



---

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**SIMULACIÓN DE LA OPERACIÓN DE  
APARTARRAYOS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN  
UTILIZANDO EL PROGRAMA ATP / EMTF.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**P R E S E N T A :**

**ING. ISABEL ADRIÁN LUGO NOGUERÓN**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**ING. JACINTO VIQUEIRA LANDA**

**MÉXICO, D.F.**

**FEBRERO 2008**

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras, gráficas, tablas y glosario de términos .....	i
Índice general.....	1
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1 INTRODUCCION.....	3
1.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA INCIDENCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN DIFERENTES ÁREAS DE TRANSMISIÓN DE CFE.....	6
1.1.2 LA REPRESENTACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BAJO DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	9
1.2 OBJETIVO.....	11
1.3 CONTENIDO .....	12
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>14</b>
<b>PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE APARTARRAYOS .....</b>	<b>14</b>
2.1 Definiciones.....	14
2.1.1 Apartarrayos .....	14
2.2 Selección de Apartarrayos de Óxidos Metálicos sin Entrehierro[10] .....	16
2.3 Selección de Apartarrayos con Entrehierro Externo en Serie.....	18
2.4 Procedimiento para Determinar las Estructuras a Proteger .....	19
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>21</b>
<b>SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN [5] .....</b>	<b>21</b>
3.1 Objetivo.....	21
3.2 Definiciones.....	21
3.3 Diseño e instalación de los sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas en construcción .....	24
3.4 Medición de resistividad aparente del subsuelo en líneas aéreas en construcción.....	26
3.5 Medición de la resistencia de la red de puesta a tierra para líneas de transmisión aéreas en construcción. ....	27
3.6 Medición de la resistividad del subsuelo y resistencia eléctrica de la red de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas en operación.....	34
3.7 Mantenimiento de las redes de tierra convencionales .....	39
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>41</b>
<b>INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA ATP/EMTP [4] .....</b>	<b>41</b>
4.1.1 Resistencia.....	43
4.1.2 Capacitancia.....	43
4.1.3 Inductancia .....	45
4.2 Programa alternativo de transitorios ATP .....	46
4.3 Módulos de simulación integrada.....	50
4.4 Programas importantes de soporte integrado .....	50
4.5 Programas de soporte para el Programa ATP .....	52
4.5.1 ATPDraw .....	52
4.5.2 Centro de control del Programa ATP .....	53
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>55</b>
<b>MODELADO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN, A TRAVÉS DE ATPDRAW Y CALCULADOS POR ATP/EMTP .....</b>	<b>55</b>
5.1 Obtención de parámetros de los tramos de línea (conductores de fase y de guarda), modelados a través de ATPDraw y calculados por ATP/EMTP.....	55

INDICE GENERAL

5.2 Obtención de los parámetros de los tramos de línea (conductores de fase y de guarda), por el programa ATP/EMTP .....	56
5.3 Representación de las estructuras de soporte de la línea.....	57
5.4 Representación de los aisladores de una línea.....	59
5.5 Representación del aterrizamiento de una torre de una línea .....	61
5.6 Representación de la descarga atmosférica a la línea .....	63
5.7 Representación de los apartarrayos de óxidos metálicos, sin entrehierro. ....	65
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>68</b>
<b>SIMULACIÓN DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LÍNEA BAJO DESCARGA ATMOSFÉRICA CON AYUDA DEL PROGRAMA ATP/EMTP: CASO DE FLAMEO DIRECTO DE AISLADORES, CON DESCARGA DIRECTA AL HILO DE GUARDA, SIN USO DE APARTARRAYO Y CON RESISTENCIA A PIE DE TORRE DE 10 kΩ.....</b>	<b>68</b>
6.1 Modelado del sistema .....	68
6.2 Resultados de la simulación del circuito de la figura 6.1.....	70
6.3 Conclusión .....	75
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>76</b>
<b>SIMULACIÓN DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LÍNEA BAJO DESCARGA ATMOSFÉRICA CON AYUDA DEL PROGRAMA ATP/EMTP: CON DESCARGA DIRECTA AL HILO DE GUARDA, CON USO DE APARTARRAYO Y CON RESISTENCIA A PIE DE TORRE DE 10 kΩ.....</b>	<b>76</b>
7.1 Modelado del sistema .....	76
7.2 Apartarrayo.....	76
7.3 Resultados de la simulación del circuito de la figura 7.1.....	79
7.4 Conclusiones .....	82
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>83</b>
<b>SIMULACIÓN DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LÍNEA BAJO DESCARGA ATMOSFÉRICA CON AYUDA DEL PROGRAMA ATP/EMTP: CON DESCARGA DIRECTA AL HILO DE GUARDA, SIN USO DE APARTARRAYO Y CON RESISTENCIA A PIE DE TORRE DE 10 Ω, NO HAY FLAMEO INVERSO .....</b>	<b>83</b>
8.1 Modelado del sistema .....	83
8.2 Conclusiones .....	87
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA: .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>90</b>
Anexo 1 Método de wenner o de los 4 electrodos para la medición de la resistividad del subsuelo	91
Anexo 2 Contrantenas y sus electrodos para la red de puesta a tierra de líneas de transmisión en construcción .....	98
Anexo 3 Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se instalarán. ....	98
Anexo 4 Especificación de materiales para la construcción de los sistemas de puesta a tierra. ....	99
Anexo 5 . Correcciones para mantenimiento de redes de tierra. ....	100

## Índice de figuras, tabla y glosario de términos.

### FIGURAS:

Figura 1.1	Flameo inverso	4
Figura 1.2	Falla de blindaje	4
Figura 1.3	Secuencia de los procesos en una descarga atmosférica con polaridad negativa	6
Figura 1.4	Proceso de propagación de la guía descendente y formación de guía ascendente	8
Figura 2.1	Parámetros de protección del apartarrayos	15
Figura 2.2	Relación entre ciclos de trabajo, MCOV y nivel de protección en apartarrayos	15
Figura 2.3	Instalación de un apartarrayos de Oxidos Metálicos sin entrehierro a una cadena de aisladores	17
Figura 2.4	Apartarrayos con entrehierro externo en serie	18
Figura 3.1	Arreglos A y B para la medición de resistividad aparente del subsuelo utilizando el método de Wenner en líneas aéreas en construcción	27
Figura 3.2	Método de medición de resistencia a tierra por caída de potencial	29
Figura 3.3	Direcciones preferentes para la medición de la resistencia de la red de tierra ( vista de planta )	30
Figura 3.4	Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 0 a 100 $\Omega \bullet m$	31
Figura 3.5	Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 101 a 300 $\Omega \bullet m$	31
Figura 3.6	Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 301 a 500 $\Omega \bullet m$	32
Figura 3.7	Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 501 a 750 $\Omega \bullet m$	32
Figura 3.8	Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 751 a 1000 $\Omega \bullet m$	33
Figura 3.9	Medición de la resistividad del subsuelo (vista de planta)	34
Figura 3.10	Dirección de la medición para torres	36
Figura 3.11	Diagrama de flujo para la medición de resistencia de la red de puesta a tierra en estructuras de líneas aéreas en operación	38
Figura 4.1	Evolución del calculo de los tiempos de integración discretos	42
Figura 4.2	Representación de resistencia	43
Figura 4.3	Capacitancia entre los puntos k, m	44
Figura 4.4	Integración usando la regla trapezoidal	44
Figura 4.5	Circuito equivalente de una capacitancia	45
Figura 4.6	Rama inductiva	45
Figura 4.7	Circuito equivalente de una inductancia	46
Figura 4.8	Modelos utilizados en el ATP - EMTP	47
Figura 5.1	Datos de los conductores de líneas	55
Figura 5.2	Datos para determinar los parámetros de una línea de transmisión	56
Figura 5.3	Modelo para representar una estructura	59
Figura 5.4	Modelado de los aisladores	60
Figura 5.5	Aislamiento en aire en relación con msnm	61
Figura 5.6	Aislamiento en aire en relación con el tiempo de falla	61
Figura 5.7	Representación del aterrizamiento de una torre	62
Figura 5.8	Datos de una descarga atmosférica	64
Figura 5.9	Probabilidad de la corriente de un rayo	65
Figura 5.10	Modelado del apartarrayo	65
Figura 5.11	Datos del apartarrayo en el simulador ATPDraw	66
Figura 6.1	Circuito, para simular la descarga atmosférica directa al hilo de guarda, línea 1, torre 4, sin apartarrayo	69
Figura 6.2	Sobretensiones en la línea 1, torre 2, tres fases	70
Figura 6.3	Sobretensiones en la línea 2, torre 2, tres fases	70
Figura 6.4	Corrientes a través de los aisladores, en las dos líneas, de la torre 2	71
Figura 6.5	Sobretensiones en la línea 1, torre 3, tres fases, en la fase A la sobretensión es de 1425 kV, provocando flameo inverso	72

## Índice de figuras

Figura 6.6	Sobretensiones en la línea 2, torre 3, tres fases, las sobretensiones son menores de 1425 kV, no hay flameo inverso	72
Figura 6.7	Corrientes a través de los aisladores, en las dos líneas, en la torre 3, en la fase A se presentan 9142 A, en las fases restantes la corriente es de 0 Amperes	73
Figura 6.8	Sobretensiones en la línea 1, torre 4, tres fases, sobretensiones menores a las de flameo.	74
Figura 6.9	Sobretensiones en la línea 2, torre 4, tres fases, sobretension mayor a 1425 kV, en la fase A	74
Figura 6.10	Corrientes a través de los aisladores, en los dos circuitos, en la torre 4, en la línea 2, fase A	75
Figura 7.1	Circuito, para simular la descarga atmosférica directa al hilo de guarda, línea 1, torre 4, con apartarrayo	78
Figura 7.2	Sobretensiones en la línea 1, torre 3, tres fases	79
Figura 7.3	Sobretensiones en la línea 2, torre 3, tres fases	79
Figura 7.4	Sobretensiones en la línea 1, torre 4, tres fases	80
Figura 7.5	Sobretensiones en la línea 2, torre 4, tres fases	80
Figura 7.6	Corrientes en las tres fases de los dos circuitos de la torre 3	81
Figura 7.7	Corrientes en las tres fases de los dos circuitos de la torre 4	81
Figura 7.8	Sobretensiones que se presentan en la cadena de aisladores del circuito 2, torre 3, fase A, cuando hay apartarrayos y cuando no hay apartarrayos	82
Figura 8.1	Circuito, para simular la descarga atmosférica directa al hilo de guarda, línea 1, torre 4, sin apartarrayo y con resistencia de puesta a tierra de 10 $\Omega$	84
Figura 8.2	Sobretensiones en las torres 3, 4 y 5. de los dos circuitos 1 y 2, fase A	85
Figura 8.3	Se observan las corrientes que se drenan a tierra, en las torres 3, 4 y 5	86
Figura A1.1	Medición de resistividad por el método de Wenner	93
Formato 1	Medición de la resistividad del subsuelo para líneas de transmisión en construcción	
Formato 2	Medición de la resistencia eléctrica del sistema de puesta a tierra de las líneas de transmisión en construcción	96
Formato 3	Medición de la resistividad del subsuelo	

## TABLAS:

Tabla 1.1	Tabla comparativa de salidas por falla de líneas de transmisión	5
Tabla 1.2	Procesos en una descarga atmosférica con polaridad negativa	7
Tabla 1.3	Salidas de líneas de transmisión por descargas atmosféricas	9
Tabla 3.1	Contratenas y sus electrodos para la red de puesta a tierra de líneas de transmisión en construcción	24
Tabla 3.2	Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se instalarán	25
Tabla 3.3	Especificación de materiales para la construcción de los sistemas de puesta a tierra	25
Tabla 3.4	Correcciones para mantenimiento de redes de tierra	39
Tabla 4.1	Se muestran la identificación de elementos que se utilizan en el programa ATP	48

## GLOSARIO DE TÉRMINOS:

ATP	Programa analizador de transitorios
EMTP	Programa de transitorios electromagnéticos
TNA	Analizador de transitorios de redes eléctricas
HVDC	Alto voltaje en corriente directa
BIL	Nivel básico de aislamiento

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 INTRODUCCION

Las fallas por descargas atmosféricas en líneas de transmisión llegan a registrar porcentajes muy elevados, más del 70% de las salidas por falla en el año 2004 fueron por esa causa, tabla 1.1. Existen áreas de transmisión mayormente afectadas por descargas atmosféricas, con índices superiores a 0.96 salidas por cada 100 km de línea, en niveles de tensión de 400 kV y de 1.5 salidas por cada 100 km de línea en niveles de tensión de 230 kV, tabla 1.1.

Lo anterior presenta una asociación clara con líneas que atraviesan regiones con índices de densidad de rayos a tierra entre moderados (de 3 a 6 rayos/km<sup>2</sup>/año) a altos (mayores a 6 rayos/km<sup>2</sup>/año), combinados en algunos casos con topografía difícil, es decir zonas montañosas en donde además se registran valores elevados de resistividad del terreno.

No existen muchos parámetros que puedan ser modificados para reducir los índices de salidas por descargas atmosféricas. Prácticamente debe seleccionarse un ángulo de blindaje adecuado y un sistema de puesta a tierra eficiente, verificándose el diseño de las torres y conductores.

En líneas que atraviesan regiones con altitudes sobre el nivel del mar elevadas, debe revisarse que la longitud de las cadenas de aisladores se seleccione aplicando los factores de corrección pertinentes. Pudiéndose presentar casos especiales como claros muy largos entre torres en zonas montañosas o en el cruce de ríos y carreteras, en estas situaciones se deberá revisar la posición que los hilos de guarda adoptan con respecto a los conductores de fase, la cual puede modificarse considerablemente, dejando a los conductores de fase más expuestos a las descargas atmosféricas.

Los fenómenos que generan fallas sobre las líneas eléctricas de energía, debido a las descargas atmosféricas, se pueden resumir en dos tipos:

- a) Falla de blindaje
- b) Flameo inverso

La *falla de blindaje* figura 1.1, es el fenómeno de descarga atmosférica directa sobre el propio conductor de fase, como resultado de la falla de intercepción del conductor de guarda. Para su estudio, en este trabajo se utiliza el Modelo Electrogeométrico (EGM) [1].

El *flameo inverso* figura 1.2, es el fenómeno de rotura de la rigidez dieléctrica en la cadena de aisladores de la línea, por efecto de la sobretensión que produce la descarga atmosférica sobre el hilo de guarda o sobre la torre, en su camino hacia la red de tierra debido a un alto valor de la resistencia de la red de puesta a tierra.

En principio las ondas de corriente que inciden en los cables de guarda o en las torres son conducidas a tierra a través de las mismas. De manera que se espera que el terreno y los elementos de conexión a tierra de la torre, en forma combinada, den un valor conocido como **“resistencia al pie de la torre”** que sea lo suficientemente bajo (menor o igual a 10  $\Omega$ ) para evitar el fenómeno de reflexión de ondas en forma importante. En este estudio se utilizó el

## INTRODUCCIÓN

programa digital ATPDRAW, para simular la aplicación del apartarrayo en las líneas de transmisión de 400 kV.

En la especificación J0028-CFE-2007 [5], Puesta a Tierra de Líneas de Transmisión, se recomienda que en estructuras de las líneas en las que la resistividad del terreno sea igual o mayor de  $1000 \Omega\text{-m}$ , se haga un estudio de confiabilidad, el cual consiste en usar apartarrayos en las líneas de transmisión.

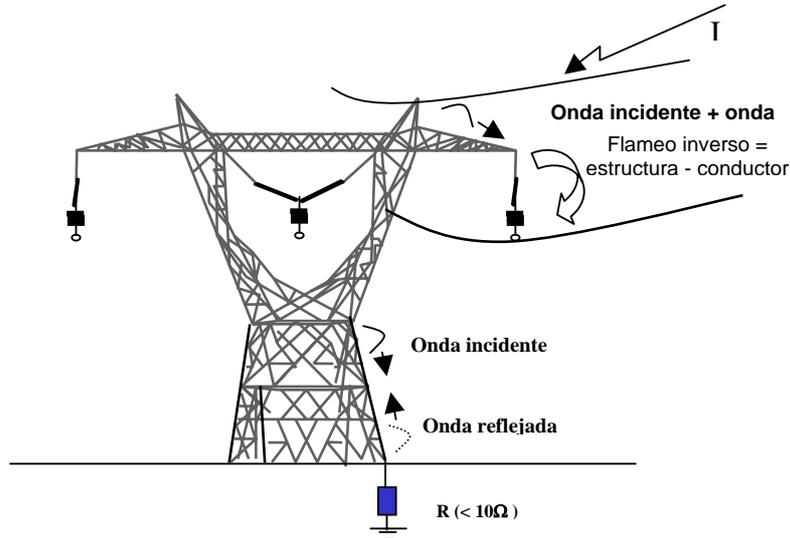


Figura 1.1 Flameo Inverso

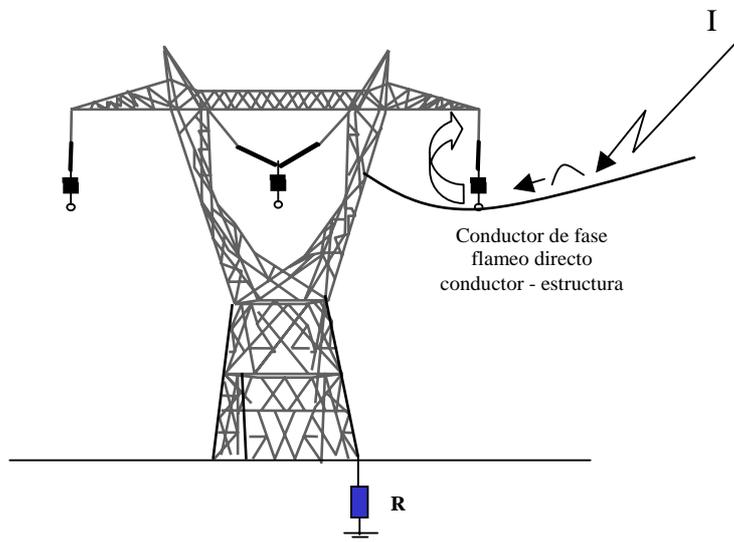


Figura 1.2 Falla de Blindaje

**INTRODUCCIÓN**  
**COORDINACION DE TRANSMISION**  
**SUBGERENCIA DE LINEAS DE TRANSMISION**  
**PERIODO: ENERO - DICIEMBRE 2004 – 2005**

400 k V																										EXTRAORDINARIAS								
GERENCIA REGIONAL DE TRANSMISION	A0		A1		A2		A3		A4		A5		A6		B0		C0		C1		C2		D0		TOTAL		KMS DE LINEA		INDICE DE SALIDAS		E2			
	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	I	II	III	T
NOROESTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	126	247.30	2.38	0.40	0	0	0	0
NORTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	400	400.00	0.00	0.75	0	0	0	0
NORESTE	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	0	4	3	16	7	0	0	0	0	1	4	3	3	27	19	3,918	3,917.75	0.69	0.48	0	4	0	4
OCCIDENTE	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	8	12	1	7	30	13	1	0	0	2	8	24	0	4	48	64	4,572	4,705.00	1.05	1.36	1	3	1	5
CENTRAL	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10	0	0	13	1	5	7	1	0	29	18	2,475	2,475.00	1.17	0.73	0	0	0	0
ORIENTE	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	5	1	1	2	25	19	0	0	0	7	0	0	1	0	33	33	4,600	4,700.00	0.72	0.70	0	3	0	3
SURESTE	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	5	0	1	21	7	1	2	0	1	0	4	5	4	31	25	1,699	1,699.00	1.82	1.47	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>104</b>	<b>60</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>14</b>	<b>39</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>171</b>	<b>163</b>	<b>17,790</b>	<b>18,144.05</b>	<b>0.96</b>	<b>0.90</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>12</b>

230 k V																										EXTRAORDINARIAS								
GERENCIA REGIONAL DE TRANSMISION	A0		A1		A2		A3		A4		A5		A6		B0		C0		C1		C2		D0		TOTAL		KMS DE LINEA		INDICE DE SALIDAS		E2			
	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	I	II	III	T
B. CALIFORNIA	0	0	1	0	2	0	0	0	2	0	2	0	19	4	0	3	0	0	1	0	0	1	0	0	27	8	1,110	1,132.00	2.43	0.71	0	0	0	0
NOROESTE	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	11	13	14	12	0	1	0	0	1	1	1	0	30	28	5,323	6303.08	0.56	0.44	0	0	0	0
NORTE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	7	9	10	3	2	1	0	0	2	0	0	1	22	17	4,134	4,451.00	0.53	0.38	0	2	2	4
NORESTE	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	2	0	8	6	9	4	0	0	0	0	0	2	0	1	24	14	1,874	1,902.53	1.28	0.74	0	0	0	0
OCCIDENTE	0	0	0	0	2	1	0	0	4	1	17	3	10	8	25	18	0	1	0	1	8	20	3	5	69	58	3,718	3,718.00	1.86	1.56	0	4	2	6
CENTRAL	1	0	2	0	1	1	1	0	0	0	4	6	6	3	23	22	0	0	1	0	5	8	3	1	47	41	3,529	3,491.00	1.33	1.17	0	0	2	2
ORIENTE	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	2	2	2	13	17	3	0	3	4	0	0	2	0	25	27	1,502	1,502.00	1.66	1.80	0	0	0	0
SURESTE	0	0	1	1	0	0	0	0	4	1	7	5	0	3	15	10	0	0	0	0	0	2	3	4	30	26	1,587	1,587.11	1.89	1.64	0	0	0	0
PENINSULAR	0	0	2	0	0	0	0	0	0	5	0	2	0	1	11	13	0	0	0	0	0	2	0	1	13	24	2,910	3,061.00	0.45	0.78	0	11	0	11
<b>TOTAL</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>33</b>	<b>19</b>	<b>63</b>	<b>49</b>	<b>120</b>	<b>102</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>16</b>	<b>36</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>287</b>	<b>243</b>	<b>25,687</b>	<b>27,147.72</b>	<b>1.12</b>	<b>0.90</b>	<b>0</b>	<b>17</b>	<b>6</b>	<b>23</b>

<b>TOTAL</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>49</b>	<b>37</b>	<b>69</b>	<b>62</b>	<b>224</b>	<b>162</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>18</b>	<b>16</b>	<b>30</b>	<b>75</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>458</b>	<b>406</b>	<b>43,477</b>	<b>45,291.77</b>	<b>1.05</b>	<b>0.90</b>	<b>1</b>	<b>27</b>	<b>7</b>	<b>35</b>
--------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	---------------	------------------	-------------	-------------	----------	-----------	----------	-----------

- |                       |                         |                   |                            |                         |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| A0: ESTRUCTURAS       | A1: HERRAJES            | A2: AISLADORES    | A3: CONDUCTORES            | E2: EXTRAORDINARIAS     |
| A4: HILO DE GUARDA    | A5: BRECHA              | A6: CONTAMINACION | B0: DESCARGAS ATMOSFERICAS | I: VANDALISMO           |
| C0: VIENTOS DE GUARDA | C2: QUEMA DE VEGETACION | D0: DESCONOCIDA   |                            | II: FENOMENOS NATURALES |
|                       |                         |                   |                            | III: ACCIDENTES         |

Tabla 1.1 Tabla comparativa de salidas por falla de líneas de transmisión

## RESUMEN

### 1.3 CONTENIDO

El desarrollo de esta tesis se describe a continuación:

En el capítulo 1. Se describe que las descargas atmosféricas son la principal causa de fallas en las líneas de transmisión, debido principalmente a las fallas de blindaje de la línea o al alto valor de la resistencia de puesta a tierra de la torre de transmisión.

Se analiza el fenómeno de la descarga atmosférica, de acuerdo al tipo de carga que tiene si es negativa o positiva, si es descendiente o ascendente.

Se da el objetivo de la tesis y se describe los elementos que se requieren para realizar las simulaciones de las descargas atmosféricas en la línea de transmisión.

En el capítulo 2. Se dan definiciones y conceptos generales sobre: La función del apartarrayo, la selección de apartarrayos para líneas de transmisión, así como su modelado. Se explica el procedimiento para determinar las estructuras a proteger con apartarrayos.

En el capítulo 3. Se explica el concepto de un sistema de puesta a tierra, se dan definiciones y la manera como se diseña y calcula un sistema de puesta a tierra para líneas de transmisión tanto en la etapa de construcción como en la de operación.

Se explican los métodos para medir resistividad y resistencia de puesta a tierra de las líneas de transmisión y se da una guía para dar mantenimiento a un sistema de puesta a tierra.

En el capítulo 4. Se analiza el concepto de transitorios en los sistemas de potencia así como su cálculo con el método de la regla trapezoidal utilizado en el simulador ATP.

Se analiza el empleo de ecuaciones de nodos para calcular las corrientes en las ramas en función de la tensión en los nodos.

Se identifican los elementos que se pueden utilizar en el programa ATP.

Se explica como trabaja el ATP así como sus programas auxiliares: ATPDraw, PCPlot, PLOTXY, LINE Constans, etc.

En el capítulo 5. Se presentan los modelos de los componentes que forman parte de una línea de transmisión, a través del ATP, ATPDraw (conductores, torres, sistemas de tierras, hilos de guarda, apartarrayos, rayos, cadena de aisladores).

Se explica como se obtienen los datos para cada modelo, los programas respectivos, así como su uso en los modelos mencionados para usarse en el programa ATP.

En el capítulo 6. Se realiza la simulación del comportamiento de la línea de transmisión bajo descarga atmosférica considerando : Cuando la descarga atmosférica cae directamente

## RESUMEN

sobre el hilo de guarda, la resistencia de puesta a tierra de la torre es de  $10\text{ k}\Omega$ , sin apartarrayos y se produce flameo inverso en los aisladores, provocando que la línea se dispare. Se miden corriente y sobretensiones en los aisladores de las torres cercanas.

En el capítulo 7. Se realiza la simulación del comportamiento de la línea de transmisión bajo descarga atmosférica, se observa como el apartarrayo absorbe la sobretensión de la descarga, en este caso se analiza: Cuando la descarga atmosférica cae directamente sobre el hilo de guarda, la resistencia de puesta a tierra de la torre es de  $10\text{ k}\Omega$ , se usa apartarrayos y no se produce flameo inverso en los aisladores y por lo tanto la línea no se dispara. Se miden corriente y sobretensiones en los aisladores de las torres cercanas.

En el capítulo 8. Se realiza la simulación del comportamiento de la línea de transmisión bajo descarga atmosférica, en este caso se considera : Cuando la descarga atmosférica cae directamente sobre el hilo de guarda, la resistencia de puesta a tierra de la torre es de  $10\ \Omega$ , no se usa apartarrayos , no se produce flameo inverso en los aisladores y por lo tanto la línea no se dispara. Se miden corriente y sobretensiones en los aisladores de las torres.

En todas las simulaciones realizadas se observa cuando existe flameo inverso y cuando no. Se explica cada caso y además se ponen graficas de corrientes y sobretensiones para cada torre y circuito de las líneas.

Se analiza y concluye porqué se presenta el flameo inverso debido a las descargas atmosféricas sobre los hilos de guarda de una línea de transmisión y como evitar esos flameos utilizando apartarrayos en paralelo con las cadenas de aisladores.

Lo anterior disminuye en un 40 % las salidas de las líneas en un año, aumentando de manera significativa la confiabilidad de las líneas.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 INTRODUCCION

Las fallas por descargas atmosféricas en líneas de transmisión llegan a registrar porcentajes muy elevados, más del 70% de las salidas por falla en el año 2004 fueron por esa causa, tabla 1.1. Existen áreas de transmisión mayormente afectadas por descargas atmosféricas, con índices superiores a 0.96 salidas por cada 100 km de línea, en niveles de tensión de 400 kV y de 1.5 salidas por cada 100 km de línea en niveles de tensión de 230 kV, tabla 1.1.

Lo anterior presenta una asociación clara con líneas que atraviesan regiones con índices de densidad de rayos a tierra entre moderados (de 3 a 6 rayos/km<sup>2</sup>/año) a altos (mayores a 6 rayos/km<sup>2</sup>/año), combinados en algunos casos con topografía difícil, es decir zonas montañosas en donde además se registran valores elevados de resistividad del terreno.

No existen muchos parámetros que puedan ser modificados para reducir los índices de salidas por descargas atmosféricas. Prácticamente debe seleccionarse un ángulo de blindaje adecuado y un sistema de puesta a tierra eficiente, verificándose el diseño de las torres y conductores.

En líneas que atraviesan regiones con altitudes sobre el nivel del mar elevadas, debe revisarse que la longitud de las cadenas de aisladores se seleccione aplicando los factores de corrección pertinentes. Pudiéndose presentar casos especiales como claros muy largos entre torres en zonas montañosas o en el cruce de ríos y carreteras, en estas situaciones se deberá revisar la posición que los hilos de guarda adoptan con respecto a los conductores de fase, la cual puede modificarse considerablemente, dejando a los conductores de fase más expuestos a las descargas atmosféricas.

Los fenómenos que generan fallas sobre las líneas eléctricas de energía, debido a las descargas atmosféricas, se pueden resumir en dos tipos:

- a) Falla de blindaje
- b) Flameo inverso

La *falla de blindaje* figura 1.1, es el fenómeno de descarga atmosférica directa sobre el propio conductor de fase, como resultado de la falla de intercepción del conductor de guarda. Para su estudio, en este trabajo se utiliza el Modelo Electrogeométrico (EGM) [1].

El *flameo inverso* figura 1.2, es el fenómeno de rotura de la rigidez dieléctrica en la cadena de aisladores de la línea, por efecto de la sobretensión que produce la descarga atmosférica sobre el hilo de guardia o sobre la torre, en su camino hacia la red de tierra debido a un alto valor de la resistencia de la red de puesta a tierra.

En principio las ondas de corriente que inciden en los cables de guarda o en las torres son conducidas a tierra a través de las mismas. De manera que se espera que el terreno y los elementos de conexión a tierra de la torre, en forma combinada, den un valor conocido como **“resistencia al pie de la torre”** que sea lo suficientemente bajo (menor o igual a 10 Ω) para

evitar el fenómeno de reflexión de ondas en forma importante. En este estudio se utilizó el programa digital ATPDRAW, para simular la aplicación del apartarrayo en las líneas de transmisión de 400 kV.

En la especificación J0028-CFE-2007 [5], Puesta a Tierra de Líneas de Transmisión, se recomienda que en estructuras de las líneas en las que la resistividad del terreno sea igual o mayor de  $1000 \Omega\text{-m}$ , se haga un estudio de confiabilidad, el cual consiste en usar apartarrayos en las líneas de transmisión.

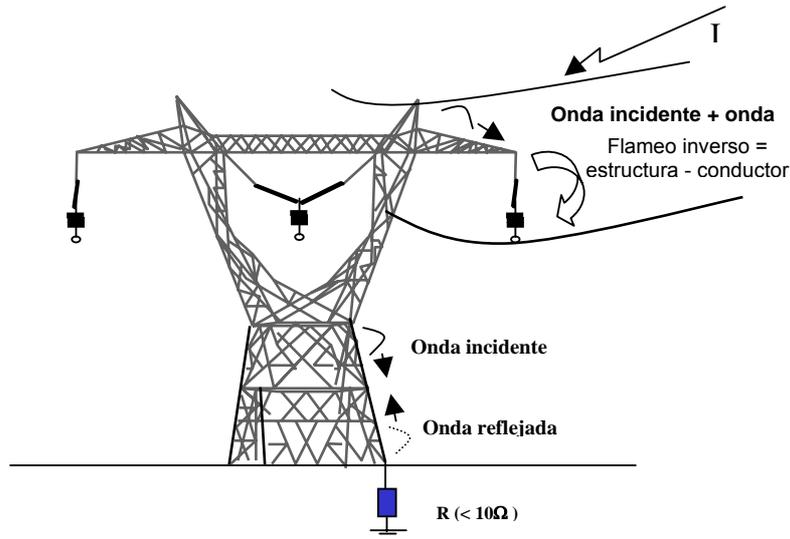


Figura 1.1 Flameo Inverso

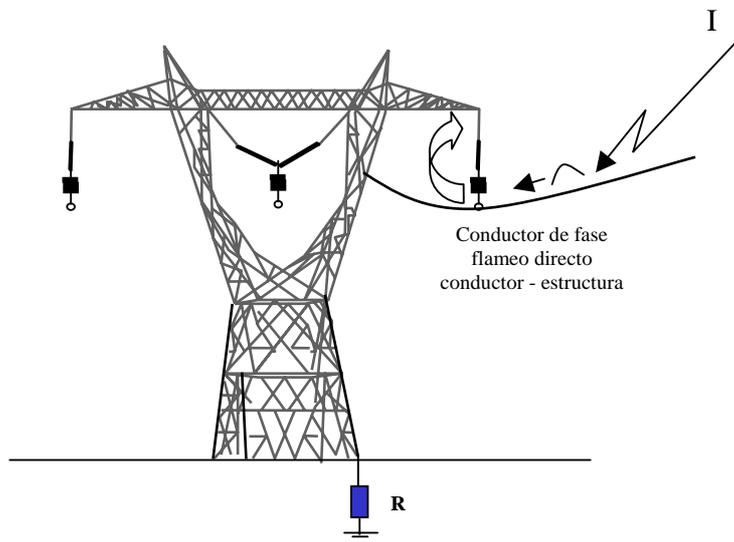


Figura 1.2 Falla de Blindaje

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN  
 COORDINACION DE TRANSMISION  
 SUBGERENCIA DE LINEAS DE TRANSMISION  
 PERIODO: ENERO - DICIEMBRE 2004 – 2005

400 k V																										EXTRAORDINARIAS								
GERENCIA REGIONAL DE TRANSMISION	A0		A1		A2		A3		A4		A5		A6		B0		C0		C1		C2		D0		TOTAL		KMS DE LINEA		INDICE DE SALIDAS		E2			
	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	I	II	III	T
NOROESTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	126	247.30	2.38	0.40	0	0	0	0
NORTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	400	400.00	0.00	0.75	0	0	0	0
NORESTE	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	0	4	3	16	7	0	0	0	0	1	4	3	3	27	19	3,918	3,917.75	0.69	0.48	0	4	0	4	
OCCIDENTE	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	8	12	1	7	30	13	1	0	0	2	8	24	0	4	48	64	4,572	4,705.00	1.05	1.36	1	3	1	5
CENTRAL	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	10	0	0	13	1	5	7	1	0	29	18	2,475	2,475.00	1.17	0.73	0	0	0	0	
ORIENTE	0	0	0	0	1	1	0	0	0	3	5	1	1	2	25	19	0	0	0	7	0	0	1	0	33	33	4,600	4,700.00	0.72	0.70	0	3	0	3
SURESTE	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	5	0	1	21	7	1	2	0	1	0	4	5	4	31	25	1,699	1,699.00	1.82	1.47	0	0	0	0	
TOTAL	0	0	1	0	1	2	0	0	4	7	16	18	6	13	104	60	2	2	13	11	14	39	10	11	171	163	17,790	18,144.05	0.96	0.90	1	10	1	12

230 k V																										EXTRAORDINARIAS								
GERENCIA REGIONAL DE TRANSMISION	A0		A1		A2		A3		A4		A5		A6		B0		C0		C1		C2		D0		TOTAL		KMS DE LINEA		INDICE DE SALIDAS		E2			
	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	04	05	I	II	III	T
B. CALIFORNIA	0	0	1	0	2	0	0	2	0	2	0	19	4	0	3	0	0	1	0	0	1	0	0	27	8	1,110	1,132.00	2.43	0.71	0	0	0	0	
NOROESTE	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	11	13	14	12	0	1	0	0	1	1	1	0	30	28	5,323	6303.08	0.56	0.44	0	0	0	0	
NORTE	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	7	9	10	3	2	1	0	0	2	0	0	1	22	17	4,134	4,451.00	0.53	0.38	0	2	2	4	
NORESTE	0	0	0	0	0	0	1	5	0	2	0	8	6	9	4	0	0	0	0	0	2	0	1	24	14	1,874	1,902.53	1.28	0.74	0	0	0	0	
OCCIDENTE	0	0	0	0	2	1	0	0	4	1	17	3	10	8	25	18	0	1	0	1	8	20	3	5	69	58	3,718	3,718.00	1.86	1.56	0	4	2	6
CENTRAL	1	0	2	0	1	1	1	0	0	4	6	6	3	23	22	0	0	1	0	5	8	3	1	47	41	3,529	3,491.00	1.33	1.17	0	0	2	2	
ORIENTE	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	0	2	2	13	17	3	0	3	4	0	0	2	0	25	27	1,502	1,502.00	1.66	1.80	0	0	0	0	
SURESTE	0	0	1	1	0	0	0	4	1	7	5	0	3	15	10	0	0	0	0	0	2	3	4	30	26	1,587	1,587.11	1.89	1.64	0	0	0	0	
PENINSULAR	0	0	2	0	0	0	0	0	5	0	2	0	1	11	13	0	0	0	0	0	2	0	1	13	24	2,910	3,061.00	0.45	0.78	0	11	0	11	
TOTAL	3	1	6	1	6	2	2	4	16	8	33	19	63	49	120	102	5	3	5	5	16	36	12	13	287	243	25,687	27,147.72	1.12	0.90	0	17	6	23

TOTAL 400 / 230 kV	3	1	7	1	7	4	2	4	20	15	49	37	69	62	224	162	7	5	18	16	30	75	22	24	458	406	43,477	45,291.77	1.05	0.90	1	27	7	35
--------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	-----	-----	---	---	----	----	----	----	----	----	-----	-----	--------	-----------	------	------	---	----	---	----

- |                       |                         |                   |                            |                         |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|
| A0: ESTRUCTURAS       | A1: HERRAJES            | A2: AISLADORES    | A3: CONDUCTORES            | E2: EXTRAORDINARIAS     |
| A4: HILO DE GUARDA    | A5: BRECHA              | A6: CONTAMINACION | B0: DESCARGAS ATMOSFERICAS | I: VANDALISMO           |
| C0: VIENTOS DE GUARDA | C2: QUEMA DE VEGETACION | D0: DESCONOCIDA   |                            | II: FENOMENOS NATURALES |
|                       |                         |                   |                            | III: ACCIDENTES         |

Tabla 1.1 Tabla comparativa de salidas por falla de líneas de transmisión

1.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA INCIDENCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN DIFERENTES ÁREAS DE TRANSMISIÓN DE CFE

Las descargas atmosféricas son descargas naturales producidas normalmente durante tormentas eléctricas. Las descargas atmosféricas se clasifican por la polaridad de la carga en la nube (positiva o negativa) y por la dirección de propagación del líder inicial o guía escalonada (ascendente o descendente). Las descargas de polaridad positiva son mas frecuentes en zonas cercanas a los polos. Podemos considerar que en nuestro país, en promedio, el 90% de rayos a tierra son de polaridad negativa, con 45% a 55% de descargas con solo un rayo de retorno.

El tipo de descarga más común que produce problemas a líneas de transmisión es la correspondiente a la descarga de nube a tierra con polaridad negativa, figura 1.3.

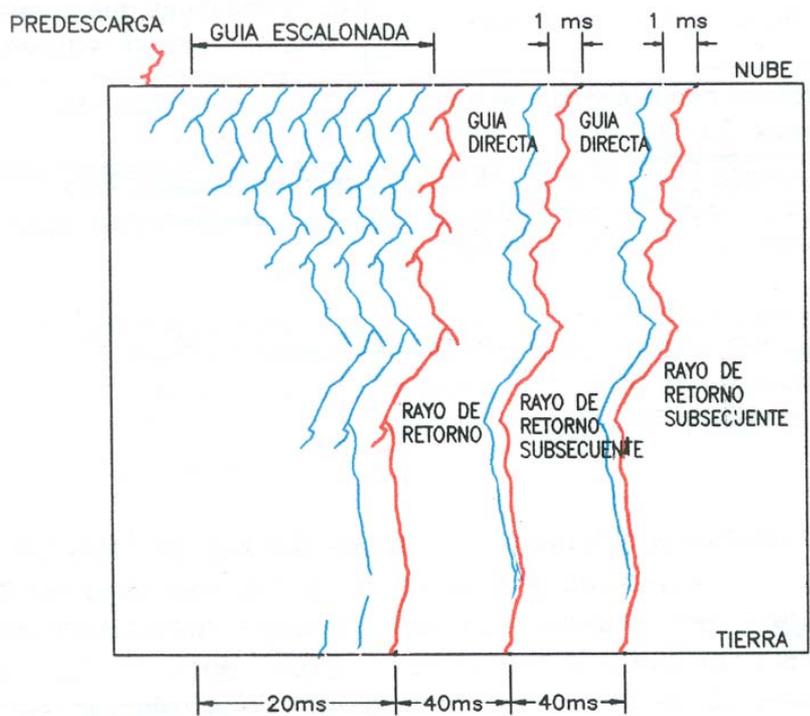


Figura 1.3 Secuencia de los procesos en una descarga atmosférica con polaridad negativa.

Los procesos que se llevan a cabo durante una descarga son muy variables tanto en espacio como en tiempo. En la tabla 1.2 se muestra un resumen de los procesos en una descarga atmosférica en secuencia de tiempo y lugar de ocurrencia.

Después de que ocurre el rayo de retorno, existe una alta probabilidad de que ocurra una o varias descargas subsecuentes por el mismo canal de descarga; el número promedio de descargas subsecuentes es de 3.

TABLA 1.2.- Procesos en una descarga atmosférica con polaridad negativa

PROCESOS	TIEMPO	LUGAR
PREDESCARGA	Duración menor de un microsegundo, < 1 $\mu$ s.	Descarga dentro de la nube
GUIA ESCALONADA	Sucede a intervalos de tiempo de alrededor de 50 $\mu$ s con una duración total de aproximadamente 100 $\mu$ s.	Desde la nube se prolonga hasta cerca del nivel de tierra, cambia de dirección en forma de escalones, con secuencia de aproximadamente 50 m cada uno.
(*) GUIA ASCENDENTE	Se forma antes que la guía escalonada llegue a tierra.	Comienza en la superficie de la tierra u objetos altos.
(**) RAYO DE RETORNO	Neutralización de la carga en la guía escalonada en aproximadamente 100-200 $\mu$ s.	Desde la unión de las guías hasta la base de la nube
GUIA SUBSECUENTE	Más rápida que la escalonada	El mismo canal que el rayo de retorno, sin ramificaciones.
DESCARGA SUBSECUENTE	Descargas con intervalos de tiempo de aproximadamente 50 $\mu$ s.	En el mismo canal del rayo de retorno.

(\*) El proceso en el cual ambas guías se unen es considerado en el estudio del radio de atracción para el diseño de blindaje como protección contra rayos directos en líneas de transmisión de energía eléctrica.

(\*\*) Este proceso es el de mayor corriente y el que mayor daño produce debido a la energía de la descarga. Los valores típicos de las corrientes de los rayos de retorno son de aproximadamente 30 kA y su frente de onda varía entre 1.8  $\mu$ s y 18  $\mu$ s, con valor promedio de 5.5  $\mu$ s.

En la figura 1.4 se muestra la última etapa antes de que el rayo de retorno se produzca, en esta etapa se desarrolla la guía ascendente cuya longitud depende de la carga que tenga la guía descendente. A través de experimentación con torres de diferentes alturas, Erikson propuso la siguiente relación entre el radio

crítico o de atracción y alturas promedio de torres de transmisión. Esta relación se obtuvo por medio del ajuste de las curvas de datos experimentales usando mínimos cuadrados:

$$R_{cr} = 14,0 H_T^{0,6}$$

donde:

$R_{cr}$  = Radio crítico o de atracción (m)

$H_T$  = Altura promedio de la torre o del conductor (m)

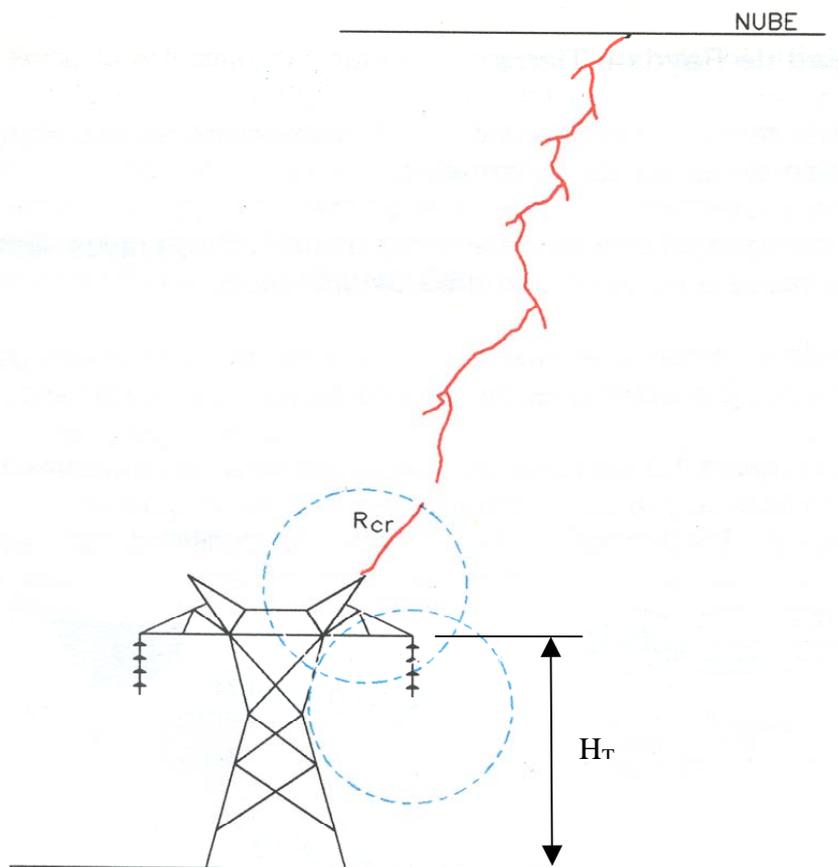


Figura 1.4 Proceso de propagación de la guía descendente y formación de guía ascendente (radio crítico de atracción)

### 1.1.2 LA REPRESENTACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN BAJO DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

El principal atributo del suministro de energía eléctrica es su continuidad. Con el objetivo de mantener el número de las interrupciones del suministro bajo el máximo comprometido, se aplican apartarrayos en paralelo con los aisladores de aquellas líneas de transmisión cuya salida por descargas atmosféricas es mayor a lo diseñado.

En particular para el estudio considerando la ocurrencia de descargas atmosféricas, los elementos asociados que requieren un modelo representativo para su análisis son:

- Conductores de fase y de guarda: fenómenos de onda viajera y otros efectos no lineales,
- Aisladores de suspensión / remate: aguante dieléctrico y arco eléctrico en aire,
- Estructura de soporte: fenómenos de onda viajera y otros efectos no lineales,
- Aterrizamiento de estructuras: comportamiento no lineal,
- Descarga atmosférica: impulso de corriente de forma de onda particular,
- Apartarrayos de línea: característica no lineal y dependiente de la frecuencia,
- Otros componentes: trampas de ondas, divisores capacitivos, etc.

Desde su inicio en 1969, el programa EMTP ofrece una variedad de modelos de cada uno de los elementos anteriores; la selección del modelo depende del objetivo del estudio y los datos disponibles.

De la estadística de la Subdirección de Transmisión de CFE correspondientes a los años 2004 y 2005 [2] de líneas de transmisión de 400 kV, la frecuencia de salidas por descargas atmosféricas es la más alta, ya que presentó un 61 y 36 % respectivamente del total de salidas por falla. Como segunda causa aparece por contaminación, en tercer lugar por vientos fuertes, en cuarto lugar por brecha y en quinto lugar por quema de vegetación, tabla 1.1.

En la tabla 1.3 se muestran las salidas de líneas por descargas atmosféricas y el total de salidas en los años 2004 y 2005 en los niveles de tensión de 400 y 230 kV.

SALIDAS DE LÍNEAS POR DESCARGA ATMOSFÉRICA			TOTAL DE SALIDAS	
TENSIÓN	2004	2005	2004	2005
400 kV	104	60	171	163
230 kV	120	102	287	243
Total	338	244	458	406

Tabla 1.3 Salidas de líneas de transmisión por descargas atmosféricas

Las estrategias que se han aplicado para disminuir las salidas de líneas de transmisión por descargas atmosféricas son las siguientes:

#### 1.1.2.1 Reducción de salidas por descargas atmosféricas

- Instalación de apartarrayos en las torres en las que se observa mayor incidencia de descargas atmosféricas.
- Medición y corrección de sistemas de tierras.
- Modificación del ángulo de blindaje.
- Medición de distribución dieléctrica y centrado de conductor
- Reposición de aislamiento roto y flameado, de conexiones en hilos de guarda y de herrajes afectados por corrosión.
- Revisión de la coordinación de aislamiento considerando las trayectorias de las líneas y estadísticas de la densidad de rayos a tierra en la República Mexicana

## 1.2 OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es mostrar que mediante la utilización de apartarrayos en líneas de transmisión; se disminuye de manera significativa el número de salidas de las mismas, debido a fallas provocadas por la ocurrencia de descargas atmosféricas. La demostración se hace, utilizando el programa ATP, ATPDRAW, en la simulación se:

- Se hacen los modelos de una línea de transmisión, torres de transmisión, hilos de guarda, apartarrayos, sistemas de tierras, descargas atmosféricas.
- Observa cuando puede presentarse el problema de flameo inverso en los aisladores de la línea, provocando disparos de las líneas.
- Analiza como se comporta una red de tierras al pie de las torres variando el valor de su resistencia en valores de  $10 \Omega$  a valores altos de  $15 \text{ k} \Omega$  cuando se presentan las descargas atmosféricas.
- Ve la efectividad del uso de apartarrayos en las líneas de transmisión ante la presencia de descargas atmosféricas.
- Demuestra que con el uso de los apartarrayos se evitaría el problema de flameo inverso y así evitar los disparos de las líneas de transmisión.
- Demuestra que con el uso de los apartarrayos se reduciría el índice de salidas de las líneas de transmisión debido a las descargas atmosféricas.
- Se utilizan líneas de transmisión trifásicas de dos circuitos de 400 kV.

### 1.3 CONTENIDO

El desarrollo de esta tesis se describe a continuación:

En el capítulo 1. Se describe que las descargas atmosféricas son la principal causa de fallas en las líneas de transmisión, debido principalmente a las fallas de blindaje de la línea o al alto valor de la resistencia de puesta a tierra de la torre de transmisión.

Se analiza el fenómeno de la descarga atmosférica, de acuerdo al tipo de carga que tiene si es negativa o positiva, si es descendente o ascendente.

Se da el objetivo de la tesis y se describe los elementos que se requieren para realizar las simulaciones de las descargas atmosféricas en la línea de transmisión.

En el capítulo 2. Se dan definiciones y conceptos generales sobre: La función del apartarrayo, la selección de apartarrayos para líneas de transmisión, así como su modelado. Se explica el procedimiento para determinar las estructuras a proteger con apartarrayos.

En el capítulo 3. Se explica el concepto de un sistema de puesta a tierra, se dan definiciones y la manera como se diseña y calcula un sistema de puesta a tierra para líneas de transmisión tanto en la etapa de construcción como en la de operación.

Se explican los métodos para medir resistividad y resistencia de puesta a tierra de las líneas de transmisión y se da una guía para dar mantenimiento a un sistema de puesta a tierra.

En el capítulo 4. Se analiza el concepto de transitorios en los sistemas de potencia así como su cálculo con el método de la regla trapezoidal utilizado en el simulador ATP.

Se analiza el empleo de ecuaciones de nodos para calcular las corrientes en las ramas en función de la tensión en los nodos.

Se identifican los elementos que se pueden utilizar en el programa ATP.

Se explica como trabaja el ATP así como sus programas auxiliares: ATPDraw, PCPlot, PLOTXY, LINE Constans, etc.

En el capítulo 5. Se presentan los modelos de los componentes que forman parte de una línea de transmisión, a través del ATP, ATPDraw (conductores, torres, sistemas de tierras, hilos de guarda, apartarrayos, rayos, cadena de aisladores).

Se explica como se obtienen los datos para cada modelo, los programas respectivos, así como su uso en los modelos mencionados para usarse en el programa ATP.

En el capítulo 6 Se realiza la simulación del comportamiento de la línea de transmisión bajo descarga atmosférica considerando: Cuando la descarga atmosférica cae directamente sobre el hilo de guarda, la resistencia de puesta a

tierra de la torre es de  $10\text{ k}\Omega$ , sin apartarrayos y se produce flameo inverso en los aisladores, provocando que la línea se dispare. Se miden corriente y sobretensiones en los aisladores de las torres cercanas.

En el capítulo 7 Se realiza la simulación del comportamiento de la línea de transmisión bajo descarga atmosférica, se observa como el apartarrayo absorbe la sobretensión de la descarga, en este caso se analiza: Cuando la descarga atmosférica cae directamente sobre el hilo de guarda, la resistencia de puesta a tierra de la torre es de  $10\text{ k}\Omega$ , se usa apartarrayos y no se produce flameo inverso en los aisladores y por lo tanto la línea no se dispara. Se miden corriente y sobretensiones en los aisladores de las torres cercanas.

En el capítulo 8 Se realiza la simulación del comportamiento de la línea de transmisión bajo descarga atmosférica, en este caso se considera: Cuando la descarga atmosférica cae directamente sobre el hilo de guarda, la resistencia de puesta a tierra de la torre es de  $10\ \Omega$ , no se usa apartarrayos, no se produce flameo inverso en los aisladores y por lo tanto la línea no se dispara. Se miden corriente y sobretensiones en los aisladores de las torres.

En todas las simulaciones realizadas se observa cuando existe flameo inverso y cuando no. Se explica cada caso y además se ponen graficas de corrientes y sobretensiones para cada torre y circuito de las líneas.

Se analiza y concluye porqué se presenta el flameo inverso debido a las descargas atmosféricas sobre los hilos de guarda de una línea de transmisión y como evitar esos flameos utilizando apartarrayos en paralelo con las cadenas de aisladores.

Lo anterior disminuye en un 40 % las salidas de las líneas en un año, aumentando de manera significativa la confiabilidad de las líneas.

## CAPITULO 2

### PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE APARTARRAYOS

#### 2.1 Definiciones

##### 2.1.1 Apartarrayos

Son dispositivos para proteger los equipos eléctricos contra sobretensiones transitorias producidas principalmente por descargas atmosféricas y operaciones de maniobra de interruptores.

##### 2.1.2 Tensión nominal

La tensión máxima eficaz permisible entre las terminales para la cuál un apartarrayos es diseñado para ejecutar su ciclo de trabajo

##### 2.1.3 Máxima Tensión de operación continua (MCOV)

El valor máximo eficaz de la tensión a frecuencia nominal que puede ser aplicada a las terminales del apartarrayos. En forma continua.

##### 2.1.4 Tensión Residual

Valor máximo de tensión que aparece en las terminales de un apartarrayos durante el paso de la corriente de descarga.

##### 2.1.5 Corriente de descarga

Valor máximo de un impulso de corriente por rayo, el cual se utiliza para clasificar un apartarrayo.

En la figura 2.1 se muestran -las tensiones en función del tiempo, que sirven como parámetros de protección de los apartarrayos a los equipos en función de su BIL.

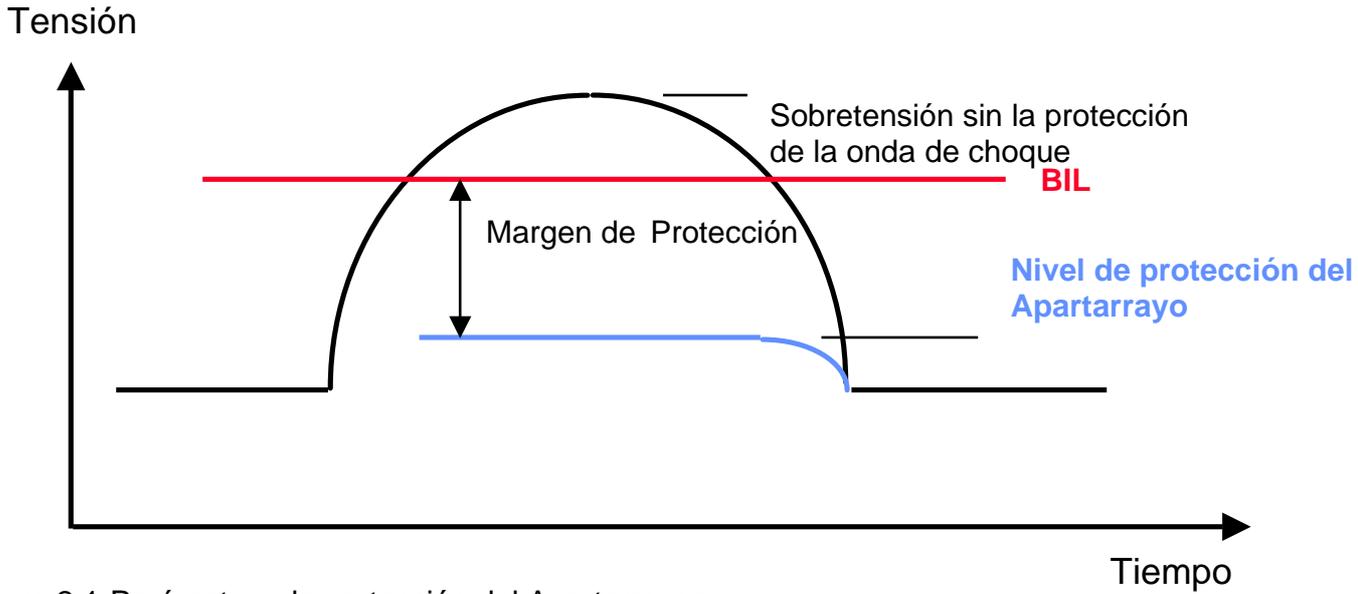


Figura 2.1 Parámetros de protección del Apartarrayos

La protección con apartarrayos de Óxidos Metálicos en líneas de transmisión se realiza en algunos países como una alternativa para reducir los índices de fallas producidas por descargas atmosféricas, particularmente en áreas que combinan niveles elevados de densidad de rayos a tierra y de resistividad del terreno. Es típico encontrar estas aplicaciones en líneas con trayectorias sobre terrenos montañosos. En la figura 2.2 se muestran las tensiones que pueden presentarse en los apartarrayos en relación con la corriente que se drenarían a través de ellos.

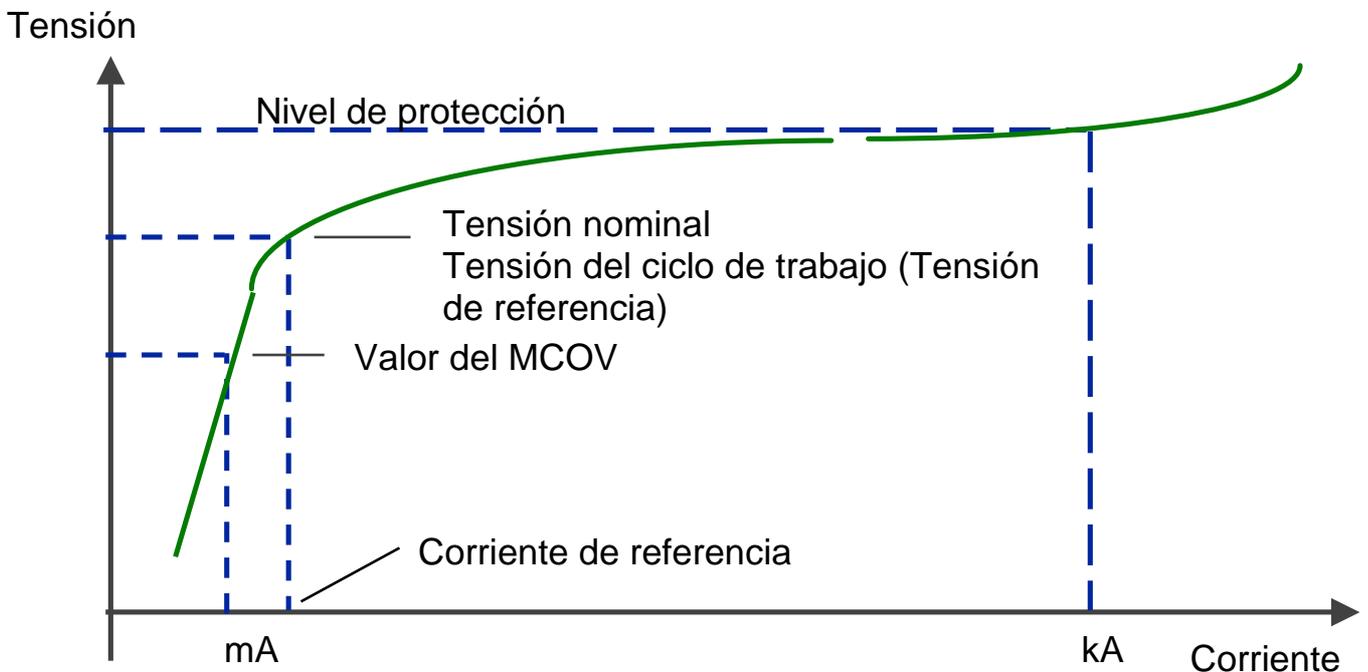


Figura 2.2 Relación entre Ciclo de Trabajo, MCOV, y nivel de protección en apartarrayos de óxido de zinc.

Existen básicamente dos tipos de apartarrayos a considerar: Los que se conectan directamente a través de las cadenas de aisladores y los que se instalan con un entrehierro externo en serie. Los primeros son el tipo de apartarrayos con el que estamos familiarizados por su extensa utilización en la protección de equipo en subestaciones. Estos se encuentran permanentemente conectados a la tensión de la línea a tierra y en condiciones normales de operación se encuentran sometidos a la circulación de la corriente de fuga. Estos apartarrayos, para su aplicación en líneas de transmisión, deben poseer algunas características particulares como: ser ligeros en peso, con un diseño que los haga mecánicamente adecuados a las condiciones de intensos vientos a los que podrán estar sometidos en áreas abiertas y que no sean susceptibles a daño por impacto de proyectiles lanzados en acciones de vandalismo. Esto prácticamente excluye la utilización de apartarrayos con envoltente de porcelana, actualmente se usan envoltente de polímero.

Los segundos son apartarrayos que incluyen en su diseño un entrehierro externo en serie que cumple varias funciones:

- Proporcionar un camino a tierra únicamente cuando se produce una sobretensión por impulso de rayo.
- Conjuntamente con la acción del apartarrayos, interrumpir la corriente de 60 Hz una vez cesado el transitorio.
- Aumentar la vida útil del apartarrayos. Esto se consigue como consecuencia de tener el apartarrayos desconectado de la línea, sin someterlo a los esfuerzos eléctricos asociados con las elevaciones temporales de tensión en la línea y el consiguiente aumento en la corriente de fuga.

## **2.2 Selección de Apartarrayos de Óxidos Metálicos sin Entrehierro[10]**

Estos apartarrayos son los que se utilizan en líneas de 230 y 400 kV de CFE y en consecuencia considerados en este estudio.

Procedimiento general para la selección de apartarrayos

Para la selección de apartarrayos, se recomienda el procedimiento siguiente:

- Determinar la tensión de operación continua del apartarrayos con respecto a la tensión de operación más alta del Sistema;
- Determinar la tensión nominal del apartarrayos con respecto a las sobretensiones temporales;
- Estimar la magnitud y probabilidad de las corrientes de descarga por rayo esperadas, a través del apartarrayos; determinar los requisitos de descarga de la línea de transmisión y seleccionar la corriente de descarga nominal, el valor de impulso de alta corriente y la clase de descarga de línea del apartarrayos;
- Seleccionar la clase de alivio de presión del apartarrayos con respecto a la corriente de falla esperada;
- Seleccionar un apartarrayos que satisfaga los requisitos anteriores;
- Determinar las características de protección del apartarrayos al impulso por rayo y por maniobra;

La figura 2.3 muestra la conexión de un apartarrayos de Óxidos Metálicos sin entrehierro a una cadena de aisladores tipo suspensión.

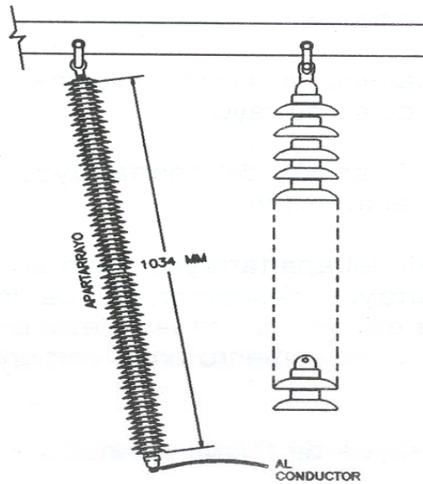


Figura 2.3.- Instalación de un apartarrayos de Oxidos Metálicos sin entrehierro a una cadena de aisladores

La selección de la tensión nominal del apartarrayos a instalar debe ajustarse a los procedimientos de CFE, que consideran la selección de un apartarrayos cuya tensión de designación sea definido por la tensión de fase a tierra, afectado por un factor que considere las elevaciones de tensión durante una falla de fase a tierra, en las fases no falladas en un sistema multiterrizado. Típicamente, en un sistema multiterrizado se recomienda utilizar un factor de 1.35 en el que ya se incluye un 5% de sobretensión por regulación de tensión. De esta forma, para Sistemas de 115, 230 y 400 kV, los apartarrayos que se utilizarán serán aquellos con tensiones de designación  $V_a$  iguales a:

$$V_a = (115/\sqrt{3}) * 1.35 = 89.63 \text{ kV} \text{ --- para 115 kV}$$

$$V_a = (230/\sqrt{3}) * 1.35 = 179.26 \text{ kV} \text{ --- para 230 kV}$$

$$V_a = (400/\sqrt{3}) * 1.35 = 311.77 \text{ kV} \text{ --- para 400 kV}$$

De la especificación CFEV A400-17 para selección de apartarrayos de Oxido de Zinc, se seleccionan los apartarrayos con una tensión igual o mayor a estos valores, lo cual resulta en las selecciones de apartarrayos:

- Para 115 kV, apartarrayos de clase 90 kV, con una tensión máxima de operación continua de 72 kV (fase a tierra).
- Para 230 kV, apartarrayos de clase 180 kV, con una tensión máxima de operación continua de 144 kV (fase a tierra).
- Para 400 kV, apartarrayos de clase 312 kV, con una tensión máxima de operación continua de 250 kV (fase a tierra).

### 2.3 Selección de Apartarrayos con Entrehierro Externo en Serie.

Este tipo de apartarrayos, mostrado en la figura 2.4, es fabricado hasta ahora únicamente en Japón. Su selección implica un procedimiento más elaborado debido a que su diseño debe adecuarse a las características de las estructuras y condiciones meteorológicas, climáticas y ambientales del sitio en donde se instalarán.

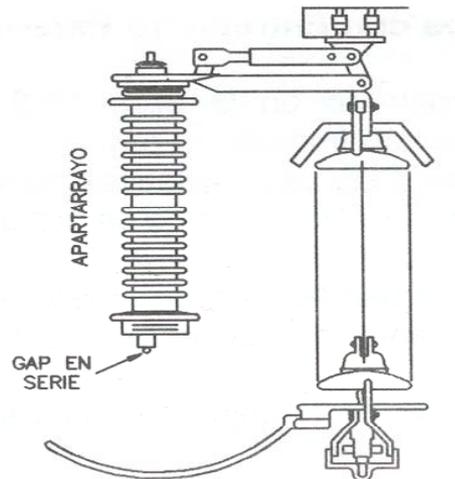


Figura 2.4.- Apartarrayos con entrehierro externo en serie.

El fabricante de este producto comercial ofrece la adecuación de las características de estos dispositivos de protección a cualquier tensión en sistemas de MT y AT (para sistemas de hasta 500 kV). Entre los parámetros que el fabricante solicita, se tienen:

- a) Características particulares de la línea. En ellas se incluye:
  - Tensión de operación y calibre de conductores.
  - Tipo y diseño de las torres (ya que los herrajes deben adecuarse dependiendo si son torres de suspensión, remate, transposición, etc.). Asimismo, longitud media del claro y flecha media por claro.
  - Tensión de maniobra de diseño de la línea (ésta debe calcularse para la línea específica, en función de los parámetros y topología de la red eléctrica), para verificar que la longitud del entrehierro sea adecuada y no se produzca operación del entrehierro por alguna operación de restablecimiento de falla o por otra maniobra.
  - Características y número de aisladores por cadena (ya que el arreglo apartarrayos-entrehierro se coloca justo a través de la cadena de aisladores.
  - Información sobre esfuerzos mecánicos de diseño.

- b) Características ambientales de la región o regiones que atraviesan la línea
- Altitud sobre el nivel del mar. En realidad se llegan a hacer necesarios los perfiles topográficos para determinar la altitud de cada estructura en donde se instalarán apartarrayos. Este aspecto es importante para definir la longitud requerida del entrehierro, a través de las correcciones por condiciones atmosféricas diferentes a las normalizadas.
  - Nivel y tipo de contaminación de la región que atraviesa la línea. Para determinar las características de la envolvente polimérica del apartarrayos, que resulte más adecuada para proporcionar la distancia de fuga requerida dependiendo del nivel de contaminación.
  - Velocidad del viento (máxima, mínima y promedio)
  - Temperatura ambiente (máxima, mínima y promedio)
  - Humedad ambiente (máxima, mínima y promedio)

#### **2.4 Procedimiento para Determinar las Estructuras a Proteger**

- a) Análisis de la información estadística de fallas de la línea, para determinar las estructuras mayormente afectadas por las descargas atmosféricas.

Esta es una información muy valiosa, ya que permite hacer una primer selección en la cual se determina en que estructuras se tiene la necesidad de instalar apartarrayos para evitar interrupciones por flameo. Generalmente se va a encontrar que torres en puntos elevados o con valores de resistencia de conexión a tierra altos, son las mayormente afectadas por las descargas atmosféricas.

Generalmente CFE conserva registros anuales de salidas por causa de falla, por lo que resulta posible combinar esta información con los registros sobre cadenas de aisladores flameadas durante las tormentas eléctricas. Adicionalmente, CFE conserva también registros de las operaciones del equipo localizador de fallas (LF), el cual proporciona la localización aproximada de la falla, estableciendo la distancia de la torre fallada hasta cada una de las subestaciones a donde se conecta dicha línea. Con la información disponible es posible determinar las fases involucradas.

- b) Una vez seleccionadas las torres, el siguiente paso es decidir cuáles serán las fases a proteger.

Este aspecto va a estar muy influenciado por el tipo de torre y el número de circuitos que lleva. Generalmente, en torres de un solo circuito debe esperarse que las fases que pudieran estar involucradas en cadenas flameadas por rayos, sean las exteriores, que son las más expuestas a fallas de blindaje. Sin embargo, en torres donde la resistencia de conexión a

tierra es elevada, la fase central puede también estar expuesta a fallas por flameo inverso, particularmente en torres con ventanas reducidas.

En líneas de doble circuito de las comúnmente utilizadas por CFE, es decir con un circuito en cada lado de la torre en configuración quasi-vertical, es común encontrar que las fases superior e inferior son las mayormente afectadas por las descargas atmosféricas. Este fenómeno se debe por un lado a que durante un proceso de flameo inverso, la tensión en el copete (parte superior) de la torre afecta principalmente a la fase superior, mientras que el efecto de acoplamiento del hilo de guarda al conductor de la fase inferior, es reducido por la mayor distancia entre los dos conductores. Esto origina que cualquier sobretensión en el conductor inferior tenga muy poca atenuación por la presencia del hilo de guarda.

En los casos en que se hayan registrado recurrentemente fallas en las tres fases, es prudente decidir la instalación de apartarrayos en las tres fases. En forma similar, si las fallas se concentran en las fases superior e inferior, será suficiente proporcionar protección sólo a esos conductores.

- c) Es importante en el caso de líneas de doble circuito proteger ambos circuitos, en aquellas estructuras donde las estadísticas de fallas muestren problemas frecuentes.
- d) Debe considerarse también la posibilidad de que al proteger algunas estructuras elevadas, parte de la corriente del rayo puede afectar a las estructuras adyacentes a las protegidas.

Esto se confirmará con los primeros resultados de la instalación de los dispositivos de protección y en caso necesario, deberán también protegerse esas estructuras en las mismas fases.

- e) Realizar simulaciones digitales para confirmar que el esquema de protección fue el adecuado.

Esto es conveniente particularmente en el caso de proteger solo algunos de los conductores en los circuitos. Sin embargo, es también importante para confirmar el efecto en las torres vecinas.

- f) Si partimos de que el mecanismo de operación de los apartarrayos con entrehierro externo es como se ha evaluado y observado en líneas de distribución, podemos esperar que el valor de resistencia de conexión a tierra de estos dispositivos no debe afectar su operación, por lo que se recomienda no realizar mejora alguna a la red de tierras en torres protegidas con este tipo de dispositivo, siempre que se protejan todos los conductores en la torre.
- g) Una vez instalados los apartar rayos con entrehierro, debe registrarse una reducción notable de los índices de fallas en la línea, con respecto a los mayores niveles históricos registrados de fallas por descargas atmosféricas.

## CAPÍTULO 3

### SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN [5]

#### 3.1 Objetivo

Normalizar los criterios para medir, diseñar, construir, instalar, mantener y corregir la red de puesta a tierra destinada a la protección de Líneas de Transmisión Aéreas contra descargas atmosféricas y fallas de corto circuito.

#### 3.2 Definiciones

Para efectos de este capítulo se establecen las siguientes definiciones:

##### 3.2.1 Aluminotermia

Proceso por el cual se libera una gran cantidad de calor para fundir una soldadura exotérmica mediante una mezcla de pólvora y aluminio en polvo.

##### 3.2.2 Bajante

Es un conductor metálico que conecta al hilo de guarda con la red de puesta a tierra.

##### 3.2.3 Cola de rata

Conexión entre el hilo de guarda y la estructura.

##### 3.2.4 Contra-antena (Electrodo de puesta a tierra tendido en forma horizontal)

Conductor metálico desnudo, enterrado y tendido en forma horizontal, con una profundidad y longitud variable, que debe estar conectado a la estructura, y sirve para drenar corrientes de descarga atmosférica o de falla.

##### 3.2.5 Corriente de descarga atmosférica

Es la corriente provocada por un rayo que incide en la línea de transmisión aérea y que fluye por el sistema de puesta a tierra

##### 3.2.6 Corriente de falla

Es la corriente alterna que fluye durante una falla de corto circuito de los conductores de la línea de transmisión aérea a tierra.

##### 3.2.7 Electrodo de puesta a tierra

Cuerpo conductor o conjunto de elementos conductores agrupados y en contacto íntimo con el suelo y destinados a establecer una conexión con el mismo.

### 3.2.8 Electrodo de puesta a tierra vertical

Conductor metálico desnudo enterrado en forma vertical, con una profundidad y longitud variable y sirve para drenar corrientes de descarga atmosférica o de falla.

### 3.2.9 Estructura de una Línea de Transmisión

La unidad principal soporte, generalmente un poste, torre o marco que soporta los aisladores, conductores y accesorios de una línea de transmisión aérea.

### 3.2.10 Puesta a tierra

Conectar intencionalmente estructuras y/o equipos al sistema de puesta a tierra.

### 3.2.11 Red de puesta a tierra

Conjunto de electrodos de puesta a tierra, verticales y horizontales enterrados que drena a tierra las corrientes de descarga atmosférica y de falla, y es un punto de conexión seguro de puesta a tierra para el personal durante maniobras con Líneas de Transmisión aéreas energizadas o desenergizadas.

### 3.2.12 Relleno

Aportación de un material diferente al suelo natural del sitio en contacto directo con los electrodos de puesta a tierra y el suelo circundante. Este relleno puede ser orgánico o químico (intensificador) cuya función es disminuir la resistividad alrededor de los electrodos para lograr una resistencia baja de puesta a tierra.

### 3.2.13 Resistencia de puesta a tierra

Es la oposición al paso de la corriente eléctrica entre la red de puesta a tierra y un punto remoto, medida en  $\Omega$  (Ohms).

### 3.2.14 Resistividad

Es la resistencia eléctrica específica de un material medida en  $\Omega$ -m (Ohms-metro).

Es la constante de proporcionalidad entre la caída de potencial por unidad de longitud y la densidad de corriente (corriente por unidad de área)

### 3.2.15 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Constituye una herramienta indirecta de exploración de los materiales que conforman el subsuelo para obtener modelos electroestratificados (resistividad-espesor) horizontalmente.

### 3.2.16 Resistividad aparente ( $\rho_a$ )

Es la que se obtiene en el trabajo de campo, de acuerdo a un método de medición de resistividad (Wenner) para cada intervalo de medición.

### 3.2.17 Resistividad recomendada de Diseño

Es la resistividad uniforme ( $\rho_d$ ) equivalente que se obtiene a través de la interpretación de resultados de campo por medio de un promedio aritmético del valor máximo y mínimo de las mediciones realizadas.

$$\rho_d = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2}$$

Donde;

$\rho_d$  = Resistividad recomendada de diseño. ( $\Omega$ -m).

$\rho_{\max}$  = Resistividad máxima medida. ( $\Omega$ -m)

$\rho_{\min}$  = Resistividad mínima medida. ( $\Omega$ -m)

### 3.2.18 Sistema de puesta a tierra

Es el conjunto de elementos que sirven para drenar la corriente de descarga atmosférica o de falla de corto circuito de las líneas de transmisión aéreas, que incluye:

- hilo(s) de guarda,
- cola(s) de rata,
- estructura,
- bajante,
- red de puesta a tierra,
- tierra natural o relleno,
- conectores.

### 3.2.19 Conectores

Elementos utilizados para unir dos partes metálicas mediante compresión o atornillables o soldables, de tal manera que se garantice el contacto permanente entre ellas.

### 3.3 Diseño e instalación de los sistemas de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas en construcción

El diseño e instalación de los sistemas de puesta a tierra para todas y cada una de las estructuras debe efectuarse según lo indicado a continuación:

3.3.1 Medir la Resistividad del Subsuelo en cada punto donde se vaya a localizar una estructura. Esto debe efectuarse de acuerdo con el procedimiento indicado en el punto 3.4, de este capítulo. Los resultados obtenidos deben ser reportados en el formato 1 “Medición de Resistividad del Subsuelo para Líneas de Transmisión en Construcción”.

3.3.2 Determinar la resistividad recomendada de diseño.

3.3.3 Diseñar el sistema de puesta a tierra de cada torre que compone la línea, tomando en cuenta la resistividad recomendada de diseño. Como parte la red de puesta a tierra, en la tabla 3.1 se describe la longitud de las contra antenas y sus electrodos por pata, que deben ser instaladas en función de la “resistividad recomendada de diseño” independientemente del arreglo instalado de acuerdo a lo indicado en la tabla 3.1. La resistencia de puesta a tierra medida tiene que ser menor o igual que  $10 \Omega$  excepto para cuando la resistividad recomendada de diseño exceda los 1 000  $\Omega$ -m.

**Tabla 3.1 Contrantenas y sus electrodos para la red de puesta a tierra de líneas de transmisión en construcción**

INTERVALO DE RESISTIVIDAD RECOMENDADA DE DISEÑO ( $\Omega$ -m)	LONGITUD DE CONTRA ANTENAS Y NUMERO DE SUS ELECTRODOS POR PATA		FIGURA No.
	LONGITUD DE CONTRA-ANTENA POR PATA (m)	No. DE ELECTRODOS VERTICALES P/CONTRA -ANTENA (varillas)	
menor que 100	3	1	1
100 a 300	6	2	2
300 a 500	12	3	3
500 a 750	24	5	4
750 a 1000	30	6	5
mayor que 1000 *	30	6	5

\* Realizar estudio de confiabilidad

3.3.4 Elaborar lista y especificaciones de materiales a emplear.

3.3.5 Incluir el suministro de los materiales, mano de obra, acarreo, herramientas y equipos y todos los insumos necesarios para una correcta instalación. Para el suministro de cable de la red de puesta a tierra debe considerarse el cable conductor necesario por el concepto del punto de conexión en la estructura a la red de puesta a tierra.

Las contra-antenas de la red de puesta a tierra se deben instalar en zanjas de 0,3 m de ancho, con las siguientes profundidades:

**Tabla 3.2 Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se instalarán**

Longitud	Tipo de terreno
0,8 m	En terrenos no cultivables
1,5 m	En terrenos de cultivo
0,4 m	En terreno rocoso

**Tabla 3.3 Especificación de materiales para la construcción de los sistemas de puesta a tierra**

Concepto	Descripción	Norma o especificación aplicable
Alambre o Cable de Cobre	Alambre de cobre electrolítico, en sección circular, temple semiduro, de sección transversal de 33,62 mm <sup>2</sup> o mayor, Conductividad I.A.C.S. a 20 8C 97.66 %.	NOM 063 SCFI, NMX-J 002, NMX-J 035, NMX-J 036, NMX-J-012, CFE E0000-32
o Cable de acero recubierto de cobre	Cable de acero con recubrimiento de cobre soldado (30 ACS 7 No. 9) de sección transversal de 46,44 mm <sup>2</sup> o mayor, diámetro nominal de 8,71 mm de resistencia de 1,27481 Ω/km	CFE E0000-33
Electrodos de tierra	Varilla de acero con recubrimiento de cobre electrolítico de acuerdo a la especificación.	CFE 56100-16
Conexiones soldables	Conexiones soldables tipo exotérmico prototipo probado de acuerdo con los requerimientos establecidos en la norma.	IEEE-STD 837
<b>Notas:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las normas o especificaciones indicadas corresponden a las vigentes.</li> <li>• No se acepta el uso de conectores a compresión o atornillables.</li> </ul>		

- 3.3.6 Previo a la instalación de la red de puesta a tierra, es requisito indispensable que el contratista envíe anticipadamente a CFE para su aprobación, la Ingeniería de detalle y memoria técnica de la red de puesta a tierra (informe de valores medidos de resistividad aparente del suelo, memoria de cálculo de la resistividad recomendada de diseño, arreglo de la red de puesta a tierra a instalar) para cada una de las estructuras que componen la línea de transmisión. La instalación de la red de puesta a tierra se hará una vez que haya sido autorizado el diseño de cada estructura por CFE. Esto en ningún momento libera de la responsabilidad al contratista de entregar la red de puesta a tierra, de acuerdo con lo solicitado [5].
- 3.3.7 Una vez terminada la instalación de la red de puesta a tierra, se procede a la medición de la resistencia de acuerdo con lo establecido en el punto 3.5, reportando los resultados de las mediciones según lo indicado en el formato 2 del anexo 1, "Medición de la resistencia de la red de puesta a tierra de la estructura para líneas de transmisión en construcción". El criterio de aceptación de la red de puesta a tierra será el valor medido de resistencia a tierra menor o igual que  $10 \Omega$  con el hilo de guarda desconectado, excepto en el caso de que la resistividad recomendada de diseño del subsuelo sea mayor que  $1000 \Omega\text{-m}$ , en cuyo caso el contratista debe instalar el arreglo de 30 metros de contra antena y 6 electrodos de tierra por pata.

### **3.4 Medición de resistividad aparente del subsuelo en líneas aéreas en construcción.**

Las mediciones de resistividad aparente del subsuelo se deben realizar en época de estiaje debido a que son las condiciones más críticas del terreno.

Una vez determinada la posición de las estructuras y por consecuencia las cimentaciones de las mismas, se procede a ejecutar la medición de la resistividad aparente del subsuelo, siguiendo el método de los cuatro electrodos o de Wenner indicado en el anexo 1. La corriente de inyección de prueba debe ser mayor o igual que 10 mA.

La medición se debe hacer para todas las estructuras, considerando su centro como el punto base en el sentido de la línea representado en la figura 3.1. En aquellos casos donde no sea posible realizar la medición en ese sentido, se puede realizar en cualquier sentido conservando el centro de la estructura como base y se debe indicar en el formato 1 del anexo1.

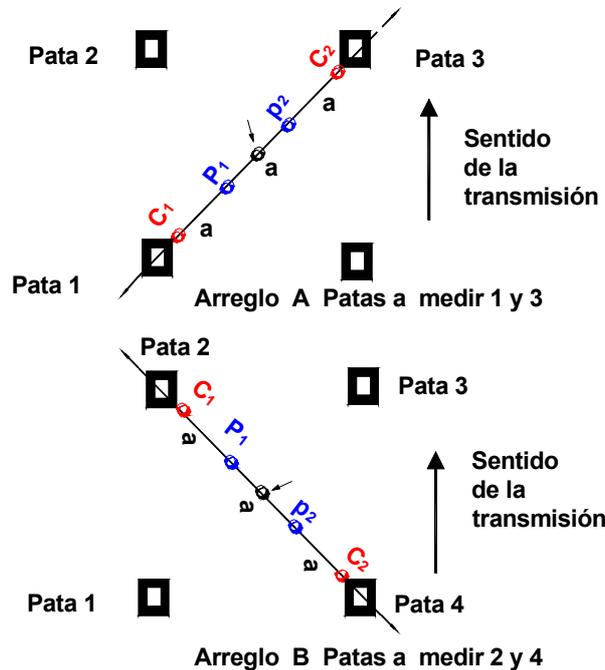


Figura 3.1 Arreglos A y B para la medición de resistividad aparente del subsuelo utilizando el método de Wenner en líneas aéreas en construcción

En cualquiera de los arreglos A o B a emplear, las mediciones (con el método de Wenner) deben obtenerse conforme al formato 1 Anexo1.

### 3.5 Medición de la resistencia de la red de puesta a tierra para líneas de transmisión aéreas en construcción.

Para la medición de la resistencia de la red de puesta a tierra, se debe utilizar el método de caída de potencial y debe realizarse en época de estiaje debido a que son las condiciones más críticas.

Este método se basa en la inyección de una corriente de prueba en el electrodo bajo análisis (red de puesta a tierra). Se toman mediciones de la tensión a diferentes distancias entre el electrodo bajo análisis E y el electrodo auxiliar de potencial P, el valor representativo de la resistencia se tendrá cuando:

- la diferencia máxima  $\Delta R$  entre mediciones sea menor que  $1 \Omega$  para cuando el valor máximo medido sea menor que  $5 \Omega$ .
- la diferencia máxima  $\Delta R$  entre mediciones sea menor que el 15% para cuando el valor máximo medido sea mayor que  $5 \Omega$ .

$\Delta R$  se determina de acuerdo al formato 2 del anexo1.

Si no se cumple con lo indicado en los incisos anteriores, la distancia  $d_{E-C}$  de la figura 3.2 se debe duplicar al igual que las distancias del electrodo **P**, hasta que se cumplan las condiciones de  $\Delta R$ .

El procedimiento para la realización de las mediciones con el método de caída de potencial se debe realizar con el hilo de guarda desconectado y con un medidor de resistencia de baja frecuencia (60 a 200 Hz). La corriente de inyección de prueba debe ser mayor o igual que 10 mA, de acuerdo con lo siguiente:

La dirección de la medición debe ser perpendicular o longitudinal a la línea aérea, como se ilustra en la figura 3.3.

- a) Instalar el electrodo auxiliar de corriente C, y su cable asociado en la dirección seleccionada a 50 m del electrodo E cuando la longitud de la contra-antena sea menor o igual que 12 m y para longitudes mayores, la distancia debe ser de 75 m del electrodo E.
- b) Colocar el electrodo auxiliar de potencial P y su cable asociado en la dirección al electrodo de corriente, a 52 % de la distancia  $d_{E-C}$ .
- c) Se realiza la primera medición de la resistencia del electrodo E, conectando el medidor de resistencia de acuerdo a la figura 3.2 y a las instrucciones del equipo de medición empleado.
- d) La segunda medición se realiza instalando el electrodo P, a 62 % de la distancia  $d_{E-C}$ .
- e) Finalmente la tercera medición se efectúa instalando el electrodo P, a 72 % de la distancia  $d_{E-C}$ .
- f) Las tres mediciones se deben registrar en el formato 2 del anexo1.
- g) El valor representativo de la resistencia ( $R_2$ ) de la red de puesta a tierra se considera el correspondiente a la lectura realizada cuando el electrodo de potencial se encuentre al 62 % de la distancia  $d_{E-C}$  una vez cumplido el criterio para  $\Delta R$ .

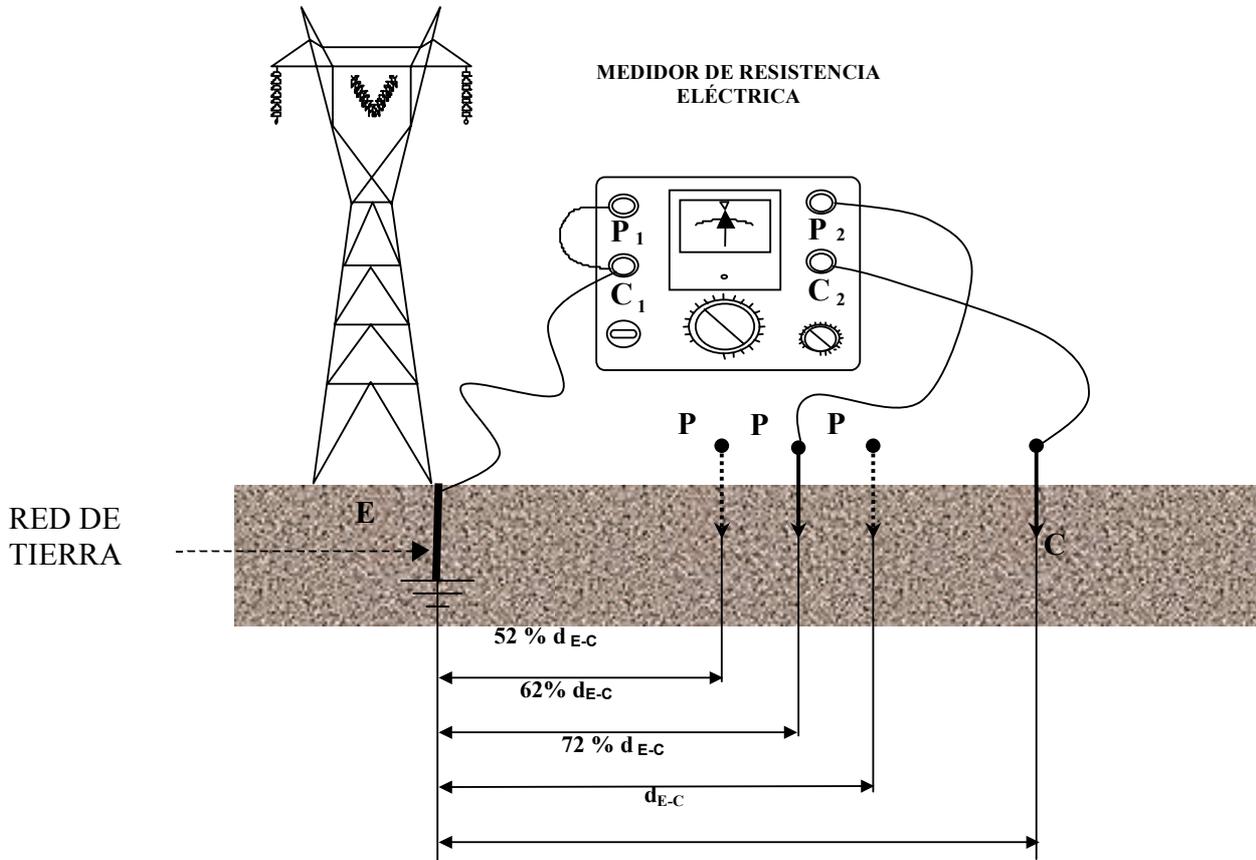


Figura 3.2 Método de medición de resistencia a tierra por caída de potencial.

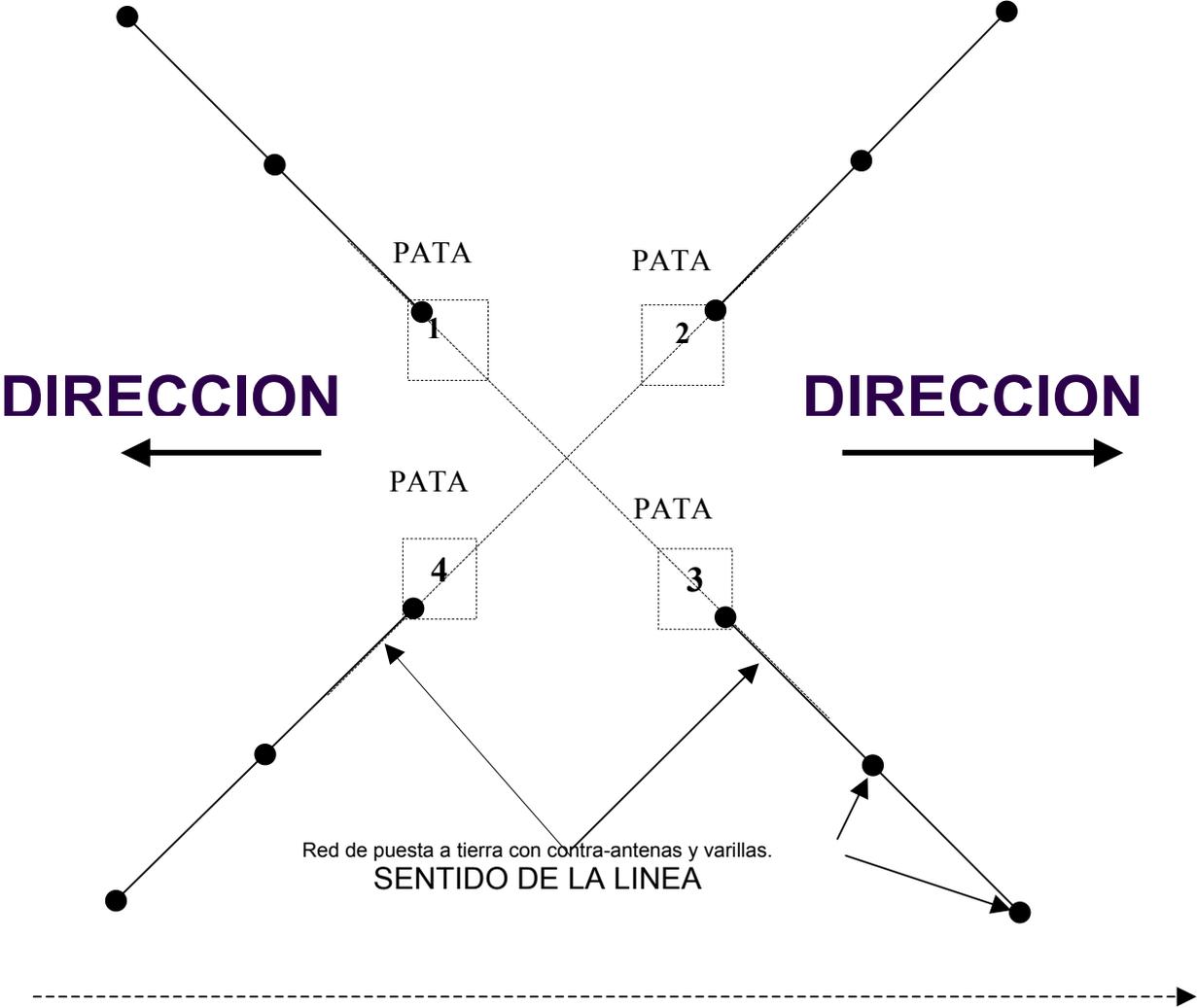


Figura3.3 Direcciones preferentes para la medición de la resistencia de la red de tierra (vista de planta).

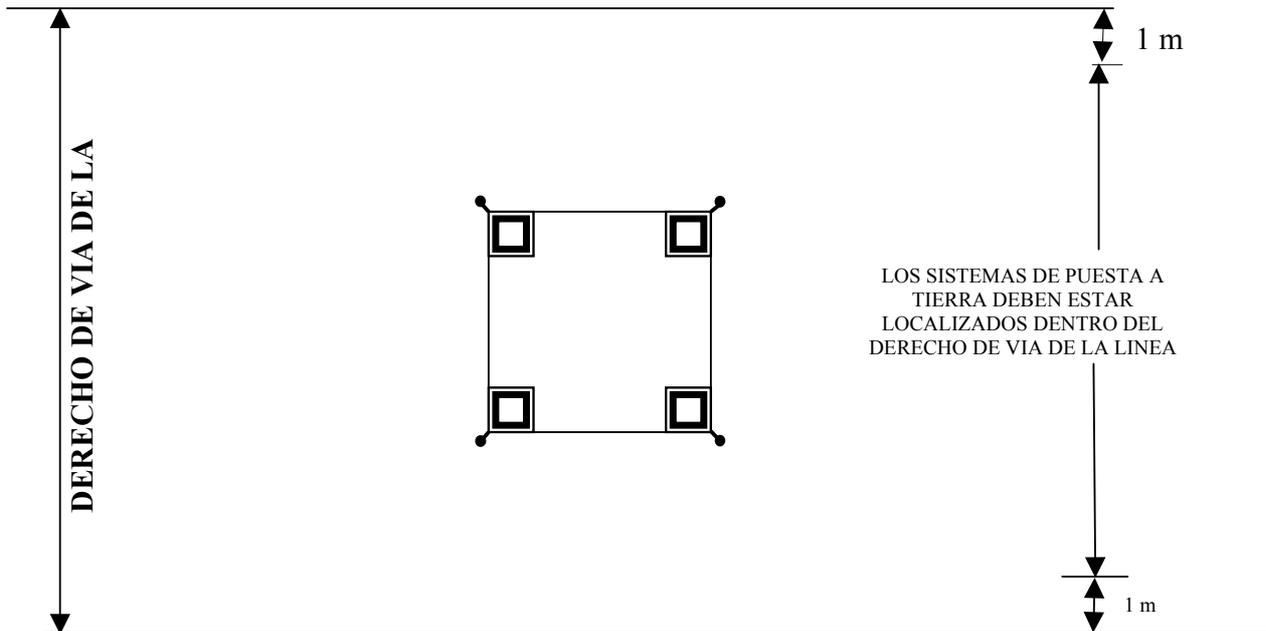


Figura 3.4. Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 0 a 100  $\Omega \cdot m$ .

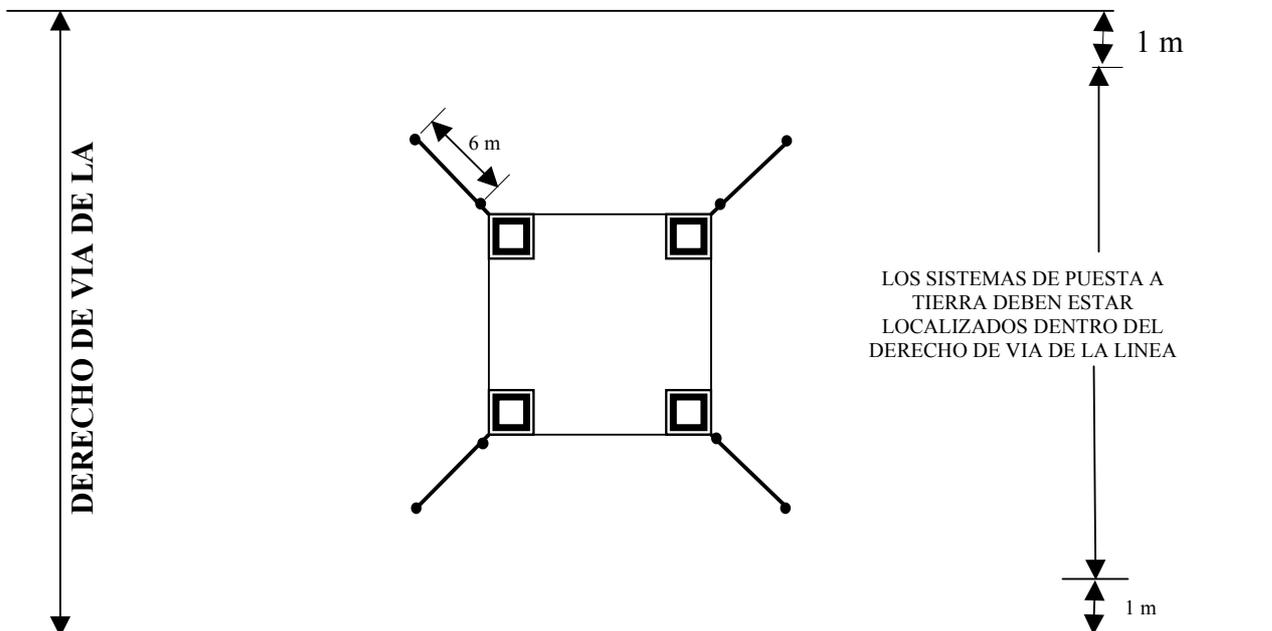


Figura 3.5 Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 101 a 300  $\Omega \cdot m$

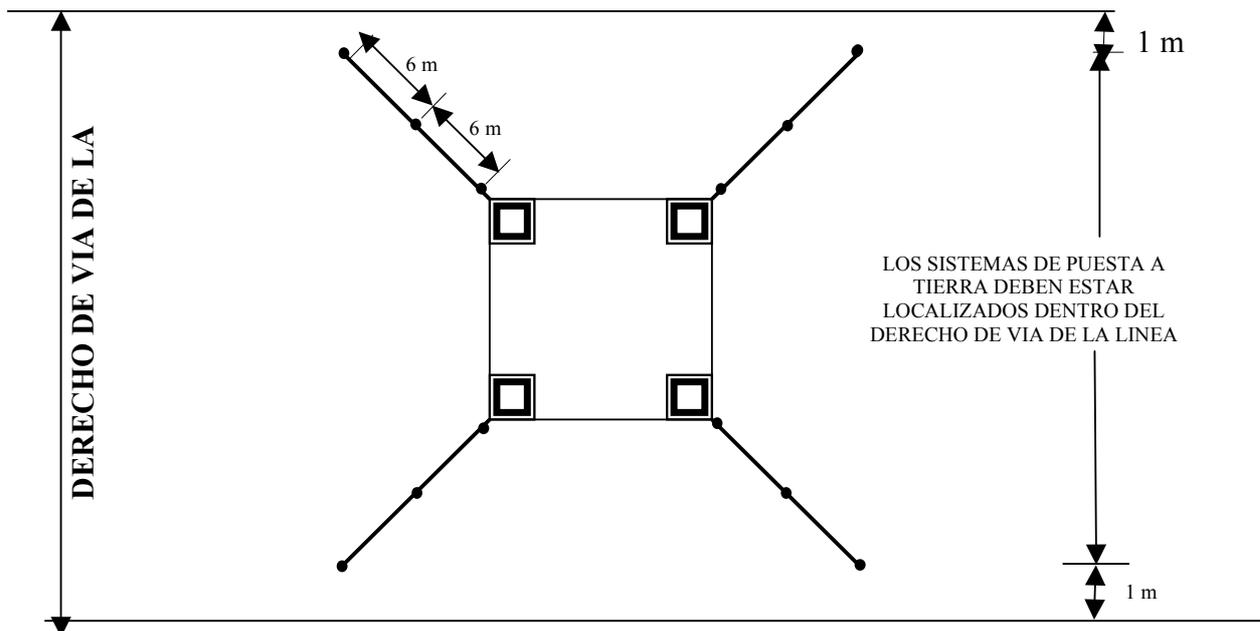


Figura 3.6 Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 301 a 500  $\Omega$ -m.

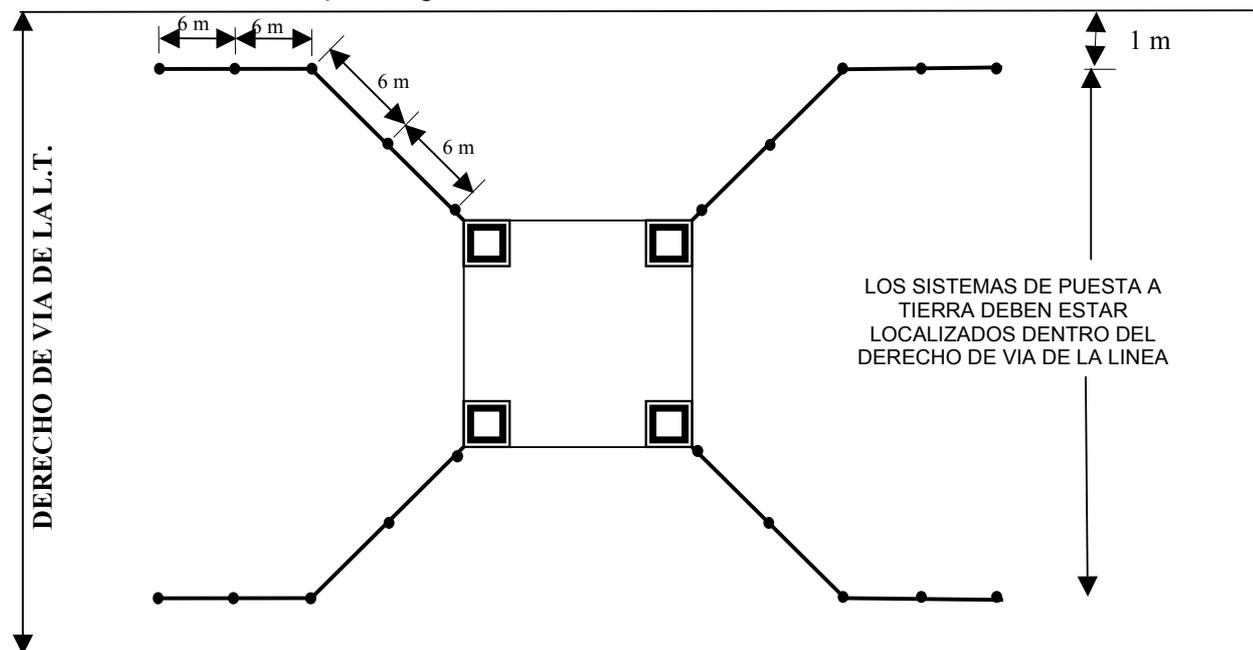


Figura 3.7 Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 501 a 750  $\Omega$ -m.

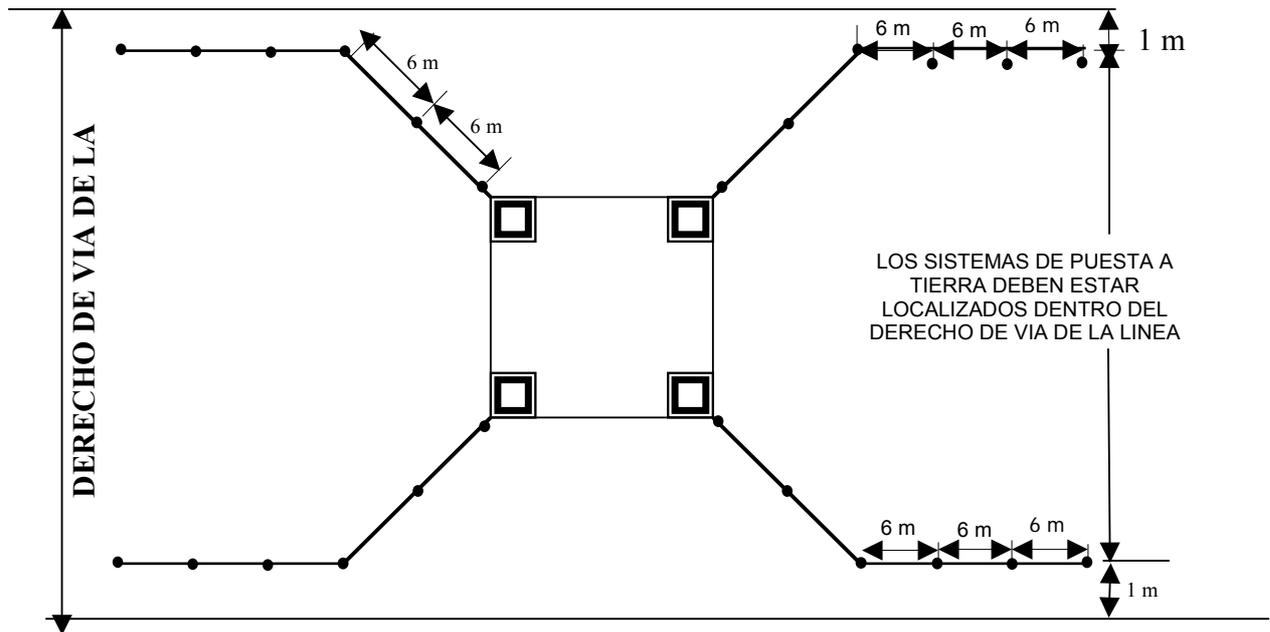


Figura 3.8 Sistema de puesta a tierra para estructura auto soportada de línea de transmisión con terreno que tenga una resistividad de diseño en un intervalo de 751 a 1000  $\Omega$ -m y mayores.

### 3.6 Medición de la resistividad del subsuelo y resistencia eléctrica de la red de puesta a tierra en líneas de transmisión aéreas en operación

#### 3.6.1 Medición de Resistividad del subsuelo

Para medir la resistividad del subsuelo, se debe utilizar el método de Wenner ilustrado en el Apéndice A.

Se debe medir la resistividad del subsuelo colocando el instrumento de medición en el centro de la estructura (mojonera), y los electrodos verticales se deben colocar paralelos al sentido de la línea de transmisión aérea, con una separación de 1,6 m para la primera medición y 3,2 m para la segunda medición (figura 3.9). Cuando no sea práctico colocar los electrodos verticales paralelos al sentido de la línea de transmisión aérea, la medición se puede realizar en sentido perpendicular.

Los valores medidos deben registrarse en el formato 3 del anexo1 y el valor final de resistividad debe estimarse de acuerdo a lo indicado en el inciso 3.2.17.

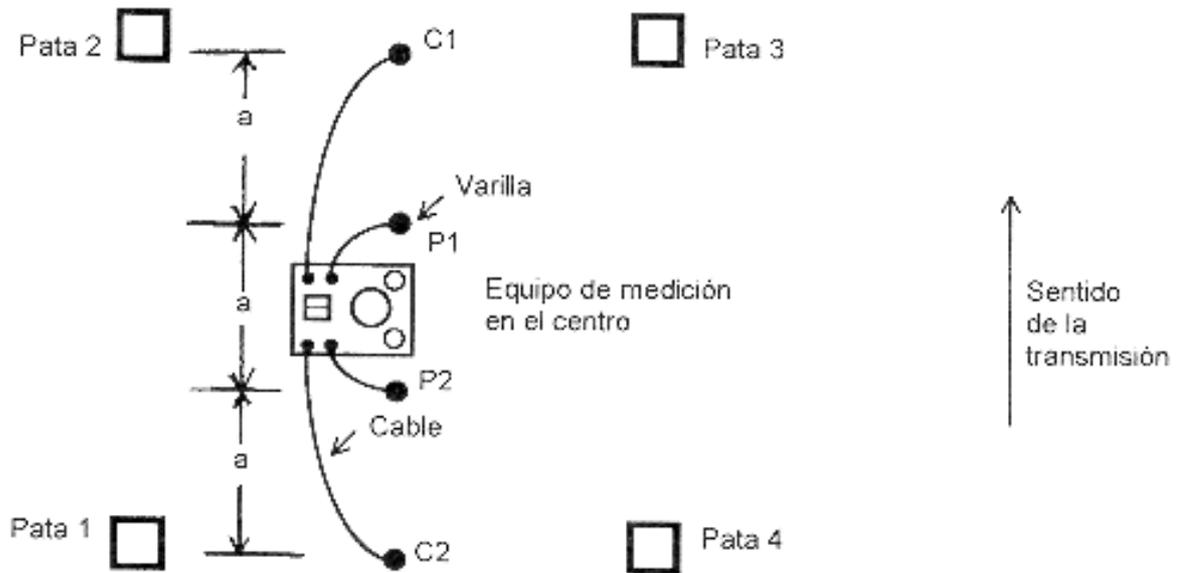


Figura 3.9 Medición de la resistividad del subsuelo (vista de planta)

### 3.6.2 Medición de la resistencia de la red de puesta a tierra para líneas de transmisión aéreas en operación.

La metodología de la medición de resistencia eléctrica de la red de puesta a tierra está en función del equipo de medición utilizado y la conexión del hilo de guarda, de la siguiente manera:

1. Cuando el hilo de guarda esté conectado y se utilice equipo de medición de alta o baja frecuencia, la distancia de instalación de los electrodos auxiliares de corriente **C** y de potencial **P** con respecto a la pata de la torre, deben ser de 75m y 46,5m respectivamente. (Anexo 1). El valor medido corresponde al valor de resistencia.
2. Cuando el hilo de guarda esté desconectado y se utilice equipo de medición de baja frecuencia debe aplicarse lo indicado en el punto 3.5.

Los equipos de medición de baja frecuencia deben tener un rango de frecuencia de 60 a 200 Hz y los equipos de alta frecuencia arriba de 25 000 Hz.

La dirección de la medición se debe realizar de preferencia perpendicular a la línea en cualquier sentido, de no poder realizarla en esa dirección, se puede realizar longitudinalmente a la línea y, en el último de los casos en forma diagonal siempre y cuando no existan contra-antenas instaladas. En el caso de estructuras de deflexión, la medición se debe hacer en la dirección de la cruceta (figura 3.10).

#### 4.6.2.1 Criterios de aceptación para la medición de la resistencia con resistividad del subsuelo menor que 100 $\Omega$ -m.

Por lo general cuando la resistividad del subsuelo es menor que 100  $\Omega$ -m, el valor de la resistencia eléctrica de la red de puesta a tierra es menor que 10  $\Omega$ , por esta razón se mide la resistencia con equipo de baja frecuencia e hilo de guarda conectado con las siguientes consideraciones:

1. Si el valor medido es menor que 5  $\Omega$  se considera aceptable.
2. Si el valor medido es mayor que 5  $\Omega$ , se verifica que las conexiones a tierra se encuentren instaladas, de lo contrario se corrigen y se vuelve a medir la resistencia, cuyo valor esperado es menor que 5  $\Omega$ ; de no ser así, la medición debe repetirse.
3. Si el valor obtenido en la nueva medición es mayor que 5  $\Omega$ , debe desconectarse el hilo de guarda y medir nuevamente. Si el nuevo valor es mayor que 10  $\Omega$ , se debe corregir y/o mejorar la red de puesta a tierra.
4. Todos los valores medidos deben registrarse en el formato 2 contenido en el anexo 1.

En caso de utilizar equipo de alta frecuencia, la medición se realiza sin desconectar el hilo de guarda y si la resistencia es menor que  $10 \Omega$ , este valor se considera aceptable y se anota en el formato 2. En caso de que el valor sea mayor que  $10 \Omega$ , se debe corregir y/o mejorar la red de puesta a tierra.

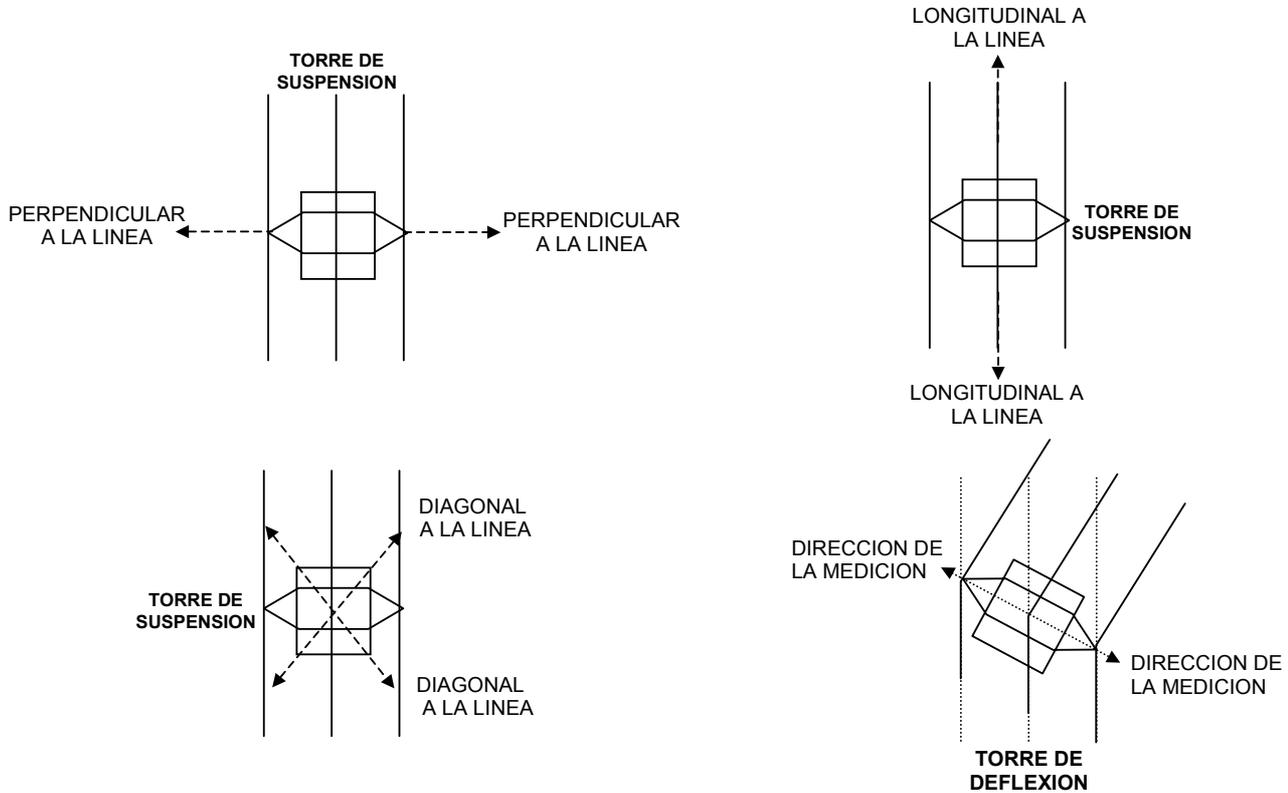


Figura 3.10. Dirección de la medición para torres

### 3.6.2.2 Criterio de aceptación para la medición de resistencia con resistividad del subsuelo mayor que $100 \Omega\text{-m}$ .

La medición de la resistencia con equipo de baja frecuencia, se realiza con el hilo de guarda conectado a la estructura con las siguientes consideraciones:

1. Si el valor medido es menor que  $3 \Omega$  se considera aceptable.
2. Si el valor medido es mayor que  $3 \Omega$ , se verifica que las conexiones a tierra se encuentren instaladas, de lo contrario se corrigen y se vuelve a medir la resistencia, cuyo valor esperado es menor que  $3 \Omega$ ; de no ser así, la medición debe repetirse.
3. Si el valor obtenido en la nueva medición es mayor que  $3 \Omega$ , debe desconectarse el hilo de guarda y medir nuevamente. Si el nuevo valor es mayor que  $10 \Omega$ , se debe corregir y/o mejorar la red de puesta a tierra.
4. Todos los valores medidos deben registrarse en el formato 2 del anexo 1.

En caso de utilizar equipo de alta frecuencia, la medición se realiza sin desconectar el hilo de guarda y si la resistencia es menor que  $10 \Omega$ , este valor se considera aceptable y se anota en el formato 2. En caso de que el valor sea mayor que  $10 \Omega$ , se debe corregir y/o mejorar la red de puesta a tierra.

3.6.3 Diagrama de flujo para el criterio de aceptación para la medición de la resistencia de la red de puesta a tierra en estructuras en operación.

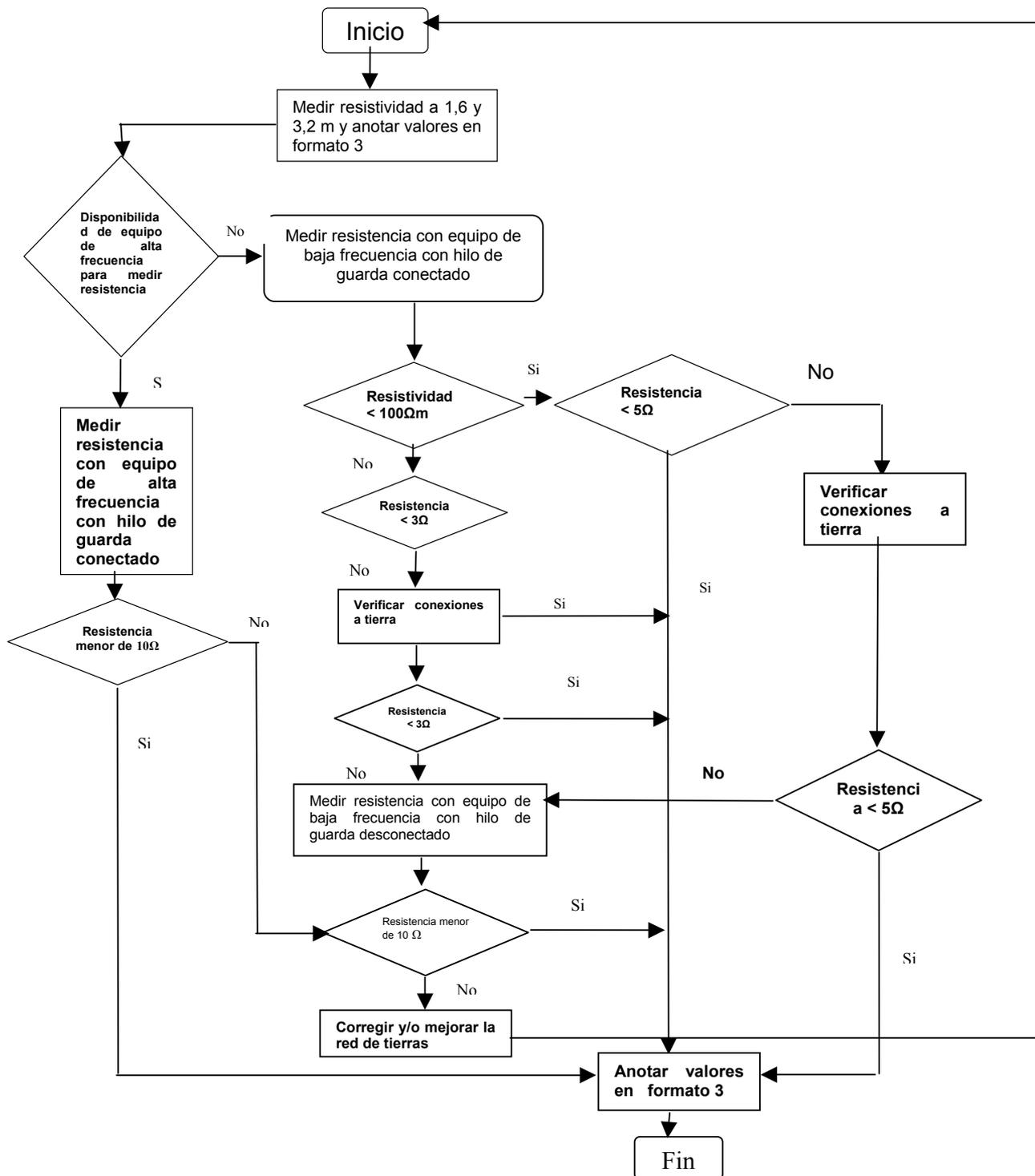


Figura 3.11 Diagrama de flujo para la medición de resistencia de la red de puesta a tierra en estructuras de líneas aéreas en operación.

### 3.7 Mantenimiento de las redes de tierra convencionales

#### 3.7.1 Actividades

Los sistemas de puesta a tierra requieren de mantenimiento debido principalmente a: envejecimiento de sus elementos, corrosión de conexiones, cambios en los valores de resistividad del subsuelo (debido a condiciones climáticas y/o agrícolas) y vandalismo principalmente.

El mantenimiento de los sistemas de puesta a tierra se realiza en forma periódica considerando las siguientes actividades fundamentales:

- medición de resistividad del subsuelo de acuerdo al anexo1.
- medición de resistencia de puesta a tierra de la estructura por el método indicado en el inciso 3.6.2.
- revisión de las conexiones de cables de guarda a la estructura (cola de rata), bajantes de las patas de la estructura a la cimentación
- reparación de los sistemas de puesta a tierra que presenten daños físicos,
- corrección y/o mejoramiento de la red de puesta a tierra

#### 3.7.2 Método de corrección.

Se deben corregir las redes de puesta tierra que no cumplan con los criterios de aceptación que se indican en el punto 3.6, así como si la estructura tiene antecedentes de falla por flameo inverso y las estructuras adyacentes a la misma, de acuerdo a la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Correcciones para mantenimiento de redes de tierra

Intervalo de resistividad ( $\Omega$ -m)	Sistema de puesta a tierra para estructuras				Cimentación	
	Longitud de contra-antena ( 4 piezas)		Número de electrodos por contra-antena		Concreto	acero
	Cimentación de concreto	Cimentación de acero	Cimentación de concreto	Cimentación de acero		
Menor que 100	3	0	1	0	18	= =
100 a 300	6	6	2	1	19A	19B
300 a 500	12	12	3	2	20A	20B
500 a 750	24	24	5	4	21A	21B
750 a 1 000	30	30	6	5	22A	22B
Mayor que 1 000	Diseño especial				= =	= =

Nota: En [5] se indican algunos arreglos especiales.

Las contra-antenas deben conectarse a cada pata de la estructura, dispuestas a 45° con relación a la trayectoria de la línea.

Las contra-antenas deben alojarse en cepas que tengan una profundidad mínima de 0,5 m, con excepción de los terrenos de cultivo donde la excavación debe ser de 1,0 m para prevenir daños por implementos agrícolas y de 0,4 m para terreno rocoso.

Los electrodos verticales deben quedar instalados equidistantemente, conectando siempre un electrodo en el extremo de la contra-antena.

Todas las conexiones que se lleven a cabo se deben hacer empleando soldadura de aluminotermia en sitio, utilizando los moldes de grafito de uso rudo y cargas de soldadura.

### 3.7.3 Materiales a Utilizar

- alambre o cable de cobre con sección transversal mínima de 33,62 mm<sup>2</sup>,
- alambre de acero con recubrimiento de cobre con sección transversal mínima de 33,62 mm<sup>2</sup>,
- cable de acero con recubrimiento de cobre soldado (30 ACS 7 No. 9) de sección transversal mínima de 46,44 mm<sup>2</sup>, diámetro nominal de 8,71 mm,
- cable de acero galvanizado mínimo de 0,95 cm de diámetro, recomendado para usarse en zonas de vandalismo,
- electrodos verticales de acero recubierto de cobre de 3,0 m x 1,6 cm,
- soldadura de Aluminotermia,
- relleno intensificador (químico o natural).

## CAPÍTULO 4

### INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA ATP/EMTP [4]

En este capítulo se hace una breve introducción de las características principales del poderoso programa de transitorios electromagnéticos ATP (Alternative Transients Program) y al *software* (programación) adicional como ATPDraw, ATP Control Center y PlotXY.

Las redes de los sistemas de potencia están sujetas a varias formas de fenómenos transitorios que van desde las oscilaciones electromecánicas relativamente lentas, asociadas con las máquinas síncronas y sus primomotores, hasta las variaciones comparativamente rápidas de tensión y corriente ocasionadas por cambios repentinos, tales como los efectos de las descargas atmosféricas, las maniobras de interruptores, fenómenos de resonancia y de ferorresonancia, entre otros.

Las descargas atmosféricas son causa común de fallas y las subsecuentes interrupciones del suministro, pero las fallas pueden ocurrir y de hecho ocurren por muchas otras razones. El mal funcionamiento de un sistema puede ocurrir por diferentes vías y tiene una gran variedad de consecuencias, por ejemplo, la apertura de una fase en un circuito trifásico puede reordenar las inductancias y capacitancias del circuito de tal manera que se produce un circuito resonante que puede provocar valores muy altos de tensión y/o corriente. Las sobretensiones transitorias son producidas durante la apertura y cierre de interruptores.

A través de los años, las tensiones a las que se transmite la potencia eléctrica a grandes distancias se han incrementado continuamente y muchos sistemas que existen en operación manejan tensiones en 400 kV, 500 kV, 750 kV y aún 1 000 kV. Las sobretensiones generadas por el sistema están directamente relacionadas con la tensión de línea y sus magnitudes se incrementan tanto como se incremente la tensión de línea; por lo que en tensiones de operación de 400 kV y más, las sobretensiones generadas por el sistema juegan una parte muy importante al determinar el nivel de aislamiento del mismo. Aunque el nivel de aislamiento del sistema debe ser suficientemente alto para no poner en peligro su confiabilidad, al mismo tiempo hay fuertes incentivos económicos (minimización de costos) para conservarlo lo más bajo posible.

Aparentemente los problemas de transitorios no pueden resolverse manualmente, excepto en los circuitos simples que contienen un pequeño número de elementos usando por ejemplo el método de transformación de Laplace. La ayuda de la computación es esencial cuando se estudian los disturbios debidos a transitorios. Sin esa ayuda, muchos problemas no podrían resolverse. Por otra parte, es necesario hacer énfasis que la computadora es una herramienta importante que permite analizar y experimentar; pero no es un sustituto del Ingeniero. El aprendizaje para trabajar analítica y experimentalmente con transitorios es un prerrequisito, ya que las técnicas de computación se deben ejercer con bastante juicio. Los **fenómenos transitorios en Sistemas Eléctricos de Potencia** son múltiples y muy complejos de entender, comparados con el comportamiento de los sistemas de potencia en estado permanente

Básicamente existen dos tipos de computadoras para calcular o reproducir los transitorios eléctricos. El primero es el Analizador de Transitorios de Redes Eléctricas (TNA), el cual puede ser un equipo analógico o digital. El TNA consta de modelos de transformadores, capacitores shunt y serie, reactores, cargas, líneas de transmisión, cables, máquinas rotatorias y apartarrayos. Los modelos de los elementos son ajustables y se pueden arreglar para reproducir las características eléctricas de cualquier tipo de dispositivo común. El modelo de red está construido con la interconexión de varios modelos de elementos individuales. Los TNA son caros, en consecuencia su uso es restringido.

El segundo método es la simulación de transitorios eléctricos por medio de programas digitales. Las computadoras personales son hoy en día poderosas y por ende apropiadas para ejecutar cualquier clase de simulaciones sofisticadas.

Ha habido un incremento en el uso de computadoras híbridas en los años recientes, con las que se combinan ambas técnicas, la analógica y la digital y tratan de optimizar su potencial. Tales simuladores han sido fabricados por ejemplo para representar sistemas HVDC (Sistemas de alto voltaje en corriente directa) para probar los equipos de control y protección. El último adelanto en el campo de la simulación de transitorios electromagnéticos son los simuladores digitales de tiempo real basados en el cálculo numérico con multiprocesadores.

En este capítulo se estudian, los métodos numéricos aplicados directamente en el dominio del tiempo para calcular los transitorios electromagnéticos en circuitos que constan de elementos RLC. Particularmente será descrito el método de integración muy conocido (trapezoidal), que se usa en el programa de transitorios electromagnéticos ATP-EMTP [3.]

#### 4.1 Integración numérica usando la regla trapezoidal.

Los programas digitales no pueden simular en forma continua los fenómenos transitorios, sino que lo hacen en intervalos discretos de tiempo, lo que es llamado el tiempo de integración  $\Delta t$ . Eso conduce a errores de truncamiento, los que pueden acumularse paso a paso y causar divergencia de la solución verdadera. El comportamiento de una red eléctrica en estado transitorio puede ser expresado a través de ecuaciones diferenciales, que describen las relaciones entre tensiones y corrientes. Estas ecuaciones deben resolverse por métodos de integración numérica. Como se explica en la figura 4.1, el estado desconocido del sistema en  $t = t$ , está determinado por el estado que le precede, que fue calculado en  $t = t - \Delta t$ . El tiempo de integración  $\Delta t$  se considera tan pequeño que las ecuaciones diferenciales son aproximadamente diferencia de ecuaciones.

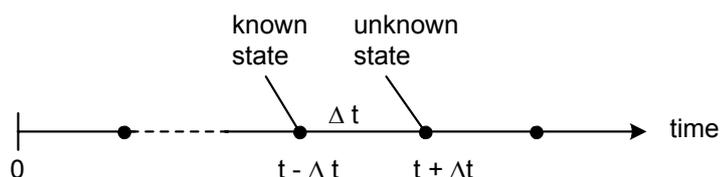


Figura 4.1 Evolución del cálculo de los tiempos de integración discretos.

La red eléctrica es descrita usando ecuaciones nodo, por ejemplo: las tensiones de nodo son cantidades desconocidas para ser determinadas. Las corrientes en las ramas se expresan como funciones de las tensiones de nodo.

#### 4.1.1 Resistencia.

Una resistencia es simplemente representada por la ley Ohm, utilizando las definiciones de tensión de nodo y corriente de rama como se muestra en la Figura 4.2.

$$i_{km}(t) = \frac{1}{R} [v_k(t) - v_m(t)] \quad (4.1)$$

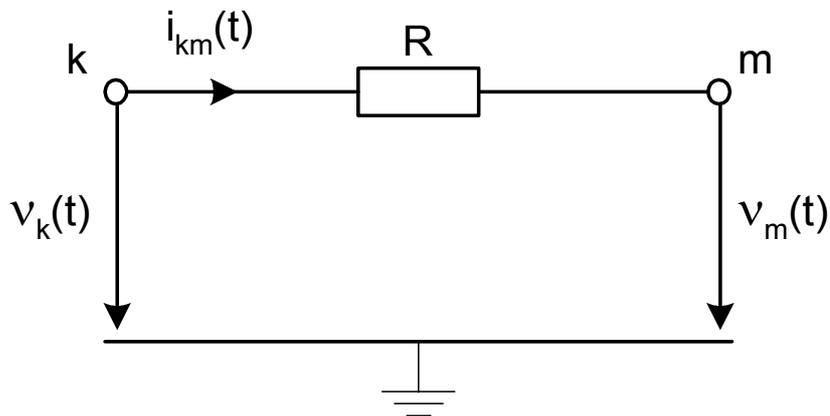


Figura 4.2 Representación de la resistencia.

#### 4.1.2 Capacitancia

Considere la Figura 4.3 para la capacitancia de C entre nodos k y m.

$$i_{km}(t) = C \frac{d[v_k(t) - v_m(t)]}{dt} \quad (4.2)$$

Supongamos  $i_{km}(t - \Delta t)$ ,  $V_k(t - \Delta t)$  y  $V_m(t - \Delta t)$  son conocidas desde el paso de integración anterior. La ecuación (4.2) será integrada por un paso de integración  $\Delta t$ :

$$v_k(t) - v_m(t) = v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t) + \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_{km}(t - \Delta t) dt \quad (4.3)$$

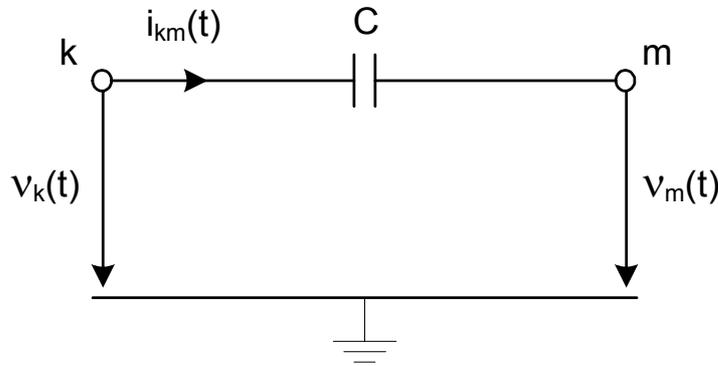


Figura 4.3 Capacitancia entre los puntos k, m

La integración de  $i_{km}(t)$  es ejecutada por la regla trapezoidal como se muestra en la Figura 4.4.

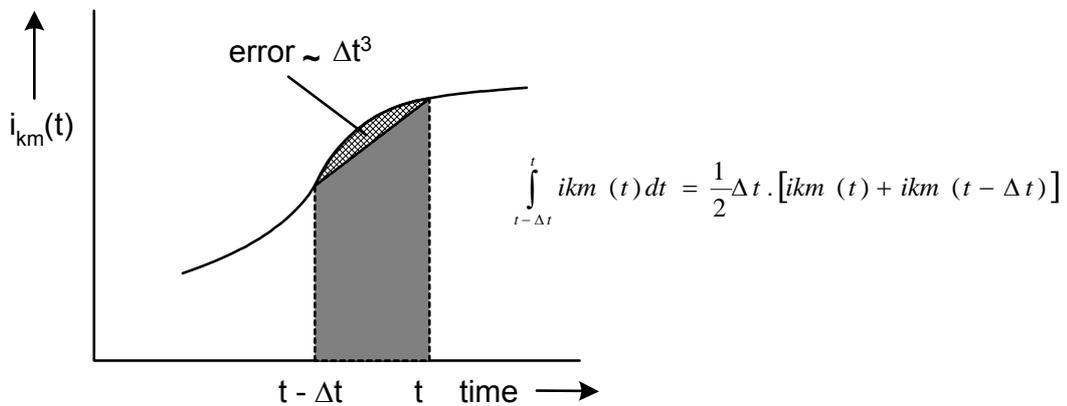


Figura 4.4 Integración usando la regla trapezoidal.

La ecuación (4.4) puede ser obtenida cuando se recopilen los valores conocidos de paso de integración anterior en  $I_{km(C)}(t - \Delta t)$ :

$$i_{km(t)} = \frac{2C}{\Delta t} [v_k(t) - v_m(t)] + I_{km(C)}(t - \Delta t) \quad (4.4)$$

Donde

$$I_{km(C)}(t - \Delta t) = -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} [v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)] \quad (4.5)$$

El circuito equivalente para la Ecuación (4.4) consta de una conductancia equivalente y una fuente de corriente como se muestra en la Figura 4.5

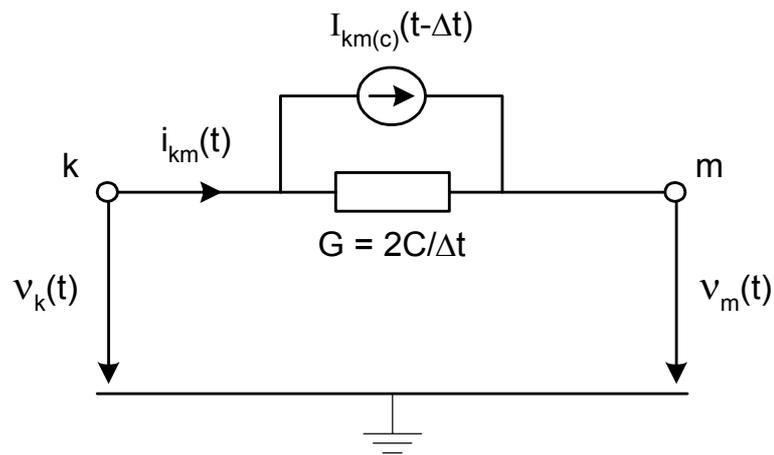


Figura 4.5 Circuito equivalente de una capacitancia

#### 4.1.3 Inductancia

La inductancia L de una rama k, m es tratada de una manera similar (figura 4.6). En este caso:

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t) - v_m(t)] + I_{km(C)}(t - \Delta t) \quad (4.6)$$

Donde:

$$I_{km(L)}(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)] \quad (4.7)$$

$I_{km(L)}(t - \Delta t)$  otra vez se conoce de la historia pasada. El circuito equivalente para una inductancia L, se muestra en la Figura 4.7.

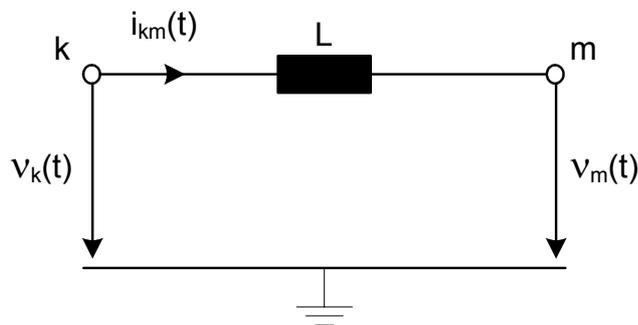


Figura 4.6 Rama de inductancia

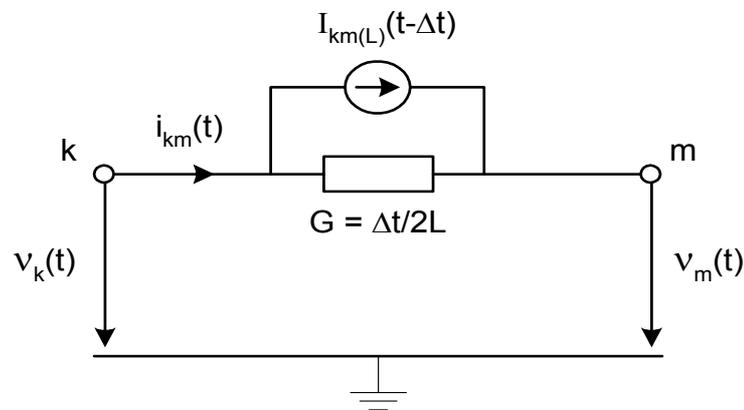


Figura 4.7 Circuito equivalente de una inductancia.

#### 4.2. Programa alternativo de transitorios ATP

El Programa ATP-EMTP está difundido en todo el mundo y es utilizado como un programa universal para la simulación digital de transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia y tiene capacidades de modelado muy extensas. Los programas digitales no pueden simular en forma continua los fenómenos transitorios, sino que lo hacen en intervalos de tiempo, que es llamado el tiempo de integración  $\Delta t$ . Junto a los módulos de simulación actuales existen varias rutinas de soporte que ejecutan alguna simulación, las cuales pueden ser usadas para generar datos de los modelos, como el cálculo de parámetros de línea o la matriz RL acoplada, para representar los transformadores multidevanados y multifase, en la simulación en el dominio del tiempo.

Una vista esquemática de los módulos de simulación disponibles y las rutinas de soporte, así como su interacción, se muestran en la Figura 4.8.

Modelos de ATP - EMTP

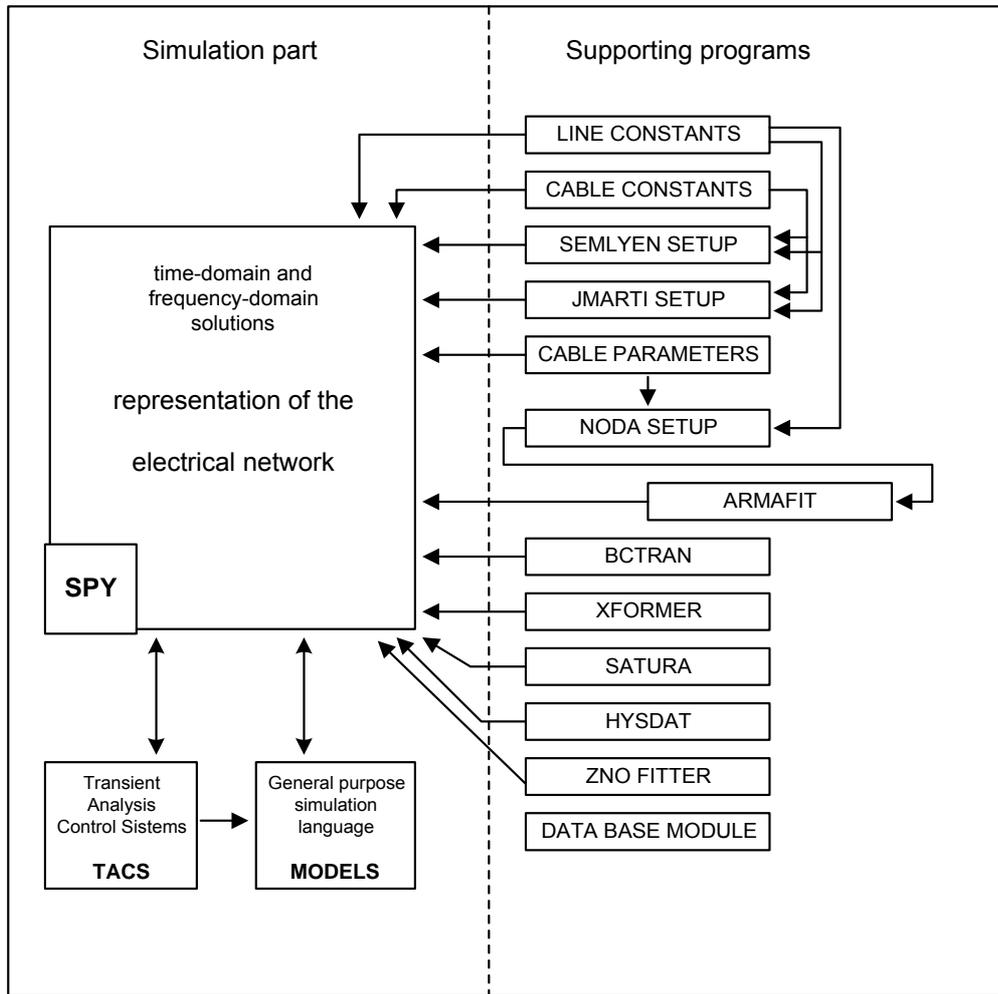


Figura 4.8 Modelos utilizados en el Simulador ATP-EMTP

En la Tabla 4.1 se muestran la identificación de elementos que se utilizan en el Programa ATP.

<b>Tipo de Componente</b>	<b>Identificación de elementos del Programa ATP</b>
Ramas lineales	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Type 0: Elemento serie RLC desacoplado y concentrado.</li> <li>▪ Type 1, 2, 3, Circuito <math>\pi</math> mutuamente acoplado</li> <li>▪ Type 51, 52, 53, ... Elementos RL mutuamente acoplados</li> <li>▪ Type -1, -2, -3: Modelos de línea con parámetros distribuidos.</li> <li>▪ Modelo de línea con parámetros constantes (Clark, K.C.Lee)</li> <li>• Línea especial de doble circuito distribuido</li> <li>• Modelo de línea Semlyen</li> <li>• Modelo de línea J. Marti</li> <li>• Modelo de línea Noda</li> </ul>
Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Componente saturable TRANSFORMER (multidevanado)</li> <li>• Unidades de transformadores monofásicos</li> <li>• TRANSFORMER THREE PHASE con acoplamiento en secuencia cero</li> <li>• Componente IDEAL TRANSFORMER</li> <li>▪ Rutina de soporte BCTRAN</li> <li>▪ KIZILCAY F-DEPENDENT (rama de admitancia de orden superior).</li> <li>▪ CASCADED PI-elemento type 1, 2, 3 (para solución en estado permanente)</li> <li>▪ PHASOR BRANCH [Y] elemento type 51, 52, 53. (Para solución en estado permanente y cálculo del barrido de frecuencia.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ type 99: Resistencia pseudo-nolineal</li> <li>▪ type 98: Inductancia pseudo-nolineal</li> <li>▪ type 97: Resistencia con característica variable en el tiempo escalonada.</li> <li>▪ type 96: Inductor con característica de histéresis pseudo-nolineal</li> <li>▪ type 94: Componente definida por el usuario vía MODELS.</li> <li>▪ type 93: Inductancia no lineal verdadera.</li> <li>▪ type 92: - Apartarrayos exponencial ZnO</li> <li>- Segementos de resistencia lineal multifase, con flameo.</li> </ul>
Ramas no lineales	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ type 91: Resistencia multifase variable en el tiempo.</li> <li>Resistencia controlada TACS/MODELS.</li> <li>▪ Elemento no lineal de usuario proporcionado por FORTRAN.</li> </ul>
Interruptores	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ type 0: Switches</li> <li>• Switch controlado por tiempo</li> <li>• Switch controlado por voltaje</li> <li>• Switch de medición MEASURING</li> <li>▪ TYPE 0: Switches estadísticos</li> <li>• Switches estadísticos</li> <li>• Switch STATISTICS</li> <li>• Switch SYSTEMATIC</li> <li>▪ Switch controlado de TACS/MODELS</li> <li>• type 11: switch para aplicación en diodos y tiristores.</li> <li>• type 12: switch para aplicación en Spark gap y triac.</li> <li>• type 13: switch controlado simple de TACS/MODELS</li> </ul>

Fuentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fuentes empíricas (opción\$INSERT)</li> <li>▪ Fuentes analíticas (voltaje o corriente)</li> <li>• type 11: Función escalón</li> <li>• type 12: Función rampa</li> <li>• type 13: Función sobretensión lineal izada de doble pendiente.</li> <li>• type 14: Función coseno/carga atrapada.</li> <li>• type 15: Función sobretensión exponencial.</li> <li>• type 16: Modelo convertidor simplificado AC/DC</li> <li>• type 18: Transformador ideal/fuente de voltaje no aterrizado</li> <li>▪ TACS/MODELS. Fuentes controladas</li> <li>• TACS/MODELS. Modulación de fuentes analíticas</li> <li>• TACS/MODELS fuentes controladas de voltaje/corriente</li> <li>▪ Máquinas rotatorias</li> <li>• type 59: Máquina síncrona trifásica (Método de predicción)</li> <li>• type 58: Máquina síncrona trifásica (solución en el dominio del tiempo).</li> <li>• type 19: Modelo de máquina universal.</li> </ul>
Componentes definidas por el usuario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• type 94: Rama eléctrica controlada MODELS.</li> <li>• Modelo tipo Thevenin</li> <li>• Modelo tipo Iterado</li> <li>• Modelo tipo Northon no transmisión.</li> <li>• Modelo tipo Northon transmisión.</li> </ul>

Tabla 4.1 identificación de elementos que se utilizan en el Programa ATP.

### 4.3 Módulos de simulación integrada

Los modelos en el Programa ATP son una descripción del lenguaje de propósito general soportado por un gran conjunto de herramientas de simulación para la representación y el estudio de sistemas variantes en el tiempo.

- La descripción de cada modelo es posible usando el formato-libre, la sintaxis del control del teclado del contexto local y es ampliamente auto documentada.
- MODELS permite la descripción de componentes de circuito eléctrico y de control definidas arbitrariamente por el usuario, proporcionando una interfaz simple para conectar otros programas/modelos al programa ATP.
- Como una herramienta programable de propósito general, MODELS se puede usar para procesar los resultados de la simulación, ya sea en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo.

TACS es un módulo de simulación para el análisis en el dominio del tiempo de los sistemas de control. Originalmente fue desarrollado para la simulación de los controles del convertidor HVDC. Se usa en la representación del diagrama de bloque TACS del sistema de control. TACS puede ser usado en la simulación de

- Controles del convertidor HVDC.
- Sistemas de excitación de máquinas síncronas
- Electrónica de potencia y controles
- Arcos eléctricos (interruptores y arcos de falla.)

La interfaz entre la red eléctrica y TACS se establece por el intercambio de señales como: voltaje de nodo, corriente en el interruptor, estatus del interruptor, resistencia variable en el tiempo, fuentes de voltaje y corriente.

### 4.4 Programas importantes de soporte integrado

**LINE CONSTANS** es una rutina de soporte para calcular los parámetros eléctricos de las líneas aéreas en el dominio de la frecuencia así como las matrices de impedancia y capacitancia por unidad de longitud, el circuito  $\pi$  equivalente, los datos para el modelo de línea con parámetros constantes distribuidos (CPDL). **LINE CONSTANTS** en el Programa ATP es llamado internamente para generar datos de frecuencia para los modelos de línea **SEMLYEN SETUP**, **JMARTI SETUP** y **NODA SETUP**.

**CABLE CONSTANTS/CABLE PARAMETERS** son rutinas de soporte para calcular los parámetros eléctricos de los cables de potencia. **CABLE PARAMETERS** es más nuevo que **CABLE CONSTANTS** y tiene características adicionales como el manejo de conductores de forma arbitraria, sistema de tendido de cables y modelo de admitancia shunt distribuido. **CABLE CONSTANTS** está enlazado a los Programas **SEMLYEN SETUP** y **JMARTI SETUP**,

mientras que CABLE PARAMETERS es llamado por el Programa NODA SETUP para generar parámetros eléctricos dependientes de la frecuencia.

**SEMLYEN SETUP** es una rutina de soporte para generar datos del modelo dependiente de frecuencia para líneas aéreas y cables. Se usa la teoría modal para representar líneas desbalanceadas en el dominio del tiempo. La respuesta al escalón y la admitancia de sobrevoltaje de la propagación modal, están aproximadas por funciones racionales de segundo orden con polos y ceros reales.

**JMARTI SETUP** genera un modelo dependiente de frecuencia de orden superior, para líneas aéreas y cables. El ajuste de la función modal de propagación y la impedancia de sobrevoltaje se ejecutan por aproximación asintótica de la magnitud, por medio de una función racional con polos reales. El modelo de línea JMARTI no es apropiado para presentar cables.

**BCTRAN** es un programa de soporte integrado en el programa ATP-EMTP, que puede ser usado para derivar una representación matricial lineal  $[R]$ ,  $[\omega L]$  ó  $[A]$ ,  $[R]$  para transformadores monofásicos o trifásicos, usando datos de pruebas de excitación y de cortocircuito a frecuencia nominal. Para los transformadores trifásicos, ambos tipos de transformadores, tipo acorazado (baja reluctancia homopolar) y los tipo núcleo (tres piernas) (alta reluctancia homopolar) pueden ser manejados por esta rutina.

**XFORMER** es usado para derivar una representación lineal de transformadores monofásicos, y de dos y tres devanados por medio de las ramas RL acopladas. BCTRAN deberá ser preferido en lugar de XFORMER.

**SATURA** es una rutina de conversión para derivar la curva de saturación flujo-corriente de la característica de voltaje-corriente RMS o la característica incremental corriente-inductancia. La curva de saturación flujo-corriente se usa para modelar la inductancia no lineal, por ejemplo para el modelado de transformadores. El Programa ATPDraw tiene esta característica integrada en el modelo *Saturable 3 Phase Transformer* (Transformador Saturable Trifásico).

**ZNO FITTER** puede ser usado para derivar una representación no lineal verdadera (ramas type – 92) para un apartarrayos de óxido de zinc, empezando con los datos del fabricante. La rutina ZNO FITTER ajusta los datos del fabricante (característica voltaje-corriente) con una serie de funciones exponenciales del tipo:

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

**DATA BASE MODULE** permite al usuario crear módulos de las secciones de red. Cualquier módulo puede contener varios elementos de circuito. Algunos datos, como los nombres de nodo o datos numéricos pueden tener valores fijos dentro del módulo, mientras que otros

datos pueden ser tratados como parámetros que serán pasados al módulo de la base de datos, cuando el módulo está conectado al paquete de datos vía \$INCLUDE.

## 4.5 Programas de soporte para el Programa ATP

### 4.5.1 ATPDraw

- **Propósito:**

ATPDraw es un procesador gráfico que genera el archivo de entrada de datos del programa ATP. Lo asiste para crear y editar en forma interactiva el modelo de la red eléctrica que va a ser simulada. En el programa el usuario puede construir un circuito eléctrico, al seleccionar componentes predefinidas de un menú muy extenso. El procesador crea el archivo de entrada correspondiente para el programa ATP automáticamente en el formato correcto.

- **Características principales:**

El programa ATPDraw normalmente soporta alrededor de 70 componentes estándar y 28 objetos TACS. También es posible el uso simplificado de MODELS. Además, el usuario puede crear sus propios objetos de circuito usando las opciones del programa ATP, Data Base Module (Módulo de Base de Datos). y \$INCLUDE. Se pueden construir circuitos monofásicos y trifásicos. Las ventanas de circuito múltiple están diseñadas para trabajar en varios circuitos simultáneamente y copiar información entre ellos. Están disponibles la mayoría de los tipos de facilidades de edición como copiar y pegar, rotación, importación/exportación, agrupar/desagrupar, deshacer e imprimir. Otras facilidades en el programa ATPDraw son: Un editor interconstruido para la edición de archivos ATP, un soporte del pisapapeles Windows para bitmap/metafile, salida del formato de archivo Windows Metafile/Bitmap o PostScript.

- **Requerimientos de Software/Hardware:**

PC compatible IBM (486 DX4-100, Pentium I, II, III).

MS-Windows 95, 98, NT 3.51 o posteriores.

Pantalla XGA (Se sugiere una resolución de 1024 x 768).

16MB de memoria disponible (32 MB) para NT).

10 MB de espacio libre en el disco duro.

- **Versión actual:**

La versión Windows 4.2 apareció en marzo de 2006.

- **Disponible en:**

El Programa ATPDraw puede ser encontrado anónimamente en el servidor <ftp.ee.mtu.edu> . (IP: 141.219.23.120), en el directorio `/puv/atp/gui/atpdraw`.

*User name:* Anónimo

*Password:* Su dirección completa del correo electrónico email.

#### 4.5.2 Centro de control del Programa ATP

- **Propósito:**

El Centro de Control del Programa ATP (ATPCCC) es un user-shell para manejo amigable de las versiones Windows del Programa ATP, soporte de programas ATPDraw, PCPlot y otros programas relacionados con el programa ATP, que corren en el ambiente Microsoft Windows 95/98/NT.

- **Características principales**

- Es posible trabajar con dos versiones diferentes de ATP al mismo tiempo
- La ejecución de archivos de tipo sensitivos para ATP, ATPDraw, PCPlot y otros programas.
- Doble click en los nombres de archivo o ejecutar usando en el contexto del menú.
- Se permite trabajar con cualquier editor que el usuario prefiera.
- Pueden ser enlazados hasta diez programas al ATPCC y ejecutados desde el usershell.
- Proyecto basado en el manejo de paquetes de datos de simulación.
- La ventana de eventos muestra previamente los comandos a ejecutar.
- La reejecución de los comandos anteriores desde la ventana de eventos.

- **Requerimientos de Software/Hardware.**

PC compatible IBM (486 DX4-100, Pentium I, II, III).

MS-Windows 95, 98 o NT.

Pantalla XGA (resolución de 800 x 600 o mayor.)

16 MB mínimo para el sistema de memoria.

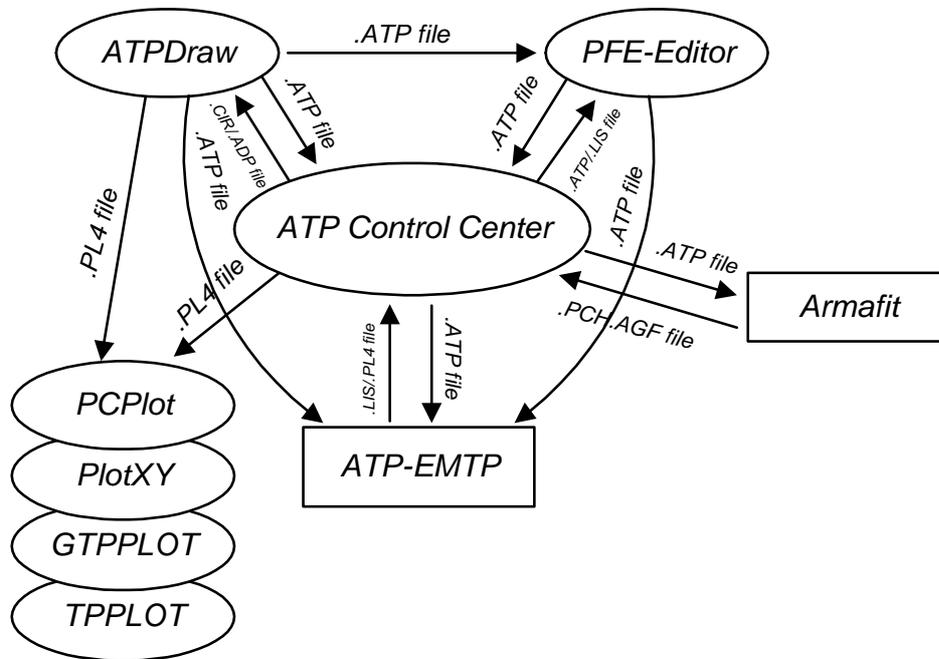
1 MB de espacio libre en el disco duro.

- **Versión actual:**

Versión 4,2P10, aparece en junio de 2005

- **Disponible en:**

El programa ATPCC actualmente está disponible únicamente para los miembros de la asociación EEUG. ha sido desarrollado por Deniz Celikag bajo contrato de la Asociación EEUG. El siguiente diagrama muestra la interacción del centro de control del Programa ATP con otros programas.



## CAPÍTULO 5

### MODELADO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN, A TRAVÉS DE ATPDRAW Y CALCULADOS POR ATP/EMTP

#### 5.1 Obtención de parámetros de los tramos de línea (conductores de fase y de guarda), modelados a través de ATPDraw y calculados por ATP/EMTP

Para este caso, se utilizan los datos de un conductor calibre 1113 kCM, tipo ACSR/TA e hilos de guarda de 3/8" de diámetro. En la tabla que se muestra en la figura 5.1, se colocan los diámetros internos y externos, la resistencia eléctrica, separación entre conductores, altura a piso, conductores por fase.

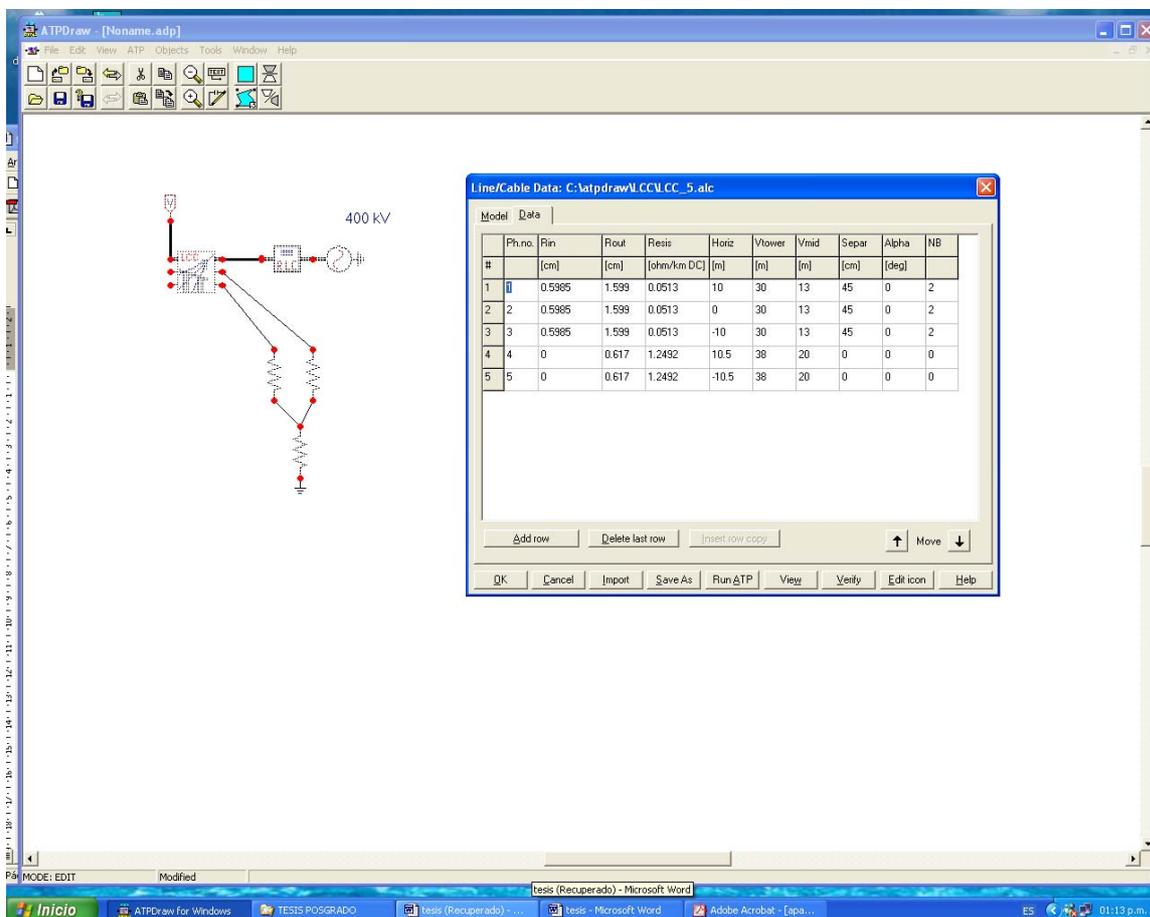


Figura 5.1 Datos de los conductores de línea.

La representación comúnmente utilizada para los conductores de fase y guarda en el caso de descargas atmosféricas es el modelo de JMARTIK - C.LEE. ATP/EMTP que obtiene sus parámetros con las siguientes características:

- Cálculo de parámetros internos a partir de dimensiones de conductores,
- Acoplamiento mutuo de varios conjuntos trifásicos,

- Consideración de varios conductores por fase,
- Acceso a hilos de guarda,
- Consideración de catenaria (altura en torre y en claro),
- Simulación de ondas viajeras -parámetros distribuidos-,
- Dependencia de los parámetros respecto a la frecuencia.

## 5.2 Obtención de los parámetros de los tramos de línea (conductores de fase y de guarda), por el programa ATP/EMTP

En la en la figura 5.2 se observa como se proporcionan los datos del tipo de terreno donde estarán instaladas las torres.

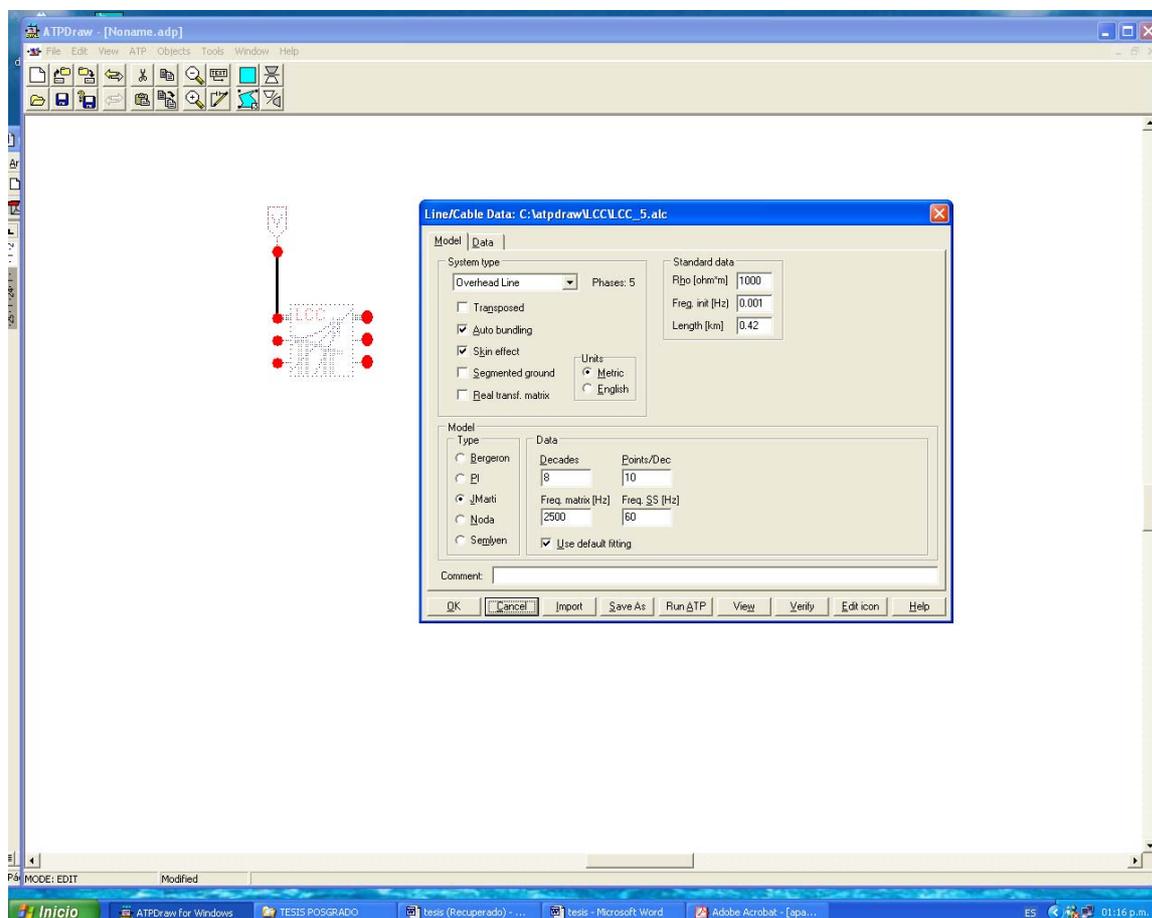


Figura 5.2 Datos para determinar los parámetros de una línea de transmisión.

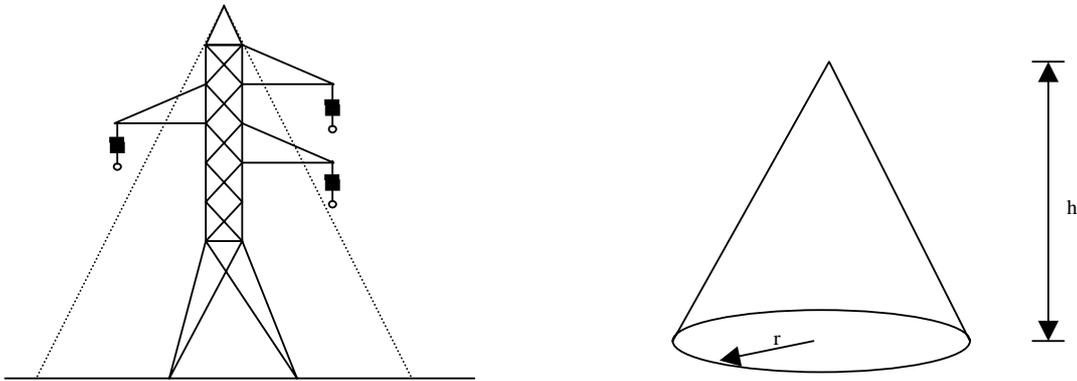
### 5.3 Representación de las estructuras de soporte de la línea

Generalmente se acepta representar las estructuras por un conjunto de impedancias con elementos monofásicos de parámetros distribuidos, se calcula la impedancia de acuerdo al tipo de torre y la longitud de cada tramo y con el programa ATPDRAW podemos generar un objeto de 3 terminales, dos monofásicas y una trifásica: Tipo de estructuras utilizadas 4CT23, 4X23, 4YR23 y 4A23.

La impedancia característica de la torre depende de la geometría de la misma (altura, diámetro, siluetas) y se ha calculado en forma experimental usando modelos a escala, de manera que a partir de esto se obtienen expresiones empíricas.

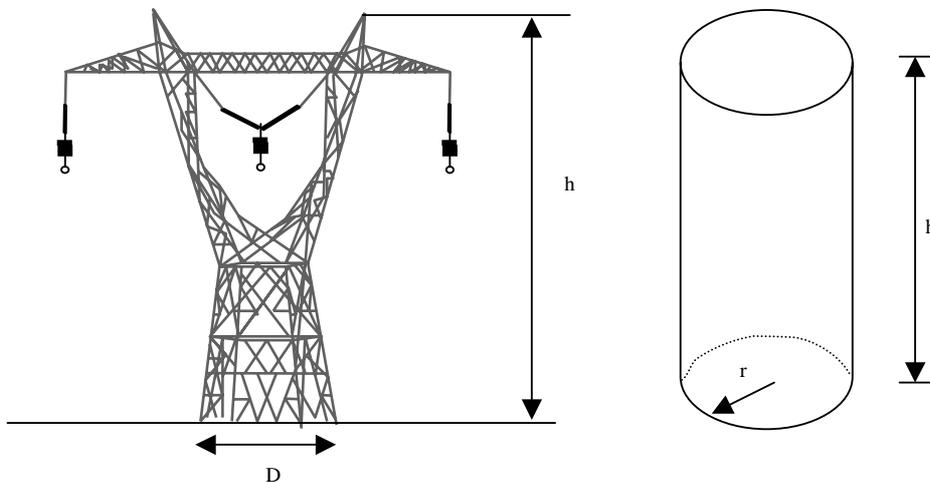
De acuerdo a las siluetas de las estructuras se tienen dos modelos básicos para determinar la impedancia característica de las torres:

- Silueta cónica.



$$z_T = 30 \ln \left[ z \left( 1 + \frac{h^2}{r^2} \right) \right] [\Omega]$$

- Silueta cilíndrica



$$z_T = 60 \ln\left(\frac{h}{r}\right) + 90\left(\frac{h}{r}\right) - 60 [\Omega]$$

Para una torre de 400 kV con  $h = 26.0$  m y  $D = 14.0$  m

$$z_T = 60 \ln\left(\frac{26.0}{7.0}\right) + 90\left(\frac{7.0}{26.0}\right) - 60 = 42.96 \approx 43 \Omega$$

Se tiene una expresión equivalente para determinar la impedancia característica en torres con siluetas cilíndricas.

$$z_T = 60 \ln \sqrt{2} \left(\frac{4h}{r}\right) - 60$$

Para la estructura de la simulación, se usa una silueta cilíndrica con:  $h = 54$  m y  $r = 12$  m

Sustituyendo valores, obtenemos la impedancia de la torre:

$$Z_t = 132,22 \Omega$$

En el ATPDRAW, se dan los datos con un modelo de impedancia de parámetros distribuidos como se indica en la figura 5.3.

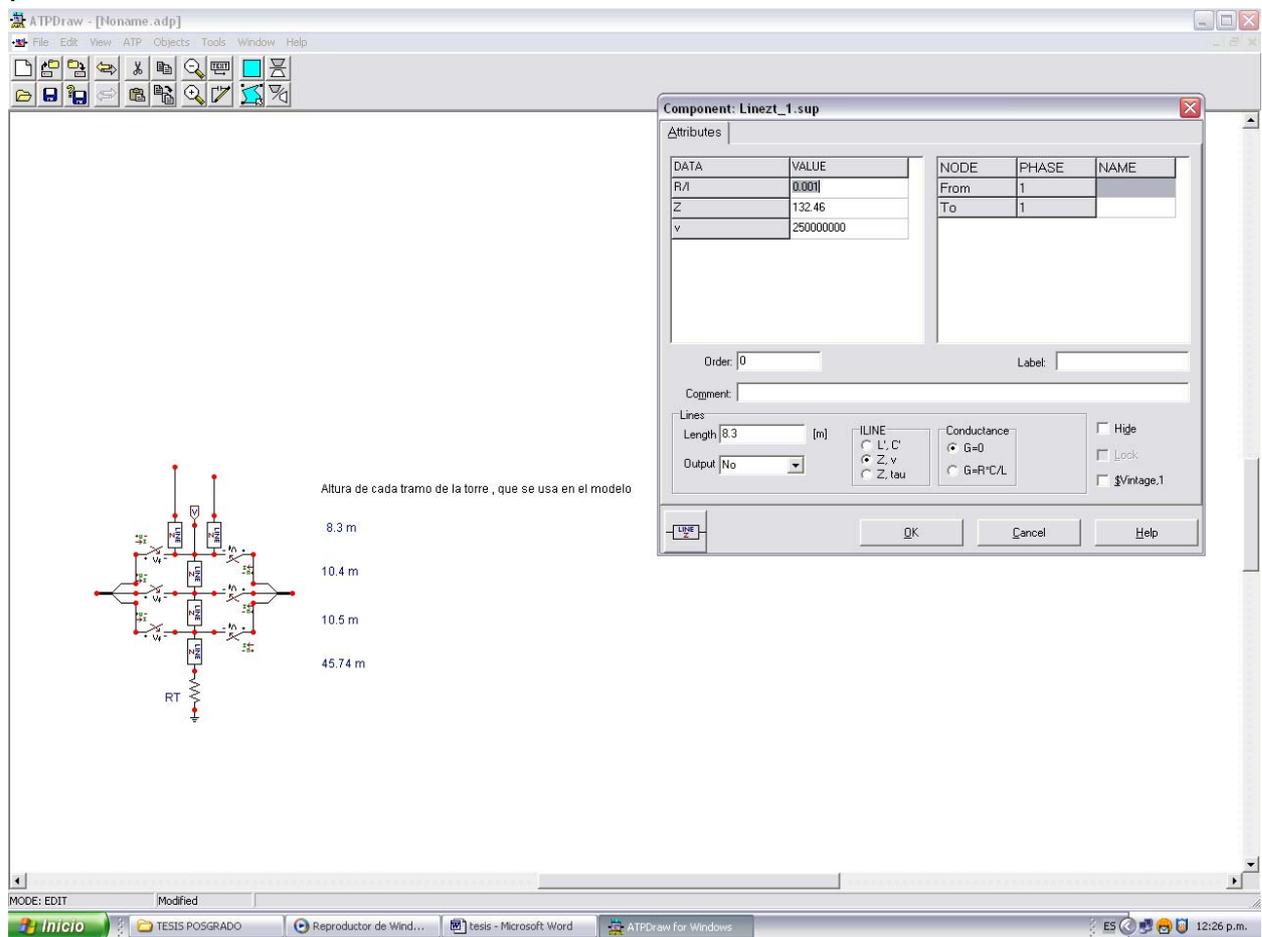


Figura 5.3 Modelo para representar una estructura.

### 5.4 Representación de los aisladores de una línea

Generalmente se acepta representar los aisladores por un conjunto trifásico de switches controlados por tensión para fenómenos de rayo, figura 5.4. Para fenómenos mas lentos, se utilizan representaciones del arco eléctrico -según Cassie / Mayr u otros-, implementados con una resistencia no lineal controlada por un objeto de TACS o de Models.

Los datos que se dan, son la tensión máxima que soporta el switch, en este caso el nivel básico de aislamiento (BIL) 1425 kV, para un sistema de 400 kV. Si la sobretensión pasa de este valor, el switch empieza a conducir corriente, que es cuando se presentaría el flameo inverso

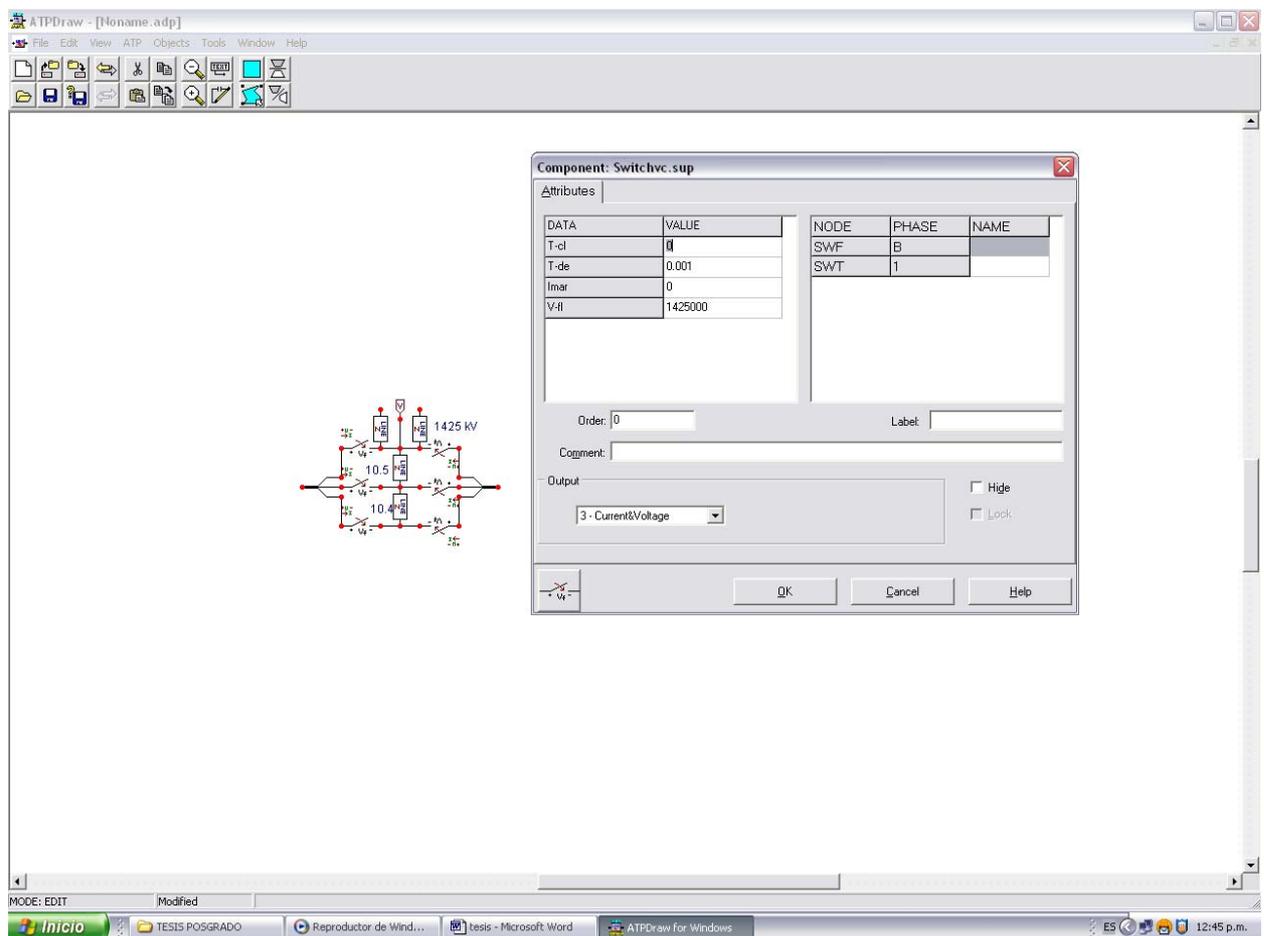
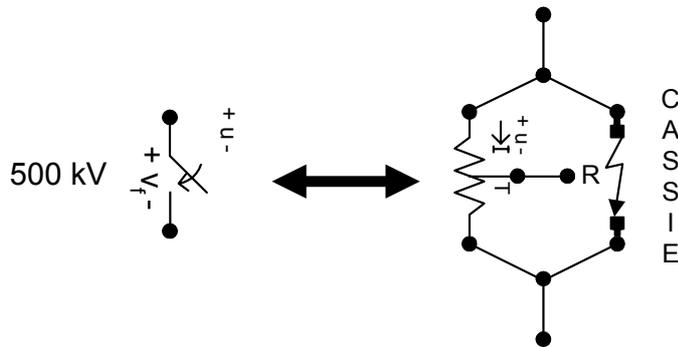


Figura 5.4 Modelado de los aisladores

En la figura 5.5 se muestra la relación de aislamiento efectivo respecto a la altitud sobre el nivel del mar (msnm).

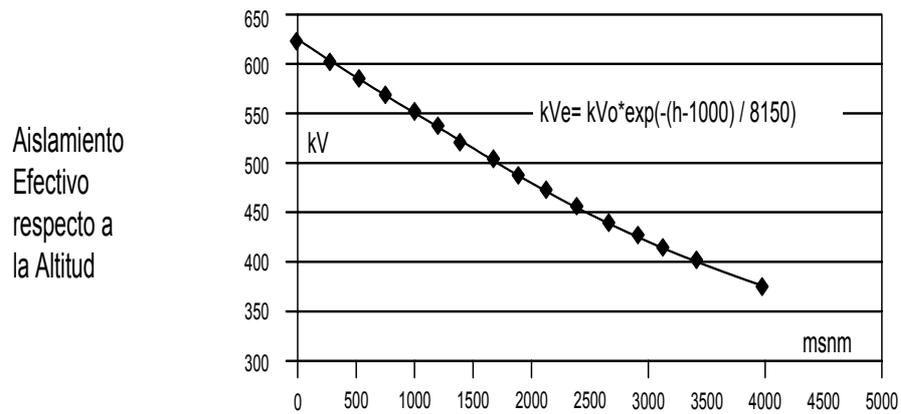


Figura 5.5 Aislamiento en aire en relación con msnm.

En la figura 5.6 se muestra una relación de aislamiento en aire, con una separación L, en función del tiempo de falla al impulso normalizado.

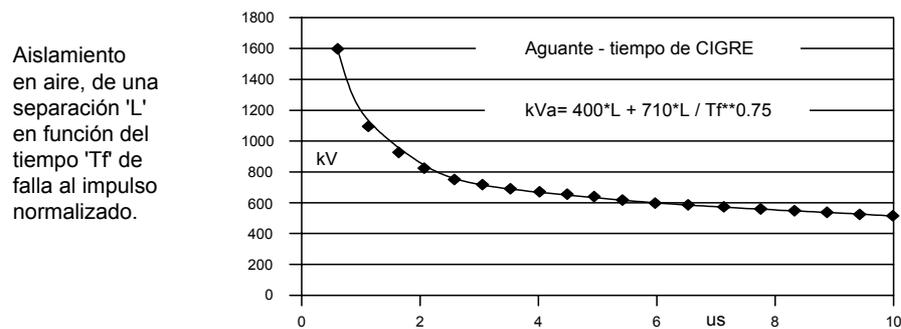


Figura 5.6 Aislamiento en aire en función del tiempo de falla

### 5.5 Representación del aterrizamiento de una torre de una línea

Generalmente se acepta representar el aterrizamiento de las estructuras de la línea con una resistencia no lineal determinada por la resistencia del aterrizamiento medida en baja

frecuencia y la resistividad del terreno circundante, es importante tener el dato real de la resistividad del terreno circundante, ya que con ese dato nos obliga a ver que tipo de mantenimiento se da al sistema de puesta a tierra o si se hace un estudio de confiabilidad a la línea de transmisión.

Para una resistividad mayor de  $1000 \Omega\text{-m}$ , es necesario hacer un estudio de confiabilidad.

De acuerdo con la experiencia con alta resistividad del terreno, la resistencia de puesta a tierra de la torre es muy alta, por lo tanto presenta un camino de alta impedancia a la frecuencia del rayo, provocando que la corriente de la descarga atmosférica no se drene a tierra y con la impedancia de la torre, genera un potencial mayor que el BIL de los aisladores, haciendo así que los aisladores se pongan en corto circuito, y se presente el flameo inverso.

En este caso se usa una resistencia lineal, y se cambian los valores según el caso de estudio,  $10\Omega$  o  $10 \text{ k}\Omega$ . Figura 5.7

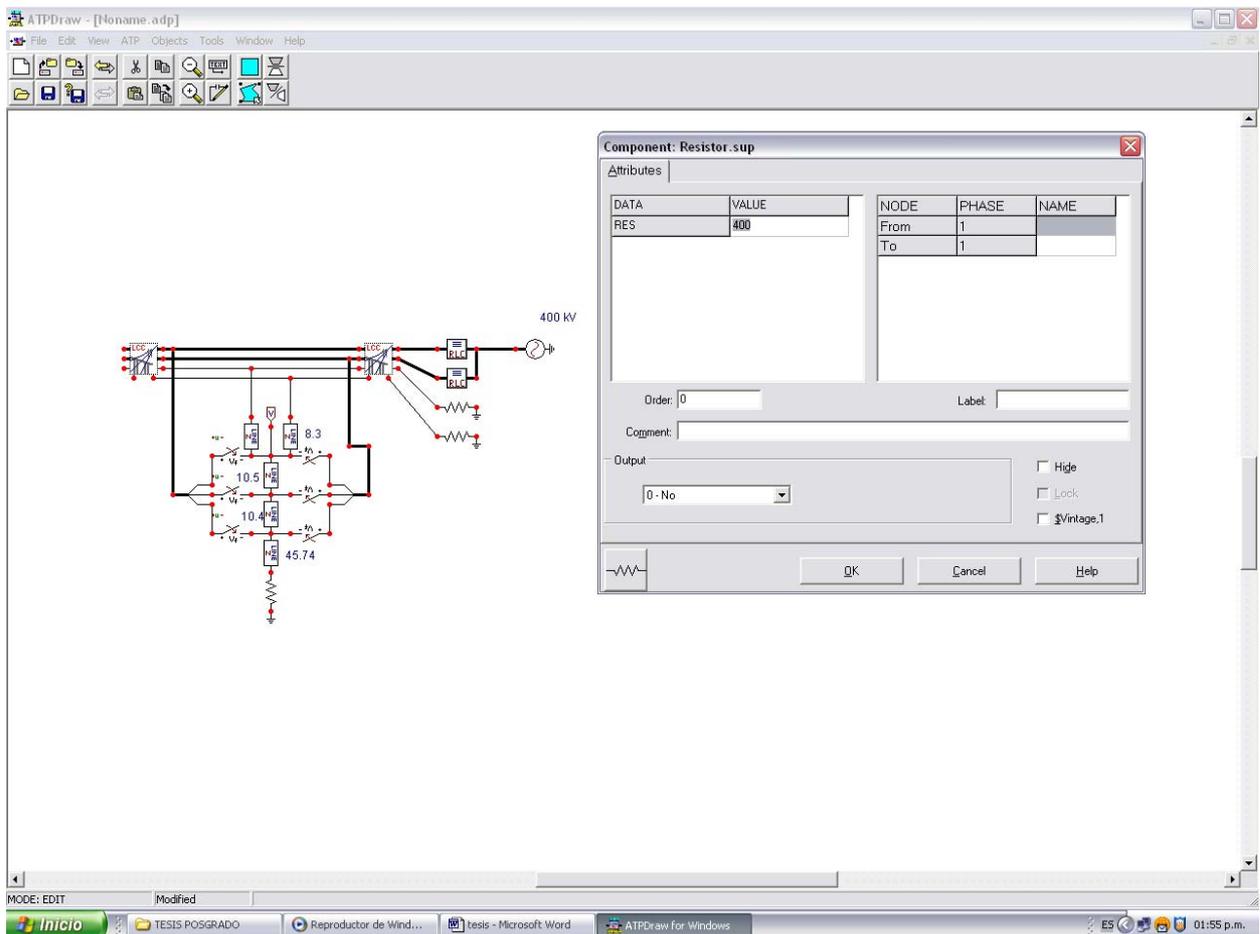
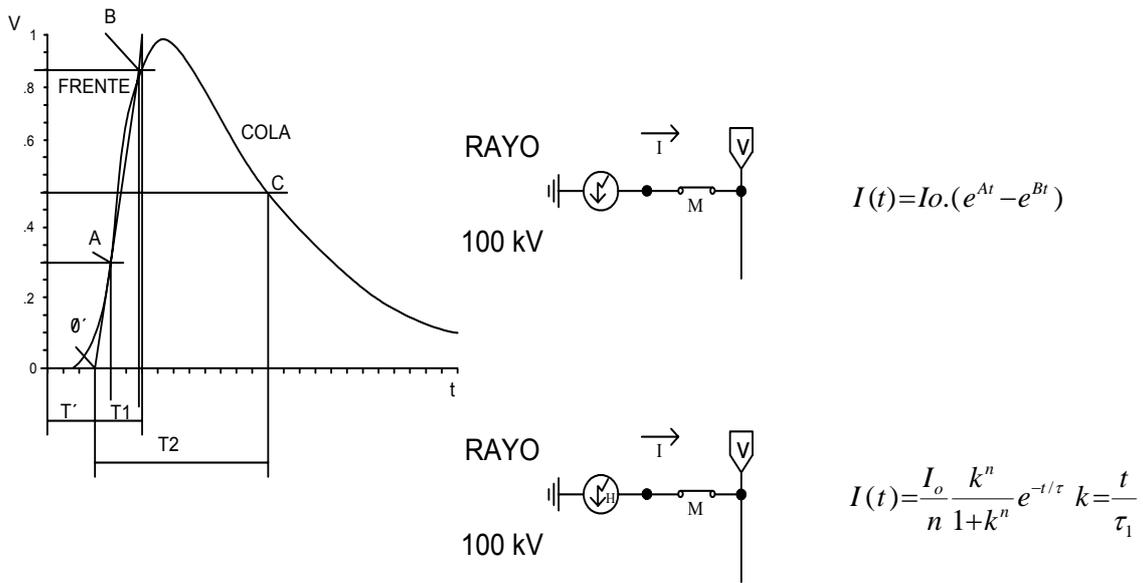


Figura 5.7 Representación del aterrizamiento de una torre.

### 5.6 Representación de la descarga atmosférica a la línea

Generalmente se acepta representar la descarga atmosférica a la línea como un impulso aperiódico de corriente. El ATP/EMTP ofrece las formas de impulso doble exponencial y Heidler, pero el usuario puede generar sus propios modelos tanto en elementos EMTP, como TACS o MODELS.



En el modelo que usamos con el ATPDRAW, se dan como datos amplitud de la corriente, los tiempos de frente de onda y el tiempo de duración de la onda. figura 5.8.

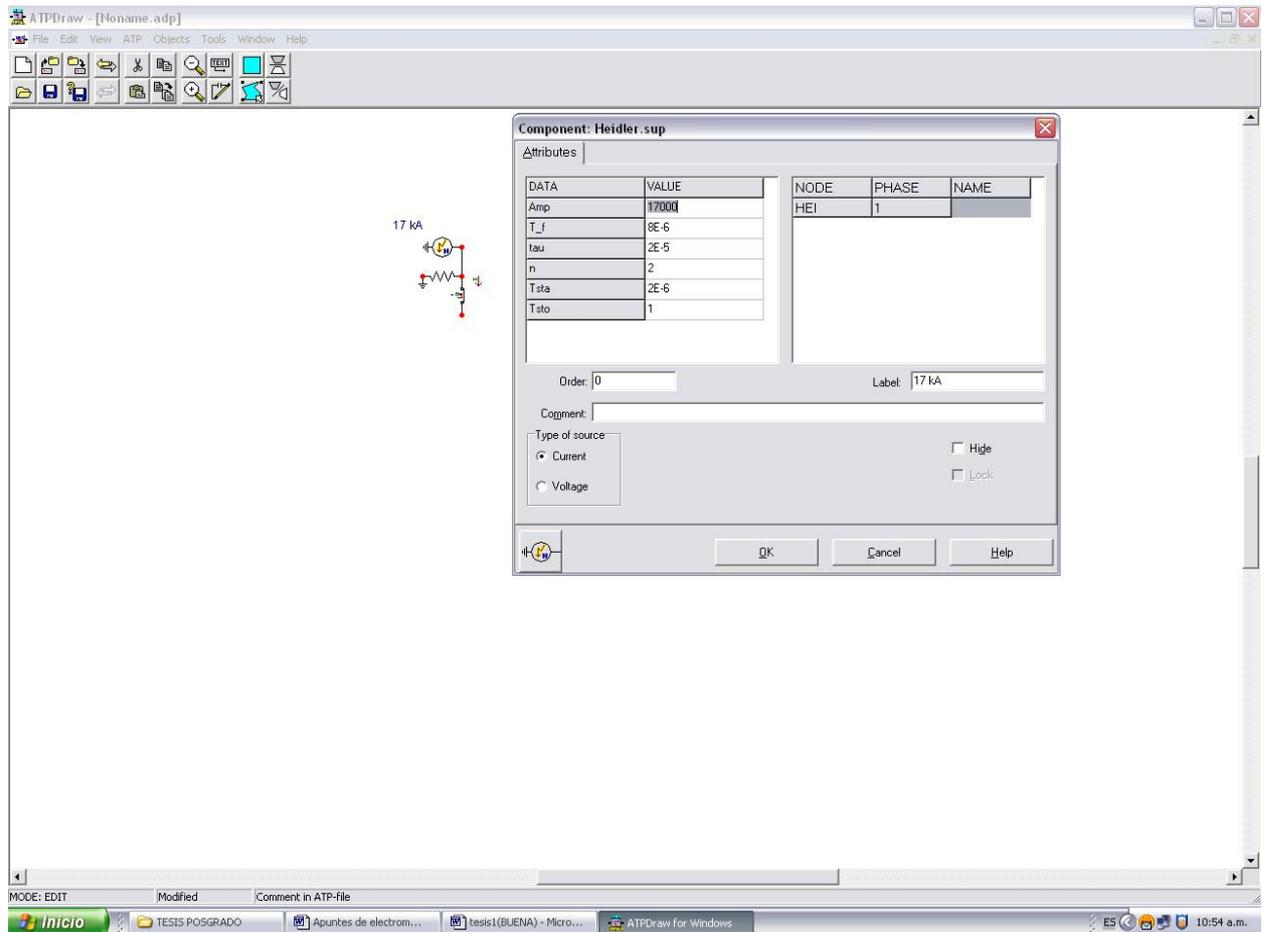


Figura 5.8 Datos amplitud de la corriente, los tiempos de frente de onda y el tiempo de duración de la onda

La probabilidad de que una descarga atmosférica presente una corriente de cresta igual o mayor que un valor de corriente  $I$  esta dado por la ecuación 5.1 [10].

$$P(I) = 1 / (1 + (I/31)^{2.6}) \quad P(I) \text{ kA} \quad (6.1)$$

En la figura 5.9 se observa la curva que muestra la probabilidad de la corriente de un rayo.

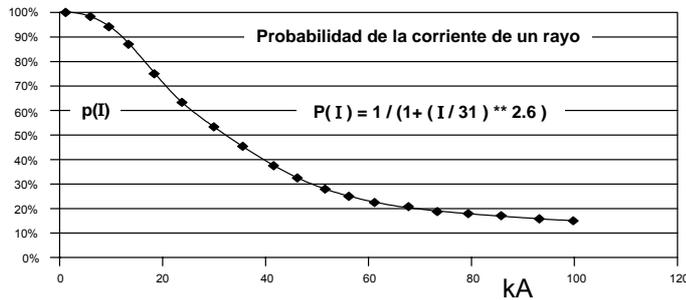


Figura 5.9 Probabilidad de la corriente de un rayo.

Algunos comentarios sobre las características principales de los rayos:

- Cerca del 90% de los rayos son de una nube cargada negativamente a la tierra positiva.
- 45% de ellos son sencillos, 65% son múltiples, con 3 descargas en promedio.
- 90% no exceden de 8 descargas.
- En general, la primer descarga es mas grande
- Las descargas se suceden en menos de 50 ms.
- Los aislamientos soportan mas kV de descarga negativa que de positiva.

### 5.7 Representación de los apartarrayos de óxidos metálicos, sin entrehierro.

Generalmente se acepta representar el apartarrayos de óxidos metálicos con un circuito de doble resistencia no lineal para transitorios rápidos como la descarga atmosférica, como se muestra en la figura 5.10.

El ATP/EMTP ofrece varias formas de resistencia no lineal pero la mas aceptada es la no lineal verdadera de segmentos exponenciales.

Para obtener las características del modelo del apartarrayo, se utiliza un programa auxiliar llamado EZNO, para su uso se dan los datos de voltaje máximo de operación del sistema. El programa obtiene: El voltaje de Operación Continua, El voltaje Nominal del apartarrayo, El voltaje Residual y la curva de magnetización V-I.

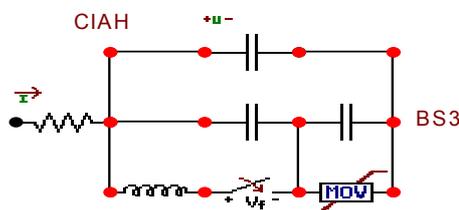


Figura 5.10 Modelo del apartarrayo

Determinación del voltaje nominal del Apartarrayos para una línea de transmisión de 400 kV nominal. De acuerdo con la norma [9] (esta norma es solo para la selección de apartarrayos de líneas de transmisión). El modelo utilizado es como en la figura 5.11 y los datos que se dan son; Tensión nominal del apartarrayo, tensión residual y curva característica V –I.

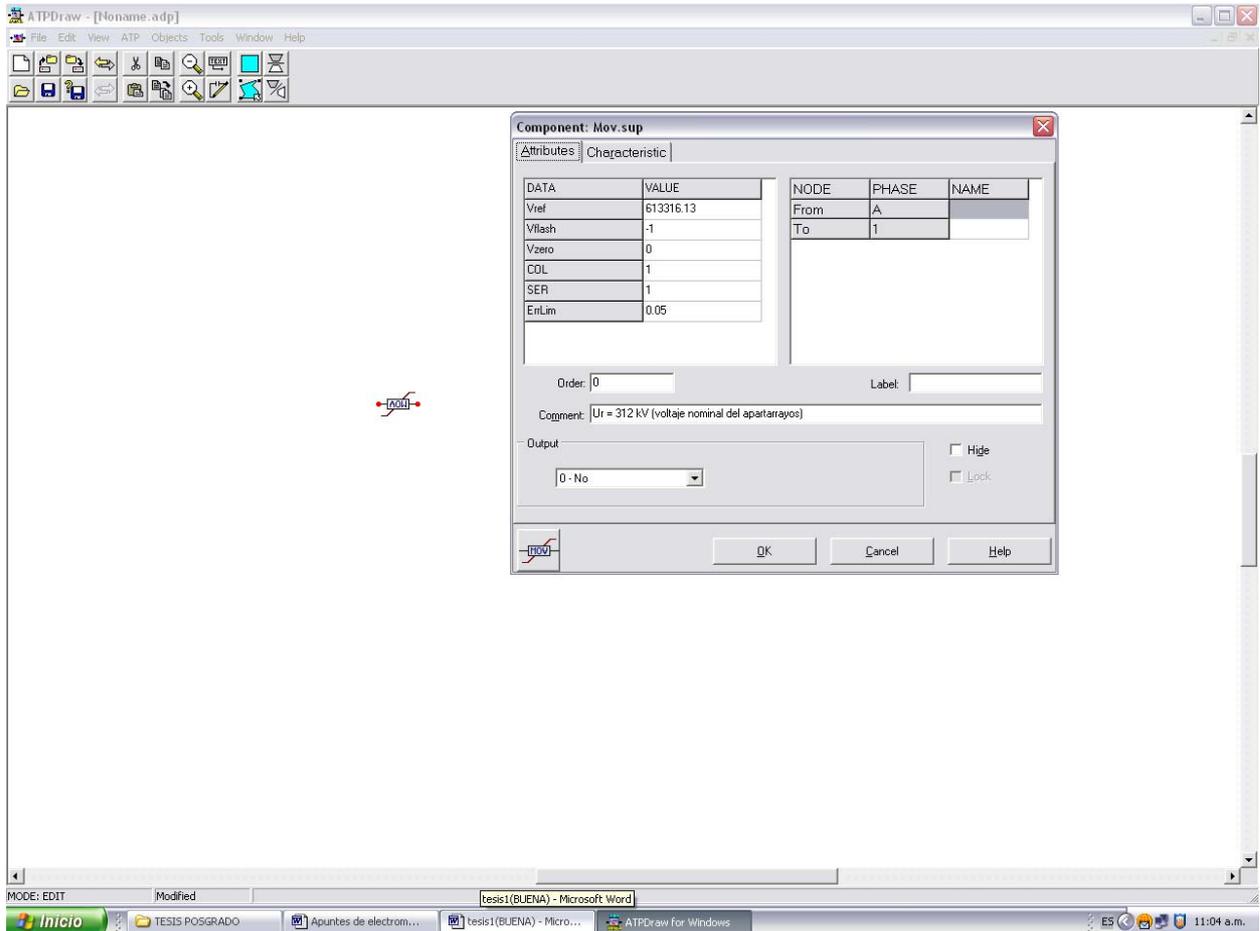


Figura 5.11 Datos de tensión nominal del apartarrayo, tensión residual y curva característica V – I.

Cálculo de la tensión de operación continua ( $U_c$  rms.).

$$U_{c \text{ rms}} = \frac{V \text{ max. del sistema}}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242.48 \text{ kV}$$

Con este dato se determina por catálogo de fabricantes la tensión nominal del apartarrayos.

De la norma de referencia PROY-NRF-045-CFE, se determina que la tensión nominal del apartarrayos ( $U_r$ ) es de **312 kV** con **clase** de descarga mínima **3**, considerando un valor de tensión de operación continua de **250 KV**.

Determinación de la curva característica V – I del apartarrayos.

$$V_{ref} = 1.39 \sqrt{2} V_n \text{ del apartarrayos.}$$

$$V_{ref} = 1.39 \sqrt{2} (312 \text{ kV}) = 613316.13 \text{ volts}$$

$$V = V_{ref} \left( \frac{I}{2500} \right)^{1/26}$$

I	V
1	453935.74
10	495970.59
3000	617632.04
5000	629886.73
10000	646905.04

## CAPÍTULO 6

### **SIMULACIÓN DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LÍNEA BAJO DESCARGA ATMOSFÉRICA CON AYUDA DEL PROGRAMA ATP/EMTP: CASO DE FLAMEO DIRECTO DE AISLADORES, CON DESCARGA DIRECTA AL HILO DE GUARDA, SIN USO DE APARTARRAYO Y CON RESISTENCIA A PIE DE TORRE DE 10 k $\Omega$ .**

#### 6.1 Modelado del sistema

Para la realización del análisis se consideraron los siguientes datos:

- Línea de 400 kV.
- Número de circuitos: 2
- Calibre del conductor de fase: 1113 kCM.
- Conductores por fase: 3.
- Tipo de conductor de fase: ACSR/TA
- Tipo de conductor de hilo de guarda.
- Tipo de estructuras: 4CT23, 4x23, 4YR23 Y 4A23.
- Resistividad del terreno mayores de 1000  $\Omega$ -m.
- Resistencia de pie de torre mayores de 10 k $\Omega$
- Nivel básico de aislamiento: 1425 kV.
- Corriente de rayo: 17 kA

Con la ayuda del programa de simulación ATP/EMTP, se formó el circuito utilizado en la figura 6.1, para analizar el efecto de una descarga atmosférica directa a uno de los hilos de guarda (HG13), circuito 1 torre3.

En las figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8, se observan las sobretensiones y corrientes que causan flameo inverso y ruptura del aislamiento en las torres de los circuitos C13 (línea 1, torre 3), C23 (línea 2, torre 3), C12, C22 (líneas 1 y 2, torre 2), C14, C24 (línea 1 y 2 torre 4) en las fases A, B y C.

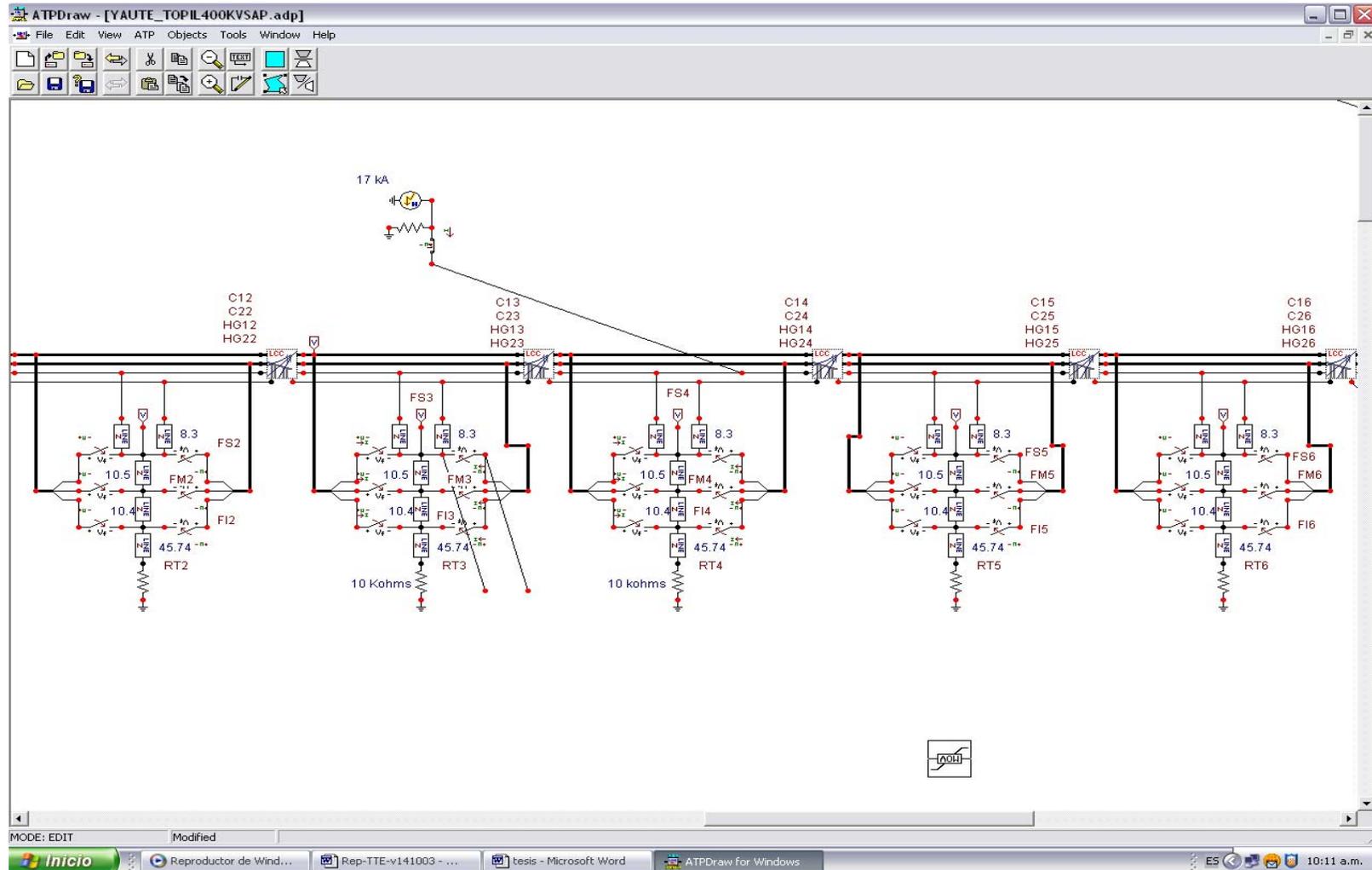


Figura 6.1 Circuito, para simular la descarga atmosférica directa al hilo de guarda, línea 1, torre 4, sin apartarrayo.

## 6.2 Resultados de la simulación del circuito de la figura 6.1

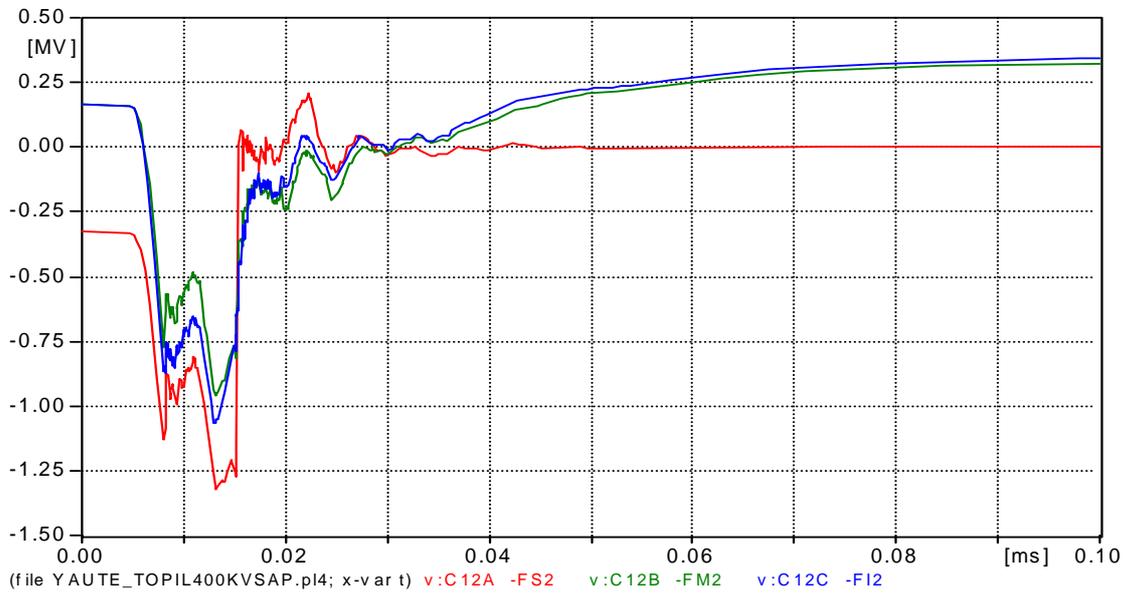


Figura 6.2 Sobretensiones en la línea 1 torre 2, tres fases.

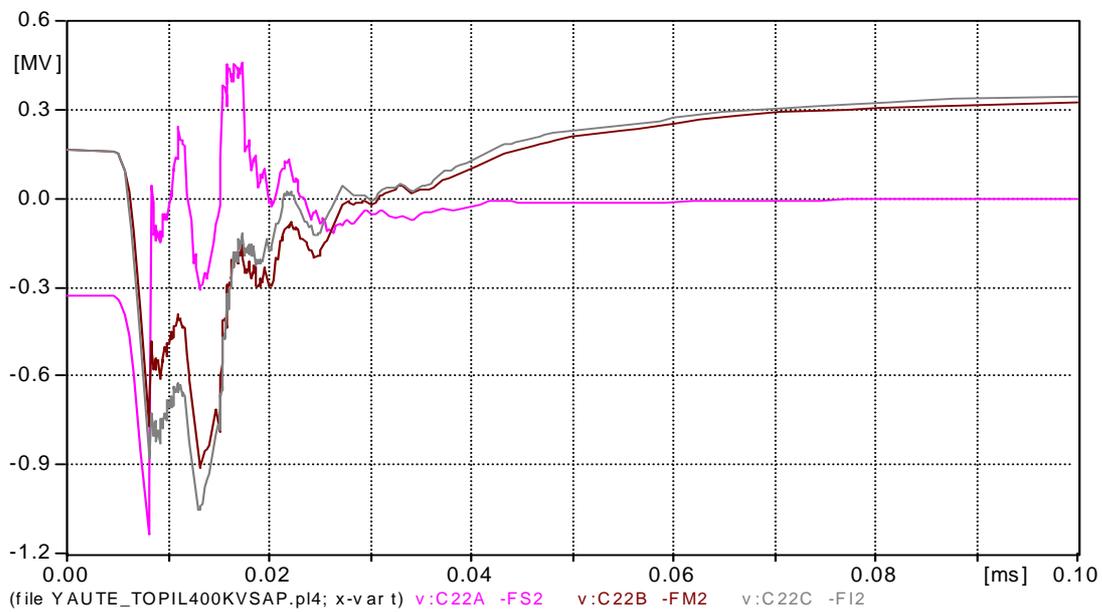


Figura 6.3 Sobretensiones en la línea 2 torre 2, tres fases.

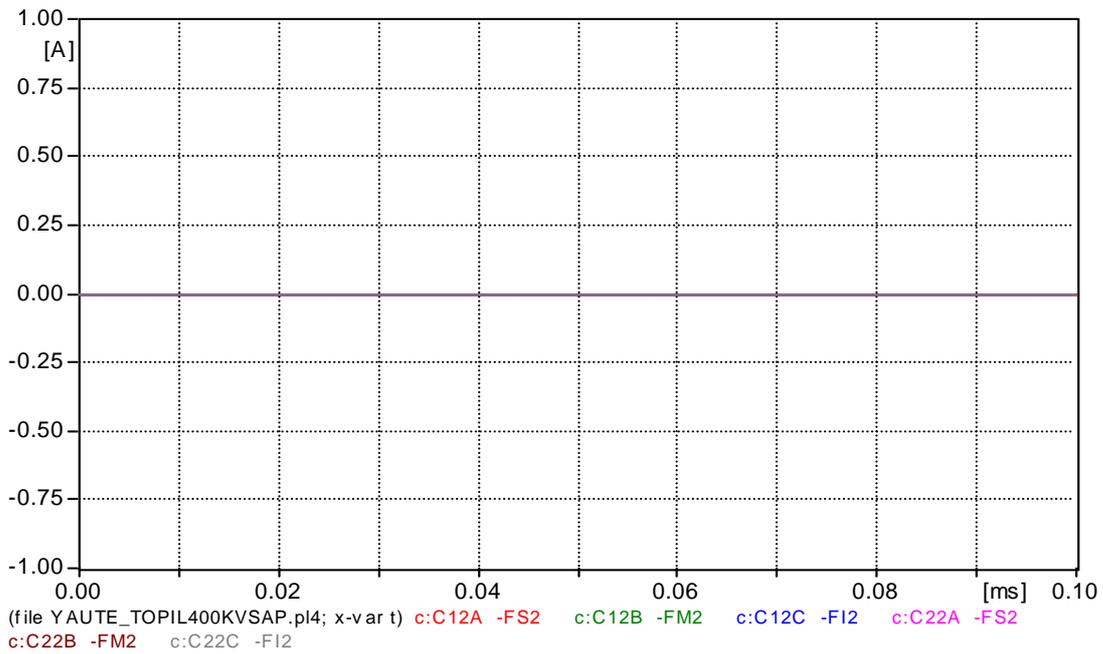


Figura 6.4 Corrientes a través de los aisladores, en las dos líneas, en la torre 2.

Se concluye que en esta torre 2, no se presenta flameo inverso ya que la sobretensión que se presenta en las tres fases de los dos circuitos es menor que 1 425 kV, que es la tensión de flameo de las cadenas de aisladores. Se observa que la corriente a través de los aisladores es de cero amperes.

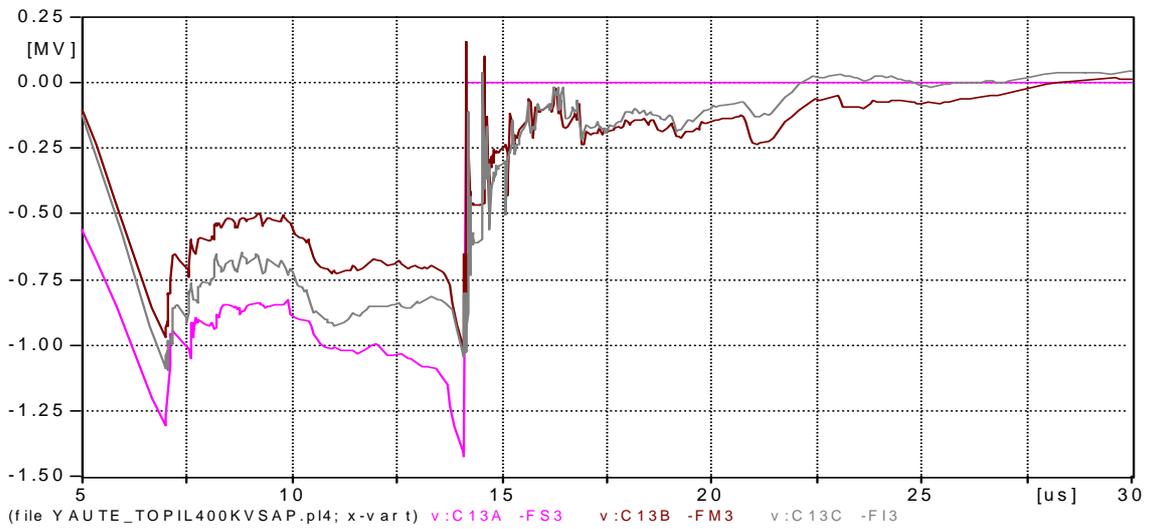


Figura 6.5 Sobretensiones en la línea 1, torres 3, tres fases, en la fase A la sobretensión es igual a 1425 kV, provocando flameo inverso en esa fase.

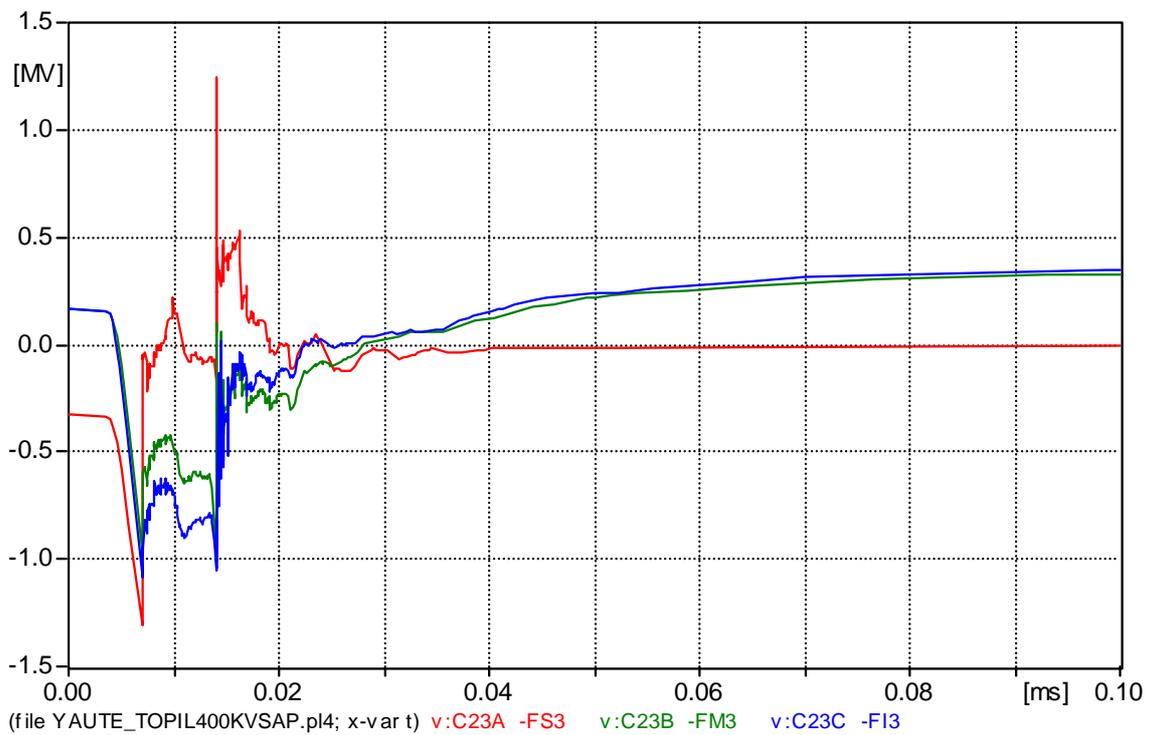


Figura 6.6 Sobretensiones en la línea 2, torres 3, tres fases, las sobretensiones son menores de 1425 kV, no hay flameo inverso.

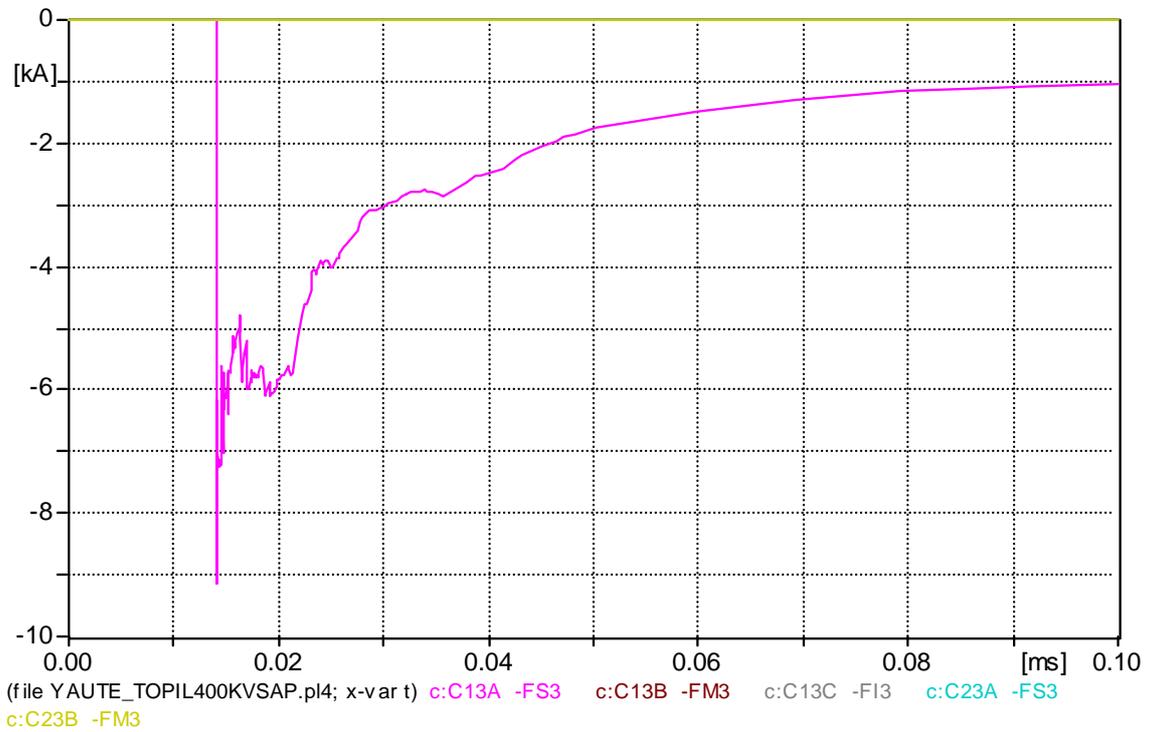


Figura 6.7 Corrientes a través de los aisladores, en las dos líneas, en la torre 3. en la fase A se presentan 9 142 A, en las fases restantes la corriente es de 0 A.

Se concluye que en esta torre 3, se presenta flameo inverso en la fase A del circuito 1, la sobretensión que se presenta es mayor de 1 425 kV, por lo tanto la corriente a través de los aisladores es de 9 142 A.

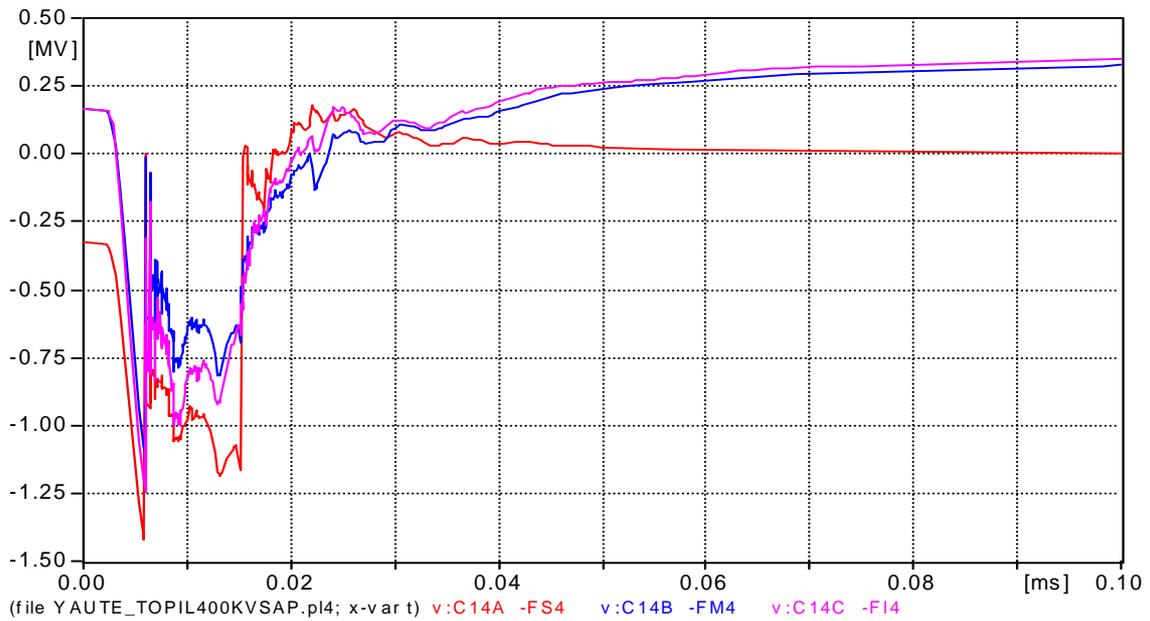


Figura 6.8 Sobretensiones en la línea 1, torres 4, tres fases. Sobretensiones menores a las de flameo.

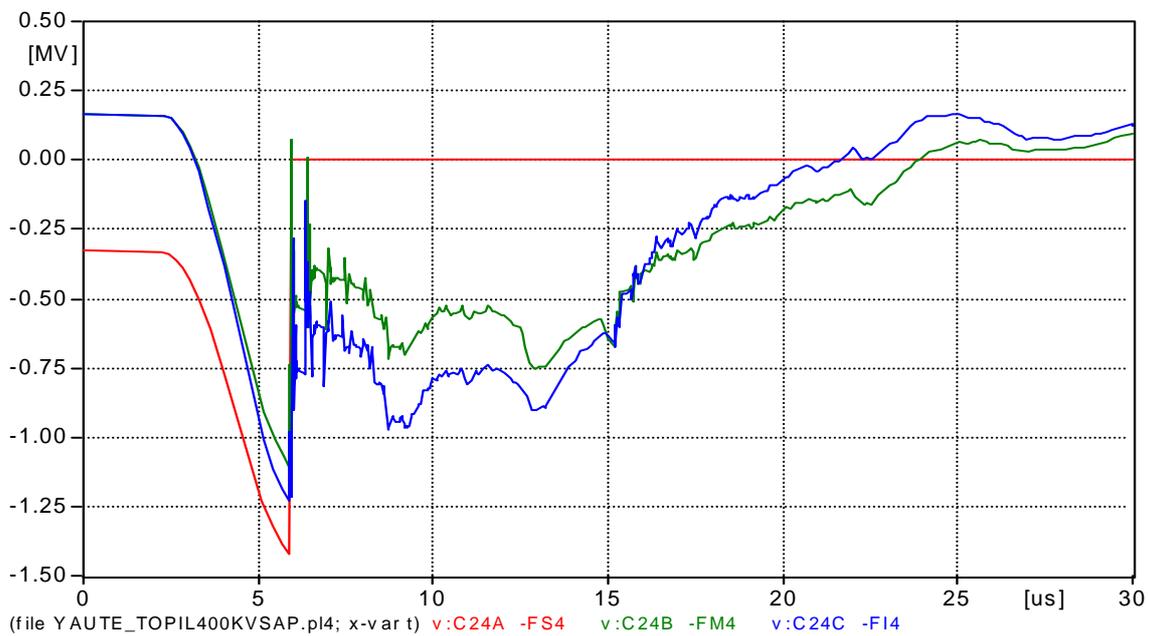


Figura 6.9 Sobretensiones en la línea 2, torres 4, tres fases. Sobretensión mayor 1425 kV en la fase A.

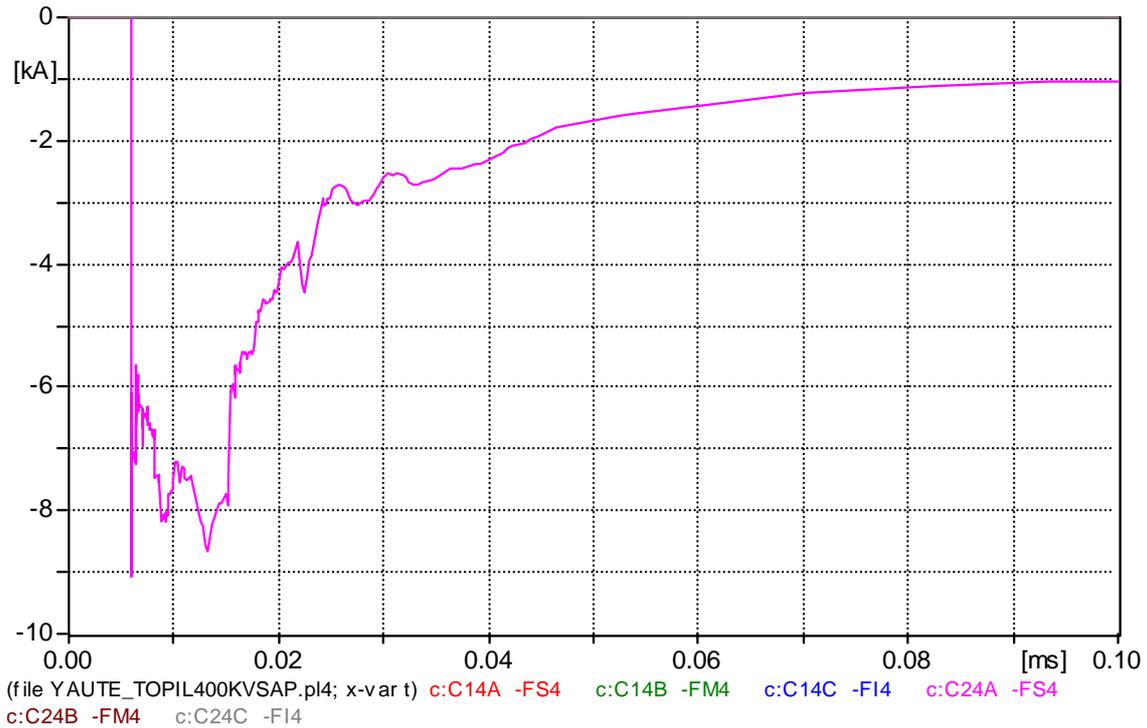


Figura 6.10 Corrientes a través de los aisladores, en los dos circuitos, en la torre 4. en la línea 2, fase A, se presentan 9 089 A, en las fases restantes la corriente es de 0 A.

### 6.3 Conclusión

- ✓ Se concluye que en esta torre 4, se presenta flameo inverso en la fase A del circuito 2, la sobretensión que se presenta es mayor de 1 425 kV, por lo tanto la corriente a través de los aisladores es de 9 142 A.
- ✓ En la torre 5 se presentaron sobretensiones en los dos circuitos menores de 1425 kV, por lo que no hay flameo.
- ✓ Finalmente se concluye que los aisladores de la fase A (parte superior de la torre), en la torre 3 y 4 se ven sometidos a falla por flameo inverso, debido a la caída de una descarga atmosférica de 17 kA.
- ✓ Se recomienda poner apartarrayos en las fases A de la torre 3 y 4.

## CAPÍTULO 7

### **SIMULACIÓN DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LÍNEA BAJO DESCARGA ATMOSFÉRICA CON AYUDA DEL PROGRAMA ATP/EMTP: CON DESCARGA DIRECTA AL HILO DE GUARDA, CON USO DE APARTARRAYO Y CON RESISTENCIA A PIE DE TORRE DE 10 kΩ.**

#### **7.1 Modelado del sistema**

Para la realización del análisis se consideraron los siguientes datos:

- Línea de 400kV.
- Número de circuitos : 2
- Calibre del conductor de fase: 1113 KCM.
- Conductores por fase: 3.
- Tipo de conductor de fase : ACSR/TA
- Tipo de conductor de hilo de guarda: Fibra Óptica.
- Tipo de estructuras: 4CT23, 4x23, 4YR23 Y 4A23.
- Resistividad del terreno mayores de 1000 Ω.m.
- Resistencia de pie de torre mayores de 10 kΩ
- Nivel basico de aislamiento 1425 kV.
- Corriente de rayo: 17 kA

#### **7.2 Apartarrayo**

Las características del apartarrayo que se usaron para esta simulación son :

- Tensión Nominal apartarrayo  $U_r = 312$  kV
- Clase de descarga: 3

- Tensión de operación continua MCOV = 250 kV

Con la ayuda del programa de simulación ATP/EMTP, se formó el circuito utilizado en la figura 8.1, para analizar el efecto de una descarga atmosférica directa a uno de los hilos de guarda (HG13).

En las figuras 7.2, 7.3, 7.4, se observa las sobretensiones y corrientes , en las fases A, B y C de las dos líneas, en las torres de los circuitos C13 (línea 1 ,torre 3), C23 ( línea 2, torre 3) , C12, C22 ( líneas 1 y 2 , torre 2) , C14 , C24 ( línea 1 y 2 torre 4).

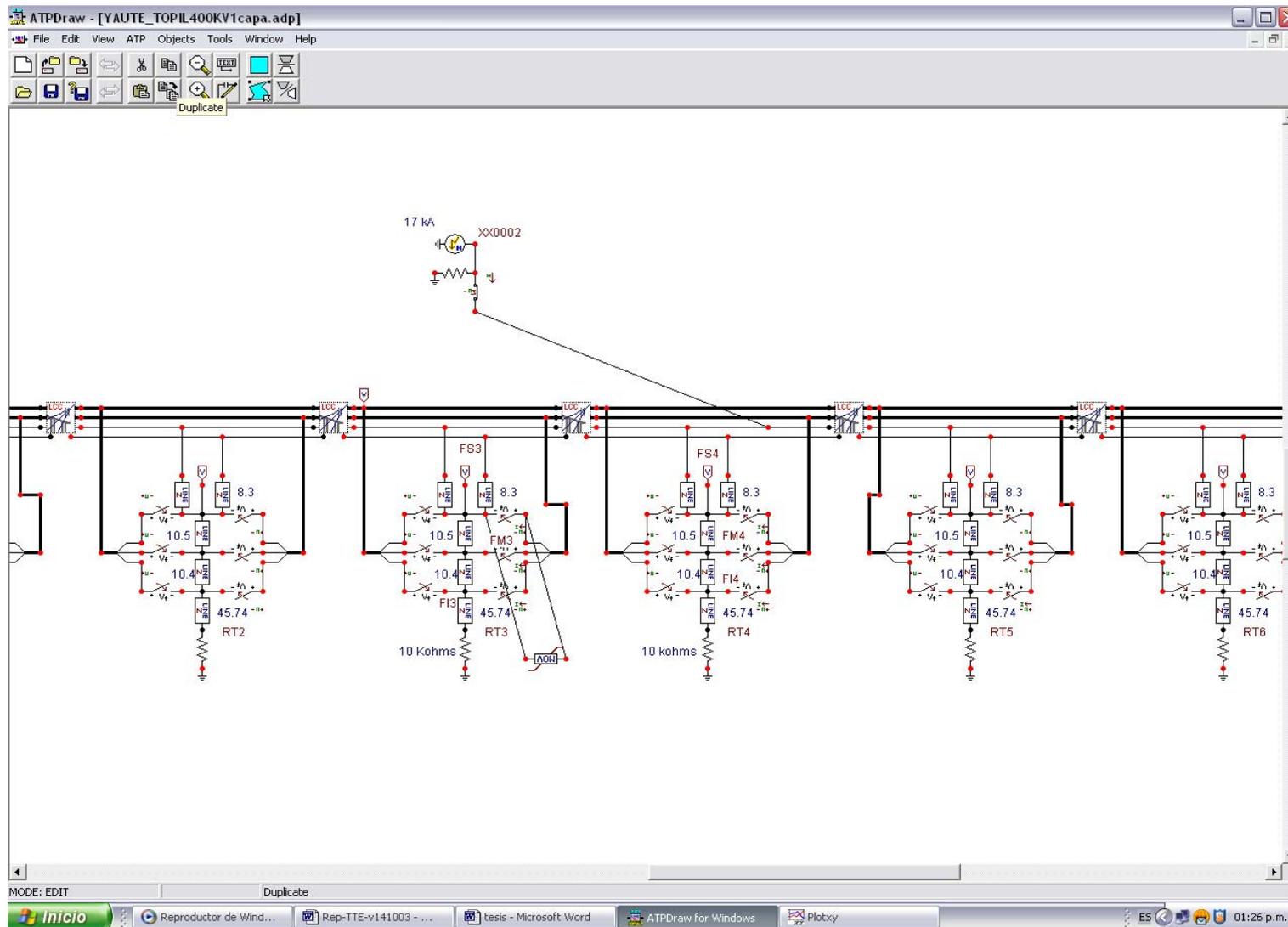


Figura 7.1 Circuito, para simular la descarga atmosférica directa al hilo de guarda, circuito 1, torre 4, con apartarrayo.

### 7.3 Resultados de la simulación del circuito de la figura 7.1

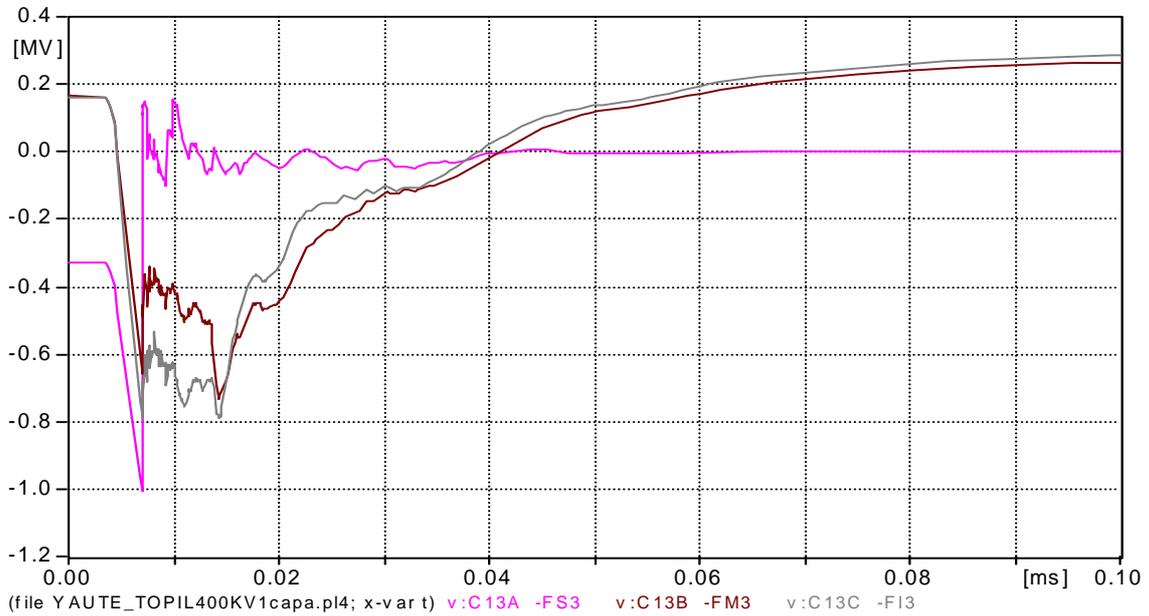


Figura 7.2 Sobretensiones en la torre3, línea1, en las tres fases

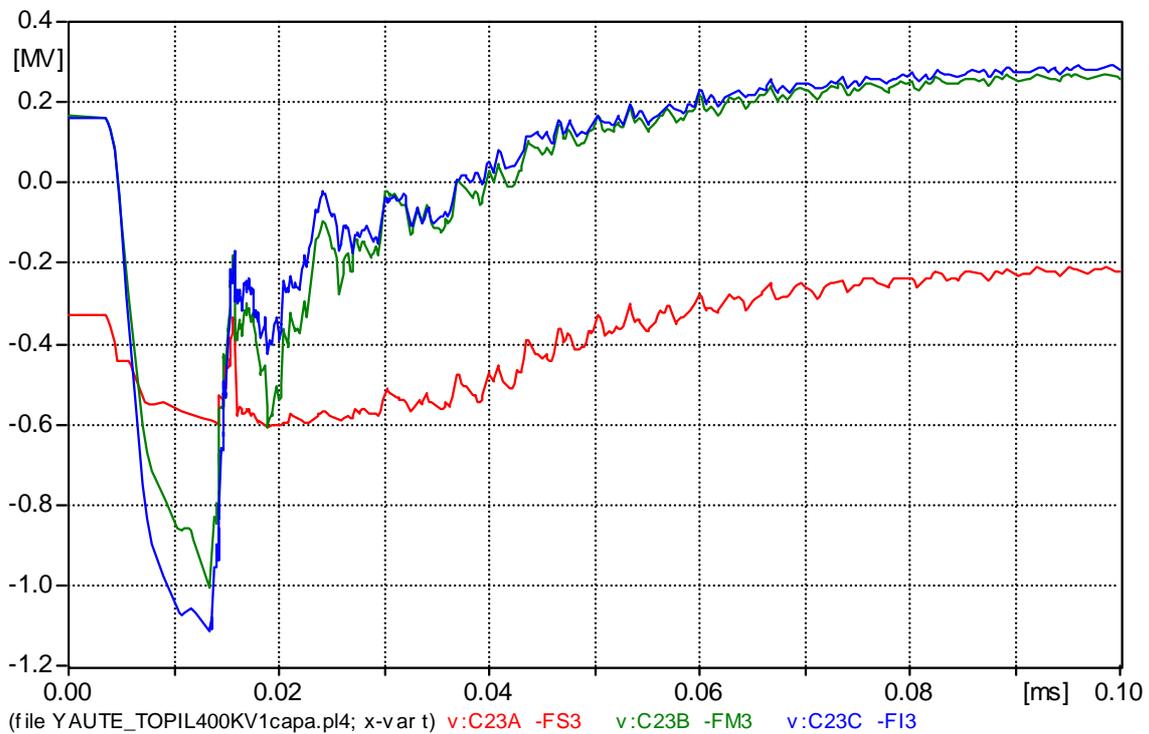


Figura 7.3 Sobretensiones en la torre 3, línea 2, en las tres fases.

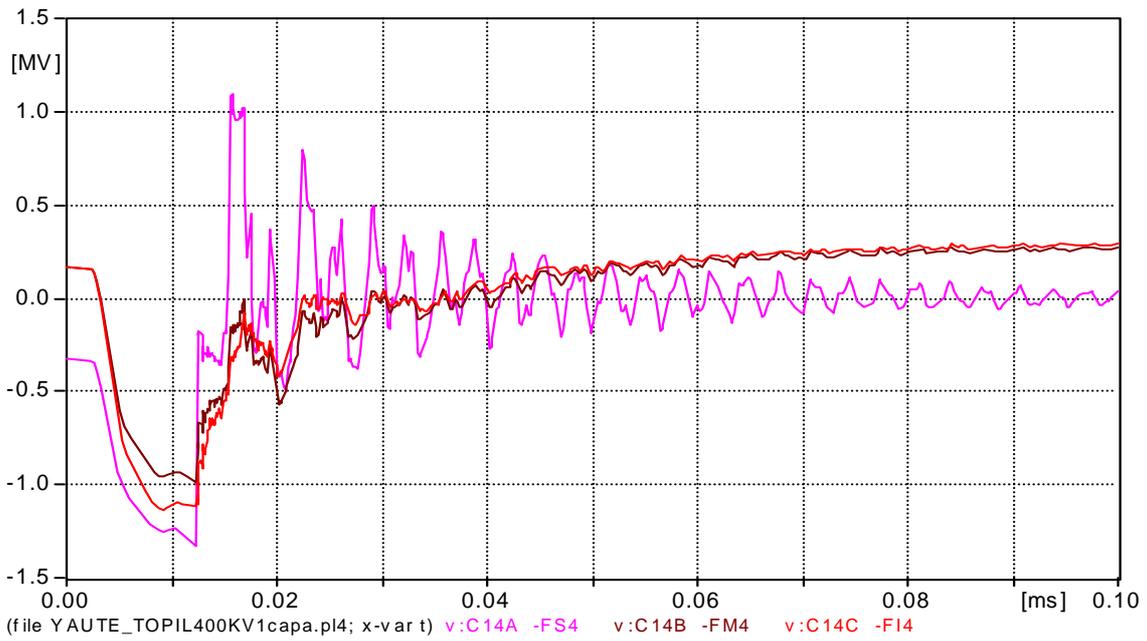


Figura 7.4 Sobretensiones en la torre 4, línea 1, en las tres fases.

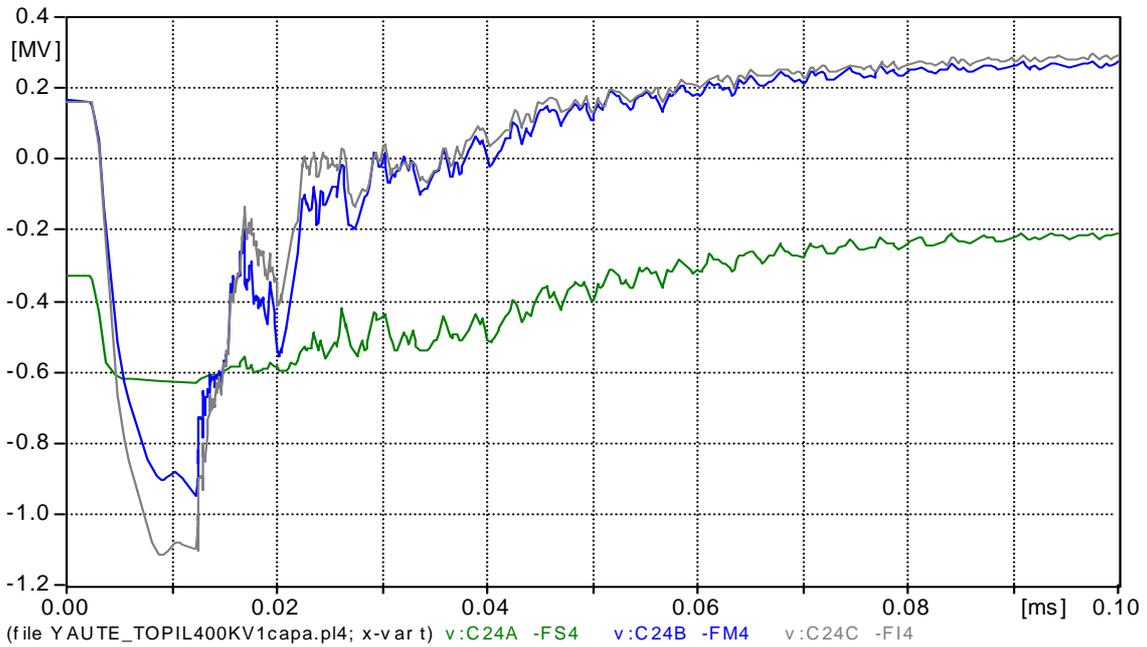


Figura 7.5 Sobretensiones en la torre 4, línea 2, en las tres fases.

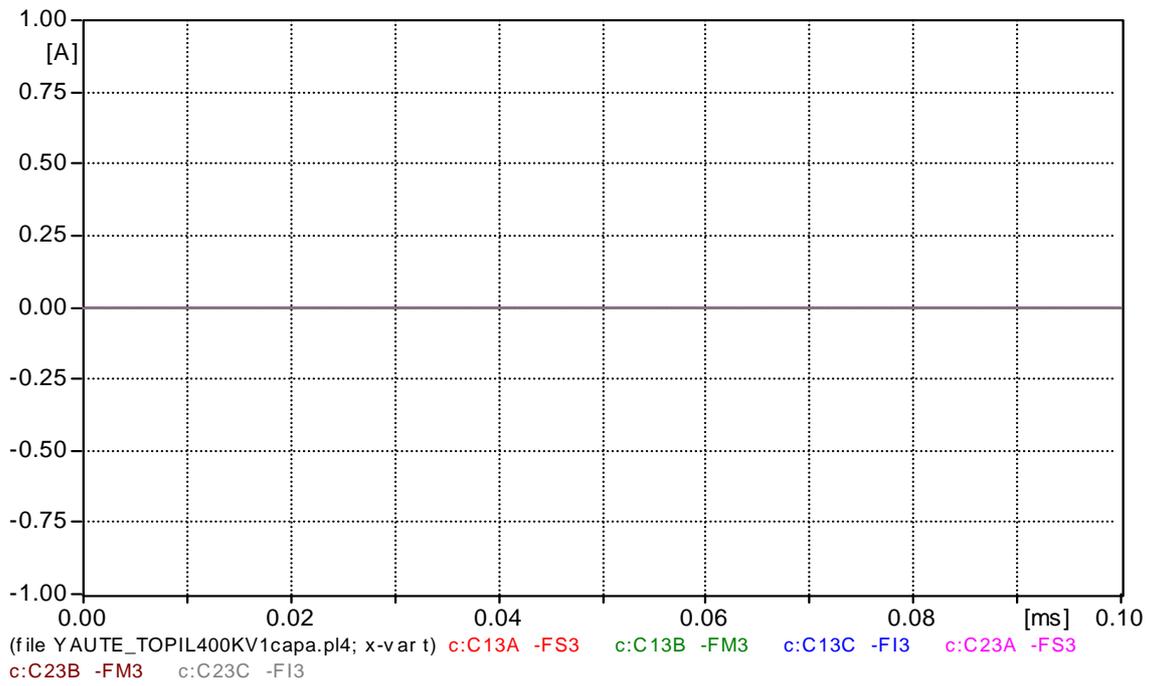


Figura 7.6 Corrientes en las tres fases, de los dos circuitos de la torre 3.

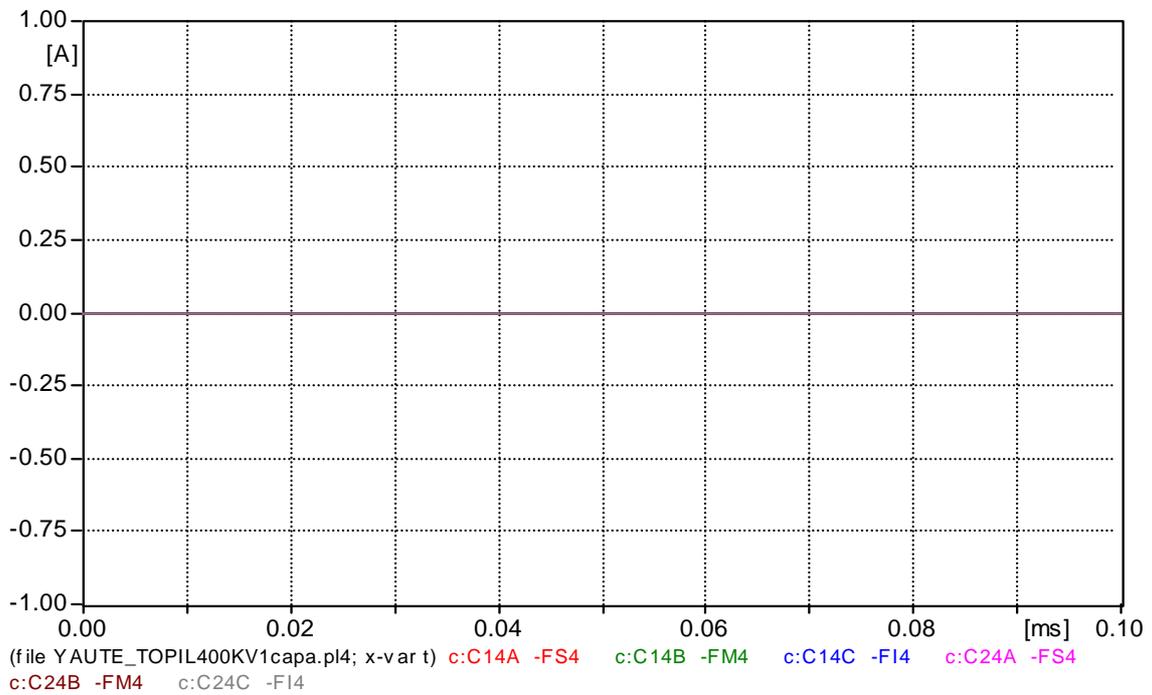


Figura 7.7 Corrientes en las tres fases, de los dos circuitos de la torre 4.

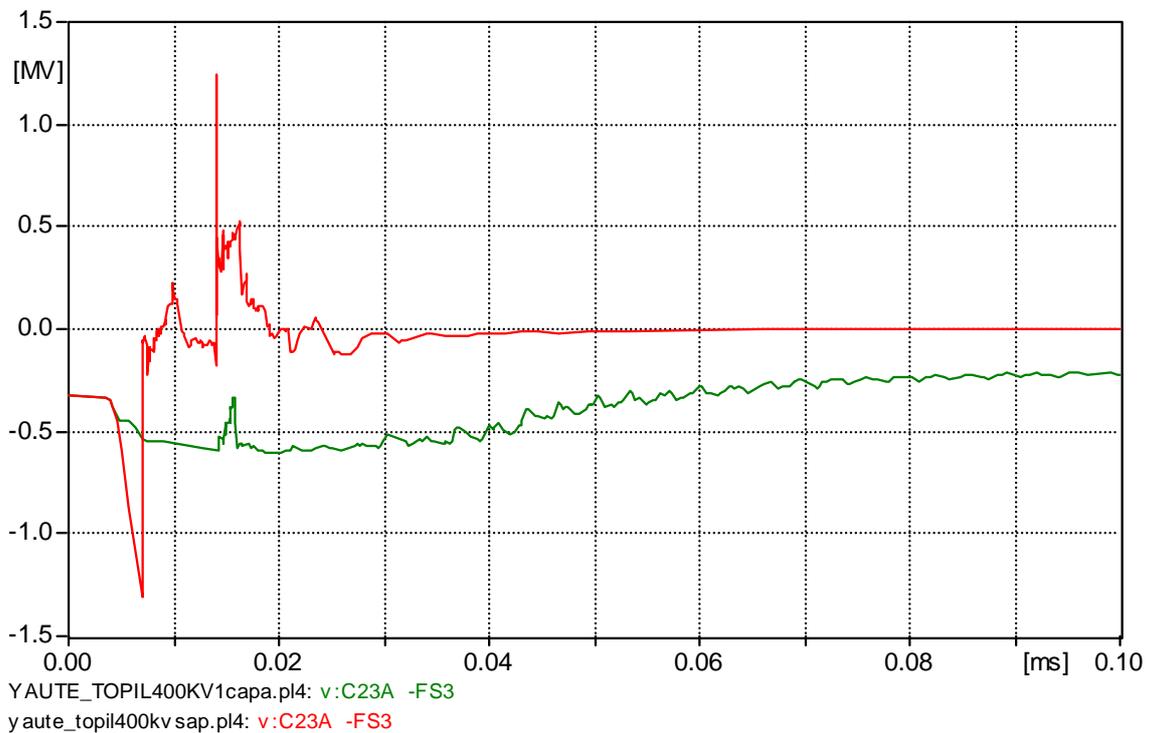


Figura 7.8 Sobretensiones que se presentan en la cadena de aisladores del circuito 2, torre 3, fase A, cuando hay apartarrayos (V C23A- FS3) y cuando no hay apartarrayos.

### 7.4 Conclusiones

- ✓ Al colocar apartarrayos de óxido de zinc en la torre 3 y 4 se observa que las sobretensiones en las fases de las dos líneas se reduce, al valor del voltaje de referencia del apartarrayo  $V_{ref} = 613316$  volts.
- ✓ Por lo que ya no hay circulación de corriente por los aisladores de las torres 3 y 4. La corriente a través de los aisladores es de cero A.
- ✓ En la figura 7.8 se observa, como disminuye la sobretensión en la cadena de aisladores al colocar un apartarrayo en paralelo con la cadena de aisladores.

## CAPÍTULO 8

### **SIMULACIÓN DEL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LÍNEA BAJO DESCARGA ATMOSFÉRICA CON AYUDA DEL PROGRAMA ATP/EMTP: CON DESCARGA DIRECTA AL HILO DE GUARDA, SIN USO DE APARTARRAYO Y CON RESISTENCIA A PIE DE TORRE DE 10 $\Omega$ , NO HAY FLAMEO INVERSO**

#### **8.1 Modelado del sistema**

Para la realización del análisis se consideraron los siguientes datos:

- Línea de 400kV.
- Número de circuitos: 2
- Calibre del conductor de fase: 1113 KCM.
- Conductores por fase: 3.
- Tipo de conductor de fase: ACSR/TA
- Tipo de conductor de hilo de guarda.
- Tipo de estructuras: 4CT23, 4x23, 4YR23 Y 4A23.
- Resistividad del terreno mayores de 1000  $\Omega$ .m.
- **Resistencia de pie de torre de 10  $\Omega$ , como lo pide la especificación[5].**
- Nivel básico de aislamiento 1425 kV.
- Corriente de rayo: 17 kA

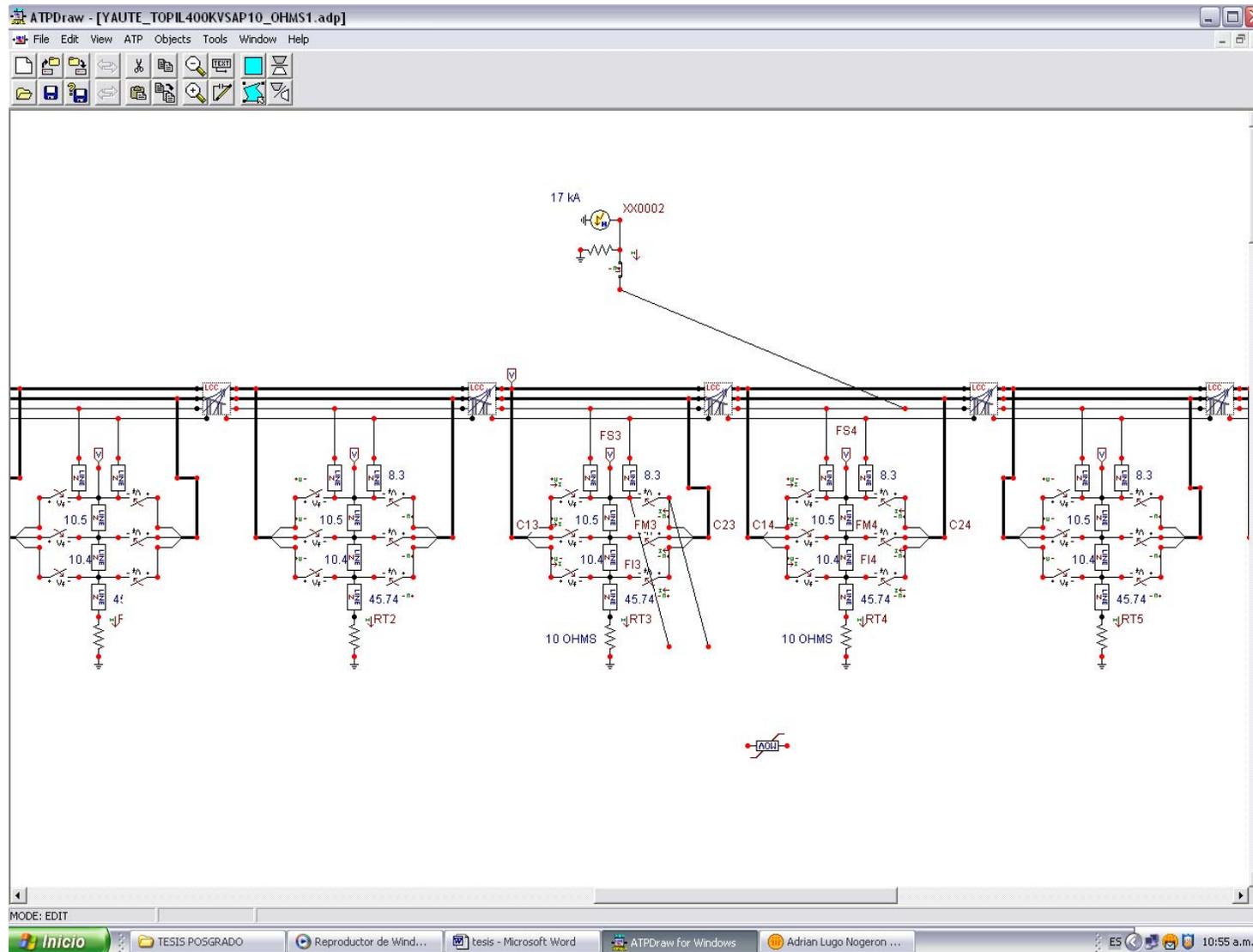


Figura 8.1 Circuito, para simular la descarga atmosférica directa al hilo de guarda, circuito 1 , torre 4, sin apartarrayo y con resistencia de puesta a tierra de 10  $\Omega$

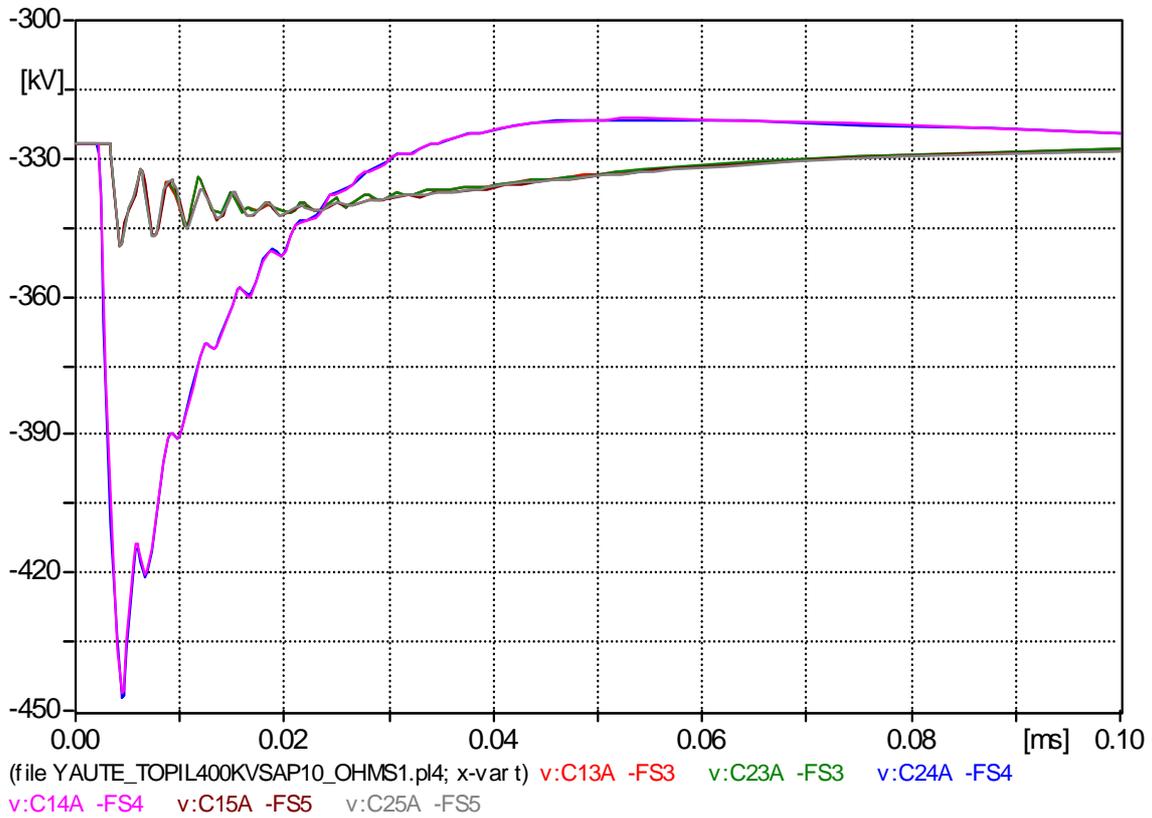


Figura 8.2 Sobretensiones en las torres 3, 4 y 5, de los circuitos 1 y 2, fase A.

En la figura 9.2 se observa que las sobretensiones son menores de 1 425 kV, por lo que no hay flameo inverso. Lo anterior es debido a la baja resistencia de puesta a tierra en las torres mencionadas.

En la figura 8.3 se observa como las corrientes que se drenan a tierra debido a la baja resistencia de torre, es la corriente del rayo.

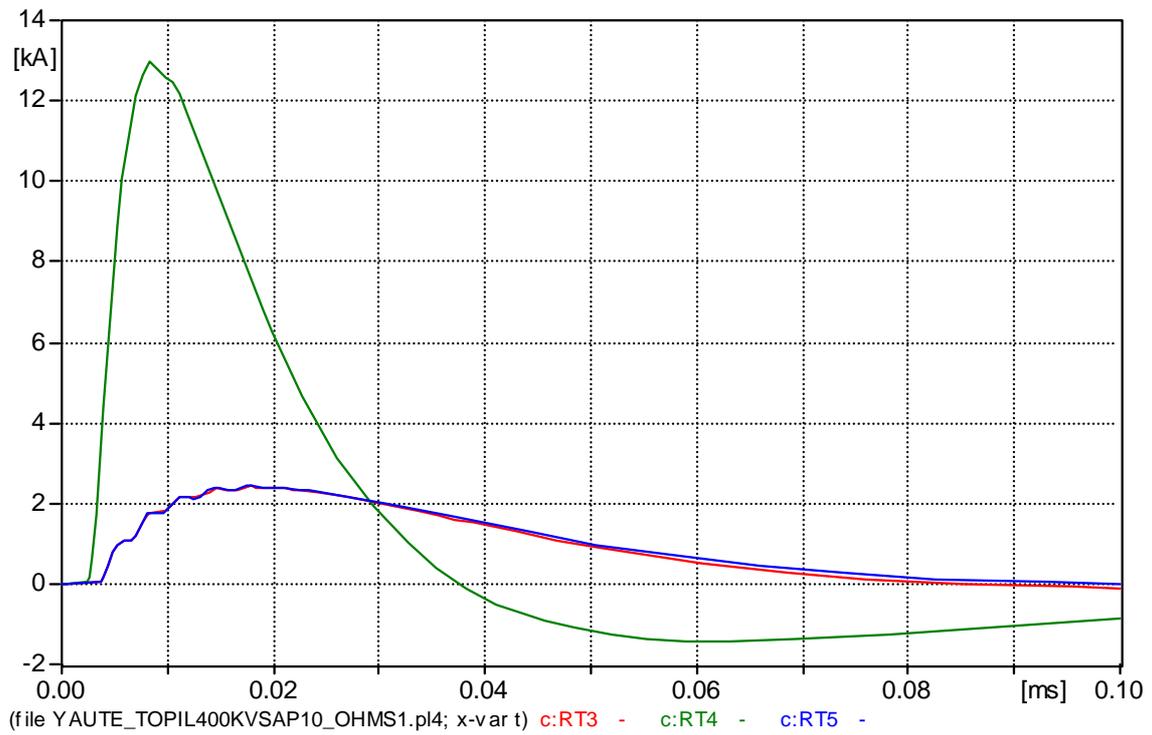


Figura 8.3 Se observan las corrientes que se drenan a tierra, en las torres 3, 4 y 5.

Se observa que la puesta a tierra de la torre 4, que es donde cae la descarga atmosférica, funciona correctamente drenando a tierra la corriente del rayo. Por lo que no ocurre flameo inverso.

## 8.2 Conclusiones

- ✓ Al colocar apartarrayos de óxido de zinc en la torre 3 y 4 se observa que las sobretensiones en las fases de las dos líneas se reduce, al valor de la tensión de referencia del apartarrayo,  $V_{ref} = 613316 \text{ V}$ .
- ✓ Por lo que ya no hay circulación de corriente por los aisladores de las torres 3 y 3. La corriente a través de los aisladores es 0 A.
- ✓ Se concluye que deben colocarse apartarrayos en dos torres adyacentes de donde caen las descargas atmosféricas.
- ✓ La función del apartarrayo es absorber la sobretensión e introducirla dentro del conductor de línea y disipar la energía a través de él o drenarla la corriente a torres cercanas donde la puesta a tierra sea menor de  $10 \Omega$ .
- ✓ La especificación [5], indica que no debe de corregirse la red de puesta a tierra, en terrenos donde la resistividad sea mayores de  $1000 \Omega \cdot \text{m}$  y debe hacerse un estudio de confiabilidad.
- ✓ Estudio de confiabilidad es hacer estudios de donde utilizar apartarrayos, en función de la resistividad medida del terreno, de los ángulos de blindaje de los hilos de guarda y de la magnitud de las descargas atmosféricas.
- ✓ En líneas donde se han colocado apartarrayos han disminuido de manera significativa las salidas de estas debido a descargas atmosféricas en un 30 %, como se observa en la tabla 1.2.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Del análisis de los resultados obtenidos, se mostró que la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión de alta tensión permite disminuir de manera significativa la salida de las mismas debido a la presencia de descargas atmosféricas.
2. De las simulaciones realizadas, mediante el uso del programa ATP/EMTP de descargas en líneas de transmisión de 400 kV, se concluye que en el terreno circundante a las torres bajo estudio, que presentan valores infinitos de resistividad, la corriente del rayo mínima para provocar un flameo inverso en cualquier fase es del orden de 14 kA.
3. Se observó que con una corriente de rayo con una magnitud del orden de 14 kA, cuya probabilidad de ocurrencia es del orden del 88 %, la probabilidad de que exista un flameo inverso es alta para líneas de transmisión que se ubiquen en zonas en las que se tiene un índice de seis a ocho rayos por km<sup>2</sup> al año y en una altura de aproximadamente 3 000 msnm.
4. Con la aplicación de apartarrayos se evita el flameo inverso obteniendo un mejor comportamiento de la línea de transmisión ante las descargas atmosféricas.
5. Se ha mostrado la gran utilidad de los programas ATP/EMTP, ATPDRAW y PLOTXY para realizar el tipo de análisis comprendidos en este trabajo. Este grupo de programas son eficaces en la obtención de parámetros, modelación versátil de componentes especializadas así como en la obtención de gráficas de calidad. Adicionalmente, es que son de distribución gratuita controlada. En ese ambiente de solución, la limitación en la representación de los componentes de la línea de transmisión y los apartarrayos queda del lado del usuario. Los datos y los modelos que el usuario utilice limitan la precisión de los estudios.
6. Se recomienda que para los tramos de la línea que presenten valores altos de resistividad (mayores a 1 000  $\Omega$ .m), se utilicen apartarrayos de línea por fase en ambos circuitos.
7. Con la finalidad de disminuir la probabilidad de salida de líneas de transmisión, se recomienda adicionalmente que los valores de la resistencia de puesta a tierra deben ser menores o igual de 10  $\Omega$ . En los anexos 2,3,4 y 5 se recomienda los tipos de sistemas de puesta a tierra que deben utilizarse para que cumplan con los 10  $\Omega$ .

ANEXOS

**ANEXOS**

## **Anexo 1**

### **Método de wenner o de los 4 electrodos para la medición de la resistividad del subsuelo**

#### **Generalidades**

La resistividad del subsuelo es una forma rápida y práctica aunque indirecta de valorar las características y condiciones del subsuelo, ya que está en función del tipo, compactación, contenido de humedad y sales solubles en los estratos. Es el inverso de la conductividad eléctrica.

Debido a que la humedad del subsuelo y la temperatura no son constantes, el valor de la resistividad sólo es verdadero para el momento de la medición.

#### **Material y Equipo**

- a) Medidor de resistencia de baja frecuencia (de 60 a 200 Hz con una capacidad de inyección de corriente de 10 mA), pudiendo ser analógico o digital, el cual debe cumplir con los requerimientos de calibración indicados en el Apéndice C de esta especificación
- b) Electrodo verticales de acero inoxidable, galvanizado o con revestimiento de cobre soldado, de 40 a 60 cm de longitud por 6 mm de diámetro mínimo, con punta en un extremo.
- c) Cables de cobre aislado para conexión de sección transversal mínima de 2 mm<sup>2</sup>, con caimanes en un extremo y en el otro, la terminal adecuada al medidor de resistencia que se utilice, siendo la más común la del tipo banana

#### **Procedimiento de Medición**

- a) Verificar la carga de las baterías antes de iniciar las mediciones.
- b) Verificar que el equipo funcione correctamente, véase apéndice C.
- c) Clavar cuatro electrodos verticales en el suelo, hasta lograr un buen contacto eléctrico, dispuestos en línea recta con una separación uniforme entre ellos. Se recomienda que las separaciones entre los electrodos verticales sean submúltiplos de 1,6 m (1,6m; 3,2m; 4,8m; 6,4m, etc.) según se requiera.
- d) Se debe procurar que los electrodos verticales queden alineados y verticales, que no existan huecos alrededor de ellos y que estén clavados a la misma profundidad, sin exceder 16 cm para la medición a 1,6 m y 32 cm para la medición a 3,2 m entre electrodos verticales y así sucesivamente.

- c) Las terminales de corriente del instrumento C1 y C2 se conectan a los electrodos verticales de los extremos y las de potencial P1 y P2 a los electrodos verticales intermedios como se indica en la figura A1.
- d) Para terrenos secos, se puede humedecer ligeramente el terreno alrededor de cada electrodo vertical.
- e) Si el equipo cuenta con una terminal de tierra (G), debe conectarse a un quinto electrodo o electrodo vertical, instalado a la mitad de la distancia entre los electrodos verticales de potencial (P1 y P2.)
- f) Efectuar la medición con equipo de baja frecuencia y tomar el valor de la resistencia en ohm.
- g) Calcular la resistividad del subsuelo mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = 2 \pi a R$$

Donde:

$R$  = resistencia medida en  $\Omega$

$a$  = separación entre electrodos en m

$\rho$  = resistividad del subsuelo en  $\Omega \cdot m$

$\pi = 3,1416$

Para  $a = 1,6$  m  $\Rightarrow \rho \approx 10 R$  ( $\Omega \cdot m$ )

Para  $a = 3,2$  m  $\Rightarrow \rho \approx 20 R$  ( $\Omega \cdot m$ )

- h) Los valores obtenidos se deben asentar en el formato 1 para líneas en construcción o en el formato 3 para líneas en operación.

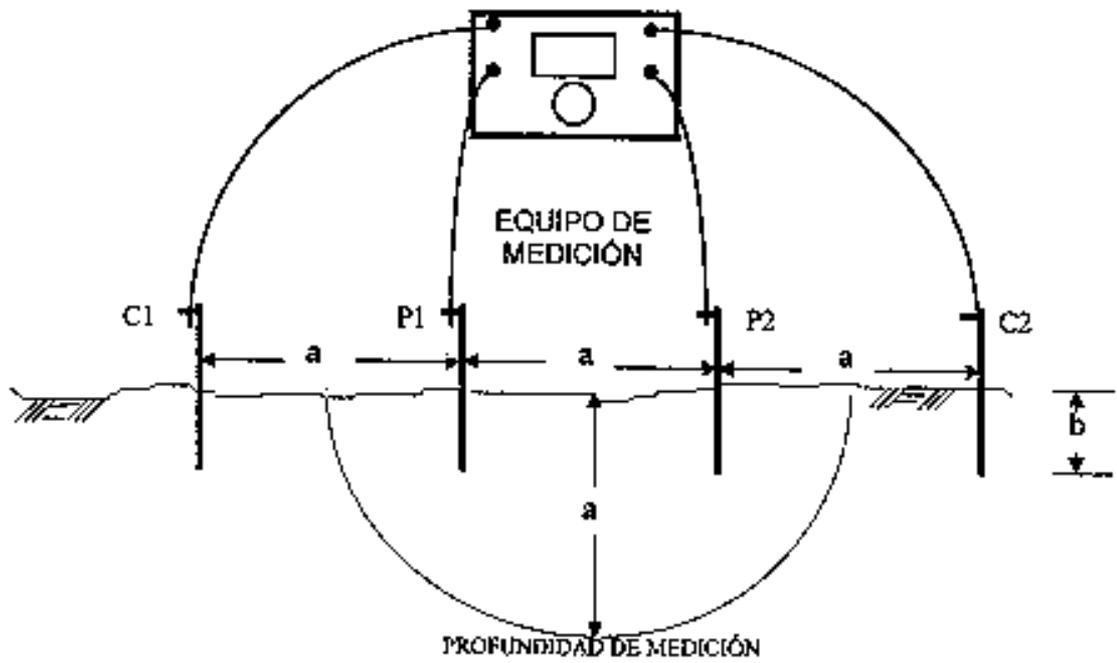


Figura A1.1 Medición de resistividad por el método "Wenner"

ANEXOS

**FORMATO 1 - Medición de la resistividad del subsuelo para líneas de transmisión en Construcción.**

LT:  Estructura número:  Fecha:

*Equipo de Medición*

Marca:  Modelo  Núm. de serie  Frecuencia de medición  Hz

*Datos de Calibración del Equipo de Medición*

Folio  Núm. de identificación  Fecha de calibración  Fecha de vencimiento

*Dirección de la Medición*

(para estructuras autoportadas)

Arreglo A  Involucra patas 1 y 3

Arreglo B  Involucra patas 2 y 4

**Descripción del suelo**

Superficie del terreno: Mojado  Húmedo  Seco  Muy seco

Uso del suelo: Cultivo  Cerril  Bosque  Otros

Tipo de suelo: Roca  Grava  Arena  Arcilla  Limo

**Resultado de las Mediciones**

Pata No:

A (m)	R ( $\Omega$ )	$2 \pi a$ (m)	$\rho = 2 \pi a R$ ( $\Omega m$ )	Observaciones
1,6		10		
3,2		20		
4,8		30		
6,4		40		
8,0		50		
9,6		60		
11,2		70		

Pata No:

ANEXOS

<b>A</b> (m)	<b>R</b> ( $\Omega$ )	<b>2 <math>\pi</math> a</b> (m)	<b><math>\rho = 2 \pi a R</math></b> ( $\Omega$ m)	<b>Observaciones</b>
1,6		10		
3,2		20		
4,8		30		
6,4		40		
8,0		50		
9,6		60		
11,2		70		

Donde:

a : separación entre electrodos

**R : resistencia medida**

**$\rho$  : resistividad del subsuelo**

**Nota:** En la medición con la distancia  $a=1,6$  m, la profundidad máxima de los electrodos verticales debe ser de 16 cm y para las otras mediciones debe ser, de preferencia, menor a 32 cm

**Formato 2 - Medición de la resistencia eléctrica del sistema de puesta a tierra de la líneas de transmisión en construcción.**

LT:  Estructura número:  Fecha:

*Equipo de Medición*

Marca:  Modelo  Núm. de serie  Frecuencia de medición  Hz

*Datos de Calibración del Equipo de Medición*

Folio  Núm. de identificación  Fecha de calibración  Fecha de vencimiento

	<b>Descripción del suelo</b>			
<b>Superficie del terreno:</b>	Mojado <input type="text"/>	Húmedo <input type="text"/>	Seco <input type="text"/>	Muy seco <input type="text"/>
<b>Uso del suelo:</b>	Cultivo <input type="text"/>	Cerril <input type="text"/>	Bosque <input type="text"/>	Otros <input type="text"/>
<b>Tipo de suelo:</b>	Roca <input type="text"/>	Grava <input type="text"/>	Arena <input type="text"/>	Arcilla <input type="text"/> Limo <input type="text"/>

**Resultado de las Mediciones**  
**Distancia del electrodo "E" al electrodo "C" = 75 m**

Lectura No	Distancia del electrodo "P" (m)	Lectura del equipo	Escala	Resistencia ( $\Omega$ )
1	39			R1=
2	46,5			R2=
3	54			R3=

**PORCIENTO DE VARIACIÓN**

$$\Delta R_{2-1} = \frac{(R_2 - R_1)}{R_2} \times 100 = \text{____} \%$$

$$\Delta R_{3-2} = \frac{(R_3 - R_2)}{R_2} \times 100 = \text{____} \%$$

Si no se cumple cualquiera de las siguientes dos condiciones:

- la diferencia máxima  $\Delta R$  entre mediciones sea menor que 1  $\Omega$  para cuando el valor máximo medido sea menor que 5  $\Omega$ .
- la diferencia máxima  $\Delta R$  entre mediciones sea menor que el 15% para cuando el valor máximo medido sea mayor que 5  $\Omega$ .

Entonces la distancia entre el electrodo **E** y el electrodo **C** se debe duplicar, repitiendo las mediciones de R1, R2 y R3



**Anexo 2****Contrantenas y sus electrodos para la red de puesta a tierra de líneas de transmisión en construcción**

INTERVALO DE RESISTIVIDAD RECOMENDADA DE DISEÑO $\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	LONGITUD DE CONTRA ANTENAS Y NUMERO DE SUS ELECTRODOS POR PATA		FIGURA No.
	LONGITUD DE CONTRA-ANTENA POR PATA (m)	No. DE ELECTRODOS VERTICALES P/CONTRA-ANTENA (varillas)	
menor que 100	3	1	1
100 a 300	6	2	2
300 a 500	12	3	3
500 a 750	24	5	4
750 a 1000	30	6	5
mayor que 1000	30	6	5

**Anexo 3****Profundidad de las contra-antenas con relación al terreno donde se instalarán.**

0,8 m	En terrenos no cultivables
1,5 m	En terrenos de cultivo
0,4 m	En terreno rocoso

**Anexo 4****Especificación de materiales para la construcción de los sistemas de puesta a tierra.**

<b>Concepto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Norma o especificación aplicable</b>
Alambre o Cable de Cobre	Alambre de cobre electrolítico, en sección circular, temple semiduro, de sección transversal de 33,62 mm <sup>2</sup> o mayor, Conductividad I.A.C.S. a 20 8C 97.66 %.	NOM 063 SCFI, NMX-J 002, NMX-J 035, NMX-J 036, NMX-J-012, CFE E0000-32
o Cable de acero recubierto de cobre	Cable de acero con recubrimiento de cobre soldado (30 ACS 7 No. 9) de sección transversal de 46,44 mm <sup>2</sup> o mayor, diámetro nominal de 8,71 mm de resistencia de 1,27481 /km	CFE E0000-33
Electrodos de tierra	Varilla de acero con recubrimiento de cobre electrolítico de acuerdo a la especificación.	CFE 56100-16
Conexiones soldables	Conexiones soldables tipo exotérmico prototipo probado de acuerdo con los requerimientos establecidos en la norma.	IEEE-STD 837
<b>Notas:</b>		
1. Las normas o especificaciones indicadas corresponden a las vigentes.		
2. No se acepta el uso de conectores a compresión o atornillables.		

## Anexo 5

## Correcciones para mantenimiento de redes de tierra.

Intervalo de resistividad ( $\Omega$ -m)	sistema de puesta a tierra para estructuras				Cimentación	
	Longitud de contra-antena ( 4 piezas)		Número de electrodos por contra-antena		Concreto	acero
	Cimentación de concreto	Cimentación de acero	Cimentación de concreto	Cimentación de acero		
Menor que 100	3	0	1	0	18	= =
100 a 300	6	6	2	1	19A	19B
300 a 500	12	12	3	2	20A	20B
500 a 750	24	24	5	4	21A	21B
750 a 1 000	30	30	6	5	22A	22B
Mayor que 1 000	Diseño especial				= =	= =

**BIBLIOGRAFÍA:****BIBLIOGRAFÍA:**

1	Coordinación de aislamiento por descargas atmosféricas en Líneas de Transmisión, Comisión Federal de Electricidad – 1996.
2	Fallas, estadísticas y trabajos relevantes en líneas de transmisión, CFE, Coordinación de Transmisión ,2005.
3	Transitorios en Sistemas de Potencia y su Calculo Dr. Mustafa Kizilcay
4	Manual del ATP – EMTP, Rule Book
5	Redes de Puesta a Tierras para Estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas de 69 a 400 kV, Especificación CFE 00JL0 - 28. México. Agosto 2006.
6	IEEE Guía para seguridad en aterrizamiento en subestaciones de CA, IEEE STD 80- 2000
7	Selección de Electroodos y Rellenos Químicos para Sistemas de Tierra de Líneas de Transmisión, LAPEM-CFE, Cortes Ignacio y Lara Carlos. Mayo1997.
8	Apartarrayos de Óxidos Metálicos pata Líneas de Transmisión, Norma de Referencia. NRF-004- CFE- 2007
9	T&D COMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. Draft Full-use guide for improving the lightning Performance of electric power overhead distribution lines. Febrero 2003
10	Simulación de apartarrayos en líneas de transmisión, apuntes, LAPEM-CFE, Peñaloza Sánchez Francisco, junio 2001.
11	Transitorios electromagnéticos, notas, SEPI-ESIME, Gilberto Enríquez Harper, año 2000.
12	Lighting protection for distribution and transmission systems. Protecto lite 400, Ohio Brass