



Metodología para el cálculo de sistemas de puesta a tierra en líneas de tensión intermedias

Olga Susana Suárez

Recibido: Febrero del 2004

Aprobado: Abril del 2004

Resumen / Abstract

Se presenta una metodología para el cálculo de los sistemas de puesta a tierra para líneas aéreas eléctricas de tensiones intermedias. La metodología se desarrolla para las condiciones propias de operación de las líneas cubanas de estos niveles de tensión. Los principales resultados son la recomendación de revisar las normas existentes en el país a este efecto y la presentación de una metodología de cálculo que reúne los conocimientos más modernos sobre el tema en la actualidad.

Palabras clave: sistema de tierra, impedancia a impulso, metodología

This paper presents one methodology to calculate grounding resistance in medium voltage aerie electrical power lines. The methodology was development to inherent operating conditions of cubans lines of this level voltage. The main results were the recommendations of check out cubans standard about this theme, and the presentation of methodology that contain the most modern knowledge about grounding system in this moment.

Key words: grounding systems, surge impedance, methodology

INTRODUCCIÓN

En las publicaciones sobre los sistemas de puesta a tierra (SPT) algunos autores se refieren al tema con extrema sencillez, mientras que otros lo tratan como un problema muy complejo. Cualquiera de los dos criterios puede representar una verdad relativa. Hay aspectos sencillos y complejos en el tema de los SPT.

Puede resultar sencillo, para los ingenieros que se dedican al estudio y diseño de los SPT, entender la necesidad de un valor adecuado de la resistencia de puesta a tierra. Por ejemplo, puede entenderse, con relativa facilidad, de los conocimientos generales de ingeniería que un valor lo suficientemente bajo de una resistencia de puesta a tierra es necesario:

- En los sistemas con neutro puesto a tierra, para garantizar la operación confiable de las protecciones con circulación de corriente de falla a tierra. ¿Cuán baja? Tanto, como que no limite la corriente a tierra, para cualquier contingencia, a un valor que las protecciones no puedan operar.

- Para garantizar que con circulación a tierra de una corriente de defecto a frecuencia industrial a impulso, las tensiones de paso y de contacto que se le asocian al nivel de la superficie de la tierra no constituyan un peligro para la vida. ¿Cuán baja? Tanto, como que el producto de ella por la corriente que circula a tierra no exceda, por ejemplo, 50 V en tiempos mayores de 5 s para C A.

- Para garantizar que con la circulación a tierra de una corriente de impulso (rayo) no se produzca descarga inversa del aislamiento. ¿Cuán baja? Tanto, que el producto de la corriente a tierra por la impedancia de impulso no supere la tensión crítica de ruptura de polaridad negativa del aislamiento.

- Para garantizar un valor bajo de sobretensiones temporales en las fases (fase) no falladas con contingencia de falla a tierra, de manera que no se violen los requerimientos de energía (capacidad térmica) de los modernos pararrayos de óxidos metálicos. ¿Cuán baja? Tanto como, por ejemplo, que

en un sistema efectivamente puesto a tierra se mantengan las condiciones de efectividad.

Es además relativamente simple diseñar SPT a bajas frecuencias; mucha experiencia ha sido acumulada en el cálculo de diferentes configuraciones y aunque diversas fórmulas se encuentran en la literatura, las que son internacionalmente aceptadas brindan porcentajes pequeños de diferencia en los resultados.

Cuando se trata sin embargo de representar las características de no uniformidad y anisotropía del terreno y la respuesta a impulso de los SPT, muchos factores se involucran, en ocasiones difíciles de conocer o estimar en la práctica y el diseñador debe analizar y utilizar con inteligencia los resultados más avanzados del conocimiento en estos campos en su momento.

En Cuba, por diversas razones, los SPT de las líneas de tensiones intermedias o media tensión han sido desatendidos y actualmente constituyen una causa importante de malas operaciones, que terminan en daño de aislamiento de elementos y/o equipos o en salidas indebidas de estas redes, sobre todo, ante el fenómeno del rayo.

Si se tiene en cuenta que Cuba es un país con tormentas de alta intensidad, las mayores del Caribe, se comprende el nivel de riesgo a que se somete el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) en general y en particular las redes de tensiones intermedias.

De acuerdo con lo anterior, el trabajo presenta como objetivos un análisis general de las normativas vigentes y el desarrollo de una metodología de cálculo de los SPT que pueda ser utilizada de manera uniforme en las empresas eléctricas del país, en las redes de hasta 34,5 kV.

ANÁLISIS GENERAL DE NORMAS CUBANAS

Las normas cubanas,¹⁻³ vigentes para el cálculo de SPT en líneas de tensión intermedias, de manera general, presentan las insuficiencias explicadas a continuación.

Generalidades

1. Están exentas del conocimiento que en el momento actual se tiene sobre el tema.
2. No consideran el diferente comportamiento de los SPT a bajas y altas frecuencias (rayo).
3. Adolecen de nuevas configuraciones que se utilizan con buenos resultados en países de alta intensidad de tormentas eléctricas.

Baja frecuencia

1. Todas las reglamentaciones instituidas consideran el suelo homogéneo e isotrópico.

Lo anterior conduce a:

- No se tienen en cuenta las diferencias entre el comportamiento de los suelos con resistividad uniforme y aquellos que no la tienen.
- No existen criterios para delimitar el modelo de suelo a utilizar en el caso de suelos uniformes y aquellos de marcada no uniformidad.
- No está establecido, por tanto, un método de cálculo de los SPT para condiciones diferentes a las dadas en la referencia 1.

Alta frecuencia

1. Las reglamentaciones existentes adolecen del análisis del comportamiento de los SPT a altas frecuencias.
2. Los valores de la resistencia de puesta a tierra han sido normalizados sin un estudio pormenorizado, de las relativas importancias de la condición de protección o no de la línea y la influencia del nivel básico de aislamiento a impulsos tipo rayo (NBAI) en relación con los requerimientos a frecuencia industrial.

Configuraciones

En la NRIB 683,² se encuentra normalizado un SPT en el cual se bordea el poste en su inferior con el bajante (*bult-wrapping*). Es muy conocido que esto crea un fuerte efecto inductivo que aumenta la tensión, en condiciones de rayo, en el cable protector o los conductores de fase, aumentando el riesgo de descarga inversa del aislamiento. Otras configuraciones que fundamentan sus buenos resultados en la experiencia no aparecen en esta reglamentación.

Según lo expuesto, la revisión y actualización de todas las reglamentaciones y normativas vigentes para incorporar los conocimientos actuales sobre el tema es una tarea impostergable para brindar a los que se dedican a la operación y mantenimiento de las redes de estos niveles de tensión, materiales útiles para su trabajo.

De igual forma, existe la necesidad de instrumentar una metodología sencilla del cálculo con orientaciones básicas para el diseño y mantenimiento de los SPT en el país con los resultados obtenidos y validados hasta el momento con las investigaciones científicas.

Metodología

La metodología que se propone es aplicable a redes de tensión inferiores a las de transmisión. Se divide en configuraciones de electrodos para circuitos urbanos y rurales.

Tal división debe ser analizada en cada caso porque no obedece a otra causa que a las dificultades que trae practicar algunas configuraciones en circuitos urbanos, por ejemplo, aquellos que tienen postes empotrados en aceras sin parterre, entre otros. La necesidad de un buen SPT puede obligar a obras civiles alrededor del poste y esto debe ser estudiado con cuidado buscando en casos particulares la mejor solución técnico-económica.

La estructura de la metodología es la siguiente:

1. Medición de la resistividad del terreno.

2. Cálculo del SPT utilizando electrodos verticales.

a) Evaluación del modelo a utilizar teniendo en cuenta las características del terreno.

- **Modelo de una capa para terreno uniforme.**
- **Modelo de dos capas para terreno de marcada no uniformidad.**

b) Cálculo por el modelo de una capa.

b.1) Evaluación de configuraciones en redes urbanas:

- **SPT con uno y dos electrodos verticales (Norma cubana actual).**
- **SPT con un electrodo inclinado (Norma cubana actual).**
- **SPT con tres electrodos en forma de triángulo (Norma cubana actual).**
- **SPT con tres electrodos en línea recta (configuración propuesta).**
- **SPT en forma de anillo en combinación con un electrodo vertical (configuración propuesta).**
- **SPT en forma de anillo en combinación con dos electrodos verticales y una contrapeso (configuración propuesta).**

b.2) Evaluación de configuraciones en redes rurales:

- **SPT con uno y dos electrodos verticales (Norma cubana actual).**
- **SPT con un electrodo inclinado (Norma cubana actual).**
- **SPT con tres electrodos verticales en forma de triángulo (Norma cubana actual).**
- **SPT con tres y cuatro electrodos en línea recta (configuraciones propuestas).**
- **SPT en forma de anillo en combinación con un electrodo (configuración propuesta).**
- **SPT en forma de anillo en combinación con dos electrodos y un contrapeso (configuración propuesta).**
- **SPT en forma de anillo en combinación con tres electrodos y dos contrapesos (configuración propuesta).**
- **SPT con cuatro electrodos en forma de círculo (configuración propuesta).**

- **SPT con n electrodos situados en los vértices de un polígono inscrito en una circunferencia (configuración propuesta).**

b.3) Comparación con el valor normalizado.

b.4) Comprobación de comportamiento ante descargas atmosféricas.

b.5) Selección de alternativa más adecuada.

- **Análisis técnico-económico.**
- **Planteamiento de los resultados.**

c) Cálculo de SPT por modelo de dos capas.

c.1) Evaluación de configuraciones en redes urbanas:

- **SPT con hasta tres electrodos verticales en línea recta (configuraciones propuestas).**

c.2) Evaluación de configuraciones en redes rurales:

- **SPT con hasta cuatro electrodos verticales en línea recta (configuración propuesta).**
- **SPT con electrodos en configuraciones cuya área pueda ser obtenida por la expresión (7)(configuraciones propuestas).**

En el caso de configuraciones de electrodos horizontales se aplican por igual, en suelos de dos capas, las que se presentan en el punto 3, siempre que se entierren en la primera capa del terreno.

c.3) Comparación con el valor normalizado

c.4) Comprobación de comportamiento ante descargas atmosféricas

c.5) Selección de alternativa más adecuada.

- **Análisis técnico-económico.**
- **Planteamiento de los resultados.**

3. Cálculo de SPT utilizando electrodos horizontales.

a.1) Evaluación de configuraciones en redes urbanas:

- **SPT con electrodo tipo varilla en forma horizontal (Norma cubana actual).**
- **SPT con conductor tipo radial (Norma cubana actual).**
- **SPT con conductor horizontal con dos brazos (Norma cubana actual).**
- **SPT con conductor tipo lazo (Norma cubana actual).**
- **SPT con placa redonda tipo lazo (configuración propuesta).**
- **SPT con placa horizontal (configuración propuesta).**

a.2) Evaluación de configuraciones en redes rurales.

- **SPT con electrodo tipo varilla en forma horizontal (Norma cubana actual).**

- SPT con conductor tipo radial (Norma cubana actual).
- SPT con conductor horizontal con dos, tres o cuatro brazos (Norma cubana actual).
- SPT con placa redonda tipo lazo (configuración propuesta).
- SPT con placa horizontal (configuración propuesta).
- SPT con conductor horizontal en forma de estrella de tres, cuatro, seis y ocho ramas (configuraciones propuestas).

a.3) Comparación con el valor normalizado.

a.4) Comprobación de comportamiento ante descargas atmosféricas.

a.5) Selección de alternativa más adecuada.

- Análisis técnico-económico.
- Planteamiento de los resultados.

La forma de trabajo de la metodología, los valores límites de utilización de las distintas configuraciones respecto a la resistividad del terreno, ejemplos prácticos de su utilización, el tratamiento artificial del terreno, así como otros detalles específicos se exponen en otro artículo.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICO-MATEMÁTICA DE LA METODOLOGÍA

Los principales conceptos teórico-matemáticos en que se basa la metodología, relacionados según sus pasos, son descritos en este acápite.

Medición de la resistividad del terreno

La medición de la resistividad del terreno constituye el primer paso a ejecutar cuando se diseña o mantiene un SPT. Su valor determina el modelo de suelo a utilizar y, por tanto, las fórmulas de cálculo de la resistencia de puesta a tierra en las distintas configuraciones.

Se propone que pueden ser utilizados los siguientes métodos para su medición:

- El método de Wenner.
- El método de los tres electrodos.

La teoría, el montaje de instrumentos y las fórmulas de cálculo están reportados en la referencia 4, y son bien conocidos. El primer método es el mundialmente utilizado por los electricistas, ambos, sin embargo, tienen un equilibrio razonable de ventajas y desventajas.

Electrodos verticales. Modelo de suelo a utilizar

Las mediciones de la resistividad del terreno permiten obtener un perfil del suelo, y con ello conocer si un terreno es homogéneo o no lo es. La elección de un

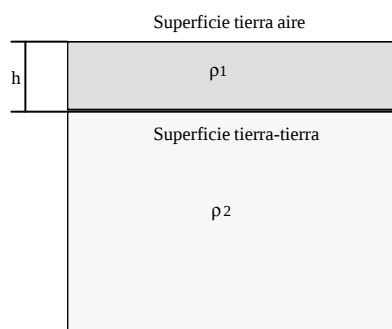
modelo de suelo que represente lo más fielmente posible las características del terreno permite diseñar un SPT cuyo valor calculado se ajusta a la realidad.

Los modelos de suelos que más se aceptan actualmente para el cálculo de SPT son:

- Modelo de una capa (suelo uniforme).
- Modelo exponencial (suelo no uniforme).
- Modelo de dos capas (suelo no uniforme).
- Modelo multicapa (suelo no uniforme).

Para los propósitos de diseño de SPT una buena aproximación se obtiene con el modelo de dos capas y este se adopta en la metodología. La utilización de un modelo de dos capas se justifica para terrenos de una marcada no uniformidad cuando se utilizan electrodos verticales. En este caso, las resistividades de las capas que atraviesan los electrodos no pueden ser razonablemente sustituidas por un promedio que permita utilizar un modelo de una capa.

Una representación esquemática del modelo de dos capas se muestra en la figura 1.



Modelo de dos capas.

1

La importancia de la utilización de un modelo de dos capas en suelos con marcada no uniformidad puede ser fácilmente explicada por los valores del coeficiente de reflexión $K = \rho_2 - \rho_1 / \rho_2 + \rho_1$.

- Si K es positivo ($\rho_1 \gg \rho_2$), en las condiciones reales del terreno y en vez de utilizar un modelo de suelo no uniforme se utiliza uno de suelo uniforme, la resistencia de puesta a tierra que se calcula es mayor que la que en verdad existe.

- Si K es negativa ($\rho_2 > \rho_1$), el valor calculado en esas condiciones es menor que el valor real de la resistencia de puesta a tierra.

Electrodos verticales y horizontales. Modelo de una capa

Configuración Norma cubana

Las fórmulas de cálculo propuestas en esta metodología se corresponden con las planteadas en la norma existente en el país para las configuraciones que se mantienen.

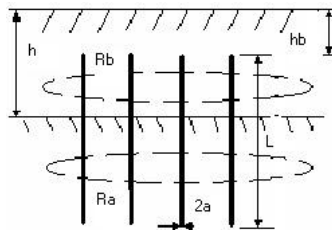
Configuraciones propuestas

Para las configuraciones propuestas se puede consultar la tabla 1. Se adopta el formulario normalizado en la IEEE STd 142-91 en el caso que corresponde y las expresiones debidas a E.D. Sunde para las configuraciones: 3 y 4 electrodos verticales en línea recta, 4 electrodos en círculo y n electrodos en los vértices de un polígono inscrito en una circunferencia. Para los SPT en forma de anillo con electrodos y contrapesos se adoptan las fórmulas aproximadas reportadas en la referencia 5.

Electrodos verticales. Modelo de dos capas

Una representación de un grupo de electrodos enterrados en suelo de dos capas se muestra en la figura 2.

Las formulaciones para obtener la resistencia de puesta a tierra que utiliza la metodología se corresponden con el método desarrollado en la referencia 6.



Electrodos en suelo de dos capas.

2

La resistencia total de puesta a tierra R_t se calcula por la expresión (1).

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}} \quad \dots(1)$$

$$R_a = \frac{r_2}{(l + hb - h)} g_0 \frac{F_0}{N} \quad \dots(2)$$

$$R_b = \frac{r_2}{(h + hb)} g_0 \frac{F_0}{N} + \frac{r_1}{h_a} f_0 \quad \dots(3)$$

TABLA 1

Fórmulas de cálculo de los SPT

Electrodo	Resistencia (Ω)
Estrella de tres ramas longitud de la rama L, profundidad s/2.	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1,071 - 0,209 \frac{s}{L} + 0,238 \frac{s^2}{L^2} - 0,054 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
Estrella de cuatro ramas longitud de la rama L, profundidad s/2.	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2,912 - 1,0701 \frac{s}{L} + 0,645 \frac{s^2}{L^2} - 0,145 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
Estrella de seis ramas longitud de la rama L, profundidad s/2.	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2,912 - 1,0701 \frac{s}{L} + 0,645 \frac{s^2}{L^2} - 0,145 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
Estrella de ocho ramas longitud de la rama L, profundidad s/2.	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10,98 - 5,51 \frac{s}{L} + 3,26 \frac{s^2}{L^2} - 1,17 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
Anillo, diámetro D, diámetro del cable d, profundidad s/2.	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
Placa horizontal, longitud 2L, sección a.b, profundidad s/2, $b < a/8$.	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
Placa redonda horizontal, radio a, profundidad s/2.	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \dots \right)$
n electrodos en línea recta, longitud L, diámetro 2a, separac. D	$R = \frac{1}{n} \left(R_1 + \frac{\rho}{\pi D} \sum_{i=2}^n \frac{1}{i} \right)$
n electrodos longitud L, diámetro 2a, polígono en circunferencia de diámetro D	$R = \frac{1}{n} \left(R_1 + \frac{\rho}{2\pi D} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\sin \frac{\pi i}{n}} \right)$
4 electrodos en círculo de diámetro D	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - \frac{1}{D} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\sin \frac{\pi i}{n}} \right)$
Anillo y electrodo vertical	$R = 0,07r$
Anillo, dos electrodos y un contrapeso (15 m)	$R = 0,02r$
Anillo, dos electrodos y dos contrapesos (15 m)	$R = 0,01r$

$$g_0 = \frac{1}{2p} \left[\ln \left(\frac{2l}{r} \right) - 1 + \frac{\ln 2}{1 + \frac{(4 \ln 2) h_b}{l}} \right] \quad \dots(4)$$

donde:

Ra: Aporte resistivo de la primera capa (Ω).

Rb: Aporte resistivo de la segunda capa (Ω).

L: Longitud del electrodo (m).

r: Radio del electrodo (m).

h: Espesor de la primera capa (m).

hb: Profundidad de enterramiento (m).

ρ_1, ρ_2 : Resistividad de las capas (Ω -m)

ϕ : Cuantifica el efecto de múltiples reflexiones de las capas en los n electrodos.

Fo: Relaciona la resistencia de un electrodo con la resistencia equivalente de un grupo de ellos para un suelo homogéneo:

Las expresiones de cálculo de **Fo** y **ϕ** son:

$$Fo = 1 + \left(N - \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \frac{R_s}{R_l} \quad \dots(5)$$

$$\frac{R_s}{R_l} = \frac{\sqrt{\frac{l}{re} \left[\left(\frac{1}{2} \right)^3 + \left(\frac{l}{l + \frac{r_e}{2}} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}}}}{2p g_0} \quad \dots(6)$$

$$re = \sqrt{\frac{A_c}{p}} \quad \dots(7)$$

donde:

Re: Radio efectivo (m).

Ac: Área que conforma la configuración de electrodos (m^2).

$$j_o = \frac{\frac{1}{2p} \left(\ln \frac{1}{1-k} \right)}{\sqrt{\left(\frac{N}{F_0} - 1 \right)^2 + 1}} \quad \dots(8)$$

Comprobación con el valor normalizado

Se recomienda utilizar los resultados reportados en la referencia 7, obtenidos mediante un estudio exhaustivo del nivel cerámico, el NBAI, las regiones de viento

(para líneas protegidas), el tipo de protección de línea y la importancia de la misma. Se plantea además el criterio de reducir a 10 W el valor para transformadores y dispositivos de interrupción manual.

La metodología chequea el cumplimiento del valor normalizado de resistencia de puesta a tierra para aceptar una variante de configuración de electrodos, y procede entonces a la verificación por impulso. Entre ambos pasos existe una secuencia interactiva.

Comprobación a impulso

La creciente polémica de cómo abordar el problema del comportamiento a altas frecuencias de los sistemas de puesta a tierra ha dado origen a diferentes tendencias para calcular los SPT ante fenómenos de este tipo. Las más difundidas en la literatura especializada son las que utilizan análisis empíricos basados en la experimentación, analíticos basados en la teoría de circuitos, el estudio de los SPT mediante modelos de las líneas de transmisión y el modelo electromagnético.

Todos tienen, ventajas y desventajas incluyendo el último que abarca la mayoría de los aspectos que se involucran en el sistema pero mantiene, hasta el momento, un grado elevado de complejidad para los propósitos prácticos de ingeniería.

A juicio de la autora, el método desarrollado por Hileman⁸ y adoptado por la CIGRE 33.01 Brouchure 71 es adecuado a luz de los conocimientos actuales teniendo en cuenta su carácter simplificado para electrodos verticales.

Para calcular el SPT con electrodos horizontales, aunque el modelo de la línea de transmisión no puede reflejar los procesos de ionización y deionización en el suelo, resulta el más práctico hasta la actualidad por el grado de conocimiento, aún relativo, de la ruptura en la estructura suelo -aire que rodea los SPT.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, los métodos mencionados son seleccionados en la metodología para la comprobación del comportamiento a impulso. Las formulaciones matemáticas de ellos son las siguientes:

Método simplificado de Hileman. Electrodos verticales

En las consideraciones de un electrodo semiesférico:

$$R_t = \frac{R}{\sqrt{1 + I_o / I_g}} \quad \dots(9)$$

$$I_g = \frac{E_g \cdot r}{2p \cdot R_t^2} \quad \dots(10)$$

donde :

R_t: Resistencia total de *n* electrodos a bajas frecuencias (W).

E_g: Gradiente de ionización del suelo (400 kV/m).

I_o: Magnitud de corriente de descarga del rayo (kA).

Método de las líneas de transmisión

Para modelos a parámetros distribuidos de una línea de distribución sin pérdidas:

$$Z_i = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \dots(11)$$

Las expresiones de *R*, *G*, *L* y *C* son las clásicas para un modelo de este tipo. El valor en el tiempo y para diferentes frecuencias se analiza mediante histogramas y se obtiene el valor de comparación que debe garantizar el comportamiento adecuado de la coordinación de aislamiento del sistema.

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO

El método que más se utiliza internacionalmente para realizar estudios que de alguna manera tengan que ver con el tema más general de coordinación de aislamiento, entre los que se incluye el correcto diseño y mantenimiento de un SPT, es el método de la relación beneficio/costo y este se adopta en la metodología.

La metodología en su secuencia ofrece como resultado final al diseñador aquella variante factible desde el punto de vista técnico que tenga una relación beneficio-costo mejor y siempre mayor que 1.

CONCLUSIONES

1. Las reglamentaciones en cuanto al cálculo de SPT instituidas en Cuba adolecen de los conocimientos más modernos sobre el tema frutos de la investigación científica, la experimentación y la propia práctica y deben ser revisadas y cambiadas.

2. El cálculo de los SPT debe ser abordado con especial cuidado de comprobar su comportamiento a altas frecuencias y estimar su validez técnico-económica.

3. La metodología propuesta constituye una herramienta útil para los propósitos de ingeniería y debe ser digitalizada y aplicada en la solución de los

problemas que en este sentido presentan las empresas eléctricas cubanas en redes de tensiones intermedias.

REFERENCIAS

1. *Norma Ramal: NRIB 019/1979. Líneas aéreas y subestaciones eléctricas, Sistema de aterramiento. Explotación.*
2. *Norma Ramal: NRIB 638/1984. Líneas de transmisión de energía eléctrica. Construcción de aterramientos para líneas aéreas que operan hasta 34.5 kV. Laminario.*
3. *Proyecto y Construcción de líneas aéreas de 33 kV y Menores. Lineamientos*, marzo, 1990.
4. Tagg, E.: *Earth Resistance*, London, 1966.
5. Casas, Favio: *Tierras soporte de la seguridad eléctrica*, mayo, 1988.
6. Chow, Y. L. et al: *Resistance Formulas of Grounding System in Two Layers Earth*, New York, 1966.
7. Suárez, Olga S.: "Método de estimación del comportamiento ante rayos de líneas aéreas eléctricas", Tesis de Doctorado, Cujae, Ciudad de La Habana, 2001.
8. Hileman, H.: *Coordinación de aislamiento*, New York, 1986.

AUTORA

Olga Susana Suárez Hernández
Ingeniera Electricista, Doctora en Ciencias Técnicas,
Investigadora Agregada, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba
e-mail:susana@electronica.cujae.edu.cu

**...Cuba es un país
con tormentas de alta
intensidad, las
mayores del Caribe,
de ahí se deduce el
nivel de riesgo a que
se somete el SEN...**
