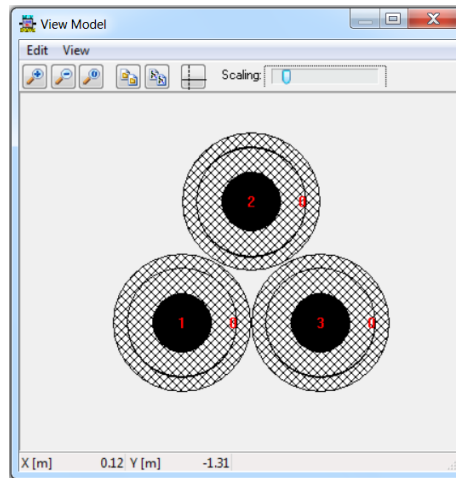


Figura 3. 21 Disposición geométrica de los conductores modelados en ATP de la L.T. TYA-93H60-CDS

se obtienen los parámetros de secuencia para la impedancia característica de nuestro modelo de la L.T TYA-93H60-CDS.

Circuit	R0 [ohm]	X0 [ohm]	R+ [ohm]	X+ [ohm]	Q0 [MVA]	Q+ [MVA]
1	0.7142	0.4137	0.1964	0.5357	31.53	24.27

Calculated at frequency [Hz]: 60
Reference line voltage [kV]: 230

Buttons: Report, OK, Help

Figura 3. 22 Impedancias de secuencia a 60 Hz en ATP de L.T. TYA-93H60-CDS

Comparando los parámetros de ATP con los valores medidos en campo de la base de datos de corto circuito Aspen OneLiner verificaremos la aproximación de nuestro modelo de línea subterránea.

La figura 3.23 muestra los parámetros de impedancia modelados en la red Aspen.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Figura 3. 23 Impedancias de secuencia a 60 Hz en Aspen OneLiner de L.T. TYA-93H60-CDS

LINEA	COMPONENTE	PARAMETROS DE ATP EN OHMS		PARAMETROS DE ATP EN P.U.			PARAMETROS MODELADOS EN ASPEN EN P.U.			DIFERENCIA ATP VS ASPEN		
		IMPEDANCIA Z		IMPEDANCIA Z			IMPEDANCIA Z			% DIFERENCIA		
		R (Ohms)	X (Ohms)	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
TYA-93H60-CDS	Sec (+)	0.1964	0.5357	0.00037	0.00101	0.00108	0.00035	0.00117	0.00122	6.08	-13.45	-11.68
	Sec (0)	0.7142	0.4137	0.00135	0.00078	0.00156	0.00167	0.00072	0.00182	-19.16	8.62	-14.21

Tabla 3. 10 Aproximación de modelo de la L.T. TYA-93H60-SNG a modelado de Aspen medido en campo

Por lo tanto, podemos observar que el modelo de ATP aplicado a cables no es tan preciso como el caso de las líneas aéreas sin embargo puede considerarse con una aproximación aceptable.

3.2.3.3 Modelado de línea de transmisión subterránea con cable de potencia tipo PIPE

La rutina ATP_LCC para el modelado de los cables de potencia tipo PIPE requiere al igual que en el cable tipo seco definir la geometría para la sección transversal del cable, propiedades de los materiales aislantes y conductores, así como su disposición física dentro del tubo contenedor (PIPE), mientras que para este último elemento es necesario definir igualmente su geometría y propiedades físicas considerando que el tubo cuenta con una cubierta de polietileno de alta densidad a lo largo de todo su trayecto el cual actúa como aislante.

La figura 3.24 muestra los requerimientos necesarios para la parametrización del modelo de cables subterráneos tipo PIPE.

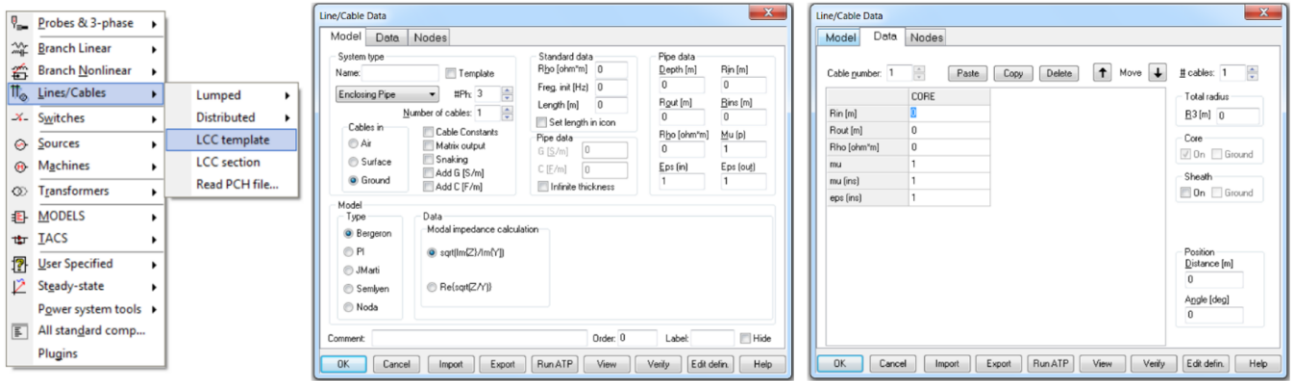


Figura 3. 24 Ventana de parámetros en ATP del modelo de cable subterráneo PIPE

Se realiza la definición de parámetros para el modelo LCC aplicado al cable de potencia de la L.T SNG-93E40-COY tipo PIPE el cual posee las siguientes características acorde a los datos proporcionados por el fabricante (Ver anexo C).

Características Generales de Cable de Potencia tipo PIPE LT SNG-93B70-COY		
Fabricante		
Tipo	1000 mm ² -PIPE-Cu	
Tension Nominal	230 kV	
Características del Tubo Envoltente		
Tubo de Acero al Carbon Cedula 40	12	in
Diametro interior	303.22	mm
Diametro externo	338.2	mm
Espesor de cubierta de Polietileno	20	mm
Características del Conductor		
Diametro del conductor	36.2	mm
Diametro del aislamiento	75.2	mm
Diametro exterior	80	mm

Tabla 3. 11 Características de fabrica generales del cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY

Para este modelo primeramente se definen los parámetros geométricos del tubo envoltente y cubierta exterior proporcionados directamente en la ficha técnica del conductor, mientras que la resistividad del tubo el cual es fabricado en acero de acuerdo con los valores de resistividad de la tabla 3.8 será de $1.38E-7 \Omega.m$, posteriormente se definirán los parámetros de permitividad relativa correspondiente al aislamiento interno entre el conductor y el tubo (aceite) y la permitividad relativa del aislamiento exterior alrededor de tubo envoltente (polietileno) que de acuerdo con la tabla 3.9 se modelan con un valor de 2.5 y 2.3 correspondientemente.



En cuanto a la permeabilidad de relativa del tubo envolvente de los cables tipo PIPE el cual esta echo de acero al alto carbono este presenta una alta permeabilidad relativa por lo que se modelara con un valor de 100. [10].

Posteriormente de acuerdo con los datos disponibles de fabrica se parametrizarán los cables contenidos en la envolvente de manera similar a como se hizo con los cables XLP considerando como pantalla del cable la cinta de lámina de Cu con la que cuenta de acuerdo con los datos contractivos de este cable en específico (Ver anexo C). la cual al no especificar su espesor se considerará de 0.7 mm de acuerdo con dimensiones comerciales de este tipo de materiales.

Por su parte modelar el conductor del cable cuando no se cuenta con la resistencia característica de conductor dada por el fabricante es necesario incrementar la resistividad ρ_c del material del núcleo para tomar en cuenta el espaciamiento entre los hilos del conductor, de acuerdo con:

$$\rho_c = \rho'_c \frac{\pi r_2^2}{A_c} \quad (3.9)$$

Donde ρ'_c es la resistividad del material del conductor, r_2 el radio de conductor y A_c el área del conductor[8], de esta forma la resistencia para el modelo del conductor será:

$$\rho_c = 1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \frac{\pi(0.0181m)^2}{0.001m^2} = 1.77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

Mientras la resistencia de la pantalla metálica del cable será de $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

La permitividad para el aislamiento del cable a partir de papel impregnado de aceite de acuerdo con la tabla 3.9 se modelará con un valor de 3.75 y de 2.5 para el aceite que lo rodea.

De esta manera se obtiene la parametrización del modelo de cable subterráneo tipo PIPE de la línea SNG-93E40-COY para la cual también se considera a un nivel de 1.5 m debajo del suelo con una resistividad homogénea de $100 \Omega \cdot m$ y disposición equilátera de los conductores dentro de la envolvente.

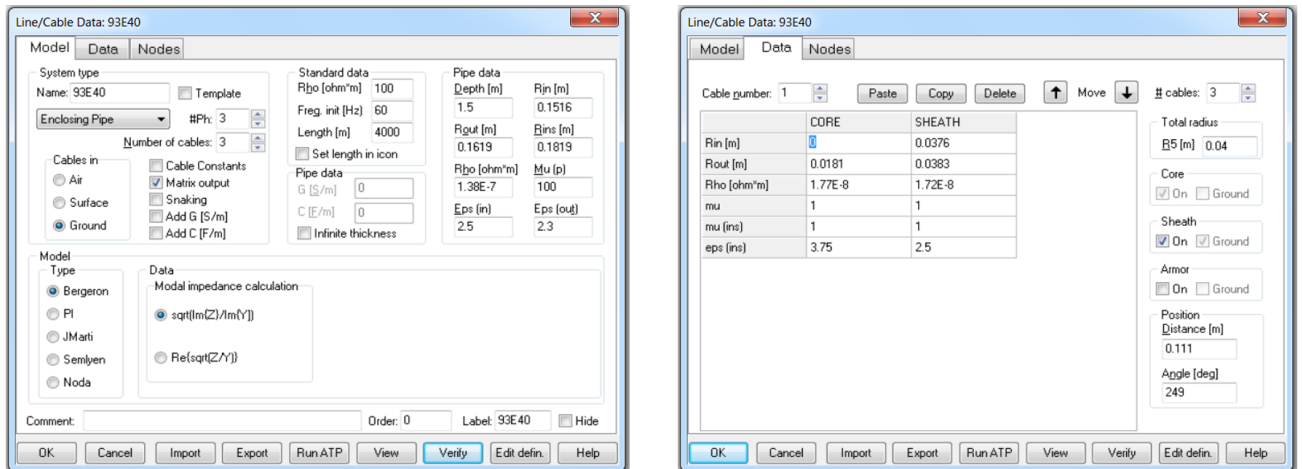


Figura 3. 25 Modelado en ATP de parámetros de la L.T. SNG-93E40-COY

Al verificar el modelo de línea subterránea a 60 Hz y a la tensión nominal de la red se obtienen los parámetros de secuencia para la impedancia característica de nuestro modelo de la L.T TYA-93H60-CDS.

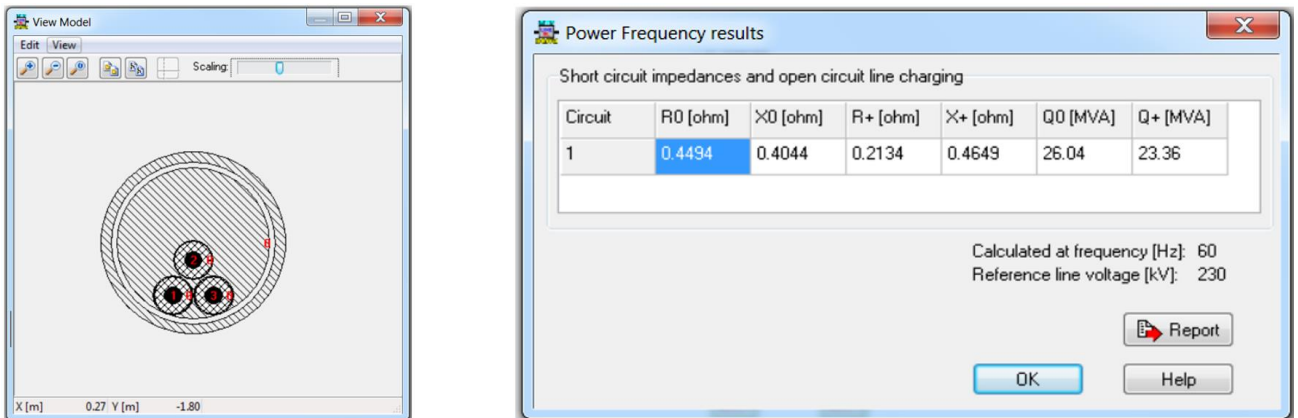


Figura 3. 26 Disposición geométrica de Impedancias de secuencia a 60 Hz en ATP de L.T. TYA-93H60-CDS

Realizando la comparación de los parámetros obtenidos de ATP con los valores medidos en campo de la base de datos de corto circuito Aspen OneLiner obtenemos la aproximación de nuestro modelo de línea subterránea tipo PIPE.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Figura 3. 27 Impedancias de secuencia a 60 Hz en Aspen OneLiner de L.T. SNG-93E40-COY

LINEA	COMPONENTE	PARAMETROS DE ATP EN OHMS		PARAMETROS DE ATP EN P.U.			PARAMETROS MODELADOS EN ASPEN EN P.U.			DIFERENCIA ATP VS ASPEN		
		IMPEDANCIA Z		IMPEDANCIA Z			IMPEDANCIA Z			% DIFERENCIA		
		R (Ohms)	X (Ohms)	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
SNG-93E40-COY	Sec (+)	0.2134	0.4649	0.00040	0.00088	0.00097	0.00042	0.00122	0.00129	-3.95	-27.96	-25.06
	Sec (0)	0.4494	0.4044	0.00085	0.00076	0.00114	0.00079	0.00091	0.00121	7.54	-15.99	-5.16

Tabla 3. 12 Aproximación de modelo de la L.T. SNG-93E40-COY a modelado de Aspen medido en campo

3.2.3.4 Resumen de especificaciones técnicas y parámetros de modelado de cables de potencia de líneas subterráneas.

Especificaciones técnicas y Parámetros de modelado del cable de la L.T. NAR-93H30-COY			
Especificaciones técnica del cable potencia		Parámetros de modelado en ATP	
Fabricante	SILEC	Modelo de línea	Bergeron
Tipo	1200 mm2-XLPE-Cu	Resistividad de Suelo	100 Ω.m
Tension Nominal	230 kV	Frecuencia de calculo de los parametros	10714 Hz
Nivel de Impulso BIL		Longitud	2800 m
Longitud	2.8 km	Altura bajo el suelo	1.2 m
Resistencia electrica CD a 20 ° C	0.0151 Ω/Km	Disposicion	Equilatera
Capacitancia	2.10E-07 F/km	Radio Interno de conductor r1	0 m
Diametro de conductor	43.3 mm	Radio Externo de conductor r2	0.02165 m
Espesor pantalla semiconductora interna	1.7 mm	Radio Interno de la Pantalla r3	0.0472 m
Espesor de Aislador principal	22 mm	Radio externo de la pantalla r4	0.047817 m
Espesor pantalla semiconductora externa	1.85 mm	Radio Externo de Cubierta r5	0.057 m
Pantalla a base de alambres de Cu	1.9 mm	Resistividad del conductor p c	2.223E-08 Ω.m
Espesor pantalla metalica de Aluminio	0.5 mm	Resistividad de la pantalla metalica p s	1.72E-08 Ω.m
Espesor cubierta externa	5 mm	Permeabilidad relativa del material de conductor μ1	1
Diametro general del cable	114 mm	Permeabilidad relativa del material de la pantalla μ2	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre el de conductor μ3	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre la pantalla μ4	1
		Permitividad relativa de conductor ε1	2.94
		Permitividad relativa de la pantalla ε2	4

Tabla 3. 13 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. NAR-93H30-COY



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Especificaciones técnicas y Parámetros de modelado del cable de la L.T. TYA-93H60-CDS			
Especificaciones técnica del cable potencia		Parámetros de modelado en ATP	
Fabricante	LS CABLE & SYSTEM	Modelo de línea	Bergeron
Tipo	2000 mm ² -XLPE-Cu-CS	Resistividad de Suelo	100 Ω.m
Tensión Nominal	230 kV	Frecuencia de calculo de los parametros	6564 Hz
Nivel de Impulso BIL	1050 kV	Longitud	4570 m
Longitud	4.57 km	Altura bajo el suelo	1.2 m
Resistencia eléctrica CD a 20 ° C	0.009 Ω/Km	Disposicion	Equilatera
Capacitancia	2.62E-07 F/km	Radio Interno de conductor r ₁	0 m
Diámetro de conductor	54.3 mm	Radio Externo de conductor r ₂	0.02715 m
Espesor pantalla semiconductora interna	1.5 mm	Radio Interno de la Pantalla r ₃	0.04995 m
Espesor de aislamiento principal	20 mm	Radio externo de la pantalla r ₄	0.05058 m
Espesor pantalla semiconductora externa	1.3 mm	Radio Externo de Cubierta r ₅	0.063 m
Espesor pantalla metálica de Aluminio	0.9 mm	Resistividad del conductor p _c	2.08E-08 Ω.m
Espesor cubierta externa	6 mm	Resistividad de la pantalla metálica p _s	2.83E-08 Ω.m
Diámetro general del cable	126 mm	Permeabilidad relativa del material de conductor μ ₁	1
		Permeabilidad relativa del material de la pantalla μ ₂	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre el de conductor μ ₃	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre la pantalla μ ₄	1
		Permitividad relativa de conductor ε ₁	2.87
		Permitividad relativa de la pantalla ε ₂	4

Tabla 3. 14 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. TYA-93H60-CDS

Especificaciones técnicas y Parámetros de modelado del cable de la L.T. DAA-93H70-CDS			
Especificaciones técnica del cable potencia		Parámetros de modelado en ATP	
Fabricante	General Cable	Modelo de línea	Bergeron
Tipo	2000 mm ² -XLPE-Cu	Resistividad de Suelo	100 Ω.m
Tension Nominal	230 kV	Frecuencia de calculo de los parametros	25000 Hz
Nivel de Impulso BIL		Longitud	1200 m
Longitud	1.2 km	Altura bajo el suelo	1.2 m
Resistencia electrica CD a 20 ° C	0.009 Ω/Km	Disposicion	Equilatera
Capacitancia	2.40E-07 F/km	Radio Interno de conductor r ₁	0 m
Diámetro de conductor	58.6 mm	Radio Externo de conductor r ₂	0.0293 m
Espesor pantalla semiconductora interna	2.4 mm	Radio Interno de la Pantalla r ₃	0.0562 m
Espesor de Aislador principal	23 mm	Radio externo de la pantalla r ₄	0.057 m
Espesor pantalla semiconductora externa	1.5 mm	Radio Externo de Cubierta r ₅	0.06265 m
Espesor Pantalla metálica de Al	0.8 mm	Resistividad del conductor p _c	2.427E-08 Ω.m
Espesor cubierta externa	5 mm	Resistividad de la pantalla metálica p _s	2.83E-08 Ω.m
Diámetro general del cable	125.3 mm	Permeabilidad relativa del material de conductor μ ₁	1
		Permeabilidad relativa del material de la pantalla μ ₂	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre el de conductor μ ₃	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre la pantalla μ ₄	1
		Permitividad relativa del aislante sobre el conductor ε ₁	2.81
		Permitividad relativa del aislante sobre la pantalla ε ₂	4

Tabla 3. 15 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. DAA-93H70-CDS

Especificaciones técnicas y Parámetros de modelado del cable de la L.T. DAA-93H80-NAR			
Especificaciones técnica del cable potencia		Parámetros de modelado en ATP	
Fabricante	General Cable	Modelo de línea	Bergeron
Tipo	2000 mm ² -XLPE-Cu	Resistividad de Suelo	100 Ω.m
Tension Nominal	230 kV	Frecuencia de calculo de los parametros	5555 Hz
Nivel de Impulso BIL		Longitud	5400 m
Longitud	5.4 km	Altura bajo el suelo	1.2 m
Resistencia electrica CD a 20 ° C	0.009 Ω/Km	Disposicion	Equilatera
Capacitancia	2.40E-07 F/km	Radio Interno de conductor r ₁	0 m
Diámetro de conductor	56.1 mm	Radio Externo de conductor r ₂	0.02805 m
Espesor pantalla semiconductora interna	2.3 mm	Radio Interno de la Pantalla r ₃	0.0549 m
Espesor de Aislador principal	23 mm	Radio externo de la pantalla r ₄	0.0557 m
Espesor pantalla semiconductora externa	1.55 mm	Radio Externo de Cubierta r ₅	0.06265 m
Espesor Pantalla metálica de Al	0.8 mm	Resistividad del conductor p _c	2.22E-08 Ω.m
Espesor cubierta externa	5.6 mm	Resistividad de la pantalla metálica p _s	2.83E-08 Ω.m
Diámetro general del cable	125.3 mm	Permeabilidad relativa del material de conductor μ ₁	1
		Permeabilidad relativa del material de la pantalla μ ₂	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre el de conductor μ ₃	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre la pantalla μ ₄	1
		Permitividad relativa del aislante sobre el conductor ε ₁	2.9
		Permitividad relativa del aislante sobre la pantalla ε ₂	4

Tabla 3. 16 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. DAA-93H80-NAR



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Especificaciones técnicas y Parámetros de modelado de cable PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY y L.T. SNG-93E50-COY			
Especificaciones técnica del cable potencia		Parámetros de modelado en ATP	
Fabricante		Modelo de línea	Bergeron
Tipo	2000 mm2-PIPE-Cu	Resistividad de Suelo	100 Ω.m
Tension Nominal	230 kV	Frecuencia de calculo de los parametros	7500 Hz
Longitud	4 km	Longitud	4000 m
Diametros de conductor	36.2 mm	Altura bajo el suelo	1.5 m
Diametro del Aislamiento	75.2 mm	Disposicion	Equilatera
Espesor de pantalla	0.007 mm	Radio Interno de conductor r ₁	0 m
Diametro exterior	80 mm	Radio Externo de conductor r ₂	0.0181 m
Tubo envolvente de acero cedula 40	12 in	Radio Interno de la Pantalla r ₃	0.0376 m
Diametro interior	303.22 mm	Radio externo de la pantalla r ₄	0.0383 m
Diametro exterior	338.2 mm	Radio Externo de Cubierta r ₅	0.04 m
Espesor de cubierta de polietileno	20 mm	Resistividad del conductor p _c	1.77E-08 Ω.m
Espesor Pantalla metalica de Al	0.8 mm	Resistividad de la pantalla metalica p _s	1.72E-08 Ω.m
Espesor cubierta externa	5.6 mm	Permeabilidad relativa del material de conductor μ ₁	1
Diametro general del cable	125.3 mm	Permeabilidad relativa del material de la pantalla μ ₂	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre el de conductor μ ₃	1
		Permeabilidad relativa del aislamiento sobre la pantalla μ ₄	1
		Permitividad relativa del papel impregnado de aceite ε ₁	3.75
		Permitividad relativa de el aceite dielectrico ε ₂	2.5
		Radio interno del tubo envolvente	0.1516 m
		Radio externo del tubo envolvente	0.1619 m
		Radio externo de la cubierta de polietileno	0.1819 m
		Resistividad del tubo envolvente de acero p _p	1.38E-07 Ω.m
		Permeabilidad del tubo envolvente μ ₅	100
		Permitividad relativa del aislamiento dentro del tubo ε ₃	2.5
		Permitividad relativa del aislamiento alrededor del tubo ε ₄	2.3

Tabla 3. 17 Especificaciones técnicas y parámetros de modelado de la L.T. SNG-93E40-COY y L.T. SNG-93E40-COY

3.2.3.5 Aproximación de los modelos de línea obtenidos en ATP

En la tabla 3.18 se muestra el porcentaje de aproximación de los modelos línea obtenidos en ATP a partir del cálculo de los parámetros de secuencia a 60 Hz con la tensión del sistema y su comparación con los parámetros de la misma línea modelados en la red de cortocircuito Aspen OneLiner de la Gerencia Regional de Transmisión Central los cuales han sido obtenidos de pruebas en campo.

En general considerando lo complejo que hasta este día resulta ser el modelado de cables subterráneos y que todo modelo es una aproximación de un fenómeno real podemos decir que se cuenta con una aproximación aceptable para este estudio.

LINEA	COMPONENTE	PARAMETROS DE ATP EN OHMS		PARAMETROS DE ATP EN P.U.			PARAMETROS MODELADOS EN ASPEN EN P.U.			DIFERENCIA ATP VS ASPEN		
		IMPEDANCIA Z		IMPEDANCIA Z			IMPEDANCIA Z			% DIFERENCIA		
		R (Ohms)	X (Ohms)	R	X	Z	R	X	Z	R	X	Z
TYA-93E70-SNG	Sec (+)	0.1922	1.67	0.00036	0.00316	0.00318	0.0004	0.0032	0.00322	-9.17	-1.35	-1.46
	Sec (0)	1.196	5.167	0.00226	0.00977	0.01003	0.0022	0.0097	0.00995	2.77	0.70	0.80
NAR-93H30-COY	Sec (+)	0.1461	0.3404	0.00028	0.00064	0.00070	0.00024	0.00053	0.00058	15.08	21.41	20.36
	Sec (0)	0.318	0.2586	0.00060	0.00049	0.00077	0.00055	0.0006	0.00081	9.30	-18.53	-4.81
TYA-93H60-CDS	Sec (+)	0.1964	0.5357	0.00037	0.00101	0.00108	0.00035	0.00117	0.00122	6.08	-13.45	-11.68
	Sec (0)	0.7142	0.4137	0.00135	0.00078	0.00156	0.00167	0.00072	0.00182	-19.16	8.62	-14.21
DAA-93H70-CDS	Sec (+)	0.0508	0.1302	0.00010	0.00025	0.00026	0.00009	0.00029	0.00030	6.70	-15.13	-12.99
	Sec (0)	0.1372	0.09796	0.00026	0.00019	0.00032	0.00033	0.00024	0.00041	-21.41	-22.84	-21.90
DAA-93H80-NAR	Sec (+)	0.2339	0.601	0.00044	0.00114	0.00122	0.00043	0.0009	0.00100	2.83	26.23	22.22
	Sec (0)	0.6299	0.4517	0.00119	0.00085	0.00147	0.0013	0.0011	0.00170	-8.40	-22.37	-13.96
SNG-93E40-COY	Sec (+)	0.2134	0.4649	0.00040	0.00088	0.00097	0.00042	0.00122	0.00129	-3.95	-27.96	-25.06
	Sec (0)	0.4494	0.4044	0.00085	0.00076	0.00114	0.00079	0.00091	0.00121	7.54	-15.99	-5.16
SNG-93E50-COY	Sec (+)	0.2134	0.4649	0.00040	0.00088	0.00097	0.00042	0.00122	0.00129	-3.95	-27.96	-25.06
	Sec (0)	0.4494	0.4044	0.00085	0.00076	0.00114	0.00079	0.00091	0.00121	7.54	-15.99	-5.16

Tabla 3. 18 Aproximación de los modelos de línea obtenidos en ATP



3.2.3.6 Determinación de la frecuencia de oscilación para los modelos de línea Bergeron.

La determinación de la frecuencia de oscilación del modelo Bergeron (Frec. Init) nos permitirá obtener la respuesta transitoria deseada dentro del rango de frecuencia a la cual se producen los transitorios por maniobra, por lo que los parámetros característicos de las líneas estudiadas serán calculados a esta frecuencia en ATP y no a la frecuencia nominal del sistema. [5]

La determinación de la frecuencia de oscilación para las líneas del presente estudio se realiza mediante la expresión:

$$f = \frac{1}{\tau} \tag{3.10}$$

Siendo τ el tiempo de viaje de la onda viajera, y al expresar τ en función de la longitud de la línea y velocidad de propagación se obtiene:

$$f = \frac{v}{10\lambda} \tag{3.11}$$

Donde v es la velocidad de la luz, y λ corresponde a la longitud de línea.

FRECUENCIAS PARA MODELOS DE LINEA BERGERON			
LINEA	LONGITUD (km)	TIPO	FRECUENCIA MODELO BERGERON (Hz)
TYA-93H60-CDS	4.57	XLP	6564
CDS-93H70-DAA	1.2	XLP	25000
DAA-93H80-NAR	5.4	XLP	5555
NAR-93H30-COY	2.8	XLP	10714
COY-93E40-SNG	4	PIPE	7500
COY-93E50-SNG	4	PIPE	7500
SNG-93E70-TYA	3.5	ACSR	8571

Tabla 3. 19 Frecuencias para los modelos de línea Bergeron

3.2.4 Modelado de cargas

Para cumplir con el objetivo de obtener un modelo lo más aproximado posible se consideran los perfiles de carga máximos más actuales de las subestaciones S.E. COY, S.E. NAR, S.E. DAA y S.E. CDS, S.E. TYA Y S.E. SNG a partir de los registros de mediciones cinco-minútales registradas por la ZTVMS y ZTVMC, por lo anterior se analizaron y valoraron los perfiles de carga anual en demanda máxima correspondientes al 2019, para realizar los estudios correspondientes.

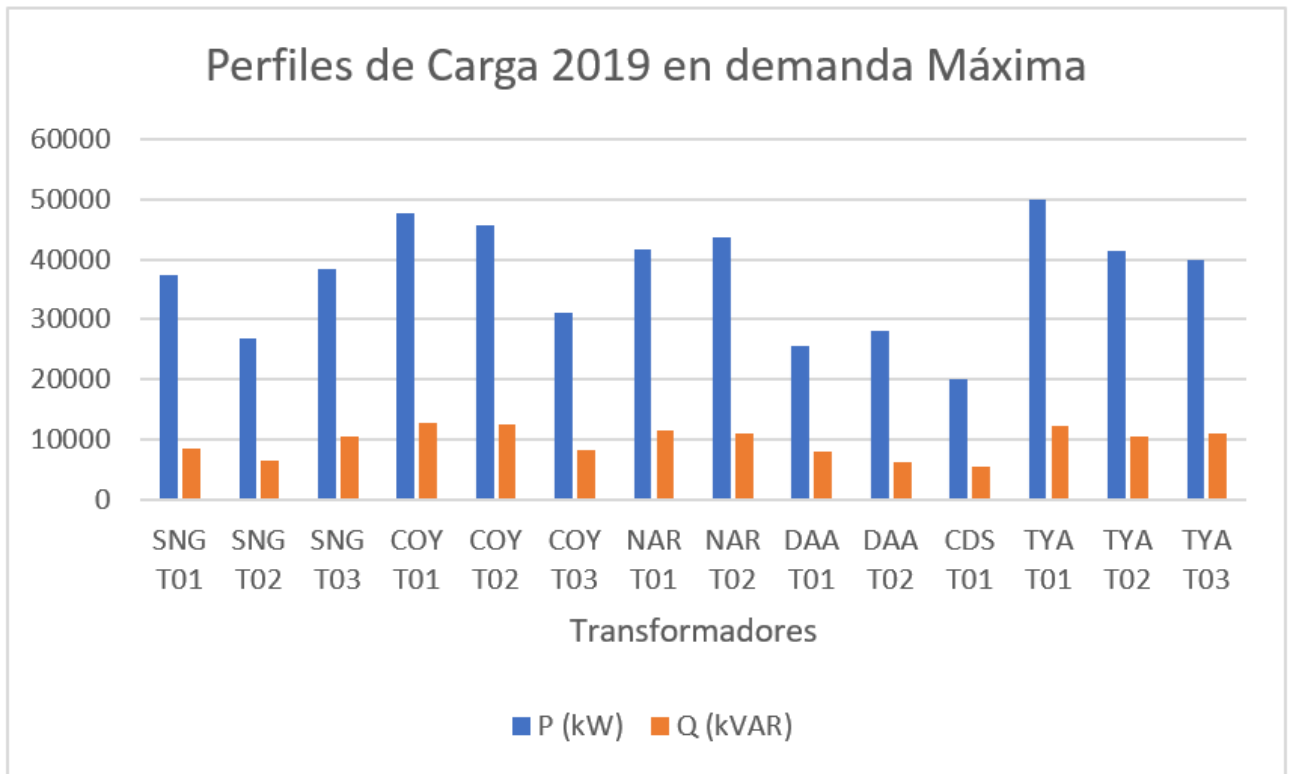


Figura 3. 28 Perfiles de carga máxima 2019 para transformadores del anillo de 230 kV TYA-SNG

Para poder realizar el modelado de las cargas conectadas en el lado baja de cada transformador es necesario transformar estos valores de P y Q en valores de impedancia, mediante las siguientes expresiones:

$$R = P * \frac{V^2}{P^2 + Q^2} \tag{3.12}$$

$$X = Q * \frac{V^2}{P^2 + Q^2} \tag{3.13}$$

$$X_L = L * 2\pi f \tag{3.14}$$

Obtenido de esta manera los siguientes valores de impedancia en parámetros modelables en ATP.



PERFILES DE CARGA 2019 EN DEMANDA MAXIMA				
TRANSFORMADOR	DEMANDA MAXIMA		PARAMETROS ATP	
	P (kW)	Q (kVAR)	R (Ω)	X (mH)
SNG T01	37400	8400	13.4651403	8.02208851
SNG T02	26800	6400	18.6738672	11.8290081
SNG T03	38400	10600	12.8006453	9.37293025
COY T01	47800	12861	10.3198646	7.36528782
COY T02	45600	12567	10.7819753	7.88195564
COY T03	31000	8331	15.9150927	11.3452349
NAR T01	41784	11430	11.7789373	8.54695089
NAR T02	43680	10920	11.3984055	7.55880242
DAA T01	25661	8039	18.7725563	15.5998617
DAA T02	28058	6228	17.9684927	10.5796773
CDS T01	20075	5569	24.4682043	18.00498
TYA T01	50000	12400	9.96699023	6.55668915
TYA T02	41400	10500	12.0055257	8.07679426
TYA T03	39800	11000	12.3482147	9.0527946

Tabla 3. 20 Perfiles de Carga máxima 2019 de transformadores del anillo de 230 kV TYA-SNG en parámetros de ATP

A continuación, se presenta la comprobación del modelo empleado para las cargas en ATP a partir del perfil de demanda máxima del transformador TYA-T01.

PERFILES DE CARGA 2019 EN DEMANDA MAXIMA				
TRANSFORMADOR	DEMANDA MAXIMA		PARAMETROS ATP	
	P (kW)	Q (kVAR)	R (Ω)	X (mH)
TYA T01	50000	12400	9.96699023	6.55668915

Tabla 3. 21 Perfiles de Carga 2019 del transformador TYA-T01 en parámetros de ATP

Para su modelado en ATP se considera un componente de carga trifásica RLC e introducen los parámetros de R y X calculados y a partir de un probador de corriente se miden los valores de P y Q observando que corresponden a la carga del transformador en cuestión (50 MW y 1.24 MVAR).

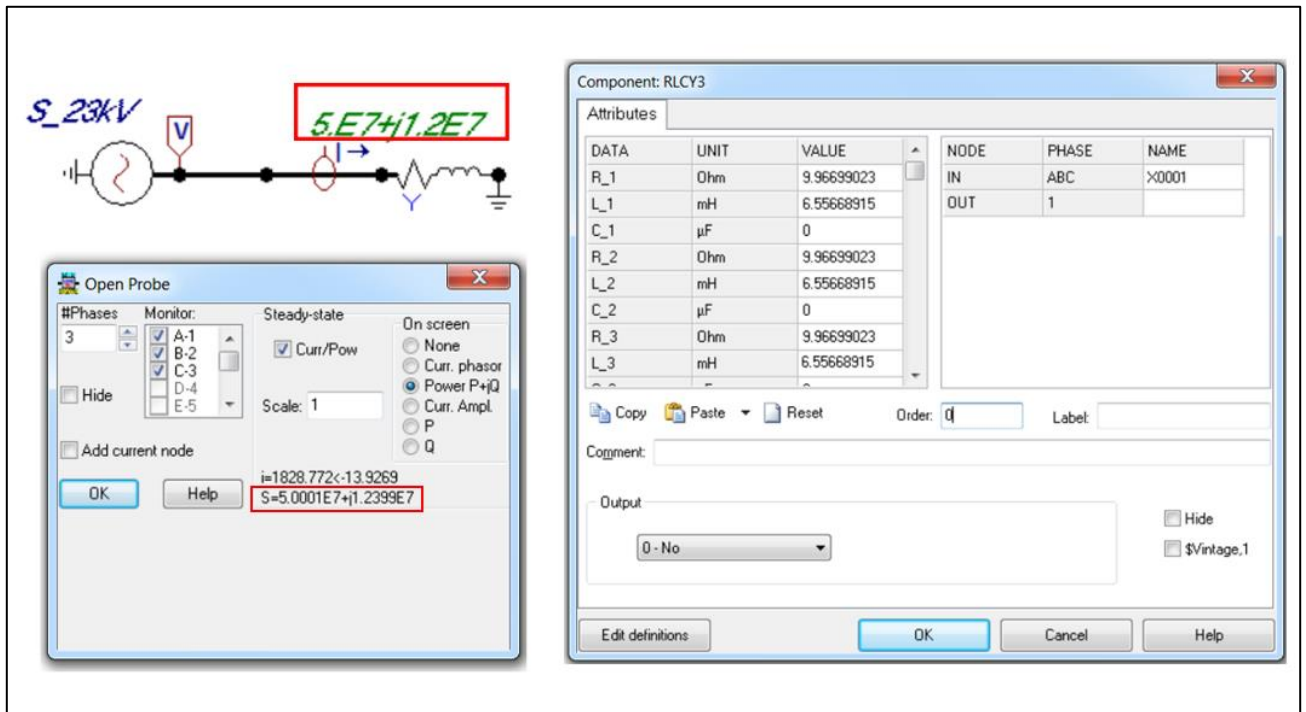


Figura 3. 29 Modelado y comprobación en ATP de carga para el transformador TYA-T01

En la figura 3.30 se observa la comprobación en el modelo de transformador TYA-T01, visualizándose que tanto la corriente como la potencia medida de la carga conectada en el lado baja corresponden a lo medido en el lado primario del transformador.

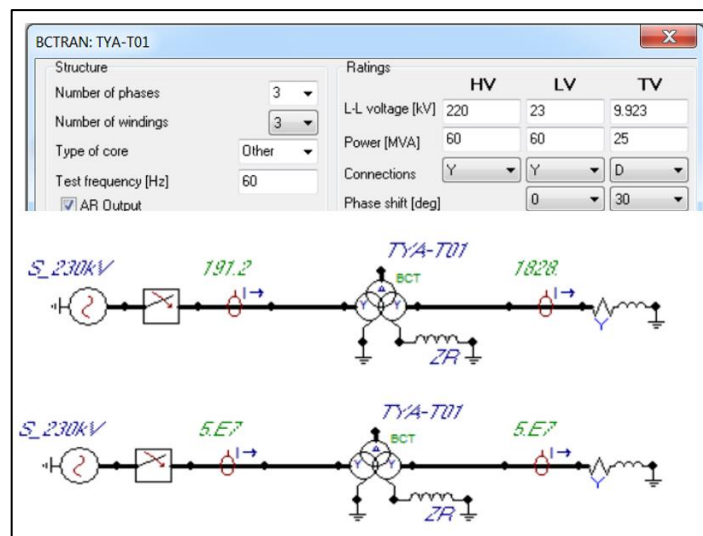


Figura 3. 30 Modelado y comprobación en ATP de carga conectada al transformador TYA-T01

3.2.5 Modelo en ATP del corredor de 230 kV TYA-SNG

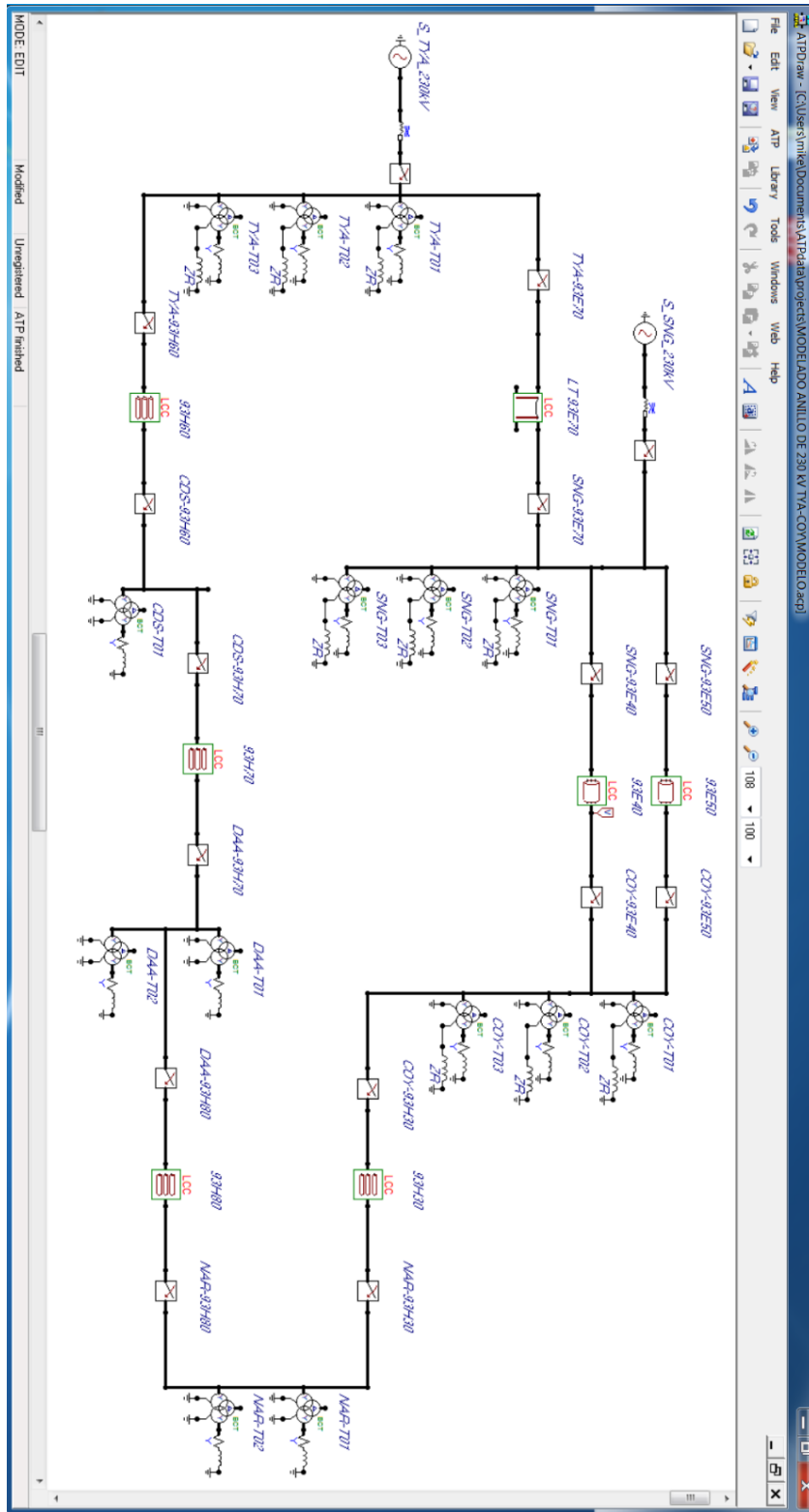


Figura 3. 31 Modelo en ATP del anillo de 230 kv TYA-SNG

CAPITULO IV

Simulaciones

4.1 Condiciones generales de la red

Para las simulaciones que se presentan en este apartado se considera que la red de estudio se encuentra en estado estable y en condiciones de operación normal (anillo cerrado) en un escenario de demanda máxima.

4.2 Parámetros generales en ATP para simulación

Se considera un tiempo de simulación de 50 ms el cual es un tiempo suficiente para poder observar el amortiguamiento de los transitorio, además de un tiempo de muestreo de 1×10^{-6} s.

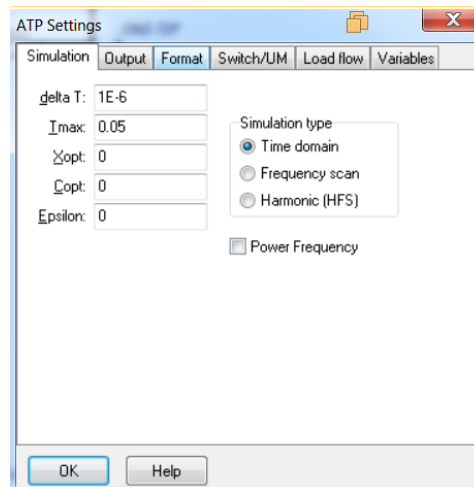


Figura 4. 1 Parámetros generales de simulación en ATP

4.2.1 Energización en vacío de las líneas de transmisión del anillo de 230 kV TYA-SNG

Para este análisis la energización en vacío de cada una de las líneas que conforman la red de estudio se considerara un tiempo de cierre de 16.6 ms.

Para lo sucesivo, en la lectura de los resultados se debe tener presente que en el software ATP-EMTP se maneja el voltaje pico y por fase.

4.2.1.2 Energización en vacío de la L.T. TYA-93H60-CDS (Línea subterránea con cable de potencia tipo XLP)

La figura 4.2 corresponde a la energización en vacío de la L.T. 93H60 teniendo como lado emisor a la S.E. TYA y cómo lado receptor con el extremo abierto a la S.E. CDS,

esta línea subterránea presenta como características generales una longitud de 4.57 km en cable de potencia tipo seco XLP.

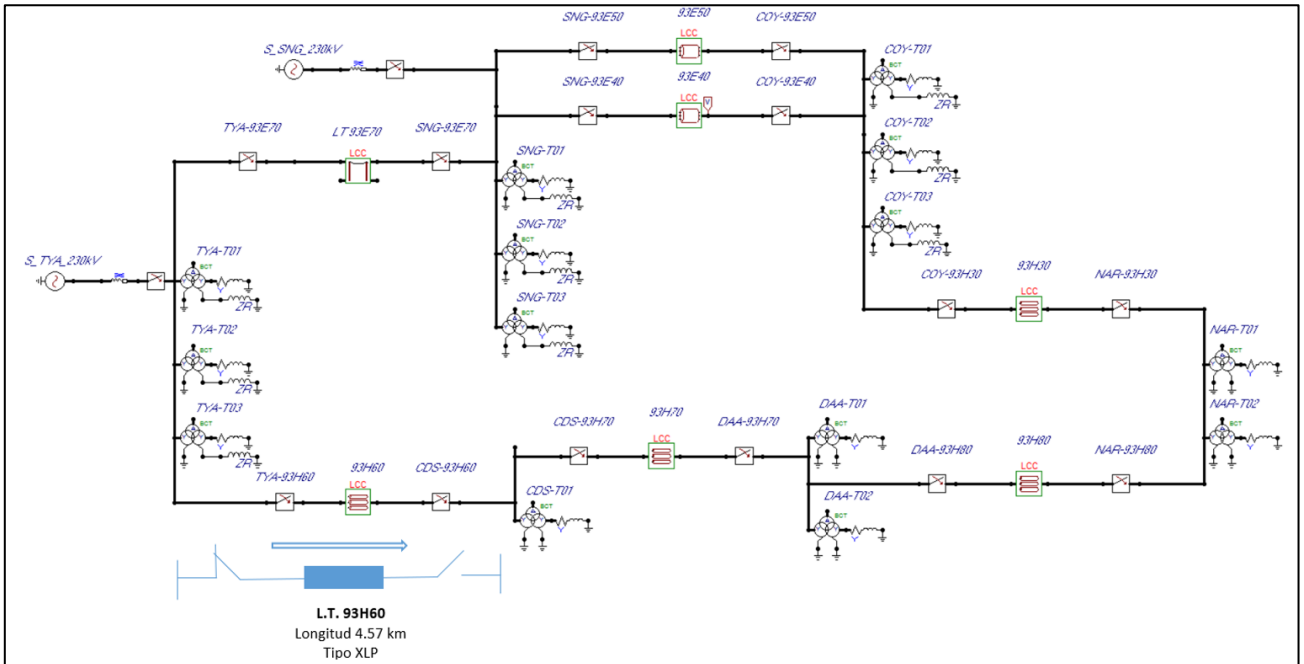


Figura 4. 2 Energización en vacío de la L.T. 93H60 hacia S.E. CDS.

A partir de la oscilografía obtenida para esta maniobra con un tiempo de cierre simultaneo de 16.6 ms, tiempo que fue calculado para determinar la sobretensión más crítica que se pudiese presentar, debido a que como se observa en la figura 4.3, el cierre se produce cuando la señal de la onda cosenoidal de voltaje para la fase A se encuentra en su máxima amplitud generándose de esta manera la máxima sobretensión transitoria y posteriormente se obtienen voltajes de menor magnitud para las fases C y B respectivamente debido a su posición respecto al paso por cero.

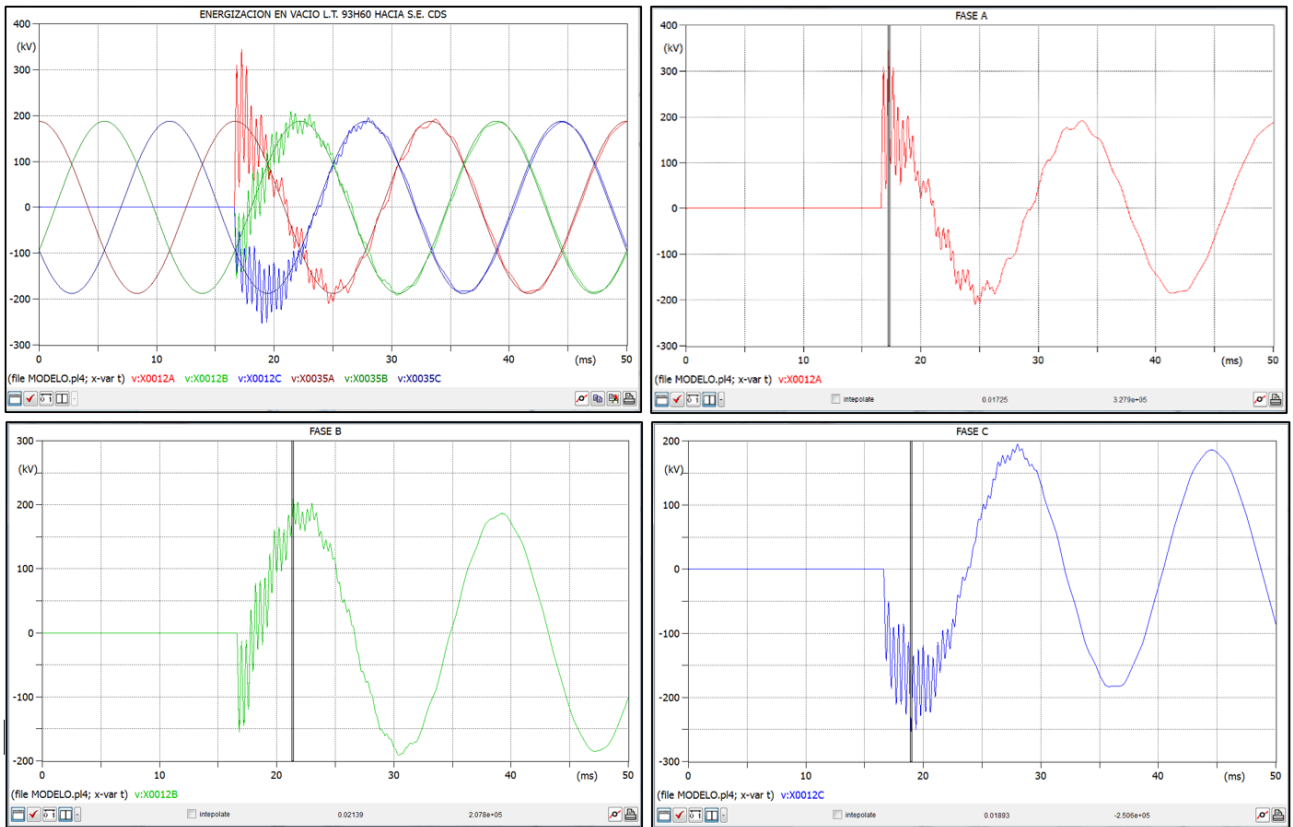


Figura 4. 3 Oscilografía de energización en vacío de la L.T. 93H60 hacia S.E. CDS.

Por tanto, debido a que los voltajes en ATP están expresados en valores pico y de fase para lograr una mejor comprensión de la magnitud de los transitorios obtenidos referiremos estas magnitudes en p.u. teniendo como voltaje base el voltaje máximo de nuestro sistema con referencia a tierra, por tanto:

$$V_{base} = \frac{230 \text{ kV} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 187.79 \text{ kV} \quad (4.1)$$

De esta manera la amplitud máxima del transitorio para la fase A es de 327.9 kV, alcanzada en su semiciclo positivo equivalente a 1.74 p.u., mientras que en la fase B alcanza su máxima amplitud en 1.107 p.u. aproximadamente 5 ms después del cierre debido a que este ocurrió en el semiciclo negativo poco antes a su paso por cero y cuando alcanza su pico máximo positivo el transitorio ya ha sido amortiguado en su mayoría, por su parte la fase C tiene una amplitud en 1.334 p.u. en la parte negativa de su ciclo y ocurre 2 ms de haberse efectuado el cierre con valor mayor que la fase B debido a que su magnitud negativa en el instante del cierre ya había cruzado por cero en sentido creciente.

En cuanto al tiempo de amortiguamiento del transitorio se observa que tiene una duración de oscilamiento de aproximadamente de 18.4 ms después de efectuarse el cierre.

4.1.2.3 Energización en vacío de la L.T. TYA-93E40-SNG (Línea subterránea con cable de potencia tipo PIPE)

Para la energización en vacío de la L.T. 93E40 se presenta como lado emisor a la S.E. COY y como lado receptor con el extremo abierto la S.E. SNG, su descripción corresponde a una línea subterránea con una longitud de 4.0 km en cable de potencia en aceite tipo PIPE.

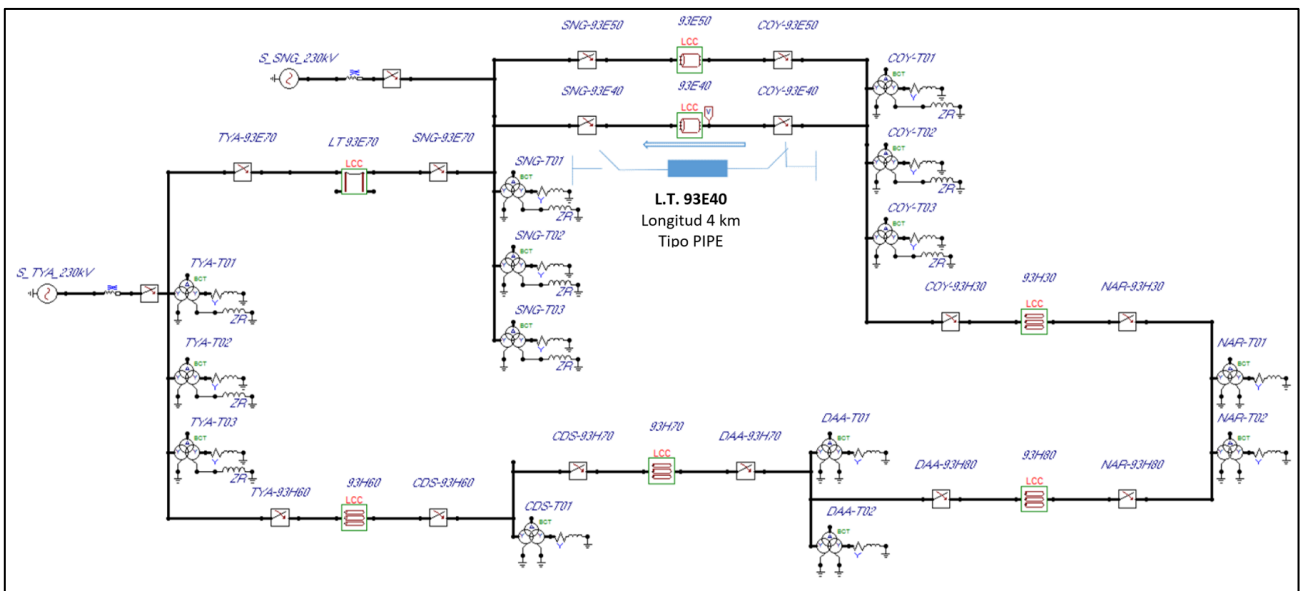


Figura 4. 4 Energización en vacío de la L.T. 93E40 hacia S.E. SNG

A partir de las simulaciones bajo las mismas condiciones generales del sistema descritas al inicio de este apartado se obtienen para su análisis y comparativa los siguientes oscilogramas de transitorios de sobretensión trifásico y por fase de este cable tipo PIPE de 230 kV el cual es una tecnología de cable subterráneo que tubo un gran uso en la década de los 70s y 80s con la entonces extinta LyC sobre todo para líneas de 85 kV.

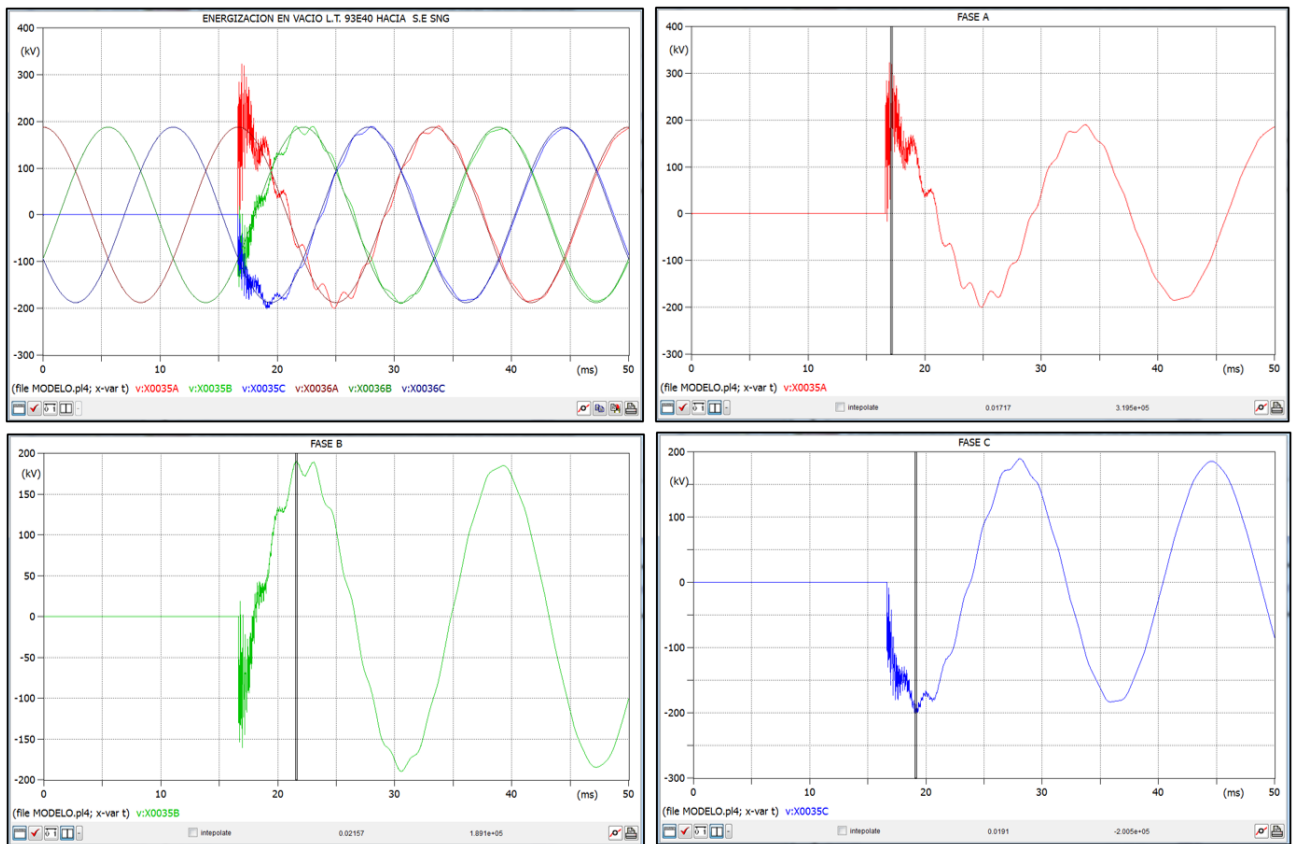
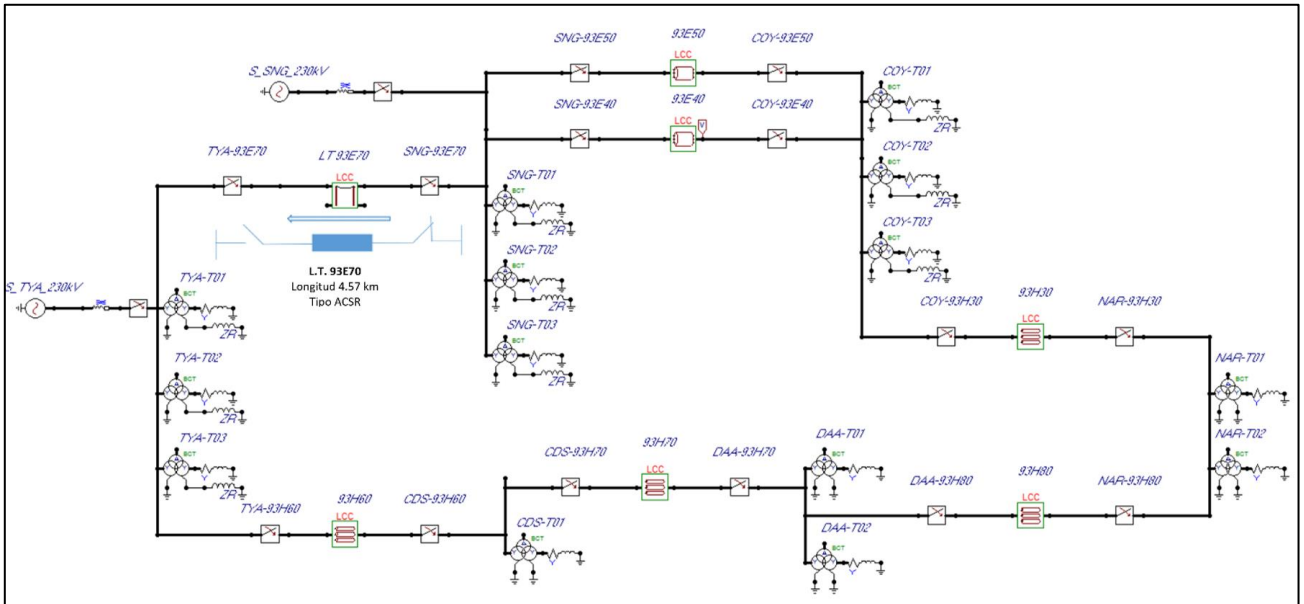


Figura 4. 5 Oscilografía de energización en vacío de la L.T. 93E40 hacia S.E. SNG

De la figura 4.5 es posible observar un transitorio de características muy similares a al generado por la energización en vacío del cable de potencia tipo seco de la línea anterior, esto a pesar de que son distintos en cuanto a constitución, geometría y tipos de aislamiento más sin embargo se puede observar un amortiguamiento que igualmente oscila entre los 18 y 20 ms, en cuanto a la amplitud máxima del transitorio para la fase A alcanza un voltaje de 319.5 kV equivalente a 1.701 p.u. durante el semiciclo positivo, mientras la fase B presenta una máxima amplitud en 1.0069 p.u. transcurridos 5.5 ms a partir del cierre que se produjo poco antes a su paso por cero hacia el semiciclo positivo, entre tanto la fase C alcanzo una sobretensión de 1.067 p.u. en el semiciclo negativo aproximadamente a los 2.5 ms del cierre.

4.2.1.4 Energización en vacío de la L.T. SNG-93E70-TYA (Línea aérea con cable ACSR)

La energización en vacío de la L.T. 93E70 presenta como lado emisor a la S.E. SNG y lado receptor con el extremo abierto a la S.E. TYA, con características generales que describen una longitud de 3.5 km de línea aérea con cable tipo ACSR de un hilo por fase.



A partir de las oscilografías mostradas en la figura 4.7 se observa que el transitorio obtenido para la única línea aérea que compone el anillo de 230 kV permite visualizar un comportamiento general distinto respecto al de los cables subterráneos debido a que su amortiguamiento es aproximadamente 4 veces más breve con una duración estimada de 5.5 ms, y en cuanto a la amplitud la fase A alcanza una sobretensión máxima 358.5 kV equivalente a 1.909 p.u. lo que representa una magnitud estimada 11% mayor a la sobretensión máxima obtenida con los cables de potencia analizados anteriores, por su parte la fase B presenta una máxima amplitud en 1.066 p.u. instantáneos al momento de cierre mientras que en los cables subterráneos hubo que pasar de 2 a 5 ms para alcanzar su máxima amplitud, en cuanto a la fase C apenas alcanza una amplitud máxima a los 3 ms en el pico de su semiciclo negativo equivalente a 1.048 p.u. debido a la rápida a atenuación del transitorio generado.

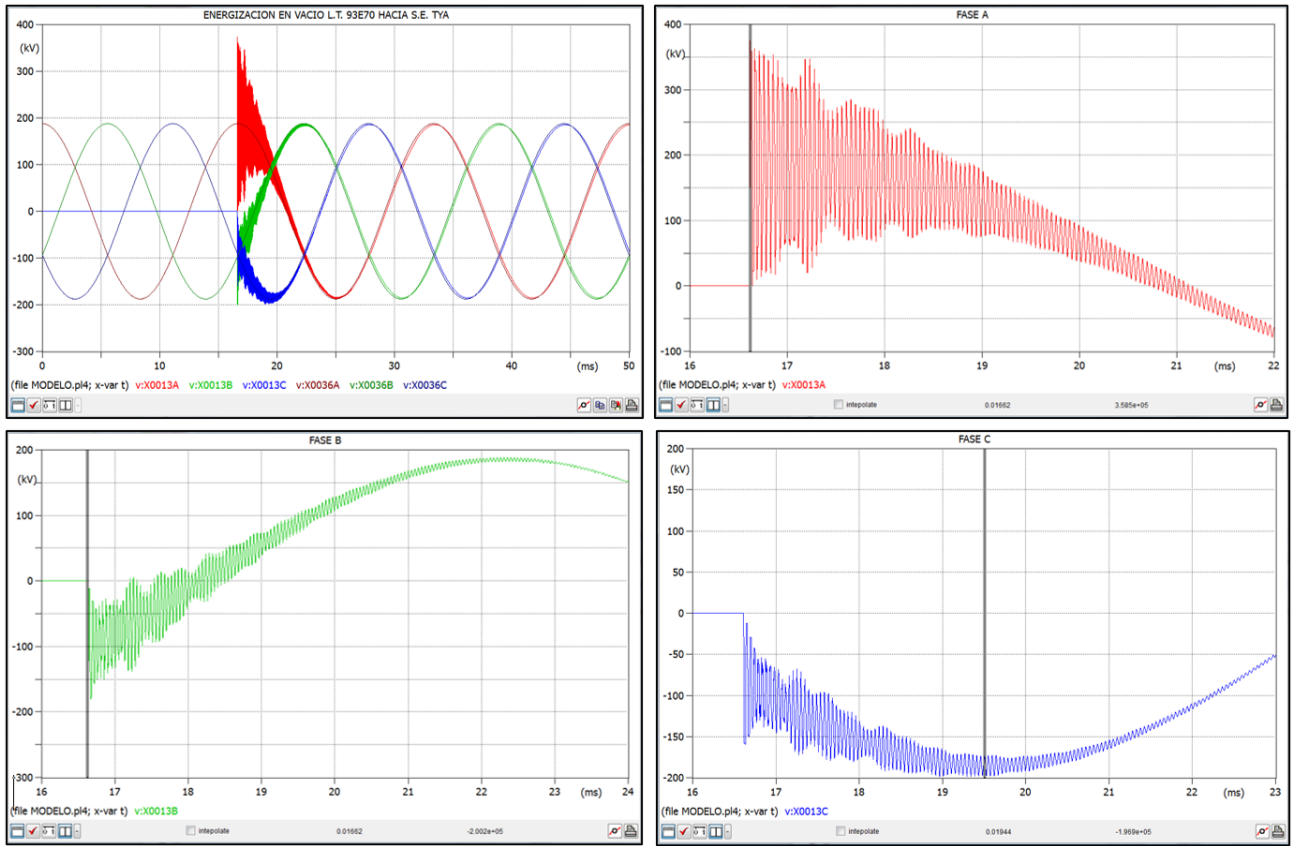


Figura 4. 7 Oscilografía de Energización en vacío de la L.T. 93E70 hacia S.E. TYA

Del proceso de simulación para la energización en vacío de la totalidad de las líneas del corredor de estudio y procesada esta información se obtiene el siguiente resumen de resultados donde es posible observar por línea la energización hacia cada extremo, además de la sobretensión por fase máxima alcanzada y el tiempo de amortiguación del transitorio.

RESUMEN DE RESULTADOS PARA LA ENERGIZACIÓN EN VACÍO DE LAS LÍNEAS DEL ANILLO DE 230 Kv TYA-SNG											
Línea	Longitud (km)	Tipo	Extremo Abierto	Vf-pico máx. (kV)			V máx. P.U. (kV)			Tiempo de Amortiguamiento máx.	
				Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	ms	ciclos
TYA-93H60-CDS	4.57	XLP	S.E. CDS	327.9	207.8	250.600	1.746	1.107	1.334	18.4	1.108
			S.E. TYA	282.68	189.8	197.1	1.505	1.011	1.050	18.4	1.108
CDS-93H70-DAA	1.2	XLP	S.E. DAA	258.68	187.79	196.63	1.377	1.000	1.047	13.4	0.807
			S.E. CDS	267.7	182	189.4	1.426	0.969	1.009	18.4	1.108
DAA-93H80-NAR	5.4	XLP	S.E. NAR	326.9	197.7	211.48	1.741	1.053	1.126	23.4	1.410
			S.E. DAA	316.82	194.02	213.95	1.687	1.033	1.139	21.4	1.289
NAR-93H30-COY	2.8	XLP	S.E. COY	278.9	184.2	195.58	1.485	0.981	1.041	17.4	1.048
			S.E. NAR	336.7	186.94	201.34	1.793	0.995	1.072	17.4	1.048
COY-93E40-SNG	4	PIPE	S.E. SNG	319.5	189.1	200.5	1.701	1.007	1.068	19.4	1.169
			S.E. COY	304.31	191.13	202.6	1.620	1.018	1.079	20.4	1.229
COY-93E50-SNG	4	PIPE	S.E. SNG	322.05	190.13	200.4	1.715	1.012	1.067	19.4	1.169
			S.E. COY	304.31	191.13	203.1	1.620	1.018	1.082	19.4	1.169
SNG-93E70-TYA	3.5	ACSR	S.E. TYA	358.5	200.2	196.9	1.909	1.066	1.049	5.4	0.325
			S.E. SNG	361.7	193.5	193	1.926	1.030	1.028	5.4	0.325

Tabla 4. 1 Resumen de resultados de energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG

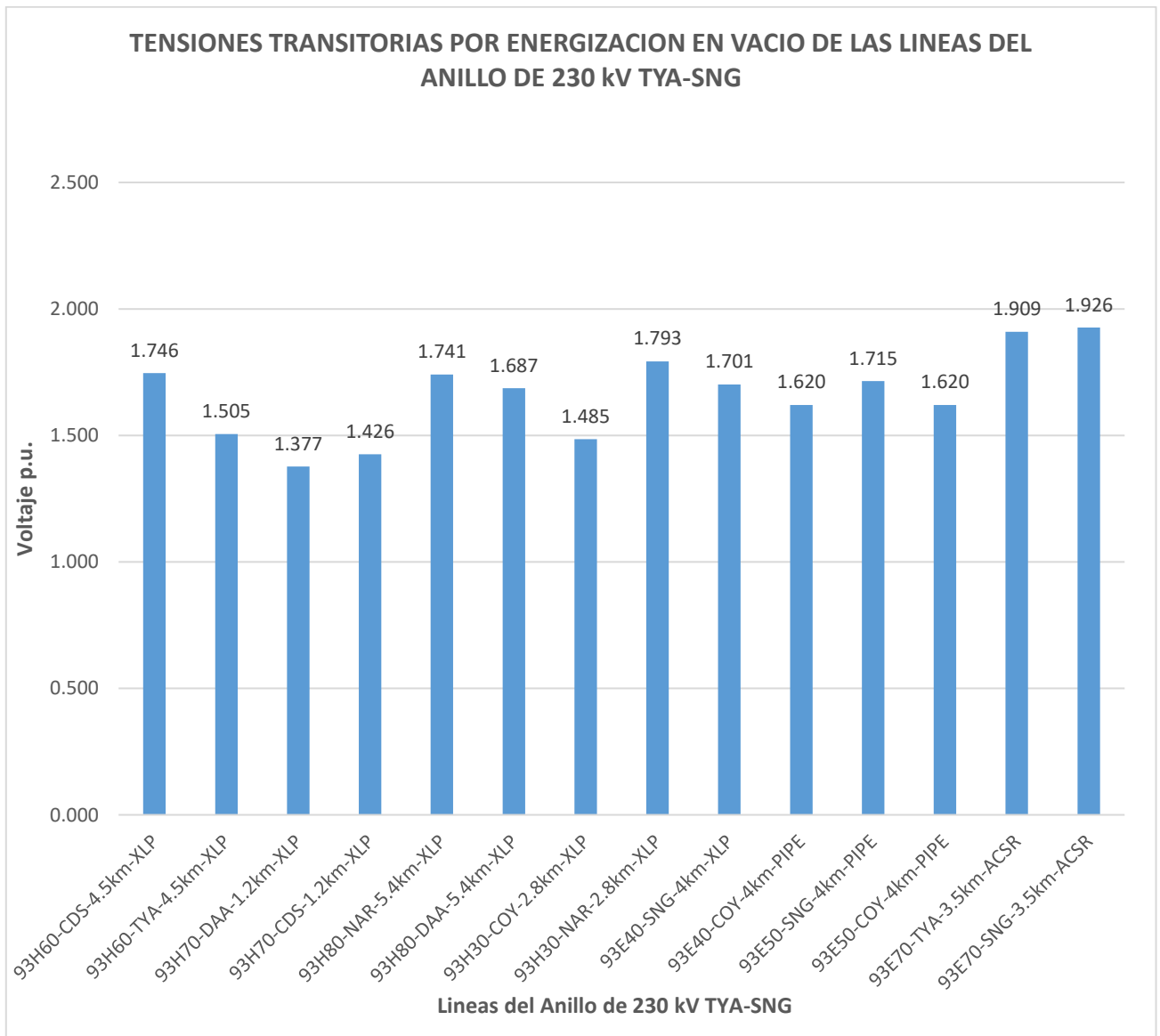


Figura 4. 8 Tensiones transitorias por energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG

El presente grafico muestra las sobretensiones máximas alcanzadas durante la energización en vacío de las líneas de la red para la cual se visualiza la relación de la amplitud de transitorio respecto a su longitud, además su respuesta similar entre cables subterráneos tipo PIPE y XLP con la misma longitud, sin embargo, las sobretensiones más altas se alcanzan en el extremo abierto de la línea aérea siendo esta más corta.

La siguiente grafica resume los tiempos de amortiguamiento para cada una de los transitorios en las diferentes maniobras de energización en vacío.



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

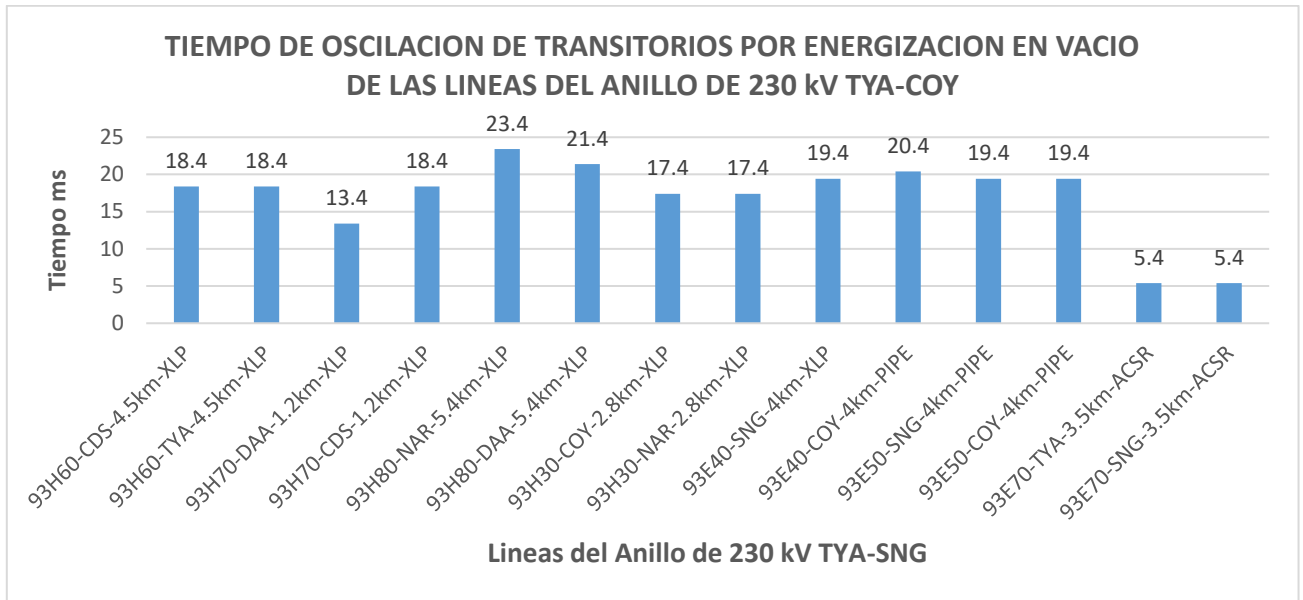


Figura 4. 9 Tiempos de oscilación de transitorios por energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG

Es posible igualmente distinguir la relación del tiempo de oscilación respecto a la longitud de los cables subterráneos XLP y PIPE con la variante de comportamiento de la línea aérea la cual presenta un amortiguamiento muy breve en comparación de los cables que permiten un mayor periodo de oscilación antes atenuarse al valor nominal del sistema.

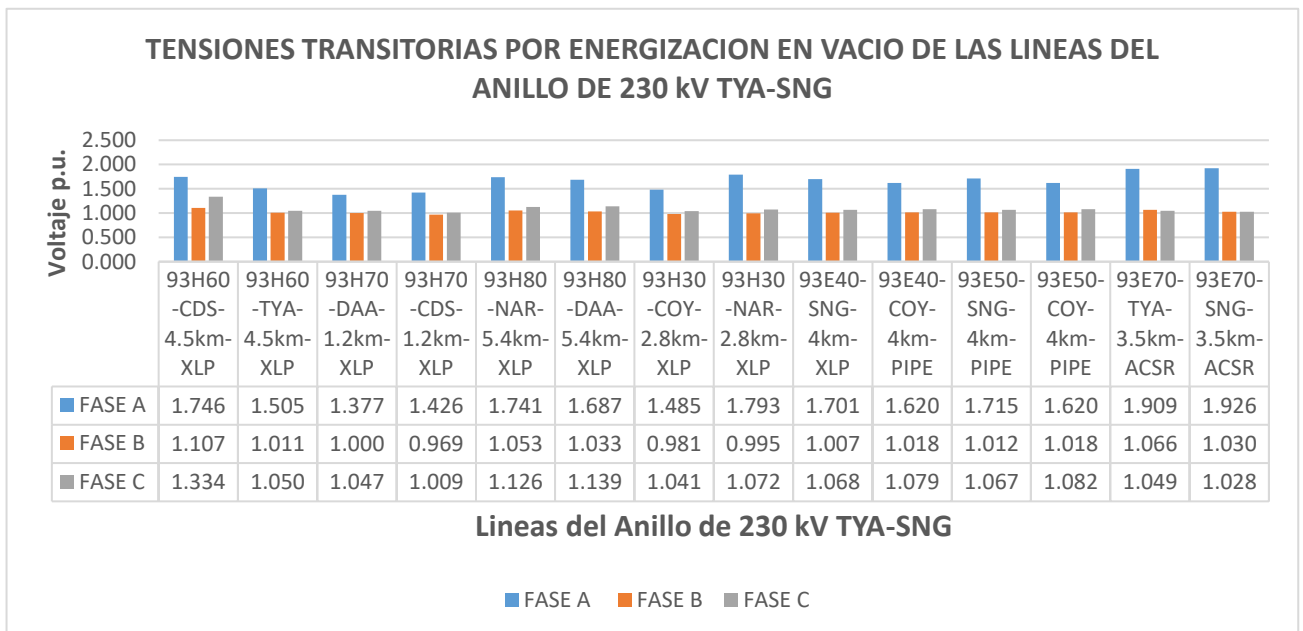


Figura 4. 10 Tensiones transitorios por energización en vacío de las líneas del anillo de 230 TYA-SNG

La grafica de la figura 4.10 muestra las sobretensiones máximas alcanzadas por fase debido a la respuesta transitoria durante la energización de cada extremo de las líneas de la red de estudio.

4.2.2 Cierre con carga de las líneas de transmisión del anillo de 230 kV TYA-SNG

Al igual que en los estudios anteriores para estas simulaciones el interruptor ejecutara el cierre transcurridos 16.6 ms mediante cierre secuencial.

Como resultado de múltiples simulaciones de cierre con carga para cada extremo de las líneas que conforman nuestra red de estudio se observa que se obtienen respuestas transitorias de sobretensión muy pobres para todas las líneas y que son casi imperceptibles solo en la fase A, esto debido a que en el instante del cierre se encuentra en su valor máximo por lo que a partir de la siguiente figura generalizaremos estos transitorios mostrando solamente las oscilaciones que se presentaron en los picos de la onda cosenoidal de la fase A para las líneas subterráneas 93H70 en cable XLP y 93E40 en cable tipo PIPE así como de la línea aérea 93E70 en cable ACSR.

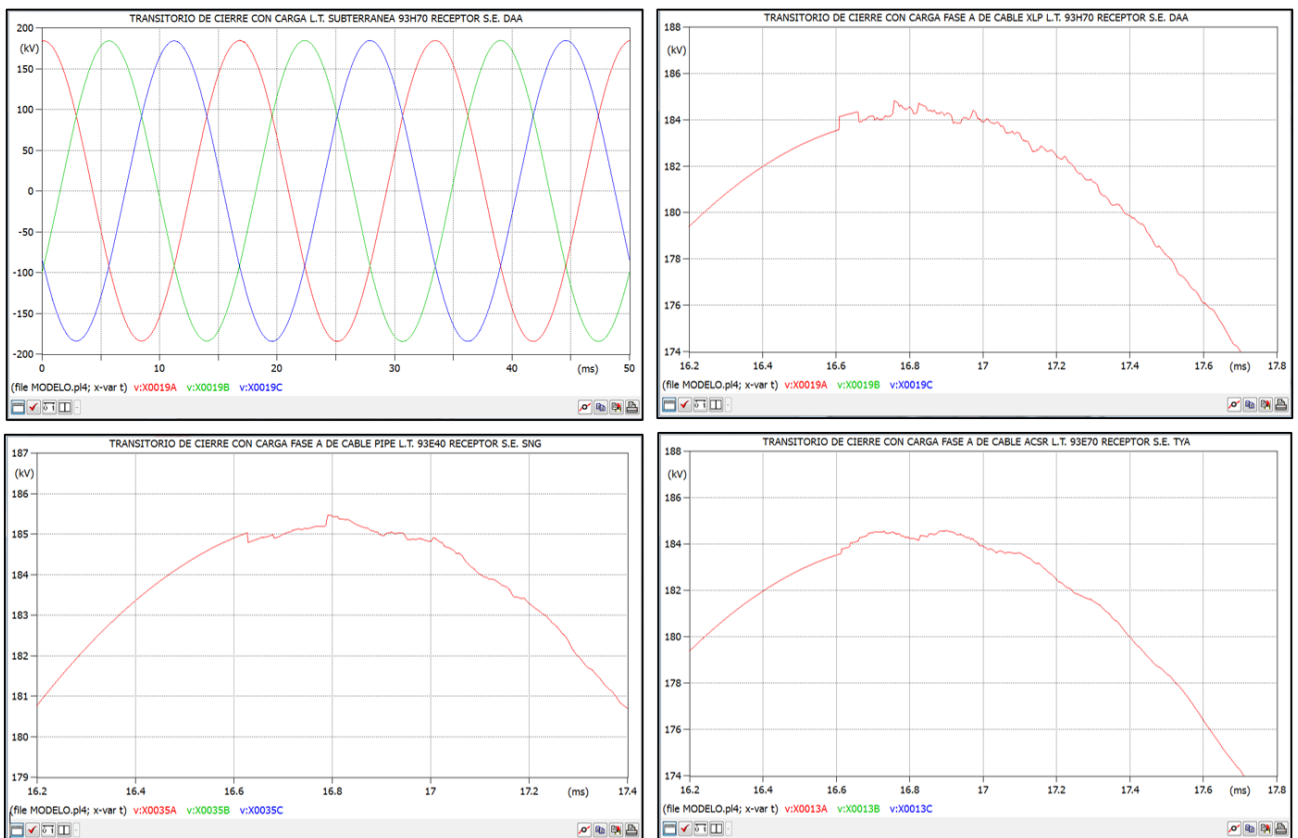


Figura 4. 11 Oscilografía de cierre con carga de las líneas del anillo de 230 kV TYA-SNG



Analizando los resultados obtenidos para la energización con carga de las líneas del anillo de 230 kV TYA-SNG se obtienen respuestas transitorias no esperadas sin embargo eso no significa que sean incorrectos y mucho menos que no sean satisfactorios, ya que esto se explica principalmente debido a una combinación de factores inherentes a las condiciones de operación, configuración de la red en anillo y al tipo de maniobra para la cual los transitorios se caracterizan por alcanzar menores amplitudes que las sobretensiones de energización en vacío al existir una carga en el extremo receptor con un valor de impedancia más cercana a la impedancia característica de la línea que a diferencia con una energización en vacío donde el valor de la resistencia de la carga es prácticamente infinita produciéndose el máximo transitorio por su parte en el caso de tener la carga un valor muy cercano a la impedancia característica de la línea prácticamente no se presenta sobretensión transitoria debido a que las reflexiones en el extremo receptor se anulan, aunado a este echo la magnitud y el amortiguamiento como se observó en la simulaciones del apartado anterior, están estrechamente relacionados con la longitud de las líneas por lo que al ser muy cortas su magnitud es menos sobresaliente y con un amortiguamiento más breve, por lo que considerando los puntos anteriores es razonable comprender que al generarse el cierre con carga en cualquier punto del anillo la resistencia de la misma por la condición de la red al instante del cierre genere una magnitud de reflexión muy pobre en el extremo receptor que es atenuado instantáneamente haciéndolo imperceptible.

4.2.3 Apertura con carga de las líneas de transmisión del anillo de 230 kV TYA-SNG

Se simulan maniobras de apertura de operación simultánea con carga en cada uno de los extremos de las líneas de la red una a la vez, obteniéndose como respuesta transitoria en el extremo receptor una pequeña oscilación ligeramente perceptible únicamente para la línea aérea en la fase A durante su a amplitud pico mientras que para las líneas subterráneas no se percibe oscilación alguna, como se muestra en la figura siguiente.

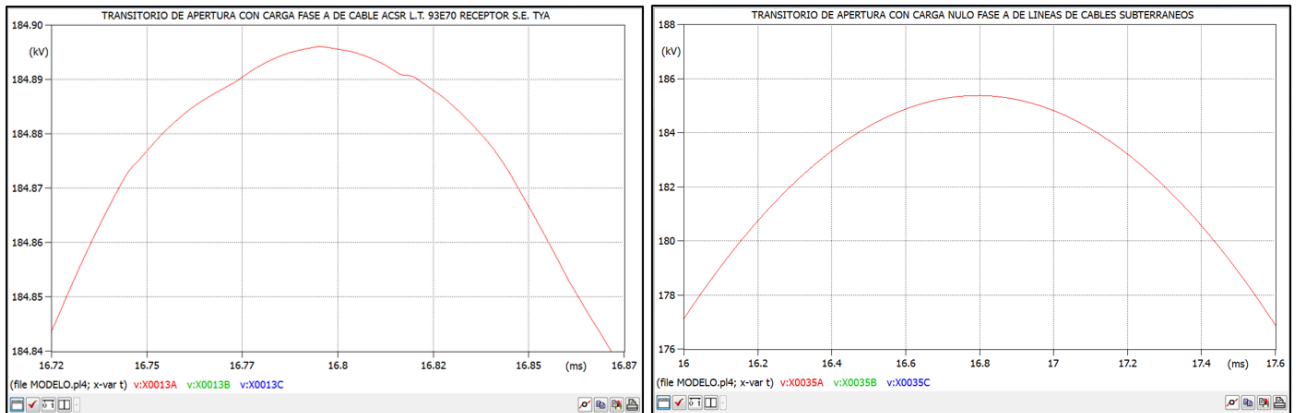


Figura 4. 12 Oscilografía de apertura con carga de las líneas del anillo de 230 kV TYA-SNG



Conclusiones

El presente trabajo se centralizó en el desarrollo de un modelo aproximado en ATP-EMTP para la red del anillo de 230 kV TYA-SNG con la finalidad de analizar los niveles de sobretensión a los que pudieran estar sometidos los aislamientos de sus elementos, al realizarse las maniobras básicas necesarias durante su operación en condiciones normales bajo un escenario de demanda máxima.

Por su parte a partir de las consideraciones y aplicación de metodologías para el manejo de datos proporcionados por el fabricante se obtiene una correcta parametrización de los elementos de la red de estudio modelados en ATP, resultado de ello es que se obtiene una aproximación general aceptable al comparar los parámetros de línea de secuencia de los modelos de ATP con los parámetros de secuencia modelados en Aspen. Observando que el modelo de línea empleado de onda viajera Bergeron presenta una mayor exactitud para las líneas aéreas respecto a los cables subterráneos.

Derivado de los resultados obtenidos de la simulación para las diferentes maniobras consideradas en este estudio se pudo observar lo siguiente:

- Las máximas sobretensiones que se pudieron alcanzar para esta red por maniobras en condiciones de operación normal bajo un escenario de demanda máxima ocurren durante las maniobras de energización de líneas en vacío.
- Debido a las condiciones de operación, configuración de la red en anillo, longitud de las líneas y características de los conductores de potencia para esta red la máxima amplitud de sobretensión transitoria se presenta al energizar en vacío la línea aérea TYA-93E70-SNG alcanzando una sobretensión máxima de 1.926 p.u. mientras que para los cables subterráneos la máxima sobretensión es de 1.793 p.u. y 1.715 p.u. para el cable XLP y PIPE respectivamente.
- Para esta configuración de red es posible apreciar una respuesta transitoria en cuanto magnitud y amortiguamiento muy similar entre los cables subterráneos tipo PIPE y los tipos Seco XLP.
- La simulación de cierres y aperturas con carga de las líneas demuestran que estas maniobras presentan reflexiones de amplitud muy baja por efecto de la carga y configuración de la red presentando un tiempo de oscilación muy breve que son prácticamente imperceptibles.
- Los niveles de sobretensiones obtenidos de las maniobras de energización en vacío para ambos extremos de la misma línea, pueden ser tomados como referencia en la práctica real al tener que energizar cualquiera de las líneas del anillo de 230 kV TYA-SNG ya que nos permitirán conocer que extremo sería



conveniente cerrar primero causando la menor sobretensión en el extremo abierto y la consecuente disminución de esfuerzos a los aislamientos involucrados durante esta maniobra.

Sugerencias para trabajos futuros

Debido al amplio campo de estudios de fenómenos transitorios que se pueden presentar en la red modelada debido tanto a factores internos como externos el presente modelo desarrollado podría ser la base para el desarrollo de análisis relacionados y complementarios como:

- Estudios y análisis de transitorios generados por descargas atmosféricas
- Estudios y análisis de transitorios por fallas monofásicas y trifásicas en diferentes puntos de la red.
- Estudios y análisis de coordinación de aislamientos.
- Estudios y análisis de protecciones para transitorios de sobretensión producidos por maniobras y descargas atmosféricas.



Referencias

- [1] Manual de Interruptores de Potencia, CFE-CTT-Gerencia de Subestaciones y Líneas, Marzo 2003.
- [2] Interruptores de Potencia de 72.5 a 420 KV, NRF-022-CFE-2002
- [3] Comisión Reguladora de Energía, Resolución Núm. RES/151/2016
- [4] ASPEN OneLiner Version 10 User's Manual
- [5] Luis A. Siegert C. Alta Tensión y Sistemas de Transmisión,
- [6] Procedimiento CFE L0000-06 de Coordinación de Aislamiento, Octubre 2019
- [7] Diseño de líneas de Transmisión aéreas, Especificación CFE-DCDLTA01, Marzo 2014
- [8] B. Gustavsen, “Panel Session on Data for Modeling Systems Transients Insulated Cable”, Trondheim, Norway.
- [9] Manual técnico de cables de energía Condumex, tercera edición, 2005.
- [10] J.H. Nehuer. “The phase sequence impedance of pipe-type cables”, IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, August 1964.
- [11] L.M. Wedepohl & D.J. Wilcox, “Transient analysis of underground power transmission systems: System-model and wave propagation Characteristics”, 1973.
- [12] Guía de aplicación de la especificación de coordinación de aislamiento CFE L000-41
- [13] J. Matinez Velazco, Power System Transients – Parameters Determination, 2010.
- [14] H.W. Dommel & W.S. Meyer, Digital Computer Solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks, April 1969.
- [15] ATPDRAW, Version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista, Users' Manual, 2009.
- [16] M.C. Salvador Fraustro Reyna, Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia 1.
- [17] Paul C.R. Analysis Of Multiconductor Transmission Lines, 1994, Jhon Wiley & Sons Inc.
- [18] Talavera G. G. Análisis Fisicomatemático de Redes Eléctricas, 1998, México, Limusa.



[19] Allan Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, second edition, Jhon Wiley & Sons Inc.

[20] *Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*, 1994.



Anexos

Anexo A: Reporte de pruebas de fabrica a transformadores (NAR-T01)

11. MEDICION DE PERDIDAS DE VACIO A 60 Hz.					Instrumentos Utilizados: Series:			
Normas Aplicada: NMX - J - 169, IEEECS7.12.90.					Equipo: LMS 4000 / 100			
Método de Prueba: Excitación con una fuente trifasica en el devanado de B.T.					Instructivo: IACT - 217			
Base de Medición y Cálculos 60 000 kVA								
Prueba 1 al 90% de su tensión nominal					20 700 V			
Lectura	Tensión Media en Volts	Tensión Eficaz en Volts	Corriente en Amperes	Potencia en Watts	Cálculos Finales			
					W Reales	21 311	% Iexc	0,06
X 1	20 707	20 721	0,746	7 181	W Calc.	-----	%IexcCal	-----
X 2	20 744	20 782	1,130	6 905	Diferencia	-----	Diferencia	-----
X 3	20 648	20 692	1,023	7 258Resultado : SATISFACTORIO			
	20 700	20 732	2,898	21 344				
Prueba 2 al 100% de su tensión nominal					23 000 V			
Lectura	Tensión Media en Volts	Tensión Eficaz en Volts	Corriente en Amperes	Potencia en Watts	Cálculos Finales			
					W Reales	26 512	% Iexc	0,07
X 1	23 022	23 001	0,772	9 048	W Gar.	26 800	%IexcGar	0,10
X 2	22 966	22 952	1,339	9 766	Diferencia	288	Diferencia	0,03
X 3	23 030	23 038	1,050	7 688Resultado : SATISFACTORIO			
	23 006	22 997	3,162	26 502				
Prueba 3 al 110% de su tensión nominal					25 300 V			
Lectura	Tensión Media en Volts	Tensión Eficaz en Volts	Corriente en Amperes	Potencia en Watts	Cálculos Finales			
					W Reales	32 756	% Iexc	0,09
X 1	25 323	25 207	1,009	10 912	W Calc.	-----	%IexcCal	-----
X 2	25 338	25 229	1,704	14 887	Diferencia	-----	Diferencia	-----
X 3	25 252	25 155	1,114	6 818Resultado : SATISFACTORIO			
	25 304	25 197	3,827	32 617				

Figura A. 1 Medición de pruebas de en vacío del transformador NAR-T01

MEDICION DE IMPEDANCIA BT/T.								
Pos. BT	N.A.	Lectura	Corriente	Tensión	Capacidad KVA	% Z a 75 C	% Z Calc.	% Dif.
		X1	30,880	39,290	1 183	0,1693	-----	-----
Pos. T	Unica	X2	28,110	37,700				
Kv nom.	23,0	X3	30,080	39,820	15 000	2,15	2,0	7,35
Temp.° C		Promedios	29,690	38,937				

Figura A. 2 Figura A. 4 Medición de pérdidas a la carga e impedancia mutua Z X-T del transformador NAR-T01



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

14. PERDIDAS DEBIDAS A LA CARGA E IMPEDANCIA A 60 Hz.						Instrumentos Utilizados:		Series:	
Normas Aplicada : NMX - J - 169, IEEE57.12.90.						Equipo : LMS		4000 / 100	
Método de Prueba: Fuente trifasica en alta tensión, corto circuito en baja tensión.						Termómetro.		4594	
Instructivo : IACT - 218									

Cap. kVA.	36 000	Lectura	Corriente	Tensión	Potencia	Capacidad kVA.	36 000	45 000	60 000
Pos. AT	17	H1	94,08	23 409	30 194	W Medidos	79 445	124 437	223 309
Pos. BT	3	H2	94,58	23 492	23 485	I2R Ambiente	59 276	92 619	164 657
I nom.	94,48	H3	94,84	23 531	25 766	Ind. Ambiente	20 169	31 818	58 652
Temp.° C	22,9		94,50	23 477	79 445	Ind. a 75° C	16 774	26 462	48 779
						I2R a 75° C	71 274	111 366	197 984
						Wr a 75° C	88 048	137 828	246 764
						W en Vacío	26 512	26 512	26 512
						W Totales	114 560	164 340	273 276
						W Garantía.	114 640	164 050	270 800
						Diferencia	80	290	2 476
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									
						% Z a 75° C	10,67	13,33	17,79
						% Z Gar.	10,80	13,50	18,00
						% Diferencia	1,19	1,24	1,18
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									

Cap. kVA.	45 000	Lectura	Corriente	Tensión	Potencia	Capacidad kVA.	45 000	60 000	
Pos. AT	17	H1	117,29	29 180	47 052	W Medidos	79 445	124 437	
Pos. BT	3	H2	117,94	29 458	36 846	I2R Ambiente	59 276	92 619	
I nom.	118,09	H3	118,82	29 353	40 539	Ind. Ambiente	20 169	31 818	
Temp.° C	22,9		118,02	29 330	124 437	Ind. a 75° C	16 774	26 462	
						I2R a 75° C	71 274	111 366	
						Wr a 75° C	88 048	137 828	
						W en Vacío	26 512	26 512	
						W Totales	114 560	164 340	
						W Garantía.	114 640	164 050	
						Diferencia	80	290	
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									

Cap. kVA.	60 000	Lectura	Corriente	Tensión	Potencia	Capacidad kVA.	60 000		
Pos. AT	17	H1	157,57	38 874	85 116	W Medidos	79 445		
Pos. BT	3	H2	156,41	39 082	65 230	I2R Ambiente	59 276		
I nom.	157,46	H3	158,42	39 442	72 963	Ind. Ambiente	20 169		
Temp.° C	22,9		157,47	39 133	223 309	Ind. a 75° C	16 774		
						I2R a 75° C	71 274		
						Wr a 75° C	88 048		
						W en Vacío	26 512		
						W Totales	114 560		
						W Garantía.	114 640		
						Diferencia	80		
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									

Figura A. 3 Medición de pérdidas a la carga e impedancia mutua Z H-X del transformador NAR-T01

14. PERDIDAS DEBIDAS A LA CARGA E IMPEDANCIA A 60 Hz.						Instrumentos Utilizados:		Series:	
Normas Aplicada : NMX - J - 169, IEEE57.12.90.						Equipo : LMS		4000 / 100	
Método de Prueba: Fuente trifasica en alta tensión, corto circuito en terciario.						Termómetro.		4594	
Instructivo : IACT - 218									

Cap. KVA	15 000	Lectura	Corriente	Tensión	Potencia	Capacidad kVA.	15 000	20 000	25 000
Pos. AT	17	H1	39,12	15 601	11 536	W Medidos	29 035	52 644	82 500
Pos. T	N.A.	H2	39,52	15 743	8 404	I2R Ambiente	20 561	36 553	57 115
I nom.	39,36	H3	39,50	15 700	9 095	Ind. Ambiente	8 474	16 091	25 385
Temp.° C	22,6		39,38	15 681	29 035	Ind. a 75° C	7 039	13 366	21 087
						I2R a 75° C	24 752	44 003	68 755
						Wr a 75° C	31 791	57 370	89 843
						W en Vacío	26 512	26 512	26 512
						W Totales	58 303	83 882	116 355
						W Calc.	.....	.....	.....
						Diferencia	.....	.....	.....
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									
						% Z a 75° C	7,13	9,51	11,88
						% Z Calc.	7,20	9,60	12,00
						% Diferencia	1,00	0,93	0,98
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									

Cap. KVA	20 000	Lectura	Corriente	Tensión	Potencia	Capacidad kVA.	20 000	25 000	
Pos. AT	17	H1	52,51	20 977	20 981	W Medidos	29 035	52 644	
Pos. T	N.A.	H2	52,84	20 894	15 394	I2R Ambiente	20 561	36 553	
I nom.	52,49	H3	52,33	20 898	16 269	Ind. Ambiente	8 474	16 091	
Temp.° C	22,6		52,56	20 923	52 644	Ind. a 75° C	7 039	13 366	
						I2R a 75° C	24 752	44 003	
						Wr a 75° C	31 791	57 370	
						W en Vacío	26 512	26 512	
						W Totales	58 303	83 882	
						W Calc.	.....	.....
						Diferencia	.....	.....
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									

Cap. KVA	25 000	Lectura	Corriente	Tensión	Potencia	Capacidad kVA.	25 000		
Pos. AT	17	H1	64,85	25 898	32 224	W Medidos	29 035		
Pos. T	N.A.	H2	65,85	26 395	24 097	I2R Ambiente	20 561		
I nom.	65,61	H3	66,11	26 131	26 179	Ind. Ambiente	8 474		
Temp.° C	22,6		65,60	26 141	82 500	Ind. a 75° C	7 039		
						I2R a 75° C	24 752		
						Wr a 75° C	31 791		
						W en Vacío	26 512		
						W Totales	58 303		
						W Calc.	.....	
						Diferencia	.....	
Resultado :									
.....SATISFACTORIO									

Figura A. 4 Medición de pérdidas a la carga e impedancia mutua Z H-T del transformador NAR-T01

Anexo B: Especificaciones técnicas de cable de potencia XLP de la L.T. TYA-93H60-CDS


 COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD SUBDIRECCIÓN DE PROYECTOS Y CONSTRUCCIÓN COORDINACIÓN DE PROYECTOS DE TRANSMISIÓN Y TRANSFORMACIÓN		Proyecto: Obra:	
		309 SLT 1620 DIVISIONES DE DISTRIBUCIÓN DEL VALLE DE MEXICO LT CONDOSA - TACUBAYA 230 KV, 4C, 3.45 km-Línea, 4.6 km-Circuito, 1 C/F 2000 mm ² XLP6-Cu, CDFO 36 FO, CS	
CÉDULA DEL CABLE DE POTENCIA 1.4.31.			
Longitud de cable de potencia requerida para la obra:			
Características Constructivas del Cable		Características Eléctricas del Cable	
Área sección transversal (mm ²): 2000		Resistencia eléctrica en CD a 20 °C Ω/km: 0.009	
Diámetro nominal (mm): 54.30		Corriente de cortocircuito en conductor (0.25 s) kA: 573.7	
Espesor nominal (mm): 0.9		Corriente de cortocircuito en pantalla metálica (0.25 s) kA: 51.7	
		Máxima Capacitancia μF/km: 0.262	
Pantalla Metálica		Características de Operación del Cable	
Espesor nominal (mm): 20		Operación nominal °C: 90	
Espesor mínimo (mm): 19		Sobrecarga °C: 105	
Radio mínimo de curvatura del cable (mm): 2620		Cortocircuito °C: 250	
Tensión máxima de jalado (kN): 13734.00			
Peso total del cable (kg/m): 27.8			
Marcado del Cable LS Cable & System CPE IEC 60267-2011 2000mm ² Cu XLP6 20mm Al Bw 133/230/2.5kV 201.7 4800268243 CSC			
Tramos para instalación (m)			
Tramo	Longitud del tramo (m)	Kilometraje acumulado (m)	Longitud del cable (m)
S.E. Condosa - Fosa Emp #2	660.47	0+660.47	700.00
Fosa Emp #2 - Fosa Emp #3	849.53	4+510.00	875.00
Fosa Emp #3 - Fosa Emp #4	750.00	2+270.00	785.00
Fosa Emp #4 - Fosa Emp #5	768.00	3+028.00	800.00
Fosa Emp #5 - Fosa Emp #6	742.00	3+770.00	770.00
Fosa Emp #6 - S.E. Tacubaya	779.95	4+549.95	840.00
Tipo de instalación TERMINALES TIPO INTERIOR (SFC-CABLE) - FOSA DE EMPALME FOSA DE EMPALME - FOSA DE EMPALME FOSA DE EMPALME - FOSA DE EMPALME FOSA DE EMPALME - FOSA DE EMPALME FOSA DE EMPALME - FOSA DE EMPALME FOSA DE EMPALME - TERMINALES TIPO INTERIOR (SFC-CABLE)			
Especificaciones y normas aplicables			
Fabricación	Prueba	Nombre	Fecha
* AIEC - CS - 8 (XLP)	* NMX - J - 030		06.04.17
* AIEC - CS - 8 para (EP)	* NMX - J - 096	Eljeotó	
* NRF - 024 - CHE	* NMX - J - 177	Revisó	06.04.17
* NMX - J - 142	* NMX - J - 212	Verificó	06.04.17
* AIEC - 037		Validó	06.04.17
* CFE EG000 - 17			
* IEC 60840			
* IEC 62087			

Figura B. 1 Especificaciones técnicas de cable de potencia tipo XLP de la L.T. TYA-93H60-CDS

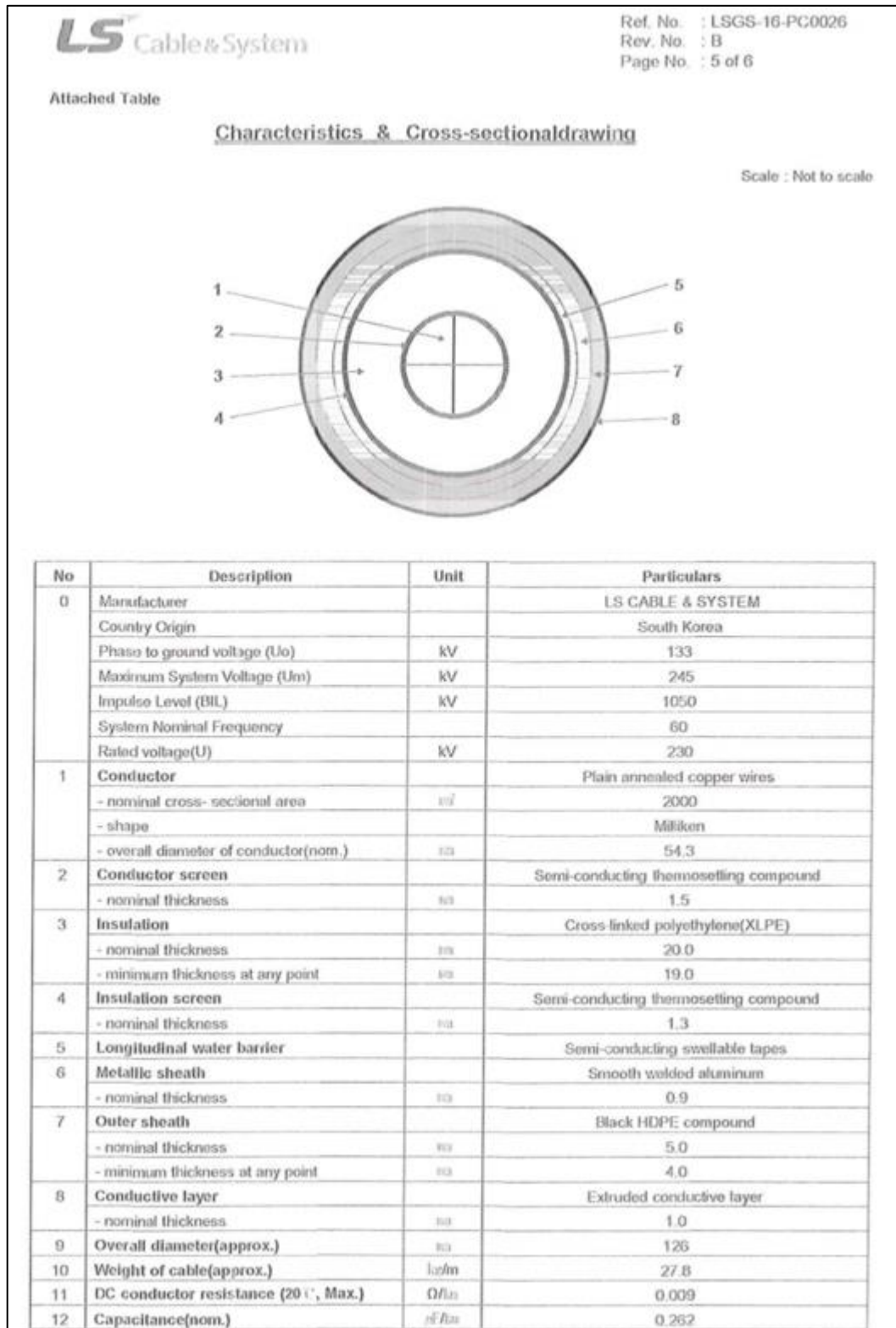


Figura B. 2 Dimensionamiento y especificaciones técnicas de cable de potencia tipo XLP de la L.T. TYA-93H60-CDS



Anexo C: Especificaciones técnicas de cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY

ECSA ENERGIA. CABLES Y SISTEMAS SA DE CV		
<u>CARACTERISTICAS DEL CABLE COYOACAN - SAN ANGEL</u>		
Tensión nominal		230 KV
Frecuencia		60 Hz
Altitud de operación		2300 mts.
Temperatura máxima de los conductores		85°C
Factor de carga promedio		75%
Temperatura de interfase		60°C
Profundidad		1.50 mts
Número de circuitos		2
Separación entre tubos		0.70 m
Resistividad del terreno		100 $\frac{^{\circ}\text{C}\text{-cm}}{\text{W}}$
Temperatura del terreno		24°C (promedio)
Resistividad técnica del aislamiento		500 $\frac{^{\circ}\text{C}\text{-cm}}{\text{W}}$
Ampacidad		
A Factor de carga 100%		435 Amperes
A Factor de carga 75%		566 Amperes
A Factor de carga 50%		730 Amperes
Diferencia de altitud entre subestaciones		90 m
Corto circuito máximo trifásico o de fase a tierra		15000 MVA
Ubicación		Entre las subestaciones San Angel, Coyoacán (ver fig. No. 1)

Calle Convento de Acolman No.18 altos Col. Jardines de Santa Monica Tlalnepanitla de Baz Edo. de México C.P. 54050
Tele. 36267068 celular 0445536103067

Figura C. 1 Especificaciones técnicas de cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY

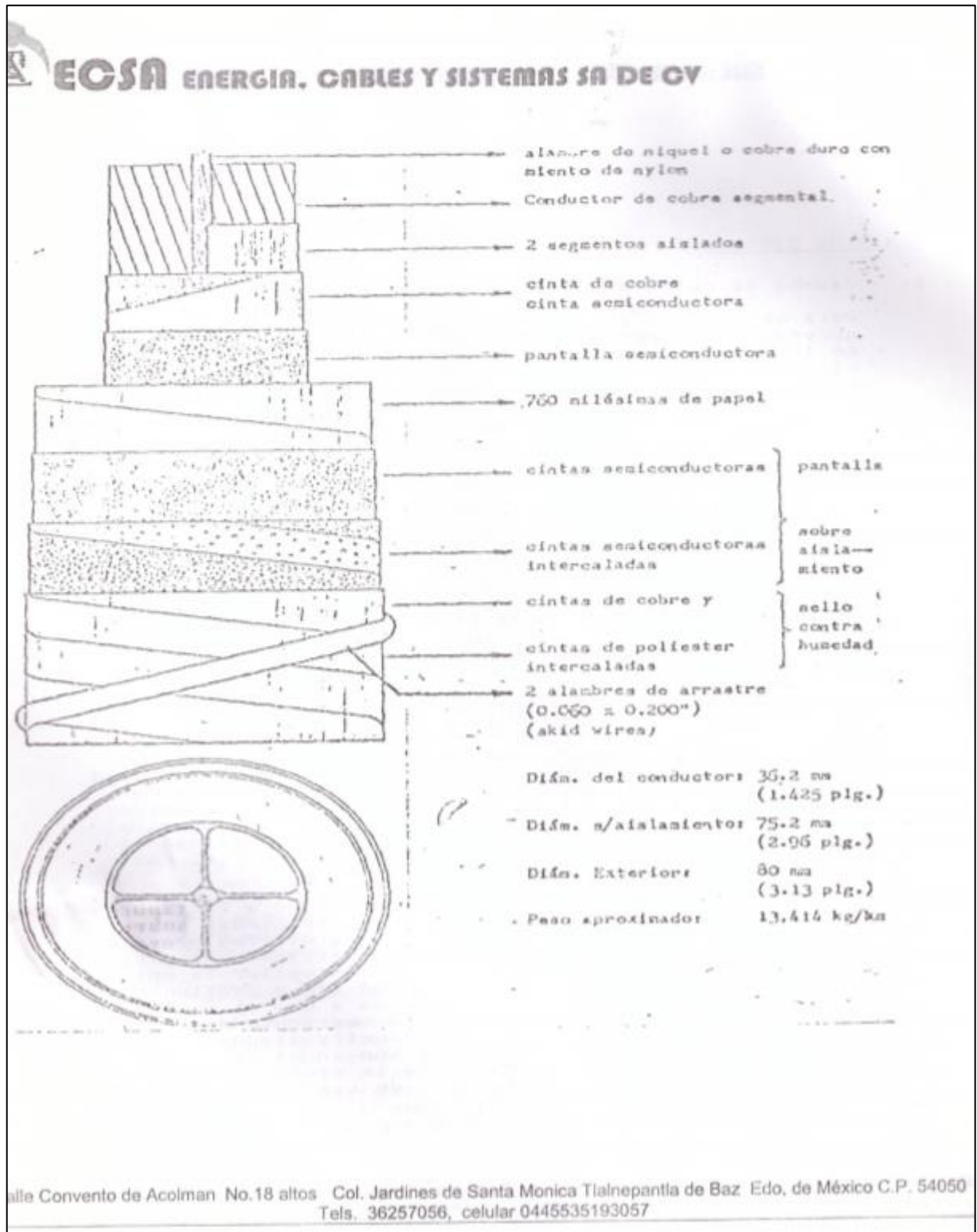


Figura C. 2 Dimensionamiento y especificaciones técnicas de cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY



“ANÁLISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS NODOS DEL ANILLO DE CABLES DE POTENCIA DE 230 KV DEL CORREDOR TYA-SNG”

Tamaño del tubo	Diámetro exterior	Designación	Espesor de la pared	Diámetro interior	Peso por pie	Peso del agua por pie de tubo	Superficie exterior en pies cuad. por pie	Superficie interior en pies cuad. por pie
NPS	O.D.	SCH	T	I.D.				
12	12.750	5	0.156	12.438	21.00	52.636	3.338	3.256
		10	0.180	12.390	24.19	52.230	3.338	3.244
		20	0.250	12.250	33.41	51.056	3.338	3.207
		30	0.330	12.090	43.81	49.731	3.338	3.165
		STD	0.375	12.000	49.61	48.994	3.338	3.142
		40	0.406	11.938	53.47	48.489	3.338	3.125
		X5	0.500	11.750	65.48	46.974	3.338	3.076
		60	0.562	11.626	73.22	45.987	3.338	3.044
		80	0.688	11.374	88.71	44.015	3.338	2.978
		100	0.844	11.062	107.42	41.634	3.338	2.896
		XXS (120)	1.000	10.750	125.61	39.318	3.338	2.814
		140	1.125	10.500	139.81	37.511	3.338	2.749
		160	1.312	10.126	160.42	34.886	3.338	2.651

Tabla C. 1 Tabla de dimensiones para el tubo envolvente de 12" cedula 40 del cable de potencia tipo PIPE de la L.T. SNG-93E40-COY