

PROPUESTA PARA LA DISMINUCIÓN DEL RUIDO AUDIBLE Y EFECTO ELECTROMAGNÉTICO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ZONAS URBANAS.

**Sergio Corrales S.
Fernando Elizarraraz R.
CFE-LAPEM**

**Juan Bautista F.
Francisco Santander V.
Froylan Martínez
CFE CTT**

RESUMEN

A pesar de que no existen estándares nacionales o internacionales que regulen la generación de ruido audible en las líneas de transmisión, en este artículo se presentan los resultados de simulaciones realizadas para estimar este nivel en las configuraciones de líneas de transmisión más utilizadas, en sistemas de 115, 230 y 400 kV.

Así mismo, se determinan las configuraciones más críticas y se propone la implementación en el laboratorio del equivalente de algunas de las configuraciones para medir el nivel de ruido audible.

INTRODUCCIÓN

Siendo México un país en vías de desarrollo y teniendo en estos tiempos una expansión y crecimiento en su industria y en la población en general, la C.F.E. tiene la necesidad de ampliar y crecer así mismo la producción y transporte de energía eléctrica para satisfacer la demanda exigida y evitar ser un freno en el desarrollo nacional. Para llevar a cabo este cometido la CFE realiza obras de modernización, repotenciación y construcción de líneas de transmisión, y ya que los centros de mayor demanda por lo general están lejos de los de generación, se requiere tener pues un transporte de energía efectivo, seguro y eficiente.

En concordancia con las disposiciones internacionales y nacionales con relación a las actividades de impacto ambiental, y al ser la CFE una empresa responsable y comprometida con la preservación del ambiente, se tienen contemplados aspectos que pudieran ser de impacto ambiental en las construcciones de las líneas de transmisión.

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRÉ-México para presentarse en el Segundo congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en la Ciudad de Irapuato, Gto.

Sabiendo lo limitado y difícil que es el tener nuevos derechos de vía para instalar nuevas líneas de transmisión, se aprovechan al máximo los existentes, por lo que en ocasiones se tiene la necesidad de modificar y/o construir una L.T. atravesando alguna mancha urbana. Sabiendo que una de las problemáticas que han tomado cierta importancia en estos casos, es el ruido audible generado por la presencia de la L.T. en las zonas urbanas, que al llegar a niveles altos (arriba de 90 dB según [5]) puede ser dañino para la salud de los moradores en las cercanías del derecho de vía de las L.T.

Aunque el nivel de ruido audible que produce una línea de transmisión es muy bajo comparado con las fuentes de ruido en el ambiente, se pretende reducirlos a niveles mínimos, desde el punto de vista técnico, principalmente en aquellas líneas que se encuentran ubicadas en zonas metropolitanas. Haciendo esta consideración y cuidando el aspecto económico, la tendencia es instalar exclusivamente en estas zonas líneas de transmisión con configuraciones que permitan minimizar el nivel de ruido audible generado, manteniendo el resto de la línea con la configuración original, o en su defecto con una configuración más económica aun que el nivel de ruido generado no sea el mínimo.

Con estas medidas, se cumplen las expectativas de crecimiento de la red eléctrica, sin alterar en lo posible el entorno social y el impacto ambiental, asegurando una convivencia en armonía, reduciendo al mínimo posibles molestias, entre los vecinos de las redes en zonas urbanas y las líneas de transporte de energía, mismas que contribuyen al desarrollo del país y ofrecen un aspecto favorable de desarrollo para bien de nuestro país.

El fenómeno del ruido audible es el de una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico, en este caso el aire. Su frecuencia está comprendida en el rango de 20 Hz a 20 kHz. En este rango de frecuencia la onda mecánica es perceptible por el oído humano cuando tiene una intensidad mayor a $1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$, que es el umbral de audición.

ANTECEDENTES.

Derivado de la necesidad de reducir al mínimo el posible impacto ambiental que producen las instalaciones de L.T.'s en zonas urbanas, se decide realizar un estudio a detalle en cuanto a disminuir los niveles de ruido audible provocado por éstas.

Actualmente se están desarrollando una serie de estudios psicoacústicos para determinar el impacto en los humanos del ruido audible generado por las líneas de transmisión. Sin embargo, a la fecha no hay límites especificados para regular estos niveles de ruido.

Conscientes de que el nivel de ruido audible generado en las líneas de transmisión puede dar origen a una problemática social, la Coordinadora de Transmisión y Transformación (CTT) en un trabajo conjunto con el LAPEM realizaron estudios y simulaciones con diferentes arreglos de conductores en las líneas de transmisión. En base a los resultados de estas simulaciones, se puede determinar el arreglo más óptimo para reducir en la medida de lo posible, el ruido audible para cada uno de los sistemas de tensión, y de esta manera ofrecer una alternativa de solución a la problemática. Es claro que los resultados obtenidos de las simulaciones, representan una situación específica de la configuración de la línea y de las condiciones en que se genera un determinado nivel de ruido, lo cual se debe de corroborar con mediciones ya sea en campo, y/o implementación de esta configuración en el laboratorio. Conociendo esta necesidad se programaron estas mediciones de ruido audible en campo, así como la implementación de algunas configuraciones en el laboratorio en una segunda etapa del estudio.

OBJETIVO

Optimizar la configuración de las líneas de transmisión para tener un nivel de ruido audible mínimo, realizando una serie de simulaciones digitales para hallar el punto óptimo y evitar en lo posible los costos innecesarios de instalación en las L.T.'s para este fin. Logrando tener una configuración efectiva, y de menor costo, que sin embargo cumpla con el cometido.

Con las simulaciones digitales se pretende estimar el nivel de ruido audible en configuraciones de 1, 2 ó 3 conductores por fase y con distintas distancias de separación entre conductores, para sistemas de transmisión de 115, 230 y 400 kV. En base a los resultados de estas simulaciones, determinar la configuración más adecuada para reducir el nivel de ruido audible para cada sistema de transmisión.

METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La metodología que se ha planteado para llevar a cabo este estudio, básicamente comprende dos etapas:

- ◆ En la primera etapa del estudio se hace uso de un programa de computo para estimar el nivel de ruido audible para las configuraciones propuestas.
- ◆ La segunda etapa consiste en implementar en el laboratorio algunas de las configuraciones propuestas y medir el nivel de ruido audible.

PRIMERA ETAPA DEL ESTUDIO

En el fenómeno de ruido audible en las líneas de transmisión se involucran varios parámetros, tales como, tensión de la línea de transmisión, calibre del conductor, número de conductores por fase y separación entre conductores.

Por esta razón fue necesario proponer algunas de las configuraciones que con mayor frecuencia se usan en los sistemas de transmisión, en las cuales se basó este estudio. Dichas configuraciones se presentan en la tabla 1.

TABLA 1. ARREGLOS PARA SIMULACIÓN POR COMPUTADORA.

Tensión del sistema (kV)	Nº de Conductores por fase	Calibre del conductor (kCM)	Separación de subconductores (cm)
400	1	1113	-----
		45	30
	2	1113	15
		795	45
	3	900	30
		1113	15
	4	477	45
		795	30
115	1	900	-----
		1113	-----
230	2	477	45
		795	30
115	2	900	15
		1113	15
115	3	477	45
		795	30
115	3	477	15
		795	15

Además de los parámetros mencionados, el programa de cómputo[2] utilizado para hacer la estimación de ruido audible, necesita como parámetros adicionales, la distancia entre fases y la altura de los conductores sobre el nivel de piso. Estos se obtuvieron de un catalogo de torres con el modelo correspondiente[3].

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Es necesario mencionar que en la simulación, el ruido audible calculado es a una altura de 1 m sobre el nivel del suelo y en una trayectoria perpendicular a la trayectoria de la línea de transmisión.

El valor del nivel de ruido audible contra la distancia de la línea en la trayectoria mencionada se muestra en la figura 1.

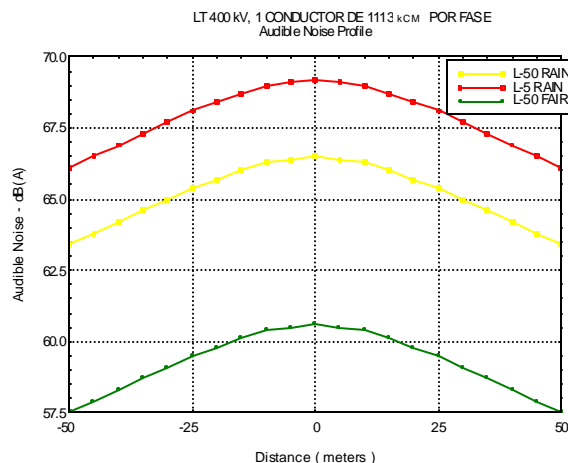


Figura 1

Es evidente que el nivel de ruido audible mayor es a cero metros, es decir debajo de la línea de transmisión. Se puede apreciar también que el nivel menor de ruido es a una distancia de 50 m de distancia de la línea de transmisión.

En las gráficas 1 a 4, se muestran los resultados de las simulaciones de las configuraciones de torres propuestas. El valor reportado es el valor justo debajo de la línea de transmisión que es el valor mayor para los tres casos, condiciones ambientales buenas, lluvia L₅, lluvia L₅₀.

Los resultados obtenidos del programa de cómputo refieren los valores a, condiciones de buen tiempo, lluvia ligera(L₅₀), lluvia intensa(L₅), los cuales podemos interpretar de la manera siguiente:

Condiciones ambientales buenas (buen tiempo).

El valor de ruido audible se calcula suponiendo un clima seco y sin contaminación.

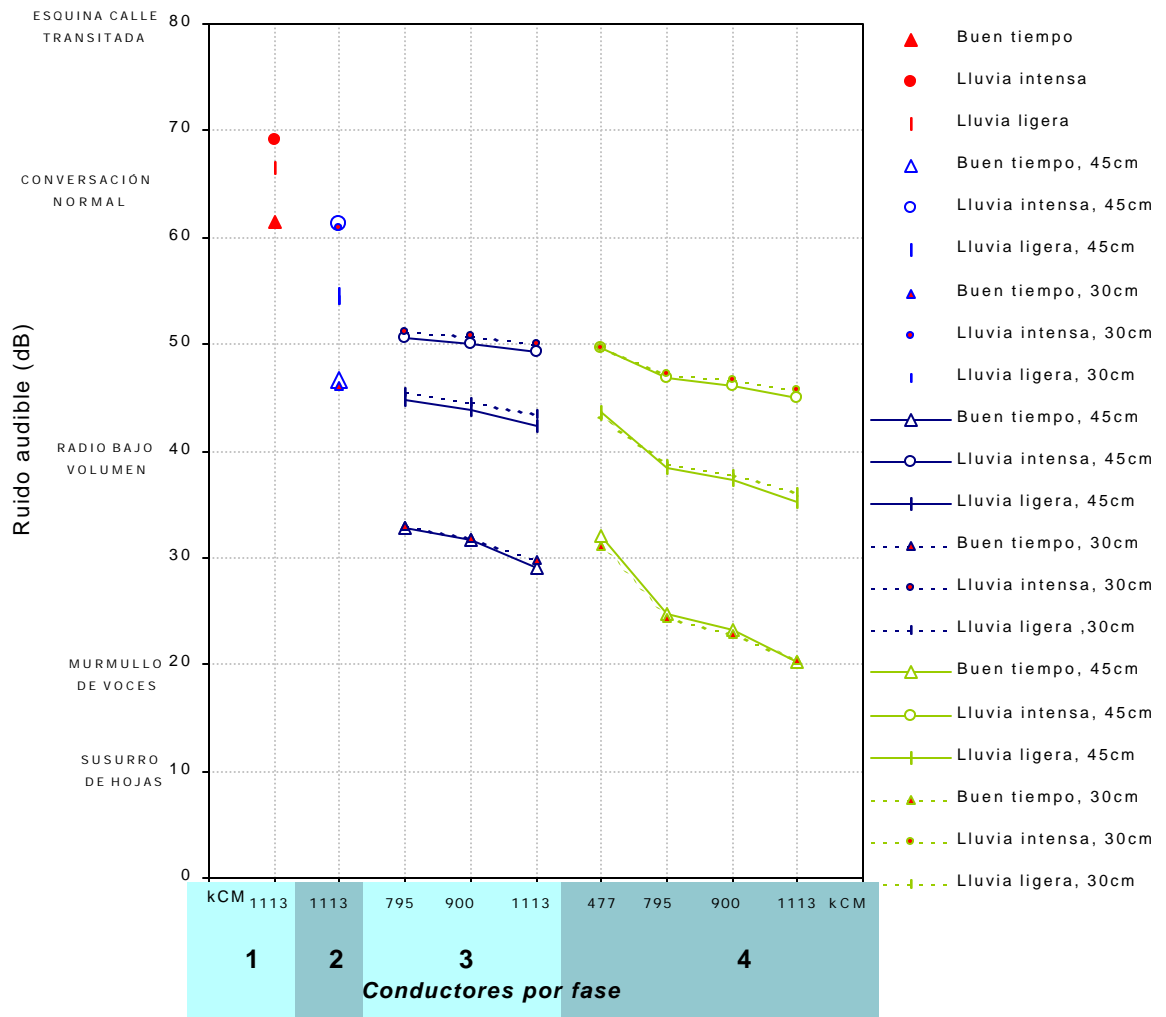
Lluvia ligera (L₅₀)

El valor de ruido audible se calcula considerando una precipitación pluvial promedio durante el tiempo de observación.

Lluvia Intensa (L₅)

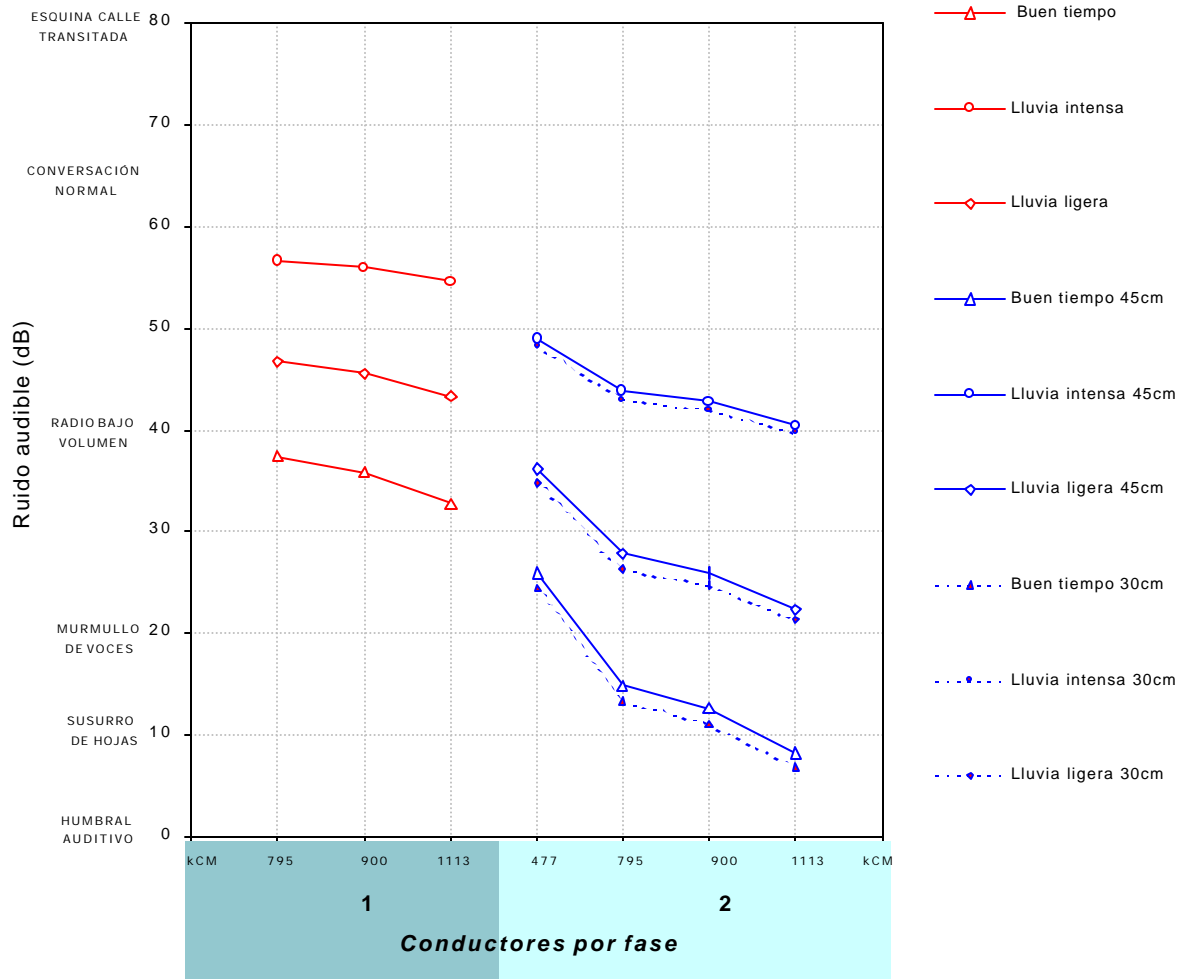
El valor de ruido audible se calcula considerando el nivel mas alto de precipitación pluvial que se mantuvo durante el 5% del tiempo de observación.

RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 400 kV.



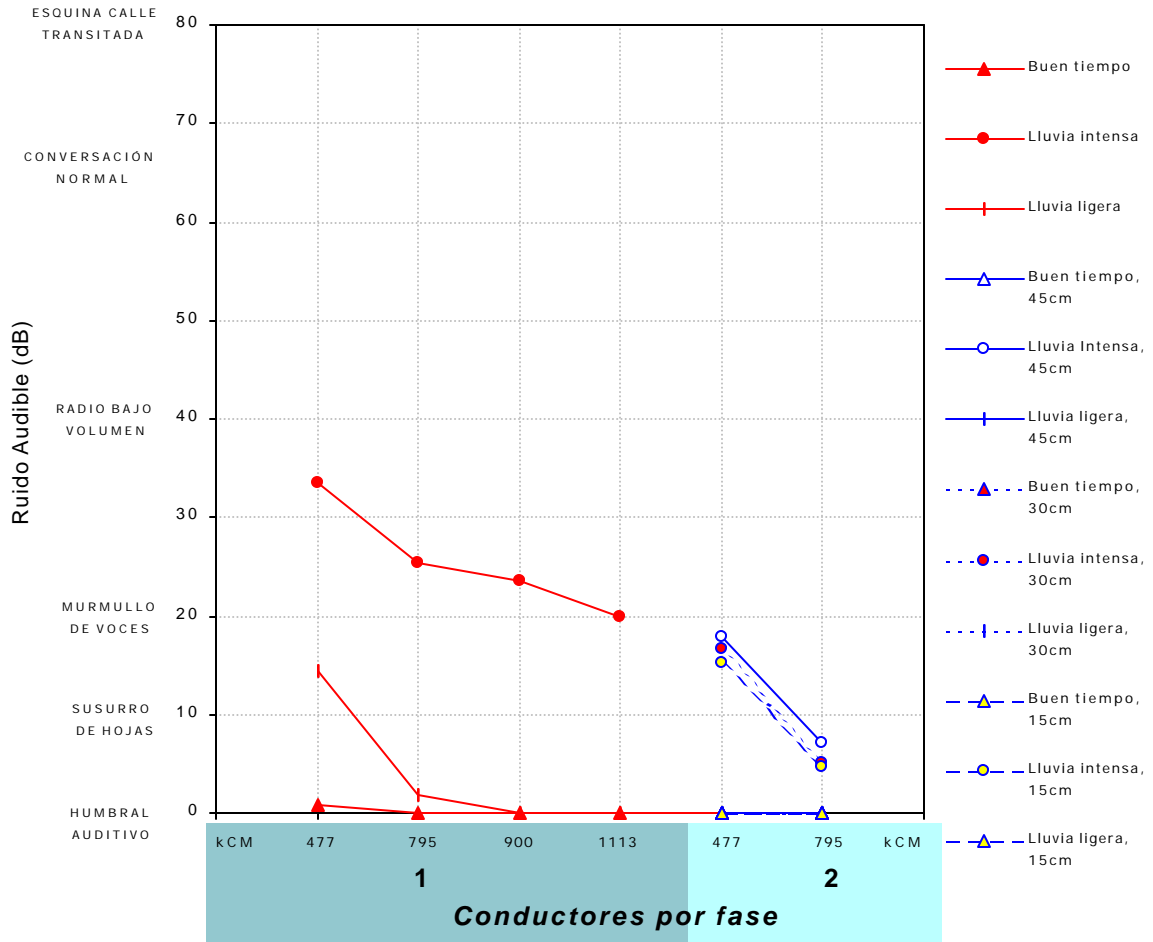
Gráfica 1.

RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 230 kV, 1 CIRCUITO.



Gráfica 2

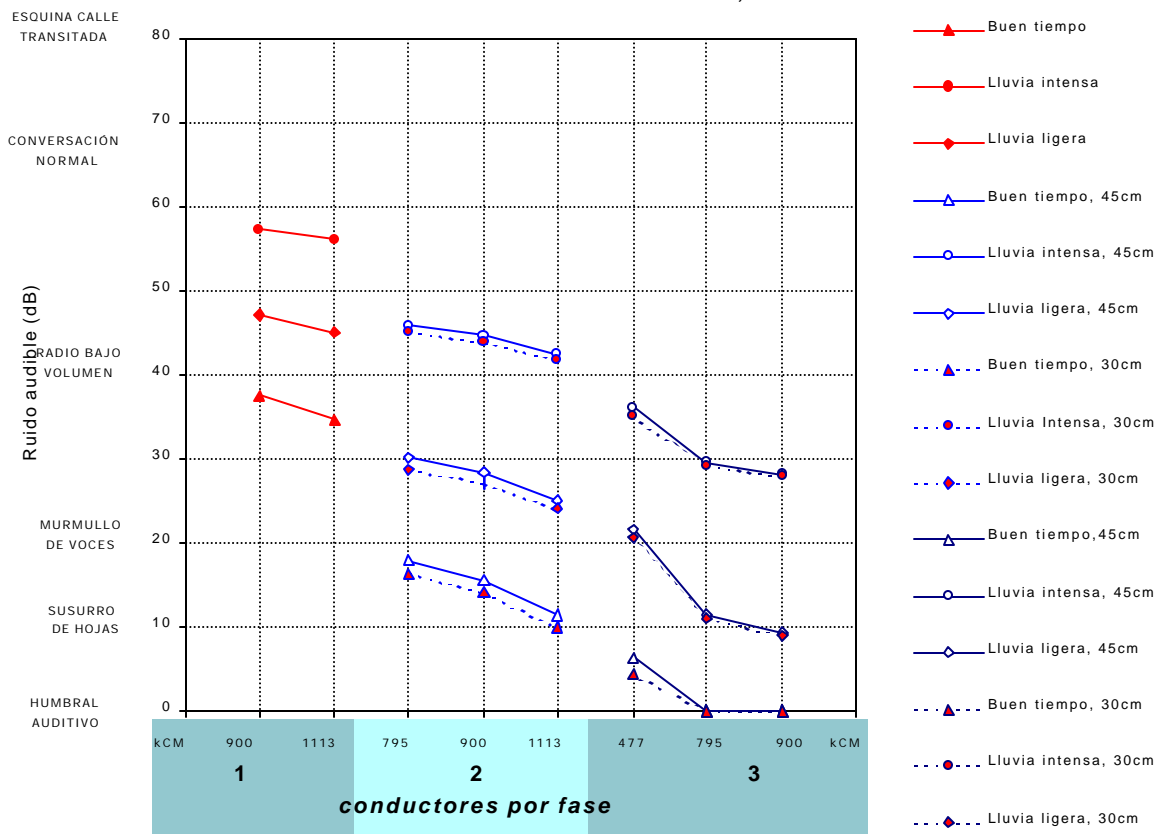
RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 115 kV, 1 CIRCUITO.



Gráfica 3

Debido a que en se prevé la necesidad de aumentar la capacidad de transmisión en líneas existentes de 230 kV con un circuito, adicionalmente se realizaron simulaciones con uno, dos y tres conductores, para líneas 230 kV, con dos circuitos.

RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 230 KV, 2 CIRCUITOS.



Gráfica 4

Análisis de resultados

En las gráficas anteriores se hace referencia a algunas situaciones con niveles de ruido más conocidos. Esto tiene el fin de proporcionar una idea más clara de los resultados obtenidos.

En la tabla 2 se muestran los niveles de ruido de algunas situaciones comunes.

Tabla 2 Niveles de ruido audible comunes.

Sonido	Nivel de intensidad, dB
Umbral de audición	0
Susurro de hojas	10
Murmullo de voces	20
Radio a bajo volumen Ruido normal de oficina	40
Conversación normal	65
En una esquina de una calle transitada	80
Transporte subterráneo	100
Umbral de dolor	120
Motor de propulsión	140 - 160

Para el caso que nos ocupa el ruido ambiente, en campo libre y alejado de la ciudad, (donde generalmente se hace el monitoreo de ruido audible en LT) es próximamente de 30 dB.

Dado que nivel de ruido audible que se reporta en las gráficas 1 a 4, es justo debajo de la LT (Valor máximo de ruido), la atenuación de este valor a la orilla del derecho de vía (15m del centro de la LT) es aproximadamente de 2 dB.

Líneas de transmisión de 400 kV.

- ❑ Considerando condiciones ambientales buenas ⁽¹⁾ y de acuerdo a los resultados de la gráfica 1, para el caso de conductor de 1113 kCM ⁽²⁾, se observa que la reducción aproximadamente es de 24% al cambiar de 1 conductor por fase a 2 conductores por fase. Así mismo, en el caso de utilizar 3 conductores por fase en lugar de 1 conductor por fase la reducción es de 48,63%.
- ❑ En la gráfica 1 también se puede apreciar que en la mayoría de los resultados, la separación de 45 cm entre los conductores por fase, tiene un nivel de ruido menor que si esta separación es de 30 cm. Aunque en esta gráfica no se muestran los resultados de simulaciones con una separación entre conductores por fase de 15 cm, se observó que con respecto a la separación de 45 cm, el ruido aumenta aproximadamente un 20% para el caso de condiciones ambientales de buen tiempo y 3

conductores por fase de 1113 kCM, separados 15 cm.

- ❑ Aun que la configuración de un conductor por fase de 1113 kCM, no es frecuente utilizarlas para LT de 400 kV, Se presentan aquí los resultados de la simulación como un caso extremo de niveles de ruido en LT:

Notas

- (1) Se consideran condiciones ambientales buenas (buen tiempo) debido a que son las que predominan el mayor tiempo.
- (2) Se considera el conductor de 1113 kCM por ser el que con mayor frecuencia se utiliza en líneas de 400, 230 y 115 kV.
- (3) La separación entre subconductores por fase para este caso es de 30 cm.

Líneas de transmisión de 230 kV.

- ❑ Considerando conductores de 1113 kCM y una separación entre conductores de 30 cm, el ruido audible se reduce aproximadamente (en el mayor de los casos, torre tipo B), un 79% si se utilizan 2 conductores de 1113 kCM por fase en lugar de uno.
- ❑ La separación de 30 cm entre los conductores por fase, para el caso de líneas de 230 kV, representa una disminución del ruido de aproximadamente 7% en el mejor de los casos, con respecto al ruido generado por esta configuración, pero con 45cm de separación entre conductores por fase.
- ❑ Al igual que en LT de 400 kV, la de separación de 15 cm entre conductores por fase de LT de 230 kV, el ruido aumenta considerablemente.
- ❑ De la gráfica 4, se puede ver que al aumentar de un circuito a dos circuitos una LT de 230 kV, el ruido aumenta alrededor de 5 %, lo cual no es muy significativo dado el beneficio que esto representa.

Líneas de transmisión de 115 kV.

- ❑ Considerando condiciones críticas de lluvia intensa (L_5) y un conductor de 1113 kCM, el ruido audible se reduce un 75% si se utilizan 2 conductores de 795 kCM por fase ⁽³⁾, en lugar de uno de 1113 kCM.
- ❑ Para una configuración de tres conductores por fase de 477 kCM, el ruido audible generado aun en la condición de lluvia intensa, es de 0

dB (teórico), por esta razón no se representan estos resultados en la gráfica 3.

- Contrario a lo que se pudiera pensar, para un sistema de 115 kV la separación entre conductores por fase, que presenta menor generación de ruido es de 15 cm.

DESARROLLO DE LA SEGUNDA ETAPA DEL ESTUDIO.

La segunda etapa del estudio, consiste en la implementación de pruebas en el LAPEM de las configuraciones, que tomando como base los resultados de las simulaciones, resultan ser las más representativas.

De la gráfica 2, para líneas de transmisión de 230 kV, se proponen las configuraciones siguientes:

- 1 conductor de 900 kCM por fase.
- 2 conductores de 795 kCM por fase y separación entre subconductores de 30 cm.
- 2 conductores de 900 kCM por fase y separación entre subconductores de 30 cm.

De la gráfica 4, para líneas de transmisión de 400 kV, se proponen las configuraciones siguientes:

- 1 conductor de 1113 kCM por fase.
- 3 conductores de 1113 kCM por fase y separación entre subconductores de 45 cm.

Estas configuraciones se consideran las más críticas y representativas de estos niveles de tensión.

Para sistemas de 115 kV, no se proponen configuraciones a implementar, ya que los niveles de ruido audible generado no son significativos.

CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos, se concluye que para los tres niveles de tensión existe una reducción superior al 20%, cuando se aumenta de un conductor por fase a dos conductores por fase. Cuando se aumenta el calibre del conductor (aproximadamente en 200 kCM), en configuraciones de 1, 2 ó 3 conductores la reducción del nivel de ruido es aproximadamente de 15 % como máximo.

Para sistemas de tensión de 230 kV, se observa que una línea con dos circuitos genera aproximadamente de 3% a 5% más de ruido que una línea con un circuito.

En general la separación entre conductores por fase que presenta menor generación de ruido, es 45, 30 y 15 cm, para niveles de tensión de 400, 230 y 115 kV, respectivamente. Sin embargo instalar conductores por fase con una separación de 45 cm en niveles de tensión de 230 y 115 kV, no aumenta significativamente la generación de ruido audible y desde el punto de vista de construcción representa una práctica útil.

De todo lo anterior se concluye que para la reducción del ruido audible, es más recomendable aumentar el número de subconductores por fase, que aumentar el calibre del conductor, manteniendo el mismo número de conductores por fase.

REFERENCIAS

[1] J.A. Molino, et al. "Initial Psychoacoustic Experiments on the Human response to Transmission Line Audible Noise" U.S. Department of Energy contract EA-77-A-01-6110-AO-17-1. Report DOE/ET/6010-1.

C. Merritt, J.E.K. Foreman. "A Psychoacoustic Pilot Study to Determine the response of People to Audible High-Voltage Transmission Line Noise" B.E.Sc. Thesis. Ontario, Canada: University of Western Ontario, March 1980.

[2] Package (software) was prepared by the organization(s) named below as an account of work sponsored or cosponsored by the Electric Power Research Institute, inc (epri).

[3] Catálogo de Torres: 400 kV, 230 kV Y 115 kV. Coordinación de Proyectos de transmisión y Transformación.

[4] Transmisión Line Reference Book 345 kV and Above/second Edition

Prepared by
Project UHV
Technical Resource Operation
Large Transformer Division
General Electric Co.
Pittsfield, Massachusetts

Electric Power Research Institute.

[5] NOM-011-STPS-1994
Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido

CURRICULUM VITAE

Sergio A. Corrales Sánchez. Ingeniero Electricista egresado de la FIMEE, Universidad de Guanajuato. Desempeñándose Actualmente en la Oficina Sistemas de transmisión del LAPEM, actualmente cursando la Maestría en Alta Tensión en la FIMEE de la Universidad de Gto.

Fernando Elizarraraz Rivera. Ingeniero Electricista egresado de la FIMEE, Universidad de Guanajuato. Desempeñándose Actualmente en la Oficina Sistemas de transmisión del LAPEM, actualmente cursando la Maestría en Alta Tensión en la FIMEE de la Universidad de Gto.

Juan Bautista Flores. Ingeniero Industrial en Electricidad (Cédula profesional 60277) del Instituto Tecnológico Regional de Veracruz, de 1974 a 1982 laboro en el Area de Transmisión y Transformación Oriente de CFE, desde 1982 a la fecha a laborado en la Coordinación de transmisión y Transformación actualmente desempeña el cargo de Gerente Nacional de Subestaciones y Líneas de Transmisión.

Francisco Santander Velázquez, Ingeniero Electricista (Cédula profesional 722993) del Instituto Politécnico Nacional, Diplomado en estudios de Maestría en la Universidad Autónoma de Morelos. Desde 1976, labora en la Comisión Federal de Electricidad, desempeñando varios puestos en la especialidad de Subestaciones y Líneas de Transmisión tanto en equipo primario de Centrales como Subestaciones de Potencia receptoras. Actualmente ocupa la Subgerencia Nacional de Líneas de Transmisión de la Subdirección de Transmisión, Transformación y Control.