



Optimización del cálculo del campo electromagnético debido a una descarga atmosférica

Reducing computational time in the electromagnetic field calculation due to indirect stroke

Verónica Adriana – Galván Sánchez
José Alberto – Gutiérrez Robles

Víctor Hugo – Ortiz Muro
Osvaldo – Aguilar Peña

Recibido: Junio del 2012

Aprobado: Noviembre del 2012

Resumen/ Abstract

Para calcular el sobrevoltaje inducido en una línea de transmisión debido a una descarga atmosférica se necesita estimar el campo electromagnético. El cálculo del campo consume tiempo de cómputo prohibitivo; por esta razón desde la década de los 80's se inició la búsqueda de cómo simplificar los modelos para hacer más accesible la implementación computacional de este tipo de estudios. La primera simplificación consiste en aproximar una descarga atmosférica con una función simple. La segunda simplificación consiste en la implementación de un interpolador lineal. Aquí se propone la implementación de un interpolador parabólico espacial para reducir las necesidades de recursos de cómputo, manteniendo el compromiso entre el tiempo de cálculo y el error acumulado. Esta nueva simplificación incorpora un error adicional equiparable con el que incorpora el interpolador lineal en tiempo, por lo tanto se considera una estrategia adecuada en el cálculo óptimo del campo electromagnético.

Palabras clave: descarga indirecta, optimización del cálculo del campo electromagnético, red de distribución, interpolación parabólica, voltaje inducido debido a una descarga atmosférica.

The induced overvoltage work out in a distribution line, due to indirect lightning discharge, needs the electromagnetic field estimation. The field calculation consumes a lot of computational resources; for this reason since 80s it is looking for some simplifications in the models to render more approachable the computation implementation of this kind of studies. Heidler function is maybe the best model to represent the current of a lightning discharge, so the first simplification consist in the approach of a lightning discharge with a simple function like a double linear ramp (here called triangular) and/or a trapezoidal waveform. The second simplification concerns to the implementation of a linear interpolation ones the current overpass its maximum value, this means that the electromagnetic field is calculated step by step the first microseconds and then every ten time steps (like an example), the remain data are linearly interpolated. It is proposed here the implementation of a parabolic space interpolation to reduce the computational needed resources; the compromise is the electromagnetic field calculation in the minimum time limiting the error. The proposed simplification incorporated an additional error comparable to the one of the time linear interpolation, so it is considered that this strategy is as good as the previous one in the electromagnetic field optimum calculation.

Key Words: indirect stroke, electromagnetic field optimum calculation, distribution network, parabolic interpolation, lightning induced overvoltage

INTRODUCCIÓN

El análisis de una descarga atmosférica indirecta en una red de distribución es muy importante, ya que la inducción debida a la descarga puede ionizar o flamear la cadena de aisladores, y ocasionar una interrupción del servicio eléctrico.

Las cadenas de aisladores están diseñadas para soportar cierta tensión en sus terminales. El nivel de aislamiento se define, de acuerdo a la Comisión Internacional de Electrotecnia, como el voltaje que debe soportar en condiciones de lluvia: una onda de voltaje del doble del voltaje pico nominal por un minuto, y un frente de onda instantáneo doble exponencial 1.2/50. Por ejemplo para un nivel nominal de 24 kV, las cadenas de aisladores se diseñan para soportar 50 kV por un minuto y un frente de onda de 125 kV [1]. Dependiendo de la localización y potencia de la descarga, el sobrevoltaje inducido puede sobrepasar este potencial, y debido a que esta sobretensión es función del campo electromagnético, es muy importante contar con una herramienta rápida y confiable para aproximar este campo.

El campo electromagnético en un punto de la línea es impredecible por dos razones principales: el comportamiento aleatorio del lugar físico donde cae la descarga, y la no-linealidad del campo electromagnético. Así, con el objeto predecir la fiabilidad de la red se utiliza el método de Monte Carlo para posicionar la descarga atmosférica y posteriormente se calcula el campo electromagnético con el fin de estimar el sobrevoltaje inducido. Si el sobrevoltaje inducido sobrepasa el límite de la cadena de aisladores, éstas se flamean y se comportan como un medio conductor; en estas condiciones los relevadores de protección detectan una falla en el sistema y desconectan parte de la red; por esta razón se puede decir que la metodología sirve en forma indirecta para determinar la fiabilidad de una red. Una práctica común es hacer miles de estos estudios en una línea de distribución para establecer el número posible de salidas de servicio que se pueden presentar en un año de acuerdo a la densidad de descargas del lugar. Adicionalmente, si cada cálculo consume tiempo prohibitivo de cómputo, se vuelve importante tener modelos simplificados que representen adecuadamente el fenómeno físico [2-4].

ECUACIONES DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Si se considera la tierra como un conductor perfecto se pueden deducir las ecuaciones del campo electromagnético en el dominio del tiempo para un dipolo vertical dz' localizado a una altura Z' a través del canal de la descarga (ver figura 1).

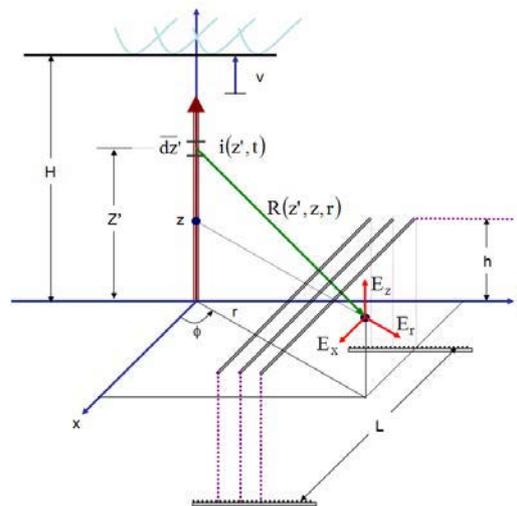


Fig. 1. Geometría utilizada para el cálculo del voltaje inducido por una descarga atmosférica.

En coordenadas polares, a partir de la solución de las ecuaciones de Maxwell se obtiene [5-6]:

$$dE_r(r, \phi, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{3r(z-Z')}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau + \frac{3r(z-Z')}{cR^4} i(z', \tau - R/c) + \frac{r(z-Z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} \right\} \quad (1)$$

$$dE_z(r, \phi, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{2(z-Z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau + \frac{2(z-Z')^2 - r^2}{cR^4} i(z', \tau - R/c) + \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} \right\} \quad (2)$$

$$dB_\phi(r, \phi, z, t) = \frac{\mu_0 dz'}{4\pi} \left\{ \frac{r}{R^3} i(z', \tau - R/c) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} \right\} \quad (3)$$

Donde

B es la densidad de flujo magnético.

E es la intensidad de campo eléctrico.

$i(z', t)$ es la corriente del canal de descarga en Z' .

τ es el tiempo de viaje desde el piso hasta dz' .

c es la velocidad de la luz.

ϵ_0 y μ_0 son respectivamente la permitividad y permeabilidad del aire.

$R = (r^2 + (z-Z')^2)^{1/2}$

El primer término del lado derecho de (1) y (2), es la componente de campo eléctrico estático en dirección r y z respectivamente. El segundo término es el campo eléctrico inducido y el tercero es el campo eléctrico radiado. El primer término del lado derecho de (3), es el campo magnético inducido y el segundo es el campo magnético radiado. El campo total debido a una descarga atmosférica se obtiene integrando las ecuaciones (1), (2) y (3) a lo largo del canal de descarga y su imagen. Así se obtiene:

$$dE_r(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \int_{-H}^H \frac{3r(z-Z')}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau dz' + \int_{-H}^H \frac{3r(z-Z')}{cR^4} i(z', \tau - R/c) dz' + \int_{-H}^H \frac{r(z-Z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} dz' \right\} \quad (4)$$

$$dE_z(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \int_{-H}^H \frac{2(z-Z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau dz' + \int_{-H}^H \frac{2(z-Z')^2 - r^2}{cR^4} i(z', \tau - R/c) dz' + \int_{-H}^H \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} dz' \right\} \quad (5)$$

$$dB_\phi(r, \phi, z, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \int_{-H}^H \frac{r}{R^3} i(z', \tau - R/c) dz' + \int_{-H}^H \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', \tau - R/c)}{\partial t} dz' \right\} \quad (6)$$

Para calcular el campo electromagnético es necesario conocer la distribución tiempo-espacio de la corriente de la descarga $i(z', t)$, que de acuerdo al modelo de línea de transmisión es [7]:

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) e^{-(z'/\lambda)} \quad Z' \leq vt$$

$$i(z', t) = 0 \quad Z' > vt,$$

donde v es la velocidad de retorno de la descarga y λ es el factor de atenuación de la corriente. Esta atenuación no representa pérdidas a lo largo del canal pero toma en cuenta el efecto de la carga en la descarga principal y en las descargas sucesivas a lo largo del canal.

ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO ENTRE EL CAMPO Y LOS CONDUCTORES DE LA LÍNEA

Una aproximación rigurosa para determinar la corriente y el voltaje inducidos en una línea de distribución debidos a una descarga atmosférica se obtiene de la teoría de antenas. Una forma de simplificación es la aproximación quasi-estática, que describe el acoplamiento entre el campo y los conductores como si se tuvieran parámetros concentrados. Lo anterior es válido solo si la dimensión de la línea es 10 veces menor a la longitud de onda más pequeña involucrada en el fenómeno. Esta dificultad se evita con la aproximación

de la teoría de líneas, la cual se basa en dos hipótesis [8-9]:

1. La dimensión transversal de la línea es menor a la longitud de onda significativo menor del campo incidente.
2. La respuesta transitoria de la línea es quasi-transversal electromagnética.

Para una línea multi-conductora sin pérdidas y homogénea posicionada a lo largo del eje x, iluminada por un campo externo, las ecuaciones de acoplamiento son:

$$\frac{\partial \mathbf{u}^s(x, t)}{\partial x} + \mathbf{L}' \frac{\partial \mathbf{i}(x, t)}{\partial t} = \mathbf{E}_x^i(x, h, t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{i}(x, t)}{\partial x} + \mathbf{C}' \frac{\partial \mathbf{u}^s(x, t)}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (8)$$

donde: $\mathbf{E}_x^i(x, h, t)$ es el vector de la componente horizontal del campo incidente a lo largo del eje x, a una altura h ; $\mathbf{i}(x, t)$ es el vector de corriente inducida; \mathbf{L}' y \mathbf{C}' son las matrices de inductancia y capacitancia, respectivamente, de la línea en por unidad de longitud; $\mathbf{u}^s(x, t)$ es el voltaje estático, el cual se define por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{u}^s(x, t) = - \int_0^h \mathbf{E}_z^s(x, z, t) dz \quad (9)$$

donde $\mathbf{E}_z^s(x, h, t)$ es la componente vertical de campo eléctrico estático. El voltaje estático se relaciona con el voltaje total con:

$$\mathbf{u}(x, t) = \mathbf{u}^i(x, t) + \mathbf{u}^s(x, t) \quad (10)$$

donde el voltaje incidente es:

$$\mathbf{u}^i(x, t) = - \int_0^h \mathbf{E}_z^i(x, z, t) dz \quad (11)$$

Aquí, $\mathbf{E}_z^i(x, h, t)$ es el campo eléctrico vertical incidente, que se puede considerar constante en el intervalo de altura $0 < z < h$.

CAMPO ELÉCTRICO TOTAL INCIDENTE

La intensidad de campo magnético horizontal incidente dada por [11], es:

$$\mathbf{H}_\phi^i(x, z, t) = \frac{1}{\mu_0} \int_0^z \mathbf{B}_\phi^i(r, \phi, z, t) dz \quad (12a)$$

La componente horizontal del campo eléctrico incidente a lo largo del eje x a la altura del conductor es:

$$\mathbf{E}_x^i(x, z, t) = [\mathbf{E}_r^i(r, z, t) - \mathbf{H}_\phi^i(r, \phi, z, t)] \text{sen } \delta \quad (12b)$$

El resultado del campo eléctrico total incidente se utiliza en cada paso de tiempo para resolver las ecuaciones de línea.

EJEMPLO DE PRUEBA

Se considera el diagrama de la figura 2a, que muestra una línea monofásica de 1 km de longitud a 10 m de altura con 2 cm de radio. Ocurre una descarga atmosférica a 50 m de uno de los extremos de la línea en dirección perpendicular a ésta y se supone que el conductor y el piso son homogéneos. Para calcular el sobrevoltaje inducido en la línea primero se resuelve el campo electromagnético en forma discreta, es decir,

en ciertos puntos a lo largo de la línea y en cada paso de tiempo para todo el tiempo de simulación. El cálculo de este campo se realiza mediante la integración numérica de las ecuaciones anteriormente mostradas. En este caso, el campo eléctrico incidente horizontal a lo largo del eje x de la línea, se calcula con un incremento de tiempo $\Delta t = 1 \times 10^{-8}$ s, un tiempo de observación de 12 μs y un incremento en espacio $\Delta x = 10$ m, como se muestra en la figura 2b.

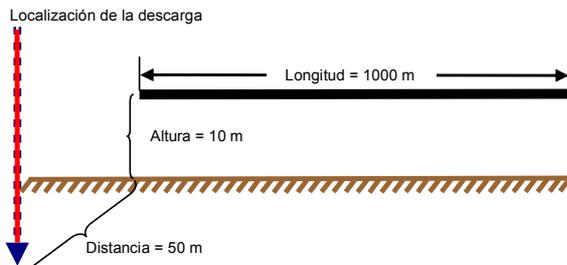


Fig. 2a. Diagrama de la simulación.

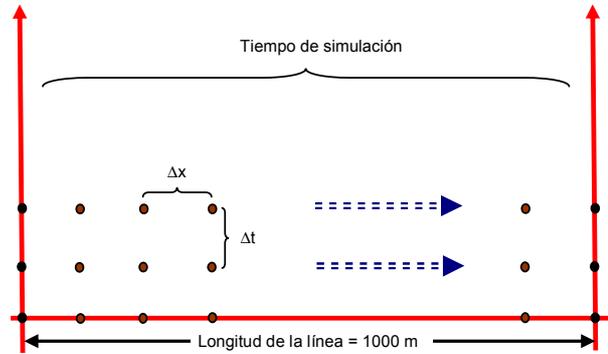


Fig. 2b. Esquema de discretización de la línea.

PRIMERA SIMPLIFICACIÓN: MODELO DE LA CORRIENTE

La función de Heidler es el mejor modelo para representar la corriente de la descarga [7, 11]. La expresión matemática de la función de Heidler 1.2/50 μs es:

$$i(z', t) = 2.1164 \left(\exp\left(-\frac{t}{20 \times 10^{-6}}\right) - \exp\left(-\frac{t}{5 \times 10^{-6}}\right) \right) \quad (13)$$

La primera simplificación consiste en linealizar la función de Heidler; como resultado se obtiene una doble rampa lineal (de aquí en adelante llamada triangular) cuya expresión es:

$$i(z', t) = \begin{cases} 10.823 \times 10^6 t & 0 < t < 9.24 (\mu\text{s}) \\ 1.1873 - 2.027 \times 10^4 t & 9.24 < t < 50 (\mu\text{s}) \end{cases} \quad (14)$$

La siguiente simplificación es definir un valor constante una vez que se alcanza la máxima amplitud. Esta forma de onda de corriente se llama trapezoidal, y su ecuación es:

$$i(z', t) = \begin{cases} 10.823 \times 10^6 t & 0 < t < 9.24 (\mu\text{s}) \\ 1 & 9.24 < t < 50 (\mu\text{s}) \end{cases} \quad (15)$$

La figura 3, muestra en forma gráfica estas tres ondas de corriente.

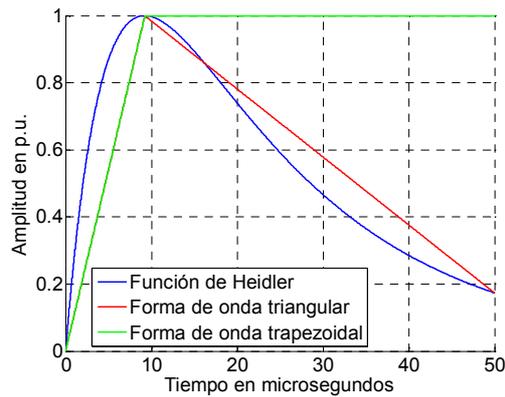


Fig. 3. Formas de onda de la corriente: función de Heidler, forma de onda triangular y forma de onda trapezoidal.

Utilizando los datos del diagrama de prueba, el tiempo promedio de 100 simulaciones se muestra en la tabla 1, para cada tipo de onda de corriente.

Tipo de onda de corriente	Tiempo promedio de ejecución (s)
Heidler	334.8600
Triangular	300.3280
Trapezoidal	186.4850

Si se simplifica el modelo de la corriente con una forma de onda triangular, se reduce el tiempo de cómputo un 10.31% y con una onda trapezoidal un 44.31%. Por lo tanto, cambiar la forma de onda es una buena estrategia para reducir el tiempo de cómputo si el error se mantiene dentro de ciertos límites; en este caso menor a 0.2% para cada simplificación.

SEGUNDA SIMPLIFICACIÓN: VENTANAS TEMPORALES

Para acelerar el proceso de cómputo se ha implementado el uso de ventanas temporales [11-12]. En la primera ventana el campo se calcula cada intervalo de tiempo, mientras que en la segunda se hace cada 10 muestras y el resto se interpola en forma lineal; esto se ilustra en la figura 4.

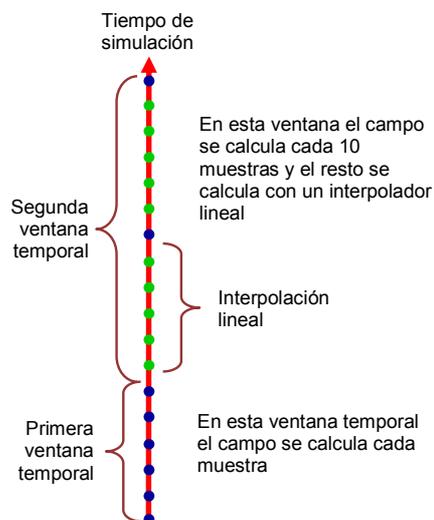


Fig. 4. Esquema de simulación con el uso de ventanas temporales.

La tabla 2, resume los tiempos de simulación utilizando estas dos ventanas temporales y la interpolación lineal. El intervalo de la primera ventana temporal es de 0 a 2 microsegundos, y el intervalo de la segunda ventana temporal es de 2 a 12 microsegundos, con una separación de 10 muestras.

Tabla 2. Tiempos de simulación con dos ventanas temporales.	
Tipo de onda de corriente	Tiempo promedio de ejecución (s)
Heidler	73.8600
Triangular	51.1250
Trapezoidal	38.7970

En comparación con el procedimiento original, si se utiliza la función de Heidler el tiempo de ejecución se reduce un 77.94%, con la triangular un 82.97% y con la trapezoidal un 79.19%. Así, con el uso de ventanas temporales el tiempo de ejecución es aproximadamente el 20% del original.

TERCERA SIMPLIFICACIÓN: INTERPOLACIÓN EN ESPACIO

Una forma adicional de acelerar el proceso de cálculo es implementando un interpolador parabólico espacial. Para optimizar el cálculo del campo electromagnético, se analiza cuál grupo de puntos da el menor error, tomando la referencia de 0.2% de error máximo.

¿Cómo trabaja el interpolador en espacio

Para implementar el interpolador en espacio se toman las formas de onda en tiempo, las cuales están separadas por un incremento en espacio. Cada forma de onda tiene su propio retraso de tiempo, como se muestra en la figura 5.

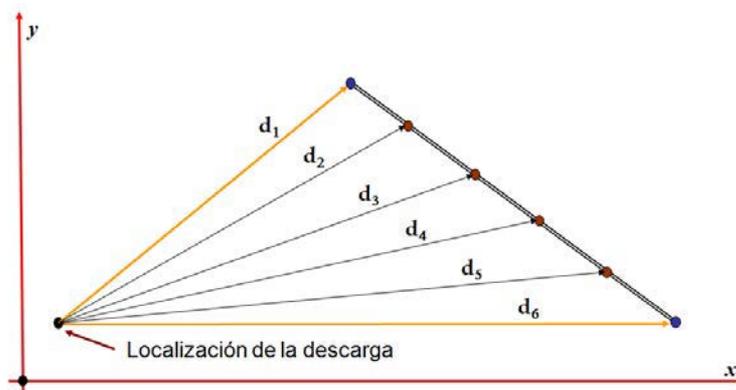


Fig 5. Localización de la descarga y distancias a los puntos de la línea expresadas en tiempos de retraso.

Por ejemplo, la figura 6, muestra las formas de onda 1 y 4, las cuales se usan para interpolar las formas de onda 2 y 3.

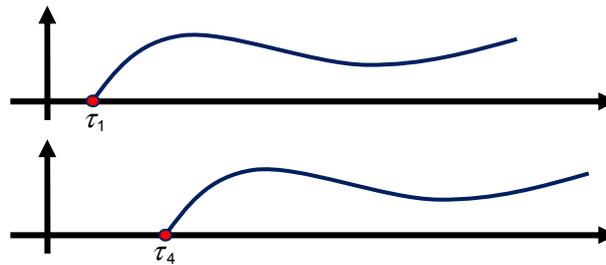


Fig. 6. Formas de onda 1 y 4 con sus respectivos tiempos de retraso.

El primer paso es mover las ondas 1 y 4 al origen, como se muestra en la figura 7, en esta posición están listas para realizar la interpolación.

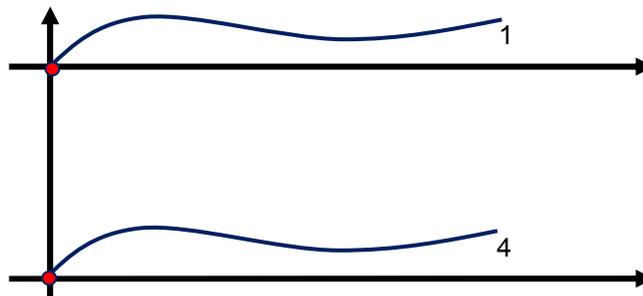


Fig. 7. Formas de onda 1 y 4 después de moverlas al origen.

La figura 8, muestra las formas de onda 2 y 3 como resultado del proceso de interpolación en espacio; y las formas 1 y 4 como la base para interpolar.

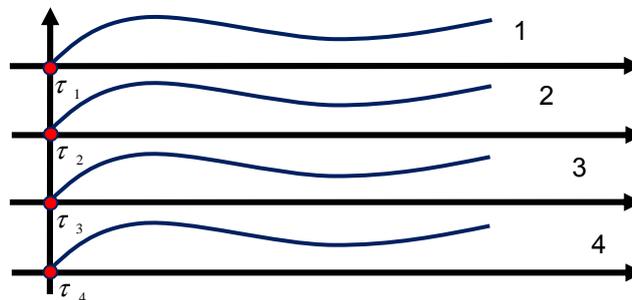


Fig. 8. Formas resultantes del proceso de interpolación.

Una vez que se tienen las formas de ondas, tanto interpoladas como calculadas, cada una de ellas se retrasa de acuerdo a la distancia entre el punto de la descarga atmosférica y el punto específico en la línea, expresando esta distancia en tiempo. La figura 9, muestra el resultado final de este proceso.

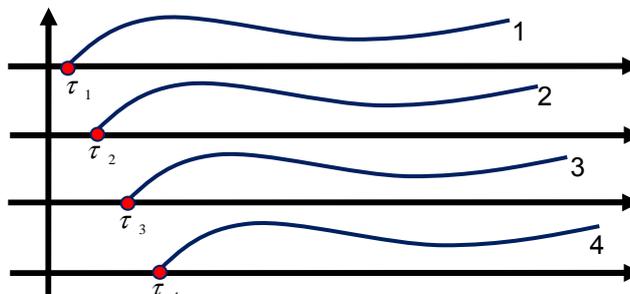


Fig. 9. Campo eléctrico incidente vertical después del proceso de interpolación parabólica en espacio.

Cómo se eligen los puntos adecuados para interpolar

El comportamiento del campo electromagnético en espacio es altamente no lineal; por lo tanto, los puntos óptimos para implementar la interpolación no tienen una distribución homogénea: para cada línea de distribución, el número y la posición de los puntos óptimos, con el máximo error permisible, se basa en tres principios heurísticos:

1. El error relativo no sobrepasa el 0.2%. Esta referencia depende del conocimiento profundo del problema.
2. El proceso desarrollado para elegir los puntos óptimos no es único, es decir, se puede desarrollar otro proceso y llegar a otro grupo de puntos óptimos.
3. La selección del método numérico para interpolar los datos es una selección que se basa en experimentos numéricos. Por lo tanto, si se diseñan diferentes pruebas se puede llegar a un interpolador diferente.

Una vez que se fija el error, se elige el interpolador y se determina la metodología, y el proceso se vuelve determinístico. Los datos del problema en el que se basa la siguiente metodología son los siguientes: la línea es de 1 km, 2 cm de radio, está a 10 m de altura; la descarga ocurre perpendicular a la línea a 50 m de uno de sus extremos; el error es del 0.2% y el interpolador es parabólico. La metodología es la siguiente:

1. La línea se discretiza con un delta de distancia $\Delta x=10$ m, y el tiempo con un paso $\Delta t=10 \times 10^{-9}$ s.
2. Se supone una descarga atmosférica perpendicular a la línea a 50 m de uno de sus extremos.
3. Se calcula el campo electromagnético en cada punto de la línea y cada paso de tiempo como referencia para el error.
4. Se implementa el uso de las dos ventanas temporales.
5. Se implementa el interpolador parabólico en espacio de la siguiente manera:
 - Sistemáticamente se omite el cálculo del segundo punto en adelante.
 - Cada vez que se omite un punto (punto 2 por ejemplo), los puntos laterales (1 y 3) se toman como base para el proceso de interpolación en espacio.
 - Si el punto interpolado tiene un error relativo menor a 0.2%, entonces este punto se omite en cálculo del campo.
 - Ahora se omite el punto 3 y se toman los puntos 1 y 4 para interpolar los puntos 2 y 3. Si ambos puntos tienen un error menor a 0.2%, estos puntos se omiten del cálculo.
 - Se omite el siguiente punto (4) y se toman el 1 y 5 como base. Se interpolan los puntos 2, 3 y 4, si alguno de ellos sobrepasa el 0.2% de error, entonces el punto 4 no se puede omitir del cálculo.
 - El proceso anterior se repite a lo largo de toda la línea. La figura 10, muestra los puntos ideales para implementar el interpolador parabólico en espacio.

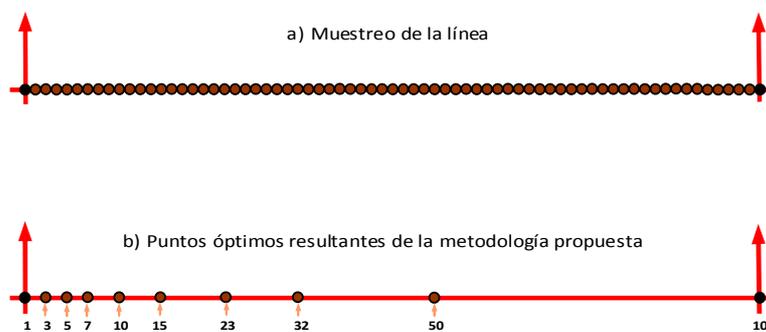


Fig. 10. Puntos óptimos para implementar la interpolación en espacio.

La tabla 3, resume los resultados de los tiempos de ejecución utilizando los puntos base mostrados en la figura 10.

Tabla 3. Tiempo promedio de simulación en 100 ejecuciones, implementando el uso de las dos ventanas temporales y la interpolación parabólica en espacio.		
Tipo de onda de corriente	Tiempo promedio de ejecución (s)	Fracción del tiempo original de ejecución
Heidler	9.4356	2.8178%
Triangular	6.2617	2.0850%
Trapezoidal	5.0127	2.6880%

ANÁLISIS DEL ERROR

Se calculan el campo eléctrico incidente horizontal y el campo eléctrico incidente vertical en cada punto de discretización (ver figura 10a). Para determinar el error que introduce el uso de la interpolación lineal en tiempo, se realiza el mismo cálculo utilizando las dos ventanas temporales. Las figuras 11 y 12, muestran los resultados utilizando ambos procedimientos con una forma de onda trapezoidal de 30 kA para la corriente de la descarga atmosférica.

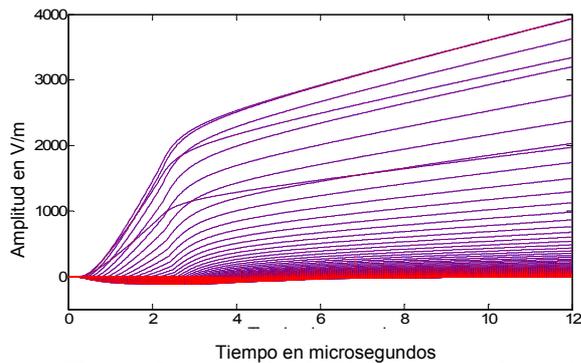


Fig. 11. Campo eléctrico incidente horizontal.

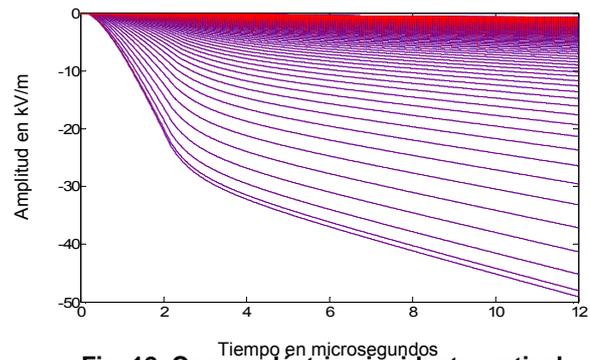


Fig. 12. Campo eléctrico incidente vertical.

El error porcentual calculado con:

$$\text{Error} = \frac{\mathbf{E}_h^i(\text{base}) - \mathbf{E}_h^i(tw)}{\max(\mathbf{E}_h^i(\text{base}))} \times 100\% \quad (11)$$

donde $\mathbf{E}_h^i(\text{base})$ es el campo eléctrico incidente horizontal calculado sin ninguna simplificación, y $\mathbf{E}_h^i(tw)$ es el campo eléctrico incidente horizontal utilizando las dos ventanas temporales.

El error resultante se muestra, respectivamente, en las figuras 13 y 14, para el campo eléctrico incidente horizontal y vertical.

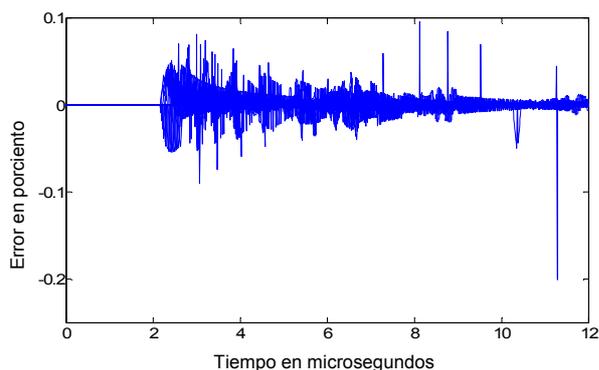


Fig. 13. Error en el cálculo del campo eléctrico incidente horizontal.

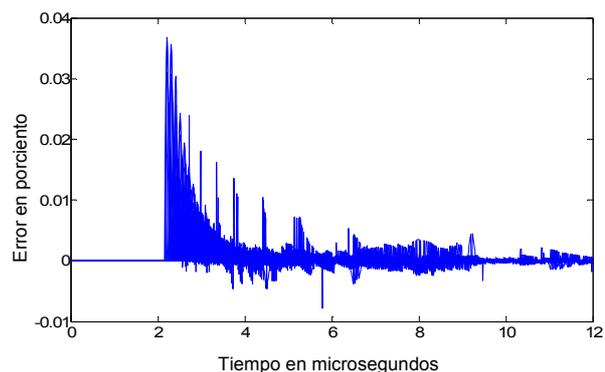


Fig. 14. Error en el cálculo del campo eléctrico incidente vertical.

El siguiente paso es la implementación de la interpolación parabólica en espacio, tomando los puntos de la figura 10b como base para la implementación. Los resultados que se obtienen se muestran en las figuras 15 y 16, para la componente de campo horizontal y vertical, respectivamente. Estas figuras muestran en negro las curvas que se usan para interpolar y en línea punteada las curvas interpoladas.

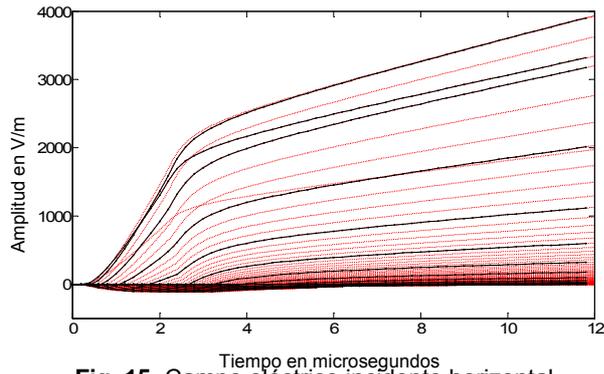


Fig. 15. Campo eléctrico incidente horizontal.

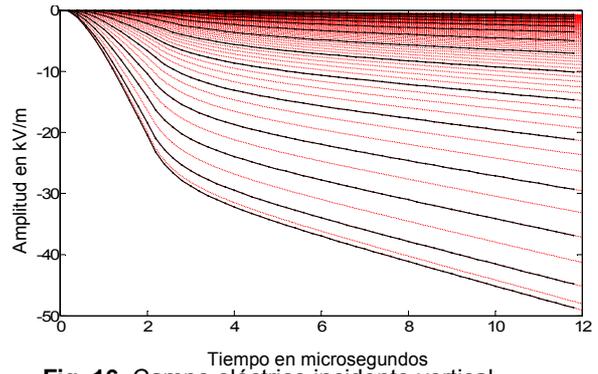


Fig. 16. Campo eléctrico incidente vertical.

Los resultados mostrados en las figuras 15 y 16, se comparan con los que se obtienen sin ninguna simplificación, y de esta forma se evalúa el error adicional que se introduce con el uso de la interpolación parabólica espacial. Las figuras 17 y 18, muestran estos errores en porcentaje.

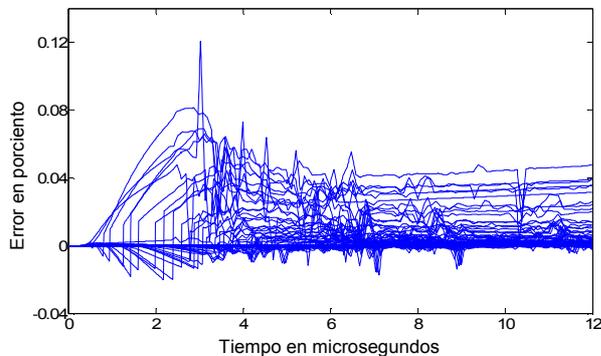


Fig. 17. Error en el cálculo del campo eléctrico incidente horizontal.

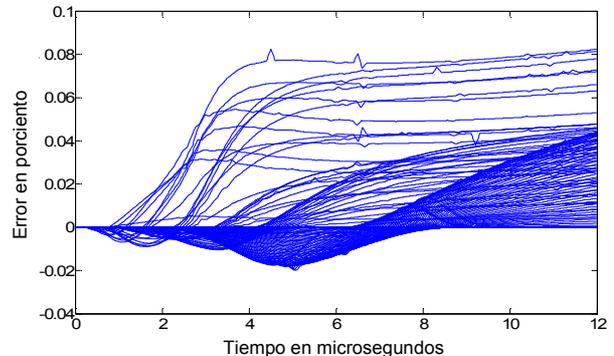


Fig. 18. Error en el cálculo del campo eléctrico incidente vertical.

Comparando la figura 17, con la figura 13, se puede apreciar que para el caso del campo eléctrico incidente horizontal el error porcentual se mantiene prácticamente igual. Para el caso del campo eléctrico incidente vertical, de acuerdo a la comparación entre las figuras 18 y 14, el error pasa de 0.04 a 0.08 aproximadamente. Lo anterior cumple con el compromiso de no incrementar el error más de lo que lo incrementa el uso de las ventanas temporales y reduce el tiempo de computo de 38.7970 segundos a 5.0127 segundos.

CONCLUSIONES

El uso de la interpolación lineal en tiempo reduce substancialmente el tiempo de ejecución en el cálculo del campo eléctrico incidente horizontal y vertical, el costo de esta reducción es la incorporación de un error porcentual máximo de 0.1%. Haciendo el compromiso entre reducción en el tiempo de ejecución e incorporación de error, el uso de la interpolación lineal en tiempo es la forma adecuada de reducir la demanda de recursos de computo.

Aplicando la misma filosofía de error, se encuentra que la implementación de la interpolación parabólica en espacio es de igual forma adecuada en función del error adicional incorporado, que es como máximo proporcional al de la interpolación lineal.

REFERENCIAS

- [1] International Electrotechnical Commission. IEC 60060-1:1989. Segunda edición. Suiza, 1989.
- [2] NUCCI, Carlo Alberto; MAZZETTI, Carlo; RACHIDI, Farad; IANOZ, Michel. "On lightning return stroke models for LEMP calculations, *Proceeding 19th International Conference on Lightning protection*, Graz, Austria, abril, 1988. ISBN: 3-7785-1754-6.
- [3] BERNARDI, Marina; GIORGI, C.; BISCAGLIA, V. "Medium voltage line faults correlation with lightning events recorded with the Italian LLP system", 'CESI-SIRE' *Proceeding of the 24th International Conference on Lightning Protection*, Birmingham, UK, September 1998.
- [4] NUCCI, Carlo Alberto; DIENDORFER, Gerhard; UMAN, Martin A.; RACHIDI, Farad; IANOZ, Michel; MAZZETTI, Carlo. "Lightning return-stroke models with channel-base specified current: a review and comparison". *Journal of Geophysical Research*. 1990, No. D12, Vol. 95, p. 20395-20408. ISSN (printed): 0148-0227, ISSN (electronic): 2156-2202.
- [5] NUCCI, Carlo Alberto; RACHIDI, Farad; IANOZ, Michel; MAZZETTI, Carlo. "Lightning-induced voltages on overhead power lines", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 35, febrero, 1993.
- [6] NUCCI, Carlo Alberto; BARDAZZI, V.; IORIO, Roberto.; MANSOLDO, Andrea.; PORRINO, Adalberto. "A code for the calculation of lightning-induced overvoltages and its interface with the Electromagnetic Transient program", *Proceeding of the 21nd International Conference on Lightning Protection*, Budapest, Hungría, p. 19-23, septiembre, 1994. ISBN: 963-420-441-4.
- [7] HEIDLER, Fridolin. "Traveling current source model for LEMP calculation", *Proceeding 6th international symposium on Electromagnetic Capability*, Zürich, Suiza, p. 157-162, marzo 1985.
- [8] BORGHETTI, Alberto; GUTIERREZ, José Alberto; NUCCI, Carlo Alberto; PAOLONE, Mario; PETRACHE, Emmanuelle; RACHIDI, Farad. "Software Tools for the Calculation of Lightning-Induced Voltages on Complex Distribution Systems", *Proceedings 26th International Conference on Lightning Protection*, Kracow, Polonia, septiembre 2-6, 2002. ISBN: 83-910689-5-1.
- [9] RACHIDI, Farad; NUCCI, Carlo Alberto; IANOZ, Michel. "Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 1, p. 294-302, enero, 1999. ISSN: 0885-897.
- [10] RUBINSTEIN, Marco; UMAN, Martin. A. "Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: application to lightning", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 31, No. 2, p.183-189, mayo, 1989. ISSN: 0018-937.
- [11] RUBINSTEIN, Marco. "An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 38, No. 3, p. 531-535, agosto, 1996. ISSN: 0018-9375.

AUTORES

Verónica Adriana Galván Sánchez

Maestra en Ciencias, Estudiante de Doctorado en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), Guadalajara, México.

e-mail: vgalvan@gdl.cinvestav.mx

José Alberto Gutiérrez Robles

Doctor en Ciencias, Profesor Investigador, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.

e-mail: alberto.gutierrez@ucei.udg.mx

Víctor Hugo Ortiz Muro

Doctor en Ciencias, Profesor Investigador, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.

e-mail: victor.ortiz@ucei.udg.mx

Oswaldo Aguilar Peña

Maestro en Ciencias, Operador del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), Guadalajara, México.

e-mail: oap255@hotmail.com