

# Ruido Audible en Líneas de Transmisión de Doble Circuito: Casos de Estudio en México e Italia

Carlos Tejada Martínez

Instituto Politécnico Nacional  
ESIME ZAC.

Ciudad de México, MÉXICO

Email: ctejadam@ipn.mx

URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8332-135X>

Fermín P. Espino Cortés

Instituto Politécnico Nacional  
ESIME ZAC.

Ciudad de México, MÉXICO

Email: fpespino@ipn.mx

URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4853-7563>

Eliseo Morales Figueroa

Instituto Politécnico Nacional  
ESIME ZAC.

Ciudad de México, MÉXICO

Email: elisecomoralesfigueroa@gmail.com

**Resumen**— En este trabajo se realiza un análisis comparativo de los perfiles de Ruido Audible (RA) generado en líneas de transmisión de doble circuito. Se estudian dos tipos de estructuras, una de México y otra de Italia. Para cada estructura se consideran tres configuraciones: doble circuito de CA, doble circuito de CD y la configuración híbrida CA/CD. Los cálculos se realizan en condiciones de ambiente seco y ambiente lluvioso. Al final, se comparan los perfiles de RA de todos los casos de estudio con los límites regulatorios establecidos en cada país, a fin de determinar si los diseños propuestos cumplen con la normatividad vigente.

**Palabras Clave** — efecto corona, línea de transmisión híbrida, ruido audible

**Abstract**- In this work, a comparative analysis of the Audible Noise (AN) profiles generated in double circuit transmission lines is carried out. Two types of structures are studied, one from Mexico and the other from Italy. For each structure, three configurations are considered: double AC circuit, double DC circuit and the hybrid AC/DC configuration. The calculations are carried out in conditions of fair weather and rainy weather. In the end, the AN profiles of all the study cases are compared with the regulatory limits established in each country, in order to determine if the proposed designs comply with current standards.

## I. INTRODUCCIÓN

El creciente desarrollo de fuentes de energía renovables, así como el rápido incremento en la demanda de energía eléctrica asociado, por ejemplo, al esperado fenómeno de nearshoring en México, impulsan la necesidad de aumentar la capacidad de los sistemas de transmisión. Las líneas de transmisión de alta tensión de corriente directa (HVDC) ofrecen ventajas significativas sobre las líneas de CA para la transmisión de energía a largas distancias [1]. Sin embargo, las limitaciones ambientales y de espacios obstaculizan el desarrollo de nuevas líneas HVDC.

En este contexto, la conversión de líneas de transmisión existentes de operación en CA a operación híbrida CA/CD se investiga fuertemente como una opción interesante para aumentar la capacidad de transmisión de la infraestructura existente.

El efecto corona es un fenómeno que puede estar presente tanto en líneas de CA como de CD, y que es originado cuando el campo eléctrico es lo suficientemente alto para ionizar el aire alrededor de los conductores de una línea aérea. En general en líneas mayores a 275 kV, es posible escuchar un ruido característico principalmente en condiciones climáticas de lluvia, niebla o nieve. Este tipo de ruido conocido como ruido audible (RA) es debido a la vibración mecánica de las partículas del aire y una manera de medirlo es por medio de la presión sonora debida a dicha vibración. El diseño de las líneas de transmisión requiere garantizar que los niveles de ruido audible se mantengan dentro de los límites establecidos por norma, evitando al mismo tiempo una modificación excesiva de las torres, que podría comprometer la viabilidad técnica y económica de la conversión híbrida [2].

En consecuencia, en este trabajo se aplicarán metodologías de cálculo del Ruido Audible (RA) generados por líneas de transmisión utilizadas en México e Italia. Los resultados obtenidos de RA son comparados con los valores máximos permitidos en las normas de cada país y que se muestran en la Tabla 1 para el caso de México y en la Tabla 2 para el caso de Italia.

**Tabla 1.-** Límites regulatorios de Ruido Audible en México [3].

Zona	Día	Noche
Áreas Residenciales	55 dB	50 dB
Áreas industriales y comerciales	68 dB	65 dB

**Tabla 2.-** Límites regulatorios de Ruido Audible en Italia [4].

Zona	Día	Noche
Áreas Residenciales	50 dB	40 dB
Áreas industriales y comerciales	65 dB	65 dB

II. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL RUIDO AUDIBLE

El cálculo del Ruido Audible (RA), se realiza mediante la aplicación de fórmulas empíricas que han sido desarrolladas por varios grupos de investigación. En este trabajo se aplican las fórmulas propuestas por la BPA (Bonneville Power Administration) [5], [6]:

$$SLA_{ac} = -188.5 + 120 \log_{10}(G) + 55 \log_{10}(d_{eq,ac}) - 11.4 \log_{10}(D) + Ka + Kw \quad (1)$$

$$SLA_{dc} = -133.4 + 86 \log_{10}(G) + 40 \log_{10}(d_{eq,dc}) - 11.4 \log_{10}(D) + Ka + Kw + Ks \quad (2)$$

donde:

$SLA_{ac}$ : es el ruido audible en dB generado por los conductores de CA en condiciones de lluvia.

$SLA_{dc}$ : es el ruido audible en dB generado por el polo positivo de una línea de CD, en buen ambiente climático (seco).

$D$ : es la distancia entre el conductor o haz de conductores y el punto de medición, en m.

$G$ : es el máximo gradiente de tensión en la superficie del conductor, en  $kV_{peak}/cm$  (valor pico).

$d_{eq}$ : es el diámetro equivalente de los conductores

$d_{eq,ac} = d_{eq,dc} = d$ , para  $n < 3$

$d_{eq,ac} = (0.58 d) n^{0.48}$  y  $d_{eq,dc} = (0.66 d) n^{0.64}$ , para  $n \geq 3$

siendo  $n$  el número de conductores en el haz y  $d$  el diámetro del subconductor en mm.

En las ecuaciones (1) y (2) se contemplan las siguientes consideraciones:

- El ruido generado por el polo negativo se desprecia considerándose solamente la aportación del polo positivo.
- Corrección por altitud:  $Ka = H/300$ , donde  $H$  es la altitud sobre el nivel del mar en m.
- Corrección por condición climática:  $Kw = -25$  para los circuitos de CA en buen ambiente.  $Kw = -6$  para los circuitos de CD en mal ambiente (lluvia).
- El campo eléctrico ( $G$ ) es evaluado a la altura promedio de los conductores (la altura más baja del conductor + 1/3 de la flecha).
- La distancia  $D$  es medida considerando la altura más baja del conductor, a la mitad de la catenaria.

III. CASOS DE ESTUDIO

En este trabajo se analizan dos tipos de estructuras, una de México y otra de Italia. El diseño original es una línea de doble circuito de CA, a partir de la cual se propone la conversión a CD y la configuración híbrida CA/CD. En la Figura 1 se presenta la geometría de la torre para el caso de México y en la Figura 2 para el caso de Italia. En la Tabla 3 se presentan los datos requeridos para la obtención de los perfiles de Ruido Audible.

Tabla 3.- Datos de las líneas de México e Italia

	Torre de México	Torre de Italia
Flecha de conductores	13 m	13 m
Flecha del hilo de guarda	12 m	12 m
Diámetro de conductores	3 x 31.98 mm ACSR Distancia entre subconductores: 45 cm	3 x 31.5 mm ACSR Distancia entre subconductores: 40 cm
Diámetro del hilo de guarda	11.5 mm (acero galvanizado)	11.5 mm (acero galvanizado)

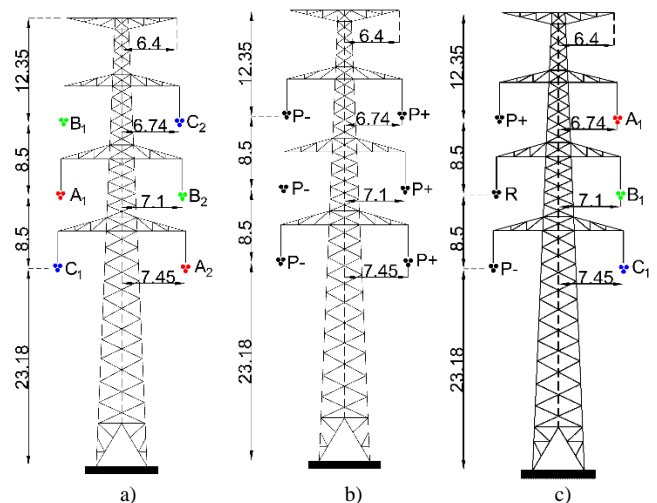


Figura 1.- Torre de doble circuito utilizada en México: a) doble circuito en CA, b) conversión a CD, c) configuración híbrida CA/CD

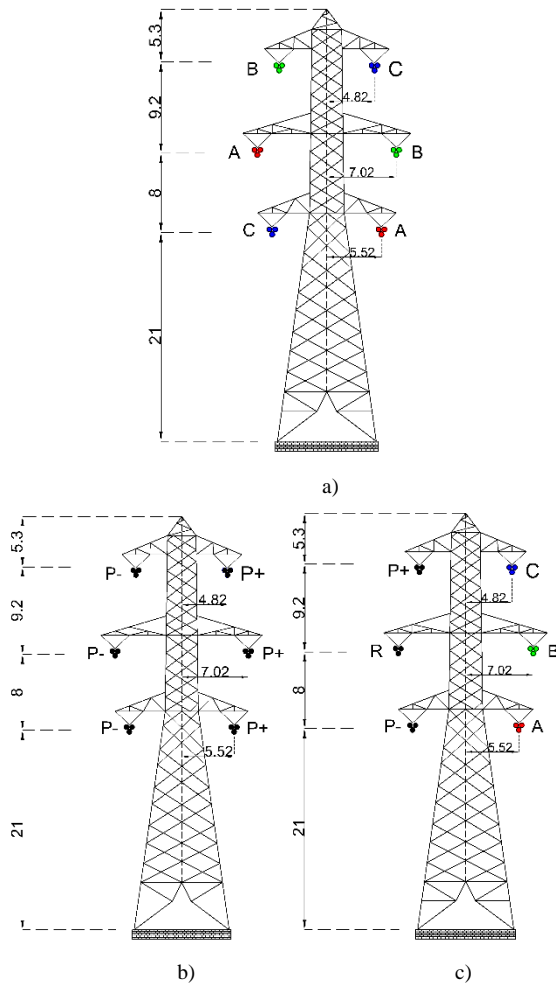


Figura 2.- Torre de doble circuito utilizada en Italia: a) doble circuito en CA, b) conversión a CD, c) configuración híbrida CA/CD

#### IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Metodología descrita en la sección II fue implementada en un código en MATLAB para la obtención de los perfiles de RA para ambas líneas (México e Italia). Para la configuración de doble circuito en CA, se considera una tensión de 400 kV en ambos circuitos. Para la operación en CD, se aplica una tensión de +500 kV para el polo positivo y -500 kV para el polo negativo. Para la configuración híbrida, se considera una tensión de 400 kV para el circuito de CA y de  $\pm 500$  kV para el circuito de CD.

Para el perfil total se considera una distancia lateral de 50 m a la izquierda y 50 m a la derecha a partir del centro de torres. Debido a que en ambos países se tienen zonas de gran altitud, los cálculos se realizan a 2000 metros sobre el nivel del mar, bajo dos condiciones climáticas: ambiente seco y lluvia. Como límite regulatorio para el caso de México, de acuerdo con la Tabla 1, se consideran 50 dB que corresponde al valor más estricto aplicable en áreas residenciales durante la noche. Para el caso de Italia, bajo el mismo criterio se consideró como límite máximo 40 dB, de acuerdo con la Tabla 2.

En las Figuras 3 y 4 se presentan los perfiles de RA de la línea de México. En ambiente seco (Fig. 3), los perfiles obtenidos con las tres configuraciones propuestas CA, CD y CA/CD, se encuentran por debajo del límite de 50 dB. En cuanto al ambiente lluvioso (Fig. 4), La configuración híbrida CA/CD supera ligeramente el límite regulatorio de 50 dB, sin embargo, al presentarse esto dentro del derecho de vía, se estaría cumpliendo con la norma, haciendo posible desde este punto de vista la operación de la línea bajo esta configuración.

En las Figuras 5 y 6 se observan los perfiles de RA para el caso de la línea de Italia, considerando las tres configuraciones propuestas. Obsérvese que en ambiente seco (Fig. 5), las configuraciones en CD e híbrida CA/CD, están por arriba del límite regulatorio de 40 dB, alcanzándose un valor máximo de 53 dB para el caso de la configuración en CD. La configuración de doble circuito en CA cumple con el límite regulatorio ya que el valor máximo de ruido que ésta presenta es de 25 dB.

Em ambiente lluvioso (Fig. 6), los perfiles de las tres configuraciones superan el límite regulatorio, siendo el caso más severo el de la configuración híbrida, alcanzando un valor máximo de 54 dB. Lo anterior conlleva considerar otras opciones de diseño de la geometría de la línea de Italia en busca de reducir los niveles de ruido generado.

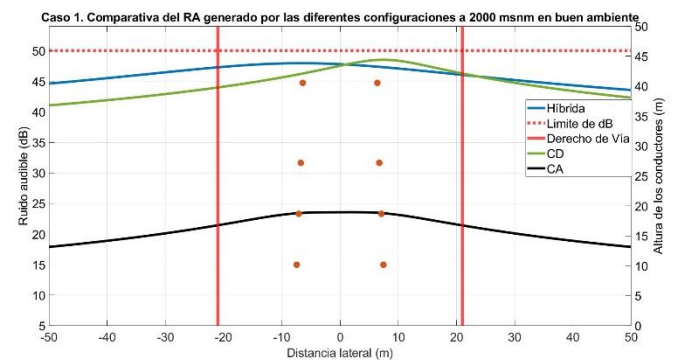


Figura 3.- Perfiles de RA en ambiente seco de la línea de México.

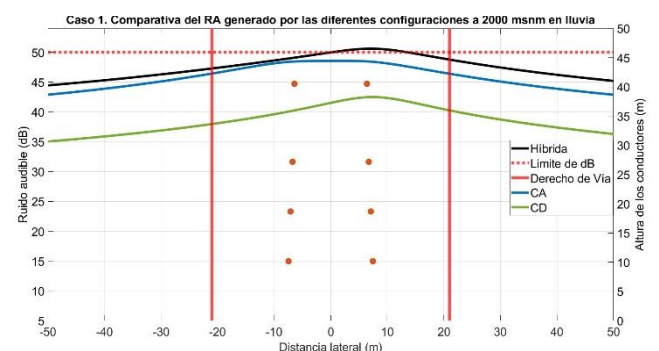


Figura 4.- Perfiles de RA en ambiente lluvioso de la línea de México.

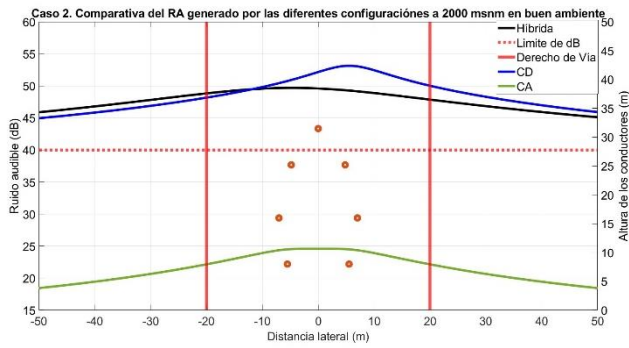


Figura 5.- Perfiles de RA en ambiente seco de la línea de Italia.

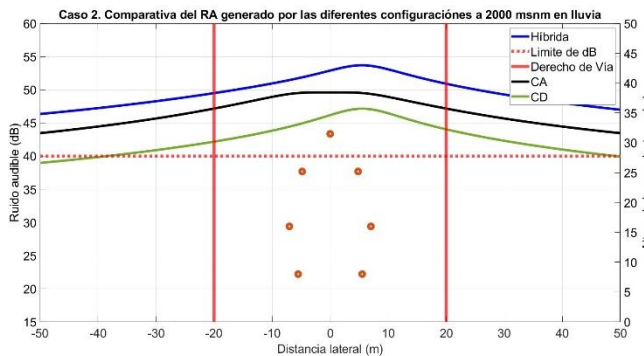


Figura 6.- Perfiles de RA en ambiente lluvioso de la línea de Italia.

En la Tabla 4 se muestra una comparación de los valores máximos de RA en los límites del derecho de vía de ambas líneas bajo condiciones de lluvia, que es el caso donde se presentan los valores más altos de RA en comparación con los presentados en ambiente seco. Para el caso de México, se observa que en los tres tipos de configuraciones de línea (CA, CD y CA/CD), los valores de RA se encuentran por debajo del límite regulatorio de 50 dB, el cual aplica a zonas residenciales de noche. No obstante, para el caso de Italia, las tres configuraciones analizadas presentan valores por arriba del límite regulatorio de 40 dB. Aunque las líneas de ambos países presentan valores similares de RA para cada tipo de línea, el límite regulatorio en la norma italiana es más estricta (40 dB) en comparación con la de México (50 dB), lo cual repercute en que los diseños usados e Italia no cumplan con su norma.

### V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un análisis comparativo de los niveles de Ruido Audible que generan dos líneas de transmisión de doble circuito, una de México y otra de Italia. Para cada una de las líneas se consideró la operación bajo tres configuraciones: doble circuito en CA, doble circuito en CD y la configuración híbrida CA/CD. Con respecto a la línea de México, con base en los resultados obtenidos se observa que, desde el punto de vista de generación de ruido, las tres configuraciones son opciones viables toda vez que cumplen con el límite regulatorio de 50 dB en todos los casos.

Tabla 4.- Comparación de valores Máximos en condiciones de lluvia de las líneas de México e Italia

Caso	Límite regulatorio en áreas residenciales (noche)	Valores máximos en el límite del derecho de vía	Cumplimiento con norma
México	50 dB	Línea de CA: 46 dB	Si cumple
		Línea de CD: 40 dB	Si cumple
		Línea Híbrida: 49 dB	Si cumple
Italia	40 dB	Línea de CA: 47 dB	No cumple
		Línea de CD: 44 dB	No cumple
		Línea Híbrida: 51 dB	No cumple

En cambio, la línea de Italia genera niveles de ruido por arriba del límite permitido de 40 dB, lo cual requiere buscar otras opciones de diseño a fin de cumplir con la norma italiana. Finalmente, como continuación del estudio se plantea realizar una revisión de normas nacionales e internacionales referentes al ruido audible, a fin de encontrar la razón de las similitudes y diferencias entre cada una de ellas.

### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

- [1] EPRI High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Reference Book (Olive Book): 2022 Edition.
- [2] P. Sarma Maruvada, "Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines", Research Studies Press Ltd., pp. 147-149, 225-226, England 2000.
- [3] Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994. Diario Oficial de la Federación 1994.
- [4] DPCM 14-11-1997- "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore" (in Italian) (Gazzetta Ufficiale - Serie generale n. 280 del 1/12/97)
- [5] V. L. Chartier and R. D. Stearns, "Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 1, pp. 121-130, Jan. 1981.
- [6] V. L. Chartier, S. H. Sarkinen, R. D. Stearns and A. L. Burns, "Investigation of Corona and Field Effects of AC/DC Hybrid Transmission Lines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 1, pp. 72-80, Jan. 1981.