

IMPACTO AMBIENTAL DE ELECTRODUCTOS EN INSTALACIONES RURALES.

P. L. Arnera¹, M. B. Barbieri², J. Z. Vernieri³

RESUMEN

Durante el proyecto de líneas de alta tensión se realiza la evaluación del impacto ambiental que las mismas introducen. En dicha etapa se analizan los requerimientos necesarios para lograr niveles de perturbación aceptables, para introducir, en caso que se requiera, cambios en el diseño.

Definida la franja de servidumbre (derecho de paso), el propietario rural tiene restricciones en la propiedad afectada por la misma.

En este trabajo se plantean las causas de dichas restricciones, enfatizando en el efecto de los campos eléctricos y magnéticos en instalaciones que configuran conductores pasivos (alambrados, cañerías, alambrado electrificado)

Se presenta un caso real en el que se realizaron mediciones de campo eléctrico y magnético, a nivel del suelo, en un sector rural del sistema de transmisión en 500 kV, con el fin de ajustar un modelo de cálculo. A partir del mismo se plantean situaciones operativas y fallas posibles en el sistema de alta tensión, buscando maximizar el valor de corrientes inducidas en un alambrado eléctrico y que circularían por animales que hicieran contacto con el mismo.

En situaciones de operación normal del sistema eléctrico no se encuentran situaciones de riesgo, la condición donde se observan corrientes peligrosas es ante falla monofásica cercana, en el sistema de alta tensión.

Palabras claves: líneas aéreas, compatibilidad electromagnética,

ENVIRONMENTAL EFFECTS OF OVERHEAD POWER LINES ON RURAL INSTALLATIONS

SUMMARY

The environmental effects introduced by high voltage power lines are evaluated during their design project. At this stage, the requirements are analyzed to verify the admissible perturbation levels and to consider possible design changes in case they are required.

Once the right of way is defined, the rural owner has restrictions in the zone of his property affected.

In this report, these restrictions are stated with emphasis in those related with the electric and magnetic field effects in passive conductors installations (i.e. wire netting, pipes, electrified wire netting)

¹. Profesor Adjunto Ordinario-Sistemas de Potencia. Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos. IITREE-FI-UNLP, Fax ++54 (21) 250804, E mail: parnera@volta.ing.unlp.edu.ar. Calle 48 y 116, 1900 La Plata Argentina.

². Profesor Adjunto-Campos y Ondas. Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos IITREE-FI-UNLP, E mail: barbieri@volta.ing.unlp.edu.ar

³. Jefe de Trabajos Prácticos-Campos y Ondas. Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos IITREE-FI-UNLP, E mail: jvernieri@volta.ing.unlp.edu.ar

A real case is showed. In this case, there were electric and magnetic field measurements taken, at soil level in a rural zone of a 500 kV transmission line, in order to adjust a mathematical model. Operating conditions and possible faults of the high voltage system are studied with this model trying to maximize the induced current values in an electrified wire netting that would eventually flow through animals in contact with it.

Under normal operating conditions of the electric system, there are no risky situations. On the contrary, dangerous current values are induced when one phase faults occur near in the high voltage system.

Key words: overhead lines, electromagnetic compatibility

INTRODUCCION

El proyecto de un sistema eléctrico, como de cualquier otra obra, no puede prescindir de considerar el potencial daño que puede originar al medio que lo circunda. En forma concreta ocupará un espacio originando perturbaciones al ambiente natural, Paris (1994)

La ocupación del espacio y la perturbación visual son factores primarios del impacto de la línea aérea en el ambiente. Las líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica pueden interferir con el medio ambiente de diversas maneras. Entre ellas, la acción sobre los sistemas de comunicaciones (radio AM, FM, TV), debida al campo electromagnético aleatorio de alta frecuencia provocado por las descargas corona o efluvios que aparecen en conductores, aisladores y morsetería (Radio-interferencia, RI). El ruido audible (RA) generado por la presencia de efecto corona. El campo eléctrico al suelo (E) y el campo de inducción magnética o campo magnético (B), en las proximidades de la instalación, originado por las corrientes de frecuencia industrial circulantes EPRI (1975)

Es conveniente que los requerimientos necesarios para lograr niveles de perturbación aceptables y sus significancias económicas sean evaluadas en la fase de diseño, en la cual pueden ser introducidos los cambios necesarios fácilmente.

La ocupación del espacio por los electroductos, a largo término, posee dos efectos: uno directo ya que se convierte en un obstáculo físico (al vuelo natural y artificial, eliminación de árboles, etc.), y otro indirecto dado por la degradación de la percepción del observador de áreas naturales, arquitectónicas, históricas o paisajísticas, ya que representa una intrusión extraña en dicho contexto, Bellomo et al (1994).

El uso del territorio se encuentra limitado, ya sea para el ambiente natural (como consecuencia se deben podar árboles); o para el ambiente antrópico para uso agrícola o residencial o industrial.

En el caso de líneas aéreas, estas interferencias con el medio ambiente interesan fundamentalmente a los efectos de determinar el territorio sujeto al derecho de paso (franja de servidumbre), Secretaría de Energía (1998)

Para los predios en los cuales se instalan sistemas de Extra Alta Tensión, el uso del suelo se encuentra afectado por la figura de servidumbre de electroducto, además de la existencia física de la línea, se encuentra restringido el uso del mismo. El propietario se hace acreedor de la correspondiente indemnización.

De esta manera los efectos perturbadores ocasionados por las líneas aéreas, pueden identificarse como aquellos que definen la franja de servidumbre,

dependiendo del diseño de la línea y aquellos que introducen restricciones al uso del territorio definido en dicha franja.

Dichas restricciones quedan definidas por el efecto, a corto término, de los campos eléctricos y magnéticos en las proximidades de líneas de transporte de energía.

El propietario del predio debe conocerlas a fin de no tener inconvenientes personales o en sus instalaciones.

El objeto de este trabajo es señalar el efecto, a corto término, de los campos electromagnéticos en instalaciones rurales, ejemplificando con resultados obtenidos en el análisis de una instalación de alambrado electrificado existente debajo de una doble terna en 500 kV.

Para ello se realizaron mediciones de campo eléctrico y magnético "in situ", los cuales se contrastan con valores calculados. A partir del modelo validado se analizan diversas condiciones de operación y ante fallas del sistema eléctrico, con el fin de determinar corrientes de descarga que pudieran aparecer en circuitos adyacentes.

CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS PRODUCIDOS POR LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

El campo eléctrico E es producido por cargas eléctricas estáticas, siendo directamente proporcional a la tensión y decreciendo al aumentar la distancia. El campo de inducción magnética B es creado por cargas eléctricas en movimiento. El mismo es directamente proporcional a la corriente y también decrece al aumentar la distancia.

Las intensidades de los campos E y B , además, están afectadas por la geometría de la línea, el número de conductores de fase, la altura, el tamaño y la separación entre conductores y la posición de los hilos de guardia.

En las cercanías de las líneas de transmisión el campo E tiene predominantemente la dirección vertical, mientras que el campo de inducción magnética B (o campo magnético), resulta principalmente transversal a la dirección de la línea. Posee, en cada punto, dos componentes de magnitud apreciable B_x (paralelo al terreno) y B_y (perpendicular al terreno) ambas con variaciones sinusoidales. En cada punto el campo tiene una magnitud y dirección del campo máximo ($B_{\text{máx}}$) distinta, por lo tanto es útil establecer estas componentes, Polivanov (1980).

Las líneas producen campos eléctricos relativamente estables dado que la tensión no suele cambiar mucho respecto de su valor nominal. En cambio, los campos magnéticos fluctúan fuertemente dependiendo del estado de carga de la línea. Una forma de describir estos campos magnéticos es estadísticamente, es decir en términos de promedios, valores máximos (o pico), etc.

EFFECTOS DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS

A lo largo de las líneas de transporte de energía y en subestaciones, el campo eléctrico en la proximidad de la superficie del suelo se considera cuasiestacionario, a la frecuencia de servicio de 50 Hz.

Para el análisis de los efectos del campo eléctrico se plantean diversas circunstancias de interés, ISTISAN (1994).

- A medida que una persona se acerca a una línea o equipo de alta tensión, entra poco a poco en un campo eléctrico cada vez más intenso, y la corriente de

desplazamiento permanente inducida en su cuerpo aumenta lentamente. Esta corriente (corriente de cortocircuito) es función de la intensidad del campo y de la capacidad entre las partes bajo tensión y la persona.

- Si la persona en cuestión toca una masa metálica cualquiera, puesta a tierra o no, en el instante del contacto puede percibir una corriente transitoria (corriente de contacto) que será bastante más elevada que la corriente permanente, que normalmente no es perceptible.

- Si por azar se realiza una maniobra de carga de combustible en un vehículo estacionado en las cercanías de la instalación de alta tensión, estas corrientes de descarga pueden producir el encendido del combustible.

A su vez la circulación de corriente por los conductores que componen una línea de transmisión establece, en la vecindad de la misma, un campo magnético variable (a la misma frecuencia que la de la corriente).

Ante la presencia en las cercanías, de elementos tales como alambrados, cercas, cañerías de riego, etc., que constituyen circuitos eléctricos pasivos, pueden aparecer tensiones y corrientes inducidas por dicho campo magnético, las cuales a semejanza de aquellas producidas por acoplamiento electrostático (E/S) pueden llegar a ser peligrosas para las personas en el caso de un eventual contacto, Deno (1977)

En consecuencia, ello requiere la determinación de criterios de salvaguarda y de restricciones en el uso del terreno ubicado en las cercanías de la línea.

VALORES DE REFERENCIA

El límite de seguridad o salvaguarda, para corrientes de contacto, indicado por la Secretaría de Energía (1998) es 5 mA.

La exposición de objetos tales como vehículos, cercos o antenas en las proximidades de la línea de transmisión, es decir bajo el efecto del campo eléctrico, resulta en una energía electrostática almacenada, que al contacto con el cuerpo humano se descarga en forma de corriente eléctrica, pudiendo alcanzarse los valores límites señalados en el punto anterior.

Entre estos objetos, cobran particular interés los vehículos, móviles y generalmente aislados de tierra. La determinación de la capacidad a tierra de los vehículos puede efectuarse a través de mediciones o de cálculos. En base a sus dimensiones se los pueden dividir en 3 tipos: A-autos, pickups, B- vehículos rurales y C-autobuses y acoplados. A partir de esta clasificación, el campo eléctrico al suelo requerido para obtener los niveles de corriente dados anteriormente son: A: 27,32 kV/m, B: 13,05 kV/m y C: 7,6 kV/m, Clayton (1981)

El fenómeno de encendido de combustible puede ocurrir durante un reabastecimiento de vehículos estacionados en las proximidades de las líneas de transmisión. Dicho encendido ocurre por la descarga del circuito capacitivo constituido por el propio vehículo y el elemento desde el cual se abastece de combustible (recipiente, persona, etc.). El problema del encendido de combustible es muy discutido, y hay considerables divergencias en torno a los criterios a seguir para eliminar tal posibilidad. Sin embargo se debe destacar que en franjas de servicio donde se realizan tareas agrícolas, este problema no existe debido a que la tensión inducida es baja debido a la conductividad a tierra, Lewis y Von Elbe (1961).

En IRAM 2 371 (1987) e IEC 479-1 (1994) se asocian, valores de corriente alterna y su efecto en los seres humanos según los tiempos de exposición. Pudiendo aparecer contracciones musculares y fibrilación ventricular para corrientes del orden de 450 mA, para tiempos de 100 ms y aproximadamente 300 mA para 300 ms.

Los tiempos considerados corresponden a valores típicos de liberación de falla de protecciones principales y de respaldo, en el sistema de 500 kV.

A partir de la fórmula de Daziel, Weeks (1981), las corrientes que pueden causar la electrocución de personas son mayores de 470 mA en tiempos de 100 ms y 270 mA para 300 ms.

Los valores de corriente de fibrilación para diversas clases de animales (vacas, perros, conejos, ovejas, etc.) indicadas en EPRI (1975), se encuentran asociadas para diversas probabilidades de ocurrencia. De ellas se observa que para un animal de 100 kg, la probabilidad de fibrilación en 150 mA ocurre en el 0.5 % de los casos, en 360 mA para el 50% de los casos y 600 mA para el 99.5%.

CASO DE ANALISIS

Bajo una línea en 500 kV, doble terna configuración coplanar horizontal, se encuentra tendido un alambrado electrificado, consistente en un conductor eléctrico (longitud total 1300m), con disposición irregular, alimentado con una fuente, conectada a tierra, que genera impulsos de tensión. Al morir animales, por electrocución, en las cercanías del alambrado, se solicitó indagar si la causa de los decesos se originaba en el sistema de Alta Tensión.

La presencia del alambrado electrificado, en la cercanía de la línea, presenta la posibilidad que en el mismo se induzcan tensiones por acoplamiento electrostático o por inducción magnética.

Metodología aplicada

Para determinar los efectos asociados a los campos eléctricos y magnéticos, se prevé, inicialmente evaluar estos últimos a partir de mediciones "in situ".

Se realizaron mediciones del perfil transversal de campo eléctrico al terreno y del máximo campo magnético, que se contrastan con valores calculados con el objeto de convalidar las simulaciones frente a la realidad y estimar valores en otras condiciones de funcionamiento. En las Figuras 1 y 2 se presentan los valores medidos y los calculados en similares condiciones.

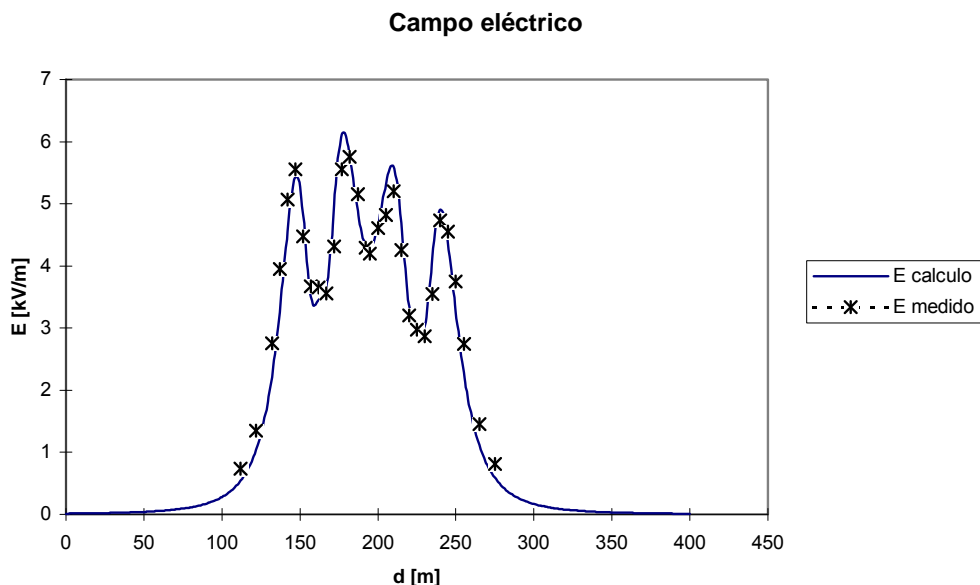


Figura 1: Campo eléctrico medido y calculado

Campo Magnético sobre el terreno

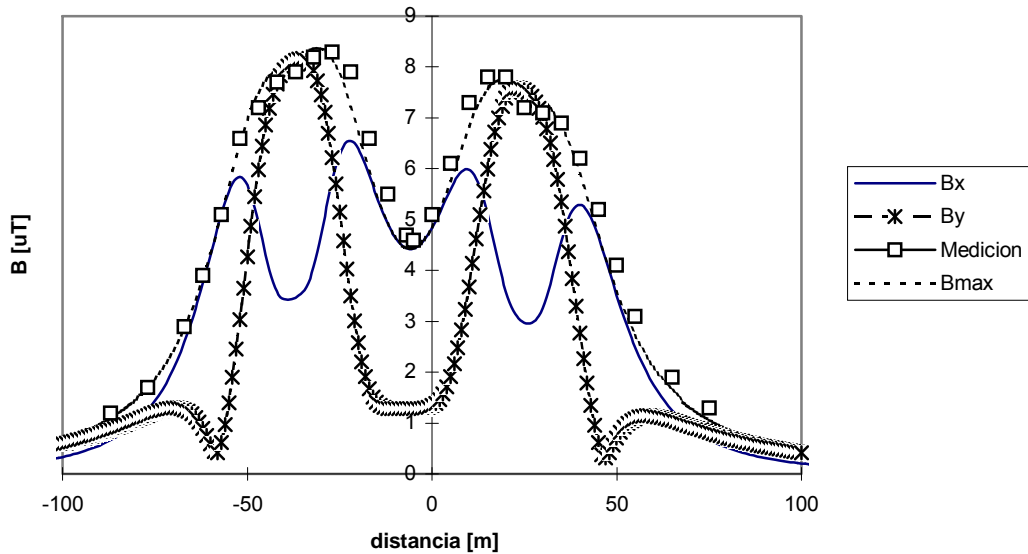


Figura 2: Máximo campo magnético medido y calculado, componentes en x (Bx) y en y (By) del campo magnético calculado.

Validado el modelo se determinan por cálculo los perfiles de: campo eléctrico para mínima altura de los conductores, campo magnético para mínima altura de conductores y máxima corriente en las fases.

Se plantean condiciones extremas de funcionamiento de la red de alta tensión, para determinar por cálculo los valores de tensión y corrientes inducidas por efecto del acoplamiento electrostático y magnético .

Tensión inducida por acoplamiento electrostático

La tensión inducida por acoplamiento electrostático en el alambrado electrizado (U_{the}), se la definió a partir de los máximos valores de campo eléctrico, Deno (1977), considerando el alambrado totalmente paralelo a la línea.

La corriente de cortocircuito (I_{sc}), en estos casos, es del orden de la corriente inducida (I_i), ya que la impedancia equivalente entre la tierra y el sistema de conductores (Z_{the}), del orden de centenares de $k\Omega$, supera el valor estimado de la impedancia del objeto (animal) en contacto ($Z = 4000 \Omega$) EPRI (1975).

$$I_{sc} = U_{th} / Z_{the}$$

$$I_i = U_{th} / (Z_{the} + Z)$$

E [kV/m]	Z _{the} [k Ω]	I _{sc} [mA]
6.15	294.5	20.9
8.3	294.5	28.2

Tensión inducida por acoplamiento magnético

La tensión inducida a circuito abierto por acoplamiento magnético en un conductor paralelo a la línea, se puede estimar a partir de la geometría y de las corrientes de los conductores de la línea (tanto de fase como de guardia),

considerando las impedancias propias y de acoplamiento entre conductores (del sistema de potencia y del alambrado).

La corriente de los conductores de la línea se supone de acuerdo a la situación operativa o falla que se quiera simular, y las corrientes de los cables de guardia se calculan considerando que están a potencial cero.

Para encontrar la corriente inducida en el objeto se debe conocer la impedancia de conexión entre el conductor y la tierra, o sea la impedancia del objeto que conecta el conductor a tierra. Esta impedancia (Z_i) es siempre mucho mayor que la impedancia de Thevenin del circuito equivalente.

Normalmente la Z_{thm} , debido al acoplamiento magnético, es de algunos Ω , mientras que la impedancia del objeto más la impedancia de contacto (Z) es de algunos miles de Ω (entre 1000 y 4000 Ω).

Por otra parte ante el recorrido irregular del alambrado electrificado, se desarrolló un programa de cálculo de manera de determinar la tensión inducida en segmentos de longitud unitaria Δl ubicados en distintas posiciones paralelas a la línea. La tensión inducida $U_i(x)$ en cada incremento Δl es un fasor, o sea tiene módulo y fase temporal, por lo tanto la sumatoria será compleja. Se define dicha sumatoria considerando el recorrido de mayor longitud entre el lugar en que se encuentra el transformador pulsante y el lugar de deceso de los animales, Arnera y Barbieri (1998).

Se suponen distintos valores de corrientes por los conductores de línea que representan condiciones de fallas, condiciones de operación normal y ante pequeños desequilibrios. El acoplamiento magnético se magnifica ante el desbalance de corrientes del sistema de potencia, de hecho se plantean situaciones de cortocircuitos monofásicos variando el punto en falla. En cada caso se establecieron las corrientes de secuencia correspondientes, en módulo y fase a partir de las cuales se obtienen las corrientes por los conductores de fase e hilos de guardia.

En la siguiente tabla se presentan los valores de tensiones inducidas y corrientes, considerando diversos valores de la impedancia de contacto (1500, 2000 y 4000 Ω), indicándose los módulos de las corrientes de secuencia presente en los conductores de fase.

	Z= 4000 [Ω]	2000 [Ω]	1500 [Ω]
	U [V]	I [mA]	I [mA]
$I_1 = I_2 = 2559 \text{ A}$, $I_0=3082\text{A}$ cortomonofásico	4587,8	1146,9	2293,9
$I_1 = I_2 = 1455 \text{ A}$, $I_0=122\text{A}$ cortomonofásico	182,4	45,6	91,2
$I_1 = 1307 \text{ A}$, $I_2 = I_0= I_1. 5\%$	99,6	24,9	49,8
$I_1 = 1307 \text{ A}$, $I_2 = 0$, $I_0= I_1. 5\%$	99,8	24,9	49,9
$I_1 = 1307 \text{ A}$, $I_2 = I_0= 0$	2,7	0,7	1,4
$I_1 = 680 \text{ A}$, $I_2 = I_0= 0$	1,4	0,4	0,7

Análisis de resultados

Suponiendo animales del orden de los 100 kg, los valores límites de corriente (alterna de 50 Hz) adoptados son 270 mA durante 300 ms o 150 mA en forma permanente.

Por acoplamiento electrostático, y por acoplamiento magnético en condiciones normales de funcionamiento no se alcanzan estos valores. De hecho son muy inferiores a los mismos.

Sólo se superan los valores límites de corriente ante un cortocircuito monofásico en la doble terna, en las cercanías del establecimiento rural.

En el caso particular analizado, la empresa concesionaria del sistema de transporte en alta tensión no obtuvo registros de actuación de sus protecciones, por lo tanto en este caso la muerte de los animales no se puede atribuir a causas originadas en el sistema de transporte de energía eléctrica.

RECOMENDACIONES

En condiciones de operación normales de la red de alta tensión no se dan condiciones de peligro, sin embargo durante el breve lapso que las protecciones requieren para liberar una falla a tierra, las corrientes que circulan por animales que estuvieran en contacto con el alambre superan los niveles de electrocución.

Por este motivo debajo de líneas de AT los alambrados y/o cañerías paralelas a la misma, deben conectarse a tierra cada algún centenar de metros, dependiendo de la distancia de los mismos a los conductores de fase y de los niveles aceptados de cortocircuitos de la línea en el lugar por seguridad de las personas y/o animales. Por efecto del acoplamiento resistivo aunque los conductores se pongan a tierra aparecen tensiones peligrosas, por lo tanto los conductores de gran longitud se deben aislar por tramos.

Por lo afirmado en el punto anterior los alambrados eléctricos no se deben usar en las zonas de líneas de AT, pues si estos se conectan a tierra y/o se seccionan no cumplen su función .

CONCLUSIONES

Al realizar las expropiaciones de terreno, en el momento de la construcción de líneas aéreas, se efectúa el acondicionamiento de alambrados y cañerías existentes, atendiendo el efecto de campos eléctricos y magnéticos en las mismas.

Sin embargo, se observa que no se respetan las restricciones impuestas para nuevas instalaciones, ejecutadas por los propietarios, incurriendo en condiciones riesgosas para personas y animales.

Resulta imperioso el asesoramiento correspondiente, para no incurrir en estas anomalías.

BIBLIOGRAFIA CITADA

Arnera P., Barbieri B. 1998, "Estudios de campos eléctricos y magnéticos asociados a la doble terna en 500 kV. Zona Marcos Paz", ENR 147, pp 25, IITREE-FI-UNLP.

Bellomo B., D' Ajello L, Nicolini P, Sartore L. 1994 "Identificazione delle problematichè de azioni intraprese dall'ENEL", en Linee elettriche e ambiente: Problemi tecnici e legislativi, AEI, Roma, 24-44.

Clayton R., Grant I., Kallaur E. Stewart J. (1981) "Electric field effects for Hidronor proposed Alicura-Abasto 500 kV Transmission Line", PTI Schenectady pp 75

Deno W. 1977, "Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field-Measurement and calculation of dostrubution and dose". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS 96, 1517-1527.

EPRI, 1975. "Transmission Line Reference Book 345 kV and above", Fred Weidner & Son Printers, Inc. Palo Alto, pp 393.

IEC 479-1 (1994) "Efectros de la corriente en seres hum,anos y animales domésticos". International Electrotechnical Comission.

IRAM 2371 (1987) “Efectos del paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano- Aspectos generales”. Instituto Argentino de racionalización de materiales. Chile 1192. Buenos Aires. Pp 29

ISTISAN 1994 “Indicazioni per gli studi di impatto ambientale relativamente alla componente salute pubblica, Linee elettriche”, de. Istituto Superior di Sanità, Roma, pp 112.

Lewis and Von Elbe , 1961. “Combustion, Flames and Explosions of Gases”, Academic Press, Second Edition, New York

Paris L. 1994, “Il miglioramento della compatibilità ambientale delle linee elettriche: analisi del problema e soluzioni possibili”, en Linee elettriche e ambiente: Problemi tecnici e legislativi, AEI, Roma, 7-17.

Polivanov K., Netushil A. 1980. “Principios de Electrotecnia –Teoría del campo electromagnético”, Edigraf, Buenos Aires, pp 385.

PTI,1981 Electric Field Effects for Hidronor proposed Alicura - Abasto 500 kV Transmission Line.

Secretaria de Energía, 1998 Resolución 77/98 Ampliación del Manual de Gestión Ambiental del Sistema de Transporte Eléctrico de Extra Alta Tensión. Boletín Oficial N° 28859 1ª sección.

Weeks W.L. 1981. Transmission and Distribution of Electrical Energy. Harper & Row Publishers, New York, pp 303