



NOTAS Y PRÁCTICAS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO I



Leonardo Cardona Correa

Universidad Nacional de Colombia

Marzo de 2012

1. INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA ATP

El programa de transitorios electromagnéticos ATP (Alternative Transients Program), es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia. Fue desarrollado por Scott Meyer a partir de la versión M39 del programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) de la BPA (Bonneville Power Administration).

El programa de transitorios electromagnéticos ATP (Alternative Transients Program), es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia. Fue desarrollado por Scott Meyer a partir de la versión M39 del programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) de la BPA (Bonneville Power Administration).

Este programa permite la simulación de transitorios electromagnéticos en redes polifásicas, donde prácticamente no hay restricciones en el número de fases. Utiliza como herramienta básica la matriz de admitancias de barra, donde utiliza el método de las características de Bergeron, para los elementos de tipo distribuido y la regla de integración trapezoidal para los elementos concentrados.

El programa ATP en el ambiente de trabajo normal viene acompañado de otros programas, como el ATPDRAW (programa para crear el archivo de simulación a partir de un esquema gráfico), los programas PLOTXY y top 2000 (programas de graficación de resultados de simulación), LINE CONSTANTS y CABLE CONSTANTS (programa para cálculo de parámetros y modelos de líneas aéreas y cables aislados).

1.1 HISTORIA

El EMTP/ATP fue desarrollado en su versión inicial por el Dr. Hermann Dommel durante la década del 60 en Alemania. Dommel trabajó en dos períodos en la Bonneville Power Administration (BPA) entre 1964 y 1973, donde se desarrollaron varios modelos con la ayuda de diferentes colaboradores. A partir de 1973 Dommel se vinculó a la Universidad de British Columbia (UBC) y Scott Meyer asumió la coordinación del desarrollo del programa en la BPA.

En 1984 la EPRI decidió invertir en el programa y se formó un grupo de desarrollo del programa EMTP llamado DCG (Development Coordination Group), donde también participó la BPA.

Diferencias entre EPRI y Scott Meyer dieron lugar la creación de una nueva versión del programa que se llamó ATP (Alternative Transients Program), la cual tuvo su sede en Bélgica. Esta versión mejorada es la que actualmente se utiliza por los diferentes grupos de usuarios a nivel mundial.

El programa ha evolucionado desde las versiones para grandes computadoras hasta las versiones actuales para computadores personales.

Debido a que el programa fue escrito inicialmente en Fortran, la interacción con el usuario es mediante un rígido archivo que debe cumplir ciertas normas de dicho lenguaje. Actualmente existen programas tipo interfaz, que permiten un trabajo más amigable para muchas de las aplicaciones. La interfaz que se utilizará es la ATPDRAW, que es un producto desarrollado por Hans Kr. Høidalen, de Norwegian Electric Power Research Institute y realizado mediante un contrato con la BPA. Esta Interfaz ha evolucionado bastante desde una versión inicial para sistema operativo DOS hasta las versiones actuales para ambiente Windows. Esta interfaz cubre una buena parte de las posibilidades que tiene el programa EMTP/ATP pero siempre se deberá tener un conocimiento básico de cómo opera el ATP, que es realmente el programa simulador.

1.2 ESTUDIOS A REALIZAR CON EL PROGRAMA ATP

A pesar de que el objetivo principal del programa es la obtención de la respuesta transitoria de los sistemas eléctricos de potencia, también se puede obtener la respuesta en estado estacionario para un sistema alimentado con CA (respuesta fasorial).

Para la simulación del sistema de potencia el programa posee varios modelos que deja una representación adecuada de los diferentes elementos que lo componen.

Los modelos disponibles se pueden clasificar así:

- Modelos constituidos por elementos concentrados RLC. Estos modelos pueden ser simples ramas RLC serie, circuitos PI polifásicos que pueden representar líneas de transmisión o transformadores.
- Modelo de onda viajera para representar adecuadamente una línea o un cable.
- Impedancias de tipo no lineal: Resistencias no lineales, inductancias no lineales, resistencias variables con el tiempo.
- Suiches ideales controlados por tiempo. Suiches controlados por voltaje para la simulación de “gaps” en flameos de aisladores. Diodos y tiristores. Suiches de operación estadística.
- Fuentes de voltaje y corriente ideales de tipo escalón, sinusoidal, rampa, exponencial y definidas punto a punto.
- Modelo completo para la máquina sincrónica.
- Modelo universal de la máquina eléctrica que permite representar doce tipos de máquinas diferentes. El modelo de más interés en este grupo de modelos es el del motor de inducción trifásico.

- Representación de los sistemas de control mediante la opción de los TACS (Transients Análisis Control System). En las versiones más recientes del ATP existe una opción alterna para representar la parte de control del sistema de potencia: MODELS.

En la Figura 1.1 se observan los diferentes módulos de que dispone el programa ATP para generar modelos. A estos módulos se les ha denominado subprogramas de soporte y algunos de ellos (Line Constants, Cable Constants, Cable Parameters, JMarti Setup, Semlyen Setup, Noda Setup, Bctran) se pueden manejar directamente desde la interfaz ATPDRAW.

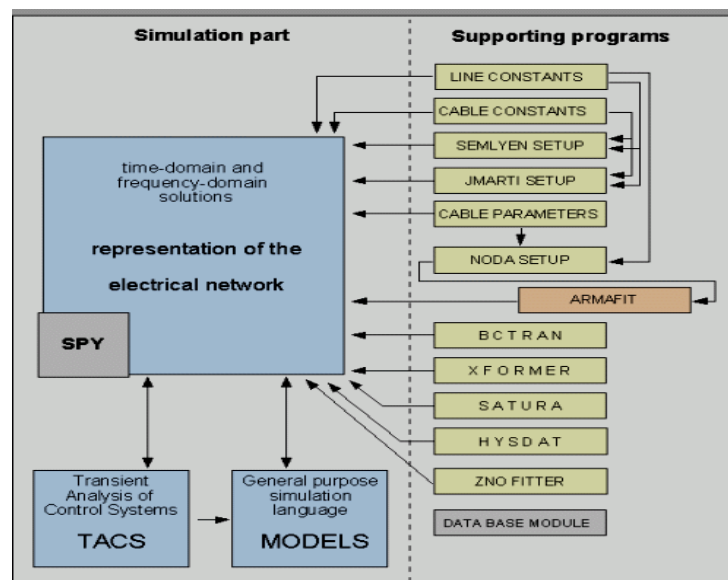


Figura 1.1 Programas de soporte que interactúan con el ATP

El ATP permite hacer entre otros los siguientes estudios:

- Cálculo de parámetros en líneas aéreas y cables subterráneos
- Cálculo en estado estacionario sobre un sistema de potencia
- Sobrevoltajes por maniobra (suicheo)
- Sobrevoltajes por descargas atmosféricas
- Cálculos de cortocircuito involucrando los sistemas de retorno

- Coordinación de aislamiento
- Cálculo de voltajes inducidos sobre elementos cercanos a líneas de transmisión (otras líneas, cercas, oleoductos)
- Resonancia en líneas paralelas
- Simulación de arranque de motores
- Evaluación de armónicos
- Estudios de ferorresonancia
- Máquinas eléctricas
- Simulación del control de las máquinas y del sistema de potencia

1.3 ESTRUCTURA GENERAL DEL AMBIENTE ATP-ATPDRAW

El ambiente de trabajo Atp-Atpdraw está compuesto por tres programas básicos:

- Atpdraw
- Tpbig (ATP)
- Plotxy y TOP 2000

Estos programas interactúan entre si de acuerdo al esquema de la Figura 1.2

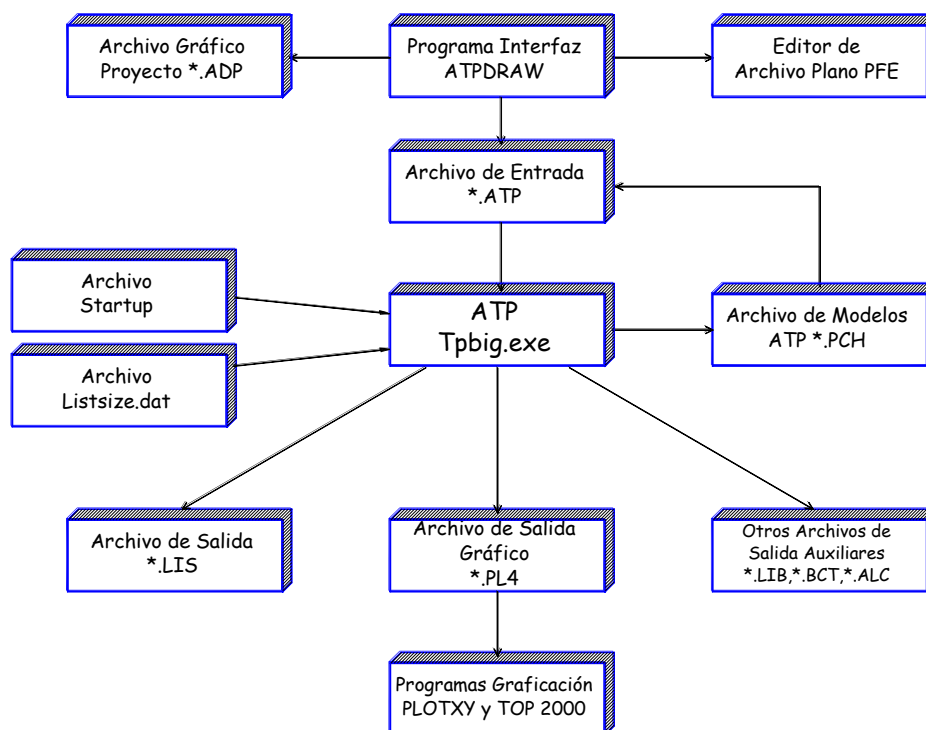


Figura 1.2 Interacción entre programas en ambiente Atp-Atpdraw

El programa Atpdraw es una interfaz gráfica que actúa como una máscara entre el usuario y el programa ATP. El ambiente de trabajo en el Atpdraw es muy amigable y se asimila al trabajo de dibujar un sistema eléctrico con los símbolos circuitales de cada uno de los elementos. Una vez elaborado el modelo sobre la herramienta gráfica Atpdraw, el programa se encarga de generar un archivo plano en formato tipo Atp, que es que acepta el programa Tpbig.exe (ATP).

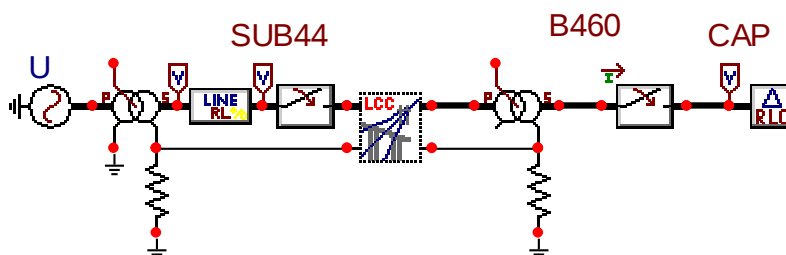


Figura 1.3 Modelo circuital de sistema eléctrico en Atpdraw

El archivo plano en formato Atp que genera el Atpdraw se observa en la Figura 1.4.

El programa ATP es un ejecutable que necesita de un par de archivos para inicializar y definir valores de variables que utiliza internamente. Esos archivos son: Startup, Listsize.dat.

El archivo Startup, es de configuración de valores límites de variables. Aquí se definen los valores para las rutinas de convergencia de algoritmos que utilizan métodos iterativos para llegar a la respuesta, como es el caso del modelo 92 para el pararrayos, el modelo 59 de la máquina sincrónica. Una de las variables más importantes en este archivo es la que define numéricamente el cero (0.0). Esta variable corresponde a EPSILN. La forma de este archivo se observa en la Figura 1.5.

En el archivo Listsize.dat se definen los dimensionamientos máximos con los que el programa ATP realizará la simulación.

[illegible]

Figura 1.4 Formato general para el programa ATP

```

1  RHIGH  EPSZNO  EPWARN  EPSTOP  EPSUBA  EPDDEL  EPOMEG  SZPLT  SZBED  TENFLZ
   1.D+10 1.D-8 1.D-3 0.1 100. 1.D-16 1.D-20 10.0 72.0 10.
2  SIGMAX TENERG DEGMIN DEGMAX ZNOLIM(1), (2) STATFR ZNVREF XMAXMX AINCR
   4.0 1.D+20 0.0 360. 1.0 1.5 60.0 1.D-6 2.0 .05
3  FREQFR HLETT1 Unused VHS VS VH TAXISL VAXISL FILL1 FILL2
   0.25 8.0 1.0 10. 20.0 8.0 6. 7.0
4  TOLRCE FHTAX FXSUP FYSUP FXTIT FYTIT VPLOTS VPLOTL FACTVI FTCARR
   8.E-5 0.5 .25 .03 0.10 0.1 1.0 5.0 0.0 1.5
5  FXNUMV FXNUMH FVAXTT FXVERT Unused TIMTAC OVRLAP FLZERO EPSILN FLTINF
   1.5 5.0 -1.5 0.0 0.0 0.5 1.D-12 1.D-16 1.D+19
6  XHEADM YHEADM HGTHDM XCASTI YCASTI HGTCST XLEGND YLEGND HGTLCN TSTALL
   2.5 7.95 .55 0.5 7.3 .35 0.5 1.30 .25 0.0
7  XALPHA YALPHA HGTALF D4FACT PEKEXP EPSLRT EPSPIV PLMARK FACOSC
   1.5 6.5 .25 1.0 43. 1.E-12 1.E-16 1.0 0.3
8  MMAUTO INTINF KOL132 MUNIT5 MAXZNO IPRSPY IPRSUP LNPIN MINHAR MAXHAR
   1 9999999 132 1 50 0 -1 6 0 20
9  NFORS2 NIOMAX MRGN LINLIM MPAGE MODE28 KPGRID KPEN(1) KPEN(2) KPEN(3)
   30 50 2 100 0 1 3 12 10 11
10 ..(4) KOMLEV NSMTH MODSCR KOLALP MAXFLG LIMCRD NOBLAN MOUSET NOTPPL
   14 -1 50 2 5 1 90000 1 0 1
1 NOCOMM NOHELP NEWPL4 JDELAY NOTMAX NSMPLT KOLWID KOLSEP JCOLU1 KSLOWR
   0 0 0 0 0 50 11 1 0 200
2 KSYMBL NOBACK KOLEXM LTEK NCUT1 NCUT2 INCHPX INCHPY NODPCX LCHLIM
   50 1 60 1 13 11 2 2 0 0
3 NORUN JTURBO MAXSYM IHS LIMCOL KLEVL KEXTR NOHPGL NOPOST NOSM59
   0 1 3 3 79 0 0 0 0 0
4 LEFTA6 LENREC LU6VRT LRLIM KASEND LUNDAT KTRPL4 JORIEP LIMPNL LUNTEX
   0 0 32768 75 5 3 -6666 0 200 -11
5 KINSEN LISTON LIMTAC NOCALC MFLUSH L4BYTE KOMPAT LISTO1 NOGMU KROSEC
   1 0 25 0 1000 1 1 0 0 0
6 LUNIT1 LUNIT2 LUNIT3 LUNIT4 LUNIT5 LUNIT6 LUNIT7 LUNIT8 LUNIT9 LUNIT10
   1 2 3 -4 5 6 7 8 9 10
17 KS(1) KS(2) KS(3) KS(4) KP(1) KP(2) KP(3) KP(4) KOLROV NUMHLD
   0 0 12 10 7 14 0 0 18
18 Name of language font file ] Window] Root name for SPY @K usage ]
\ junk inclspy .dat
9 SSONLY CHEFLD TEXNAM CHVBAR BRANCH TXCOPY USERID -TRASH -TERRA CHRCOM
   PHASOR E DUM | NAME COPY EU0801 ..... TERRA C {}$,
0 DATTPP LISTYP PCHTYP PL4TYP EFIELD FMTPL4 PSCTYP -BLANK
   .dat .lis .pch .pl4
C After regular STARTUP comes optional VMS-like symbol definitions that are
C used for input data file name in response to the opening prompt.
scott:=c:\atp\ { 1st of 2 remote directories
tsu:=c:\tsu-huei\ { 2nd of 2
$EOF { Software end-of-file terminates last of 20 or fewer VMS-like symbols
Failed units: 10, 32, 33, 38 (3 May)
HLETT2 = 88555. ==> use READ (*, rather than CALL FLAGER for keyboard input
   0.25 88555. 8.0 1.0 10. 20.0 8.0 6. 7.0
   0.25 8.0 1.0 10. 20.0 8.0 6. 7.0
□

```

Figura 1.5 Archivo de configuración Startup

Cuando se realiza una simulación el programa Atp genera un archivo en formato gráfico con extensión PL4. El programa básico de graficación es el PLOTXY, el cual permite realizar gráficas de una manera básica pero muy sencilla. Si se desea gráficas más elaboradas con opciones de control del grosor y color del trazo de línea, cambio del texto de los nombre de las gráficas, se puede utilizar el programa TOP 2000. Estos dos programas se incluyen en el ambiente del programa Atpdraw. Lo

anterior es posible porque el programa Atpdraw permite ejecutar otros programas mediante la definición de comandos de ejecución. Ver Figura 1.6.

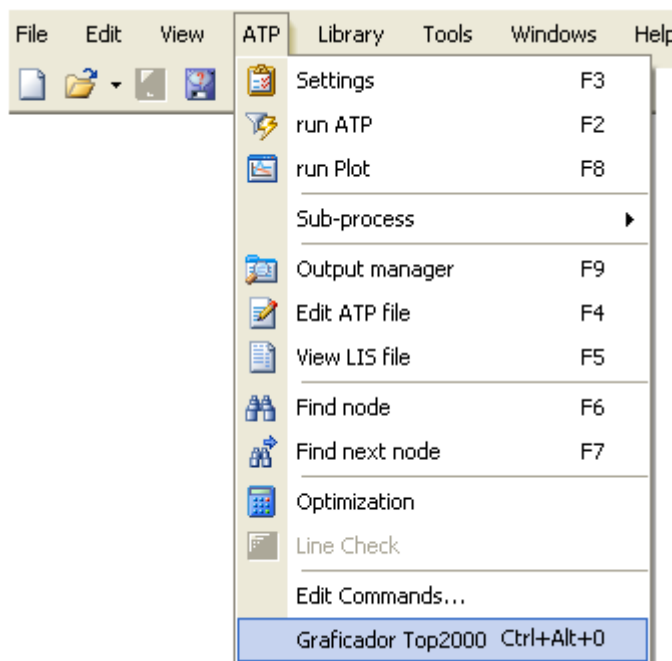


Figura 1.6 Llamado a programas de graficación TOP 2000

El programa Plotxy, que se puede invocar con la tecla F8 o directamente del menú, permite graficar simultáneamente hasta ocho gráficas y permite cargar hasta tres archivos diferentes en formato PL4.

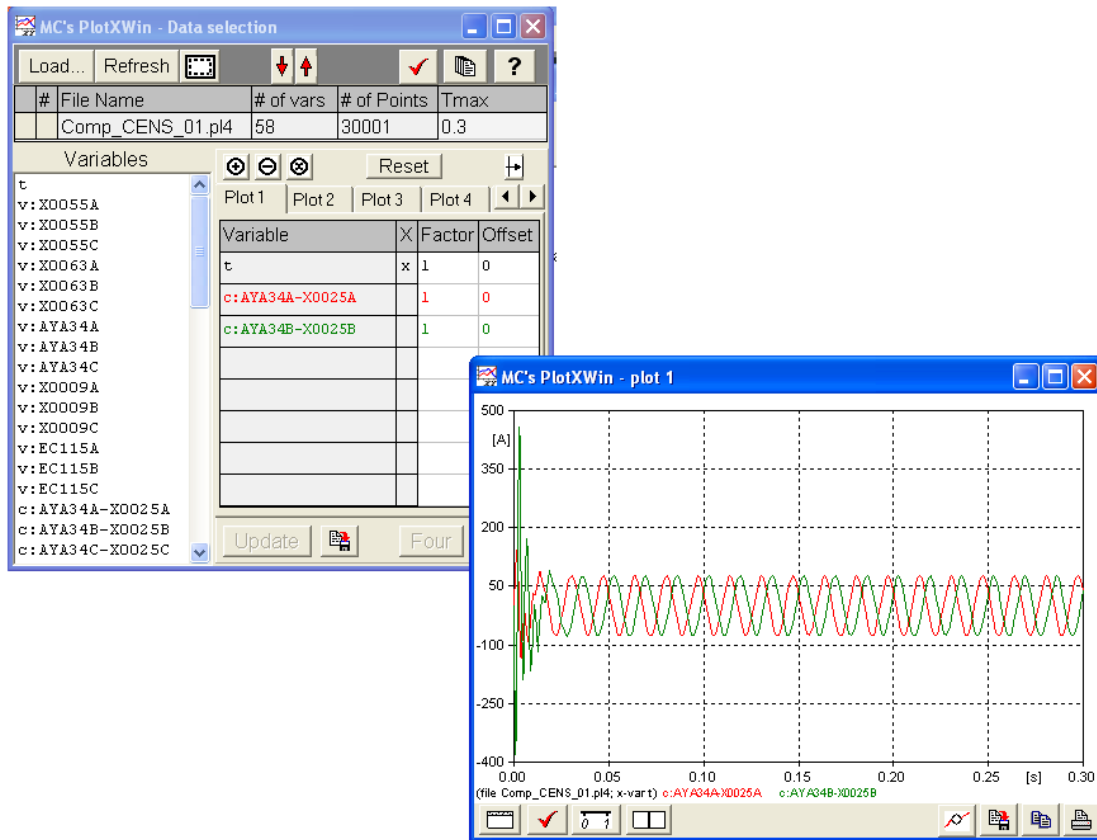


Figura 1.7 Programa de graficación Plotxy.

El programa TOP 2000 y permite varios formatos de archivos gráficos. Estos formatos son los siguientes:

- ASCII Text
- COMTRADE: IEEE Std C37.111-1991 | C37.111-1999
- PQDIF: Power Quality Data Interchange Format - IEEE Std 1159.3-2002
- Dranetz-BMI 8010 and 8020 PQNode
- Dranetz-BMI 65x Series
- Electrotek SuperHarm
- Electrotek FerroViewTM
- EPRI/DCG EMTF for Windows
- ATP (Alternative Transients Program)

- PSCAD - Versions 3 and 4
- EPRI HARMFLO for Windows
- Cooper Power Systems V-HARMTM
- EPRI SDWorkstation
- EPRI LPDW (CFlash, DFlash, TFlash)
- EPRI PQ Diagnostic System (Capacitor Switching "&" Lightning)
- Square D PowerLogic (using DADisp format)
- Fluke 41

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE MODELOS BÁSICOS DISPONIBLES EN EL ATP

En este capítulo se van a describir de manera general los principales modelos que tiene disponibles el programa ATP para la simulación de un sistema eléctrico de potencia.

Los modelos se dividen en forma general en modelos para representar el sistema de potencia y modelos para la representación de sistemas de control y equipos que interactúan con el sistema eléctrico de potencia.

2.1 ELEMENTOS CONCENTRADOS

El modelo básico es el modelo RLC serie que permite la representación de todo tipo de elementos concentrados en cualquiera de las combinaciones de valores R, L y C.

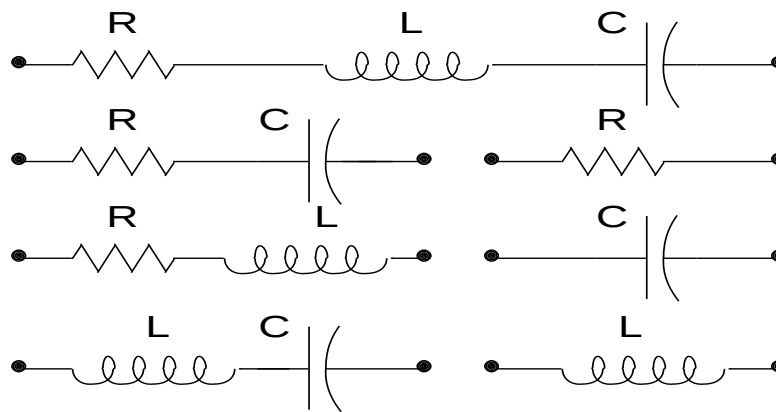


Figura 2.1 Resistencias, inductancias y capacitancias

2.2 ELEMENTOS R-L ACOPLADOS

Una rama RL polifásica con acoplamiento entre fases, puede ser representada tal como aparece en la Figura 2.2.

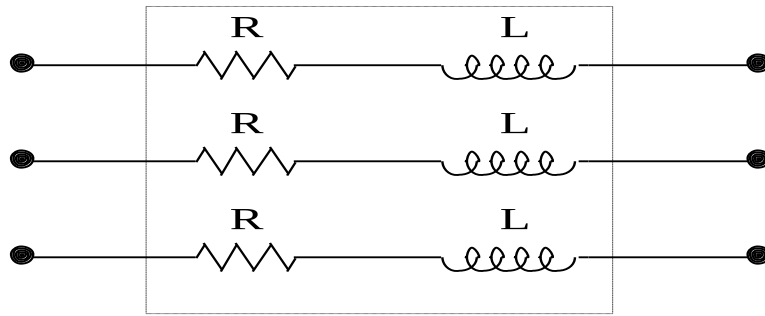


Figura 2.2 Rama polifásica con acople RL

Este elemento es muy utilizado para representar equivalentes de red donde no es importante el efecto capacitivo. Una opción muy interesante que tiene este elemento es que permite incorporar los parámetros en forma matricial o como impedancias de secuencia y para este último caso es muy útil para representar equivalentes de red en sistemas de distribución donde es necesario modelar la fuente con su equivalente Thevenin de cortocircuito.

2.3 CIRCUITO PI POLIFÁSICO EQUIVALENTE

Cuando una línea tiene varios conductores, como es el caso por ejemplo de una línea trifásica, como la de la Figura 2.4 el circuito equivalente para estudios a frecuencia industrial es el correspondiente al equivalente PI matricial. El equivalente PI polifásico es un circuito de ramas mutuamente acopladas, tanto resistiva, inductiva como capacitivamente (ver Figura 2.4).

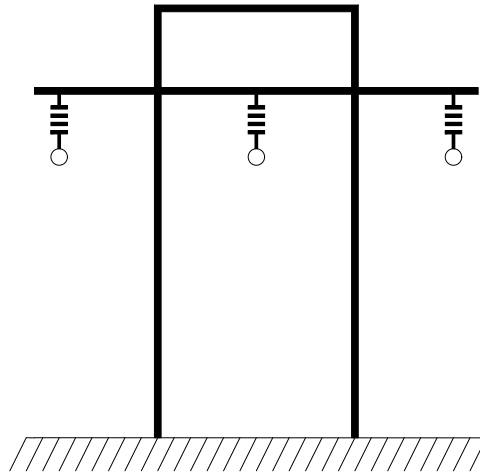


Figura 2.3 Línea trifásica de un solo circuito

Los parámetros correspondientes al equivalente PI matricial, normalmente no son calculados por el usuario, sino mediante el subprograma LINE CONSTANTS.

El circuito PI trifásico circuitalmente es como aparece en la Figura 2.4, formado por impedancias serie acopladas y capacitancias shunt acopladas. El efecto capacitivo total se distribuye por mitades al principio y al final de la línea.

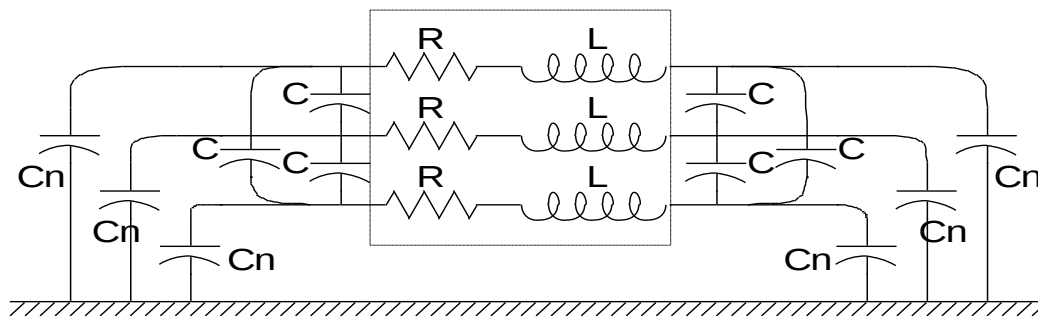


Figura 2.4 Circuito PI polifásico equivalente

2.4 LOS TRANSFORMADORES

El ATP dispone de varios modelos para representar los transformadores. Los modelos más sencillos de transformadores considera una representación lineal matricial de $[R]$ y $[L]$. Un modelo más elaborado es el correspondiente al TRANSFORMADOR

SATURABLE, el cual permite simular el comportamiento no lineal del núcleo. El anterior modelo en el programa se denomina TRANSFORMER.

Este modelo tiene tres componentes básicas: transformador ideal, rama de magnetización con su característica no lineal (saturación) y la rama de dispersión para cada devanado. El modelo circuital que maneja el modelo TRANSFORMER es el ilustrado en la Figura 2.5.

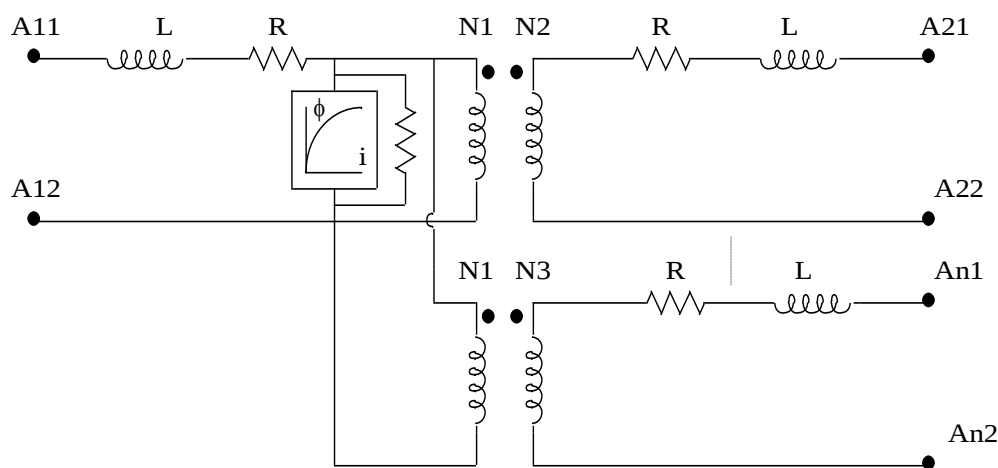


Figura 2.5 Circuito equivalente para un transformador monofásico de N devanados

Un modelo más elaborado del transformador se obtiene con el subprograma BCTRAN, que permite obtener el modelo a partir de los datos de placa suministrados por el fabricante. La rama de magnetización con saturación para este caso hay que incluirla en forma externa al modelo, ya que el modelo no la incluye.

2.5 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA

Los modelos de líneas de la transmisión disponibles en el programa ATP son bastante flexibles y los hay para cada necesidad de simulación de transitorios. Una línea en forma general se puede simular mediante parámetros distribuidos o mediante parámetros semidistribuidos.

La opción con parámetros semidistribuidos es utilizada con frecuencia en estudios a baja frecuencia. En este caso la línea se representa por una serie de elementos PI en cascada. Mientras mayor número de elementos PI se consideren, mayor será la precisión obtenida en la simulación. Esta representación de la línea presenta algunas oscilaciones cuya frecuencia depende del número de elementos PI considerados.

Una representación más adecuada de la línea es mediante parámetros distribuidos es decir con modelos que reproducen el fenómeno de la onda viajera. Una solución analítica para la ecuación de onda viajera en una línea de transmisión solo se puede obtener para línea ideal sin pérdidas o para línea sin distorsión. A partir de la solución para línea ideal se obtiene el m modelo para línea con pérdidas, agregando la parte resistiva y en forma concentrada en tres puntos de la línea: un 25% al principio y final de línea y el 50% de resistencia a mitad de línea. Esta distribución de resistencia de pérdidas ha demostrado que es suficiente para representar la atenuación que presentan las ondas viajeras.

Los parámetros de la línea presentan variaciones con respecto a la frecuencia. Si se utiliza un modelo de línea que no permite variación de parámetros con la frecuencia, esta se debe elegir de acuerdo al fenómeno que se esté simulando y se debe tener certeza de esta frecuencia del fenómeno para que el modelo de línea sea adecuado. El ATP tiene modelos de línea que son válidos para un rango de frecuencias o ancho de banda y este puede ser definido por el usuario. El modelo clásico que permite esta variación en la frecuencia es el JMARTI.

2.6 ELEMENTOS NO LINEALES

El programa permite la representación de resistencia e inductancias de tipo no lineal para equipos como pararrayos, núcleos magnéticos con características de saturación, resistencias no lineales.

Las características básicas que pueden representarse en el ATP son las que observan en la Figura 2.6.

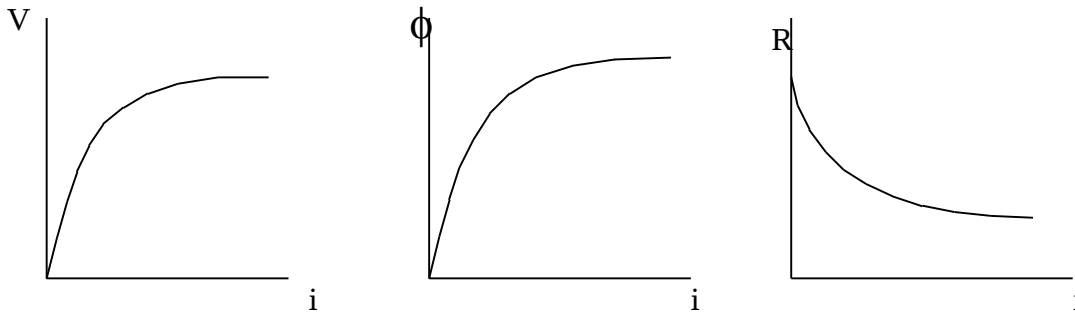


Figura 2.6 Características no lineales

Las resistencias se representan mediante la característica tensión-corriente (V, i) o resistencia-corriente y las inductancias con la característica flujo-corriente (Φ, i). También se pueden representar resistencias no lineales en función del tiempo. También existe un modelo de resistencia no lineal que depende de una función de control que defina el usuario.

En la familia de los elementos no lineales un equipo especial es el pararrayos. Este equipo tiene modelos que reproducen de manera muy precisa su comportamiento. Para este equipo hay un modelo que reproduce mediante tramos exponenciales la característica no lineal tensión-corriente de acuerdo a la ecuación:

$$i = p \times \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad (2.1)$$

2.7 INTERRUPTORES

El programa ATP tiene una gama amplia de modelos de interruptores. Existen modelos de interruptores controlado por tiempo, controlados por voltaje, de corriente unidireccional (diodo), de corriente unidireccional controlado por señal de compuerta, controlados por señal externa (por fuera de la red de potencia), interruptores de tipo estadístico, interruptores de tipo sistemático.

de Thevenin o Norton según sea fuente de tensión o de corriente. Las fuentes básicas de excitación son las que aparecen en la Figura 2.8.

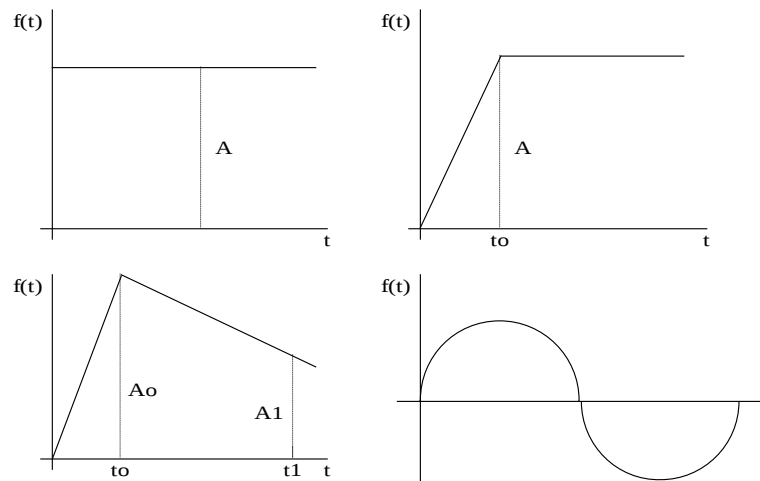


Figura 2.8 Las formas de ondas básicas de voltaje y corriente de excitación

En la Figura 2.9 se observan el grupo de fuentes de excitación disponibles en el ATP y en el Atpdraw.

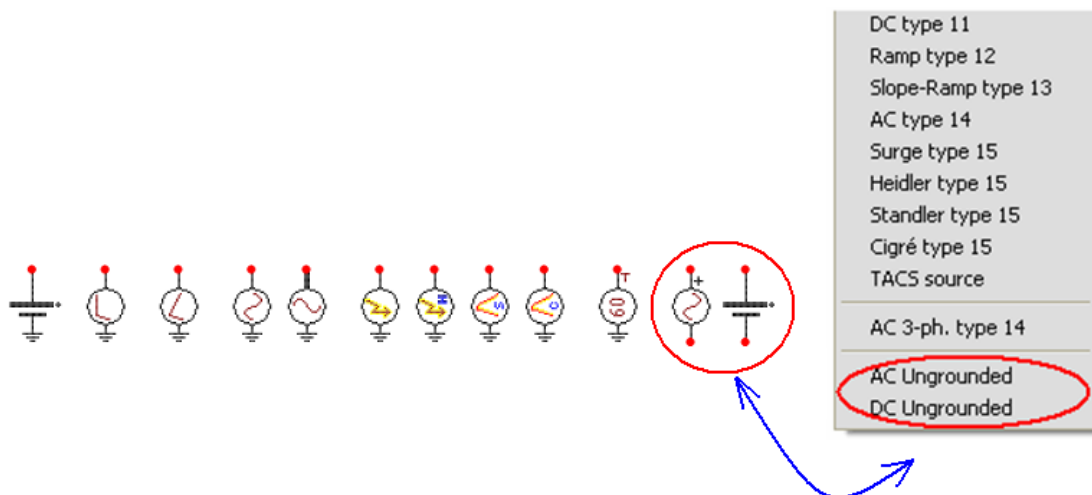


Figura 2.9 Menú de fuentes en el Atp y Atpdraw

Las fuentes por definición se conectan entre la tierra y un nodo. Las dos últimas fuentes de la Figura 2.9 corresponden a las que se pueden conectar entre dos nodos de la red.

Para los estudios donde el interés son las variables eléctricas los modelos detallados de las máquinas no son necesarios ya que las constantes de tiempo eléctricas son mucho más pequeñas que las mecánicas.

Cuando el interés del estudio es sobre un componente de la máquina síncrona se requiere un análisis detallado de la máquina y para esto hay disponible un modelo completo eléctrico y mecánico donde se puede modelar en detalle el gobernador y la excitatriz de la máquina. Este modelo corresponde al modelo 59 de la máquina. En la Figura 2.10

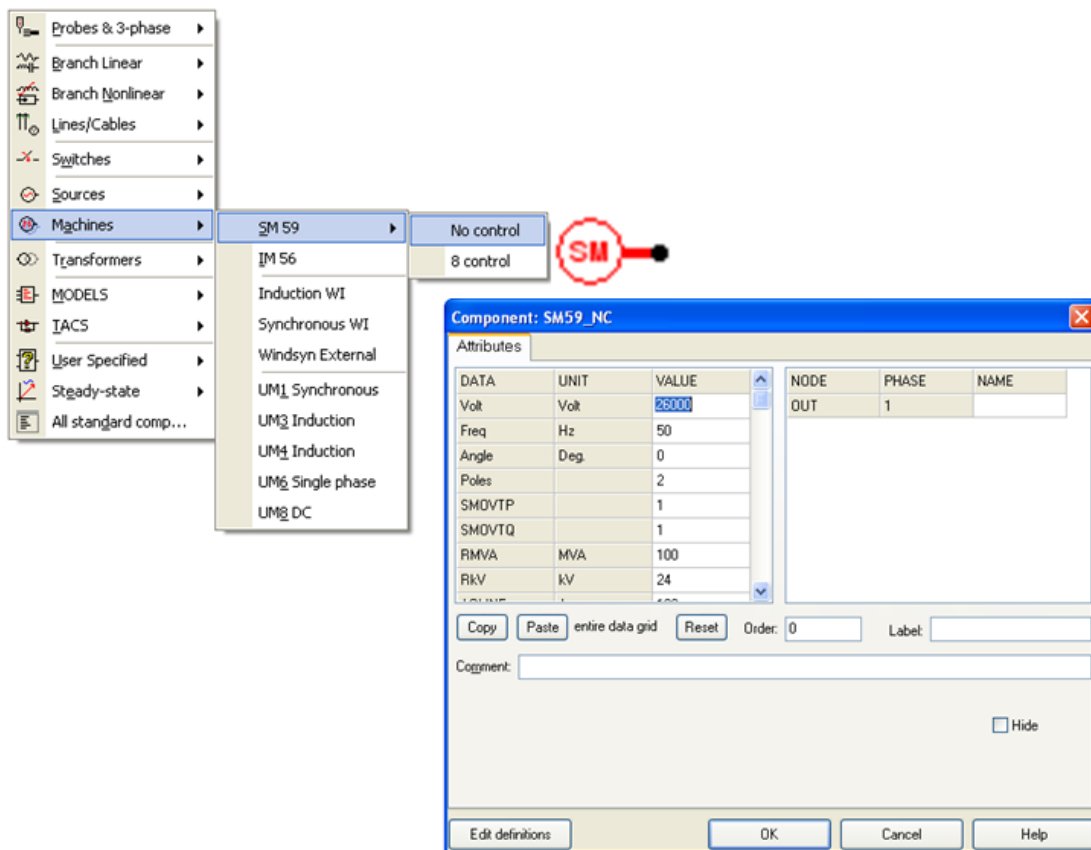


Figura 2.10 Menú para el modelo de la máquina síncrona

3. INTRODUCCIÓN A LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS Y SOBREVOLTAJES

3.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico de potencia está sometido a una serie de perturbaciones que alteran su estado normal de operación. El paso de un estado a otro ocasionado por una perturbación se hace en forma gradual, ya que las variables físicas como voltajes y corrientes no pueden tener cambios bruscos debido a que las leyes de la Física no lo permiten.

El estudio del estado transitorio debe hacerse en forma cuidadosa ya que las variables físicas pueden llegar a tomar valores extremos y exigir a los equipos, hasta ocasionar el deterioro de los mismos o la interrupción del suministro de energía. El conocimiento de los estados transitorios permitirá tomar decisiones para proteger adecuadamente los equipos, lo mismo que el aseguramiento de la calidad de la potencia eléctrica, con unos estándares de calidad adecuados.

Los transitorios en un sistema de potencia en forma general son de tipo eléctrico, mecánico y térmico. Los transitorios mecánicos y térmicos, a pesar de ser muy importantes, son mucho más lentos que los de tipo eléctrico. Su frecuencia está por debajo de la sincrónica (60 Hz). Los transitorios eléctricos son muy rápidos y constituyen el motivo del trabajo en esta asignatura.

El sistema eléctrico, desde el punto de vista circuital, se puede representar por la combinación de tres clases de elementos: resistor, inductor y capacitor.

Cualquier componente de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), está formado por la combinación de elementos RLC. En estado estacionario un parámetro, para un determinado equipo, será dominante sobre los otros, pero en estado transitorio hay dependencia de las características y tipo de fenómeno transitorio. En un transformador de voltaje, por ejemplo, es claro que la componente inductiva es

dominante en un estado normal de operación a 60 Hz y para eventos transitorios de una frecuencia relativamente baja, pero se sabe que en eventos cuya frecuencia está por encima de unos 3 kHz, el efecto capacitivo empieza a ser importante y el transformador pierde su precisión.

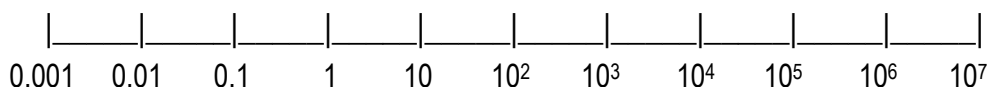
Otra característica importante es la forma como los efectos RLC se encuentran presentes en un equipo. Se pueden presentar de manera concentrada o distribuida. En una línea, por ejemplo, los parámetros RLC se encuentran distribuidos a lo largo de la misma, mientras que en un reactor para compensación de líneas, el parámetro dominante inductivo se encuentra concentrado. El modelo para representar estos elementos dependerá de si se puede representar de manera concentrada o distribuida. Estos parámetros adicionalmente pueden depender de otra variable, como es el caso de la inductancia, que representa la magnetización de un transformador, la cual depende del voltaje aplicado.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSITORIOS

Los transitorios que aparecen en un sistema de potencia se pueden clasificar desde diferentes puntos de vista. Uno obedece a los tipos de fenómenos físicos involucrados; para este caso, los fenómenos transitorios se clasifican en dos categorías:

- Transitorios que son consecuencia de la interacción entre las energías almacenadas en capacitores y en inductores.
- Transitorios que resultan de la interacción de la energía mecánica almacenada en las partes rotóricas de las máquinas y la energía almacenada en los circuitos.

En la Figura 3.1 se ilustra esta clasificación de acuerdo con la frecuencia del fenómeno.



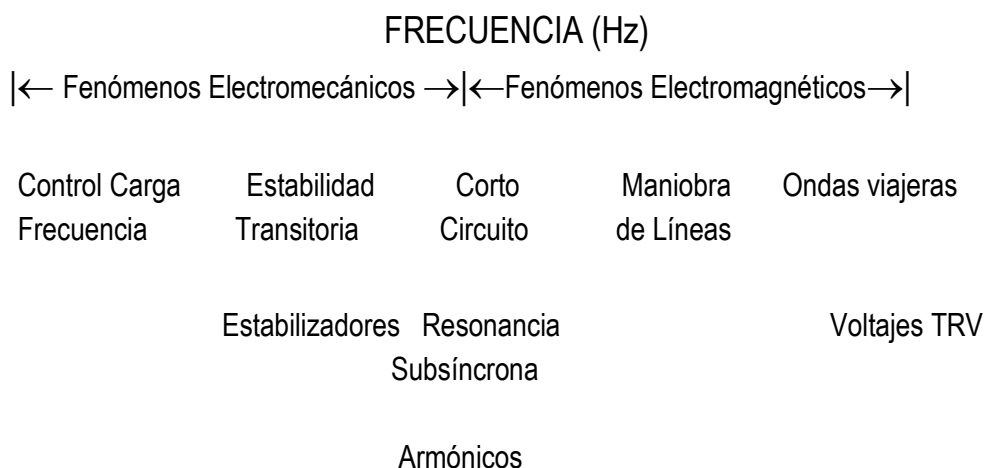


Figura 3.1 Clasificación de los transitorios de acuerdo con la frecuencia

El rango de frecuencias de los fenómenos transitorios electromagnéticos que pueden aparecer en un sistema eléctrico es muy amplio. Un modelo para los elementos del sistema que sea válido para todo el rango de frecuencias es impráctico por no decir que imposible de implementar. Este rango de frecuencias se divide en grupos de frecuencias, donde existe un modelo apropiado para cada uno de estos grupos. El Comité de Estudios 33 del CIGRE, divide el rango de frecuencias en cuatro grupos. La Tabla 3.1 muestra la clasificación de frecuencias propuesta por este comité.

Tabla 3.1 Clasificación de las frecuencias

GRUPO	RANGO DE FRECUENCIAS	DESIGNACIÓN	APLICACIONES
I	0.1 Hz - 3 kHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Sobretensiones temporales
II	50 Hz - 20 kHz	Ondas de frente lento	Sobretensiones de maniobra
III	10 kHz - 3 MHz	Ondas de frente rápido	Sobretensiones atmosféricas
IV	100 kHz - 50 MHz	Ondas de frente muy rápido	Reignición - Subestaciones SF ₆

En un estudio es muy importante tener una idea del rango de frecuencias del fenómeno que se esté analizando. Este rango para un determinado fenómeno varía muy poco, lo que quiere decir que es posible seleccionar un modelo que represente adecuadamente el sistema eléctrico, para el fenómeno que se esté estudiando.

Dependiendo de la frecuencia del fenómeno, se presentan unas magnitudes de sobrevoltaje típico. Estas magnitudes típicas se observan en la Figura 3.2.

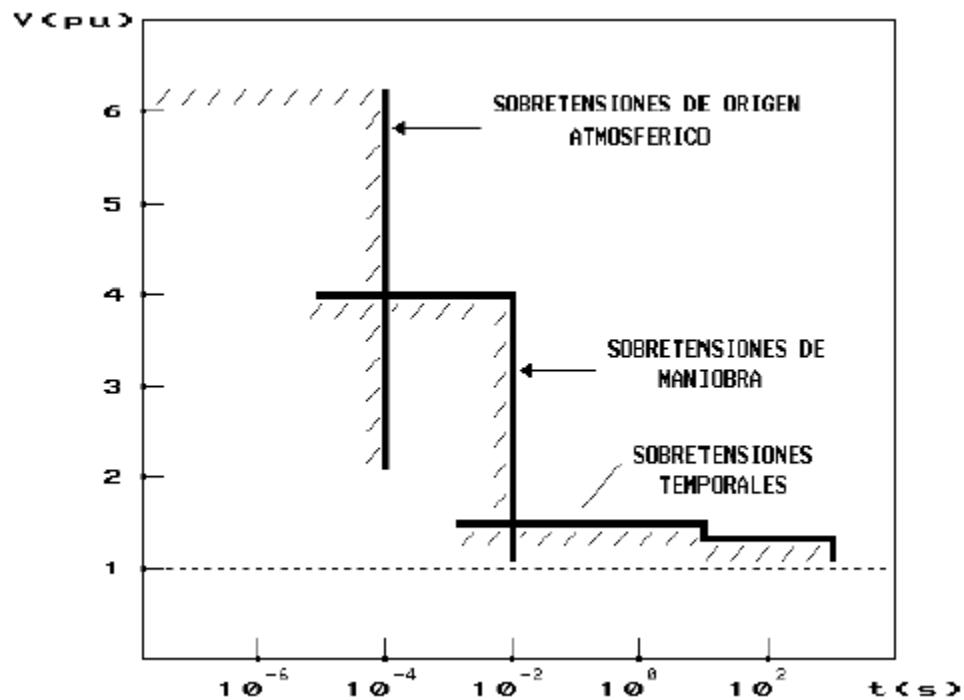


Figura 3.2 Relación entre el tipo de sobrevoltaje y el valor máximo.

4. PRÁCTICA N° 1. ANÁLISIS DE SISTEMAS SIMPLES RLC Y RL EN ESTADO TRANSITORIO

Para realizar una introducción en lo que es la utilización práctica del ATP en ambiente ATPDRAW, como herramienta de simulación, lo más apropiado es hacerlo con sistemas simples RLC, RL y RC que involucren estados transitorios como una primera aproximación a los fenómenos que aparecen en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

4.1 OBJETIVO

El objetivo de esta práctica es familiarizarse con la forma operativa como se trabaja en el ambiente de trabajo ATP/ATPDRAW, mediante la simulación de circuitos simples RLC, RL y RC. Se pretende también conocer el formato del archivo de entrada de datos para un caso simple de simulación transitoria.

4.2 DESCRIPCIÓN

El circuito RLC serie es una primera aproximación a la modelación de componentes de un sistema de potencia, como una red de transmisión de energía. En forma real estos efectos, resistivo-inductivo-capacitivo, se presentan de manera distribuida y no concentrada como es el caso que nos ocupa en esta aplicación. Sin embargo hay una serie de definiciones que se pueden hacer sobre un circuito RLC serie que aparecen definidos cuando una red de transmisión se modela mediante parámetros distribuidos, como es el caso del la impedancia característica de sobretensión.

El circuito a simular se observa en la Figura 4.1. Para observar los estados transitorios de voltaje sobre el capacitor y de corriente, se pueden utilizar cualquiera de los dos circuitos #1 y #2.

El primer circuito incluye un suiche conectado entre nodos FTE y NSW, que se cierra en el momento que se desee. La fuente se activa en cualquier momento mediante el parámetro Tsta, que es el tiempo de activación de la fuente.

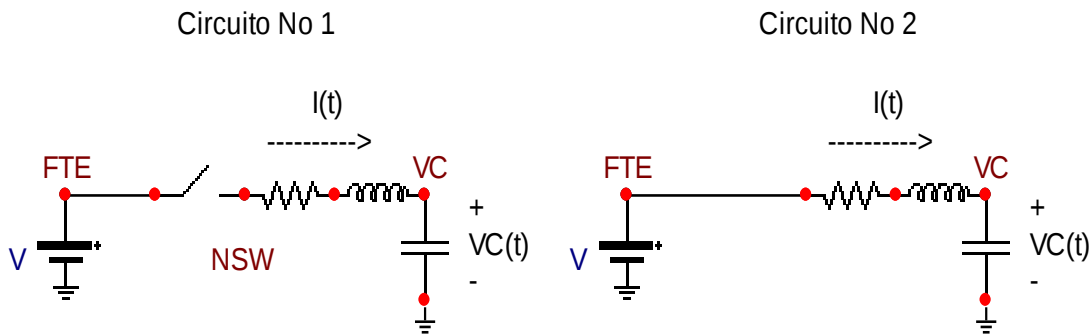


Figura 4.1 Circuito RLC serie

El segundo circuito no tiene suiche, pero se consigue el mismo efecto, al activarse la fuente en un tiempo igual al tiempo en que se cerró el suiche del primer circuito.

Para el caso de una respuesta subamortiguada en el circuito, la corriente tiene la siguiente expresión:

$$i(t) = \frac{V}{Z_c \sqrt{1 - \frac{1}{4\lambda^2}}} \times e^{-\frac{R}{2L}t} \times \left(\sin \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{4\lambda^2}}}{\sqrt{LC}} t \right) \quad (4.1)$$

Z_c = Impedancia característica de sobretensión

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.2)$$

λ = Factor de amortiguamiento;

$$\lambda = \frac{Z_c}{R} \quad (4.3)$$

Cuando el efecto resistivo es despreciable, la corriente tendrá un comportamiento senoidal de amplitud constante (no hay amortiguamiento). La corriente tendrá un comportamiento en el tiempo de acuerdo a la siguiente expresión:

$$i(t) = \frac{V}{Z_c} \times \text{sen} \left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \times t \right) \quad (4.4)$$

La anterior expresión permite dar una interpretación de la impedancia característica Z_c , como la relación entre la amplitud de la fuente del voltaje de excitación y el valor pico de la corriente senoidal del circuito serie.

La frecuencia de la oscilación senoidal está dada por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz} \quad (4.5)$$

4.3 PROCEDIMIENTO

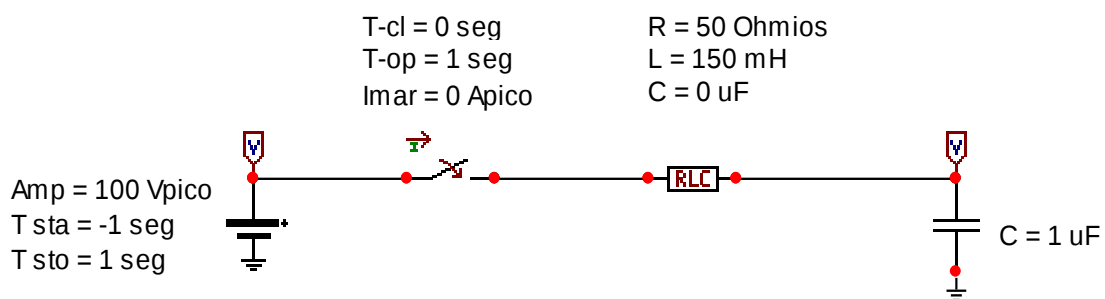


Figura 4.2 Circuito RLC serie en Atpdraw

Haciendo uso de la caja de herramientas de la interfaz Atpdraw elaborar el circuito de la Figura 4.2 asignando los parámetros sugeridos.

Para editar cada uno de los componentes se abre la caja de herramientas con el botón derecho del mouse:

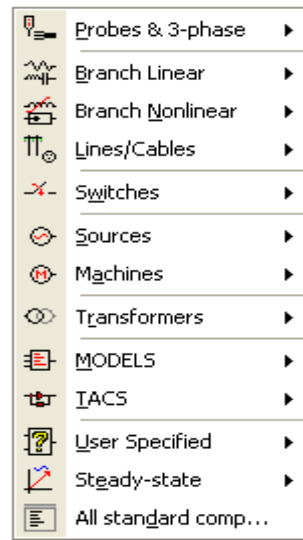


Figura 4.3 Caja de herramientas de la interfaz Atppdraw

Asignar los "settings" correspondientes a la simulación de acuerdo con la ventana de **datos** que se observa en la Figura 4.4. Importante resaltar que el parámetro XOPT está en cero ya que la inductancia está dada en mH.

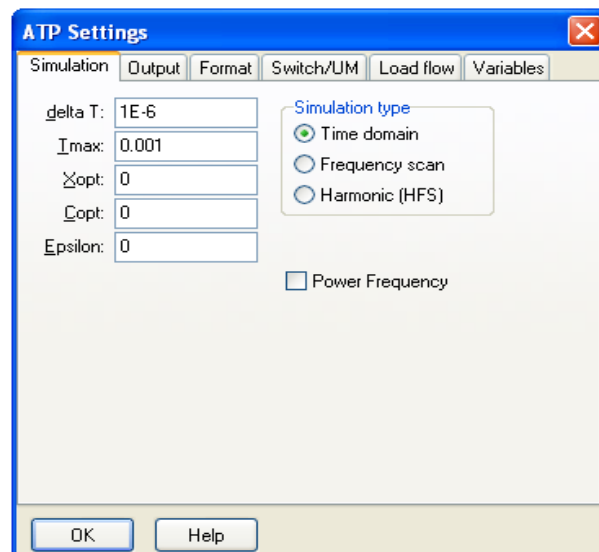


Figura 4.4 Ventana de datos para los "settings" de simulación

De igual manera deben asignarse los "settings" de salida de resultados.

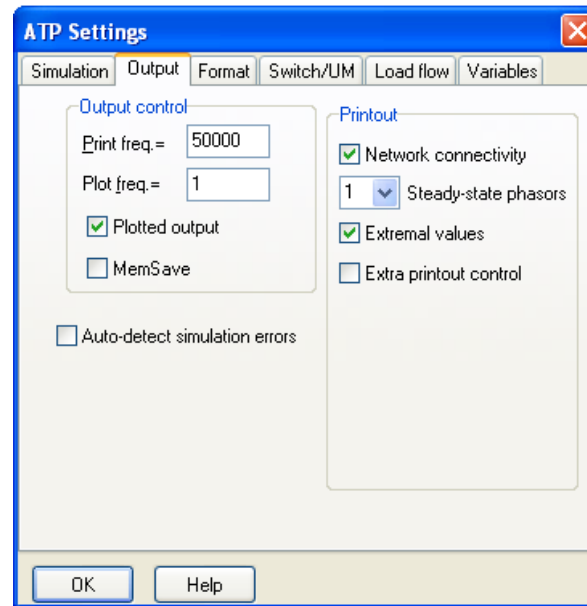


Figura 4.5 Ventana de los "settings" para control de salida de resultados

Los valores de los datos enteros que aparecen por defecto normalmente son suficientes. Se recomienda cambiarlos cuando sea estrictamente necesario y a medida que se adquiera destreza en el manejo del programa.

Es importante que los diferentes parámetros que controlan las simulaciones se conozcan bien. Una primera fuente de información es el HELP que aparece en la mayoría de las ventanas.

Cuando se tenga completamente editado todos los componentes se ejecuta el ATP con la opción de acuerdo a la Figura 4.6 o con la tecla F2 se obtiene el mismo resultado. Cuando se ejecuta esta acción se genera el archivo *.atp de simulación.

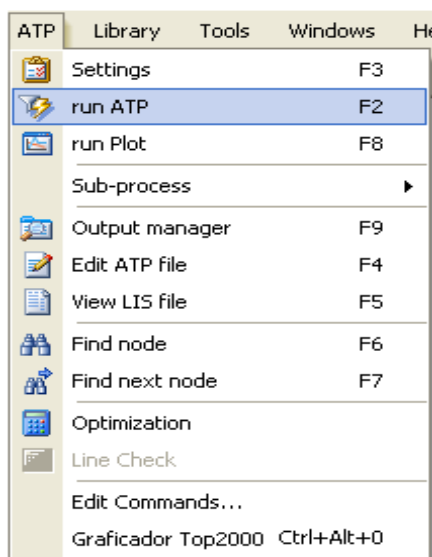


Figura 4.6 Persiana "ATP" para realizar el "Make File"

El archivo de simulación *.ATP se observa en la Tabla 4.1

Tabla 4.1 Archivo plano generado por la interfaz Atpdraw

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW Marzo, Martes 6, 2007
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2003
C -----
POWER FREQUENCY 60.
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
  1.E-5 .05
    500 1 1 1 1 0 0 1 0
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
NSW VC 50. 150. 0
VC 1. 0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
FTE NSW 1. 1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
11FTE 0 100. -1. 1.
/OUTPUT
VC FTE
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Las características de este archivo de simulación son las siguientes:

- Las líneas que empiezan con la letra "C" son simples comentarios para documentar el archivo. El programa ATP en la ejecución las ignora.
- El tiempo máximo de simulación es de 50 mseg. El delta de tiempo es de 10 μ seg. Lo anterior da un total de 5000 puntos de cálculo.
- Se va a imprimir una tabla con los datos de las respuestas transitorias de los voltajes y corrientes en el circuito con un intervalo de impresión de 500, para un total de datos de 11 puntos en el archivo de resultados. Este archivo de resultados tiene extensión *.LIS
- Se solicita una tabla de conexionado de la red, lo mismo que los picos máximos y mínimos de las variables en el tiempo.
- En la columna 64 de la línea correspondiente a datos misceláneos enteros (línea 3a del anterior archivo, excluyendo las líneas de comentarios) se ha solicitado mediante un "1" la generación de un archivo con extensión *.PL4, el cual sirve para que otros paquetes de graficación como el PLOTXY generen una gráfica, con unas características de resolución muy buenas.
- Para la modelación de los elementos del circuito se utilizan dos ramas tipo "00" (rama tipo RLC serie). La primera es una rama con valores R, L, C de 50 Ω , 150 mH y 0.0 μ F. La segunda rama con valores de 1.0 μ F. Las ramas RLC no puede tener los tres valores en cero. Cuando se asigna cero a la capacitancia en la rama RLC el programa entiende que es una rama RL y simplemente asume que no existe el parámetro capacitancia, porque de lo contrario un valor cero de capacitancia puede interpretarse como una impedancia de un valor muy grande.
- Como fuente de excitación se utiliza tipo escalón de 100.0 voltios de amplitud, la cual tiene un tiempo de activación de -1.0 s y un tiempo de desactivación de 1.0 s.
- No hay condiciones iniciales (las CI son cero).
- Como variables de salida se solicitan la corriente del circuito y los voltajes de la fuente y sobre el capacitor.

El archivo correspondiente a la salida de resultados de esta simulación se observa en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Archivo de resultados

```

-----+-----
Blank card to terminate EMTF execution.
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C data:C:\ATP\ATPDRAW\ATP\RLC.ATP
Marker card preceding new EMTF data case.                  |BEGIN NEW DATA CASE
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C -----
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C Generated by ATPDRAW Febrero, Sábado 11, 2006
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C A Bonneville Power Administration program
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C Programmed by H. K. Heidalen at Sefas - NORWAY 1994-2003
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C -----
New power frequency STATFR = 6.00000000E+01 Hz.          |POWER FREQUENCY                                60.
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt >
Misc. data.     1.000E-05 5.000E-02 6.000E+01            | 1.E-5 .05 60.
Statistics data. 500 1 1 1 1 0 0 1 | 500 1 1 1 1 0 0 1
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C 1 2 3 4 5 6 7 8
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
Series R-L-C.   5.000E+01 3.979E-01 0.000E+00            | NSW VC 50. 150. 0
Series R-L-C.   0.000E+00 0.000E+00 1.000E-06            | VC 1. 0
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 2 3                |BLANK BRANCH
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
Switch. 0.00E+00 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00            | FTE NSW 1. 1
Blank card ending switches. KSWTCH = 1.                   |BLANK SWITCH
Comment card.   KOMPAN > 0.                                |C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
Source. 1.00E+02 0.00E+00 0.00E+00 -1.00E+00            |11FTE 0 100. -1. 1.
Blank card ends electric sources. KCONST = 1               |BLANK SOURCE

List of input elements that are connected to each node. Only the physical connections of multi-phase lines are shown (capacitive
and inductive coupling are ignored). Repeated entries indicate parallel connections. Switches are included, although sources
(including rotating machinery) are omitted -- except that U.M. usage produces extra, internally-defined nodes "UMXXXX".

-----+-----
From bus name | Names of all adjacent busses.
-----+-----
NSW |VC *FTE *
VC |TERRA *NSW *
FTE |NSW *
TERRA |VC *

-----+-----
Card of names for time-step loop output. | VC FTE
Blank card ending requests for output variables. |BLANK OUTPUT

Column headings for the 3 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ....
First 2 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
Next 1 output variables are branch currents (flowing from the upper node to the lower node);
Step Time VC FTE FTE
NSW
*** Switch "FTE " to "NSW " closed after 0.00000000E+00 sec.
0 0.0 0.0 0.0 0.0
500 .005 101.368262 100. .11572178
1000 .01 153.215173 100. -.01052566
1500 .015 94.1212734 100. -.06072023
2000 .02 72.1780072 100. .011490423
2500 .025 105.828225 100. .031283059
3000 .03 114.279386 100. -.00915699
3500 .035 95.5090102 100. -.01580383
4000 .04 92.8163357 100. .006414409
4500 .045 103.091028 100. .00781087
% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
5000 .05 103.533483 100. -.00417787

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : 188.281512 100. .149186757
Times of maxima : .00199 .1E-4 .97E-3
Variable minima : 0.0 0.0 -0.13170546
Times of minima : 0.0 0.0 .00295

Blank card terminating all plot cards. |BLANK PLOT
Actual List Sizes for the preceding solution follow. 11-Feb-06 05.06.45
Size 1-10: 4 2 2 1 6 1 6 0 0 0
Size 11-20: 0 3 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
Size 21-30: 0 0 2 0 -9999 0 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.020 0.000 0.020 -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.001 0.000 0.001
Seconds for overlays 12-15 : 0.001 0.000 0.001
Seconds for time-step loop : 0.002 0.000 0.002
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
-----+-----
Totals : 0.024 0.000 0.024
-----+-----

```

El anterior archivo de resultados está constituido de las siguientes partes:

- Un cuadro general que tiene la forma del Listado. En este listado se divide en dos partes; la parte derecha corresponde a una copia de las líneas, tal como fueron editadas en el archivo de datos de simulación; la parte izquierda corresponde a la interpretación que el programa le da a cada línea. Esta información es muy valiosa cuando se está buscando un error en un archivo de datos. Esta forma del cuadro se repite en forma intercalada en diferentes partes del archivo, hasta completar todas las líneas del caso bajo simulación.
- Después de la línea "BLANK SOURCE" aparece la tabla de conexionado de la red. De esta tabla de conexionado se excluye los acoples capacitivos e inductivos y las fuentes. Los suiches si aparecen en la tabla de conexionado de la red.
- Después de la línea "BLANK OUTPUT", aparece una tabla con los valores de las variables eléctricas en el tiempo. El ordenamiento de las columnas en esta tabla de datos es la siguiente:
 - Número de paso de integración.
 - Tiempo en segundos.
 - Diferencias de potencial que fueron solicitados en las diferentes ramas.
 - Voltajes nodales especificados en lista.
 - Corrientes de rama.
- Valores de máximos y de mínimos, lo mismo que los tiempos en que se presentan estos valores, para cada una de las variables y en el mismo orden de la tabla a que se refiere el ítem anterior.

Algunos resultados que se han obtenido con el programa graficador "TOP 2000" se observan en la Figuras 4.7 y 4.8.

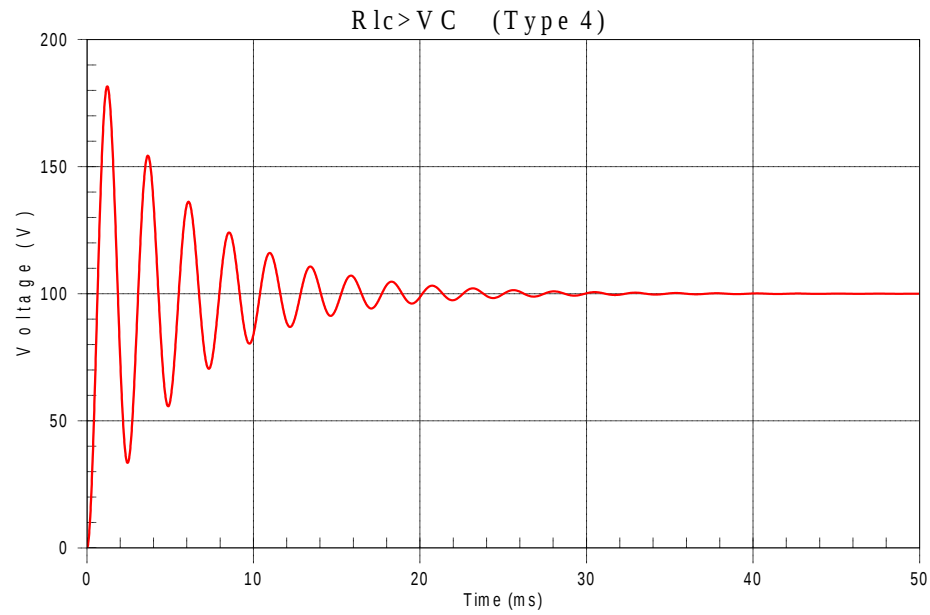


Figura 4.7 Corriente en el circuito RLC serie

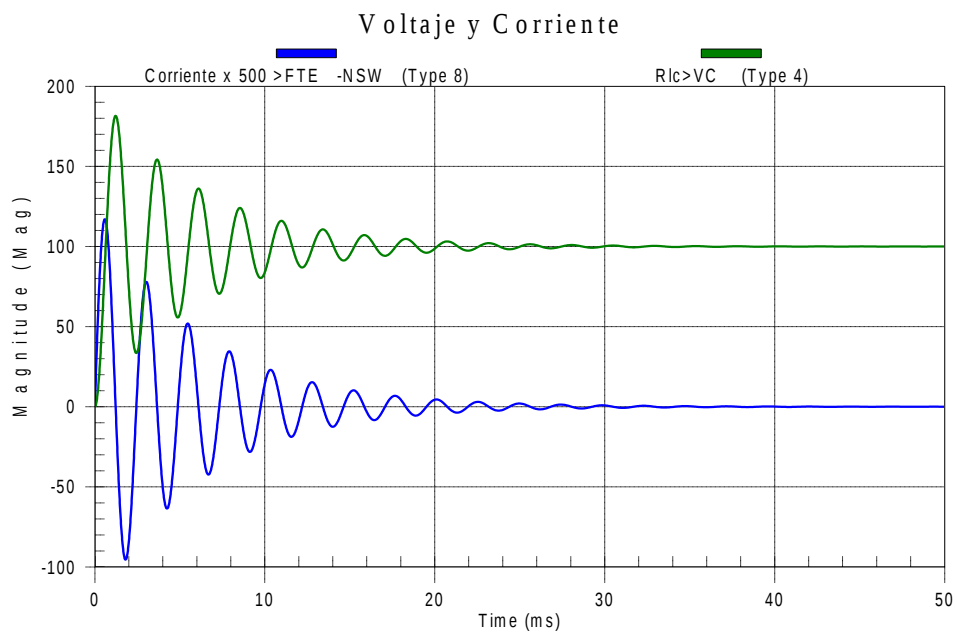


Figura 4.8 Voltaje y corriente en el circuito RLC serie

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EL CIRCUITO RLC

- Calcule para el circuito simulado impedancia característica, frecuencia natural de oscilación y factor de amortiguamiento que aparece asociado con la corriente transitoria.
- Calcule la relación entre la amplitud del voltaje de la fuente y el primer pico de corriente. Compare esta relación con la impedancia característica del circuito.
- Utilizando el concepto de impedancia característica explique porqué el voltaje máximo sobre el condensador se aproxima al doble del valor de la fuente para circuito RLC serie con poco amortiguamiento ($R \ll Z_c$). Asumir R de 1Ω .
- Determine la variación del primer pico de corriente con respecto a la resistencia del circuito, para $1 \leq R \leq 50 \Omega$. ¿Cuál será la razón de esta variación?
- Cambiar la fuente DC por una de tipo sinusoidal de frecuencia industrial de 60 Hz, y una amplitud de 100 Vpico. Para este caso se desea observar el voltaje sobre el condensador y compararlo con el obtenido para la simulación con excitación escalón.
- Determinar la frecuencia de resonancia serie del circuito utilizando la opción Frequency Scan. Para habilitar la opción Frequency Scan, en la ventana "Atp Setting" se colocan los valores de acuerdo a la Figura 4.9. Es recomendable asignar a la fuente un valor de 1 V. Los suiches, si los hay, deben tener tiempo de cierre negativos ($T_{-cl} = -1$). Cuando se utiliza esta opción de simulación la gráfica que se obtiene es de magnitud de las variables en función de la frecuencia (Hz). Ver Figura 4.10

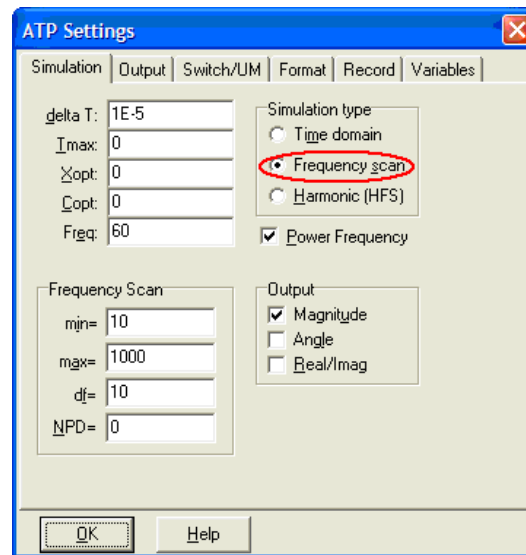


Figura 4.9 Opciones para Frequency Scan

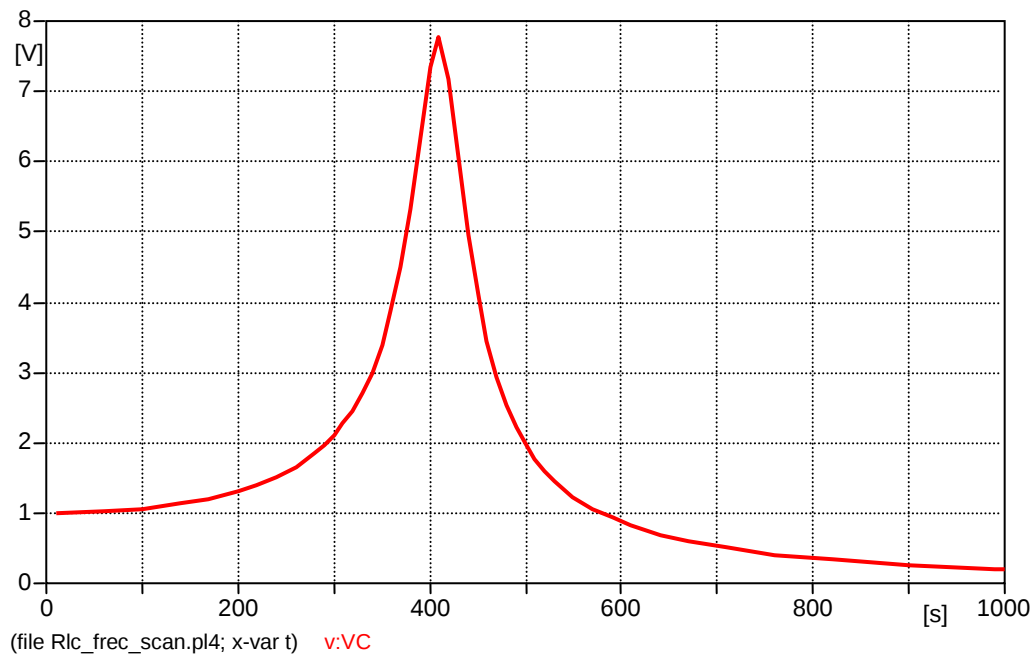


Figura 4.10 Respuesta en frecuencia con Plotxy del voltaje sobre el condensador

4.5 ANÁLISIS DEL CIRCUITO BÁSICO GENERADOR DE IMPULSO DE MARX

El profesor Marx propuso el siguiente circuito para generar una onda de impulso de voltaje en el laboratorio. Ver Figura 4.11.

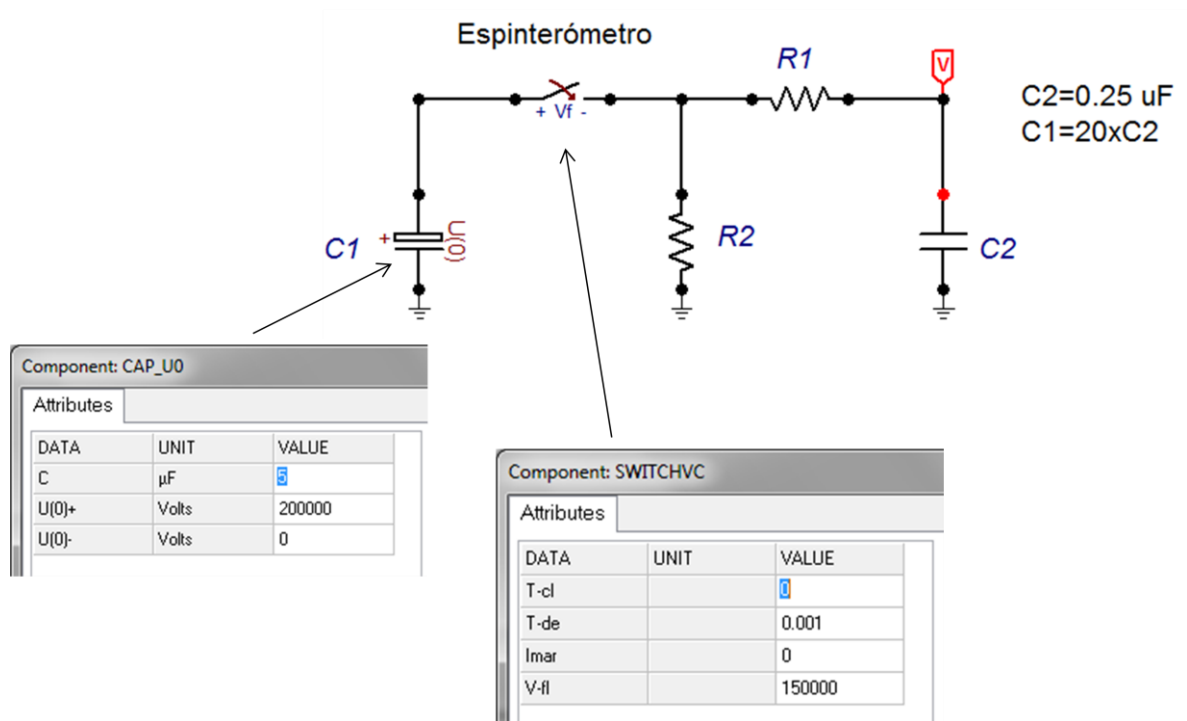


Figura 4.11 Circuito básico del generador de Marx.

- Diseñar el circuito para obtener una onda normalizada 1.2/50 us con valor pico de 200 kV.
- Deducir las expresión analítica para el voltaje y corriente en C_2 .
- Investigar cómo sería el montaje para un generador de varias etapas.

5. ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

5.1 OBJETIVO

El objetivo de este módulo sobre onda viajera es entender la solución obtenida analíticamente para la onda viajera en líneas de transmisión y darle la correspondiente interpretación física.

A partir de la solución para línea ideal de la ecuación del telegrafista se va a confirmar mediante simulación los resultados obtenidos de la solución analítica.

Conocer los modelos matemáticos para la solución de ecuación de onda para línea monofásica con pérdidas y para línea trifásica.

5.2 MARCO TEÓRICO

Los modelos que utilizan los programas de simulación digital para la onda viajera en líneas y cables se dividen en forma general:

- Modelo para línea trifásica transpuesta (Modelo de Clarke).
- Modelo para línea no transpuesta (Modelo K.C. LEE)
- Modelos que incluyen variación de los parámetros con la frecuencia

El modelo de Clarke utiliza para los cálculos una matriz de transformación constante, ya que para línea transpuesta los parámetros para los modos de propagación siempre se pueden evaluar de la misma manera.

Las matrices de transformación básicamente lo que hacen es descomponer una propagación que se daría por una línea acoplada (caso trifásico por ejemplo) en varios modos de propagación. Para el caso de línea trifásica transpuesta, los parámetros para los tres modos de propagación, se pueden obtener a partir de las componentes de secuencia y se obtienen los mismos resultados. Cuando la línea deja de ser transpuesta los modos se evalúan para cada caso en forma particular. Para este caso

se debe calcular una matriz de transformación particular, que se hace normalmente con la opción LINE CONSTANTS del ATP.

5.2.1 Solución para línea monofásica sin pérdidas

Para determinar en forma exacta el comportamiento de la línea en régimen transitorio, se plantea las ecuaciones del telegrafista. Estas ecuaciones se plantean a partir de un elemento diferencial como el de la Figura 5.1.

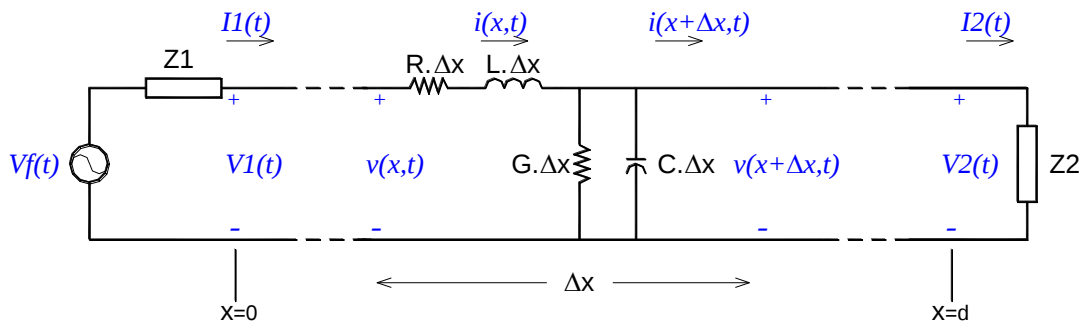


Figura 5.1 Elemento diferencial circuital de línea, variables x y t

$R \rightarrow$ Resistencia por unidad de longitud

$L \rightarrow$ Inductancia por unidad de longitud

$G \rightarrow$ Conductancia por unidad de longitud

$C \rightarrow$ Capacitancia por unidad de longitud

Sobre el elemento diferencial de línea se plantean ecuaciones de voltaje y de corriente de acuerdo a las leyes de Kirchoff.

Planteando ley de voltajes:

$$v(x,t) - v(x+\Delta x) = R\Delta x \cdot i(x,t) + L\Delta x \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (5.1)$$

Dividiendo por Δx en ambos miembros de la ecuación (5.1)

$$\frac{v(x,t) - v(x + \Delta x)}{\Delta x} = Ri(x,t) + L \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (5.2)$$

Tomando límites cuando $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -R \cdot i(x,t) - L \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (5.3)$$

Planteando ley de corrientes en el elemento diferencial :

$$i(x,t) - i(x + \Delta x,t) = G \Delta x \cdot v(x + \Delta x,t) + C \cdot \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x,t)}{\partial t} \quad (5.4)$$

Dividiendo por Δx en ambos miembros de la ecuación (5.4)

$$\frac{i(x,t) - i(x + \Delta x,t)}{\Delta x} = G \cdot v(x + \Delta x,t) + C \frac{\partial v(x + \Delta x,t)}{\partial t} \quad (5.5)$$

Tomando límites cuando $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -Gv(x,t) - C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (5.6)$$

Las ecuaciones (5.3) y (5.6) se deben resolver simultáneamente. Existen diferentes métodos para resolver las ecuaciones de la línea:

- El Método de D'Alembert
- El Método Clásico
- El Método mediante la Transformada doble de Laplace

Los dos primeros métodos son los más utilizados porque dan una solución realmente simple ya parten de un supuesto de solución que cumpla con las ecuaciones de borde del problema.

El método de Laplace es mucho más elaborado con la ventaja de que la interpretación de la solución final es mucho más sencilla. Otra ventaja es la de que la suposición de casos particulares de solución, como la de línea ideal sin pérdidas, solo hay que hacerlo al final, permitiendo un paso fácil hacia los modelos de líneas considerando las pérdidas.

Utilizando el método de doble transformada de Laplace, para las variables tiempo y para el desplazamiento x , se obtiene una solución analítica para el caso de línea ideal sin pérdidas ($R=0$, $G=0$). Esta solución para el voltaje y la corriente corresponde a las ecuaciones 5.7 y 5.8.

$$v(x,t) = \frac{Z_c}{Z_1 + Z_c} \times \left[\begin{aligned} &v_f(t - x/v)u(t - x/v) + \\ &r_2 v_f(t - (2d - x)/v)u(t - (2d - x)/v) + \\ &r_1 r_2 v_f(t - (2d + x)/v)u(t - (2d + x)/v) + \\ &r_1 r_2^2 v_f(t - (4d - x)/v)u(t - (4d - x)/v) + \\ &r_1^2 r_2^2 v_f(t - (4d + x)/v)u(t - (4d + x)/v) + \dots \end{aligned} \right] \quad (5.7)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_1 + Z_c} \times \left[\begin{aligned} &v_f(t - x/v)u(t - x/v) \\ &- r_2 v_f(t - (2d - x)/v)u(t - (2d - x)/v) \\ &+ r_1 r_2 v_f(t - (2d + x)/v)u(t - (2d + x)/v) \\ &- r_1 r_2^2 v_f(t - (4d - x)/v)u(t - (4d - x)/v) \\ &+ r_1^2 r_2^2 v_f(t - (4d + x)/v)u(t - (4d + x)/v) - \dots \end{aligned} \right] \quad (5.8)$$

Donde,

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{Impedancia característica de la línea } (\Omega)$$

$$r_1 = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} \quad \text{Coeficiente de reflexión al inicio de la línea}$$

$$r_2 = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} \quad \text{Coeficiente de reflexión al final de la línea}$$

Z_1 es la impedancia de la fuente.

Z_2 es la impedancia en la carga.

Cuando la línea es del tipo semi-infinita las ondas reflejadas del lado de la carga nunca llegan y en las dos ecuaciones anteriores solamente aparece el primer término de la serie:

$$v(x,t) = \frac{Z_C}{Z_1 + Z_C} \times [v_f(t - x/v)u(t - x/v)] \quad (5.9)$$

$$i(x,t) = \frac{1}{Z_1 + Z_C} \times [v_f(t - x/v)u(t - x/v)] \quad (5.10)$$

Igual sucede cuando la línea tiene una carga resistiva igual a su impedancia característica de la línea.

5.3 SIMULACIONES

Se van a realizar una serie de simulaciones, empezando por líneas ideales y luego con líneas reales del sistema de transmisión colombiano. Para las líneas ideales y aún para líneas transpuestas, los parámetros se pueden estimar mediante cálculos manuales, pero para líneas reales, se debe apoyar en el subprograma Line Constants del Atp, para que determine los parámetros correspondientes a los modelos de onda viajera. Este subprograma hace parte del mismo programa ATP.

5.3.1 Energización de línea monofásica sin pérdidas en vacío con una fuente impulso de voltaje

Esta primera simulación se va a realizar considerando una línea ideal sin pérdidas. La línea se va dividir en dos tramos de 25 km para efectos únicamente de observar lo que le sucedería a un observador que esté situado a mitad de línea.

Longitud = 50 km

Impedancia característica = 500Ω

Velocidad de propagación = $3 \cdot 10^5$ km/s

$T_{\max} = 2.5$ ms

$\Delta t = 0.15 \mu\text{s}$

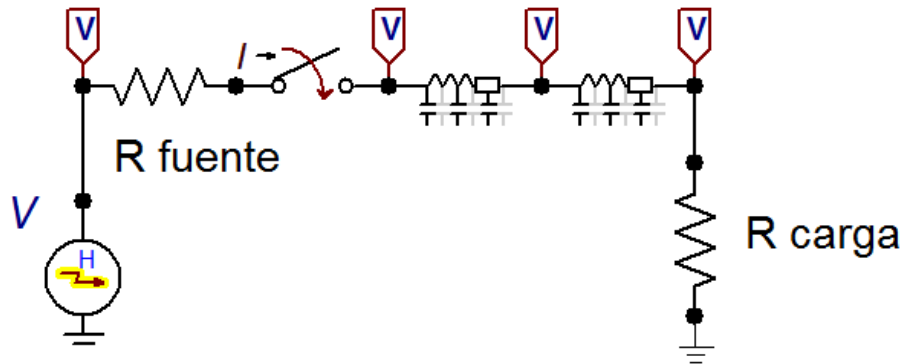


Figura 5.1 Línea energizada con un impulso de voltaje

La fuente de voltaje a considerar es una de tipo impulso de $8 \mu\text{s}$ de frente y una constante de tiempo de cola de $20 \mu\text{s}$ (Ver Figura 5.2).

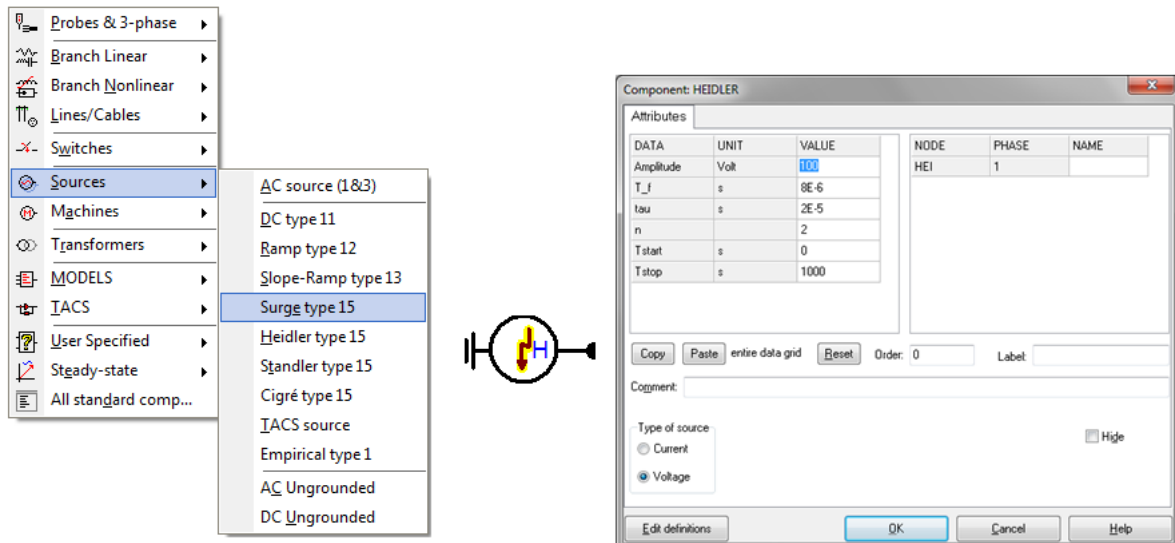


Figura 5.2 Ventana de datos fuente tipo impulso de voltaje

Lo que se pretende con esta simulación es entender la solución dada a la propagación de una onda viajera planteada en las ecuaciones 5.7 y 5.8. La energización se realiza con una función impulso con el único fin de que los términos de la solución a la ecuación de onda gráficamente aparezcan en forma separada.

Para éste caso se utiliza el modelo de onda viajera monofásico de Clarke, el cual se selecciona de acuerdo a la Figura 5.3

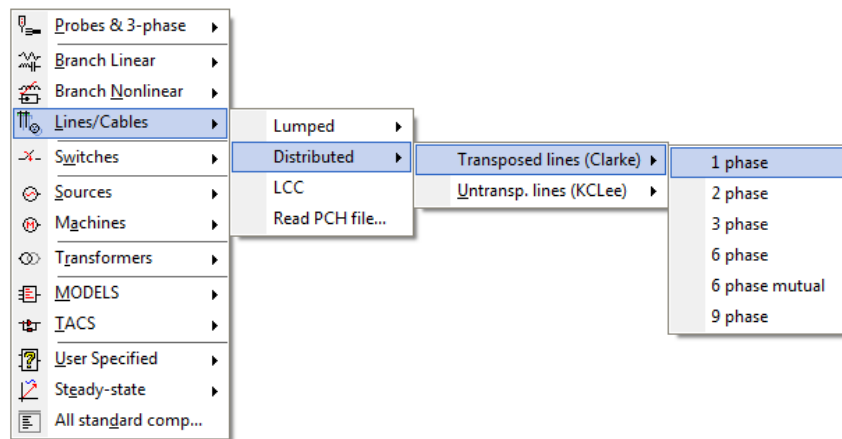


Figura 5.3 Modelo de Clarke monofásico para onda viajera.

Para asignar los datos de la línea hay varias opciones dependiendo de la opción ILINE, que puede tomar los valores 0, 1 o 2. Para comprender estas opciones se puede apoyar en la ventana del HELP (Ver Figura 5.4).

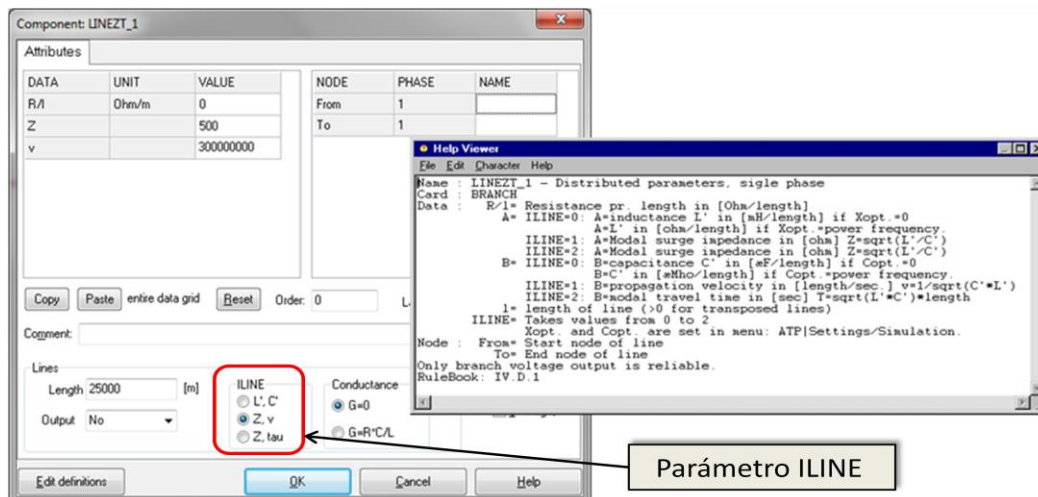


Figura 5.4 Ventana datos del modelo de Clarke

Los parámetros que requiere este modelo son los siguientes:

- Resistencia de pérdidas (Ω /unidad de longitud)
- Impedancia característica (Ω), para $ILINE=1$ (Z_v)
- Velocidad de propagación (unidad de longitud/s), para $ILINE=1$
- Distancia del tramo de red (unidad de longitud)
- Variable de control de unidades $ILINE$. Para el caso de las definiciones anteriores esta variable debe tener valor 1

En las versiones actuales de Atpdraw, el parámetro $ILINE$ es transparente para el usuario, ya que aparecen las tres opciones disponibles mediante un botón, tal como aparece en la Figura 5.4.

Considerar las siguientes situaciones para la fuente y la carga:

- R_{fuente} de 0.1Ω y R_{carga} de 500Ω
- R_{fuente} de 0.1Ω y R_{carga} de 250Ω
- R_{fuente} de 0.1Ω y R_{carga} de 750Ω
- R_{fuente} de 0.1Ω y R_{carga} de $1 M\Omega$
- R_{fuente} de 500Ω y R_{carga} de $1 M\Omega$

Para cada uno de los anteriores casos y de acuerdo a la solución de la ecuación de onda, indicar cuál es la solución analítica para el voltaje a mitad y al final de la línea.

5.3.2 Energización de línea monofásica sin pérdidas en vacío

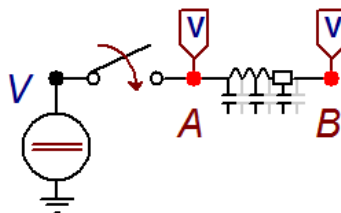


Figura 5.5 Línea ideal energizada con fuente escalón de voltaje

Para la simulación, implementar el circuito de la Figura 5.5. La energización se va a hacer inicialmente con una fuente constante y para línea ideal sin pérdidas.

Una precaución importante para las simulaciones que se hagan utilizando los modelos de onda viajera es la de que la variable Deltat (Delta de tiempo de simulación) debe ser menor que el tiempo de viaje de la línea más corta. Para el caso de la anterior línea que tiene una velocidad de propagación de 300.000 km/s y una distancia de 100 km:

$$Deltat \text{ Máximo} \leq \frac{Distancia}{Velocidad} = \frac{100}{300000} = 333.33 \mu seg$$

Se podría tomar un Deltat de 10 μs .

Con el fin de determinar el tiempo de simulación (Tmax) se debe tener en cuenta la duración del período de la oscilación de voltaje al final de la línea, que para una línea está del orden de cuatro veces el tiempo de viaje, y considerando que se quieren realizar la simulación durante 10 períodos:

$$Tmax = 10 \times 4 \times 333.33 \times 10^{-6} = 13.3 \text{ ms}$$

Es bueno chequear el número de pasos de cálculo que tendría la simulación:

$$Número \text{ de } pasos \text{ de } cálculo = \frac{Tmax}{Deltat} = \frac{13.3 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-6}} = 1330 \text{ pasos}$$

Este chequeo se realiza porque el número de pasos podría dar lugar a una simulación muy pesada y habría que afectar adecuadamente los "settings" enteros. Recordar que la variable "Plot Freq" de los "settings" enteros debe ser un número entero impar.

5.3.3 Energización de línea monofásica sin pérdidas con carga

Energizar nuevamente la línea pero considerando una carga resistiva con los siguientes valores:

Rcarga de 1000, 100 y 500 Ω

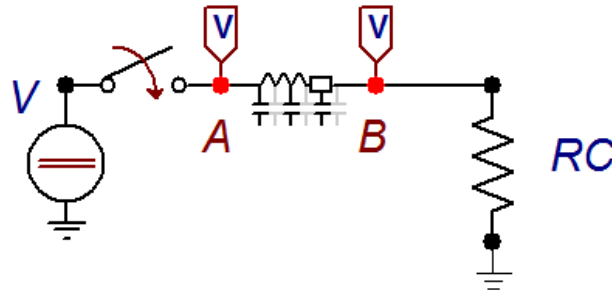


Figura 5.6 Línea ideal energizada con carga

Para cada caso calcular el coeficiente de reflexión y compararlo con el tipo de oscilación que se presenta.

5.3.4 Energización de línea monofásica sin pérdidas con resistencia de preinserción

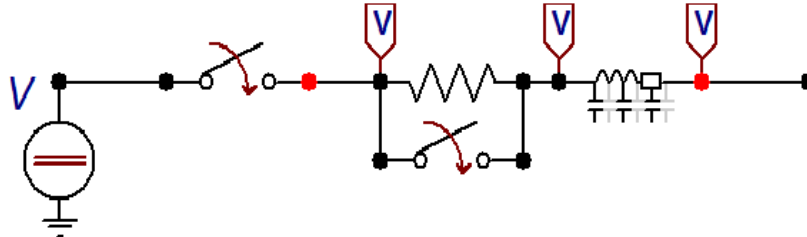


Figura 5.7 Línea ideal con resistencia de preinserción

Una manera de controlar la magnitud del sobrevoltaje que se presenta al final de una línea durante su energización es mediante una resistencia de preinserción. El objetivo de esta resistencia es hacer que la onda viajera que regresa de la línea hacia la fuente vea un coeficiente de reflexión muy pequeño. Considerar el sistema que se ilustra en la Figura 5.7. A la resistencia de preinserción para efectos de la simulación se le debe controlar dos parámetros básicos:

- Valor de la resistencia
- Tiempo que debe permanecer conectada en serie con la línea.

Este par de parámetros se debe escoger y justificar adecuadamente de acuerdo al sistema bajo simulación.

5.3.5 Obtención modelos Lee y Clarke

Los modelos de onda viajera para línea transpuesta y no transpuesta son los modelos más utilizados para representar adecuadamente una red de transmisión de energía eléctrica para diferentes estudios de un sistema de potencia.

Para estudio de transitorios y considerando una línea trifásica se hace una descomposición en modos de propagación. Lo anterior es semejante a la descomposición que se hace en redes de secuencia para estudios de estado estacionario. Cuando la línea es transpuesta y los transitorios a estudiar no son de alta frecuencia, los modos de propagación se pueden obtener a partir de la teoría básica de impedancias de secuencia.

Para la práctica se van a calcular los modos de propagación a partir de los parámetros de secuencia.

$$R_{modo} = R_{secuencia} (\Omega / km) \quad (5.11)$$

$$Z_{c\ modo} = \sqrt{\frac{L_{secuencia} (H)}{C_{secuencia} (F)}} (\Omega) \quad (5.12)$$

$$Vel. \ de \ prop. = \frac{1}{\sqrt{Induc \ de \ sec. (H/km) \times Capac \ de \ sec. (F/km)}} (km/s) \quad (5.13)$$

De manera análoga que se obtiene para los parámetros de secuencia, para los modos de propagación se obtienen tres tipos, donde el primero es el modo **tierra** (ground) y tienen influencia de las características del suelo, los dos siguientes son iguales entre si y no tienen influencia del suelo.

La formulación básica para cálculo de parámetros de secuencia de una línea con dos cables de guarda es:

$$Z_0 = (Z_s + 2Z_m) - \frac{6 Z_{fg}^2}{Z_g + Z_{gg}} \quad (5.14)$$

$$Z_s + 2Z_m = Rac + 3 \cdot \pi^2 f \times 10^{-4} + j 3 \times \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De}{\sqrt[3]{RMG' \cdot DMG^2}} \Omega / km \quad (5.15)$$

$$De = 658,86 \sqrt{\rho / f} \text{ m} \quad (5.16)$$

$$Z_{fg} = \pi^2 f \times 10^{-4} + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De}{DMG_{fg}} \Omega / km \quad (5.17)$$

$$Z_{gg} = \pi^2 f \times 10^{-4} + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De}{D_{gg}} \Omega / km \quad (5.18)$$

$$Z_g = Rac + \pi^2 f \times 10^{-4} + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{De}{RMG'} \Omega / km \quad (5.19)$$

$$Z_1 = Rac + j \frac{w\mu}{2\pi} \ln \frac{DMG}{RMG'} \Omega / km \quad (5.20)$$

Para el cálculo de las capacitancias se pueden utilizar las siguientes expresiones:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{DMG}{r_f}} = \frac{55.55}{\ln \frac{DMG}{r_f}} \frac{nF}{km} \quad (5.21)$$

$$C_0 = \frac{1}{3} \times \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{DMG_{fases-imágenes}}{\sqrt[3]{r_f \cdot DMG^2}} - \frac{\left(\ln \frac{DMG_{fases-imágenesguardas}}{DMG_{fases-guardas}} \right)^2}{\ln \frac{DMG_{guardas-imágenesguardas}}{\sqrt[2]{r_g \cdot D_{guardas}}}}} \quad (5.22)$$

Realizar los cálculos de los modos de propagación para una línea de 500 kV la cual tiene la siguiente configuración.

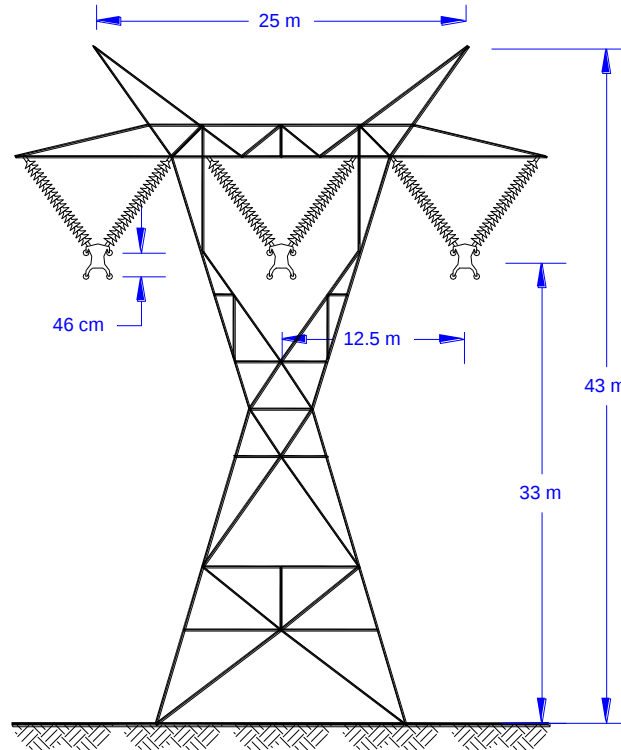


Figura 5.8 Configuración línea de 500 kV

En el informe deben aparecer los cálculos para estos modos de propagación de manera que los confrontemos con los que se obtengan mediante el modelo que se genere con el programa ATP. Hacer el cálculo para frecuencias de 60, 100, 500 y 1000 Hz y para una resistividad del terreno de $150 \Omega \cdot m$. Los modos de propagación se pueden presentar como $R_{pérdidas}$, Z_c y V_{el} de propagación.

Los datos físicos del conductor y cable de guarda son:

	Conductor	Cable de guarda
Diámetro	25.17 mm	8.71 mm
Rdc	$0.08912 \Omega/km$	$1.844 \Omega/km$

Considerar para el cable de guarda la conexión tradicional, es decir continuo y aterrizado en cada estructura.

Los resultados que se obtengan sirven para alimentar la ventana de datos del modelo que en el programa se llama modelo de Clarke (3 fases).

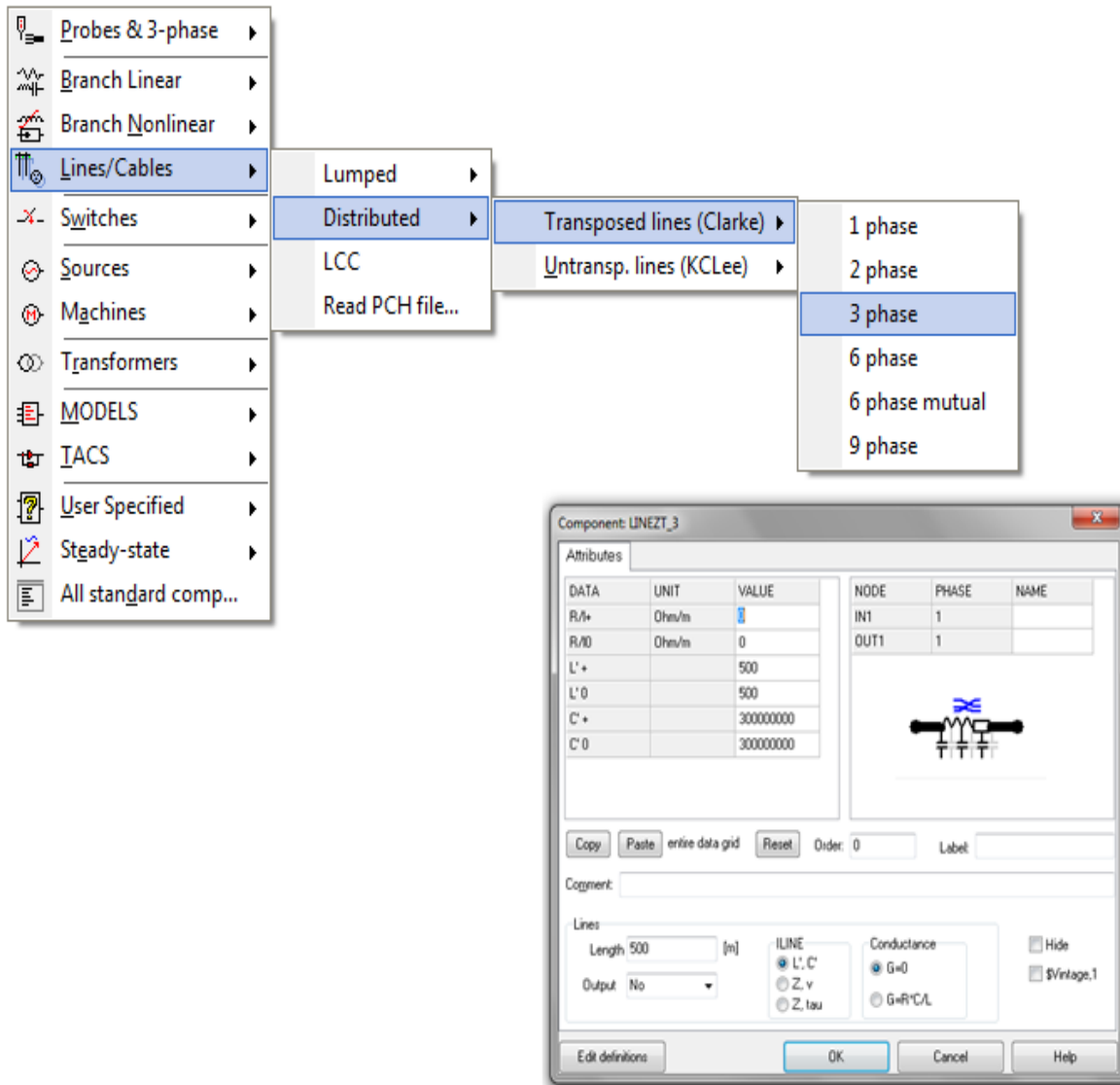


Figura 5.9 Ventana de datos para modelo de Clarke trifásico

Consultar en el Help la definición de cada uno de estos parámetros:

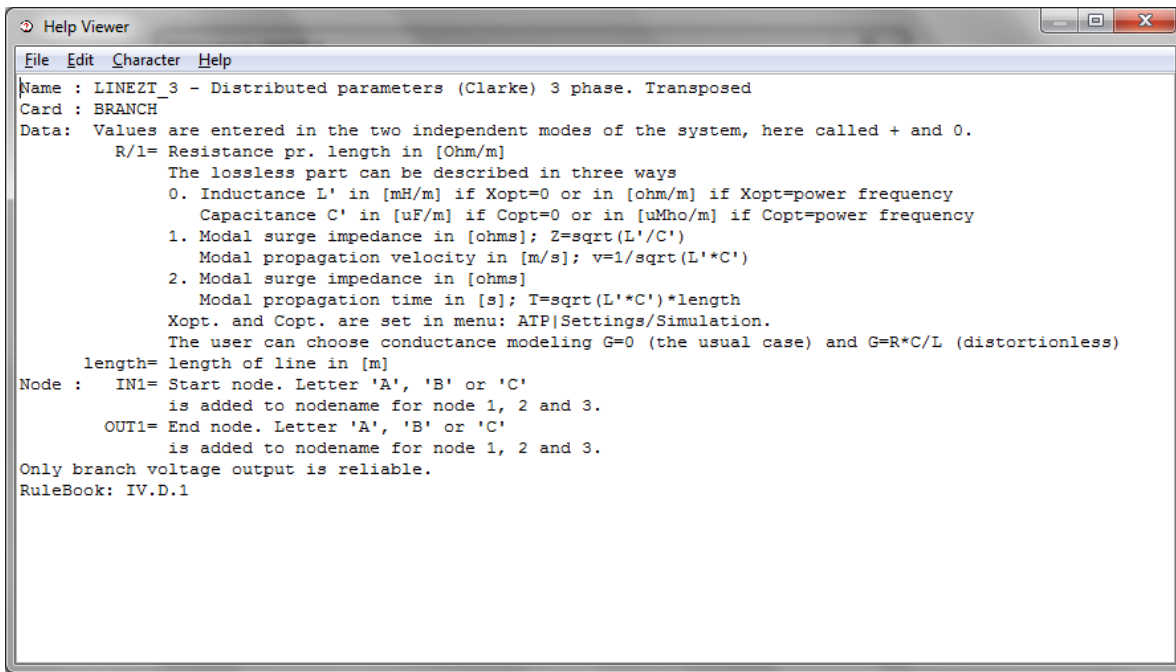


Figura 5.10 Ayuda para el modelo de Clarke.

5.3.6 Obtención modelos Lee y Clarke con Line Constants

Consultar la opción Line Constants del Atp, con el fin de entender las diferentes opciones que tiene este subprograma. Esta opción corresponde a LINES/CABLES LCC de la caja de herramientas.

Lo que se puede obtener a partir de esta opción que ofrece la interfaz Atpdraw es una corrida del subprograma Line Constants para generar modelos de líneas lo mismo que obtener parámetros de secuencia o una matriz de impedancias o capacitancias.

Para esta línea se requiere obtener la siguiente información:

- Obtener el modelo de onda viajera trifásico para línea transpuesta. De acuerdo al formato para el modelo de Clarke leer los valores de Resistencia de pérdidas, Impedancia Característica, Velocidad de Propagación para los diferentes modos de propagación. Para el caso de línea trifásica son tres (El concepto es equivalente a descomposición en redes de secuencia). Las longitudes de línea es de 209 km. En la obtención de estos modelos es muy importante la frecuencia del

fenómeno transitorio, en este caso la del voltaje al final de la línea y que debe ser muy aproximada a la que se presente en forma real cuando ocurra el transitorio. Asumir una resistividad del terreno de $150 \Omega.m$, y una velocidad de propagación igual a la de la luz para el cálculo de los parámetros (esto último equivale a un cálculo que se debe hacer de la frecuencia de oscilación del voltaje al final de la línea en el tiempo de energización).

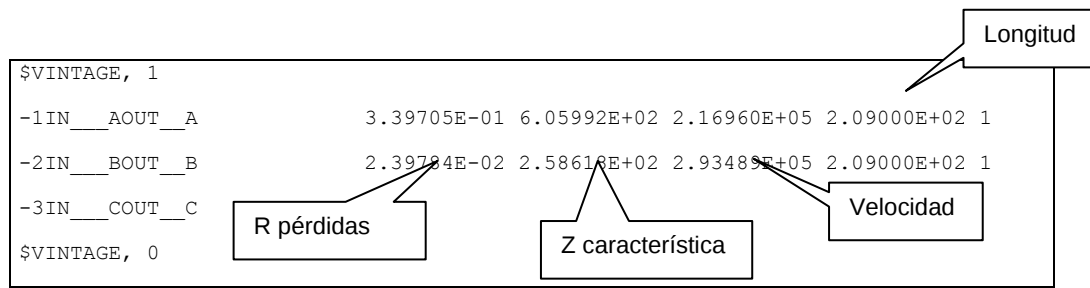


Figura 5.11 Formato del modelo de Clarke trifásico

- En el modelo de Clarke el programa Atp utiliza una transformación interna que tiene. Investigar cuál es dicha transformación y porque no es válido utilizar la transformación de componentes simétricas.
- Determinar la sensibilidad de los parámetros: Resistencia de Pérdidas, Impedancia Característica y Velocidad de Propagación, con respecto a variación de la frecuencia ($10 \text{ Hz} \leq f \leq 5000 \text{ Hz}$) y la resistividad del terreno ($100\text{-}3000 \Omega.m$). Estas sensibilidades se deben presentar en forma tabular y en forma gráfica.
- Determinar la relación entre Z_c y $R/4$ (R es la resistencia de pérdidas total de la línea) con el fin de verificar la necesidad de considerar tramos más cortos de línea en la modelación. Se debe cumplir que $Z_c \gg R/4$ para garantizar un funcionamiento adecuado de éstos modelos de onda viajera. Justificar las relaciones entre las resistencias de pérdidas, impedancias características y velocidades de propagación de los dos modos de propagación para una línea transpuesta.
- Repetir el primer ítem pero considerando línea no transpuesta. Para este caso aparece una matriz de transformación diferente a la de Clarke, que es calculada para cada configuración de línea.

- Realizar una simulación energizando una sola fase con una fuente tipo escalón (11). Determinar la frecuencia real de la oscilación del voltaje al final de la línea en la fase energizada. Una vez determinada la frecuencia real de oscilación del voltaje, cambiar la fuente por una del tipo sinusoidal (tipo 14) y observar nuevamente el voltaje al final de la línea, pero esta vez interesa observar el resultado cuando el voltaje se estabilice. Justificar el resultado. ¿Cuál sería la longitud de línea que para la anterior fuente no se presente un sobrevoltaje en estado estacionario por encima del 10%? A partir de los resultados obtenidos dar una posible justificación a la frecuencia comercial de 60 Hz.
- Energizar la línea transpuesta con una fuente trifásica sinusoidal considerando diferentes tiempos de cierre de los interruptores. Determinar la condición más crítica en los anteriores tiempos tomando como señal de criticidad el máximo sobrevoltaje al final de la línea en cualquiera de las fases.

6. FENÓMENOS TRANSITORIOS ORIGINADOS POR UNA CORRIENTE DE RAYO Y CÁLCULO DE NÚMERO DE SALIDAS DE LA LÍNEA.

6.1 INTRODUCCIÓN

Un rayo produce sobre el aislamiento de una línea de transmisión un sobrevoltaje que depende principalmente de la magnitud de la descarga y de la resistencia de puesta a tierra. El parámetro que clásicamente ha medido dicho comportamiento es el número de salidas de la línea por cada 100 km de longitud y por cada año, parámetro que constituye un criterio de diseño del aislamiento, o una medida del desempeño para una línea que ya esté construida.

El rayo es un fenómeno que origina una sobretensión de origen externo o simplemente de origen atmosférico.

Las sobretensiones de origen atmosférico son independientes de los voltajes de operación de los sistemas de potencia a diferencia de las que se presentan por maniobra, que si dependen del nivel de tensión nominal de los sistemas. La importancia relativa de las sobretensiones atmosféricas crece a medida que disminuye el nivel de tensión de los sistemas.

Los sistemas de transmisión normalmente son diseñados con un apantallamiento con una probabilidad de falla muy pequeña. Las descargas atmosféricas que caerían en forma directa serían de muy poca probabilidad. El flameo inverso ocasionado por una descarga que cae sobre la torre o sobre el cable de guarda es la causa más común de salida de la línea. Se denomina flameo inverso porque este se presenta del neutro hacia la fase, debido al aumento del voltaje en el mismo.

6.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN A ESTUDIAR

Para la caracterización por descargas atmosféricas se va a considerar una línea de 230 kV, con dos cables de guarda tal como se observa en la Figura 6.1.

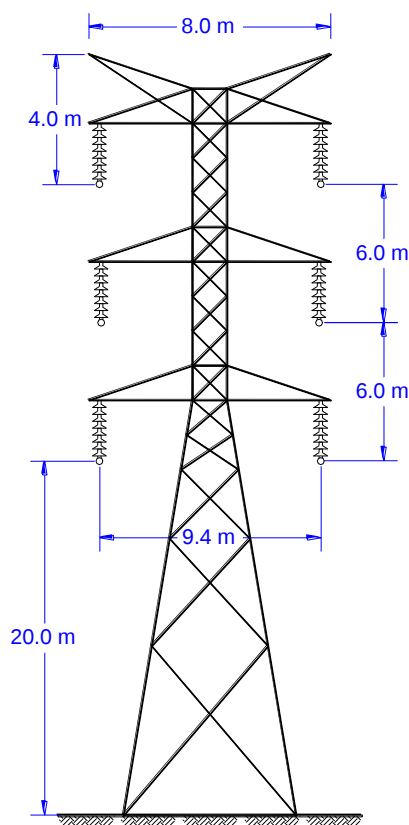


Figura 6.1 Estructura típica de 230 kV

Datos del conductor de fase	Datos del cable de guarda
$R_{dc} = 0.05086 \, \Omega/\text{km}$	$R_{dc} = 1.9014 \, \Omega/\text{km}$
$\varnothing = 30.98 \, \text{mm}$	$\varnothing = 9.78 \, \text{mm}$

Resistividad del terreno = $250 \, \Omega \times \text{m}$

6.3 ASPECTOS DE MODELACIÓN DE ESTRUCTURA Y CONDUCTORES

La modelación de la estructura metálica para un estudio de descargas atmosféricas se puede hacer tal como aparece en la Figura 6.2.

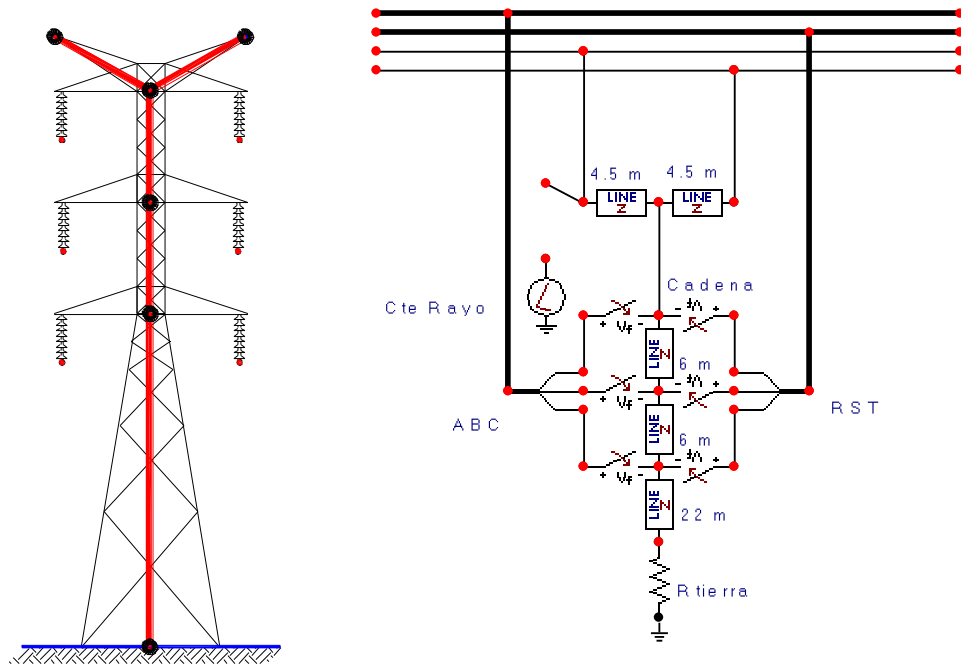


Figura 6.2 Trayectoria del rayo y diagrama para modelación con Atpdraw-Atp

En la modelación de la estructura impactada por el rayo se consideran los tramos más importantes. Si se desea se puede detallar aún más incluyendo por ejemplo las crucetas en las fases, pero la precisión que se logra al detallar no es importante.

Cada uno de los elementos metálicos se puede modelar como un tramo de línea ideal sin pérdidas con una impedancia característica dada por (estructuras de forma cónica):

$$Z_T = 30 \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \Omega \quad (6.1)$$

Donde, h es la altura de la torre y r el radio en la base, suponiendo un cono equivalente.

Como valor típico para Z_T se puede asumir un valor de 200Ω . La velocidad de propagación es aproximadamente la de la luz.

La torre se divide de acuerdo a los tramos que se necesiten con la misma impedancia característica de 200Ω y de acuerdo a la distancia que se considere. El modelo a considerar es el de CLARKE para el caso monofásico y sin pérdidas, tal como se observa en la Figura 6.3.

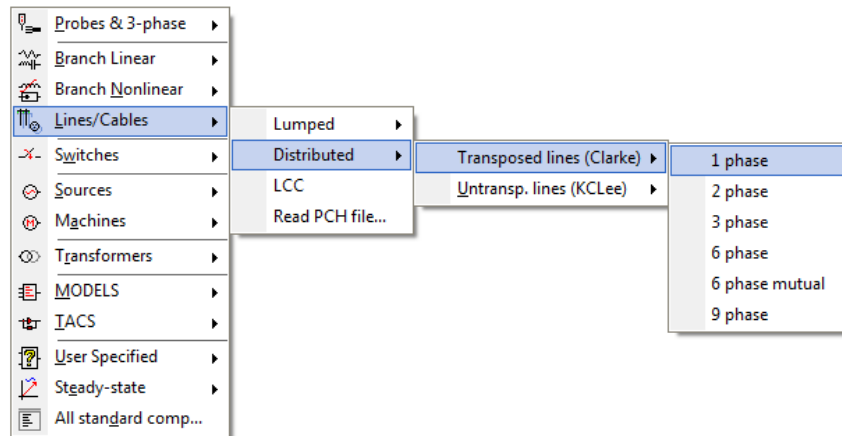


Figura 6.3 Modelo de Clarke para tramo de red monofásica

Los conductores de fase, conjuntamente con los cables de guarda, se modelan como un conjunto de 8 fases acopladas entre si, mediante el modelo de K.C.LEE, a una frecuencia que puede ser de 100 kHz (lo que se denomina el modelo Bergerón en el Atpdraw). Asumir un valor del vano de 0.5 km.

Para obtener el correspondiente modelo se puede utilizar la opción LINE/CABLE de la caja de herramientas del Atpdraw. El modelo a utilizar es el de onda viajera (Bergerón) para línea no transpuesta.

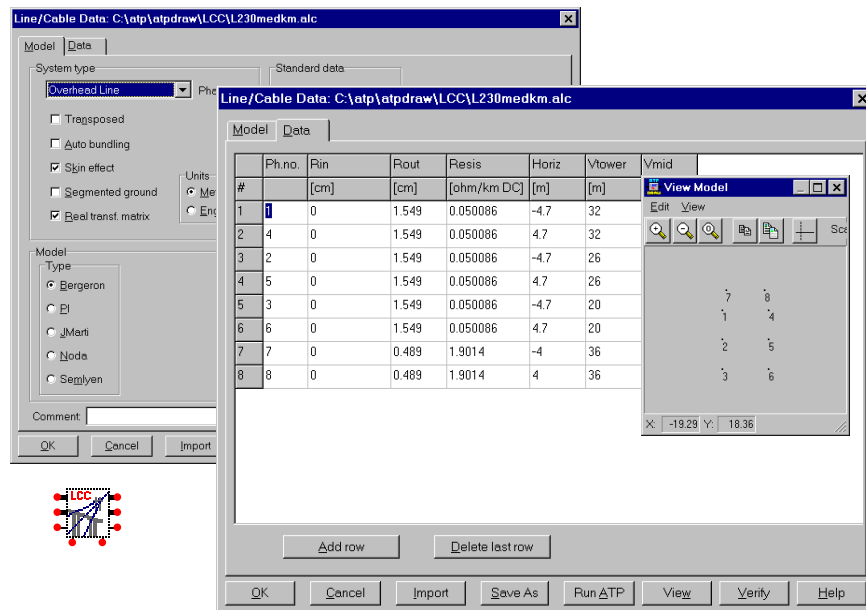


Figura 6.4 Ventana de datos para obtener modelo K.C.LEE para la línea.

La cadena de aisladores se modela como un suiche tipo “gap” que es controlado por voltaje (Figura 6.5).

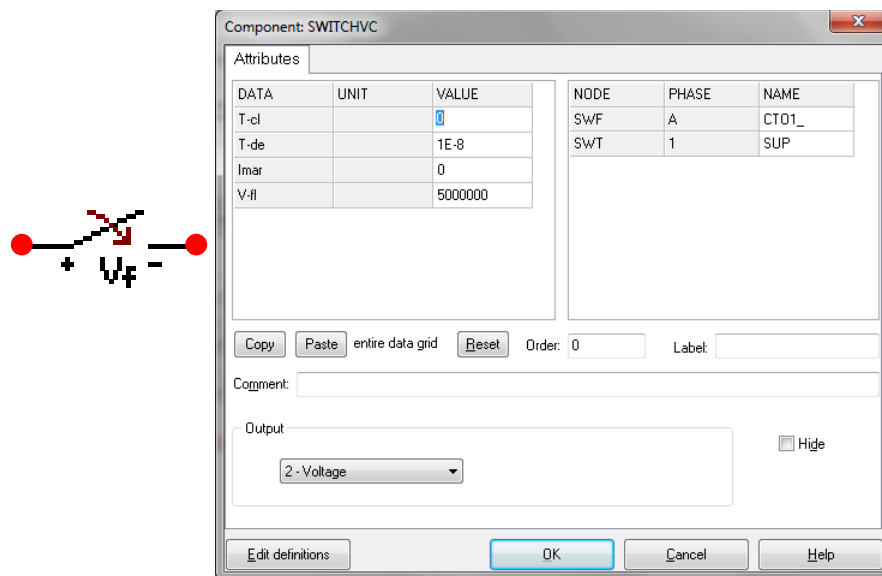


Figura 6.5 Modelo tipo “gap” para la cadena de aisladores.

Para que se pueda observar perfectamente el voltaje que aparece sobre la cadena de aisladores, se coloca un voltaje de flameo bien alto con respecto al que normalmente aparecería sobre la misma (5 MV por ejemplo)

La resistencia de puesta a tierra se modela como una del tipo concentrado, con el valor correspondiente (20Ω en forma típica).

La corriente de rayo se puede simular con una fuente rampa de doble pendiente (tipo 13), o con una fuente tipo impulso bien sea doble exponencial o de un exponencial (tipo 15). Se recomienda para esta práctica la fuente tipo 13 por la facilidad de manejo de la pendiente de rayo.

De manera adicional se puede simular el comportamiento del aislamiento de acuerdo a la formulación que propone la IEEE, donde la resistencia que ofrece el aislamiento depende del tiempo:

$$V_{flameo} = \left(0.4 + \frac{0.71}{t^{0.75}} \right) \times d \quad [MV] \quad (6.2)$$

Donde:

t es el tiempo en μseg

d es la distancia longitudinal de la cadena en m

Esta respuesta del aislamiento se ha simulado mediante la opción de los TACS del ATP que permite implementar fórmulas matemáticas y bloques de control:

$$V_{flameo} = \left(0.4 + \frac{0.71}{(t * 10^6)^{0.75}} \right) \times \# \text{aisladores} \times \text{long por aislador (m)} \times 10^6 \quad [V]$$

Para controlar el hecho que para valores iniciales muy pequeños de tiempo el valor del voltaje de flameo tiende a infinito, se puede multiplicar el valor del voltaje de flameo por una señal paso desplazada en el tiempo.

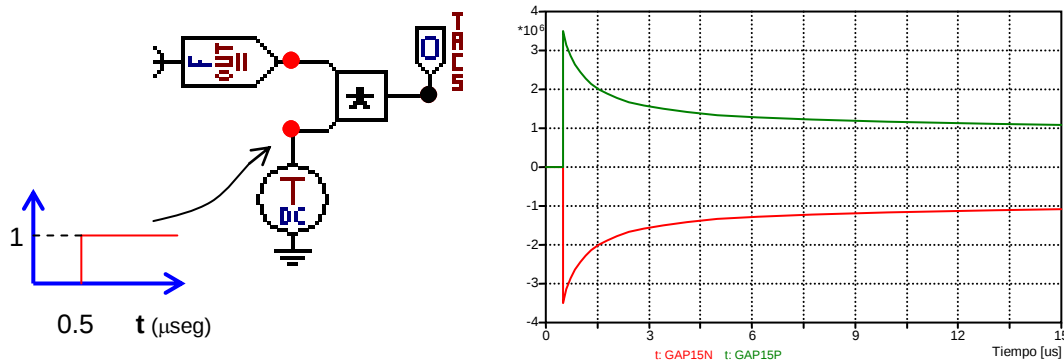


Figura 6.6 Implementación de la función flameo desplazada en el tiempo

El sistema finalmente puede tener la presentación de la Figura 6.7.

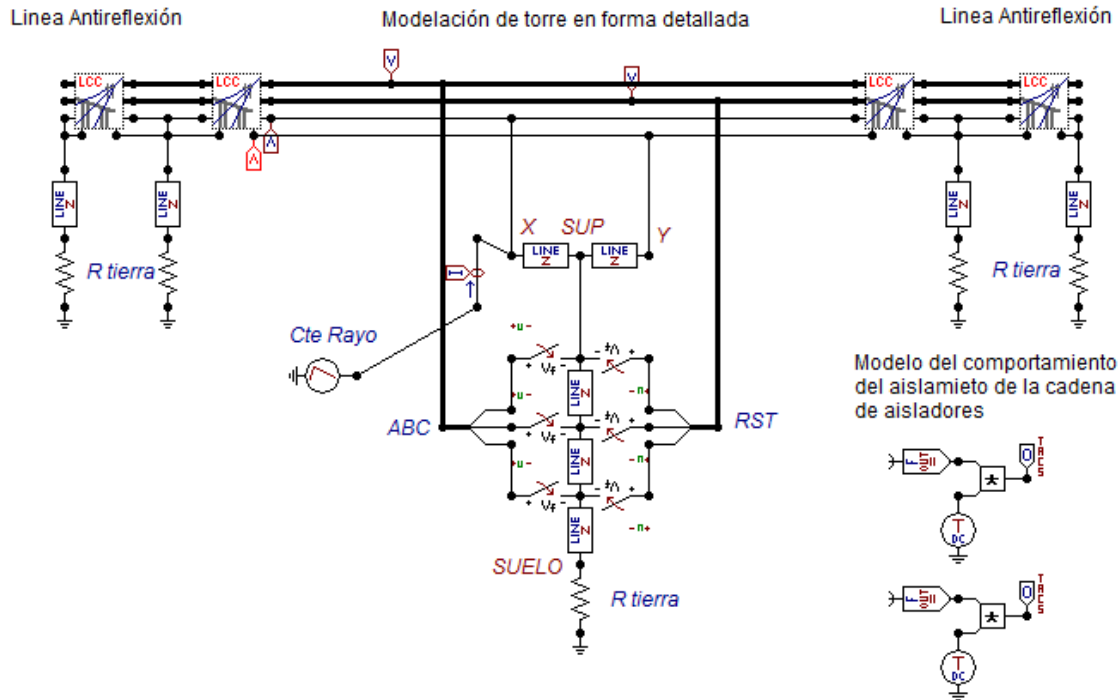


Figura 6.7 Diagrama completo para simulación.

Se puede observar que hay dos vanos de 500 m a lado y lado de la torre donde cae la descarga. Es suficiente esto, porque las puestas a tierra que más influyen son las que quedan más cerca de la torre impactada por el rayo. El hecho que en forma real sean muchos vanos se simula con una línea de longitud infinita (para que no regresen las reflexiones), o mediante elementos resistivos acoplados con valores de resistencia igual a las impedancias características de la línea. Para el caso de este trabajo se puede considerar tramos de línea de una distancia suficientemente grande para que las reflexiones regresen fuera del tiempo de análisis, lo cual equivale en la práctica a considerar línea infinita. Para el sistema se ha considerado tramos de línea de 2.5 km cuyas reflexiones regresarían en un tiempo aprox. de 16.7 μseg .

Hay que tener especial cuidado con el delta de tiempo de simulación, ya que debe ser más pequeño que el tiempo de viaje más corto ($\Delta t < 4.5\text{m}/3 \times 10^8 \text{ m/s} = 15 \text{ nseg}$). El tiempo de simulación, $T_{\text{máx}}$, debe estar entre entre 10 y 20 μseg para que no sea

muy pesada la simulación y adicionalmente en este tiempo, los peores sobrevoltajes sobre la cadena ya se han presentado.

6.4 PROCEDIMIENTO Y PREGUNTAS

- Interesa en primera instancia establecer la diferencia entre los efectos sobre el aislamiento (cadena de aisladores) de una descarga directa en la fase y una descarga en los cables de guarda o en la torre. Para este caso se va a impactar la línea primero en la punta de la torre y luego en la fase. Para ambos casos determinar el voltaje que aparece en la cadena de aisladores y determinar la influencia del valor de puesta a tierra y de la variación de la corriente. ¿Se puede controlar el sobrevoltaje en las cadenas de aisladores cuando el rayo impacta la fase? ¿Por qué?
- Considerar la repuesta del aislamiento en el tiempo y determinar que magnitud de corriente de rayo puede romper el aislamiento de una cadena de 15 aisladores. En la simulación se considera la simulación de la respuesta del aislamiento en el tiempo mediante los TACS.
- Calcular el sobrevoltaje que aparece sobre cada una de las cadenas de aisladores para una corriente de rayo de 30 kA, 2/50 μ seg y resistencia de puesta a tierra de 20 Ω . ¿En cuál cadena aparece mayor sobrevoltaje y porqué? ¿Qué signo tienen estos voltajes, cuál es la razón de este signo?
- El concepto de acople se entiende como el voltaje que aparece inducido sobre las fases debido al voltaje generado sobre los cables de guarda debido a la descarga atmosférica. Normalmente se define en forma porcentual con respecto al voltaje que aparecen en los cables de guarda. ¿Para la misma situación del ítem anterior cual es el valor de estos acoples en %?
- Identificada la cadena donde aparece el mayor sobrevoltaje y partiendo de una condición base de T_f de 1.2 μ seg, R_{tierra} de 20 Ω y una corriente de rayo de 30 kA, hacer sensibilidad con respecto a la corriente de rayo (1kA a 200 kA), resistencia de puesta a tierra de las torres (5 Ω a 1000 Ω), frente de onda (0.5 μ seg a 4 μ seg). Realizar un ordenamiento de estos parámetros de acuerdo a su

influencia en la magnitud del sobrevoltaje y dando las razones de dicho ordenamiento.

- Para una corriente de rayo fija de 1kA, llenar la siguiente tabla 6.1

Tabla 6.1 Archivo plano generado por la interfaz Atpdraw

Rtierra (Ω)	Tfrente (μ seg)	Vcadena (kV/kA)	Icrítica (kA) para diferentes longitudes de cadena					
			12	13	14	15	16	17
20	1.2							
5	2.0							
10	2.0							
20	2.0							
50	2.0							
100	2.0							
200	2.0							
1000	2.0							
20	4.0							

La corriente crítica se obtiene dividiendo el BIL total de la cadena para impulsos negativos por el sobrevoltaje que aparece sobre la misma para un kA de corriente de rayo. Considere que el BIL de cada aislador es de 120 kV en seco y 80 kV en húmedo.

Por ejemplo si para un Tf de 1.2 μ seg y una Rtierra de 20 Ω el sobrevoltaje sobre la cadena fue de 20.3 kV/kA (Corriente de rayo unitaria de 1kA), la corriente crítica de flameo para una cadena de 15 aisladores seria de $15 \cdot 120 / 20.3$ kA, es decir 88.7 kA.

- Para cada una de las corrientes críticas de flameo calcular la probabilidad de que en realidad estas corrientes sean superadas. Existen diferentes funciones de

probabilidad para las corrientes de rayo. Una de uso frecuente es la propuesta por Anderson-Eriksson:

$$P(I \geq I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (6.3)$$

La función de probabilidad anterior dice que posibilidad tiene una corriente crítica de ser superada. Para el caso del ejemplo la probabilidad de que la corriente sea superada sería de 6.1%

- Tal como se mencionó, una manera de evaluar el desempeño del aislamiento frente a un esfuerzo originado por descargas atmosféricas, es mediante el índice: *No salidas/100 km/año*. Para calcular el número de salidas se debe conocer el número de descargas que caen por cada km de longitud de línea. Una vez conocido este número de descargas se multiplica por la probabilidad de que superen la corriente crítica. Adicionalmente hay que considerar que las descargas no todas caen sobre la torre, sino que un porcentaje caen a mitad del vano, donde no se produciría flameo porque la distancia en aire entre conductores es mayor a la longitud en aislamiento de cadena y por el fenómeno de predescarga. Se considera que de todas las descargas que caen, el 60% caen sobre la estructura o dentro del área de influencia de la misma y que el 40% caen a mitad del vano. Para calcular el número de descargas que caen por km de línea y por año se puede utilizar la siguiente relación:

$$Nro\ descargas/km/año = (4h + b)Ng \quad (6.4)$$

Donde,

h = altura del cable de guarda (km)

b = separación horizontal entre cables de guarda (km)

Ng = Densidad de rayos en la zona (No descargas/km²/año)

Se puede asumir un valor típico para Ng de 5 para nuestra región.

Para las dimensiones de la torre el Nro de descargas sería de 0.76 descargas/km/año. Para 100 km sería de 152 descargas/100 km/año. Y el número de salidas si se considera cadena de 15 aisladores sería de $76 \cdot 0.061 \cdot 0.6$, es decir 2.78 salidas/100 km/año.

- Si se quiere manejar el criterio de que el número de salidas por cada 100 km por año esté en el rango de 1 a 3 cuál sería el valor de resistencia de puesta a tierra y número de aisladores a garantizar.
- A partir de una condición base de referencia ($R_t=20\Omega$) deducir un criterio básico de diseño que diga: cuantos ohmios hay que rebajar a partir de esta base de puesta a tierra, para que sea equivalente a colocar un aislador más a partir de 15 aisladores. La definición del criterio se basa en el hecho de que para controlar sobretensiones por descargas atmosféricas, se baja el valor de puesta a tierra o se aumenta el número de aisladores.

7. CARACTERIZACIÓN DE SOBREVOLTAJES DE BAJA FRECUENCIA TEMPORALES PRODUCIDOS POR FALLAS

Otro tipo de sobrevoltajes que se presentan en un sistema eléctrico son los llamados temporales, que se caracterizan por su amplitud, la forma de onda y su duración. Un caso que se va estudiar son las sobretensiones originadas por fallas a tierra. Cuando se presenta una falla en un sistema eléctrico de potencia se presenta una condición transitoria que se amortigua rápidamente, quedando una condición de estado estacionaria, pero donde las variables eléctricas no presentan el mismo valor que antes de la falla. Esta condición se mantiene hasta que la falla no sea despejada. La situación más crítica de sobrevoltaje se presenta para las fallas de tipo asimétrico, donde las fases sanas presentan un elevamiento de la tensión que depende del grado de aterrizamiento del sistema.

La situación de sobrevoltaje transitorio permanece hasta cuando se despeje la falla. El sobrevoltaje que se presente depende de las relaciones entre las impedancias de secuencia en el punto de falla y específicamente de las relaciones de X_0/X_1 y R_0/X_1 .

7.1 SOBRETENSIONES TEMPORALES DEBIDO A FALLA MONOFÁSICA A TIERRA

Las fallas monofásica y bifásica a tierra son las que mayores sobretensiones producen en las fases no falladas. En la mayoría de los casos la falla monofásica a tierra se considera la que mayor genera sobretensiones y es la que se considera para caracterizar este tipo de sobretensiones.

El cálculo de estas sobretensiones se puede hacer mediante componentes simétricas, utilizando curvas que sugieren las normas o mediante herramientas de simulación.

El factor de falla a tierra se define para un sistema eléctrico trifásico como la relación entre la mayor tensión a frecuencia industrial entre una fase sana y la tierra durante una falla a tierra que afecta una o más fases en cualquier punto del sistema, y el valor eficaz de la tensión de fase a tierra a frecuencia industrial, que se obtendría en un sitio dado, en ausencia de la falla. El factor de falla se define para el punto de falla.

Para otros estudios como en calidad de la potencia interesa adicionalmente conocer el voltaje que se presenta en la barra de la subestación de potencia para fallas a lo largo del circuito.

Es necesaria la determinación de este factor de falla a tierra para la elección de los niveles de aislamiento a frecuencia industrial del material eléctrico y para determinar parámetros en selección de pararrayos.

Un sistema se denomina “con neutro efectivamente a tierra” cuando el factor de falla a tierra es < 1.38 , lo cual es posible si $X_0/X_1 < 3$ y $R_0/X_1 < 1$. Para valores altos de X_0/X_1 , se dice que el sistema es de neutro aislado.

La norma IEC 71-2 define en el anexo B un método gráfico genérico para determinar el factor de falla para diferentes condiciones del sistema eléctrico.

Estos gráficos son los siguientes:

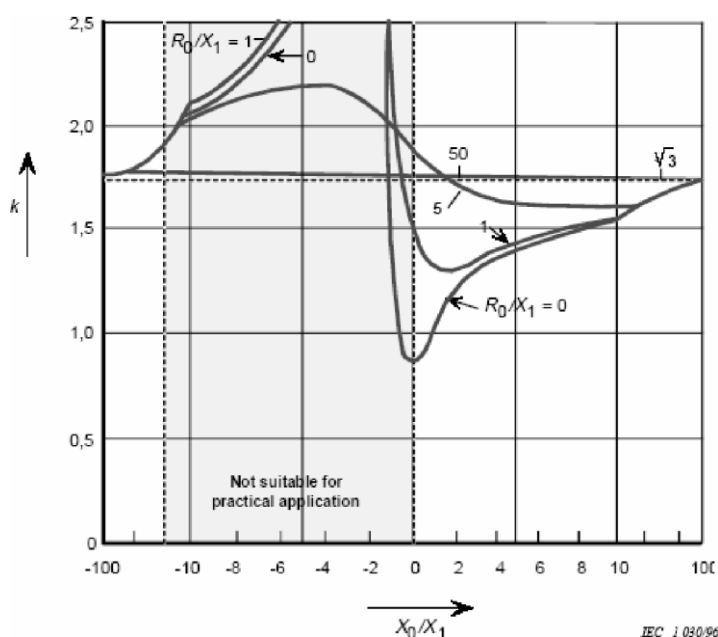


Figura 7.1 Factor de falla a tierra en función de X_0/X_1 y R_0/X_1 como parámetro

En la anterior figura se da el factor de falla a tierra en función de X_0/X_1 , para $R_1/X_1=0$ y para diferentes valores de la relación de R_0/X_1 .

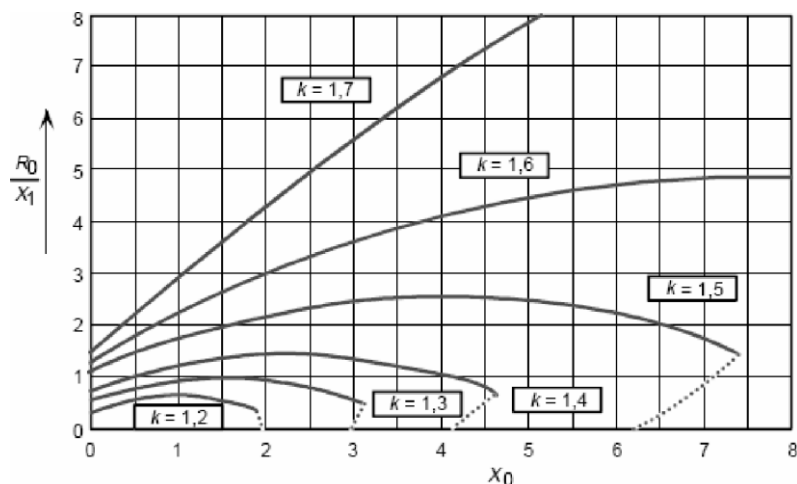


Figura 7.2 Factor de falla tierra para $R_1=0$.

En la figura anterior se grafica el lugar geométrico para valores constantes de factor de falla a tierra, donde la abscisa(x) es la variable X_0/X_1 y la ordenada(y) R_0/X_1 , pero para valores pequeños de R_1 . Se asume $R_1=0$.

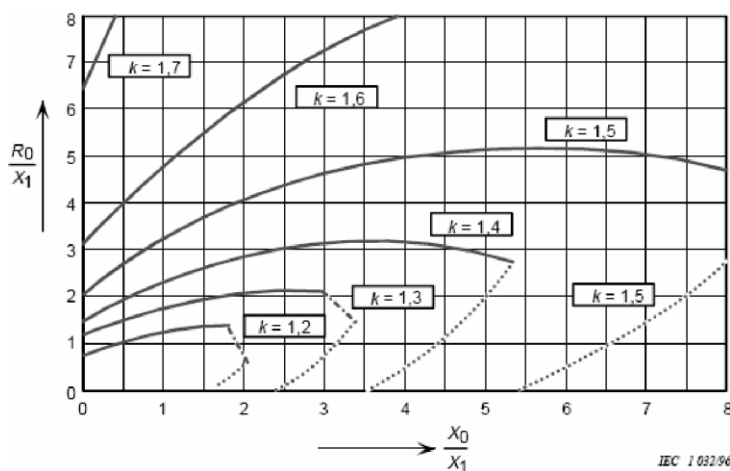


Figura 7.3 Factor de falla a tierra para $X_1=2xR_1$

En la figura anterior se grafica el lugar geométrico para valores constantes de factor de falla a tierra, donde la abscisa es la variable X_0/X_1 y la ordenada R_0/X_1 , pero para una relación de X_1/R_1 de 2.

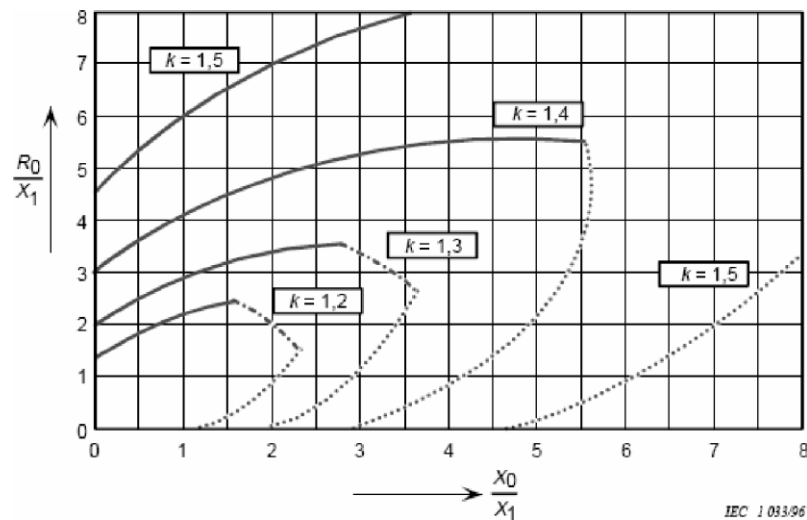


Figura 7.4 Factor de falla tierra para $R_1=X_1$

En la figura anterior se grafica el lugar geométrico para valores constantes de factor de falla a tierra, donde la abscisa es la variable X_0/X_1 y la ordenada R_0/X_1 , pero para $X_1=R_1$.

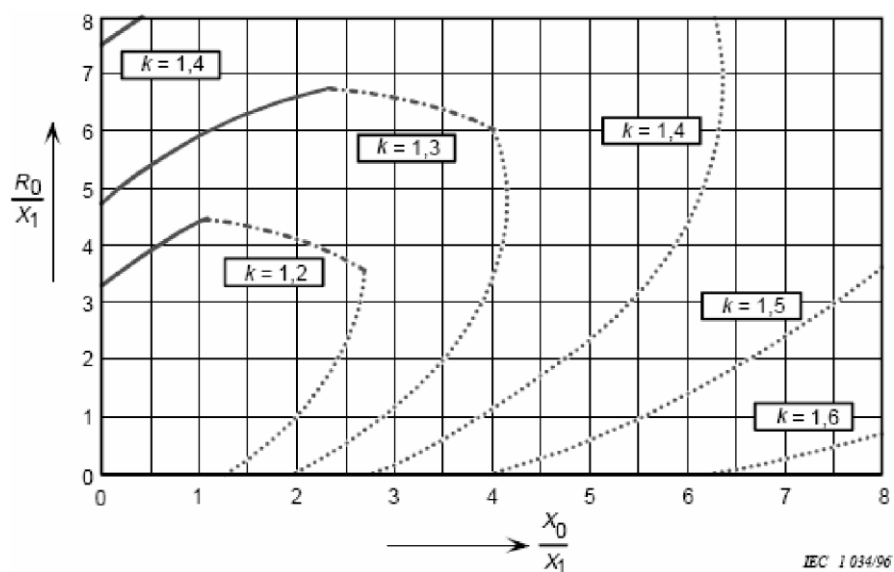


Figura 7.5 Factor de falla a tierra para $R_1=2X_1$

En la figura anterior se grafica el lugar geométrico para valores constantes de factor de falla a tierra, donde la abscisa es la variable X_0/X_1 y la ordenada R_0/X_1 , pero para una relación de X_1/R_1 de 0.5

7.2 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE FACTORES DE FALLA A TIERRA MEDIANTE LA SIMULACIÓN EN ATP

El procedimiento para construir estas curvas consiste en simular en ATP el modelo básico de una línea en la cual se presenta una falla a tierra, tomar el valor máximo de voltaje de las fases sanas y calcular el valor de sobrevoltaje para diferentes valores de impedancias de secuencia, véase la Figura siguiente.

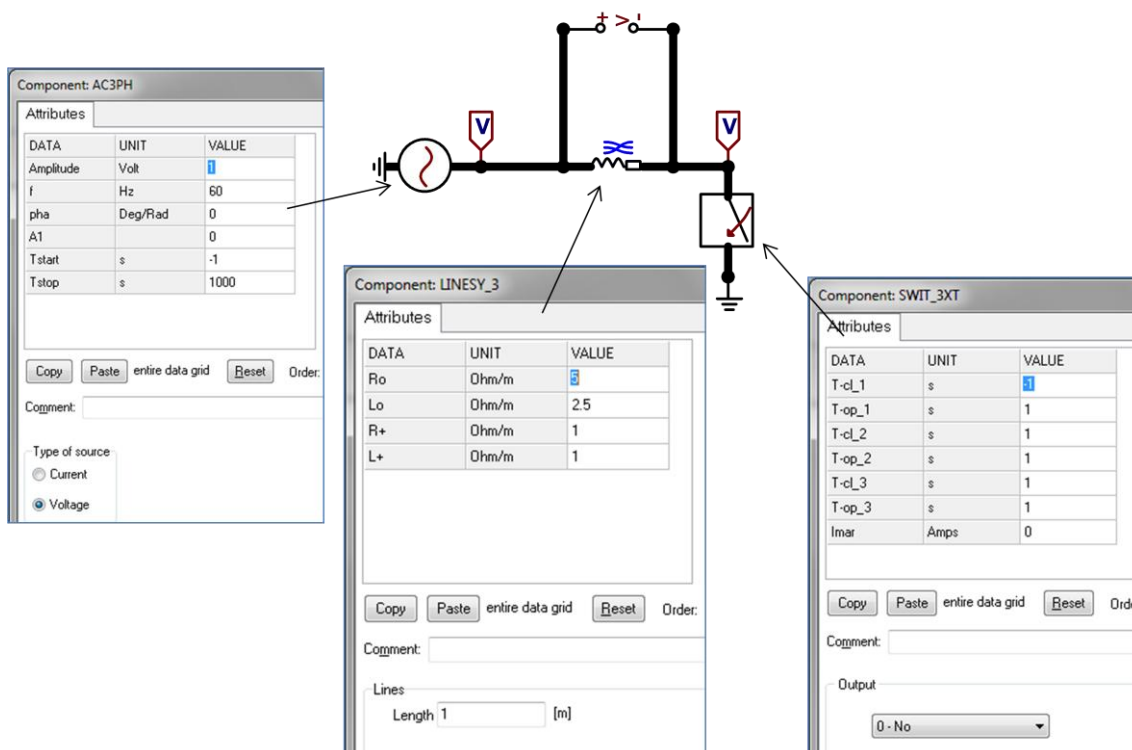


Figura 7.6 Montaje en ATP para el evaluar factor de falla a tierra.

En la simulación se fijan los valores de $R1=X1=1.0$, es decir se va a verificar los valores de factor de falla a tierra dados en la Figura 7.4. Se varían $R0$ y $X0$ desde 0 hasta 8, para varias combinaciones de estas dos impedancias. En la Figura 7 se observa un resultado para $R0=5$ y $X0=2.5$. Realizar la verificación mediante cálculo por componentes simétricas de al menos un caso.

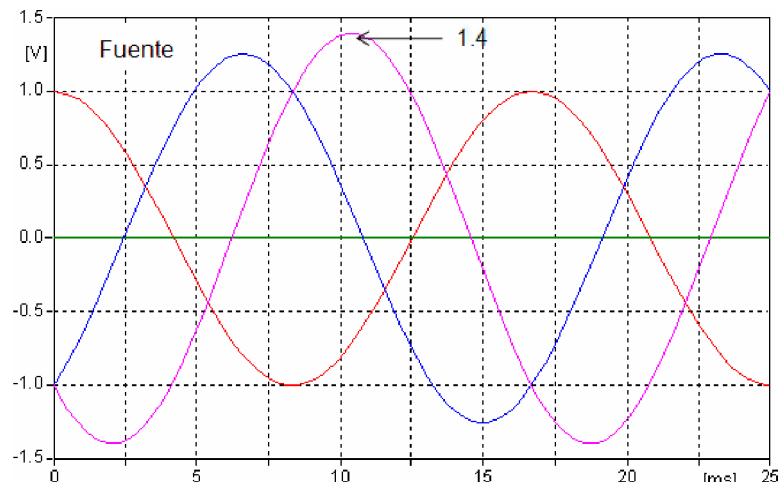


Figura 7.7 Sobrevoltajes para calcular factor de falla a tierra.

7.3 SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN TÍPICO PARA ESTUDIO DE SOBRETENSIONES TEMPORALES

Para esta práctica se va analizar un sistema típico de distribución en una subestación con niveles de voltaje de 110, 44 y 13.2 kV tal como se observa en la Figura 7.8.

Este sistema está constituido por una red de 44 kV y una red de 13.2 kV, tal como se ilustra en el siguiente diagrama unifilar.

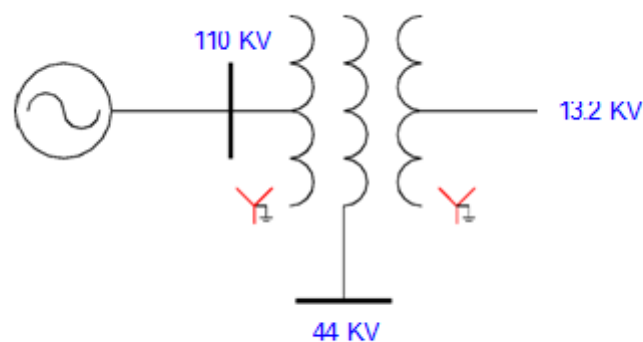


Figura 7.8 Diagrama unifilar de sistema de distribución

7.3.1 Datos de los elementos de red.

Para realizar la simulación se dispone de la siguiente librería

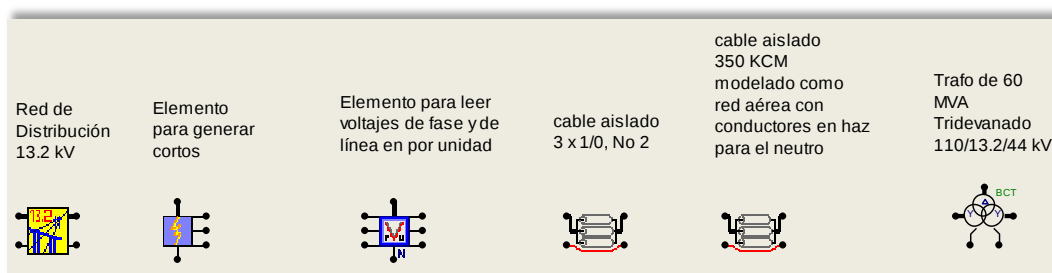


Figura 7.9 Librería para simulación del sistema de de potencia

La fuente se encuentra en la barra de 110 kV.

Equivalente de cortocircuito en la barra de 110 kV

Voltaje de prefalla = 112.08 kV

Voltaje base = 110 kV

Potencia base = 100 MVA

$Z_1 = 0.46 + j4.611 \, \Omega$

$Z_0 = 0.7838 + j7.538 \, \Omega$

Transformador de potencia

60/20/60 MVA

110/44/13.2 kV

$Z_{AB} = 17.5\%$ (Base 60 MVA)

$Z_{AM} = 10.12\%$ (Base 20 MVA)

$Z_{MB} = 2.99\%$ (Base 20 MVA)

Cable aislado 350 KCM para salida de circuito de 13.2 kV

El cable como una buena aproximación para estudios de fallas se puede simular como un equivalente de línea aérea con fases en haz de conductores.

Características del conductor de fase del cable 350 KCM

Resistencia AC del conductor a 20 °C: 0.102 Ω /km

Coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura: 0.00393 1/°C

Temperatura de trabajo del conductor: 90 °C

Diámetro del conductor: 15.9 mm

Longitud: 1000 m

Características del neutro concéntrico del cable 350 KCM

Número de hilos: 18

Resistencia AC de cada hilo a 20 °C: 5.27 Ω /km

Diámetro de cada hilo: 2.05 mm

Temperatura de trabajo del neutro concéntrico: 80 °C

Radio de la circunferencia que pasa por el centro de los hilos: 16.775 mm.

Resistividad del terreno: 100 Ω *m

Distancia entre conductores de fase: 42.2 mm (disposición delta)

Red aérea desnuda de 13.2 kV

Conductor de fase: Tipo = Penguin (4/0 ACSR) Rdc

(50 °C) = 0.2979 Ω /km Rac (50 °C) = 0.3616

Diámetro = 14.31 mm

Conductor neutro: Tipo = Raven (1/0 ACSR) superior Rdc (50

°C) = 0.5091 Ω /km

Rac (50 °C) = 0.6031 Ω /km Diámetro = 10.11 mm

Resistividad del terreno = 150 Ω *m

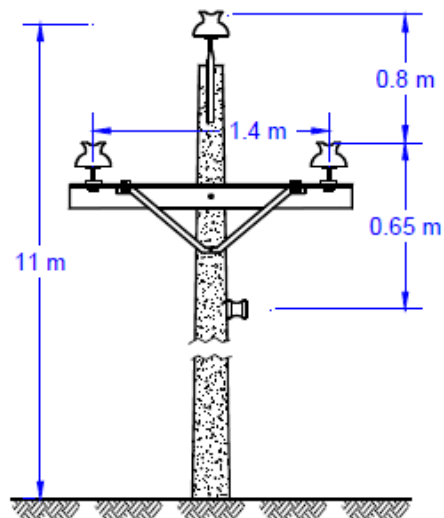


Figura 7.10 Configuración de estructura de 13.2 kV neutro inferior

Red aérea de 44 kV

Suponer los mismos conductores de fase y de neutro utilizados en 13.2 kV

Resistividad del terreno = $100 \Omega \cdot m$.

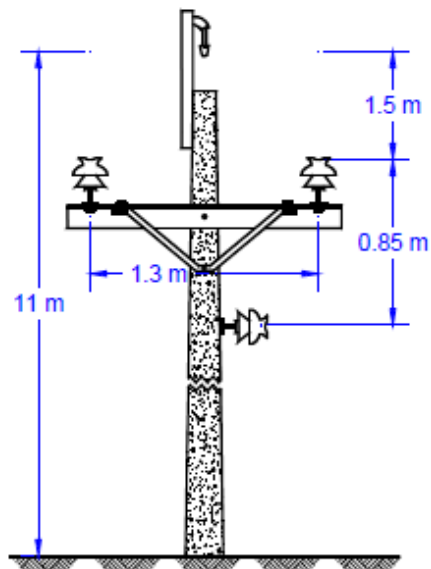


Figura 7.11. Configuración red de 44 kV

El sistema de 44 kV es en delta aislado y el de 13.2 kV, como el de 110 kV están en estrella sólidamente aterrizados en la subestación y en cada estructura. Los circuitos tienen cada uno una distancia de 10 km en red aérea.

Suponer aterrizamientos cada 500 m de 25 Ohmios en la red de 13.2 kV en la red de 44 kV.

7.3.2 Calcular y simular

- Para una falla monofásica en la barra de 13.2 kV, calcular y simular para obtener el factor de falla a tierra. Observar los voltajes de línea y de fase en la barra de 44 kV. Verificar de acuerdo a las curvas de la IEC 71-2 para factores de falla a tierra.
- Para falla monofásica a la salida del cable aislado calcular y simular para obtener el factor de falla a tierra. Determinar también mediante las curvas de la norma IEC.
- Correr la falla a lo largo del circuito de 13.2 kV y mediante simulación determinar cómo varía el factor de falla a tierra en función de la longitud de red desde la subestación. Expresarlo gráficamente.
- Determinar el punto para una falla en el circuito de 13.2 kV donde se produzca una caída en el voltaje de línea en la barra de 44 kV del 10%.
- ¿Cómo varía este voltaje de línea en 44 kV a medida que se corre la falla en el circuito de 13.2 kV?
- Si se presenta una falla monofásica en la red de 44 kV, calcular los sobrevoltajes que aparecerían en la red de 44 kV y en la de 13.2 kV, Explicar las razones. Calcular el factor de falla a tierra. Tener presente que el devanado de 44 kV está en delta aislada.
- La red de 44 kV se aterriza a través de un transformador zigzag de 864 kVA, 2.3% de impedancia de secuencia cero y 57Ω de resistencia de puesta a tierra. Determinar el factor de falla a tierra para varios puntos de falla en la red de 44 kV.

8. EL PARARRAYOS (DPS) COMO ELEMENTO DE PROTECCIÓN FRENTE A SOBREVOLTAJES

Una red eléctrica se debe proteger adecuadamente frente a todo tipo de sobrevoltajes, de manera que pueda operar con confiabilidad y se ofrezca seguridad a los equipos frente a eventuales esfuerzos de sobrevoltajes de origen interno y externo.

8.1 Características físicas del DPS

¿Qué es un DPS?

Es un dispositivo diseñado para limitar las sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas y por acciones de maniobra de líneas de transmisión.

¿Cómo limitan los sobrevoltajes?

En condiciones normales tiene una impedancia muy elevada y solo fluye una pequeña corriente del orden de 1 ma. En presencia de una sobretensión, la impedancia cambia de un valor elevado a un valor muy bajo, descargando una corriente a tierra.

El producto de la corriente nominal de descarga por la impedancia (no lineal) = voltaje residual, llamado nivel de protección, que es el valor al cual se limita la sobretensión.

¿Qué importancia tiene limitar las sobretensiones?

Se puede reducir el aislamiento de los transformadores de potencia y con ello reducir al máximo la probabilidad de falla del transformador. Además se aumenta la confiabilidad de la red. Esto es importante desde el punto de vista económico y de confiabilidad del sistema.

Descripción general del DPS.



Figura 8.1. Algunas formas de pararrayos

El pararrayo de SiC tiene resistencias no lineales de carburo de silicio en serie con los explosores metálicos, ambos dentro de una porcelana cilíndrica hueca y con tapas o bridas en ambos extremos de la porcelana.

En la foto se observa uno del tipo de Carburo de Silicio tipo estación.

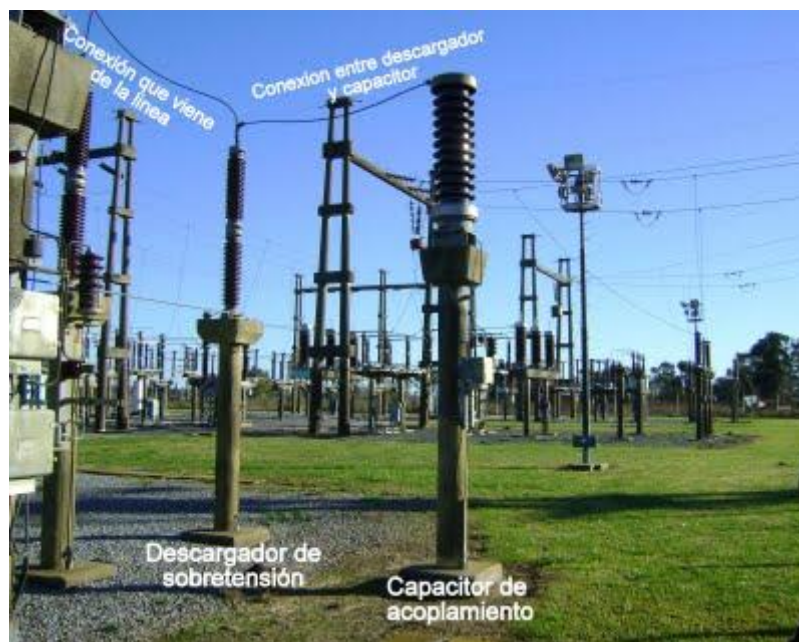


Figura 8.2. Pararrayos de SiC en subestación

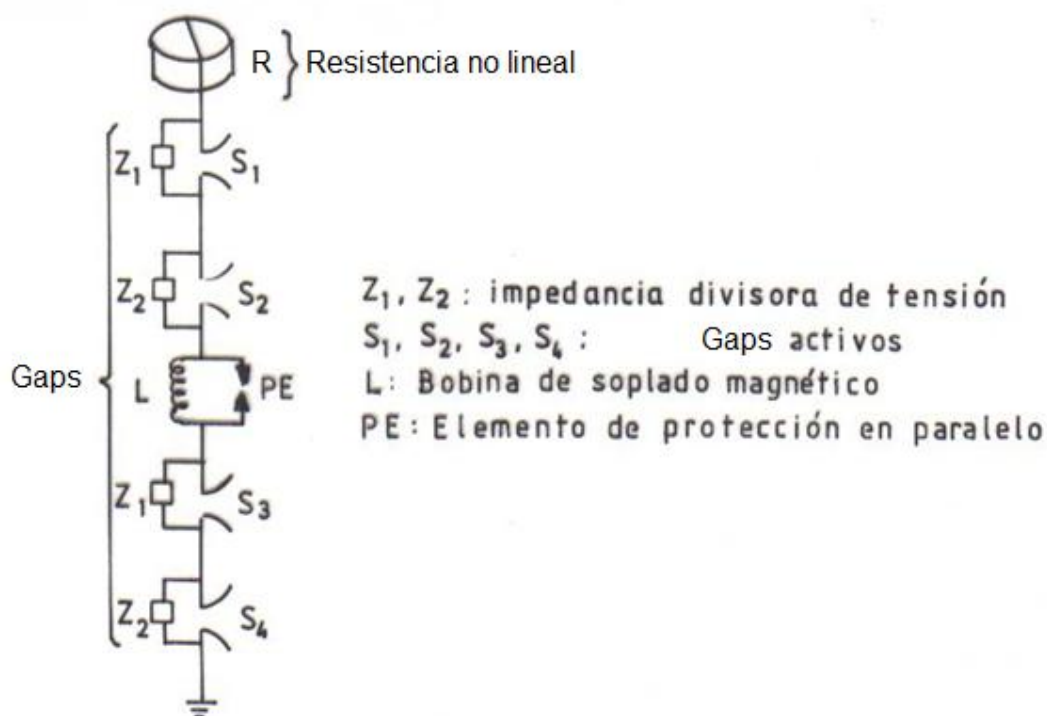


Figura 8.3 Composición de una pararrayos de SiC.

El pararrayo de ZnO tiene resistencias no lineales de óxidos metálicos, principalmente, el óxido de zinc y no tiene explosores.

Los varistores (resistor variable) están dentro de una envoltura que puede ser de porcelana o polimérica, la cual está sellada en ambos extremos por tapas o bridas.

El pararrayos de SiC es de una tecnología vieja que fue la solución hasta los años 80. Para la época ya no es recomendable utilizarlo. La CREG en Resolución No. 098 (Diciembre 11 de 2000) en el numeral 2.4 referente al tema de aislamiento, dice: ***“No se permite el uso de pararrayos de carburo silicio en ningún punto como protección de las nuevas líneas de transmisión”***. Con lo anterior queda prohibido el uso de pararrayos de SiC en Colombia.

Diferencias entre los pararrayos de sic y los de zno.

Los problemas que existían con los explosores serie, ya no se tienen en los de ZnO. La construcción de los de ZnO es más simple y como tiene menos piezas, la confiabilidad es mayor. Lo anterior, establece diferencias constructivas entre los dos tipos de fabricación.

La diferencia en las características de los materiales (SiC y ZnO) es significativa: Los discos o bloques hechos de ZnO tienen una característica no lineal muy superior a los de SiC. Debido a esta característica, los pararrayos de ZnO no requieren los explosores.

La característica no lineal del ZnO, permite lograr niveles de protección mejores que los de SiC.

Los pararrayos de ZnO, tienen mayor capacidad de absorción de energía, lo cual permite realizar la protección contra sobretensiones de maniobra, esto no era posible con los de SiC.

8.2 Características técnicas de un DPS típico de distribución.

$V_{\text{nominal}} = 10 \text{ kV}$

$\text{MCOV} = 8.4 \text{ kV}$

Corriente nominal = 10 kA

La característica voltaje vs corriente del pararrayos es la siguiente:

Tabla 1. Curva Voltaje-Corriente del DPS

I (kA)	V (kV)
1.5	26
3	28
5	29.5
10	32
20	37.5
40	43.5

La anterior característica la realiza el fabricante a una onda determinada de impulso, normalmente una onda 8/20 μs .

Tabla 2. Capacidad de sobrevoltaje temporal (TOV) del DPS

Duración en segundos	Voltaje en pu del MCOV	Voltaje en kV
0.02	1.77	14.87
0.1	1.68	14.11
1.0	1.58	13.27
10	1.50	12.60
100	1.46	12.26
1000	1.40	11.76

8.3 Simulaciones

8.3.1 Prueba del modelo del pararrayos a baja frecuencia

Con el fin de familiarizarse con los modelos de pararrayos que dispone el ATP se va a utilizar el modelo 92. Este modelo aproxima la curva tensión-corriente del pararrayos a una curva de segmentos exponenciales consecutivos que empatan uno con otro de acuerdo a la siguiente expresión:

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q$$

De acuerdo a la precisión escogida el Atpdraw determina el número de segmentos exponenciales. De acuerdo a la experiencia para una precisión del 5% el programa determina dos (2) segmentos exponenciales en la mayoría de los pararrayos.

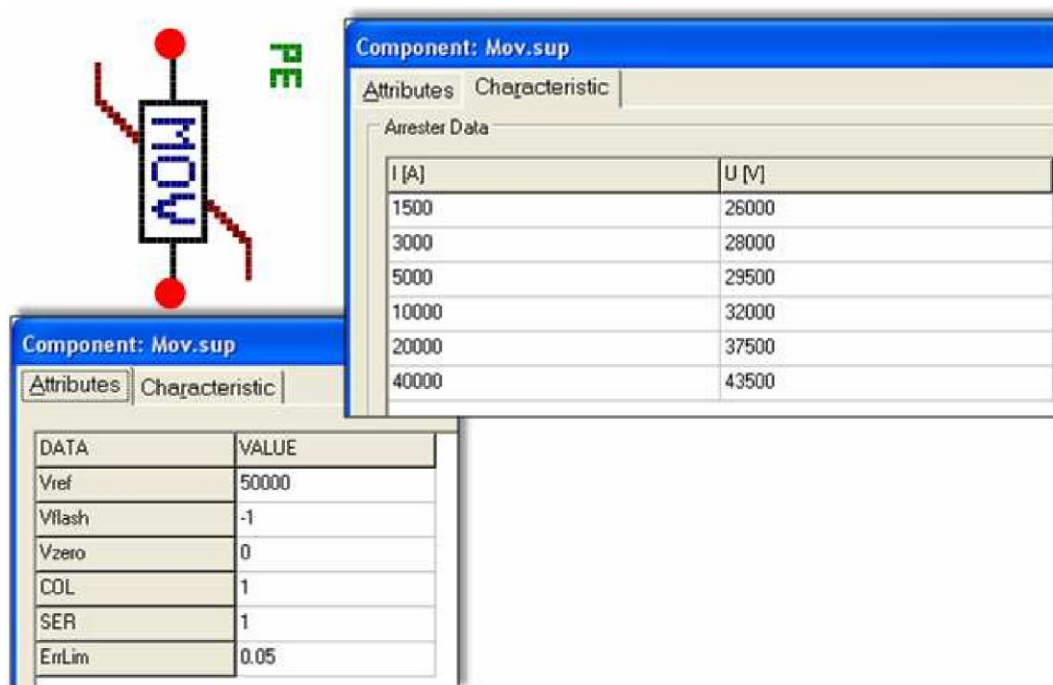


Figura 8.4 Modelo 92 para el DPS.

Este modelo tiene dos ventanas de datos de acuerdo a la figura 8.4. Una primera ventana corresponde a los datos generales.

Para hacer la prueba del pararrayos se puede hacer el siguiente montaje de la figura 8.5, para verificar su correcta operación. La resistencia es para limitar la corriente. El voltaje que se debe asignar a la fuente debe ser suficiente para hacer que el pararrayos actúe, es decir que mínimo se debe llevar al voltaje residual.

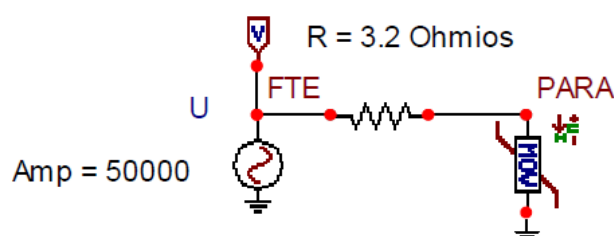


Figura 8.5 Circuito para prueba del Modelo 92 del pararrayos

Para un error del 5% se genera el siguiente modelo de pararrayos. Ver figura 8.6.

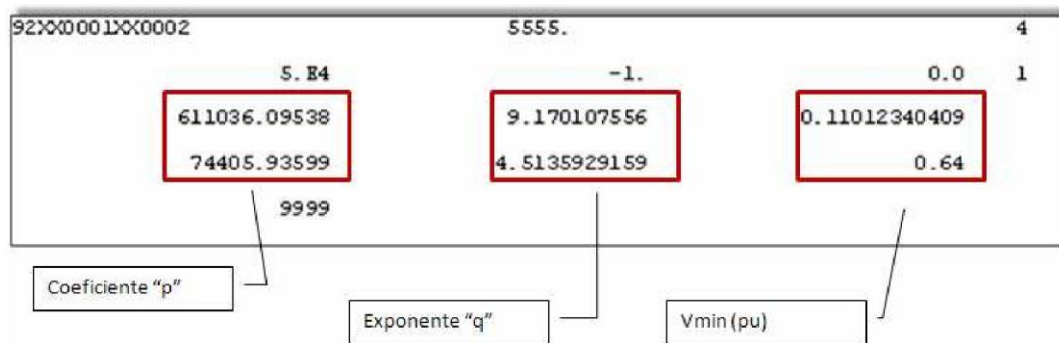


Figura 8.6. Modelo 92 para el pararrayos

Los resultados que se obtienen se observan en las figura 8.7 y 8.8.

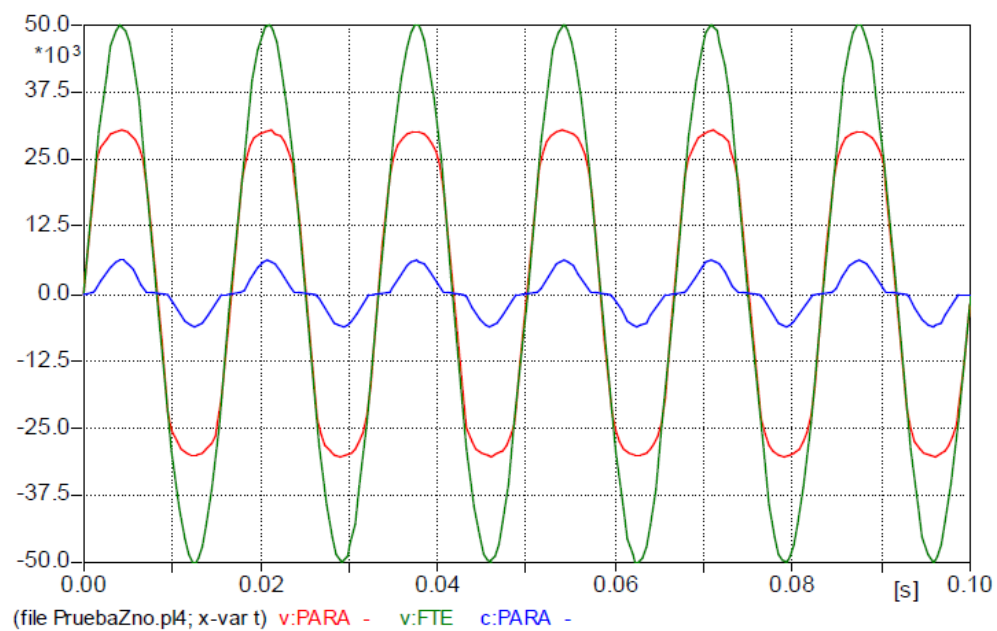


Figura 8.7 Resultados prueba a baja frecuencia del Modelo 92

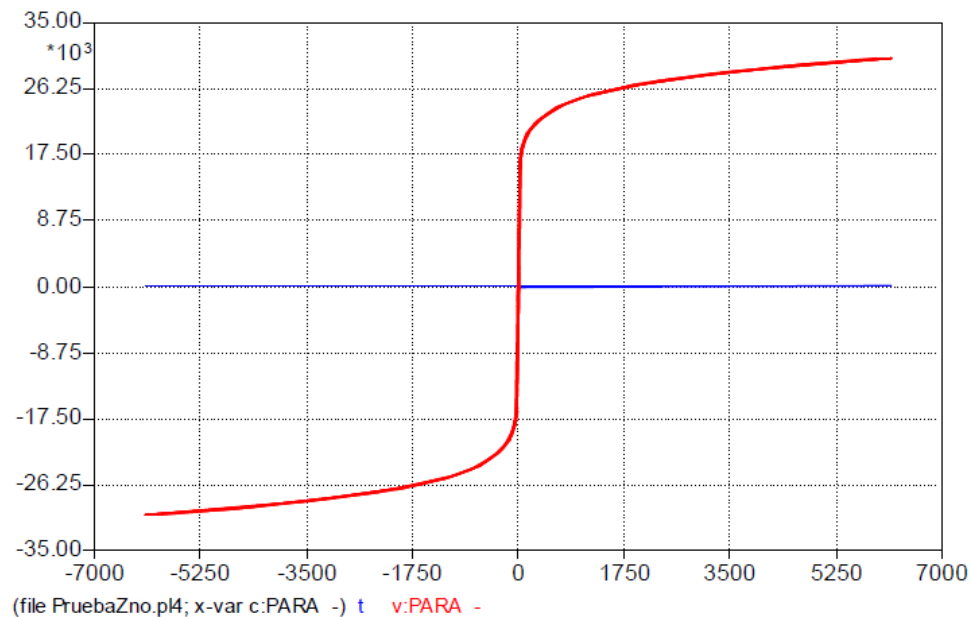


Figura 8.8 Resultados V vs I a baja frecuencia del Modelo 92

8.3.2 Verificación de disipación de energía en el DPS

Para la misma simulación de la figura 8.5, variar la fuente de acuerdo a los valores indicados del TOV de la tabla 2. Para este caso asignar un valor de resistencia limitadora de 1.0Ω . Verificar en cada caso la disipación de energía en el DPS.

La energía máxima que puede disipar este tipo de DPS está alrededor de 25000 J (25 kJ). ¿Cómo se explica que puntos de la curva del TOV con tiempos largos (>10 s) el DPS esté por encima de la disipación máxima permitida?

8.3.3 Prueba del modelo del DPS a alta frecuencia

Para esta prueba se va a considerar el circuito de la figura 8.9 donde la fuente de excitación es una función impulso de corriente de 10 kA, 8/20 μ s. Investigar en qué consiste esta función impulso tipo Heidler.

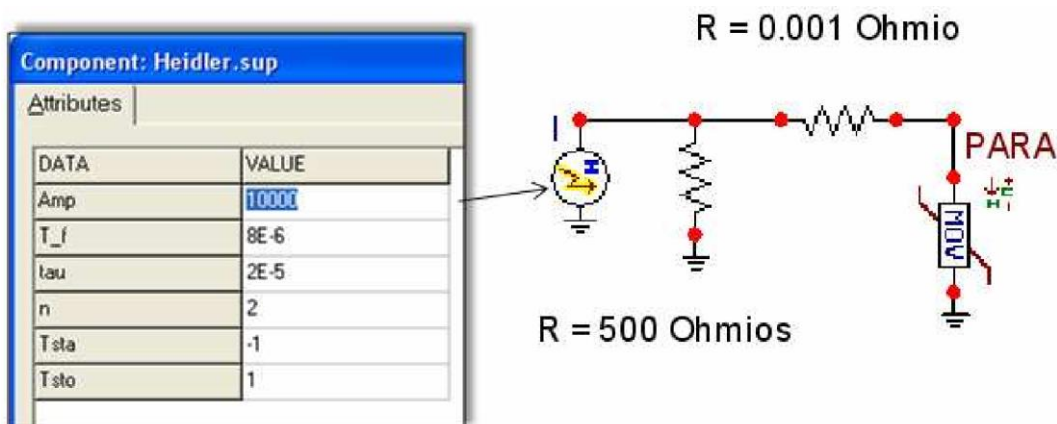


Figura 8.9 Prueba Modelo 92 para alta frecuencia

Observar las formas de onda de la corriente y el voltaje sobre el pararrayos.
¿Cuál tiene el frente más rápido y cuál es la razón de esta diferencia?

Investigar el porqué de la onda normalizada de corriente $8/20 \text{ } \mu\text{s}$. relacionándolo con el resultado obtenido en esta simulación.

8.3.4 Iniciación al estudio del efecto distancia en la protección con pararrayos.

Se va a considerar de acuerdo al esquema de la Figura 8.10, la situación donde el pararrayos se encuentra separado del equipo que se a proteger. Considerar distancias de cable de 10 a 25 metros ($1 \text{ } \mu\text{H/m}$). Para cada caso determinar la diferencia de voltajes entre el pararrayos y el equipo protegido. Variar la pendiente de rayo, la magnitud de la sobretensión y determinar la dependencia del voltaje en la carga con respecto a estos dos parámetros.

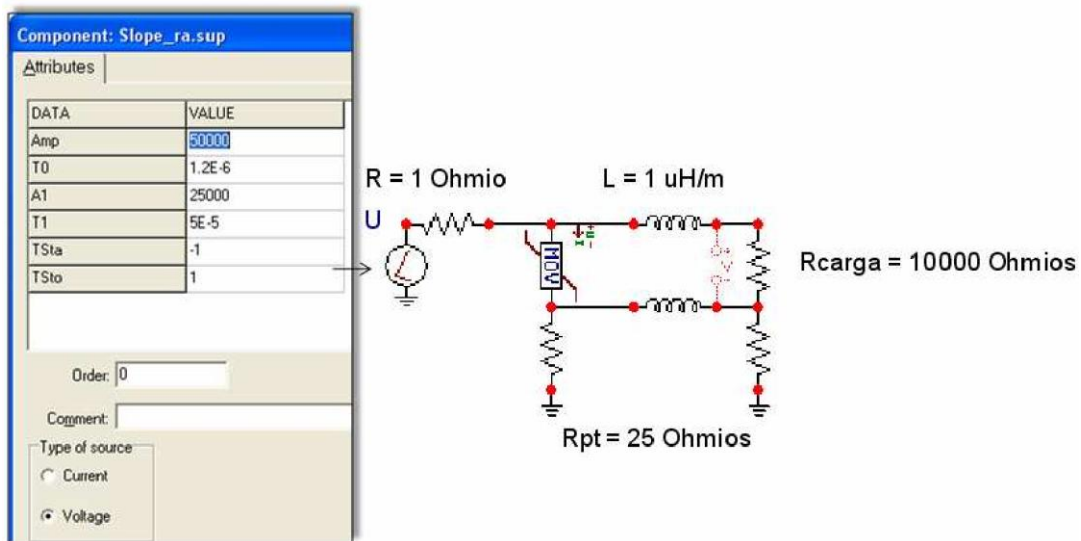


Figura 8.10 Efecto distancia

8.4 Investigar

8.4.1 Normas de protección de transformadores frente a sobrevoltajes de diferentes empresas de energía en Colombia (al menos dos empresas). El foco de la norma es la ubicación del DPS con respecto al equipo a proteger.

8.4.2 Investigar normas de protección de reconectadores en empresas de energía en Colombia (al menos una)

9. APLICACIÓN DE DPS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN RURAL CON ALTO NIVEL CERAUNICO

Los DPS se inventaron para proteger los equipos frente a los efectos de las descargas atmosféricas, ya que las sobretensiones que estas ocasionan, harían inviable la utilización de equipos con un nivel de aislamiento que soporten todo tipo de sobretensiones.

El valor de la puesta a tierra va a ser determinante en la vida útil que tenga el DPS y el nivel energético a que estará sometido este depende en buena medida de que la puesta a tierra sea reducida. La pregunta entonces es que tan reducida debe ser y que sea económico su implementación.

9.1 Características del sistema a simular

Un sistema de distribución o de transmisión normalmente no tiene DPS de línea. Para el caso de distribución los DPS se ubican para proteger equipos como transformadores de distribución o cables aislados en las acometidas primarias. En la figura 9.1 se observa la aplicación convencional como protección de un transformador de distribución.

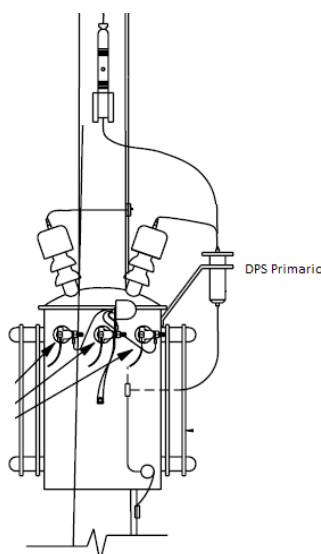


Figura 9.1 DPS en transformador distribución

El sistema a trabajar en éste módulo es una red de distribución de 13.2 kV en el sector rural, donde se asume que está expuesta y sin apantallamiento natural frente a las descargas atmosféricas. La configuración de la estructura es de neutro superior porque se considera que este apantallamiento ayuda en la vida útil del pararrayos.

El sistema tiene las siguientes características:

Red de distribución

Calibre de conductores de fase = 3 N0 266.8 KCM ACSR – Waxwing

Rdc fase a 20 °C = 0.217 Ω /km

Temperatura de trabajo = 50 °C

Coefficiente de variación de resistencia con la temperatura = 0.004024 1/°C

Diámetro conductor fase = 15.47 mm

Calibre de conductor de neutro = 1 No 1/0 AWG – Raven

Rdc conductor de neutro a 20 °C = 0.538 Ω /km

Temperatura de trabajo del conductor de neutro = 20 °C

Diámetro neutro = 10.11 mm

Separación entre puestas a tierra = 300 m

Resistividad promedio del terreno = 300 Ω *m

Características del DPS

Vnominal = 10 kV

MCOV = 8.4 kV

Corriente nominal = 10 kA

Voltaje residual = 32 kV

La característica voltaje vs corriente del DPS es la siguiente:

I (kA)	V (kV)
1.5	26
3	28
5	29.5
10	32
20	37.5
40	43.5

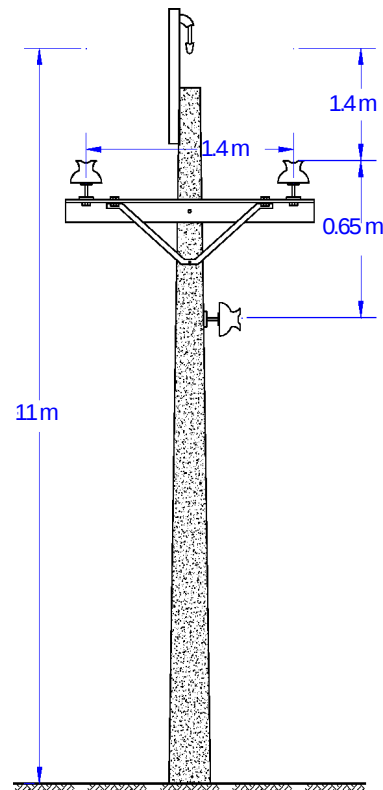


Figura 9.2 Configuración estructura 13.2 Kv

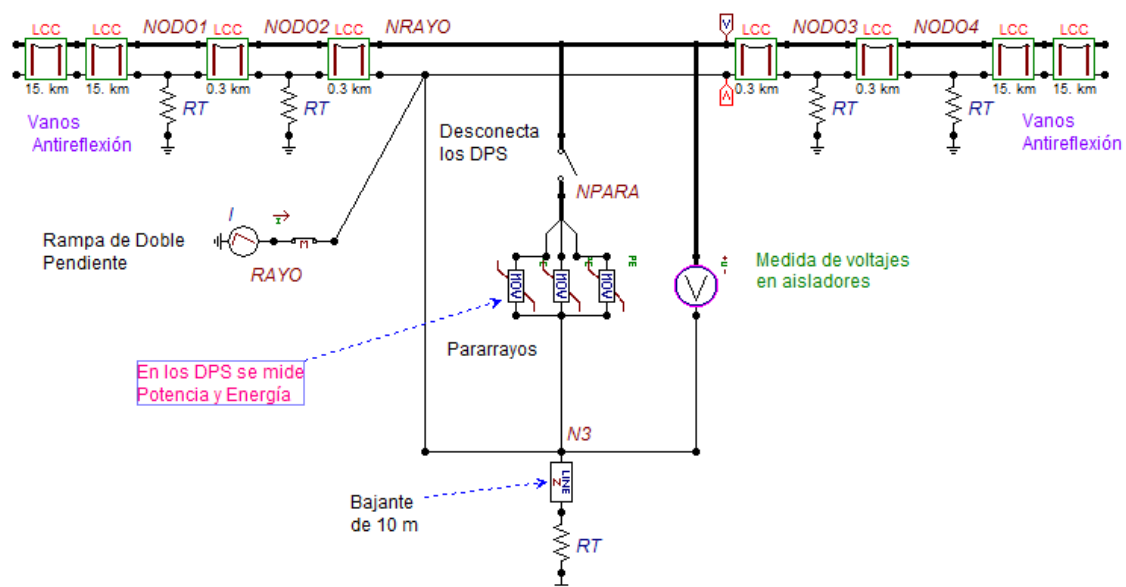


Figura 9.3 Diagrama eléctrico del sistema a simular en Atpdraw.

Se consideran dos vanos de red a ambos lados del poste impactado por el rayo, cada uno de 300 m. Los vanos extremos son antirreflexión para simular línea infinita. Para el caso se consideró tramos de 15 km.

9.2 Sistema sin DPS

Determinar las sobretensiones sobre el aislamiento para diferentes corrientes de rayo. Determinar la corriente crítica a partir de la cual el BIL de aislador es superado (Suponer un BIL de 100 kV). Observar los voltajes que se inducen en las fases no impactadas por el rayo. Observar la diferencia entre las sobretensiones sobre el aislamiento para descarga en el neutro y descarga en la fase.

Algunos resultados esperados (Para estos casos se recomienda un $T_{\text{máx}}$ de 20 μs y Δt de $1\text{e-}8$ s)

Para una corriente de rayo de 30 kA y resistencia de puesta a tierra de 50 Ω , los voltajes que aparecen en los aisladores serían los siguientes:

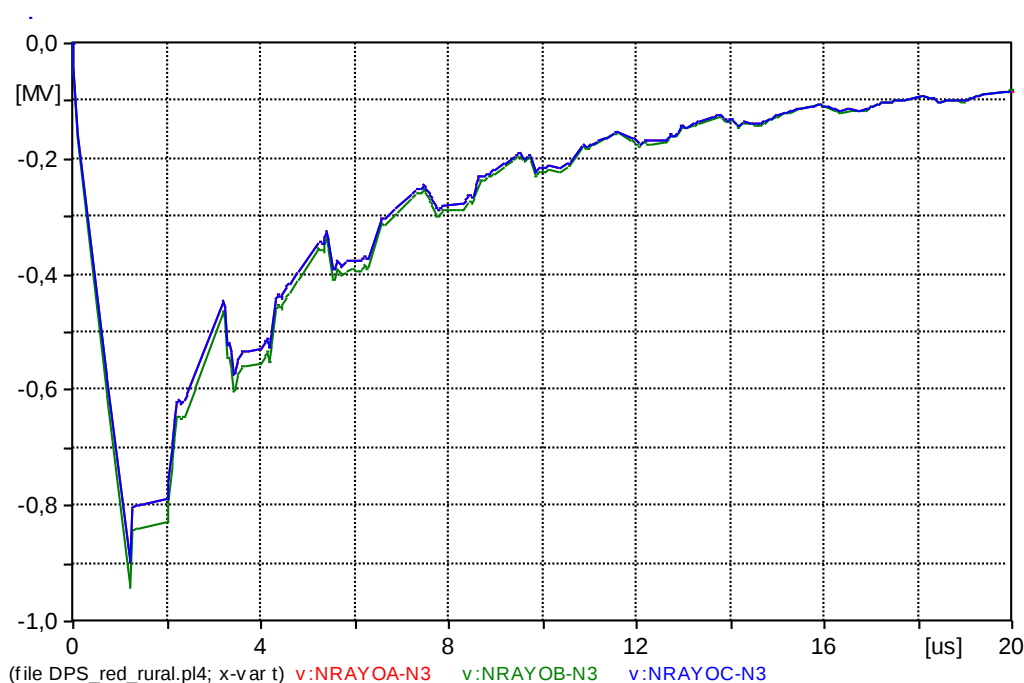


Figura 9.4 Voltajes sobre los aisladores sin DPS.

Para una corriente de rayo de 30 kA y resistencia de puesta a tierra de 50 Ω , los voltajes que aparecen en el neutro y en las fases con respecto a tierra serían los siguientes:

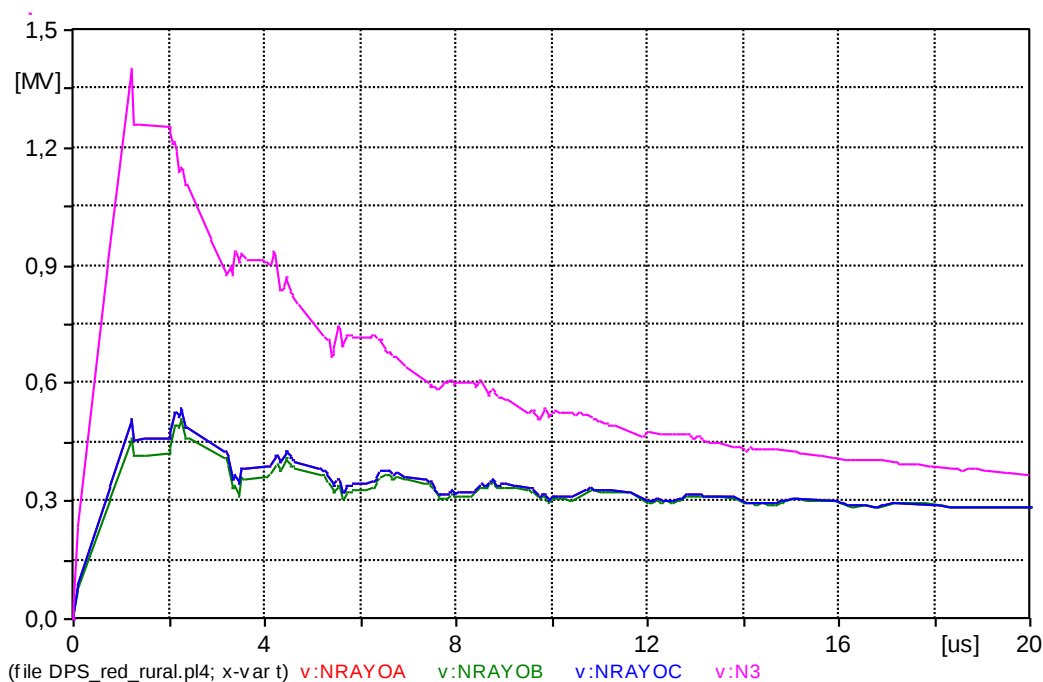


Figura 9.5 Voltajes en las fases y el neutro sin pararrayos

Para observar la diferencia entre las sobretensiones que se presentan sobre los aisladores por descarga en el neutro y en la fase, se recomienda considerar una resistencia baja de 25Ω , para que se vea el efecto.

9.3 Sistema con DPS

Determinar para una onda normalizada de rayo, los sobrevoltajes que se presentan sobre el aislamiento para descarga en el neutro y en la fase. Describir a partir de los resultados el concepto de equipotencialización.

Realizar sensibilidad con respecto a la corriente de rayo, valor de resistencia de puesta a tierra, tiempo de frente de onda.

Algunos resultados esperados (Para estos casos se recomienda un $T_{\text{máx}}$ de $20 \mu\text{s}$ y Δt de $1\text{e-}8 \text{ s}$)

Para una corriente de rayo de 30 kA y resistencia de puesta a tierra de 50Ω , los voltajes en las fases, neutro y aisladores son los siguientes:

En la primera gráfica aparecen los voltajes en las fases y en el neutro. En la segunda aparece el voltaje sobre el aislador.

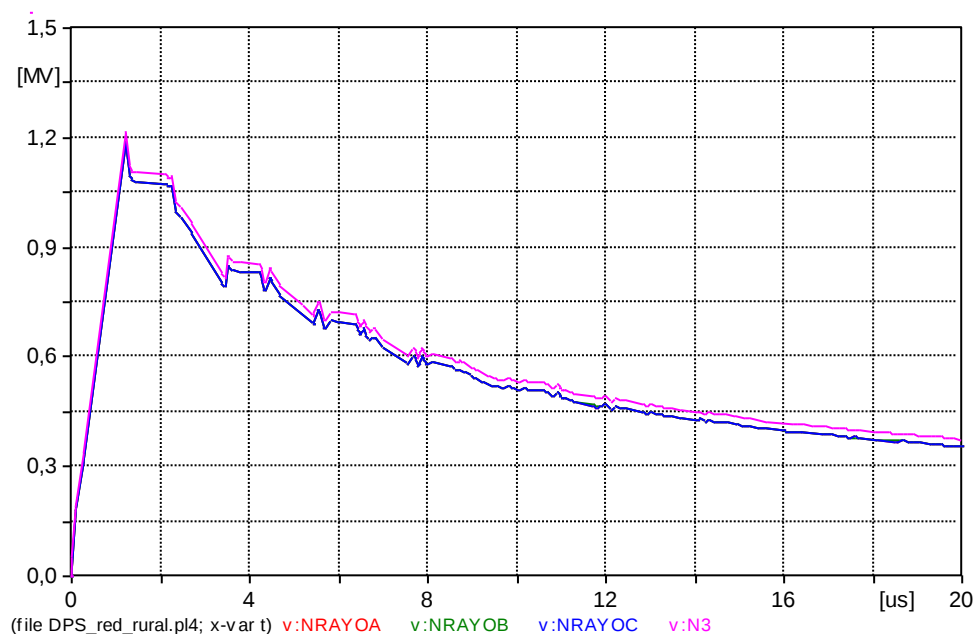


Figura 9.6 Voltajes en las fases y el neutro con pararrayos

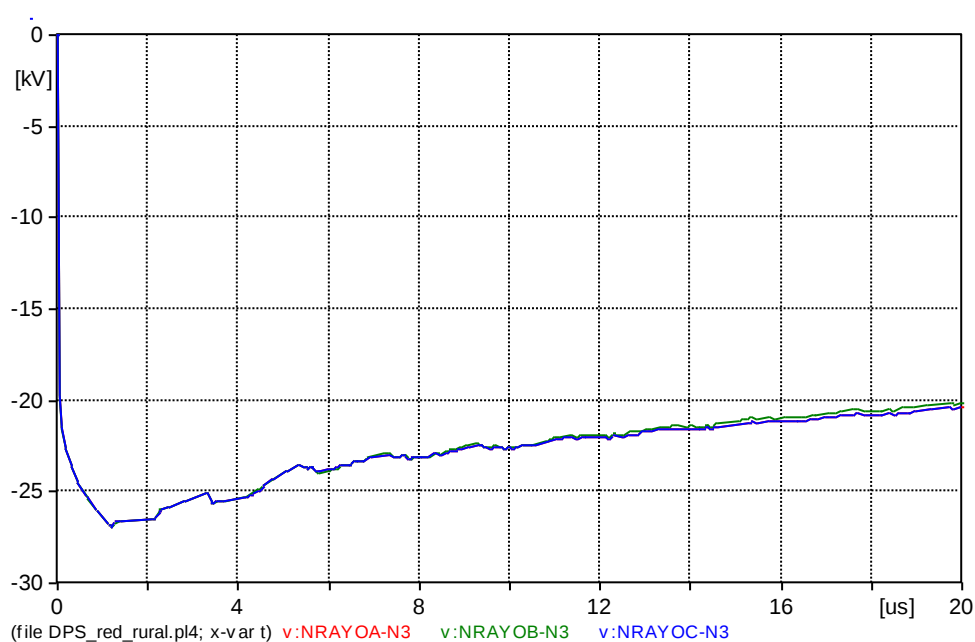


Figura 9.7 Voltajes sobre los aisladores con pararrayos

Para el caso con DPS realizar una lectura de los sobrevoltajes que se presentan en los aisladores a 300 m de la estructura impactada (donde están instalados los DPS). Ver figura 9.8.

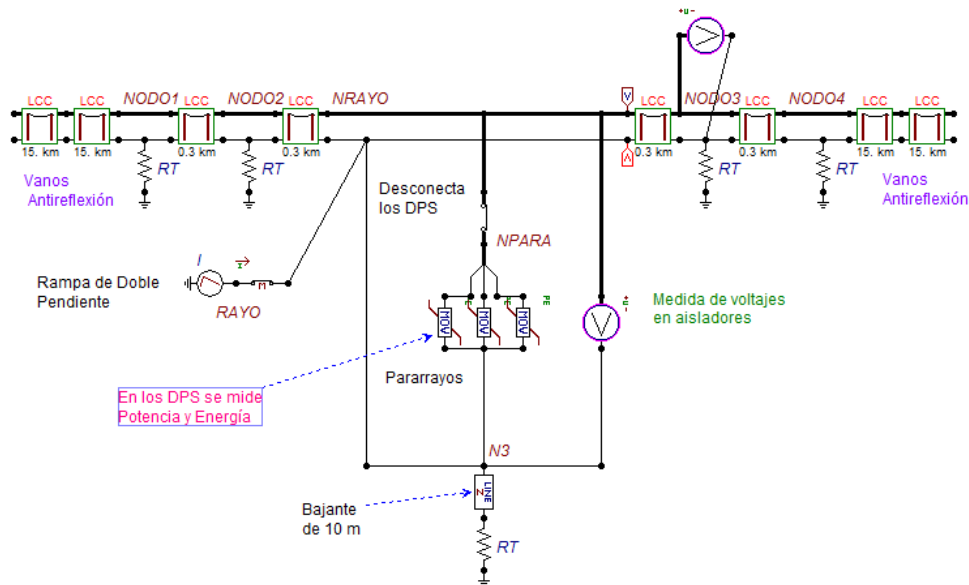


Figura 9.8 Lectura de voltaje en aislador cercano al impacto de rayo.

9.4 Curva de disipación de energía del DPS.

Obtener la curva de energía disipada en los pararrayos, en función de la corriente de rayo y teniendo como parámetro el valor de la resistencia de puesta a tierra.

Energía disipada por los pararrayos para una corriente de 100 kA y R_{pt} de 100 Ω (Aparece como A, pero en realidad son Joules, porque se solicitó potencia y energía sobre los pararrayos). Utilizar un tiempo de simulación de 200 μs .

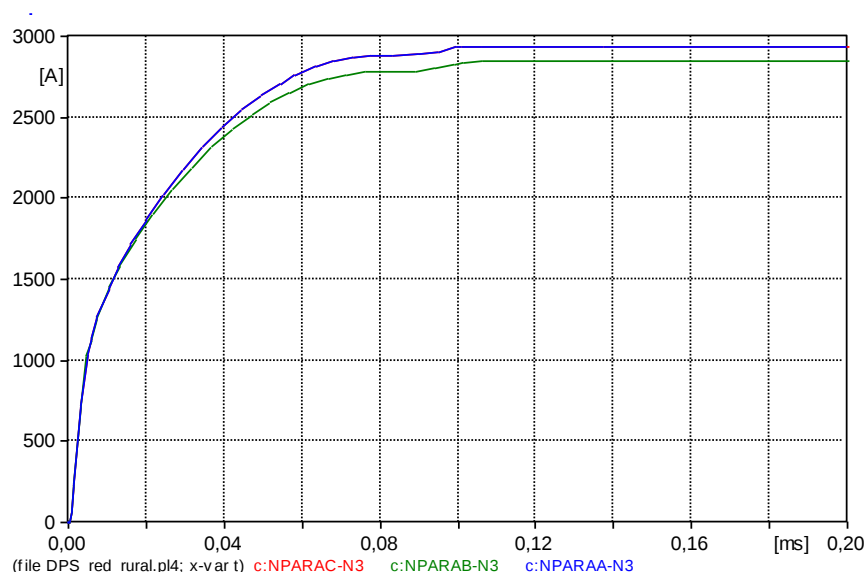


Figura 9.9 Energía disipada por los DPS.

La curva de disipación versus corriente de rayo, tiene la forma siguiente. Esta curva lógicamente hay que obtenerla externamente una vez hechas las simulaciones.

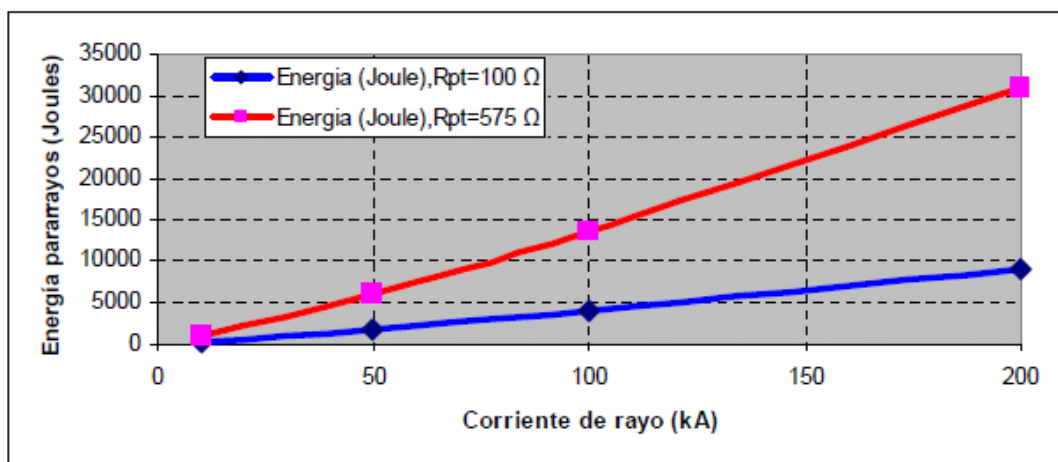


Figura 9. 10 Energía en DPS vs corriente de rayo

Obtener esta curva para resistencias de 20, 50, 300 y 1000 Ω de puesta a tierra.

9.5 Preguntas

- ¿Si la descarga cae en la fase sin pararrayos cuál es la probabilidad de que falle el aislamiento?. Considerar la expresión de la guía de la primera práctica.
- Con la presencia de pararrayos, si la descarga cae en la fase, cuál es la probabilidad de que se dañen los pararrayos para resistencias de puesta a tierra de 20, 50, 100 y 1000 ohmios?
- El ítem anterior pero descarga en el neutro.
- Para descarga en el neutro, para que valor de puesta a tierra, la probabilidad de daño del pararrayos del 1, 5 y 10%?
- De acuerdo al estándar IEEE 1410 proponga una separación máxima entre sitios de ubicación de pararrayos.

10 CONCEPTOS BÁSICOS DE SOBREVOLTAJE OCASIONADOS POR MANIOBRAS DETERMINÍSTICAS Y ESTADÍSTICAS EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

El objetivo es la caracterización determinística y estadística de los sobrevoltajes de tipo interno ocasionados por maniobra en líneas de alta tensión.

10.1 Datos del sistema

La configuración de torre corresponde a una línea típica de nivel de tensión de 500 kV, la cual es de circuito sencillo, configuración horizontal con conductores de fase en haz y dos cables de guarda, tal como se muestra en la figura 10.1. Los cables de guarda están aterrizados en cada estructura.

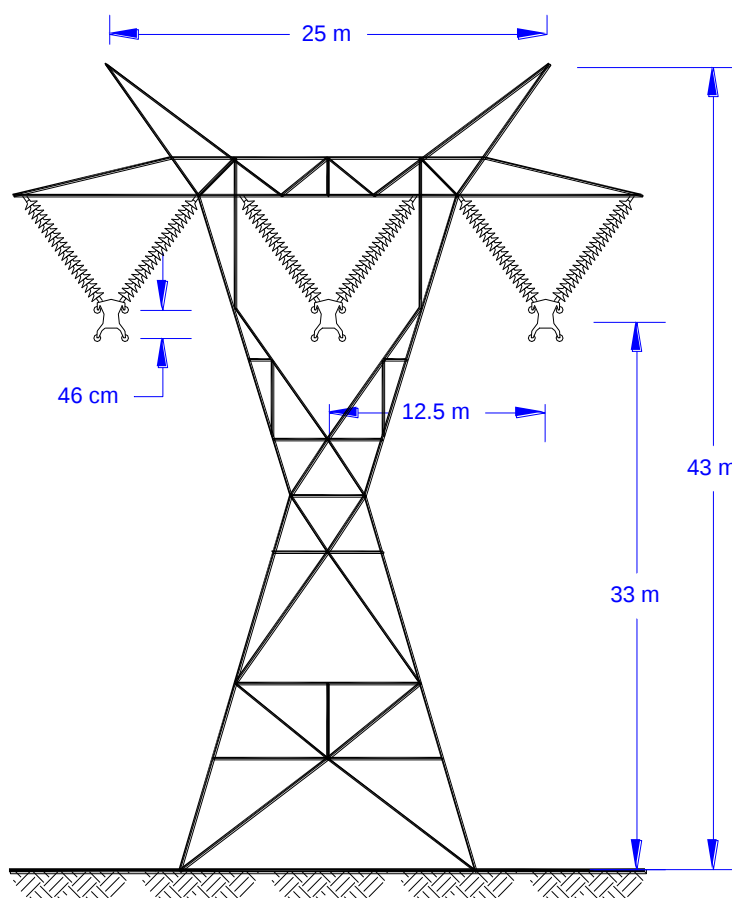


Figura 10.1 Estructura típica de 500 kV

Conductor $R_{dc} = 0.08912 \, \Omega/\text{km}$ (a 75°C)
 Diámetro = 25.17 mm
 Suponer conductor macizo

C. de G. $R_{dc} = 1.844 \, \Omega/\text{km}$ (A 20°C)
 Diámetro = 9.78 mm
 Conductor macizo

Longitud = 206 km

Resistividad del terreno = $200 \, \Omega\cdot\text{m}$

10.2 Simulaciones y análisis de resultados

- Energizar la línea en forma monopolar con una fuente ideal de voltaje trifásica, para identificar la frecuencia de oscilación de los sobrevoltajes. Considerar un valor de la fuente de $1.05 V_n$. El modelo a utilizar para la línea es el de onda viajera para línea transpuesta (Modelo de Clark). El programa Atpdraw lo identifica como el modelo Bergeron. La frecuencia del modelo se debe ajustar después de realizar la simulación al observar la verdadera frecuencia de oscilación. Una expresión aproximada para determinar la frecuencia (Freq. init) que se debe dar al modelo Bergerón es:

$$f = \frac{1}{4\tau}$$

Donde τ es el tiempo de viaje de la onda viajera. Investigar por qué la frecuencia de oscilación se puede determinar con la anterior expresión.

Expresando τ en función de la longitud de línea y velocidad de propagación:

$$f = \frac{v}{4d} = \frac{3 \times 10^5}{4 \times 206} = 364 \, \text{Hz}$$

Donde v se puede asumir como la velocidad de la luz como primera aproximación. Verificar la frecuencia real la oscilación del voltaje al final de la fase energizada, ya que la velocidad de la onda es un poco más lenta que la velocidad de la luz.

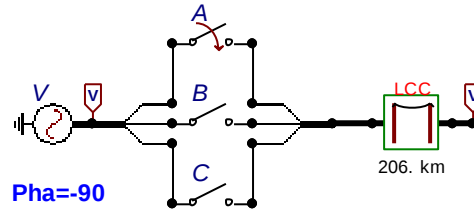


Figura 10.2. Esquema en Atpdraw para cierre monopolar

- Variando el tiempo de cierre del interruptor de la fase A y con cierre monopolar, determinar el tiempo de cierre donde aparece el mayor sobrevoltaje al final de la línea. Asignar un ángulo de -90° a la fase A, para energizar con una fuente senoidal.
- Considerar cierre tripolar instantáneo de los tres polos. Determinar el tiempo de cierre para el cual se genera el mayor sobrevoltaje, observando el voltaje más alto en cualquiera de las tres fases. Comparar este sobrevoltaje máximo con respecto al del ítem anterior y determinar la razón por la cual es mayor o menor.

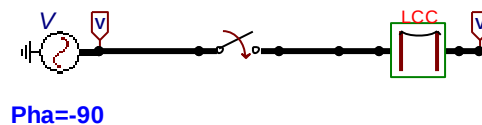


Figura 10.3 Esquema en Atpdraw para cierre tripolar

La figura 10.4 corresponde al resultado de un cierre tripolar en un tiempo de 4.17 ms. Es importante considerar un tiempo razonable para simulación. Un tiempo de 50 ms se considera razonable para observar perfectamente el máximo sobrevoltaje.

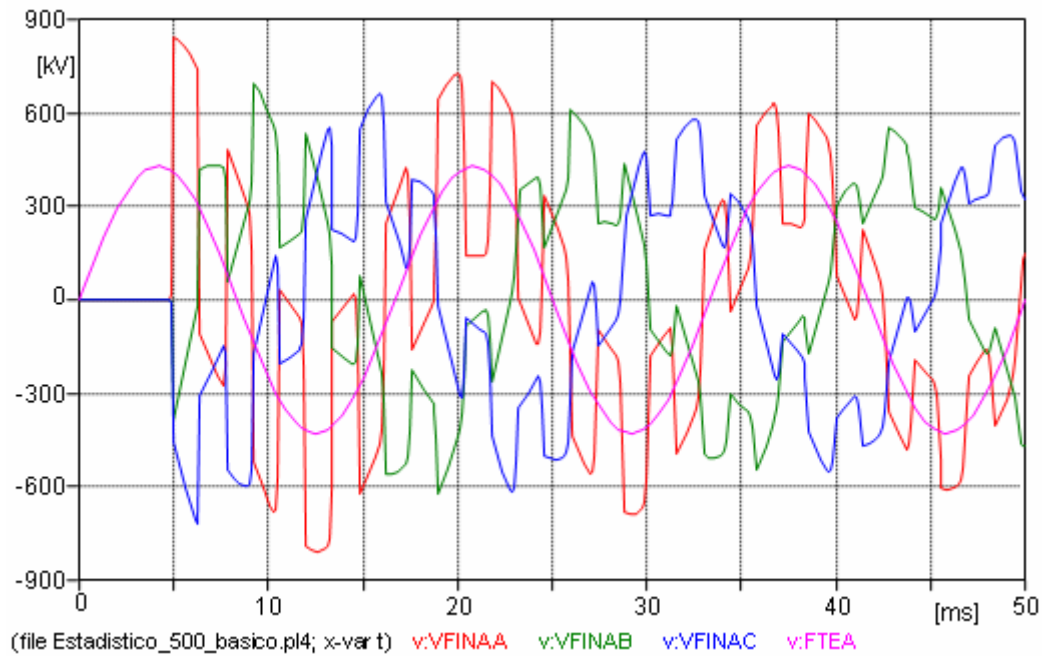


Figura 10.4 Voltajes al final de la línea para cierre tripolar

- Variar los tiempos de cierre de los interruptores entre 0 y 16 ms, con pasos de 2 ms. Empezar en la combinación $t=0, t=0, t=0$ y así establecer todas las combinaciones $((0,0,0),(2,0,0),(4,0,0)\dots(16,16,16))$. Como el número de combinaciones es muy grande ($9^3=729$), se deben realizar algunas combinaciones que considere de importancia de acuerdo con su criterio. Para estos casos se debe encontrar la peor situación de sobretensión. Se recomienda un tiempo de simulación de 60 ms y un delta de tiempo de 100 μ s.

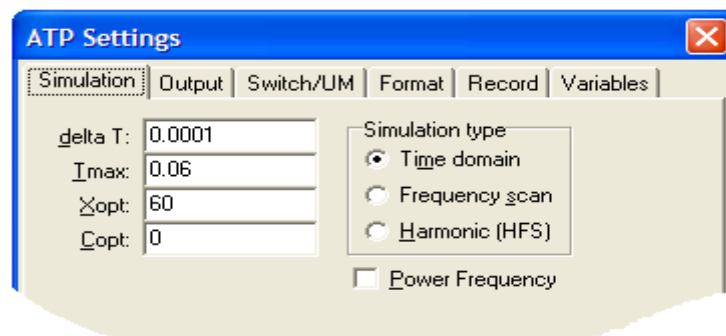


Figura 10.5. Atp Settings

- Utilizando el suiche “Sistemático” realizar de manera automática y completa la anterior simulación. Se recomiendan los mismos valores para el Tmax y Deltat. Determinar el sobrevoltaje mínimo, promedio y el más alto que se puede presentar. En el archivo *.lis aparece la tabla donde está el resumen estadístico de todas las simulaciones.

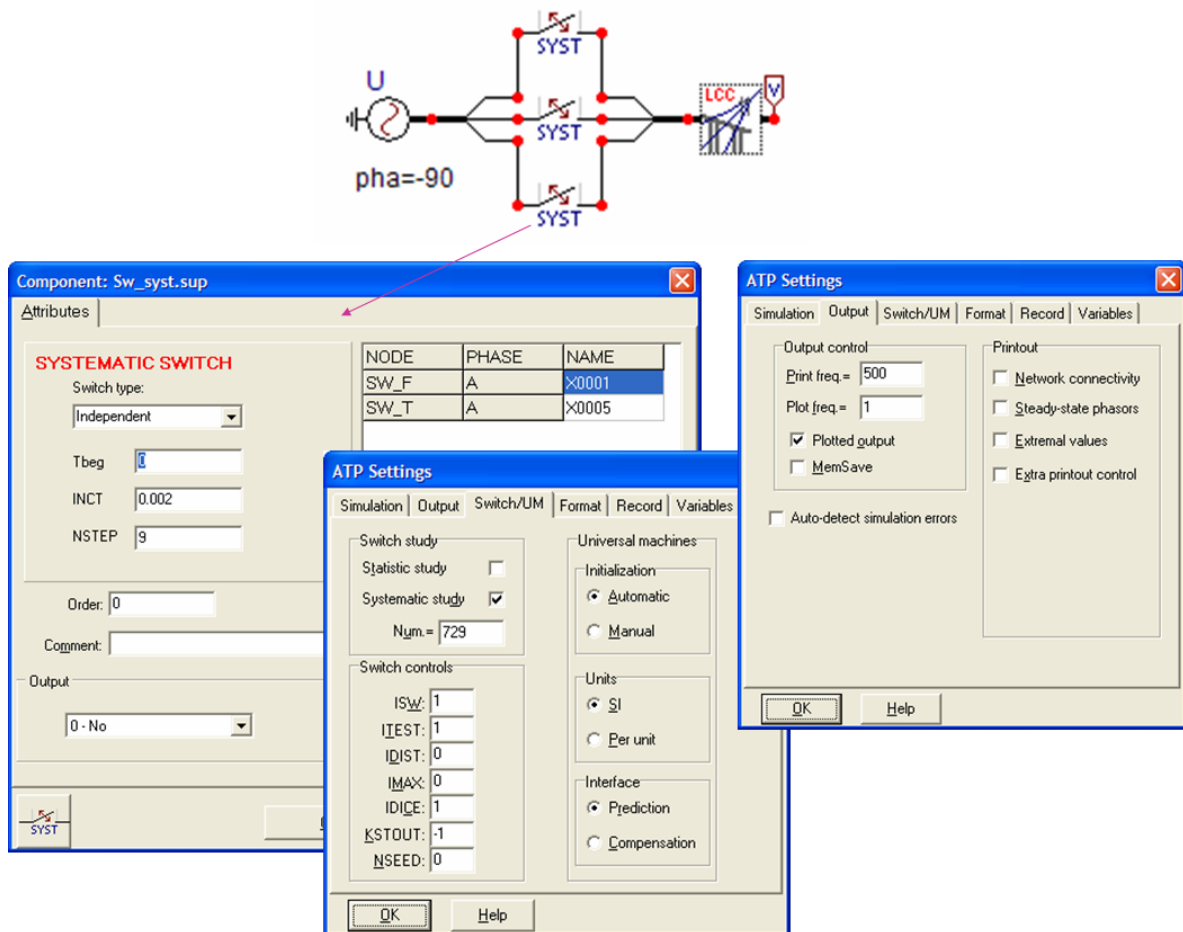


Figura 10.6 Utilización del suiche sistemático

La anterior simulación produce un resultado de la forma como que se observar en la siguiente tabla, para cada una de las fases. Para el análisis se debe seleccionar la fase donde ocurren los mayores sobrevoltajes.

Statistical distribution of peak voltage at node "X0003A". The base voltage for per unit printout is

Interval number	voltage in per unit	voltage in physical units	Frequency (density)	Cumulative frequency	Per cent
23	1.1500000	4.92969546E+05	0	0	100.000000
24	1.2000000	5.14403004E+05	3	3	99.588477
25	1.2500000	5.35836463E+05	6	9	98.765432
26	1.3000000	5.57269921E+05	17	26	96.433471
27	1.3500000	5.78703380E+05	19	45	93.827160
28	1.4000000	6.00136838E+05	14	59	91.906722
29	1.4500000	6.21570297E+05	14	73	89.986283
30	1.5000000	6.43003755E+05	12	85	88.340192
31	1.5500000	6.64437213E+05	17	102	86.008230
32	1.6000000	6.85870672E+05	19	121	83.401920
33	1.6500000	7.07304131E+05	24	145	80.109739
34	1.7000000	7.28737589E+05	26	171	76.543210
35	1.7500000	7.50171047E+05	44	215	70.507545
36	1.8000000	7.71604506E+05	70	285	60.905350
37	1.8500000	7.93037965E+05	86	371	49.108368
38	1.9000000	8.14471423E+05	54	425	41.708960
39	1.9500000	8.35904882E+05	42	467	35.939643
40	2.0000000	8.57338340E+05	56	523	28.257888
41	2.0500000	8.78771799E+05	32	555	23.868313
42	2.1000000	9.00205257E+05	54	609	16.460905
43	2.1500000	9.21638715E+05	42	651	10.699588
44	2.2000000	9.43072174E+05	21	672	7.818930
45	2.2500000	9.64505632E+05	10	682	6.447188
46	2.3000000	9.85939091E+05	16	698	4.252401
47	2.3500000	1.00737255E+06	4	702	3.703704
48	2.4000000	1.02880601E+06	7	709	2.743484
49	2.4500000	1.05023947E+06	9	718	1.508916
50	2.5000000	1.07167293E+06	3	721	1.097394
51	2.5500000	1.09310638E+06	6	727	.274348
52	2.6000000	1.11453984E+06	2	729	.000000

Summary of preceding table follows:

	Grouped data	Ungrouped data
Mean =	1.85010288E+00	1.85050188E+00
Variance =	7.36752985E-02	7.33890157E-02
Standard deviation =	2.71431941E-01	2.70904071E-01

Tabla 10.1. Resultado de los sobrevoltajes en la fase a

De la anterior tabla obtener los siguientes datos:

Identificar el rango de clase donde se presentan la mayor cantidad de sobrevoltajes. Calcular para este rango la probabilidad de que los sobrevoltajes estén en este rango.

Para la desviación estándar observada, determinar el significado físico de la misma y comprobar con los resultados de la tabla.

Sobrevoltajes con probabilidad de ser excedidos del 50%, del 10% y del 2%.

De los datos de la anterior tabla y utilizando Excel, realizar el gráfico de barras con los datos de frecuencia absoluta de sobrevoltajes.

- Repetir el ítem anterior pero considerando un paso de tiempo (INCT) para cada suiche de 1 ms, un número de pasos de 10 (NSTEP). Para este caso cada suiche cierra entre 0 y 9 ms.

Comparar los resultados con respecto al ítem anterior. ¿Se presentaron mayores o menores sobrevoltajes y porqué?

- Utilizando el suiche “Estadístico” realizar de manera automática una simulación para 500 energizaciones. Determinar el sobrevoltaje mínimo, promedio y el más alto que se puede presentar.

Se deben utilizar cuatro(4) suiches estadísticos tal como aparece en la figura 10.7. Existe un primer suiche en la modalidad “Master”, que es el que controla los demás suiches tipo “Esclavo”. Este suiche “Master” debe funcionar de acuerdo a una distribución uniforme.

Dar los parámetros al suiche “Master” para que los suicheos se realicen en el segundo ciclo. ($16.66 \text{ ms} \leq t_{\text{cierres}} \leq 33.33 \text{ ms}$). Se debe asignar una desviación estándar para que se realicen simulaciones en todo el ciclo entre 16.66 ms y 33.33 ms. Ver figura 10.7, 10.8 y 10.9

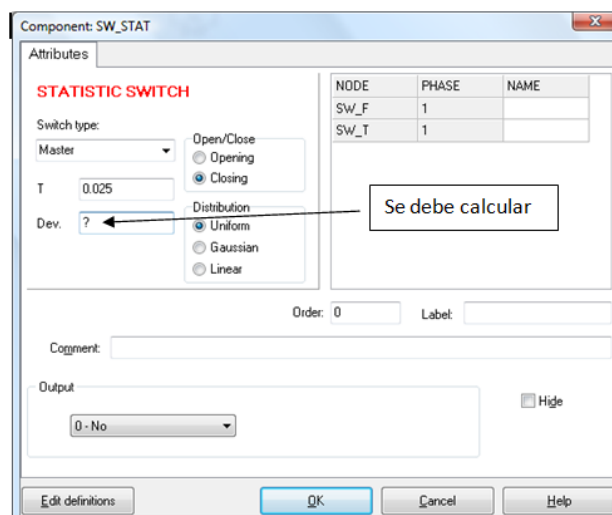


Figura 10.7 Ventana datos suiche maestro

Los suiches tipo “Esclavo” funcionan de acuerdo a una distribución normal y representan el funcionamiento real de los interruptores. Considerar que los interruptores tienen una dispersidad de los polos de seis (6) ms, es decir que cuando se da la orden de cierre, realmente cierran en un tiempo de $T \pm 3$ ms. Se debe asignar un valor promedio cero ($T=0$ s), ya que este tiempo lo controla el suiche “Master”, y una desviación estándar para que se incluya el 98% de los tiempos de acuerdo a la distribución normal. Realizar el ejercicio en Excel para obtener el valor para la desviación estándar que se debe asignar a este suiche esclavo.

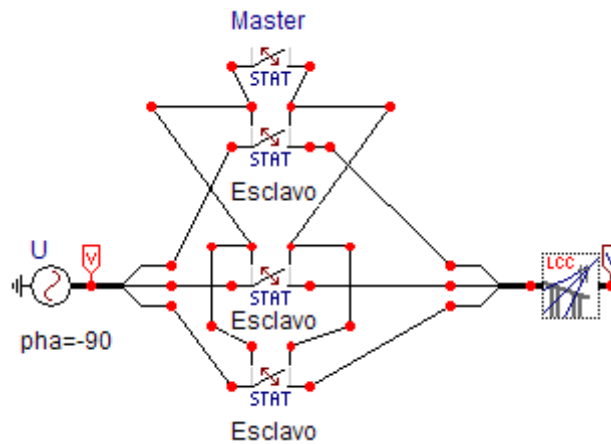


Figura 10.8 Esquema en Atpdraw para suicheo estadístico trifásico

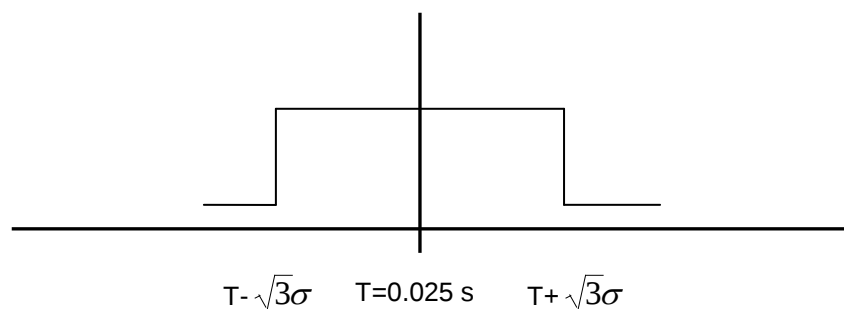


Figura 10.9 Distribución uniforme con valor medio T

De la simulación obtener los siguientes datos:

- Sobrevoltaje promedio, la desviación estándar y los sobrevoltajes con probabilidades de presentarse del 50, 70, 90 y 98%. A este último voltaje del 98%, que es lo mismo que el sobrevoltaje con probabilidad de ser excedido del 2%, también se conoce como **sobrevoltaje estadístico**. Obtener mediante Excel el gráfico de barras con los datos de frecuencia de sobrevoltajes, donde se observe también la curva acumulada de sobrevoltajes.
- Repetir el ítem anterior considerando una dispersidad de los polos de 10 ms durante el cierre de los mismos. ¿Se presentan cambios importantes con respecto a la consideración de una dispersidad de polos de 6 ms?
- Determinar los sobrevoltajes del ítem a que se presentarían en la mitad de la línea.

- d. Si al final de la línea hay instalados pararrayos de voltaje nominal de 420 kV, con la característica dada en la tabla, determinar los del ítem a, al final y a mitad de línea.

I (Apico)	V (KVpico)
250	816
500	832
1000	857
2000	877
5000	958
10000	1008
20000	1089
40000	1189

- e. Determinar el número de aisladores de la cadena para puntos intermedios de la línea y al final de la misma sin pararrayos, para un riesgo de falla del aislamiento de 0.01 y 0.001. Considerar que se utilizan aisladores con un CFO al impulso tipo maniobra de 80 kV pico, con una desviación estándar del 6%.
- f. Repetir el ítem anterior con pararrayos al final de la línea, pero calculando el número de aisladores para puntos intermedios de la línea.