

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



## TRABAJO DE DIPLOMA

Título: "Descargas atmosféricas en la Red de Generación Distribuida"

Autor: Roberto C. Ramírez Carrillo

Tutor: **Dr. Ing.** Ángel Valcárcel Rojas

Santa Clara  
2006

"Año de la Revolución Energética en Cuba"



Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas  
Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



## TRABAJO DE DIPLOMA

Título: "Descargas atmosféricas en la Red de Generación Distribuida"

Autor: Roberto C. Ramírez Carrillo  
Email: rcero2@yahoo.es

Tutor: **Dr. Ing.** Ángel Valcárcel Rojas  
Profesor Auxiliar  
Centro de Estudios Electroenergéticos  
Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Email: valca@uclv.edu.cu

Santa Clara  
2006

"Año de la Revolución Energética en Cuba"





Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de Departamento

---

Responsable de Información  
Científico-Técnica

Pensamiento

## PENSAMIENTO

*Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica:  
la voluntad.*

*Albert Einstein*

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico:

- Mis padres.
- Mis amigos.
- Todos aquellos presentes o no entre nosotros que de cierta forma dieron su grano de arena para que llegase hasta aquí.
- A alguien muy especial para mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

1. Nuevamente a mis padres por el apoyo que me han dado.
2. Al tutor por su labor durante el trabajo.
3. A toda la familia por su apoyo incondicional.

## TAREA TÉCNICA

1. Búsqueda de información sobre los sistemas de generación distribuida y comportamiento ante rayos de sistemas de subtransmisión y distribución.
2. Familiarizarse con el uso del programa ATPDRAW.
3. Modelar en ATPDRAW un sistema de generación distribuida como los que se están instalando en el país.
4. Realizar el análisis del comportamiento ante rayos del sistema modelado.
5. Comentar los resultados obtenidos.
6. Obtener conclusiones de los resultados obtenidos.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## **RESUMEN**

En un país como Cuba donde la actividad de tormenta es relativamente grande es indispensable la realización de un estudio previo del comportamiento ante rayos de toda instalación que se haga. En la literatura consultada no existe información al respecto.

En el presente trabajo con la ayuda del ATPDRAW se hace un análisis del comportamiento ante rayos de los grupos electrógenos que se están instalando en el país, teniendo en cuenta los posibles niveles de puesta a tierra del grupo, su efecto en los niveles de sobretensión que generan los rayos, las contribuciones de corriente de los generadores bajo condiciones de operación de los pararrayos, el efecto de la conexión entre el cable protector de la línea y la malla de tierra del grupo y la ubicación del pararrayo por el lado de 34.5 o de 4.16 kV. De acuerdo a los resultados se tomara en cuenta cual es la variante que menos perjudicial le es a la red.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA .....	iv
RESUMEN .....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>Capítulo I: Generación Distribuida .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1- Introducción .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2-Tipos de tecnologías.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1-Restricciones a tomar en cuenta.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Aplicaciones de la generación distribuida .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4- Beneficios de la generación distribuida .....</b>	<b>7</b>
<b>1.5-Calidad de la energía.....</b>	<b>8</b>
<b>1.6-Mundo, desarrollo de la GD .....</b>	<b>9</b>
<b>1.7-CUBA. Panorama actual.....</b>	<b>10</b>
<b>1.7.1- Nuestro sistema eléctrico .....</b>	<b>11</b>
<b>1.7.2 -Condiciones actuales del sistema electroenergético.....</b>	<b>11</b>
<b>1.8-Nuevas Plantas que se integran a los Sistemas Eléctricos.....</b>	<b>12</b>
<b>1.8.1-Corriente de aire.....</b>	<b>14</b>
<b>1.9-Generación Distribuida En Villa Clara .....</b>	<b>15</b>
<b>1.9.1-Se garantizan en emergencia con GE: .....</b>	<b>17</b>
<b>1.9.2-Organizaciones responsables del montaje y mantenimiento .....</b>	<b>17</b>
<b>1.10-Programa de mejoras en Villa Clara .....</b>	<b>18</b>
<b>1.11-Trabajos a Realizar en las Redes y Subestaciones .....</b>	<b>18</b>

1.12-Resultados que se esperan después de ejecutar el programa de mejoras: .....	19
<b>Capitulo II: Modelación en Atpdraw del Sistema de Generación.....</b>	<b>20</b>
2.1.-Introducción .....	20
2.2.- Modelación de la fuente que representa el Sistema.....	20
2.3.- Modelación de la línea de subtransmisión a 34.5 kV. ....	22
2.4- Modelación del pararrayo. ....	23
2.4.1. Modelación de los aisladores.....	24
2.4.2.- Modelación de los transformadores.....	25
2.5.-Modelación de las puestas a tierra.....	27
2.6.-Modelación de los generadores.....	28
2.7.- Modelo general del sistema.....	28
<b>Capitulo III: Análisis de los resultados.....</b>	<b>30</b>
3.1- Introducción .....	30
3.2-Ubicación de pararrayos por el lado de baja.....	30
3.2.1-Efectos de la resistencia de puesta a tierra en la magnitud de las sobretensiones.....	30
3.3-Ubicación del pararrayos en el lado de alta tensión.....	35
3.3.1-Impacto sobre la línea. ....	35
3.3.2-Impacto sobre el cable protector.....	41
3.4-Ubicación de pararrayos por el lado de alta y baja tensión. ....	45
3.4.2-Impacto del rayo sobre la línea .....	46
3.4.3-Impacto del rayo sobre cable protector.....	48
<b>Conclusiones:.....</b>	<b>50</b>
<b>Recomendaciones:.....</b>	<b>51</b>

# Introducción

---

## INTRODUCCIÓN

Dada las condiciones de tormenta existentes en nuestro país, resulta de primordial importancia poder hacer una valoración preliminar del futuro comportamiento de todo sistema eléctrico ante descargas atmosféricas. En el mundo es el rayo una de las principales causas de fallo de los sistemas eléctricos, pero no se ha tratado en particular el tema del comportamiento ante rayos de sistemas como los analizados en este trabajo.

El presente muestra el estudio realizado a un esquema de generación distribuida. El primer capítulo nos da una panorámica de los conceptos y principales fuentes de generación distribuida en general así como sus ventajas debido a la escasez de combustible que presenta el panorama actual dando otras opciones de obtener energía sanamente; mostrando como son utilizadas en otros países del primer mundo, tampoco se deja fuera la Revolución Energética desarrollada en nuestro país haciendo énfasis en la provincia de Villa Clara. Un segundo capítulo donde se explica como se modeló el circuito tomado como estudio mediante el esquema modelado mediante el programa ATPDRAW. Finalmente un tercer capítulo donde se hace un análisis del comportamiento ante rayos del sistema modelado, teniendo en cuenta la variación de los parámetros de tensión y amperaje, de acuerdo a las variaciones de resistencia de puesta a tierra, la conexión o no del cable protector de la línea al aterramiento de la subestación y la ubicación del pararrayo por el lado de 34.5 o de 4.16 kV, como herramienta adicional se utilizó el MATLAB como ayuda en el análisis de los resultados.

.El informe queda organizado de la forma siguiente:

**Capítulo I: Generación Distribuida.**

**Capítulo II: Modelación en ATPDRAW del Sistema de Generación.**

**Capítulo III: Análisis de los resultados.**

---

# Capítulo I

Generación Distribuida

---

## Capítulo I: Generación Distribuida

### 1.1- Introducción

Debido a las desventajas que representaba, así como las restricciones tecnológicas de la generación de los generadores de corriente directa, ya que su transporte máximo por la baja tensión, que era de 30 a 57 kilómetros, al descubrirse la corriente alterna esto permitió que pudiese ser llevada la energía eléctrica a muchos lugares más distantes, perdiéndose la estructura centralizada que había con anterioridad.

Debido a la crisis de los años 60 se propusieron hallar una solución tecnológica ventajas de la tecnología moderna y el respaldo eléctrico de la red del sistema eléctrico, para compensar cualquier requerimiento adicional de compra o venta de energía eléctrica, incorporando los adelantos recientes relacionados con la materia, acercando los suministros de energía hacia las cargas, llegándose al termino de Generación Distribuida; el cual podríamos resumir de la siguiente forma:

**Generación Distribuida (GD):** *la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica y, en algunos casos, considerando la máxima eficiencia energética.[1]*

Un concepto semejante al anterior, pero utilizando diferentes términos:

*Emplazamiento estratégico de pequeñas unidades generadoras cerca del consumidor, donde el valor obtenido es mayor que el valor del servicio recibido de la red [2]*

### 1.2-Tipos de tecnologías

Existen diferentes tipos de tecnología las cuales se pueden dividir en las de generación y las de almacenamiento la tabla siguiente presenta un resumen:

Tabla 1-Tipos de tecnología

GENERACION		ALMACENAMIENTO
NO CONVENCIONALES	CONVENCIONALES	
Turbinas eólicas	Cogeneración	Baterías
fotovoltaica	Turbina de gas	Volantes de inercia
Celdas de combustible	Motor de combustión interna	Bobinas superconductoras
	Microturbina	A base de hidrógeno

Las tecnologías de generación se dividen, a su vez, en convencionales y no convencionales. Las primeras incluyen a las turbinas de gas, motores de combustión interna y microturbinas. Las segundas se refieren a las energías no renovables, como la minihidráulica, geotérmica y biomasa, las turbinas eólicas, celdas de combustibles y celdas fotovoltaicas.

Las tecnologías de almacenamiento comprenden a las baterías de acumuladores, los volantes de inercia, las bobinas superconductoras, imanes y almacenamiento a base de hidrógeno.

A continuación se da una breve descripción de las más importantes.

**Cogeneración.**- Esta tecnología produce en forma secuencial energía eléctrica y térmica, donde esta última es útil a los procesos productivos en forma de un fluido caliente (vapor, agua, gases), obteniendo eficiencias globales de más del 80%. Sus capacidades son muy amplias, debido al hecho de que utiliza todas las tecnologías que abarca la GD.

**Turbina de gas.**- El combustible suele ser gas natural, aunque puede emplearse gas LP o diésel. Sus capacidades van de 265 kW a 50,000 kW; permiten obtener eficiencias eléctricas del 30% y eficiencias térmicas del 55%; los gases de combustión tienen una

---

temperatura de 600°C; ofrecen una alta seguridad de operación; tienen un bajo costo de inversión; el tiempo de arranque es corto (10 minutos); y requieren un mínimo de espacio físico.

Por otro lado, los gases de combustión se pueden utilizar directamente para el calentamiento de procesos, o indirectamente para la generación de vapor o cualquier otro fluido caliente.

*Motor de combustión interna.*- Utilizan diésel, gasóleo o gas natural; existen en capacidades de 15 kW a mayores de 20,000 kW; alcanzan eficiencias eléctricas del orden del 40% y eficiencias térmicas cercanas al 33%; su temperatura de gases de combustión es de 400°C; tienen un bajo costo de inversión, una vida útil de 25 años, alta eficiencia a baja carga, consumo medio de agua, poco espacio para instalación, flexibilidad de combustibles y su crecimiento puede ser modular.

*Microturbinas.*- Estas constituyen una tecnología reciente de GD, ya que exceptuando a algunos fabricantes, el mercado está a varios años de su comercialización total.

Las microturbinas tienen cuatro modos distintos de operación: aislado de la red eléctrica, conectado a la red, en paralelo con exportación de energía, y de modo continuo o intermitente a la misma.

Sus principales características son: rango de 15 kW a 300 kW en una sola unidad; frecuencia de 1,600 Hz; mantenimiento mínimo; sus unidades ocupan muy poco espacio; son ligeras; operan sin vibración, prácticamente no hacen ruido; operan de 40,000 a 75,000 horas y pueden utilizar como combustible, además del gas natural, el keroseno, gasolina, etanol, diésel, propano, y biomasa. Una de sus principales características es la reducción de emisiones contaminantes: 9 partes por millón (ppm) de NO<sub>x</sub>, 40 ppm de CO y emisiones totales de hidrocarburos por debajo de las 9 ppm.

*Baterías.*- Son, entre otros, los acumuladores convencionales de plomo – ácido y las de Níquel – Cadmio, que presentan una densidad de energía almacenada del orden de 30 Wh/kg. Existen varios tipos de baterías en desarrollo, como las de Sodio - Azufre que alcanzan valores de densidad de 60 a 150 Wh/kg; las de Zinc – Aire con valores de 80 a

100 Wh/kg; y las de flujo (redox) o pilas de combustible regenerativas, que son las de Zinc – Bromo – Cloro y las de Bromuro de Sodio – Polisulfuro de Sodio.

*Volantes de inercia.-* Existen volantes de baja velocidad ( 7,000 rpm) y de acero de alta resistencia, que es de 55 Wh/kg. Los volantes avanzados son de fibra de alta resistencia y baja densidad, giran a alta velocidad (más de 50,000 rpm) llegando a valores de hasta 350 Wh/kg.

*Bobinas superconductoras.-* Mediante esta tecnología, la energía se almacena en forma de campo electromagnético, el cual es creado por la acción de bobinas superconductoras. Los materiales superconductores pueden ser de baja temperatura, del orden de los 4°K, o de alta temperatura, 77°K. [1]

La generación distribuida tiene como objetivo:

1. Garantizar el suministro eléctrico en horarios picos.
2. Reserva para situaciones de Emergencia.

Seguidamente tenemos la tabla #2 la cual muestra las Características generales de las tecnologías de generación distribuida [3]

**Tabla 2.1- Características generales de las tecnologías de generación distribuida.**

Tecnología	Combustible	Potencia (MW)	Eficiencia $\eta$ eléctrica	Eficiencia $\eta$ global	Inversión (USD/kW)	O&M (USD/kW)
Turbina de vapor	cualquiera	0.25-500	25-42	60-80	200-1800	0.0027
Turbina de gas	Gaseoso o líquido	0.25-50	35-55	65-87	400-8500	0.04-0.009
Ciclo combinado	Gaseoso o líquido	3-300	25-45	73-90	400-850	0.004-0.009
Motores Diesel y Otto	Gaseoso o líquido	0.003-20	15-30	65-92	300-1450	0.007-0.014
Microturbinas	Gaseoso o líquido	0.005-0.1	15-30	60-85	600-850	<0.006-0.01
Celdas de combustible	Gaseoso o líquido	0.003-3	37-50	85-90		
Motor String	Gaseoso o líquido	0.003	~15-25	65-85		
Celdas fotovoltaicas	solar	0.003-1	12-15		5000-8000	0.0001

---

USD-United State Dollar

O-OPERACIÓN

M-MANTENIMIENTO

### **1.2.1-Restricciones a tomar en cuenta**

En la planificación de las redes de diversas regiones del planeta se toman en cuenta las restricciones para optimizar las inversiones, considerando que ciertos fenómenos frecuentemente provocan las acciones que se detallan a continuación:

1. *Refuerzos y reestructuración de las redes.*
2. *Mejoras en las características del aislamiento de redes aéreas.*
3. *Mejoras en las redes expuestas a factores ambientales.*
4. *Verificación de los límites de disturbios eléctricos propuestos.*
5. *Verificación de los medios de protección propuestos en las zonas expuestas a los disturbios armónicos, parpadeos, tensiones parásitas.*
6. *Análisis de las tecnologías de materiales propuestos para soportar zonas de disturbios.*
7. *Mejoras propuestas en las redes de AT, MT y BT discriminadas.*

### **1.3 Aplicaciones de la generación distribuida**

La aplicación de una u otra tecnología en la GD depende de los requerimientos particulares del usuario. Los arreglos tecnológicos más usuales se citan a continuación:

Carga base. Se utiliza para generar energía eléctrica en forma continua; opera en paralelo con la red de distribución; puede tomar o vender parte de la energía, y usa la red para respaldo y mantenimiento.

Proporcionar carga en punta. Se utiliza para suministrar la energía eléctrica en períodos punta, con lo que disminuye la demanda máxima del consumidor, ya que el costo de la energía en este período es el más alto.

Generación aislada o remota. Se usa el arreglo para generar energía eléctrica en el modo de autoabastecimiento, debido a que no es viable a partir de la red eléctrica (sistema aislado o falta de capacidad del suministrador).

---

*Soporte a la red de distribución.* A veces en forma eventual o bien periódicamente, la empresa eléctrica requiere reforzar su red eléctrica instalando pequeñas plantas, incluida la subestación de potencia, debido a altas demandas en diversas épocas del año, o por fallas en la red.

*Almacenamiento de energía.* Se puede tomar en consideración esta alternativa cuando es viable el costo de la tecnología a emplear, las interrupciones son frecuentes o se cuenta con fuentes de energía renovables.

#### **1.4- Beneficios de la generación distribuida**

El auge de los sistemas de GD se debe a los beneficios inherentes a la aplicación de esta tecnología, tanto para el usuario como para la red eléctrica. A continuación se listan algunos de los beneficios:

##### **Ventajas:**

- La generación local reduce las pérdidas de transmisión de energía.
- Se mejora la eficiencia global y el aprovechamiento de la energía primaria.
- Pueden evitarse congestionamientos en las redes de transmisión existentes.
- Se reducen los impactos de fallas en las redes de transmisión.
- Posibilita un mayor aprovechamiento del calor residual.
- Se mejora la calidad y la fiabilidad del suministro de energía.
- Las fuentes de generación distribuida se pueden poner en línea mucho más rápidamente.
- Se incrementa la diversidad de combustibles y fuentes de energía.

##### **Ventajas económicas y sociales**

- Regiones remotas y comunidades aisladas se benefician grandemente de las posibilidades ofrecidas por el desarrollo de las tecnologías energéticas descentralizadas.
- Se estimula el empleo, por ejemplo, en el caso del aprovechamiento de la biomasa en el sector rural.
- El monto y el riesgo de las inversiones se reducen al poder tener una estrecha correspondencia entre la capacidad instalada y el crecimiento de la demanda.
- Los impactos medioambientales se reducen, en particular cuando se utilizan fuentes renovables de energía.
- Se reduce la vulnerabilidad de los sistemas energéticos a fenómenos climáticos y de otra

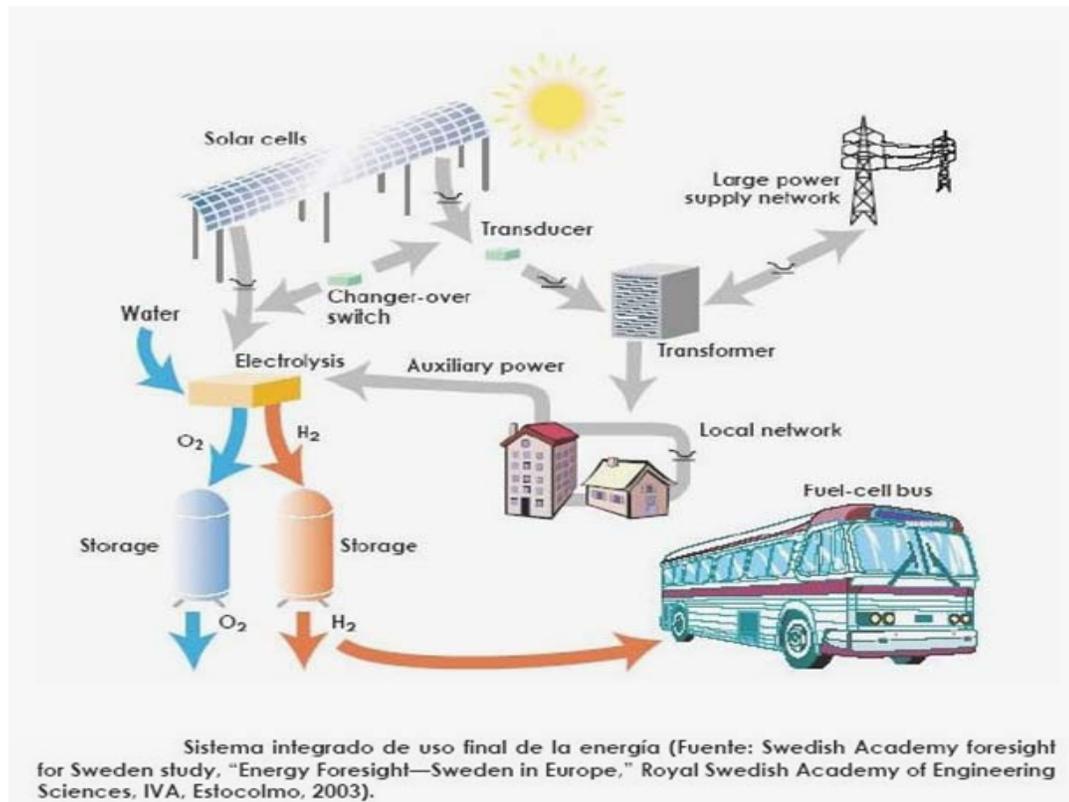
índole.

–Se incrementa la seguridad energética al ampliarse la gama de fuentes de energía en el sistema.

### 1.5-Calidad de la energía

En términos generales, al implementar proyectos de GD lo que se busca es aumentar la calidad de energía, entendiendo por esto: *contar de forma ininterrumpida con la energía eléctrica, con sus adecuados parámetros eléctricos que la definen acordes a las necesidades, esto es voltaje, corriente y frecuencia, entre otros.*

La mayoría de las redes de transmisión y distribución de energía eléctrica alcanzan una confiabilidad del 99.9%, equivalentes a 8.7 hora al año fuera de servicio. Al respecto, cabe mencionar que en Estados Unidos el costo de las pérdidas por fallas en el suministro de energía es del orden de 119 mil millones de dólares al año, y para el caso de América Latina, de entre 10 y 15 mil millones de dólares anuales

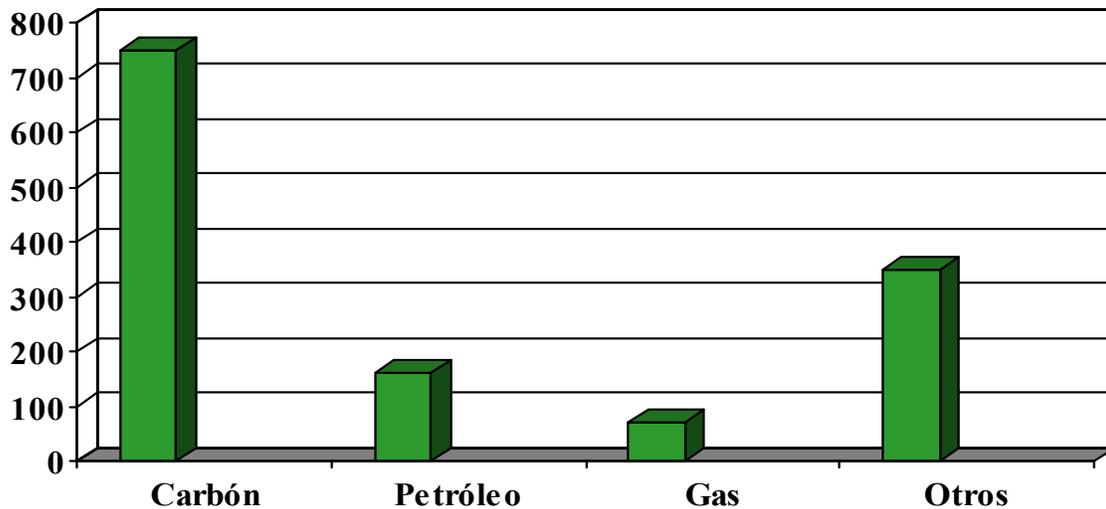


**Fig.5.1.1-Sistema integrado de uso final de la energía**

## 1.6-Mundo, desarrollo de la GD

### 1.6.1-Reservas mundiales de energía

El siguiente gráfico de barras muestra el cálculo aproximado (en años) de la durabilidad de los combustibles



**Fig.6.1.1-Estimado de durabilidad (en años) de las fuentes de combustible**

Como se aprecia el petróleo es el segundo más pequeño.

*“A pesar de que todavía queda un poco más de la mitad del petróleo convencional que la naturaleza creó, va a ser cada vez más difícil y caro extraerlo. Así como los mejores asientos en el cine se ocupan primero o las mejores tierras se cultivan antes que las peores. Desgraciadamente, sólo millones de años de condiciones ecológicas y geológicas muy particulares pueden crear más petróleo o cualquier otro recurso fósil. Actualmente se descubre sólo un barril de petróleo por cada cinco que se consumen a nivel mundial...”*  
[4]

La generación distribuida es utilizada en otros países .De acuerdo con datos de la CIGRE de 1999, en diversos países del mundo se ha incrementado el porcentaje de la potencia instalada de GD, en relación con la capacidad total instalada, por ejemplo en Dinamarca y Holanda alcanzan valores de hasta el 37%,y entre otros países como España y Alemania alcanza el 15% y EE.UU. un porcentaje muy bajo ;pero un estudio realizado por del Electrical Power Research Institute y del Natural Gas Fundation prevén que, de la nueva

---

capacidad de generación eléctrica que se instalará al año 2010 en Estados Unidos, del 25% al 30% será con GD.

En el Reino Unido también se dan pasos para la utilización de recursos para la obtención de Energía Eléctrica (este país participó junto al ENTE Vasco de la Energía(EVE) en la primera Jornada Internacional sobre Energía Marina celebrado en Euskadi )La primera instalación de este tipo en Euskadi se localizó en Mitriku(Gipuzkoa),en la costa vasca. Se llevó a cabo hacia el 2007(prevé una inversión de 3.5 millones de euros, potencia instalada 480kW, por lo que anualmente sería 970MWh, evitando la emisión a la atmósfera de aproximadamente 1000 toneladas de CO<sub>2</sub>).

El gobierno británico ha invertido más de 20 millones de libras (cerca de 30 millones de euros) en la investigación de energía mareomotriz y eolomotriz lo que lo ha llevado a convertirse en uno de los líderes en este campo [5]

Endesa, empresa energética española, electricidad, gas energías renovables y cogeneración. Ha realizado un estudio detallado del uso del biodiésel como alternativa al heavy Fuel-oil (H.F.O) en motores alternativos de combustión interna(MACI)para generación de electricidad existente ,tratando de desplazar al CO<sub>2</sub> ,también contribuye en la realización de otros proyectos de gas natural como el gasoducto España-Argelia [6]

Este tipo de tecnología se está preparando la norma por el Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos de Estados Unidos (IEEE) está preparando la norma eléctrica “**IEEE-Standard-1547 – Standard for Distributed Resources Interconnection with Power Systems**”, que será de uso exclusivo para normalizar las interconexiones y la operación de los sistemas de GD.

### **1.7-CUBA. Panorama actual**

- Dependencia casi absoluta de las fuentes tradicionales
- Grandes plantas generadoras
- Graves impactos ambientales
- Mínima explotación de las fuentes pequeñas

---

### 1.7.1- Nuestro sistema eléctrico

- Formado por grandes plantas generadoras situadas principalmente en 9 puntos a lo largo del país, con una potencia total instalada de 3234 MW.
- La energía es transferida a lo largo de todo el país a través de líneas de Transmisión a 220 y 110 KV, después es transformada a niveles de 33 KV para conformar el sistema de subtransmisión, esta a su vez es transformada a niveles de 13,2 y 4,2 KV denominada la distribución primaria, para llegar a la mayoría de los clientes a través de transformadores la cual es llamada baja tensión.

### 1.7.2 -Condiciones actuales del sistema electroenergético

- La salida del sistema por mayor tiempo de lo previsto de la termoeléctrica Antonio Guiteras, provocó el aplazamiento de los ciclos de mantenimientos de otras unidades generadoras.
- Unidos a lo anterior y la imposibilidad de incorporar al sistema nuevos bloques generadores a traído como consecuencia baja disponibilidad de generación en los últimos tiempos.
- Nuestro país es azotado por grandes huracanes y cuando estos afectan las líneas de transmisión dejan sin servicio gran cantidad de clientes, ejemplo de ello La provincia de Pinar del Río, estuvo sin servicio más de 20 días este año.

((122 días de apagones entre el verano del 2004y el verano de 2005))[7]

- El Bastión 2004 demostró que nuestras termoeléctricas pueden\_ser blancos para el enemigo al ser pocas y de grandes capacidades.
- Nuestro sistema transfiere largas distancias grandes cantidades de energía lo que provoca niveles de pérdidas en el orden del 15 %, distribuidos de la siguiente forma:

Transmisión -----3 %

Subtransmisión ----- 2 %

Distribución Primaria-----10 %

y secundaria

---

Cuba contrató cuatro mil 158 de estos equipos, mientras ya superan tres mil los que están en el país, y su adquisición total significaría unos 711 mil 811 kW de potencia, una cifra capaz de garantizar la estabilidad en la generación eléctrica.

Al término del primer semestre de 2006 en toda la nación se habrán instalado miles de ellos, que junto a otros medios permitirán dar solución a los problemas originados por un sistema electroenergético obsoleto y derrochador.

Este es un primer paso en la batalla por la eficiencia energética, tras la cual se sustituirán las unidades de las termoeléctricas altamente consumidoras por motores eficientes, con los recursos necesarios para su mantenimiento.

Conjuntamente se impulsa la generación eléctrica a partir del gas natural acompañante del petróleo y la implementación de sistemas de ciclos combinados, los cuales se aprovechan el vapor de agua desprendido de ese proceso.

Esa alternativa es empleada en la occidental provincia de Matanzas, capaz de tributar al sistema nacional 200 MW, y que La Habana lo hará próximamente, pues ya en la zona de Puerto Escondido, se preparan las condiciones para aplicar esa fórmula.

Adicionalmente a la adquisición de nuevas tecnologías y restauración de las redes de suministro y distribución de electricidad, se lleva adelante un plan con la entrega a cada hogar cubano de equipos electrodomésticos.

Entre las soluciones que favorecen esos propósitos se destacan la sustitución de juntas de refrigeradores, cambios de bombillos incandescentes por ahorradores, distribución de ollas arroceras y de presión y eliminación de ventiladores altamente consumidores de electricidad. [8]

### **1.8-Nuevas Plantas que se integran a los Sistemas Eléctricos**

- Biomosas.
- Minihidroeléctricas.
- Eólicas.
- Fotovoltáicas.
- Celdas de combustibles.

Hoy se extienden los ciclos combinados con turbinas de gas y vapor con un aprovechamiento superior a 50 % de la energía primaria, aunque en términos globales su eficiencia es inferior a la que se obtiene en los sistemas de cogeneración, donde se puede utilizar, además, diversos tipos de biocombustibles.

Una aplicación importante de las microturbinas es la generación y cogeneración de energía eléctrica a partir de biomasa gasificada o biogás. Estos sistemas reúnen en sí la elevada eficiencia del ciclo combinado o la cogeneración y la sustentabilidad de las energías renovables.

En Cuba se extiende la generación fotovoltaica, eólica e hidráulica. En el futuro debe esperarse un crecimiento de la cogeneración, particularmente en los cayos e islotes para el servicio hotelero, centros turísticos y de apoyo vinculados a esta actividad, donde puede utilizarse la refrigeración por absorción y obtener frío, calor y energía eléctrica a partir de un único combustible, procedimiento de elevada eficiencia conocido como trigeneración. Con la cogeneración se evitan las inversiones en centrales eléctricas, líneas de transmisión y distribución y disminuyen las pérdidas en éstas. Los costos de transmisión y distribución son aproximadamente 30 % del costo de la energía entregada, si se consideran los costos de inversión y operación del orden de los 1 200 USD/kW. Un ejemplo de los gastos que podrían reducirse con la generación distribuida se muestra en la tabla 3, en las condiciones de Cuba.

**Tabla 3.1- Costo aproximado de alguno de los elementos del sistema**

COSTO APROXIMADO DE ALGUNO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA	
<u>Línea de 13.8Kv tres fases y neutro</u>	<u>USD/km</u>
#4 <u>A.W.G</u>	7 000
#2 <u>A.W.G</u>	8 800
#1/0 <u>A.W.G</u>	12 200
#2/0 <u>A.W.G</u>	15 600
#3/0 <u>A.W.G</u>	19 200
Líneas de 34.5Kv tres fases sin neutro	10 500
<b>SUBESTACION</b>	<b>USD</b>
De seis postes dos salidas de 3.2MVA	81 700
Transformador de 1 600kVA 34.5/13.8kV	23 800
Interruptor de 34.5Kv	11 900
Interruptor de 13.8Kv	7 000

Pese a las ventajas mencionadas, aún el costo capital por kW instalado es superior, y la economía en el uso del combustible, inferior, con excepción de los ciclos de cogeneración. Por esta razón, el desarrollo de la generación distribuida en el país debe estar dirigido en primer lugar a identificar los sistemas de cogeneración de alta eficiencia, independientemente de su capacidad, combustible o tecnología, y a promover o potenciar la eficiencia y reducir el costo en el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, ya sean en régimen aislado o integradas a la red eléctrica.

**Tabla 4.1- Direcciones de desarrollo de la generación distribuida en Cuba**

Direcciones de desarrollo de la generación distribuida en Cuba	
Energía renovable	Cogeneración con biomasa
	Generación en pequeñas mini y micro hidroeléctricas
	Energía eólica
	Biogás
	Energía fotovoltaica
	Eficiencia energética
Energía fósil	Ciclos combinados con gas natural acompañante
	Cogeneración a pequeña y media escala
	Introducción de tecnologías eficientes
	Gestión energética

**1.8.1-Corriente de aire**

Para Cuba el 2006 se abre como el año de la revolución energética y, en correspondencia con ello, está definida una estrategia que concibe el aseguramiento del suministro mediante el aprovechamiento de cuanta posibilidad sea permisible.

En los últimos 15 años, las condiciones básicas han sido creadas a fin de impulsar el uso de fuentes complementarias al balance energético nacional y para la electrificación de objetivos aislados, del que las miles de celdas fotovoltaicas diseminadas.

Pero dentro de ellas, el potencial de las corrientes de aire no ha estado desechado. En cayo Coco se instaló lo que se define como el primer intento en serio de un parque eólico capaz de contribuir al aporte de plantas de diesel existentes allí.

---

Hoy el programa toma nuevos bríos como parte de los cuales en suelo espinoso se fomentan las primeras urgencias. Las alturas de Meneses se incluyen entre las 17 zonas de la isla seleccionadas para realizar estudios de medición de las corrientes de aire, un primer y decisivo paso con el objetivo de dar vía a acciones posteriores que precisan de garantías para asegurar la factibilidad de una posible inversión.

Para el Máster en Ciencias Osmel Cabrera, responsable del Grupo de la energía del Polo Científico local, las misiones inmediatas apuntan hacia la creación del grupo eólico, el apoyo a las autoridades para la instrumentación de un programa que concibe a la Organización Básica Eléctrica como la inversionista y el análisis crítico de las zonas propuestas.

A este respecto, Carlos Méndez, delegado del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en la provincia, le concede máxima importancia: “Antes de tomar cualquier decisión, es preciso realizar estudios profundos que aseguren la factibilidad de la acción a acometer si tomamos en cuenta los costos de cualquier inversión en ese terreno y el tiempo de vida que distingue a los aerogeneradores”.

El país se propone lograr a corto plazo un centenar de MW por medio de la explotación de esta fuente. [9]

### **1.9-Generación Distribuida En Villa Clara**

- Las plantas que se instalarán de inmediato son de diesel pero de muy alta eficiencia (200 a 240 g/kW.h)
- Se buscan soluciones de generación distribuida a través de usar la biomasa, celdas fotovoltaicas, hidrógeno y otros.

Se realizó un estudio sobre el uso de los Grupos Electrógenos (GE) existentes, y la instalación de nuevos GE en objetivos vitales para el país, y otros vinculados directamente a generar para sub-estaciones del Sistema Eléctrico Nacional. Han participado en este estudio, técnicos destacados de GEYSEL, CIMEX, UNECAMOTO, COPEXTEL, CUPET y el SIME, entre otros.

La base de este estudio ha sido la estandarización de las potencias a utilizar; los tipos de motores y marcas, (8 potencias básicas y 3 tipos de motores japoneses, MTU - MB y Guascor - Vasco).

---

(“10 de Enero de 2006 - Un total de 120 grupos electrógenos se instaló en centros de la producción y los servicios de la provincia en el año recién finalizado, con prioridad para las instituciones de salud, panaderías, centros de elaboración de alimentos, de acueductos, entre otras.

Además entraron en funcionamiento otros ocho grupos pertenecientes a la Empresa Eléctrica, cuatro en Santo Domingo e igual número en Ranchuelo, capaces de generar 12 MW, que representa el 9 % de la demanda en la hora pico de la provincia.

En el presente año deben instalarse otros 50 grupos, lo que significará poder llegar a 98,8 MW y cubrir así el 70 % de la demanda provincial en el horario pico.

Tales acciones se corresponden con la política de la dirección de la Revolución para disminuir al máximo las interrupciones eléctricas ocasionadas por la falta de generación de las termoeléctricas del país, y aportar al sistema electroenergético nacional en los horarios de mayor demanda.

En esta primera etapa fueron priorizadas instituciones que están estrechamente vinculadas con la población por los servicios que prestan. Un total de 23 equipos han sido reservados para igual cantidad de policlínicos, en proceso de remozamiento.

Actualmente se trabaja en la preparación y acondicionamiento de los locales con los requerimientos técnicos necesarios, para el buen funcionamiento y conservación de los que faltan por ubicar.

La importante labor está a cargo de especialistas de la Corporación CIMEX, así como de las empresas UNECAMOTO y ECOSOL, y la Organización Básica Eléctrica (OBE) del patio.”)[10]

Se trata de una tarea enorme y estratégica, en todos los municipios del país hay que instalar GE y Villa Clara no es la excepción como muestra la siguiente tabla:

**Tabla 5 Grupos electrógenos en Villa Clara**

Villa Clara													DENYO	M.BENZ	TOTAL	
Potencia (kVA)	6	7.5	10	13	18	20	25	40	45	60	120	150	220	6,131	3,690	9,821
Cantidad	11	0	4	0	0	9	25	0	32	63	22	7	0	144	29	173

**1.9.1-Se garantizan en emergencia con GE:**

- ✓ Hospitales, Policlínicos y Clínicas Estomatológicas.
- ✓ Hogares de Ancianos e Impedidos físicos.
- ✓ Estaciones Meteorológicas.
- ✓ Estaciones de Radio y Televisión.
- ✓ Panaderías y Centros de Elaboración.
- ✓ Bombeo de Agua.
- ✓ Importantes Centros Educativos.
- ✓ Bancos de Sangre y Farmacias principales.
- ✓ Otros objetivos de importancia.

**1.9.2-Organizaciones responsables del montaje y mantenimiento**

Organizaciones tendrán la responsabilidad central de montar, realizar la puesta en marcha, cumplir los requisitos de la garantía y ejecutar el mantenimiento programado.

**Tabla 6- Organizaciones responsables del montaje y mantenimiento**

<b>CIMEX</b>	<b>6 kVA A 60 kVA Y 220 kVA</b>
<b>UNECAMOTO</b>	<b>120 kVA y 150 kVA</b>
<b>UNE</b>	<b>500, 550, 1000, 1150 y 2360 kVA</b>

Participarán también en el montaje de los GE japoneses, el MIC y el MINAL. La puesta en marcha y garantía de los mismos son responsabilidad de CIMEX.

Para garantizar un servicio eficiente a nuestro pueblo de conjunto con la generación se acometerán mejoras en las redes

---

### **1.10-Programa de mejoras en Villa Clara**

Como respuesta a lo que nos convoca Fidel sobre la necesidad de garantizar el servicio eléctrico, asumimos la tarea de la revisar el estado técnicos de nuestras redes y la calidad del servicio a nuestro pueblo.

- En nuestra Provincia existen como promedio 70 Interrupciones Diarias (4 Interrupciones Primarias, 18 Secundarias y 48 Servicios).
- Se afectan como promedio diariamente 5823 clientes
- La Calidad del Servicio que Prestamos, Tiempo de Interrupción por Usuario (TIU) cierre del 2004 fue de 50,67 Horas es decir a nuestro clientes les falto el servicio Eléctrico 2 Días como promedio.
- Existen 385 Zonas de Bajos Voltajes.
- Los Interruptores de las Subestaciones de Distribución son de Tecnología Obsoleta y 27 Subestaciones Drop Out por Baja.
- El 48% del Conductor en nuestra Redes esta en mal Estado.
- El 46% de los Circuitos en la Provincia se Alimentan a 4,16Kv.
- Las Perdidas Técnica son de un 12,0%.
- Todas estas Condiciones reflejan que el servicio que prestamos no es bueno, para eso hemos realizado un Programa de Modernización a las Redes, en el que ha participado toda la Fuerza Técnica, a ejecutar en un Periodo de 2 Años.

### **1.11-Trabajos a Realizar en las Redes y Subestaciones**

- En las Subestaciones de 110 kV se ejecutara la instalación de 3 transformadores para aumento de capacidad.
- En las Redes de Subtransmisión ejecutar cambio de Calibre a 91,2 Km. de Conductor
- En las Redes Primarias ejecutar 701,7 Km. Cambio de Calibre.
- En las Redes Secundarias ejecutar 2457 Cambios de Calibre.
- Ejecutar 1179 divisiones de Circuito Secundario, 1346 aumentos de Capacidad, la Mayor Capacidad instalada en nuestras redes será de 50kVA.
- En estas Mejoras Secundarias se instalan 2628 Transformadores.
- En las Subestaciones de Distribución, aumentar capacidad en 26 subestaciones, construir 7 subestaciones nuevas y la instalación de 104 Recerradores.

➤ Se utilizaran un total de 11066 postes.

**1.12-Resultados que se esperan después de ejecutar el programa de mejoras:**

- En la Calidad del Servicio se reduce el Tiempo de Interrupción por Usuario (TIU) en el Año a 10Horas.
- Se reduce en un 70% las Interrupciones en las Redes (14 Interrupciones Promedios Diarias).
- Se eliminan todas las Zonas de Bajos Voltajes.
- El porciento de pérdidas alcanza un valor de 9,93%.
- Todos los Trabajos a realizar en las Redes se ejecutaran en Calientes.

**Tabla 7-Generación distribuida por grupos electrógenos en Villa Clara**

<b>Instalación de GE en las subestaciones rurales de distribución</b>					
<b>Fecha</b>	<b>Subestación</b>	<b>Municipio</b>	<b>viviendas</b>	<b>GE</b>	<b>kVA</b>
<b>jun-05</b>	Bermejál	Santo domingo	1000	2 x 1150	2300
	<b>Sub. Total</b>		<b>1000</b>	<b>2</b>	<b>2300</b>
<b>jul-05</b>	Sto. Domingo 13	Santo Domingo	4370	2 x 2360	4720
	<b>Sub Total</b>		<b>4370</b>	<b>2</b>	<b>4720</b>
<b>sep-05</b>	Cifuentes 13	Cifuentes	2250	2 x 2360	4720
	<b>Sub. Total</b>		<b>2250</b>	<b>2</b>	<b>4720</b>
<b>oct-05</b>	Ranchuelo I	Ranchuelo	667	2 x 2360	4720
	Ranchuelo II	Ranchuelo	2939	2 x 2360	4720
	<b>Sub. Total</b>		<b>3606</b>	<b>4</b>	<b>9440</b>
	<b>Total</b>		<b>11226</b>	<b>10</b>	<b>21180</b>

---

# Capítulo II

Modelación en AtPDRRAW del Sistema de Generación

---

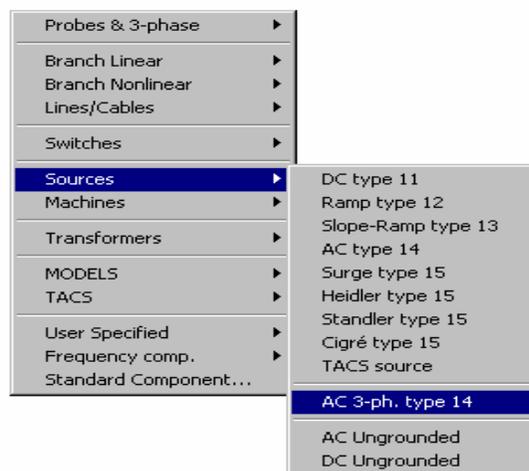
## Capítulo II: Modelación en Atpdraw del Sistema de Generación.

### 2.1.-Introducción

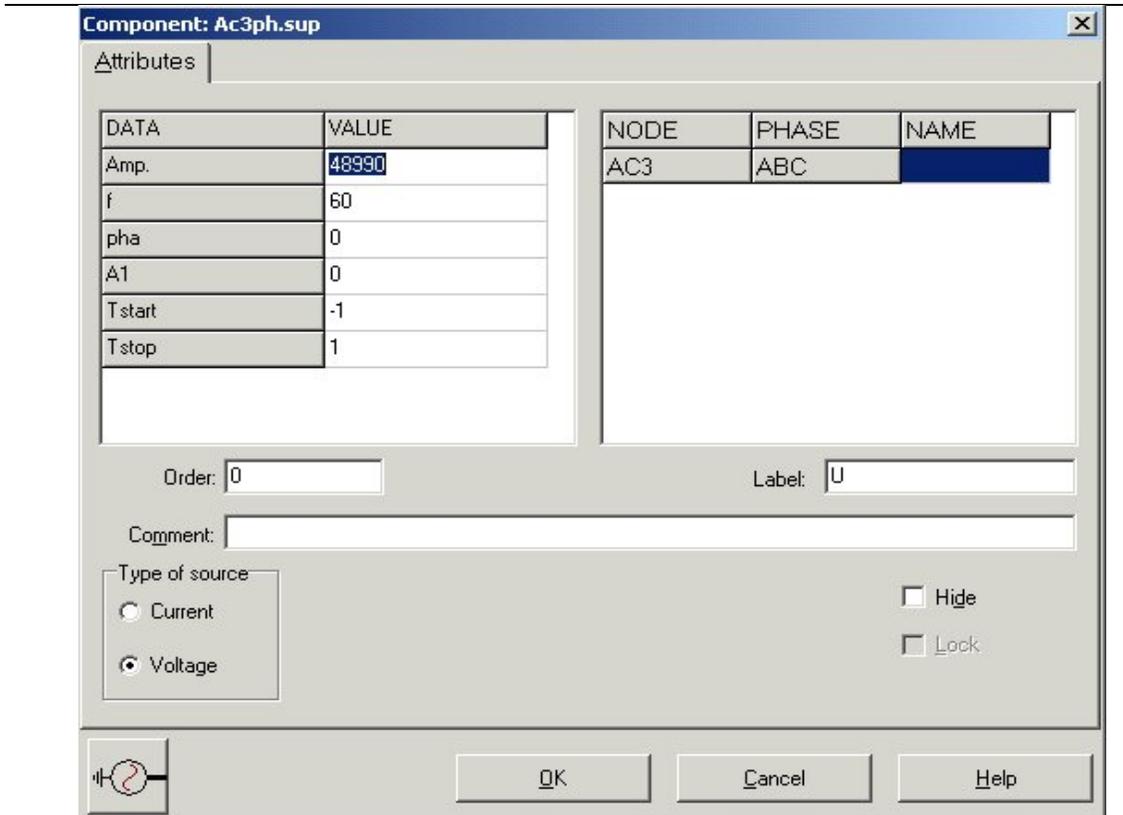
Con la aplicación de los software el hombre ha dado solución a miles de incógnitas que se le han presentado en el transcurso de su desarrollo tecnológico, por eso en este capítulo se hace mención de la puesta en práctica del simulador ATPDraw, programa de amplio uso mundial para el análisis de transitorios electromagnéticos en Sistemas Eléctricos de Potencia, en este caso haciendo referencia únicamente a los elementos modelados en este trabajo. A continuación se presenta una descripción de la modelación realizada con vista a realizar el estudio del comportamiento ante descargas atmosféricas de los sistemas de generación Distribuida que se están instalando en el país.

### 2.2.- Modelación de la fuente que representa el Sistema.

En este caso se seleccionó una fuente de corriente alterna trifásica Fig.2.2.1. Este tipo de fuente posee un diseño propio el cual puede ser modificado según criterio del especialista. Además posee una ventana donde se introducen todos los datos de la fuente, tales como: frecuencia, ángulo de fase, tiempo de comienzo de su funcionamiento, tiempo de parada y el tipo corriente o voltaje, su capacidad correspondiente. Dicha ventana se muestra en la Fig.2.2.2[11]

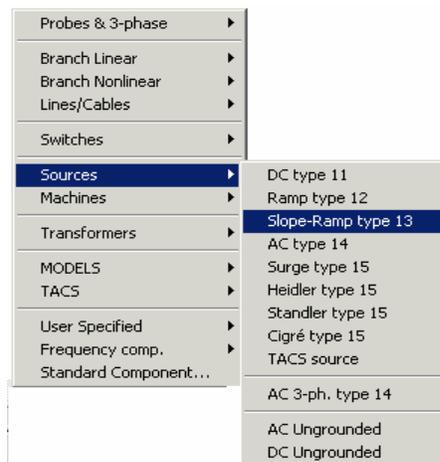


**Fig.2.2.1.- Fuente AC 3-ph tipo14.**



**Fig.2.2.2.- Ventana de datos de la fuente AC 3-ph tipo14**

Para modelar una descarga atmosférica se utilizó una fuente tipo doble rampa Fig.2.2.3, cuyos datos se muestran en la Fig. 2.2.4, valor máximo de la onda de tensión o corriente según se seleccione, tiempo de frente, tiempo de cola, tiempo de inicio y tiempo de duración.



**Fig.2.2.3.- Fuente tipo doble rampa.**

DATA	VALUE
Amp	10000
T0	1.2E-6
A1	5000
T1	5E-5
TSta	0.008
TSto	0.00805

NODE	PHASE	NAME
SR	A	X0017

Order: 0      Label:

Comment:

Type of source:  
 Current  
 Voltage

Hide  
 Lock

**Fig.2.2.4.- Dato de la fuente tipo doble rampa**

### 2.3.- Modelación de la línea de subtransmisión a 34.5 kV.

Los conductores de fase conjuntamente con el cable protector se representan con un modelo de línea no transpuesta LCC (se utiliza el modelo Bergerón del el ATPDRAW, apropiado para la modelación de ondas viajeras). Asumiendo un tramo de línea de 10 km.

Para obtener el correspondiente modelo se puede utilizar la opción LINE/CABLE de la caja de herramientas del ATPDRAW Fig. 2.3.1. La Fig. 2.3.2 muestra la ventana de datos de este modelo.

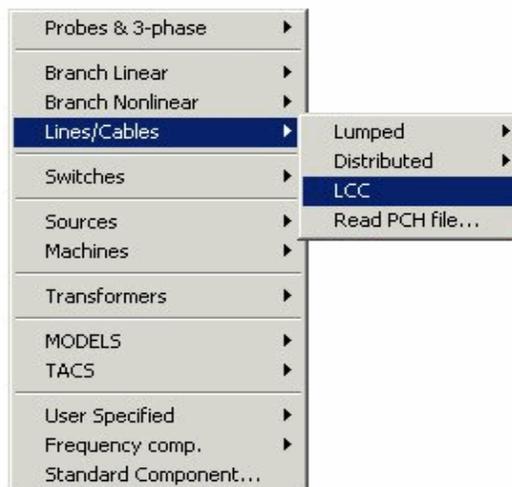


Fig.2.3.1.- Modelo de línea LCC.

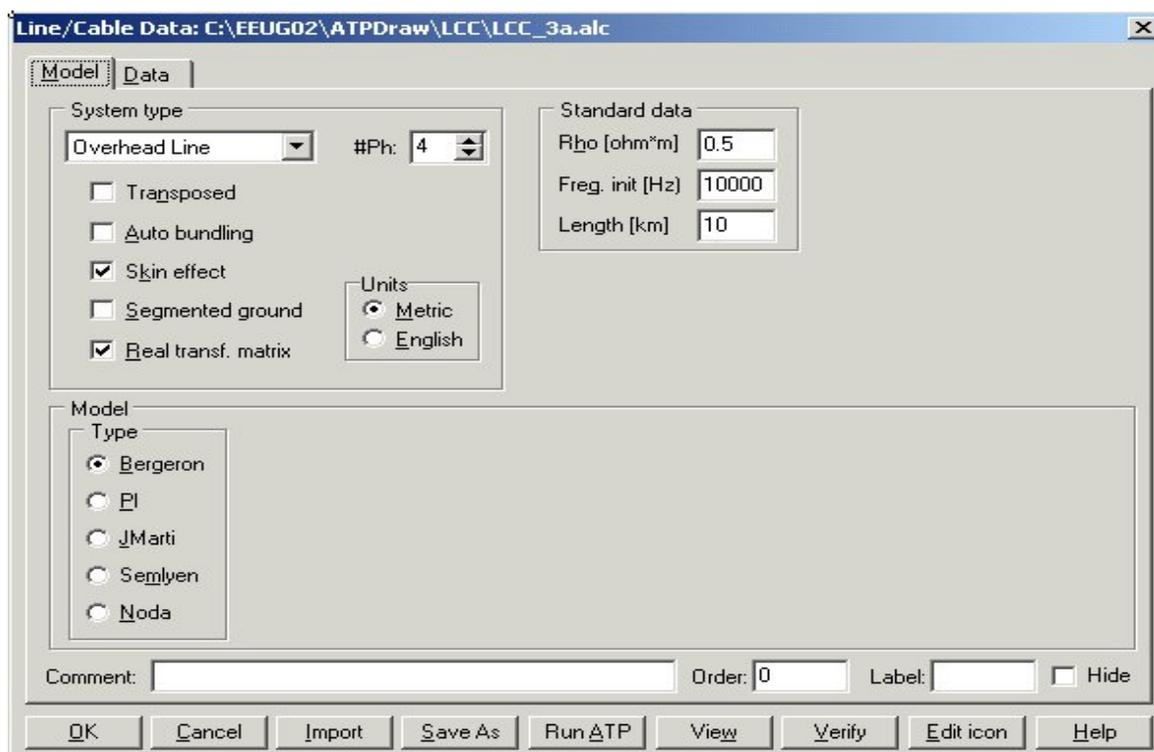
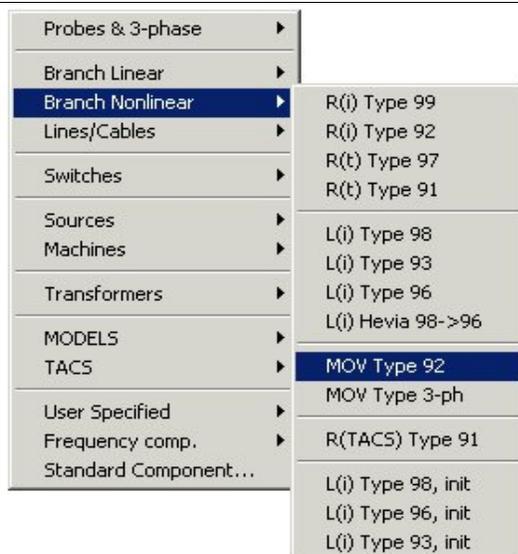


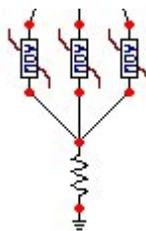
Fig.2.3.2.- Datos del Modelo de Línea LCC.

#### 2.4- Modelación del pararrayo.

El modelo del pararrayo se basa en un switch MOV type 92, Fig 2.4.1, que funciona como un pararrayo de oxido metálico.



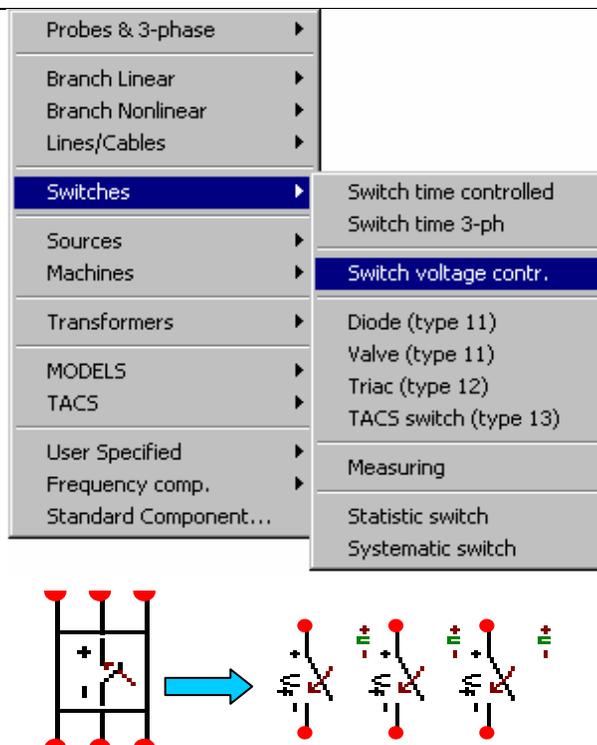
**Fig. 2.4.1.- Modelo del MOV Type 92.**



**Fig. 2.4.2.- Modelo del pararrayo.**

### 2.4.1. Modelación de los aisladores.

El modelo de los aisladores se basa en interruptores controlado por voltaje Fig. 2.4.1.1.



**Fig 2.4.1.1.- Modelo de interruptor controlado por voltaje para el modelado de los aisladores.**

#### 2.4.2.- Modelación de los transformadores

El programa dispone de una amplia gama de transformadores tanto monofásicos como trifásicos con diferentes tipos de conexión, ideales, saturables, etc., para la modelación de los transformadores trifásicos se escogió dentro la biblioteca (fig2.4.2.1) que ofrece el programa uno estrella-delta y otro delta-estrella transformadores(34.5/4.6) kV y de(4.6/0.48)kV Fig. 2.4.2.2 y Fig. 2.4.2.3



Fig.2.4.2.1.- Transformador trifásico saturable.

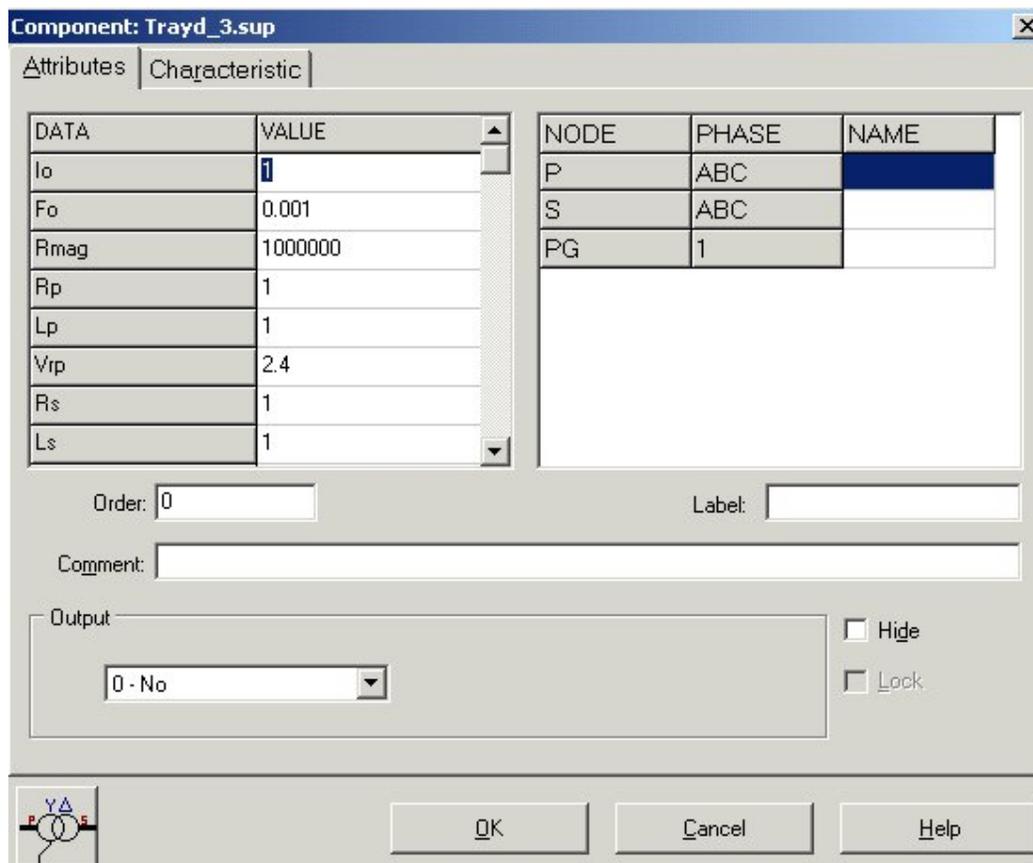


Fig.2.4.2.2.- Ventana de datos del transformador estrella \_ delta

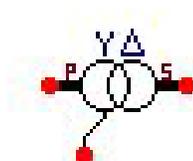


Fig 2.4.2.3.- Modelo del banco trifásico

## 2.5.- Modelación de las puestas a tierra.

La resistencia de puesta a tierra se modela con un resistor, figuras 2.5.1. y 2.5.2

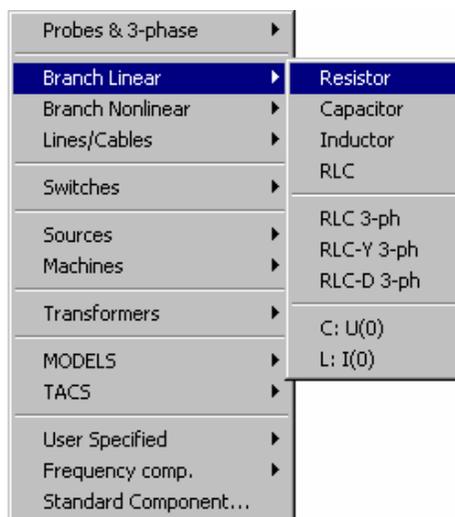


Fig.2.5.1.- Componente resistor.

The dialog box 'Component: RESISTOR.SUP' has an 'Attributes' tab. It contains two tables and several input fields.

DATA	VALUE
RES	10

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Group No: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No   Hide  Lock  \$Vintage.1

Buttons: OK Cancel Help

Fig.2.5.2.- Datos de la resistencia de puesta a tierra.

A todas las resistencias se le asigna un valor de  $10\Omega$ , con excepción de la resistencia de puesta a tierra de los generadores que para la realización de las gráficas se varían desde  $5-200\Omega$  y desde  $1-40\Omega$  mediante la asignación de una variable cuyo nombre es resis.

### 2.6.- Modelación de los generadores.

Para la modelación de los generadores se usó el modelo de un turbo generador bipolar cuya ventana de datos se muestran en la figura 2.6.1.

The 'Attributes' dialog box contains the following data:

DATA	VALUE
Volt	480
Freq	60
Angle	0
Poles	2
SMOVTP	1
SMOVTPQ	1
RMVA	2
RkV	0.681

NODE	PHASE	NAME
OUT	ABC	X0031

Order:  Label:

Comment:

Hide  
 Lock

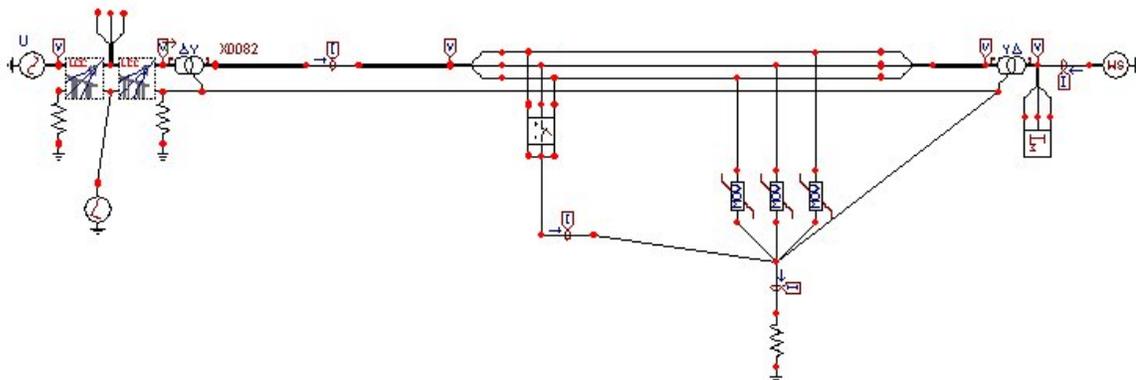
Buttons:



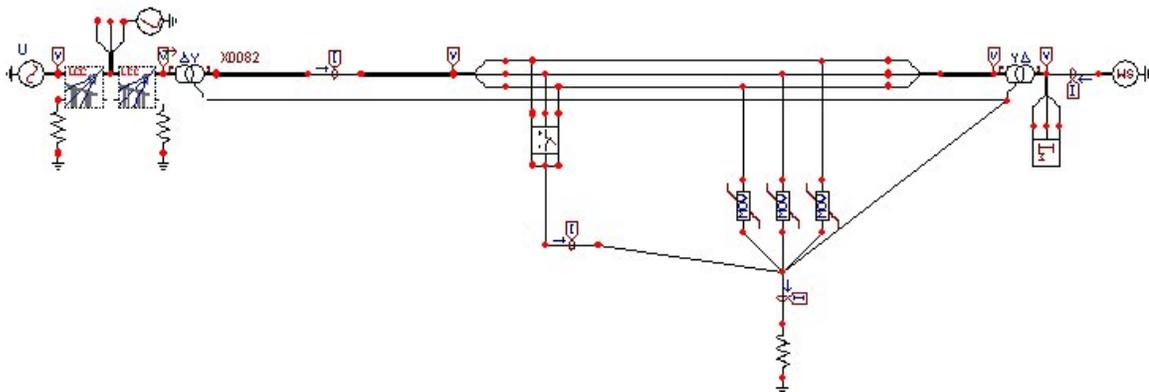
Fig.2.6.1.- Datos del turbo generador.

### 2.7.- Modelo general del sistema.

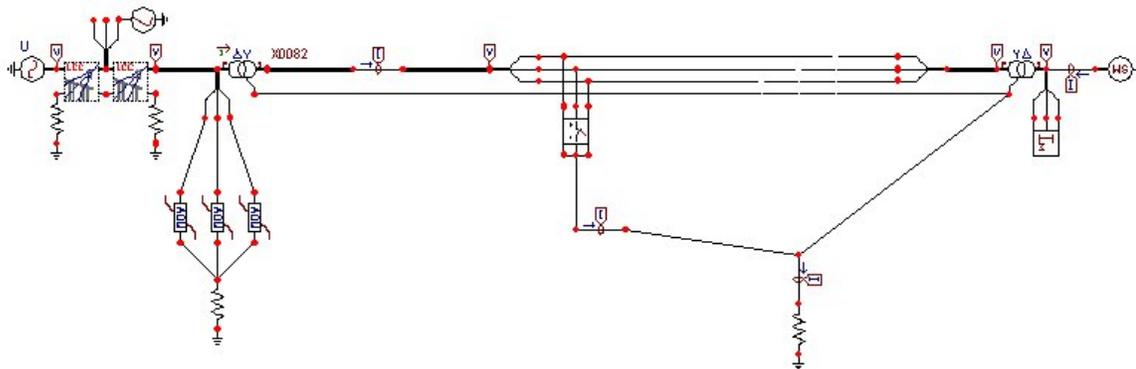
En la figura 2.7.1 se muestra el esquema general del sistema de generación distribuida modelado.



**Fig. 2.7.1- Esquema general del sistema modelado con el cable protector conectado a la puesta a tierra de la subestación.**



**Fig. 2.7.2- Esquema general del sistema modelado sin el cable protector conectado a la puesta a tierra de la subestación.**



**Fig. 2.7.3- Esquema general del sistema modelado con pararrayo por el lado de 34.5kV.**

---

# Capítulo III

Análisis de los resultados

## Capítulo III: Análisis de los resultados

### 3.1- Introducción

Con la ayuda del ATPDRAW se realizó la modelación de un Grupo Electrónico con la cual fue posible observar el comportamiento de este ante descargas atmosféricas, entre los efectos observados están:

1. Efecto de la ubicación del pararrayo por el lado de 34.5 kV o de 4.16 kV.
2. Efecto de la magnitud de la resistencia de puesta a tierra en el nivel de sobretensiones a que se ven sometidas las unidades del grupo.
3. Efecto de la conexión o no del cable protector a la puesta a tierra del grupo.
4. Protección por los lados de alta y baja del transformador.

Los resultados del programa ATPdraw se dan en forma de gráficos de los diferentes parámetros del circuito contra tiempo de análisis.

Las tensiones medidas fueron a partir de los siguientes puntos Fig.3.1.1. Donde se toman de allí los valores máximos

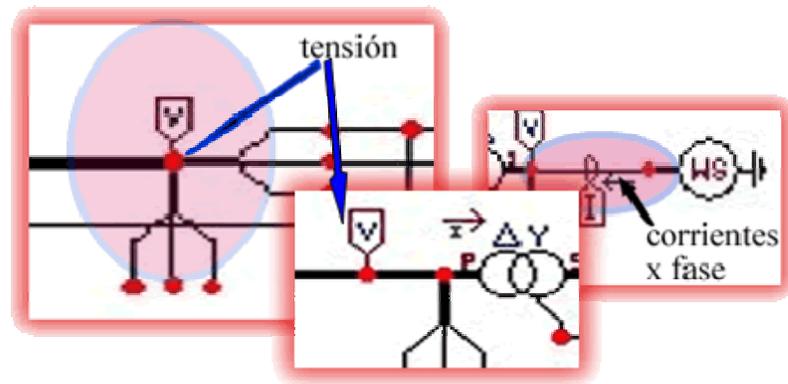


Fig.3.1.1-Puntos donde se realizaron mediciones

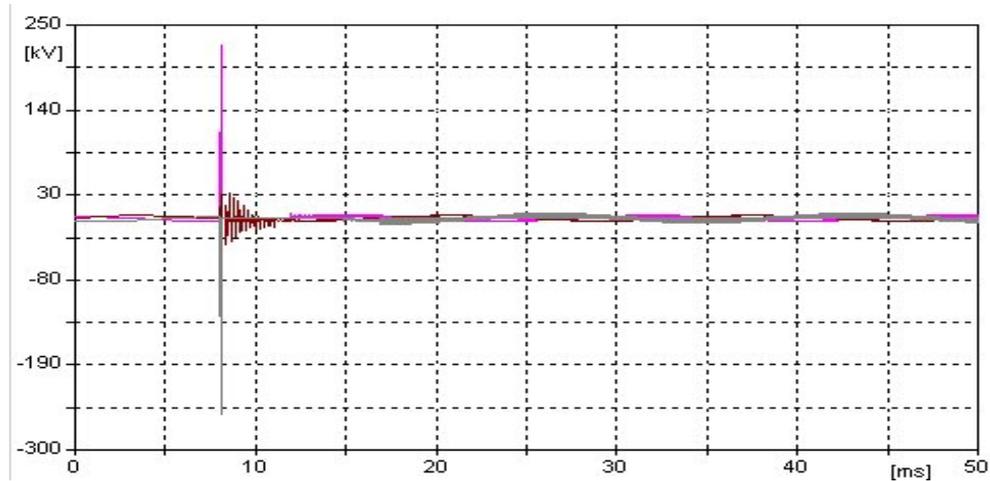
### 3.2-Ubicación de pararrayos por el lado de baja.

#### 3.2.1-Efectos de la resistencia de puesta a tierra en la magnitud de las sobretensiones.

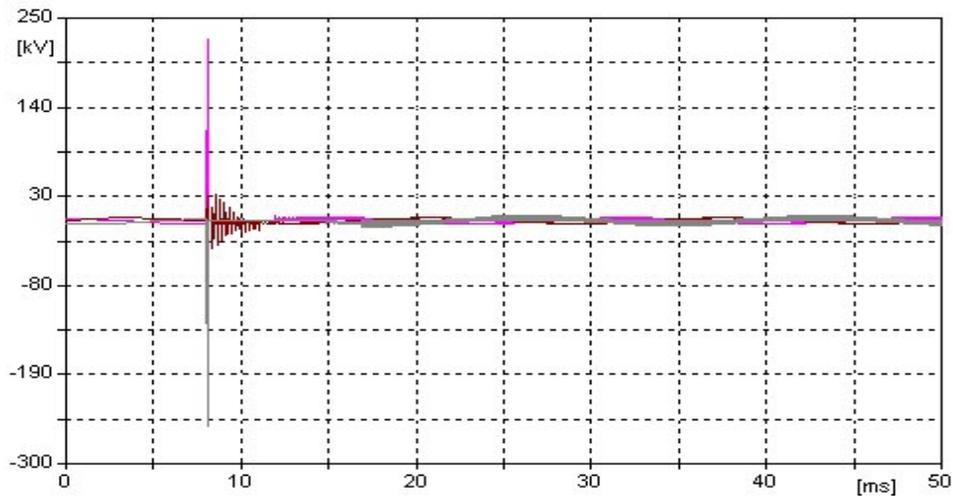
En este caso se tuvieron en cuenta dos posibles condiciones de ocurrencia del impacto del rayo, en los conductores de fase o en el cable protector y para conexión o no del cable protector al sistema de puesta a tierra del grupo generador.

### 3.2.1.1-Impacto en los conductores de fase.

En este tipo de impacto se analizaron las posibilidades de conexión o no del cable protector a la puesta a tierra del grupo. Para valorar el efecto de la resistencia de puesta a tierra, su magnitud fue variada desde 5 hasta 200  $\Omega$



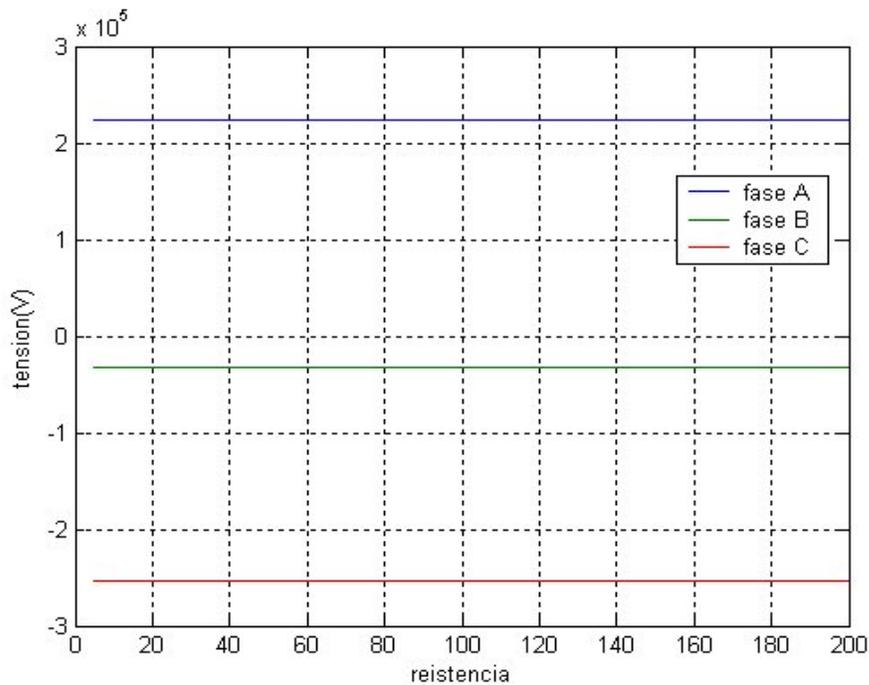
**Fig.3.2.1.1.1- Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra de 5  $\Omega$ .**



**Fig.3.2.1.1.2- Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra de 200  $\Omega$ .**

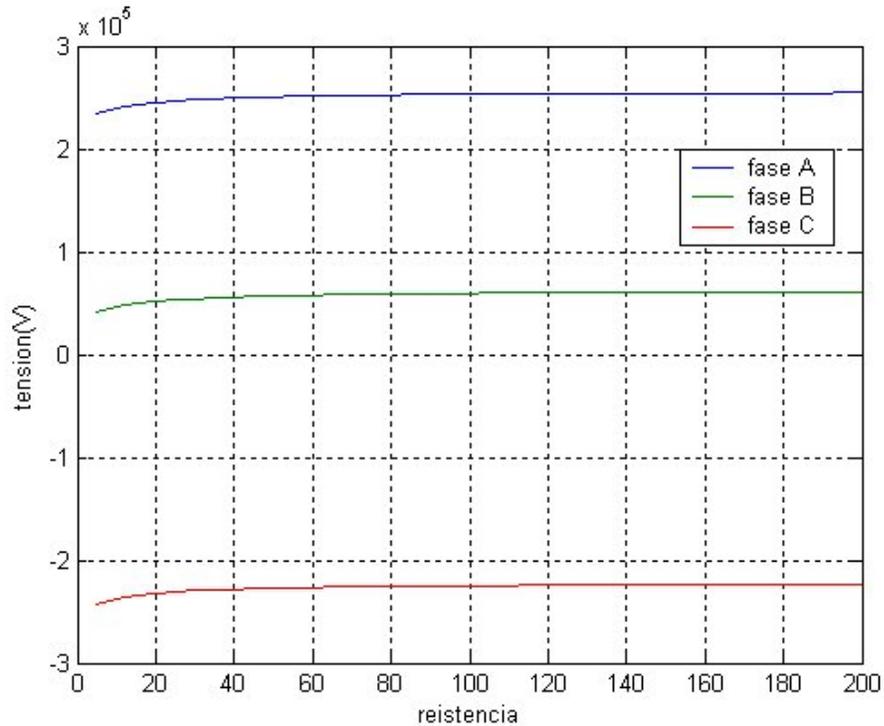
Las Fig. 3.2.1.1.1 y Fig. 3.2.1.1.2 muestran los niveles de sobretensión que aparecen en cada una de las fases de los terminales del transformador de cada unidad generadora (lado de 4.16 kV) con un tiempo de análisis de 50ms para valores de resistencia de 5 y 200Ω respectivamente y sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo generador.

Como se puede apreciar en las figuras, no existe variación apreciable en la forma y magnitud de las características, o sea el efecto de la resistencia de puesta a tierra en este caso es prácticamente nulo. La figura 3.2.1.1.3 muestra esta variación en todo el rango de resistencia para las tres fases.



**Fig.3.2.1.1.3- Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía entre 5 y 200  $\Omega$ , sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo.**

Si se realiza la conexión entre el cable protector de la línea y la puesta a tierra del grupo la variación que experimenta la tensión con la resistencia de puesta a tierra es la que se muestra en la figura 3.2.1.1.4

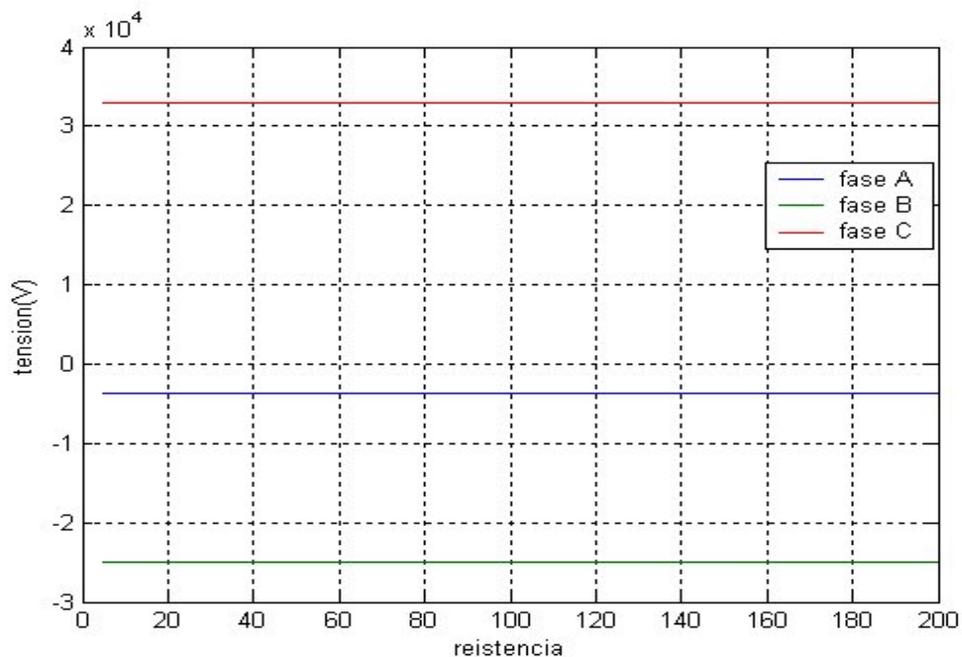


**Fig.3.2.1.1.4- - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía entre 5 y 200  $\Omega$ , con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo.**

En este caso para valores bajos de resistencia (menos de 20  $\Omega$ ) se produce una ligera disminución de las sobretensiones pero continúan siendo elevadas.

### 3.2.1.2- Impacto en cable protector.

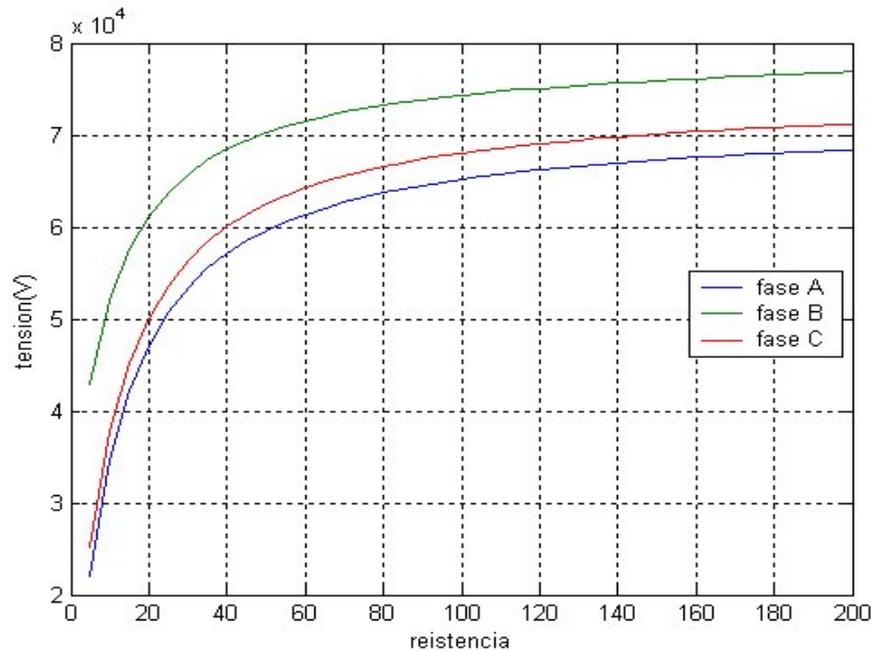
En este caso también se analizaron las posibilidades de conexión o no del cable protector a la puesta a tierra del grupo. La Fig.3.2.1.2.1 muestra los niveles de sobretensión que aparecen en cada una de las fases de los terminales del transformador de cada unidad generadora (lado de 4.16 kV) con un tiempo de análisis de 50ms para valores de resistencia de 5 a 200 $\Omega$  y sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo generador



**Fig.3.2.1.2.1- Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía entre 5 y 200 Ω, sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo.**

En este caso tampoco tiene influencia en la sobretensión la magnitud de la resistencia de puesta a tierra, pero si como era de esperar los niveles de sobretensión son más bajos.

Si se realiza la conexión entre el cable protector de la línea y la puesta a tierra del grupo la variación que experimenta la tensión con la resistencia de puesta a tierra es la que se muestra en la figura 3.2.1.2.2



**Fig.3.2.1.2.2 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía entre 5 y 200  $\Omega$ , con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo.**

Como se puede observar bajo estas condiciones si se aprecia una marcada diferencia entre los valores de tensión para bajos y altos valores de resistencia, pero lo más importante es que se produce un incremento en las magnitudes de sobrtensiones en comparación con las que tienen lugar cuando no hay conexión.

### 3.3-Ubicación del pararrayos en el lado de alta tensión.

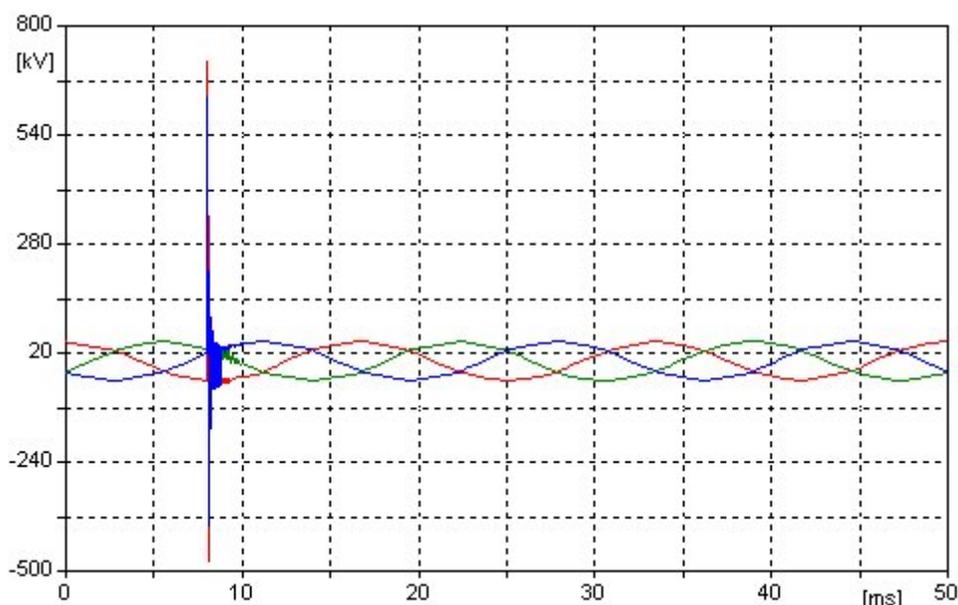
#### 3.3.1-Impacto sobre la línea.

A continuación se muestran los resultados gráficos correspondiente al modelo de la Fig2.7.3 del capítulo anterior presentando los niveles de sobretensión que aparecen en cada una de las fases de los terminales del transformador de cada unidad generadora (lado de 35.4 kV) con un tiempo de análisis de 50ms para valores de resistencia de 5 a 200 $\Omega$  y sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo generador.

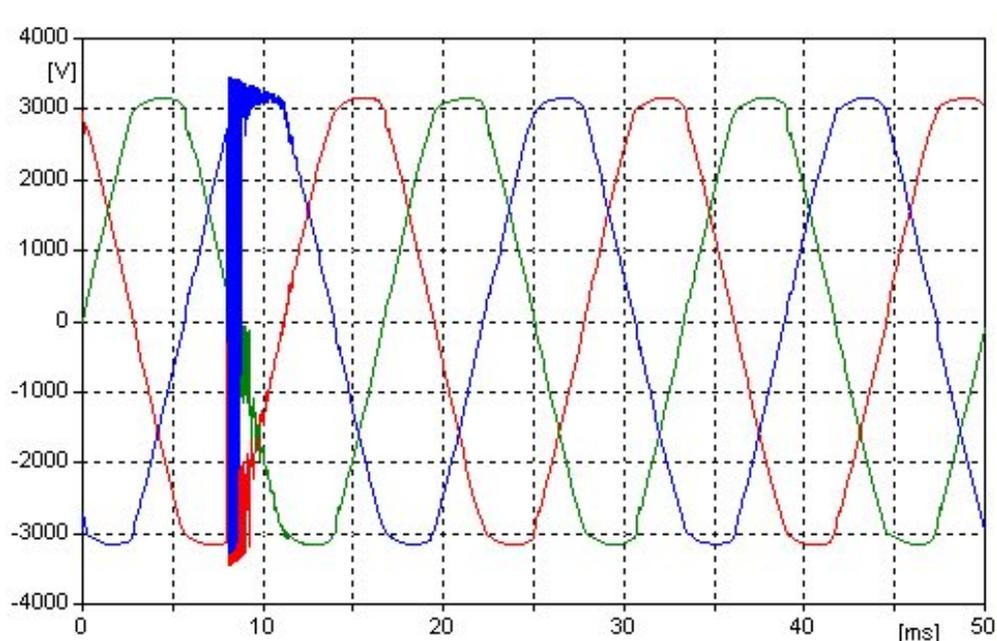
Se realizaron las pruebas bajo las siguientes condiciones:

- Impacto en la línea
- No conexión del cable protector con el aterramiento de los generadores.

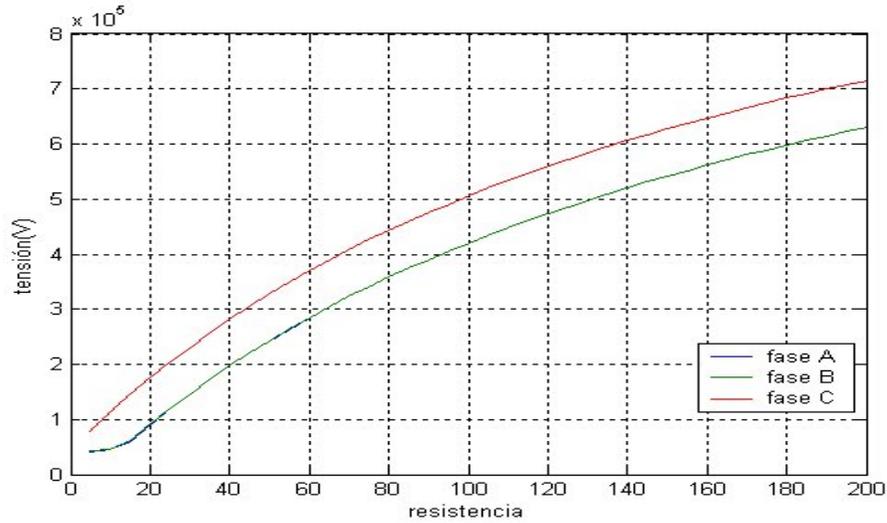
Las figuras 3.3.1.1 y 3.3.1.2 muestran la variación de tensión por los lados de alta y baja del transformador para una resistencia de puesta a tierra de  $200 \Omega$ .



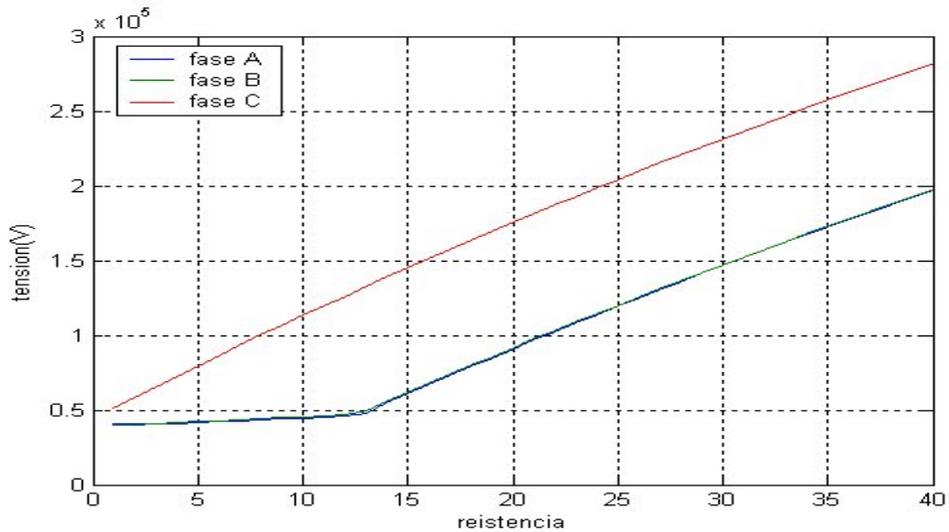
**Fig. 3.3.1.1- Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra de  $200 \Omega$ , por alta tensión.**



**Fig. 3.3.1.2- Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra de  $200 \Omega$ , por baja tensión**



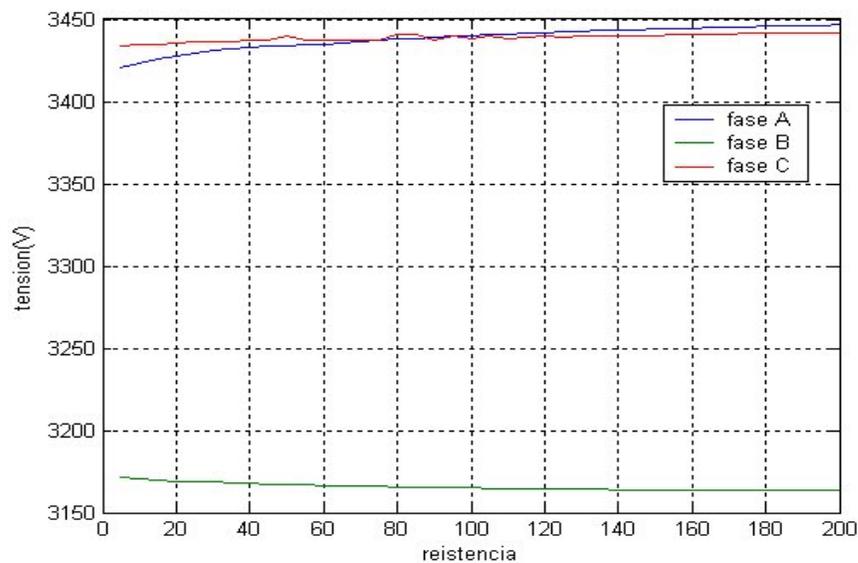
**Fig. 3.3.1.3- Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra en el pararrayo que varía entre 5 y 200  $\Omega$ , sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo**



**Fig.3.3.1.4 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía entre 1 y 40  $\Omega$  en el pararrayo, sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo**

Tal y como muestran las figuras 3.3.1.3 y 3.3.1.4 los voltajes por el lado de alta del transformador experimentan una elevación de tensión, presentándose un comportamiento similar entre las fases A y B (casi superponiéndose una sobre otra) no ocurriendo así con la fase C (fase sobre la que incide el rayo) la mas afectada, es importante destacar que en las fase no impactadas (A y B) se produce un incremento lento de la tensión con la resistencia hasta un valor de 13  $\Omega$ , donde cambia la pendiente y la tensión crece mas rápidamente.

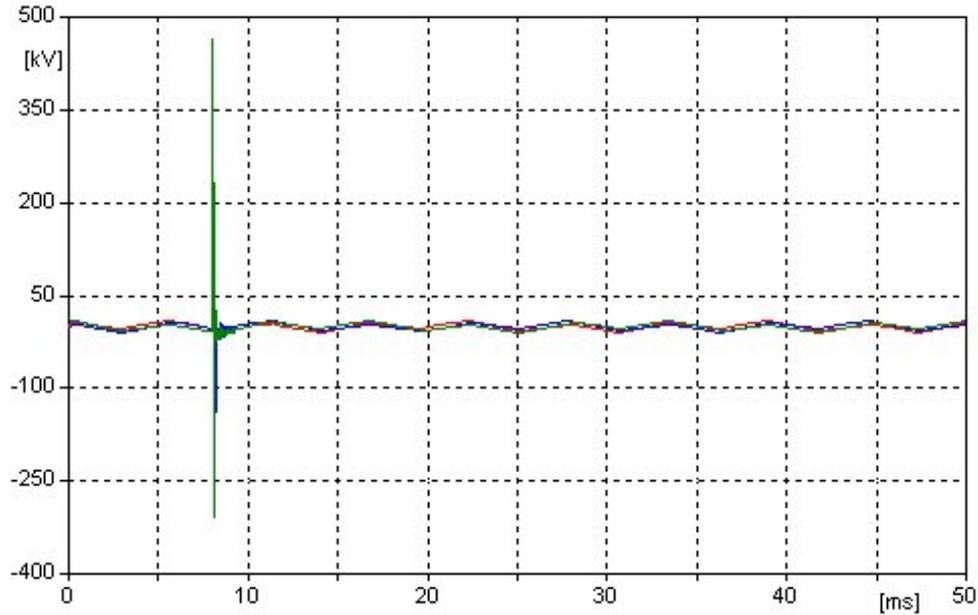
Es importante señalar también que el valor de resistencia de puesta a tierra tiene muy poca influencia en la magnitud de la sobretensión por el lado de baja, Fig.3.2.1.5



**Fig.3.3.1.5- - Variación de la tensión en los terminales del transformador por el lado de baja para una resistencia de puesta a tierra que varía entre 5 y 200  $\Omega$ , sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo**

Es evidente que la conexión del pararrayos por el lado de alta del transformador, según los valores de sobretensión observados en las gráficas, es más ventajosa, presentándose solo pequeñas distorsiones por el lado de baja.

Hasta aquí se ha considerado que el pararrayo se conecta a una puesta a tierra independiente de la puesta a tierra del grupo, si el pararrayo se conecta a la puesta a tierra del grupo, se transfieren al secundario, sobretensiones muy superiores a las obtenidas con conexión separada. (ver figura 3.3.1.6)

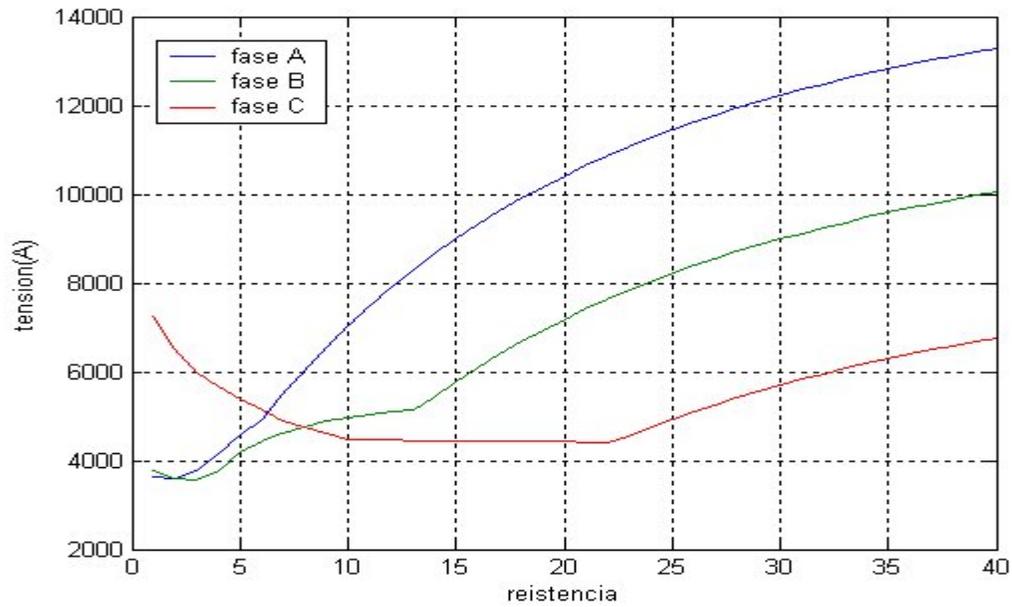


**Fig.3.3.1.6 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra de  $200 \Omega$ , sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo.**

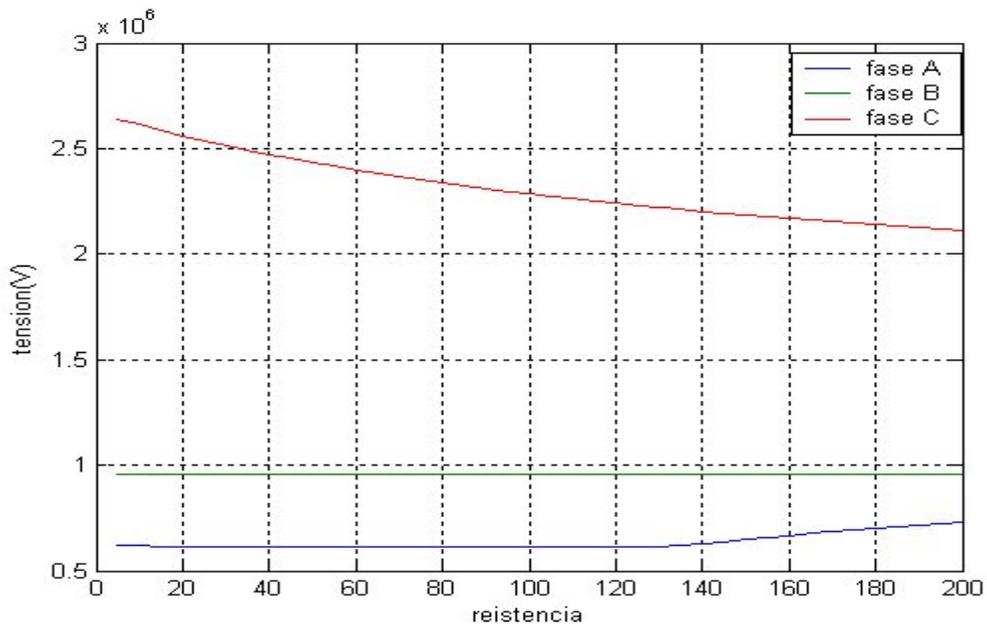
Si se mantiene el pararrayo por el lado de alta y conectado a una tierra independiente, con impacto del rayo en uno de los conductores de fase, pero se conecta el cable protector a la puesta a tierra del grupo y se hace el mismo análisis anterior se obtienen las variaciones de tensión mostradas en las figuras 3.3.1.7y 3.3.1.8

En la figura 3.3.1.7 se observan las variaciones de tensión en las tres fases de los terminales del transformador por el lado de baja, es evidente que los niveles de sobretensión son mucho más altos que con conexión separada del cable protector (Fig.3.3.1.5 ) y las variaciones con la resistencia son más marcadas.

En la figura 3.3.1.8 se muestran las variaciones por el lado de alta, donde se produce un incremento con respecto a la Fig. 3.3.1.3 y una menor dependencia con la resistencia.



**Fig.3.3.1.7 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varia desde 5 hasta 200 Ω, por baja tensión, con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo.**



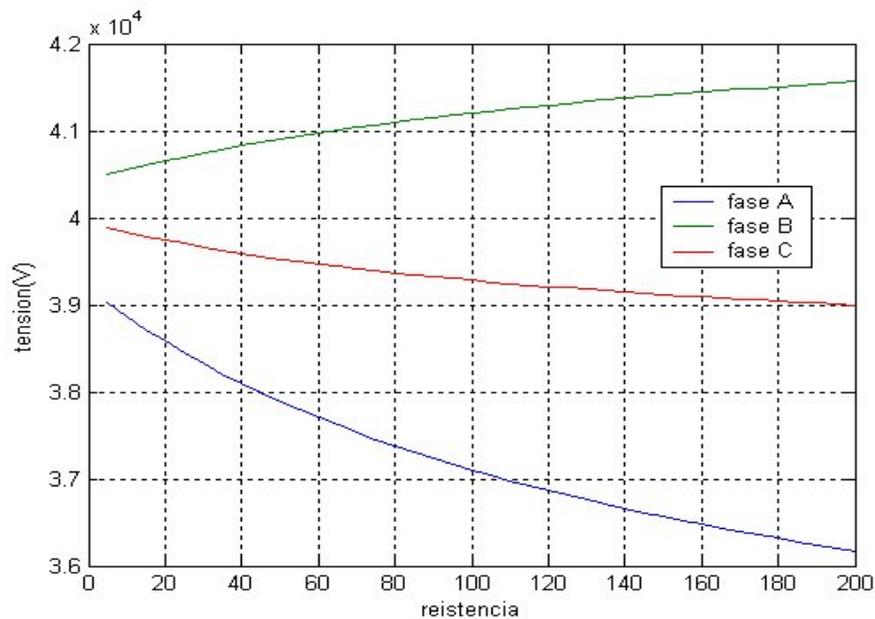
**Fig.3.3.1.8 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varia desde 5 hasta 200 Ω, por alta tensión, con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo (la resistencia de aterramiento del grupo es de 10 Ω)**

### 3.3.2-Impacto sobre el cable protector

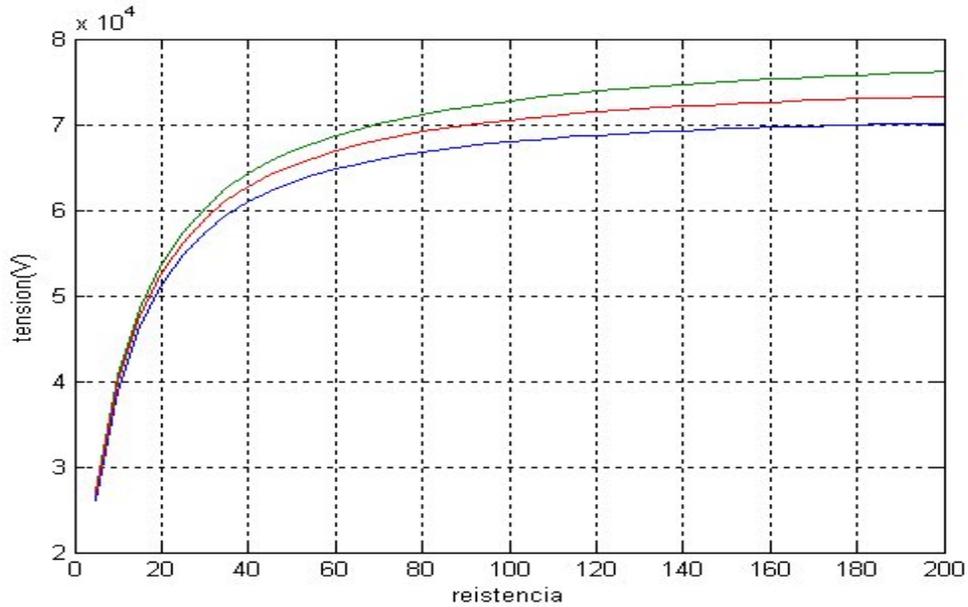
Siguiendo el mismo procedimiento se realizaron las pruebas bajo las siguientes condiciones:

- Impacto en el cable protector
- Conexión del cable protector con el aterramiento de los generadores.
- Las resistencias de aterramiento del pararrayo se variaron desde 5 hasta 200  $\Omega$  y se mantuvo constante con un valor de 10  $\Omega$  la del grupo

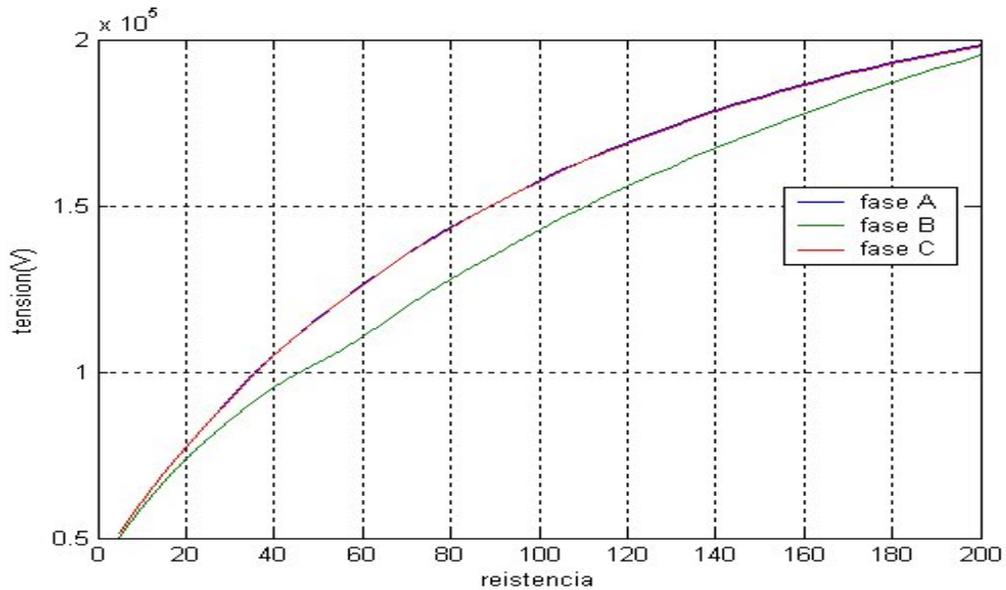
Es evidente la notable diferencia existente entre Fig.3.3.2.1 y Fig.3.3.2.2 siendo esta última más perjudicial por los elevados niveles de voltaje que presenta, como se aprecia las tres fases incrementan constantemente; sin embargo en la primera figura se nota una disminución en las fases C y A siendo solamente la B la que continua incrementándose; pero sin tomar valores tan elevados como los del gráfico 3.3.2.2



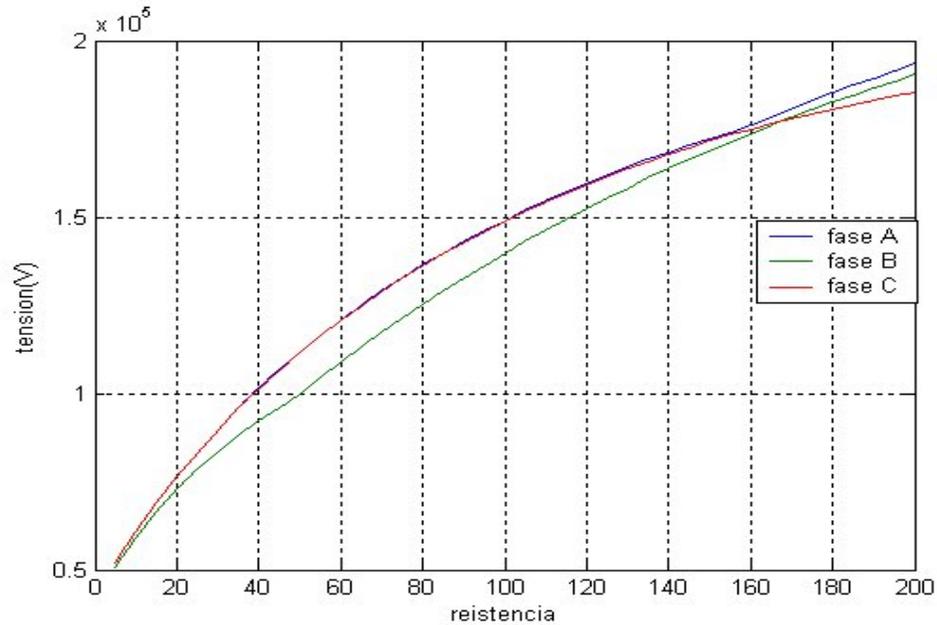
**Fig.3.3.2.1 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía desde 5 hasta 200 $\Omega$ , por baja tensión, con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo y pararrayo con conexión independiente**



**Fig.3.3.2.2 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varia desde 5 hasta 200 Ω, por baja tensión, con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo y pararrayo conectado a la puesta a tierra del grupo**



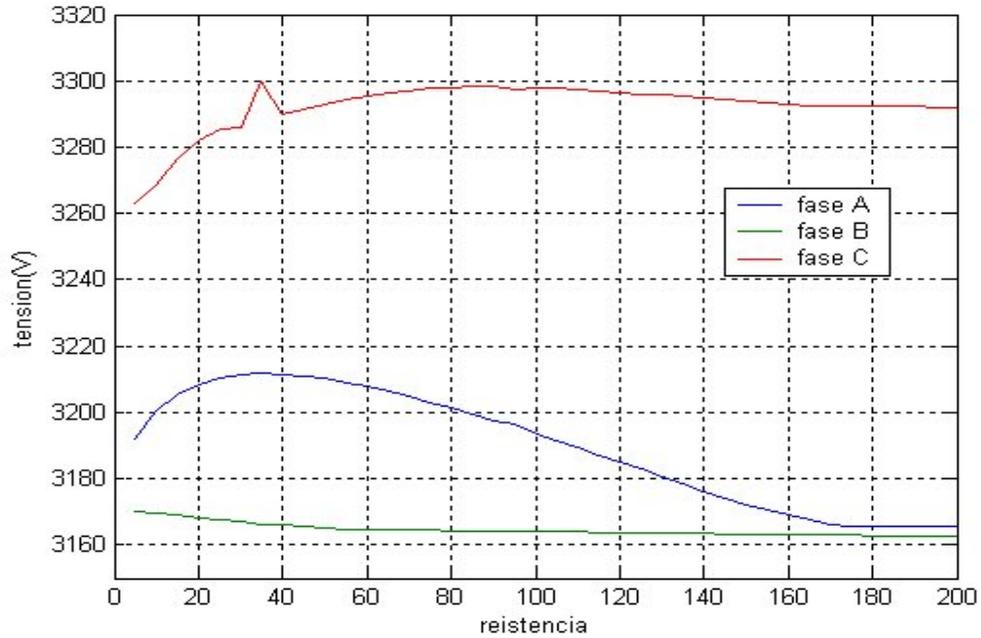
**Fig.3.3.2.3 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varia desde 5 hasta 200 Ω, por alta tensión, con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo y pararrayo con conexión independiente**



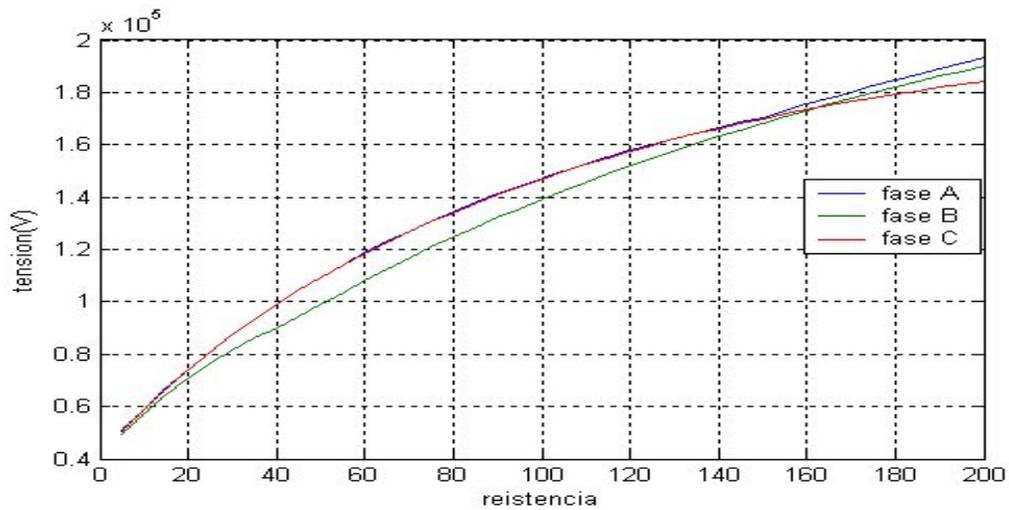
**Fig.3.3.2.4 - Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía desde 5 hasta 200 Ω por alta tensión, con conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo y pararrayo conectado a la puesta a tierra del grupo**

El comportamiento en las figuras 3.3.2.3 y 3.3.2.4 es muy semejante con un cierto incremento en la tensión cuando el pararrayo se conecta a la puesta a tierra del grupo.

Si no se realiza conexión entre el cable protector y la toma de tierra del grupo las tensiones por el lado de baja son las que se muestran en la figura 3.3.2.5, en este caso con conexión del pararrayo a la toma de tierra del grupo y la figura 3.3.2.6 con esas mismas condiciones la tensión por el lado de alta.



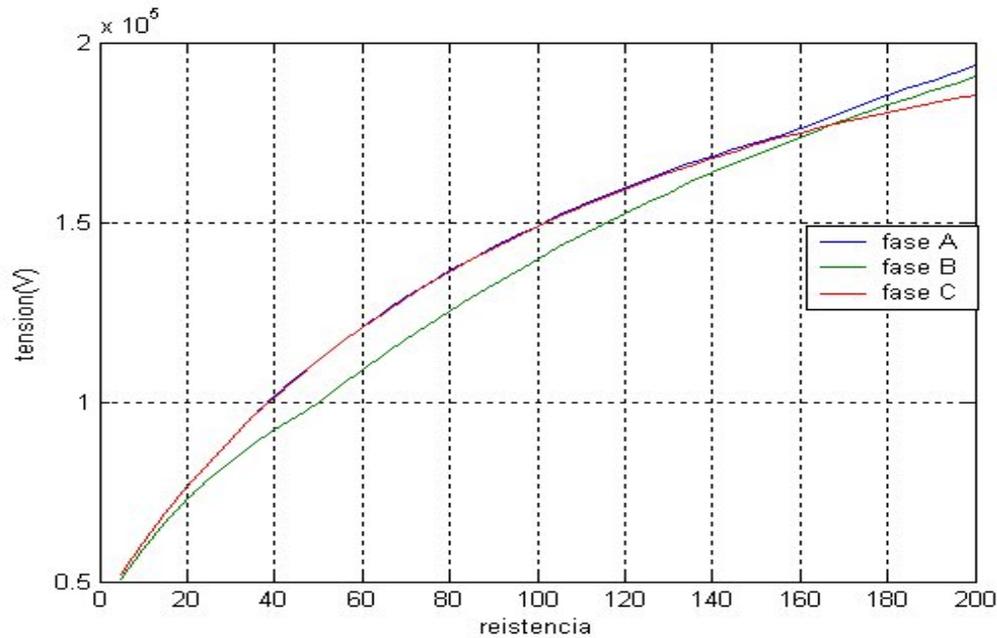
**Fig. 3.3.2.5-Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varia desde 5 hasta 200 Ω por baja tensión, sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo y pararrayo conectado a la puesta a tierra del grupo**



**Fig. 3.3.2.6**

**Fig. 3.3.2.5-Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varia desde 5 hasta 200 Ω por alta tensión, sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo y pararrayo conectado a la puesta a tierra del grupo.**

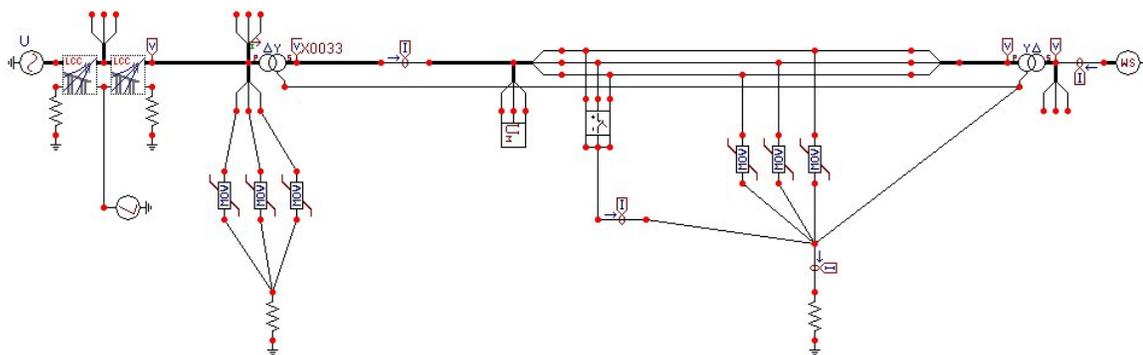
Si no realiza conexión entre el cable protector y la toma de tierra del grupo las tensiones por el lado de baja no cambian siendo iguales a las de la figura 3.3.2.5, en este caso con conexión independiente del pararrayo y la figura 3.3.2.7 muestra las variaciones de tensión por el lado de alta que también coinciden con la figura 3.3.2.6. mostrándonos que la conexión o no del cable al grupo así como la independencia de la puesta a tierra del pararrayos, en este caso, no es de mucha importancia.



**Fig. 3.3.2.6-Variación de la tensión en los terminales del transformador para una resistencia de puesta a tierra que varía desde 5 hasta 200  $\Omega$  por alta tensión, sin conexión entre el cable protector y la puesta a tierra del grupo y pararrayo conectado independientemente a la puesta a tierra del grupo**

### 3.4-Ubicación de pararrayos por el lado de alta y baja tensión.

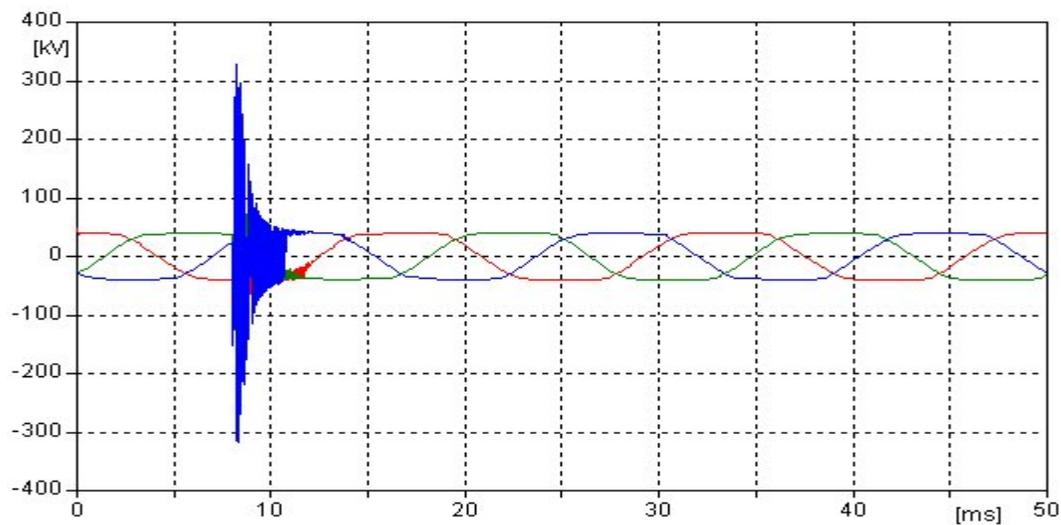
Hasta el momento se ha visto el comportamiento de las sobretensiones debido a una descarga atmosférica con la ubicación del pararrayos por el lado de alta o de baja del transformador, es lógico pensar en la protección por ambos lados del transformador. La figura 3.4.1 muestra el circuito utilizado en este caso.



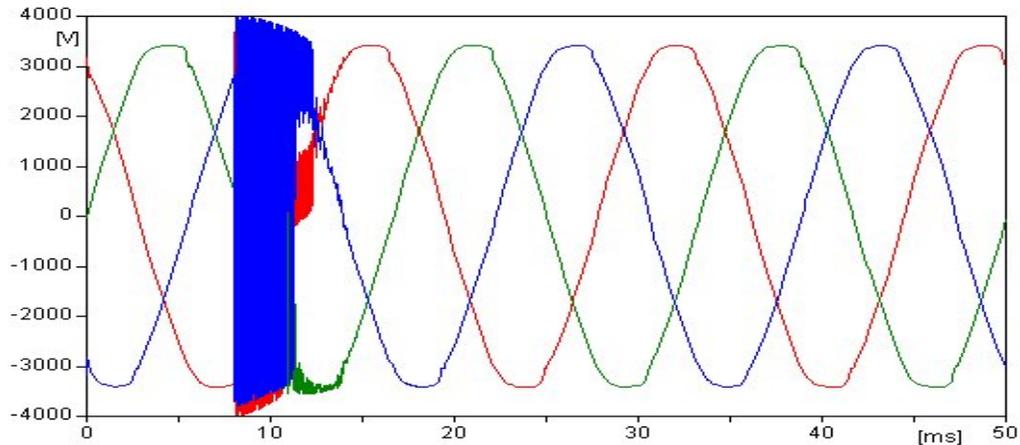
**Fig. 3.4.1. Esquema general del sistema modelado con protección por ambos lados del transformador.**

### 3.4.2-Impacto del rayo sobre la línea

Las figuras 3.4.2.1 y 3.4.2.2 muestran la variación de tensión por los lados de alta y baja del transformador respectivamente.

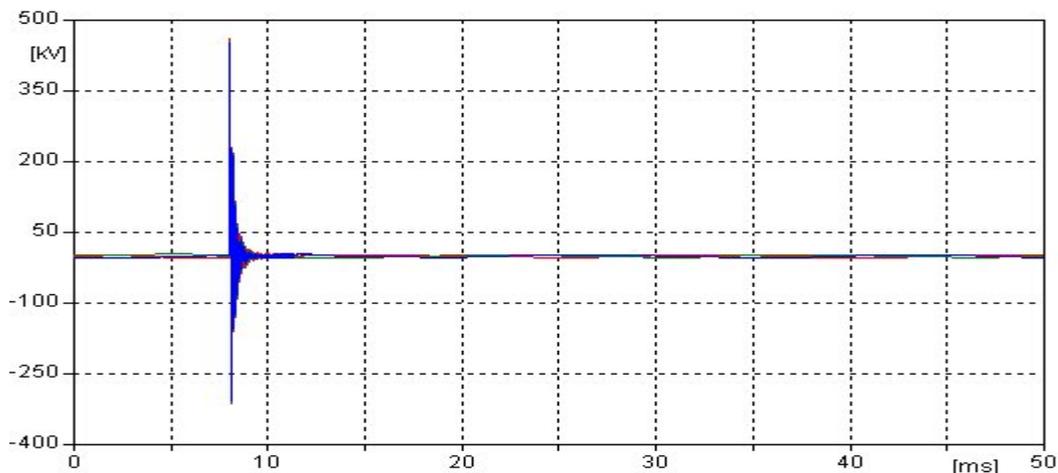


**Fig. 3.4.2.1 Variación de tensión por el lado de alta del transformador**



**Fig. 3.4.2.2 Variación de tensión por el lado de baja del transformador.**

En este caso se puede apreciar que independientemente de que las variaciones de tensión por el lado de alta adquieren valores de cientos de kV, las tensiones transferidas al secundario no superan los 4 kV. Es importante señalar que la corriente máxima del rayo en este caso fue de 250 kA, o sea que independientemente de la corriente del rayo las tensiones por secundario casi nunca hacen operar a los pararrayos de baja, por lo que pudieran no ser utilizados.



**Fig. 3.4.2.3 Variación de tensión por el lado de baja del transformador, con conexión del pararrayo de alta a la puesta a tierra del grupo.**

Se pudo comprobar que al igual que en los casos anteriormente analizados las conexiones tanto del cable protector como del pararrayo a la toma de tierra del grupo provoca tensiones por el lado de baja de gran magnitud (ver figura 3.4.2.3)

### **3.4.3-Impacto del rayo sobre cable protector.**

En este caso el comportamiento es similar al analizado en el epígrafe anterior, pero con valores de tensión de menor magnitud.

---

**Conclusiones:**

1. La ubicación de pararrayos solo por el lado de baja no garantiza una protección adecuada de las unidades del grupo ni del transformador 34.5 kV.
2. La ubicación del pararrayo por el lado de 34.5 kV garantiza una protección adecuada solo si se conecta a un toma de tierra independiente de la del grupo.
3. La conexión del cable protector de la línea de 34.5 kV a la toma de tierra del grupo, provoca grandes valores de sobretensión por el lado de baja.
4. Con una protección adecuada por el lado de alta los niveles de tensión por baja casi nunca superan los 4 kV, por lo que pudieran no ser utilizados.

Queda demostrado que los valores de resistencia de puesta a tierra deben ser lo menor posible, para garantizar una adecuada operación de los pararrayos y por tanto valores bajos de sobretensión.

---

**Recomendaciones:**

1. La protección adecuada de todos los elementos del sistema se logra si se realiza la protección por el lado de 34.5 kV.
2. Independientemente de que las tensiones por baja nunca superan los 4 kV, para cualquier valor de corriente máxima del rayo, se recomienda su utilización como un protección de respaldo para las unidades del grupo.
3. Nunca se debe conectar el cable protector de la línea de 34.5 kV a la toma de tierra del grupo.
4. Los valores de resistencia de puesta a tierra deben ser lo más pequeño posible y nunca superiores a los 20  $\Omega$

---

# Referencias bibliográficas

En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento.

/Albert Einstein/

**Referencias bibliográficas**

[1]CONAE,(2005) "GENERACIÓN DISTRIBUIDA ENERGÍA DE CALIDAD" disponible en :

[http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA\\_1917\\_generacion\\_distribui](http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_1917_generacion_distribui)

.Lunes 24 de octubre de 2005.

[2]Carlos Salzman" *GENERACION DISTRIBUIDA, SU INTERCONEXION EN EL FUTURO A UN SISTEMA DE DISTRIBUCION ELECTRICA. ANALISIS DEL IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE SERVICIO DEL SUMINISTRO*" Universidad de Buenos Aires(UBA)-Facultad de Ingeniería. Departamento de Electrotecnia-Proyecto I001.ARGENTINA.

[3]Marcos A. de Armas Teyra, Marcos A. de Armas Teyra , Inocente a. costa Pérez.La generación descentralizada: Nexos entre la generación descentralizada y las fuentes renovables de energía" disponible en

<http://cubasolar.cu/biblioteca/%20energia/Energia27/HTML/articulo07.htm%20-2030k%20->

[4]Andrés Buenfil Friedman,(2005)" El agotamiento de las reservas,más cerca de lo que se piensa cuando se acabe el petróleo " Masionare boletín#410. disponible en

<http://www.jornada.unam.mx/2005/10/30/mas-andres.html>

, DOMINGO 30 DE OCTUBRE DE 2005

[5]"Jornada internacional sobre energia marina:el despliegue de una fuente renovable"Energia Berria.Revista del Cluster de Energia del Pais Vasco # 17 disponible en:

[www.clusterenergia.com/ficheros%5CE.%20BERRIA%20N%C2%BA17.pdf](http://www.clusterenergia.com/ficheros%5CE.%20BERRIA%20N%C2%BA17.pdf)

abril 2006

[6]"Tecnología e innovacion".Informe anual de Actividades 2004 (EDESA)

[7]István Ojeda Bello(2006) "¿por que una Revolucion Energetica en Cuba?", Periódico 26 disponible en

[www.energia.inf.cu/2006.htm](http://www.energia.inf.cu/2006.htm)

[8] Embajada de Cuba en España (2006)"Aumentan transformaciones energéticas en Cuba" disponible en

<http://emba.cubaminrex.cu/Default.aspx?tabid=5386>

- [9] Humberto Concepción Toledo(2006)“La energía eólica se suma a la revolución que en ese terreno se plantea el país” Escambray, disponible en [www.energia.inf.cu/2006.htm](http://www.energia.inf.cu/2006.htm)
- [10]Idalia Vázquez Zerquera“Avanza instalación de grupos electrógenos en Villa Clara”, Vanguardia disponible en [www.energia.inf.cu/2006.htm](http://www.energia.inf.cu/2006.htm)
- [11]SINTEF,(2002).*ATPDRAW TM FOR Windows 3.5 ,User´s M anual.*  
Trondheim,Norway
- [12] MP.Kostenko, L.M.Piotrovski (1976) *Cortocircuito instantáneo de una Maquina Eléctrica* En: *Máquinas eléctricas* Vol.2, Ch15, MIR(ed), MOSCU.