



Impacto ecológico de las líneas de transporte de energía eléctrica aéreas. Parte I: Campo Eléctrico.

Héctor Silvio Llamo Laborí

RESUMEN / ABSTRACT

Se presentan las características y algunos resultados de un algoritmo (INDUC.EXE) que permite calcular el campo electrostático y el voltaje inducido, de esta misma naturaleza en los conductores desenergizados y aislados de la tierra. Se muestra, además, la necesidad de conocer estos resultados desde el punto de vista de la seguridad del personal de operación de las redes de transmisión y de la ecología del medio.

Palabras claves: Líneas de transmisión eléctricas, transporte de energía, impacto ecológico de líneas de transmisión eléctricas.

In this work are presented the characteristic and some results of INDUC.EXE algorithm that permit to calculate the electrostatic field and the induced voltage in conductors that are isolated and without load. It is shown too the necessity of knowing this results from the point of view of the personal security and the ecology.

Key words: Electric transmission lines, energy transmission, ecological impact of the electric transmission.

Generalidades.

Aunque la exposición a los campos eléctricos y magnéticos se produce en toda la sociedad, existe una inquietud social que se agudiza especialmente en las líneas aéreas de alta tensión porque en ellas se combinan la utilización de tensiones altas, generadoras del campo eléctrico (CE) y la circulación de altas corrientes, generadoras del campo magnético (CM). Sin embargo, muchos autores afirman que en cualquier país desarrollado la vida de las personas se desenvuelve en el seno de campos electromagnéticos (CEM) mayores que los que se miden debajo de las líneas de transmisión en la zona más desfavorable y que esto ocurre principalmente con los campos generados por las secadoras de pelo, las planchas eléctricas, los hornos "micro-wave", las cocinas eléctricas, los medios de transporte accionados por fuerzas eléctricas, etcétera.

Si nuestro hogar está debajo de una línea de alta tensión o próximo a ella se expone tanto al CM como al CE. Como las paredes exteriores apantallan al CE, pero no anulan el CM, en el interior de la vivienda, sus moradores se verán afectados sólo por este último. Además, un estudio realizado por Dennis Henshaw, de la Universidad de Bristol, publicado por el *International Journal of Radiation Biologic* afirma que el CM libera el gas radón existente en las paredes de los edificios y que este elemento es asimilado por el organismo con grave riesgo para las personas con cánceres no desencadenados.

Como nadie ha demostrado que sean inocuos, se puede al menos sospechar que los campos electromagnéticos representan algún tipo de riesgo para la salud humana. A continuación se expondrán algunos pocos ejemplos de estudios realizados sobre este tema.^{1, 2, 3}

- En 1979 Nancy Wertheimer y Ed Leeper de la Universidad de Colorado descubrieron una

relación entre los casos encontrados de leucemia infantil con la proximidad a líneas de alta tensión y/o grandes transformadores. Este fue el primer estudio epidemiológico sobre este tema.

- En 1987 Savits, de la Universidad de Carolina del Norte presentó los resultados de un estudio de siete años sobre los casos de cáncer en niños de 15 años teniendo en cuenta los campos electromagnéticos (CEM) producidos por los aparatos electrodomésticos con los siguientes resultados: Dichos menores tienen de 1,3 a 1,6 más riesgos de contraer cáncer que los no expuestos a CEM. Y en el caso de la leucemia, los riesgos se duplican. Sin embargo, no encontró riesgo alguno en los casos vinculados con el CE.

- En 1992 y 1993 estudios realizados en Suecia y Dinamarca con técnicas mejoradas para la evaluación de las exposiciones confirmaron la evidencia de un posible riesgo de cáncer debido a la exposición en las viviendas. El estudio realizado por los suecos encontró que para la leucemia infantil el riesgo era el doble por encima de los niveles históricos calculados de 0,2 mT (2 mG). Se ha calculado que en Suecia, en cada año, hay dos casos de leucemia infantil por estar de bajo o en un radio de hasta 300 m de las líneas de transmisión.

- En 1992 el Departamento de Energía de la ciudad de Orlando en los EEUU comprobó que el efecto sinérgico del ruido, los contaminantes químicos y la radiación electromagnética traían serias consecuencias en las primeras etapas de la gestación.

- Científicos de la Comisión Nacional de Protección Radiológica de Inglaterra publicaron un estudio que demuestra que la exposición a CCEEMM puede provocar una severa pérdida de la memoria.

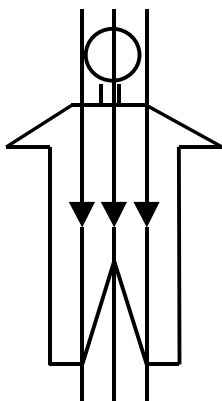


Figura 1- Líneas de fuerza del campo eléctrico en una persona.

Los resultados mostrados anteriormente y muchos otros más no expuestos han hecho que varios países hayan normado los valores máximos de CEM permisibles en una Zona de Paso (ZP) de las líneas de transmisión y que varias organizaciones hayan definido valores de CEM considerados "seguros". Las tablas 1 y 2 muestran los valores límites y las recomendaciones para la exposición a CE y CM publicados por organismos internacionales autorizados como son:

ICNIRP: Comisión Internacional sobre Radiaciones No Ionizantes. Depende de IRPA.

IRPA: Agencia Internacional de Protección Radiológica.

CENELEC: Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.

NRPB: Junta Nacional de Protección Radiológica de Gran Bretaña.

ACGIH: Conferencia Americana de Higienistas Industriales.

C.E.: Comunidad Europea.

Organismo	Campo Eléctrico (kV/m)
ICNIRP: Todo el día.	8,3
CENELEC: Todo el día. Pocas horas.	10,0 30,0
NRPB	12,0
ACGIH (USA)	25,0
C.E. (Propuesta)	6,0

Tabla 1- Límites y recomendaciones para exposición laboral al campo eléctrico a 60 Hz.

ORGANISMO	Campo Eléctrico (kV/m)
ICNIRP Todo el día.	4,2
CENELEC.: Norma propuesta	10
NRPB	12
Alemania (Pocas horas)	$5^{(1)} - 10^{(2)}$
U.S.A.: Florida Nueva York	$8 - 10^{(3)}$ 12
Australia	$5 - 10^{(3)}$
Italia ⁽⁵⁾	10
C.E. (recomendación)	5

⁽¹⁾Dentro de la casa. ⁽²⁾Fuera de la casa. ⁽³⁾Líneas de 230 y 500 kV respectivamente.

⁽⁴⁾Líneas de 500 kV (DC), 500 kV (simple circuito) y de 230 kV respectivamente.

⁽⁵⁾Italia establece además distancias mínimas que varían entre 10 y 28 m.

Tabla 2- Límites y recomendaciones de exposición para el público en general.

La tabla 3 muestra algunas de las normas

establecidas por varios estados de los EEUU de América para una zona de paso de 15 m a ambos lados del eje de la estructura de las líneas para tensiones comprendidas entre 66 y 230 kV. Los valores de los CM son para carga máxima.

Se observa que aún dentro del mismo país, los valores recomendados son diferentes.

Estado	Campo Eléctrico en kV/m	
	Zona de Paso (ZP)	Borde de la ZP
Florida	8,0	2,0
Montana	7,0	1,0
N. York	11,8	1,6

Tabla 3- Normas de algunos estados norteamericanos para los CEM de las líneas de transmisión.

Cálculo del valor del campo eléctrico (CE).

El CE se mide en kilovolt por metro o en kilovolt por centímetro y dichos kilovolt pueden estar en valores efectivos o en valores pico.

La figura 2 muestra la sección transversal al conductor "i" de una línea de transmisión. En la figura:

- El efecto de la tierra se tiene en cuenta mediante el método del conductor imagen debido a Maxwell.
- Se muestra el punto "p", con coordenadas X_p y Y_p , donde se calculará el campo eléctrico.
- Por el punto "p" pasan dos superficies gaussianas que son cilindros de radios R^+ y R^- para el conductor y su imagen respectivamente con áreas S^+ y S^- .
- Se considera que el conductor tiene una carga $+q_i$ y la imagen $-q_i$ Coulomb. También I_i y $-I_i$ Coulomb /m
- Cada una de las cargas anteriores tiene asociado un vector intensidad de campo eléctrico E^+ y E^- respectivamente. Uno sale de, y el otro entra en la superficie gaussiana, ambos perpendicularmente,

La expresión para calcular el gradiente en la superficie de un conductor cargado es⁵:

$$E_i = \frac{20\sqrt{2} I_i}{D_i} \quad \text{kV pico/cm} \quad (1)$$

Donde:

I_i : Densidad lineal de carga eléctrica del conductor en Coulomb/metro.

D_i : Diámetro del conductor en milímetros.

La densidad lineal de carga eléctrica se calcula mediante la expresión:

$$(Q)=(C)(U) \text{ Coulomb/metro} \quad (2)$$

Donde:

$(C)=(P)^{-1}$: Es la matriz de las capacitancias de la línea calculadas a partir de la matriz de los coeficientes de potencial (P).

Conocer el campo eléctrico en un punto situado en la superficie del terreno o por encima de ésta, próximo a una línea o grupo de líneas es necesario desde varios puntos de vista. Entre los más importantes están el cálculo de la radio interferencia (RI)⁴ y determinar el impacto ecológico de la línea en su zona de influencia.

La expresión matemática del teorema de Gauss es⁵

$$e_0 \oint_S E dS = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3)$$

Donde:

$e_0=8,854 \cdot 10^{-12}$ Farad/metro

E_i : Vector intensidad del campo eléctrico resultante en cada superficie gaussiana.

dS : Vector elemental de superficie orientado de forma perpendicular a la superficie gaussiana.

Q_i : Carga en Coulomb en la superficie del conductor "i" obtenida de².

En la figura 2 las superficies gaussianas son cilindros con áreas

$$S^+=2PR+Lm^2 \quad (4)$$

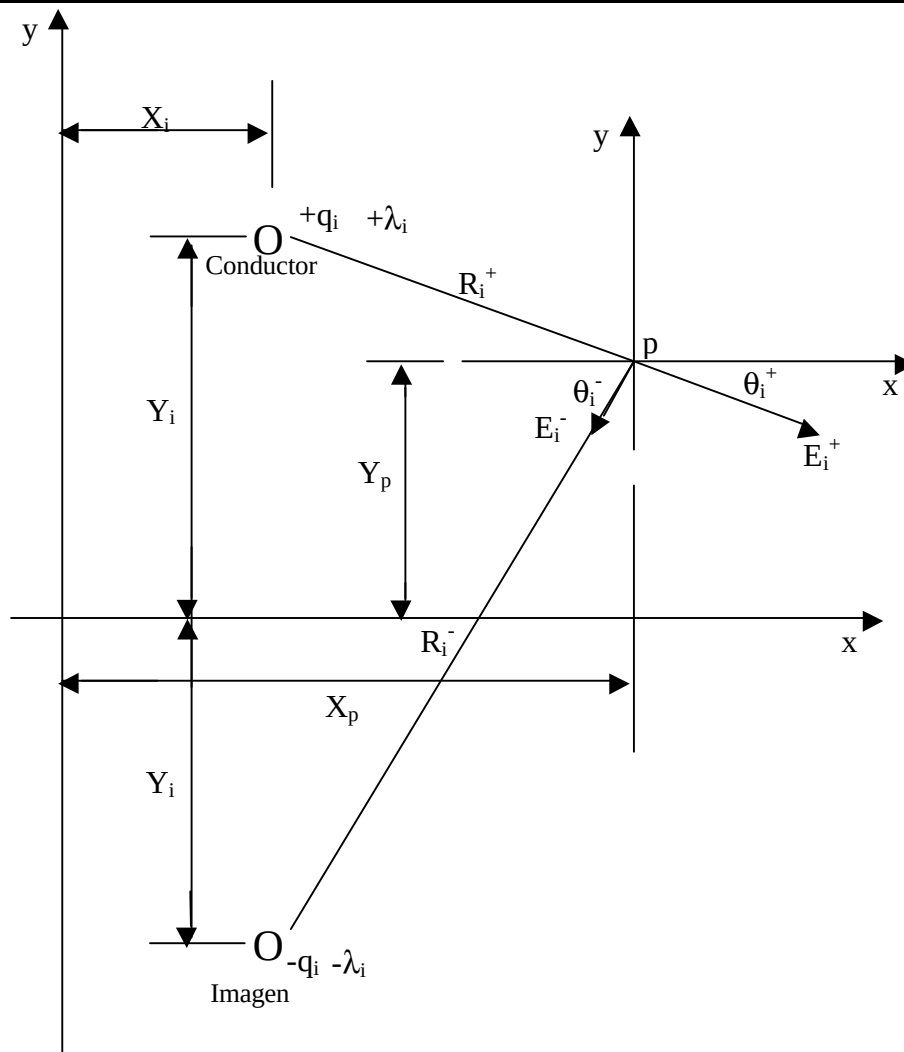


Figura 2- Sección transversal al conductor y su imagen de una línea de transmisión.

$$S = 2\pi R \cdot L \cdot m^2 \quad (5)$$

Donde:

"L" es la longitud de la línea.

$Q_i = l_i L$: Coulomb es la carga en la superficie del conductor "i".

Aplicando el teorema de Gauss⁶ a las cargas +Q y -Q del conductor y su imagen respectivamente en la figura 2 se obtienen los vectores de la intensidad del campo eléctrico:

$$E_i^+ = \frac{l_i}{2\pi\epsilon_0 R^+} \quad (6)$$

$$E_i^- = \frac{-l_i}{2\pi\epsilon_0 R^-} \quad (7)$$

De la geometría de la figura 2 se obtienen:

$$\cos \theta_i^+ = \frac{X_p - X_i}{R_i^+} \quad (8)$$

$$\cos \theta_i^- = \frac{X_p - X_i}{R_i^-} \quad (9)$$

$$\sin \theta_i^+ = \frac{Y_i - Y_p}{R_i^+} \quad (10)$$

$$\text{sen } q^- = \frac{Y_i - Y_p}{R^-_i} \quad (11)$$

Donde:

$$R^+_i = \sqrt{(X_p - X_i)^2 + (Y_i - Y_p)^2} \text{ metros.}$$

$$R^-_i = \sqrt{(Y_i - Y_p)^2 + (X_p - X_i)^2} \text{ metros.}$$

Las líneas de transmisión tienen más de un conductor y para determinar el valor del campo eléctrico resultante en el punto "p", hay que descomponer el vector del campo eléctrico de cada conductor y su imagen en sus proyecciones horizontales y verticales, utilizando los senos y cosenos definidos más arriba, de manera que los campos resultantes en los ejes "X" y "Y" sean la suma de estas proyecciones. Así

$$E_{xTotal} = \sum_{i=1}^n E_{ix} \quad (12)$$

$$E_{yTotal} = \sum_{i=1}^n E_{iy} \quad (13)$$

Si el campo se calcula en la superficie del terreno hay simetría de +q y -q, sus componentes horizontales se anulan, sólo hay campo en el eje "Y" y el vector intensidad de campo eléctrico resultante se calcula mediante el teorema de Pitágoras. Sin embargo, si se calcula el campo en un punto ubicado por encima de la superficie del terreno, ninguna componente se anula y como los elementos del vector de las tensiones al neutro en cada conductor, (U), son fasores, el vector de las cargas eléctricas, (Q), estará también formado por fasores y los vectores intensidad de campo eléctrico, (E), serán también fasores, es decir, serán

vectores rotatorios que describirán una elipse.

La expresión que da los ejes mayor y menor de la elipse es:

$$EM = \sqrt{\frac{i}{i+K^2} [(a^2 + c^2)K^2 + H]} \quad (14)$$

Donde:

$$K = \frac{f \pm \sqrt{f^2 + 4}}{2}, \quad L = 2(ab + cd)K$$

$$f = \frac{(b^2 + d^2) - (a^2 - c^2)}{(ab + cd)}, \quad H = L + b^2 + c^2$$

$E_x = a + jb$: Campo eléctrico total en el eje "X".

$E_y = c + jd$: Campo eléctrico total en el eje "Y".

Por ejemplo las expresiones de E_x y E_y son:

$$E_x = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{X_p - X_i}{(R^+_i)^2} + \frac{X_p - X_i}{(R^-_i)^2} \right] \quad (15)$$

$$E_y = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{Y_p - Y_i}{(R^+_i)^2} + \frac{Y_p + Y_i}{(R^-_i)^2} \right] \quad (16)$$

Donde N es igual al número de conductores activos de la línea, por ejemplo 12 en una línea simple circuito con 4 conductores por fase, o igual a tres por el número de circuitos de la línea (3 para este mismo caso).

En el segundo caso se sustituye el haz de conductores por un conductor equivalente por fase. En el primer caso, más exacto, se trabaja con todos los conductores activos de la línea. En ambos casos a la matriz (P) se le incorporó el efecto de la tierra y el de los cables protectores.

Como ya se señaló si el campo se calcula en la superficie del terreno:

$$E_{\max} = \sqrt{c^2 + d^2} = E_y \quad (17)$$

Tensiones de naturaleza electrostática inducidas en conductores aislados de tierra.

Entre los problemas más importantes de la operación de los sistemas de transmisión, subtransmisión y distribución está que sus operarios trabajen con un máximo de seguridad, sin accidentes. Cuando se trabaja en una línea desenergizada y en vacío próxima a otras líneas en operación, hay que conocer cual es la tensión de naturaleza electrostática que las segundas inducen en las primeras. Esta tensión se induce inclusive durante la construcción de una línea en el mismo corredor de otras que estén en operación y es del orden de las decenas de kilovolt.

Otra de las necesidades de conocer las tensiones de naturaleza electrostáticas inducidas está en la utilización de la tensión inducida en los cables protectores para alimentar pequeñas cargas próximas a líneas de transmisión de alta tensión.

Planteamiento matemático.

La ecuación matricial que da el comportamiento electrostático de una línea de transmisión de energía eléctrica es:

$$(U)=(Y)^{-1}(I_c) \quad \text{Volt al neutro} \quad (18)$$

Donde:

(U): Vector de las tensiones al neutro en cada uno de los conductores considerados en el análisis.

(Y)⁻¹=1/jw(P): Inversa de la matriz admitancia de los parámetros electrostáticos de la línea.

(P): Matriz con los coeficientes de potencial debidos a Maxwell.

w=2πF Frecuencia angular en radianes/segundo.

(I_c): Vector con las corrientes capacitivas que circulan por los conductores considerados en el

análisis.

La ecuación matricial 18 es general, su orden depende de donde es que se desean las tensiones inducidas.

Tensiones inducidas en el circuito desenergizado y en vacío de una línea de transmisión doble circuito.

En este caso hay seis ecuaciones y la matriz (P) tendrá incorporado el efecto de los cables protectores. Desarrollando la ecuación 18 con notación simbólica para las matrices:

$$\begin{bmatrix} (U_F) \\ (U_i) \end{bmatrix} = \frac{1}{jw} \begin{bmatrix} (P_{11}) & (P_{12}) \\ (P_{21}) & (P_{22}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (I_c)_f \\ (0) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde:

(U_F): Vector de orden 3 con las tensiones aplicadas al circuito energizado.

(U_i): Vector de orden 3 con las tensiones electrostáticamente inducidas en el circuito desenergizado y en vacío.

(I_c)_f: Corrientes capacitivas que circulan por los conductores del circuito energizado.

(0): Vector nulo de orden 3 con las corrientes que circulan por el circuito desenergizado y sin carga (cero en este caso).

Despejando:

$$(U_i)=(P_{21})(P_{11})^{-1}(U_F) \quad (20)$$

Donde:

(P₂₁): Submatriz con los coeficientes de potencial entre los conductores energizados y los desenergizados y sin carga.

(P₁₁)⁻¹: Inversa de la submatriz con los coeficientes de potencial propios y mutuos entre los conductores del circuito energizado solamente.

La ecuación 20 muestra que la tensión inducida de naturaleza electrostática es independiente de la longitud de la línea, directamente proporcional al valor de la tensión aplicada y función del sistema de capacitancias de la línea, es decir, de su configuración.

Tensiones inducidas en los cables protectores aislados de la tierra.

En países como Canadá, Rusia, Perú y otros se utiliza la tensión inducida en los cables protectores aislados de tierra para servir pequeñas cargas como estaciones de mantenimiento, viviendas aisladas, etcétera. En ese caso, si la línea es simple circuito con un cable protector habrá cuatro ecuaciones. Si tiene dos cables protectores habrá cinco y si fuera doble circuito con dos cables protectores, ocho.

Por un proceso completamente similar al descrito se obtiene el vector de las tensiones inducidas en los cables protectores, $(U_i)_{cp}$, pero ahora será de un orden igual al número de cables protectores de la línea.

RESULTADOS NUMÉRICOS

La figura 3 a) muestra las tensiones inducidas en los cables protectores (CP) de la línea Nuevitas-Holguín. Se supuso una tensión de 230 kV, los conductores son de aluminio reforzado con acero y 300 mm². Los cables protectores (aislados de tierra) son de acero de 70 mm². Se supusieron flechas de 8m y 6,4 m para los conductores de fase y los cables protectores respectivamente.

La mayor tensión se induce en el CP que tiene un mayor acoplamiento electrostático con las fases.

La figura 3 b) muestra las tensiones inducidas en los CP (aislados de la tierra) y en el circuito de la derecha que se supuso desenergizado y sin carga por el circuito de la izquierda alimentado con 230 kV. Esta línea está entre la estación generadora del Mariel y la subestación CUJAE. Es doble

circuito con conductores de fase de aluminio reforzado con acero de 400 mm² y cables protectores de acero de 70 mm². Se supusieron flechas iguales a las de la línea anterior.

Nótese que las tensiones inducidas de mayor valor se encuentran en los conductores más altos siendo la mayor la del CP, aunque próxima a la del conductor de la fase "B".

Estos resultados se obtuvieron mediante el paquete de programas PARLINC 6 cuyos resultados están validados por mediciones hechas en el país por especialistas japoneses y colombianos.

CONCLUSIONES.

Se mostraron las características y las posibilidades de cálculos de un algoritmo desarrollado en la computadora digital y validado mediante mediciones que permite calcular el campo eléctrico y los voltajes inducidos de naturaleza electrostática en los conductores desenergizados y aislados de la tierra. Este algoritmo es de gran utilidad porque con él es posible determinar el impacto de las líneas de transporte aéreas, trifásicas en el medio que las rodea.

DATOS DEL AUTOR

Héctor Silvio Llamo Laborí
Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE), Ciudad de la Habana

En la actualidad, es jefe de la disciplina Sistemas Electroenergéticos e imparte cursos de Pregrado y Postgrado en las asignaturas relacionadas con los Sistemas Eléctricos de Potencia.

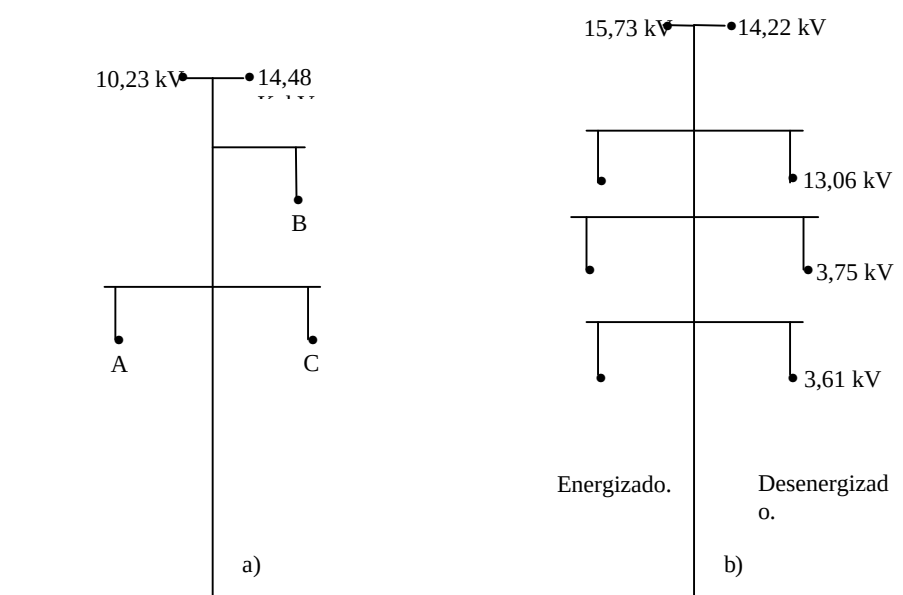


Figura 3- Tensiones inducidas en los CP de una línea a simple circuito y en los CP y los conductores de fase desenergizados de un doble circuito, ambas a 220 kV.

Referencias bibliográficas.

- 1.- Moulder J. E.: "Electromagnetic Fields and Human Healths: Power lines and cancer FAQs1997.
- 2.- Kaune W. T.: Assesing human exposure to power frequency electric and magnetic field". *Environmental Research* 101 (Suppl. 4), pp 121-133. 1993.
- 3.- Efecto Ecológico de los CEM. Cap. 1. Tomado de INTERNET. 1999.
- 4.- Priest, K. W. et al. "Calculation of the Radio Interference Estatistic of Transmission Lines." *Transaction on PAS*. pp 92-97. Junio 1971.
- 5.- Halliday, D. E. et al. "Física para Estudiantes de Ciencia e Ingeniería." Ediciones R. 1965.
- 6.- Llamo, H.S.: "Cálculo Automatizado para el Diseño de las Líneas de Transporte de Energía Eléctrica". Tesis para el grado de Dr. en Ciencias Técnicas. ISPJAE. 1995.