

Statistical Analysis of Overvoltages Applied to Insulation Coordination

W.F. Gimenez

Abstract- The combination of an air-insulated installation with a new gas installation is being studied, in an urban mountain area close to the sea with a high ceramic level. Carrying out a conventional deterministic study shows unrealistic results for an average lightning. If you wish to consider the random of lightning, a statistical procedure must be incorporated that allows a trend analysis of the results. In this sense, a real case is developed at 145 kV that combines an existing double overhead line with a new gas insulated transformer station to verify its insulation level. The statistical analysis of lightning is detailed in a simulation software with random generation of variables for more than ten thousand atmospheric discharges and a level of protection of the facilities are determined. The usefulness of the procedure to analyze behavior as a whole is presented. It also shows the convenience of the process to extrapolate its behavior to the useful life of the installation

Keywords: EMTP/ATP, Insulation, Lightning, Overvoltages.

I. INTRODUCCIÓN

TRADICIONALMENTE, el proceso de coordinación de la aislación en una instalación de alta tensión se efectiviza en dos grandes áreas: coordinación de la aislación de la línea aérea que involucra a todas sus dimensiones físicas y características propias y la coordinación en la estación transformadora, donde son fundamentales los niveles de aislación (BIL – Nivel básico de aislamiento a impulso de rayo- y BSL – Nivel básico de aislamiento a impulso de maniobra) y propiedades de sus componentes, en especial si incluyen descargadores de sobre tensión.

Para cada una de ellas es posible realizar una verificación del tipo convencional o determinística donde se verifique que el BIL o BSL sea levemente superior al nivel máximo de sobre tensión posible en la instalación, o bien un estudio probabilístico donde se acepte una falla en un plazo de tiempo determinado (MTBF), como la cantidad de fallas por año cada 100 km de línea o el tiempo medio entre fallas para otras instalaciones [5].

Teniendo en cuenta que existen otras consideraciones técnicas como la dispersión y aleatoriedad propia de las descargas o la variedad de condiciones atmosféricas o topográficas; hacen que la utilización de un método probabilístico en función de parámetros estadísticos aceptados sea el más adecuado para la etapa de proyecto de una nueva instalación de potencia [4].

Seguidamente se presenta la aplicación del método probabilístico para la futura apertura de una doble LAT de 145 kV convencional, para instalar una nueva ET GIS de 10 bahías, en una zona muy poblada entre sierras bajas y el mar, generando variables aleatorias mediante sub rutinas del software EMTP/ATP [7] [8] buscando verificar el margen de protección de la estación ante ondas de sobre tensión rápidas que llegan a la primera interrupción dentro de la GIS [12].

II. CASO DE ESTUDIO

El proyecto es la apertura de una doble línea convencional de aislación de porcelana en soportes de hormigón donde los cinco últimos vanos son especiales por la topografía y diferencias de altitud que rondan los 150 metros acometiendo a la ET GIS que se ubica a solo 3 km del mar. En la Fig. 1, se presenta de forma simplificada, la situación del proyecto.

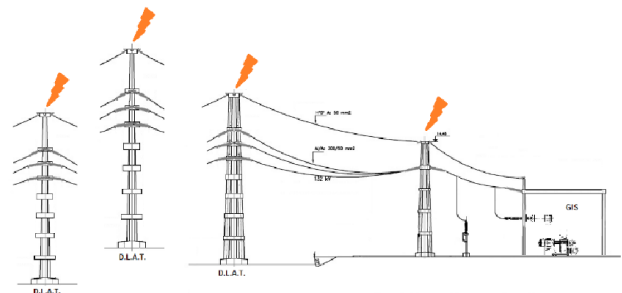


Fig 1. Esquema general del caso analizado.

Para el estudio probabilístico se utiliza el programa de simulación numérica EMTP/ATP junto a su preprocesador ATPDraw que permite la generación aleatoria de variables para representar la descarga atmosférica y subrutinas propias de pre y post procesamiento de datos y resultados [7]-[8].

Según [1]-[2]-[3] la línea aérea que acomete a la estación transformadora se representa mediante un modelo matemático con parámetros distribuidos constantes con la frecuencia de 500 kHz contemplándose el efecto pelicular y se representa de forma unitaria para cada vano, incluso sus hilos de guardia. Las estructuras se simulan como si fuera un conductor simple representado por una línea de parámetros distribuidos con su tiempo de tránsito igual al cociente entre la altura de la torre y una velocidad de onda proporcional a la velocidad de la luz con una impedancia característica menor

a 300 Ohms. Cada cadena de aisladores se representa con una capacitancia de 80 pF en paralelo con un interruptor controlado por tensión que se cierra para simular el contorno de la cadena.

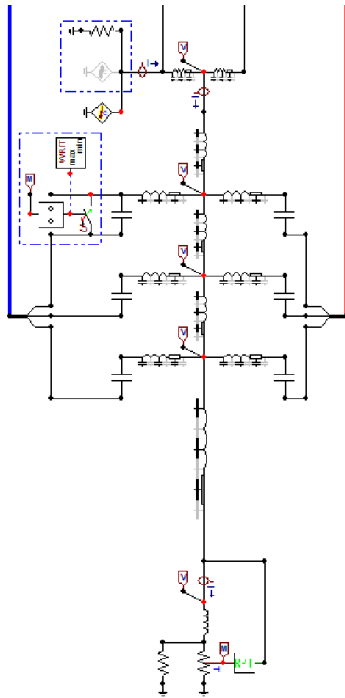


Fig 2. Representación final de una estructura.

La puesta a tierra, al ser ejecutada con jabalinas, se modela con una resistencia no lineal dependiente de la corriente ya que su valor varía desde 150 Ohms aproximadamente a menos de la mitad para un terreno de resistividad próxima a 100 Ohm-m de promedio.

Para simular la estación transformadora se utilizan las recomendaciones de IEEE de barras no segregadas construyéndose un modelo utilizando la “Línea Tipo B” disponible en la Subrutina Cable Parameters, correspondiente a cables tipo tubo [11] que se puede observar en la Fig.3.

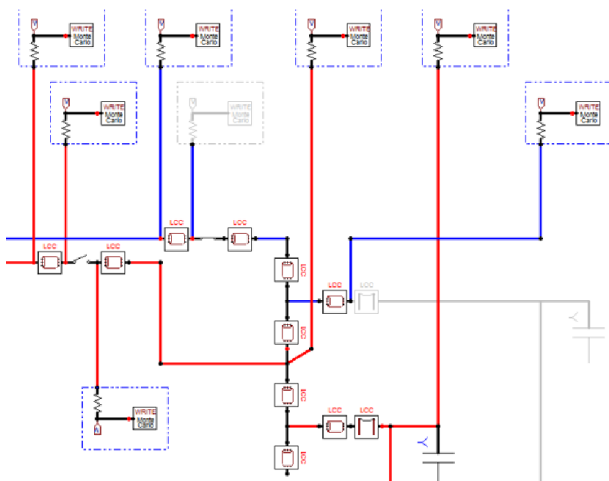


Fig 3. Representación reducida de la ET GIS.

Igualmente el descargador fue modelado según IEEE a partir de los datos físicos del folleto del fabricante desde

donde también se obtuvo su curva de actuación. El resto de elementos también se han representado y verificado su robustez, siguiendo las recomendaciones habituales para estos estudios [2].

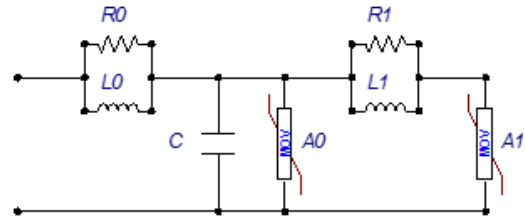


Fig 4. Modelo de descargador propuesto por IEEE.

III. LA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Existen cuatro tipos de rayos posibles [4]-[5] – descendentes, ascendentes, polaridad positiva y negativa – pero la estadística y registros indican que en el 90% de los casos se trata de descargas descendentes de polaridad negativa, que pueden involucrar varias descargas consecutivas espaciadas solo algunos milisegundos entre sí.

Escogiendo solo el primer impacto, existe un conjunto de parámetros que es necesario definir a la hora de representar una descarga atmosférica o un conjunto de ellas, a través de su “forma de onda” que son:

- Amplitud del primer pico de corriente.
- Tiempo de cresta.
- Tasa de variación de corriente
- Tiempo de semi cola.
- Duración total.

Según los estudios y mediciones realizadas por BERGER [5] y ratificados por otros autores [4], los parámetros anteriores pueden ser agrupados en una distribución logarítmica normal; entonces, se podrá utilizar una ecuación general para representar su densidad de probabilidad para cualquiera de ellos según la forma siguiente:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot x \cdot \vartheta_{\ln x}} \exp\left[-0,5\left(\frac{\ln x - \ln x_m}{\vartheta_{\ln x}}\right)^2\right], \quad (1)$$

siendo $\vartheta_{\ln x}$ la desviación estándar del $\ln x$ y x_m la mediana de x y cuyos valores se encuentran en la Fig.5 para el primer impacto, que es el utilizado y para los siguientes picos.

Esta descarga representada en el programa de simulación por una fuente de corriente ideal doble exponencial con una impedancia infinita resulta, en términos gráficos, la Fig.6 representa para una descarga única de 38 kA de intensidad aproximadamente y de forma general según los parámetros de Fig.5 [9]- [10]- [11].

Parameter	First stroke		Subsequent strokes	
	Median, M	β , log std. deviation	Median, M	β , log std. deviation
Front, μs				
$t_{10/90}$	5.63	0.576	0.75	0.921
$t_{50/90}$	3.83	0.553	0.67	1.013
$t_m = \min \text{ eq. front}^a$	1.28	0.611	0.308	0.708
$t'_m = \min \text{ eq. front}^b$	1.14	0.578	0.296	0.708
Steepness, kA/μs				
$S_{10/90}$	5.0	0.645	15.4	0.944
$S_{50/90}$	7.2	0.622	20.1	0.967
S_{10}	2.6	0.921	18.9	1.404
S_m	24.3	0.599	39.9	0.852
Crest, kA				
I_i , initial	27.7	0.461	11.8	0.530
I_f , final	31.1	0.484	12.3	0.530
Initial/final	0.9	0.230	0.9	0.207
Charge, C	4.65	0.882	0.938	0.882
Tail, μs	77.5	0.577	30.2	0.933
$I^2 dt$, (kA) 2 s	0.057	1.373	0.0055	1.366
Inter-stroke interval, ms				
			1st to 2nd stroke, $M = 45$ ms	
			2d stroke onward, $M = 35$ ms	
			$\beta = 1.066$ for both	
Flash duration, ms, excluding single stroke flashes			$M = 200$	
			$\beta = 0.69$	

Fig 5. Parámetros estadísticos para la distribución logarítmica normal [4].

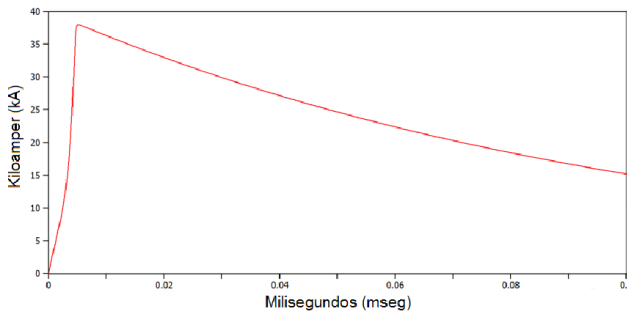


Fig 6. Forma de onda general de una descarga atmosférica doble exponencial.

La figura anterior que responde a una distribución Log-normal: cuya función densidad de probabilidad está caracterizada por una Mediana (P_{50}) igual a 31,1 kA y una desviación estándar logarítmica de 0,484; es sólo una de las infinitas posibilidades reales de ocurrencia, entonces: ¿Cómo se incorpora la dispersión real que existe en la naturaleza en las simulaciones? ¿Hay que hacer tantas simulaciones cómo posibilidades se tenga? La respuesta es, *si*.

No obstante, para facilitar el trabajo, una de las posibilidades es la generación automática de variables aleatorias a través del “Método de Montecarlo”, método estadístico no determinístico, que permite resolver problemas complejos a través de la generación fortuita y aleatoria de variables involucradas en un suceso representado en el programa de simulación.

De ésta forma, una buena cantidad de simulaciones asegura reproducir las curvas de densidad de probabilidades de las variables aleatorias con buen grado de precisión pero a costa de un incremento notable en el trabajo; mientras que una cantidad reducida arrojará valores muy dispersos y poco representativos. Por lo tanto, la cantidad de simulaciones será realizada en base a la experiencia, grado de precisión deseado y tiempo disponible, siempre buscando una solución de equilibrio entre “exactitud vs tiempo de proceso”.

IV. SIMULACIONES ESTADÍSTICAS

Una vez construido el circuito y habiendo previamente verificado el correcto comportamiento de cada elemento individualmente y en conjunto a la frecuencia del estudio; se estará en condiciones de realizar las simulaciones para el tiempo máximo y delta T escogidos en consonancia. Por ejemplo, se podrá ver la evolución de la tensión en cualquier parte de la instalación o en la torre donde impacta la descarga; siendo necesaria la aclaración que la primera porción de la curva es la que realmente guarda relación con la realidad.

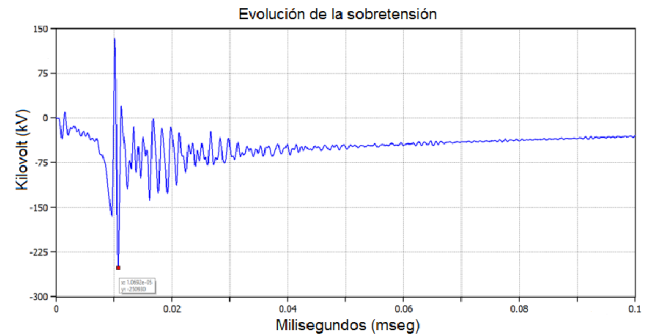


Fig 7. Evolución de la tensión al final de la línea aérea.

Luego se realizan tantas simulaciones como precisión se desee para proceder finalmente a graficar, generalmente una sobretensión o una sobre corriente, en función del número de caso que guarda relación con la generación aleatoria de variables.

De esta forma, una vez verificado el resultado, se repite mil veces la misma simulación, pero utilizando mil formas de rayos distintas con parámetros generados aleatoriamente según Montecarlo, con lo que se obtiene una distribución estadística de la corriente de la descarga, el tiempo de frente y derivada de la corriente, como principales parámetros de las descargas que se presentan seguidamente.

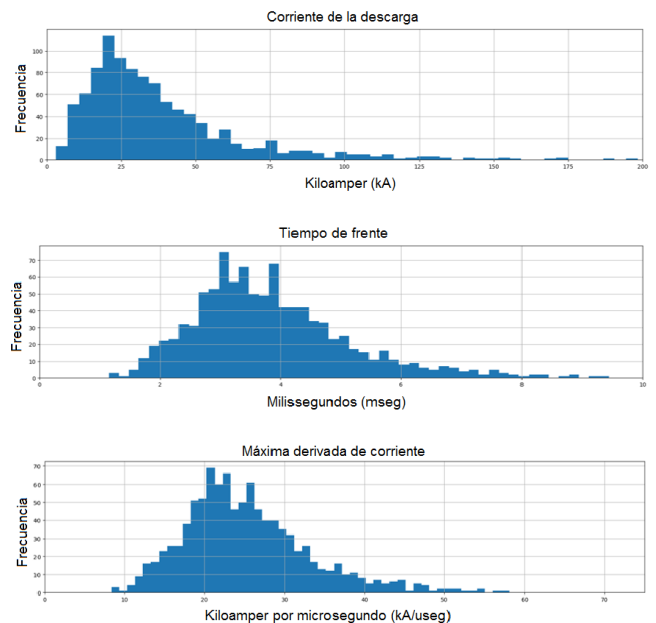


Fig 8. Distribución estadística de magnitud de corriente, tiempo de frente y su tasa de variación, generados aleatoriamente.

El resultado de las simulaciones son tablas de mil valores de la o las incógnitas buscadas que luego habrá que procesar y graficar. Como ejemplo, en la gráfica siguiente, cada punto representa el valor máximo de sobretensión en el pórtico final de la línea aérea, en bornes de entrada y en la primera interrupción interna de la GIS.

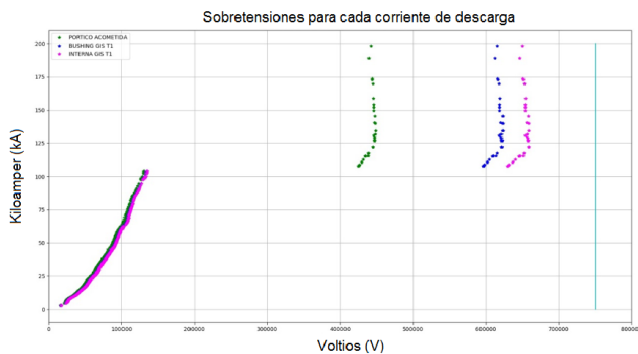


Fig 9. Nivel de sobretensiones para cada uno de los mil rayos generados.

La figura anterior resalta lo siguiente:

- ✓ Se muestran los resultados de las 1000 simulaciones realizadas junto con el BIL de la ET GIS (750 kV).
- ✓ Cualquier descarga por sobre los 110 kA aprox. siempre provoca el contorneo de alguna cadena de aisladores en las torres próximas y un salto en los valores de sobretensiones que se manifiesta en las discontinuidades de las curvas.
- ✓ Como es de esperar, la onda de sobretensión “rebota” en la primera interrupción y retorna, provocando la mayor sobretensión dentro de la GIS.
- ✓ A pesar de lo anterior y de las mil simulaciones realizadas, su magnitud no es suficiente para alcanzar el BIL de la GIS.
- ✓ En números, la instalación tiene casi un 10% de “factor o margen de seguridad” para las descargas involucradas.

Como es de conocimiento, a igualdad de costos, es posible mejorar el grado de protección de la instalación con un simple reposicionamiento del descargador a una posición bien cerca del bushing de entrada a la GIS

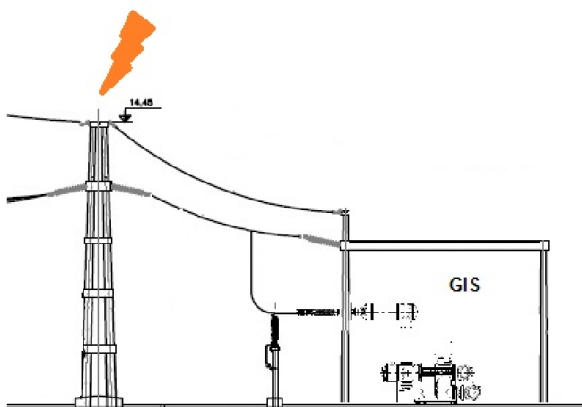


Fig 10. Nueva posición del descargador.

Ejecutando nuevamente las mil simulaciones se obtiene la nueva figura de sobretensiones en función de sobre

corrientes, en donde el factor de protección se incrementa hasta superar el 26%, o, lo que es igual, se reducen todas las sobretensiones en el interior de la GIS al trabajar mejor el descargador de sobretensión, como ya es sabido.

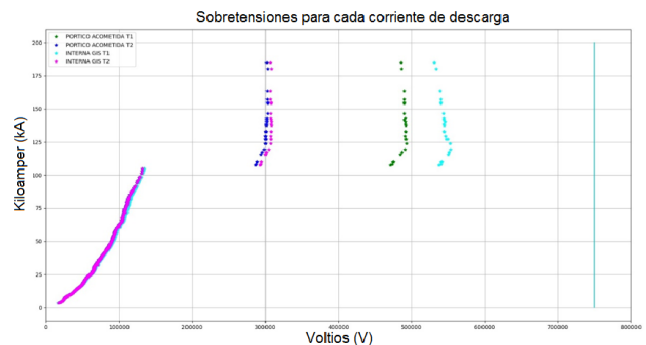


Fig 11. Nivel de sobretensiones para la nueva posición.

El análisis realizado fundamentalmente permite no sólo conocer que intensidad de descarga provoca el contorneo de cualquier cadena de aislación, ya que esto se lograría fácilmente usando intensidades de cientos de kA y un proceso iterativo. Lo que aquí se ejemplifica es como generalizar para cientos o miles de descargas por aplicación estadística de registros, según criterios de IEEE.

V. CONCLUSIONES

Se presentó por medio de un caso de estudio de análisis de sobretensiones, la forma de migrar de un estudio determinístico a uno probabilístico con generación de las principales variables de forma aleatoria en función de datos reales, siguiendo una distribución específica, logarítmica normal para éste caso.

Una de las ventajas es la visión más general del evento en estudio, pudiéndose realizar diferentes análisis complementarios; por ejemplo, si se tiene el nivel cerámico de la zona, que representa la cantidad de descargas a tierra N_g por kilómetro cuadrado por año o bien la cantidad de días de tormenta al año T_d . Calculando, si se conoce que hay 25 tormentas al año para un nivel cerámico de 2,24 esto resulta que caen a tierra casi 3 rayos por kilómetro cuadrado por año. Si una línea tiene 100 km de longitud y una franja de seguridad de 25 m; se podría aceptar que ocupa 2,5 hectáreas lo que significa que caen sobre la línea casi 8 descargas al año. Extrapolando para toda la vida útil estimada de una instalación de alrededor de 30 años, la cantidad de descargas que recibe a lo largo de su vida asciende a 240 veces.

El procedimiento empleado permite generar ésta cantidad de descargas en una sola simulación donde se puede estudiar su comportamiento a lo largo de toda su vida útil analizando su grado de protección.

De forma similar, para una estación transformadora se puede calcular a partir de una tasa de falla o un porcentaje de eficiencia cual es el plazo medio de tiempo entre fallas para esa zona geográfica, a partir de simular la cantidad de descargas atmosféricas que se desee.

Por último, la nube de puntos que se obtiene, siempre indica tendencias posibles y diversas interpretaciones que el profesional podrá analizar convenientemente.

VI. AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a colegas del Área de Sistemas de Potencia de la UTN FRSF, por su valiosa ayuda en el desarrollo del trabajo original y en la implementación del método en el programa de simulación.

VII. REFERENCIAS

Publicaciones:

- [1] IEEE Fast Front Transient Task Force: “*Modeling guidelines for fast front Transients*” — IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, No 1, January 1996.
- [2] IEEE Working Group 3.4.11 – Power Delivery Transaction: “Modelling of metal oxide surge arresters” Vol 7 N° 1, January 199
- [3] Juan A. Martinez-Velasco: *Power System Transients, Parameter Determination*, ISBN 978-1-4200-6529-9, Ed. CRC Press 2010.

Libros:

- [4] EPRI: *AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above – 3th Edition*.
- [5] Andrew R. Hilemann: *Insulation Coordination for Power Systems* ISBN 0-8247-9957-7, Ed. Marcel Dekker, 4° Ed, 1999.
- [6] Allan Greenwood: *Electrical Transients in Power Systems – Second Edition*, ISBN 0-471-62058-0, Ed. John Wiley, 6° Ed. 1991
- [7] Can Am EMTP User Group: *ATP Rule Book*.
- [8] Bonneville Power Administration: *EMTP Theory Book*.

Reportes Técnicos:

- [9] CIGRE - Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltage and Insulation Coordination): *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, October 1991.
- [10] *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines - IEEE Std 1243*, 1997.
- [11] Task Force on Very Fast Transient in IEEE Working Group on Modelling an Analysis of Systems Transients Using Digital Programs “Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients”, in IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 11, N°4, October 1996.

Artículos:

- [12] J. R. Simms: “Overvoltage protection of gas-insulated substations”, *Power Engineering Journal*, July 1987.

VIII. REFERENCIAS



Walter Fernando Giménez nació en Santa Fe – Argentina en 1966. Se graduó de Ingeniero Electricista en la Universidad Tecnológica Nacional en 1991, en 1993 se graduó de Diplomado en Dirección de Empresas en la Universidad Nacional del Litoral; ya en el 2000 terminó su Doctorado con Honores en la Universitat Politècnica de Catalunya. Profesor a tiempo completo en la UTN, docente – investigador Categoría I desde 2014.

Ha dirigido numerosos proyectos de investigación, proyectos de fin de carrera, tesis de posgrado y realizado numerosas publicaciones y libro en el área de Sistemas de Potencia, Transitorios Electromagnéticos y Simulación Matemática. Consultor independiente en el área de estudios especiales y perito técnico en Alta Tensión.