INFORME CONFIDENCIAL APROBADO C5012405

Cliente Interchile S.A.

Objeto Análisis de la emisión de ruido audible de la Línea de Transmisión Eléctrica Cardones-Polpaico 500 kV y análisis de alternativas de mitigación

Orden ---

Notas

La reproducción parcial de este documento sólo está permitida con el permiso escrito de CESI.

N.º de páginas 26 **N.º de páginas anexas**

Fecha de emisión 15/07/2025

Preparado por SCH – Alessandro Valsecchi

Verificado por CEN – Francesco Rizzo

Aprobado por CEN – Stefano Malgarotti

Mod. RAPP v. 1

CESI SpA
Via Rubattino 54
I-20134 Milano - Italy
Tel: +39 02 21251
Fax: +39 02 21255440
e-mail: info@cesi.it
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150
P.I. IT00793580150
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2025 by CESI. All rights reserved.

Tabla de contenido

1 DOCUMENTOS DE REFERENCIA Y NORMAS 4

1.1 Documentos de referencia 4
1.2 Abreviaturas 4

2 INTRODUCCIÓN 5

3 MARCO CONCEPTUAL SOBRE EL EFECTO CORONA 6

3.1 Gradientes de Conductores 7
3.2 Ruido audible 9

4 CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN 10

5 SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN Nº1: TRANSICIÓN A UNA SECCIÓN SUBTERRÁNEA DE LA LÍNEA 14

6 SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN Nº2: DIVISIÓN DE LA LÍNEA DE DOBLE CIRCUITO EN DOS LÍNEAS INDEPENDIENTES DE CIRCUITO ÚNICO 17

7 SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN Nº3: INSTALACIÓN DE ANILLOS DE CORONA EN LAS CADENAS DE AISLAMIENTO 20

8 CONCLUSIÓN 26

HISTORIAL DE REVISIONES

Número de revisión	Fecha	Protocolo	Lista de modificaciones y/o párrafos modificados
0	15/07/2025	Versión Inicial	Primera emisión
1	25/08/2025	Borrador 1	Revisado según los comentarios del cliente.
2	10/09/2025	C5012405	Revisado según los comentarios del cliente.
3	18/09/2025	C5012405	Revisado según los comentarios del cliente.
4	24/09/2025	C5012405	Revisado según los comentarios del cliente 23/09/2025

1 DOCUMENTOS DE REFERENCIA Y NORMAS

1.1 Documentos de referencia

[1] Carta N°20259910322 de 05 de agosto de 2022 de Servicio de Evaluación Ambiental. Materia: Solicita información
[2] Carta N°202599103225 del Servicio de Evaluación Ambiental Chile
[3] LINE DIAGRAM-500KV-AZ2- REVISED_Valido
[4] DEE_1971_2024_Rev 1_SAE TOWERS_LabEAT_Ass_DEE - Español (Cadena Suspensión Sin Anillo Protector)-Aprobado
[5] DEE_1972_2024_Rev 1_SAE TOWERS_LabEAT_Ass_DEE - Español (Cadena Suspensión Con Anillo Protector)-Aprobado
[6] DEE_1973_2024_Rev 1_SAE TOWERS_LabEAT_Ass_DEE - Español (Cadena Anclaje Doble Sin Anillo Protector)-Aprobado
[7] DEE_1974_2024_Rev 1_SAE TOWERS_LabEAT_Ass_DEE - Español (Cadena Anclaje Doble Con Anillo Protector)-Aprobado
[8] Decreto Supremo (D.S.) N° 38 de 2011 del Ministerio del Medio Ambiente de Chile
[9] Cigrè Green Book
[10] Cigrè TB 638 “Guide to Overall Line Design”

1.2 Abreviaturas

Abreviatura	Descripción Completa
ACAR	Conductor de Aluminio Reforzado con Acero
CEN	Comité Europeo de Normalización
CENELEC	Comité Europeo de Normalización para la Normalización Electrotécnica
GW	Cable de Tierra
HVAC	Corriente Alterna de Alto Voltaje
IEC	Comisión Eléctrica Internacional
LTE	Línea de Transmisión Eléctrica
OPGW	Cable de Tierra Óptico
AN	Ruido Audible
RI	Interferencia de Radio
a.s.l.	Sobre el nivel del mar
ROW	Derecho de paso
S/S	Subestación
T/L	Línea de Transmisión
UG	Subterráneo
EPRI	Electric Power Research Institute
BPA	Bonneville Power Administration

2 INTRODUCCIÓN

La Línea de Transmisión Eléctrica (LTE) Cardones-Polpaico conecta las subestaciones eléctricas desde la S/E Cardones (Región de Atacama) a la S/E Polpaico (Región Metropolitana) con una línea de transmisión de doble circuito con una tensión nominal de 500 kV y una longitud aproximada de 753 km.

Carta N°202599103225 del Servicio de Evaluación Ambiental Chile[2] relevantes para la Línea de Transmisión Eléctrica de alta tensión Cardones-Polpaico, en particular, lo planteado por la Autoridad Ambiental en la consulta N°10 de la Carta mencionada.

En el "ICSARA de Ruido – Pregunta 10 (Carta N°20259910322 del Servicio de Evaluación Ambiental)", la Autoridad Ambiental propone tres soluciones diferentes que podrían mitigar el límite de Ruido Audible (AN) y se resumen a continuación.

"Se requiere al Titular evaluar mejores técnicas u otro tipo de medidas ar atenuar las emisiones de ruido asociadas al Efecto Corona, tales como: - La modificación de la configuración de la LTE de 3 fases de doble circuito a 6 fases de circuito simple, en tramos seleccionados. - Soterrar la LTE, en tramos seleccionados (afectados), similar a lo realizado en el tramo de la LTE tramo Los Maquis-Polpaico: y/o - Implementar anillos anti-corona en los extremos de los aisladores de cada una de las fases de las torres cercanas a los receptores afectados, en particular donde existen distancias críticas de cumplimiento.

Por lo tanto, se solicita al Titular en base a lo anteriormente expuesto dar una respuesta fundada y presentar la información necesaria y completa para subsanar las observaciones antes detalladas con el objeto de adoptar las medidas necesarias para corregir la variación sustantiva de la variable ruido en la evaluación ambiental del Proyecto, según lo establecido el artículo 25 quinquies de la Ley N°19.300."

1. *Transición a una sección subterránea de la línea.*
2. *División de la línea de doble circuito en dos líneas independientes de circuito único.*
3. *Instalación de anillos Corona en cadenas de aislamiento.*

3 MARCO CONCEPTUAL SOBRE EL EFECTO CORONA

Dado que el Ruido Audible (AN) y otras perturbaciones de la transmisión de energía eléctrica se deben al efecto corona[1], el alcance de este párrafo es explicar el fenómeno y sus efectos.

Cuando los conductores de una línea de transmisión están bajo tensión eléctrica, se genera un campo eléctrico y gradiente de voltaje en su superficie (gradiente superficial del conductor). Si este gradiente superficial supera un cierto límite (gradiente pico, corona crítica o gradiente establecido), se inician las descargas de corona. Los fenómenos de descarga eléctrica producen diversos efectos (pérdida de potencia, campos electromagnéticos de alta frecuencia, emisión acústica y luminosa, generación de iones y ozono). Una persona que se encuentre cerca de una línea aérea cuyos conductores y/o conjuntos estén bajo corona a veces puede oír un ruido especial: sonidos de freír, crujidos y silbidos, y zumbidos de baja frecuencia.

Estos efectos están influenciados por las características de la línea de transmisión (tamaño del conductor, configuración del haz, espaciado de fases, altura del conductor a tierra, gradiente de la superficie del conductor y condiciones atmosféricas (temperatura, presión, lluvia, nieve, etc.).

El efecto corona de las líneas de transmisión producen principalmente dos tipos de perturbaciones sobre el **medio ambiente**, a saber:

- El Ruido de Radio o Radio Interferencia (IR) es una perturbación dentro de la banda de radiofrecuencia, como ondas eléctricas no deseadas en cualquier canal o dispositivo de transmisión. La banda de frecuencia es de 500 kHz a 1500 kHz (banda AM). La frecuencia de 1000 kHz (1 MHz) se suele tomar como referencia para el cálculo de la IR.
- Ruido Audible (AN) producido por el efecto corona en los conductores de líneas de transmisión. En condiciones secas, los conductores suelen operar por debajo del nivel de inicio del efecto corona y la presencia de fuentes de este efecto es mínima. El ruido audible de las líneas de transmisión de corriente alterna se produce principalmente en condiciones climáticas adversas, tomando en consideración que, con lluvia fuerte, el ruido del efecto corona no es perceptible en razón a que la lluvia genera un ruido de mayor intensidad. Sin embargo, en general, se puede afirmar que los sistemas de transmisión contribuyen muy poco en comparación con el ruido producido por otras fuentes.

Ambas perturbaciones se originan en función de las características de las líneas de transmisión.

A continuación, en los párrafos siguientes se señalarán algunas definiciones y conceptos asociados al Efecto Corona, que permiten comprender su procedencia y manifestación.

[1] Para el presente documento se empleará: “efecto Corona”, “Corona”, “Fenómeno Corona” u otro afín, para referirse a los efectos del ruido audible que genera la transmisión de energía eléctrica.

3.1 Gradientes del haz de conductores

Dentro de las estimaciones del efecto corona es fundamental considerar el llamado “gradiente crítico”, variable definida en la literatura técnica para indicar un estimado del límite, en ciertas condiciones eléctricas y ambientales, para la manifestación del efecto corona.

El gradiente crítico “g_c” se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$g_c = m g_0 \delta \left[1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}}\right]$$

dónde:

- m factor de rugosidad de la superficie del conductor
- g_0 gradiente de inicio de corona kV/cm
- δ densidad relativa del aire
- K constante empírica
- r radio del conductor

El cálculo del gradiente superficial del conductor se realiza a través de los coeficientes de potencial de Maxwell como se indica a continuación.

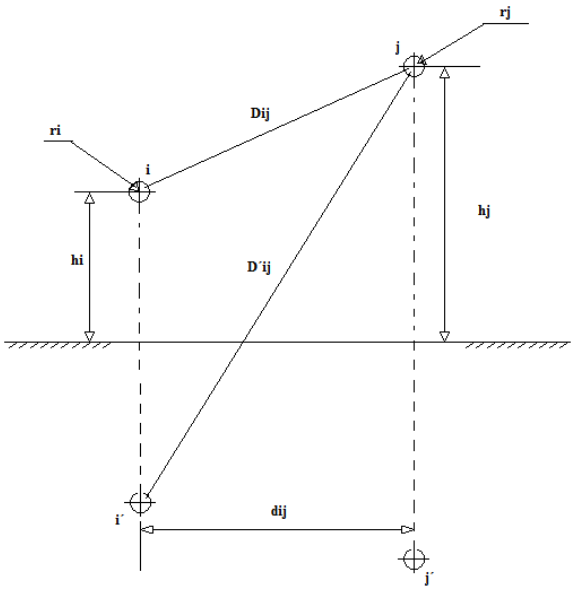


Figura 1: Esquema de gradiente de la superficie del conductor

Para una LTE aérea, la relación entre la carga (Q) y el voltaje (V) en los conductores o el cable de tierra viene dada por:

$$[V]=[\lambda][Q]$$

dónde:

- V_i y Q_i voltaje y carga del conductor i.
- λ_{ij} coeficientes de los potenciales de Maxwell

Los coeficientes de Maxwell se calculan según las siguientes fórmulas:

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i}$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}$$

dónde:
- r_i radio del conductor individual o cable de tierra. En el caso de un haz, r_i se sustituye por el radio equivalente del haz.
- h_i altura del conductor.
- D_{ij} distancia entre conductores.

Es importante subrayar que:
- $V = (V_r + j\, V_i)$
- $Q = (q_r + j\, q_i)$
- V y Q son números complejos.

Invirtiendo la matriz de potenciales de Maxwell, se puede determinar la carga en los conductores.

$$[Q]=[\lambda]^{-1}[V]$$

Dado que la carga total se considera distribuida de manera uniforme en los n conductores del haz, el gradiente promedio g_a de un conductor en el haz es:

$$g_a = \frac{1}{n} \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

dónde:
- r radio de los conductores
- n número de subconductores en el haz
- ε_0 permitividad de vacío

El gradiente máximo medio g de un conductor en el haz es:

$$g = g_a \left[1 + \frac{(n-1)r}{R}\right]$$

dónde:
- R Radio del haz

En síntesis, el "gradiente del haz de conductores" representa la tasa de cambio del potencial eléctrico con la distancia, y se expresa como el campo eléctrico.

3.2 Ruido audible

El ruido audible proviene de las variaciones de presión atmosférica causadas por las descargas corona. BPA y EPRI han desarrollado una fórmula de CIGRE para los niveles de AN L_5 para "conductor mojado" a partir de AN L_{50}: en un enfoque estadístico, el sufijo 5 o 50 indica la probabilidad de que se supere el valor calculado; AN L_5 (5% de probabilidad de ser superado) y AN L_{50} (50% de probabilidad de ser superado).

La siguiente fórmula es válida para el voltaje de línea entre 230 – 1500 kV, n ≤ 16, 2 ≤ d ≤ 6.5 cm

$$\Gamma A_{50} = K_1 + 120 \log g + K_2 \log n + 55 \log d + \frac{q}{300}$$

dónde:
- g gradiente superficial máximo (kV/cm)
- n número de conductores en el haz
- d diámetro del conductor(cm)
- q elevación (m a.s.l.)

	K1	K2
- n < 3	−169.7	0
- n ≥ 3	−182.7	26.4

Para el cálculo del nivel promedio de ruido con tiempo despejado, al cálculo antes indicados hay que reducir 25 dBA.

$$\Gamma A_5 = \Gamma A_{50} + 3.5$$

El nivel de AN a una distancia D desde el punto de producción del ruido en dBA es:

$$LA = \Gamma A_n + 54.3 - 11.4 \log D$$

La suma de los valores de presión individuales de todas las fases da como resultado la presión sonora total en el punto:

$$LA_{Tot} = 10 \log \sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{LA_i}{10}}$$

En lo específico, el efecto corona es una descarga eléctrica visible que ocurre en el aire alrededor de un conductor con alta tensión, producida por la ionización del aire debido a la intensidad del campo eléctrico. Se manifiesta como un resplandor azulado, a menudo acompañado de un sonido agudo o zumbido (ruido audible), y se debe a que el aire, normalmente un aislante, se vuelve conductor por la concentración de cargas. Este fenómeno, que puede causar pérdidas de energía y degradación de equipos, depende de factores como la humedad, la altitud y las irregularidades en la superficie de los conductores. Por tanto el ruido audible es el sonido, descrito como un zumbido, que se escucha en las líneas de transmisión debido al efecto corona[2].

[2] Oliver PISCHLER, Uwe SCHICHLER y Isobel GREEN. B2- Improved model for overhead line audible noise prediction. Documento em linea < CSE N°35 December 2024>

4 CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

La Línea de Transmisión Eléctrica Cardones-Polpaico es de doble circuito y está equipada con cadena de aisladores compuestos (poliméricos) en forma de “I sencillas o II para cadenas dobles”. El esquema de la torre se muestra en Figura 3. La cadena de aisladores se muestra en Figura 4.

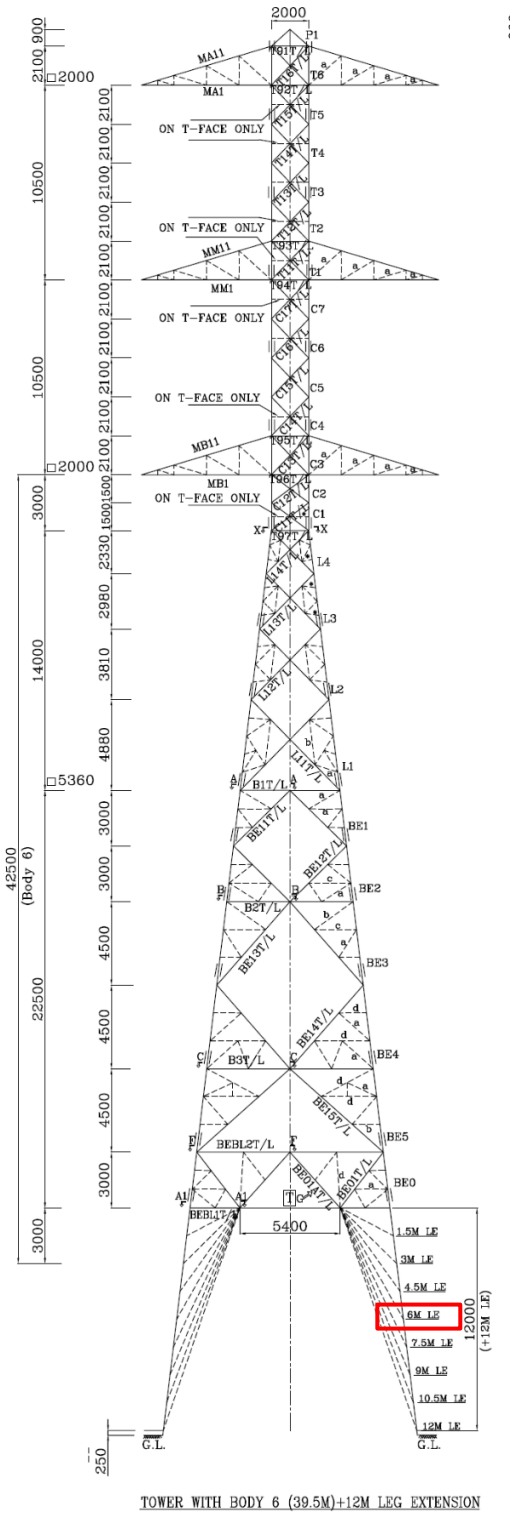
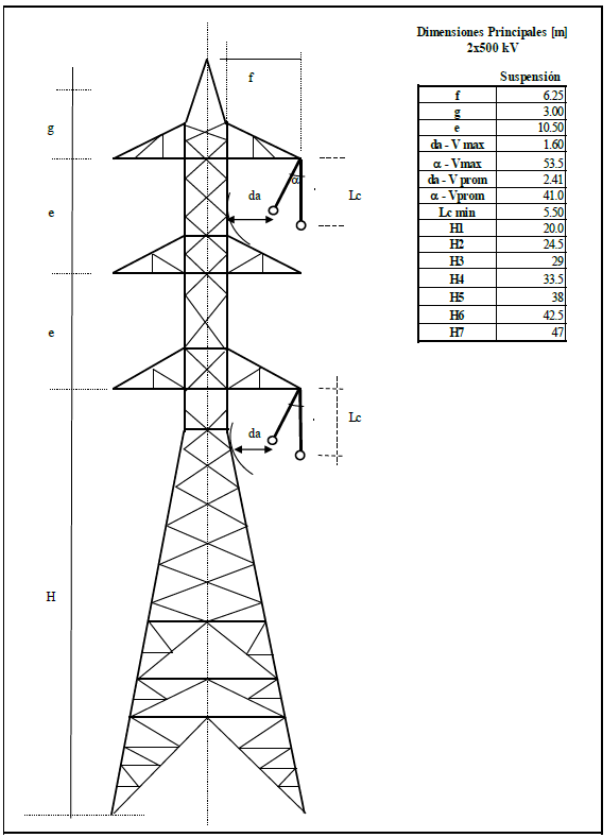


Figura 2: Esquema de la torre

El esquema de la torre considerado en el presente estudio se muestra en la Figura 2. La torre es de tipo suspensión y forma parte de la familia de torres adoptadas en la línea Cardones-Polpaico: está compuesta por Cuerpo 6 (42.5 m) y extensión de pata de +4.5 metros para una altura total de torre aproximada de unos 70 m.

El diagrama que muestra las distancias eléctricas que debe respetar la geometría de la torre, se indica en la Figura 3.



Dimensiones Principales [m]
2x500 kV

	Suspensión
f	6.25
g	3.00
e	10.50
da - V max	1.60
α - Vmax	53.5
da - V prom	2.41
α - Vprom	41.0
Lc min	5.50
H1	20.0
H2	24.5
H3	29
H4	33.5
H5	38
H6	42.5
H7	47

Figura 3: Esquema de distancias eléctricas de la torre

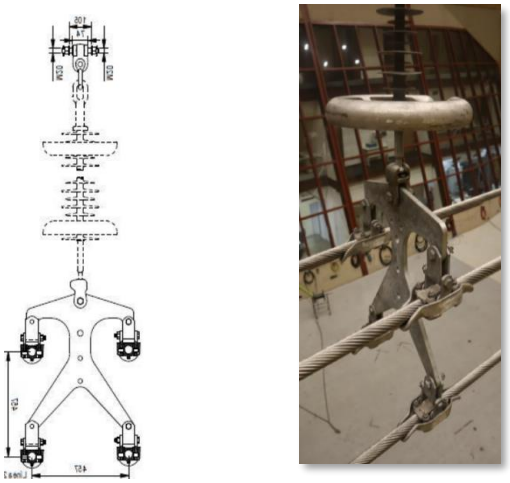


Figura 4: Cadena de aisladores: detalle del conjunto de Suspensión

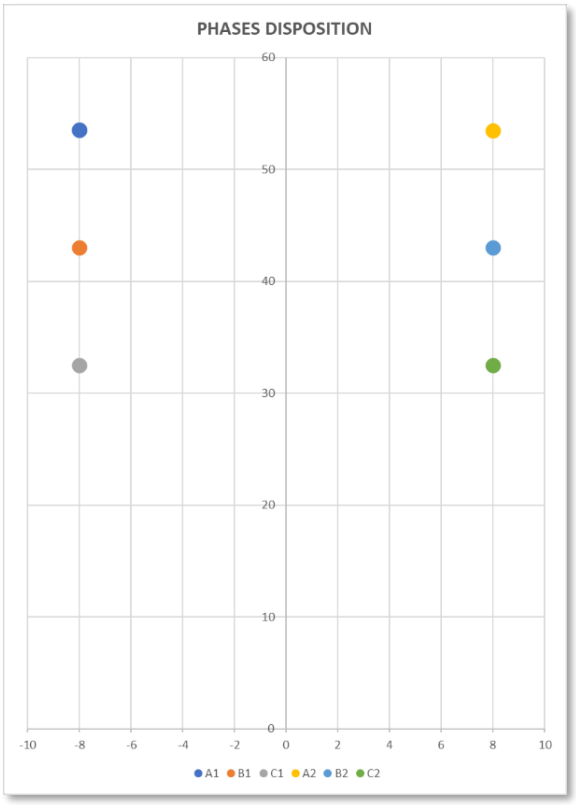
Según [2], el análisis a nivel de AN se ha realizado en la torre T413 para un receptor situado a 32 m horizontalmente del eje de la línea.

Las características de la línea se resumen a continuación:

Tabla 1: Características de la línea

Línea	
Voltaje	500 kV
N. de circuitos	2
Conductor	
Tipo	ACAR 700
Diámetro	24.5 mm
Configuración del haz	Quad
Distancia entre subconductores	45.7 cm

La geometría de la torre T413 es la siguiente:



Circuito/Fase	Distancia horizontal desde el eje de la línea [m] (abscisa)	Distancia al suelo [m] (ordenada)
1.1	-8	53.5
1.2	-8	43
1.3	-8	32.5
2.1	8	53.5
2.2	8	43
2.3	8	32.5

Figura 5: Disposición de fases

Todos los cálculos y análisis se han realizado según la metodología CIGRE indicada en [9] y [10], referencias bibliográficas ampliamente usadas en Europa, América y países de otros continentes, proporcionando un enfoque a la evaluación de AN con los mismos supuestos indicados en [2]:

- no se ha considerado la flecha del conductor
- factor de rugosidad m=0.5
- temperatura del aire 10 °C
- presión atmosférica de referencia 76 cm Hg a 25 °C.

Cabe señalar que las condiciones de rugosidad del conductor, así como las condiciones ambientales mencionadas anteriormente son muy conservadoras y pueden llevar a una sobrestimación del RI y AN.

El factor de rugosidad indica las condiciones de la superficie del conductor y afecta el gradiente crítico. Los conductores de línea están compuestos de hilos que pueden presentar irregularidades superficiales, como muescas, arañazos, etc., producidas durante su manipulación e instalación. Además, durante el funcionamiento normal de una línea de transmisión, pueden depositarse sobre los conductores sustancias orgánicas (hojas, insectos, etc.) e inorgánicas (polvo, arena y otros contaminantes atmosféricos). Estudios experimentales muestran que, para conductores trenzados razonablemente limpios, el factor *m* oscila entre 0.75 y 0.85. Las irregularidades de la superficie pueden reducir la variable *m*, a valores entre 0.6 y 0.8, mientras que los depósitos en la superficie del conductor y las precipitaciones (lluvia, nieve, etc.) pueden reducir aún más dicha variable *m* a valores entre 0.5 y 0.7.

En el cálculo de CIGRE se adopta un valor para *m* de 0.82. Un valor seguro es 0.75.

En síntesis, la selección del valor m=0.5 en el presente estudio refleja una condición conservadora para conductores expuestos a humedad y contaminación

5 SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN Nº1: TRANSICIÓN A UNA SECCIÓN SUBTERRÁNEA DE LA LÍNEA

El enterramiento o soterramiento de una sección de la línea podría ser una solución adecuada, siempre y cuando la única variable a considerar fuese en términos de Ruido Audible AN, pero presenta dificultades en cuanto a permisos, construcción e impactos en el medio ambiente. La cantidad de cables necesarios para la línea de doble circuito de 500 kV, sería como mínimo de 12 cables o en la ingeniería de detalle podrían requerirse hasta 24 cables. Un esquema de la solución para este tipo de proyectos se muestra en las figuras 6 y 7.

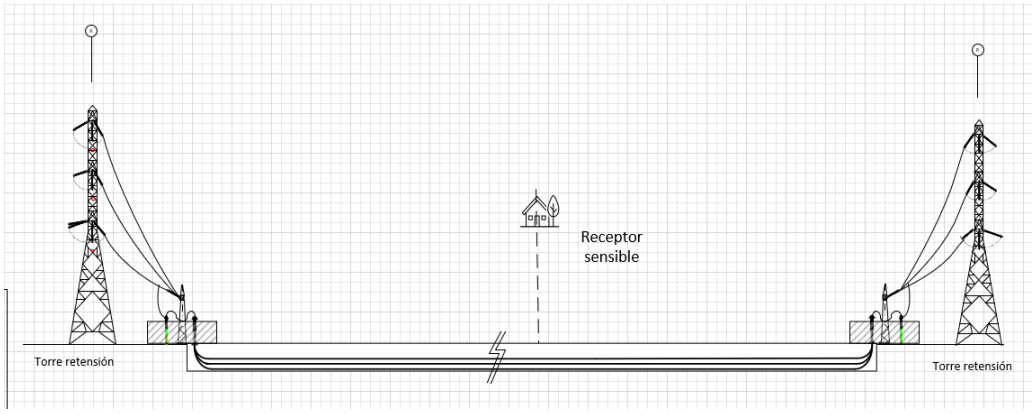


Figura 6: Perfil longitudinal del soterramiento de la línea

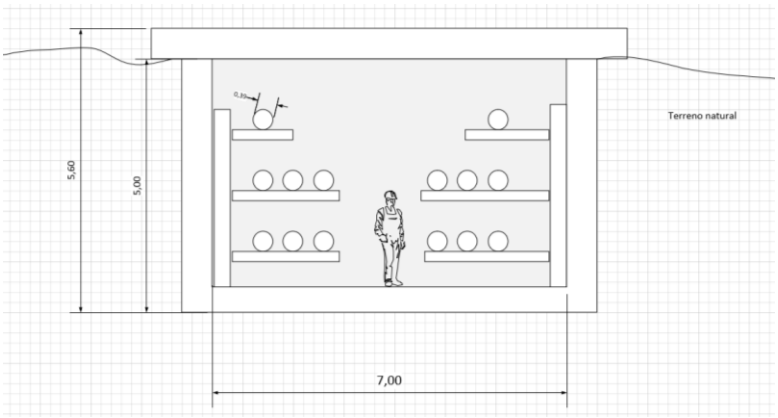


Figura 7: Sección de la zanja subterránea

Las líneas de transmisión subterráneas tienen varias desventajas en comparación con las líneas aéreas:

- Mayor tiempo de instalación: la planificación, los suministros y fabricación, la tramitación de permisos y la construcción requieren más tiempo que para las líneas aéreas. Esto puede retrasar significativamente los plazos del proyecto. En comparación con los proyectos existentes, el tiempo de construcción podría ser de al menos 12 meses, una vez se cuentan con todos los permisos y materiales para un tramo de hasta 4 km, al compararlo con un tramo de línea de transmisión aérea.
- En caso de no ser posible utilizar el corredor existente, se requerirá una nueva ruta.
- Riesgo de entrada de agua: la humedad puede dañar el aislamiento y provocar fallas, especialmente si el revestimiento del cable está comprometido.
- En términos de operación, los parámetros de la línea para la sección subterránea son diferentes a los de la porción aérea: esto debe ser manejado por el sistema de protección de la subestación que debe ser revisado para operar adecuadamente en caso de falla.
- Mantenimiento y reparaciones complejas: localizar fallas en cables subterráneos es más complejo y

requiere más tiempo. Las reparaciones requieren excavación, lo que puede interrumpir el tráfico y la infraestructura, especialmente en áreas urbanas. Recuperar el sistema ante fallas en líneas subterráneas puede demorar varios meses, en comparación con las líneas aéreas que se hacen en cuestión de días (menos de 1 semana).

- En la transición entre la línea aérea y el suelo se deben añadir equipos adicionales para la protección del cable; así como construcción de amplias cajas en concreto para permitir un adecuado radio de curvatura de los cables aislados, lo que también es un elemento de riesgo para la comunidad y la fauna y elementos que pueden también generar ruido, en esta ocasión, por la cercanía al suelo de los equipos eléctricos.
- Disipación de calor limitada: los cables subterráneos tienen un enfriamiento menos eficiente en comparación con las líneas aéreas. Esto puede limitar la capacidad de transporte de corriente y puede requerir sistemas de enfriamiento adicionales.
- Desafíos ambientales y de construcción: La instalación puede afectar la infraestructura existente, las raíces de los árboles y los ecosistemas y acuíferos. En zonas rocosas o anegadas, la excavación de zanjas puede ser particularmente difícil y costosa o de plano técnicamente inejecutable. En particular:
  1. Alteración del suelo y subsuelo
     - Remoción de capas de suelo fértil.
     - Compactación del terreno que afecta la infiltración de agua.
     - Afectación a cursos de agua natural subterráneos
  2. Afectación de ecosistemas
     - Daño a raíces de árboles y vegetación.
     - Fragmentación de hábitats naturales.
     - Perturbación de fauna subterránea (insectos, roedores, etc.).
  3. Contaminación
     - Emisión de polvo y partículas durante excavaciones.
     - Generación de residuos sólidos y líquidos.
  4. Ruido y vibración
     - Ruidos intensos por maquinaria pesada.
     - Vibraciones que pueden afectar estructuras cercanas y fauna sensible.
  5. Alteración del paisaje urbano
     - Cambios temporales o permanentes en la estética del entorno.
  6. Impactos sociales indirectos
     - Restricciones de acceso y movilidad para comunidades cercanas durante la construcción.
- Considerando una longitud de 2.5 km de la sección del cable, el volumen de excavación es de aproximadamente 87.500 m^3.
- Alto costo de instalación: la instalación de cables subterráneos es considerablemente más costosa debido a la necesidad de excavación de zanjas, aislamiento y capas protectoras, Adicionalmente al costo de los cables de alta tensión, los que valga la pena confirmar, solo un par de fabricantes a nivel mundial los pueden fabricar, con plazos que hoy oscilan entre 2 a 3 años Los costos pueden ser de 5 a 10 veces mayores que los de las líneas aéreas, dependiendo del terreno y la densidad urbana.

Tabla 2: Comparación entre línea de transmisión eléctrica subterránea y aérea

Característica	Línea Subterránea	Línea Aérea
Mantenimiento	Difícil y costoso	Más fácil y barato
Detección y reparación de fallas	Requiere mucho tiempo y es complejo	Rápido y sencillo
Resistencia a la Intemperie	Mejor (protegido del viento, tormentas) pero riesgo de entrada de agua y acceso de personas ajenas.	Vulnerable a las condiciones climáticas
Disipación de Calor	Pobre (podrían requerirse sistemas de refrigeración especiales)	Bueno (refrigeración de aire natural)
Campos Electromagnéticos (EMF) / Corona	Menor exposición a nivel del suelo	Mayor exposición cerca de las líneas
Alteración Ambiental	Alta durante la instalación	Baja durante la instalación
Vida Útil	Más larga (si se mantiene bien)	Más corta (condiciones ambientales, expuesta a los elementos)
Costo de Instalación	Muy alto (5–10 veces más caro)	Relativamente bajo
Impacto Estético	Mínimo (invisible)	Alto (torres y líneas visibles)
Impacto al ecosistema y al terreno	Proyectos con afectación metro a metro, con alto impacto a los ecosistemas y subsuelo por donde se construye	Bajo impacto, por el distanciamiento entre torres

En relación a líneas de transmisión de energía eléctrica de alta tensión soterradas en 500 KV existen solo unas 3 o 4 aplicaciones de muy poca longitud (no más de 1 km), y baja potencia, en los casos particulares de salidas de centrales hidroeléctricas, por ejemplo en China se ha hecho una instalación de un cable de 400 mts, en USA en California en Chino Hills se instaló un cable de 3,7 millas, pero parte del tramo en túnel y con perforación horizontal dirigida con 18 cables (la razón es que el cable enterrado pierde hasta el 60% de su capacidad de transmisión y para grandes potencias se deben colocar más conductores en paralelo). Ya en Sur América, en la Central Hidro Ituango en Colombia se cuenta con un circuito de 600 mts x 13 cables, esta aplicación no está soterrada, pero si es una solución en un túnel de servicio vertical de la central, que se encuentra en el medio de una central subterránea. Se menciona que en este sitio es aceptable, toda vez que el cable está en una instalación industrial y alejada de potenciales accesos de personas o animales y por ende bajo control total del propietario y que finalmente es la única solución factible para la extracción de la energía generada, caso muy diferente a una instalación a la que eventualmente pudiese ser accedida por personas o animales y generar un potencial accidente que podría ser de grande proporciones tanto para las personas, como ambientalmente lo que demuestra la complejidad de llevar a cabo una obra de este tipo, pues lleva al límite de capacidad de ejecución con altísimos riesgos al tratarse de voltaje tan elevados, diferentemente que en sistemas de 110 kV, donde los niveles de potencia son mucho más bajos y por ende sus impactos son mucho menores que en un sistema como la línea de transmisión Cardones Polpaico, de 500 kV donde se deben transmitir más de 2000 MW en condición peak.

6 SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN Nº2: DIVISIÓN DE LA LÍNEA DE DOBLE CIRCUITO EN DOS LÍNEAS INDEPENDIENTES DE CIRCUITO ÚNICO

Separar la línea de doble circuito, en dos líneas independientes de circuito único, representa una solución compleja en cuanto a la definición del trazado, la tramitación de permisos, licenciamiento ambiental y la construcción de las dos nuevas líneas. Se deben definir dos nuevas rutas independientes sin posibilidad de utilizar el corredor existente, esto se indica tomando como referencia que no se presentaría indisponibilidad de los circuitos, es decir, no se presentaría energía no suministrada, con ocupación de suelo por derecho de vía, evitando así la violación del límite de AN, especialmente en las zonas donde se ubican receptores sensibles. El ancho del corredor requerido es prácticamente el doble del existente.

Para evaluar el AN de las dos líneas, se realizaron los cálculos del caso base para la solución de mitigación n.2. tomando como referencia la metodología CIGRE indicada en [9] y [10]. La configuración de las fases en la estructura de las líneas es el siguiente. La distancia mínima entre las torres de cada circuito se asume de 40 m. La configuración de fases sin embrago, considera reconfigurar la línea existente e instalar un nuevo circuito trifásico.

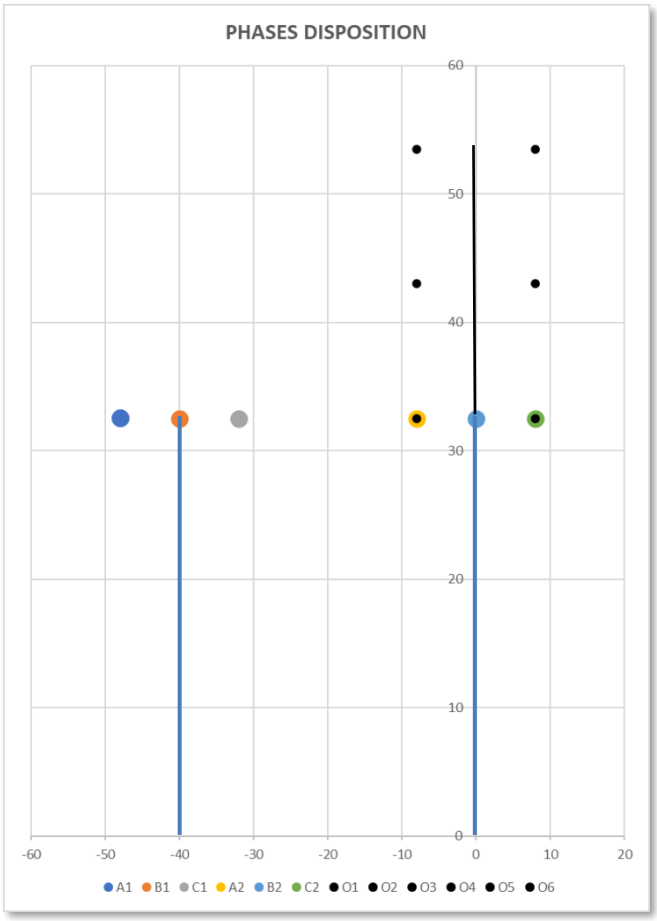


Figura 8: Disposición de fases de dos líneas independientes de un solo circuito

En la Figura 8, se muestran:

- Dos (2) líneas separadas (imagen con puntos de color).
- la disposición real de las fases del nuevo circuito en configuración horizontal.

Como se muestra en Figura 8, la altura de la fase de las n.2 líneas separadas es igual a la altura de la fase inferior de la línea existente 32.5 m (imagen con puntos negros).

Con base en la metodología descrita en el numeral 3.1, se calculan los gradientes de los conductores:
- Gradiente crítico g_c : 14.66 kV/cm
- El gradiente superficial g:

Circuito/Fase	g (kV/cm)
1.1	16.65
1.2	18.71
1.3	15,95
2.1	15,95
2.2	18.71
2.3	16.65

Figura 9. Perfil de AN para las dos líneas separadas.

En el eje de abscisas se indica la distancia desde las dos líneas, considerando que la torre 1 se encuentra en el valor 0 y la torre 2 en -40 m; ambas torres se muestran con líneas azul oscuro. El receptor se encuentra a 32 m de la línea y se representa con la línea negra en el gráfico.

En el eje de ordenadas se indica el nivel de ruido audible para:

- Azul: condición de lluvia
- Verde: tiempo despejado
- Rojo: Límite AN 43 dBA

Se concluye con el siguiente análisis gráfico, que el valor de AN en la ubicación del receptor, es de 51.72 dBA, el cual es superior al valor del diseño de la línea existente el cual consideró la configuración en doble circuito instalado en la misma torre. Por lo tanto, para mitigar el ruido audible, esta solución no se recomienda.

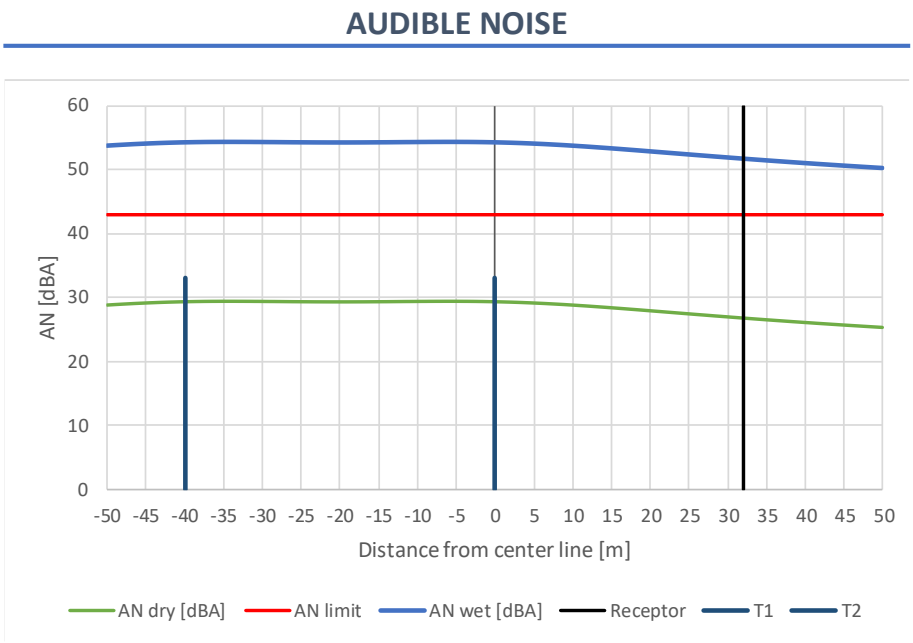


Figura 9: Perfil AN en dos líneas separadas

7 SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN Nº3: INSTALACIÓN DE ANILLOS DE CORONA EN LAS CADENAS DE AISLAMIENTO

Los anillos corona, también conocidos como anillos de clasificación, son anillos metálicos unidos a los extremos de las cadenas de aisladores de alto voltaje en líneas de transmisión aéreas y subestaciones. La configuración de la cadena de aisladores se muestra en Figura 10. Los anillos Corona propuestos son los elementos 09 y 10.

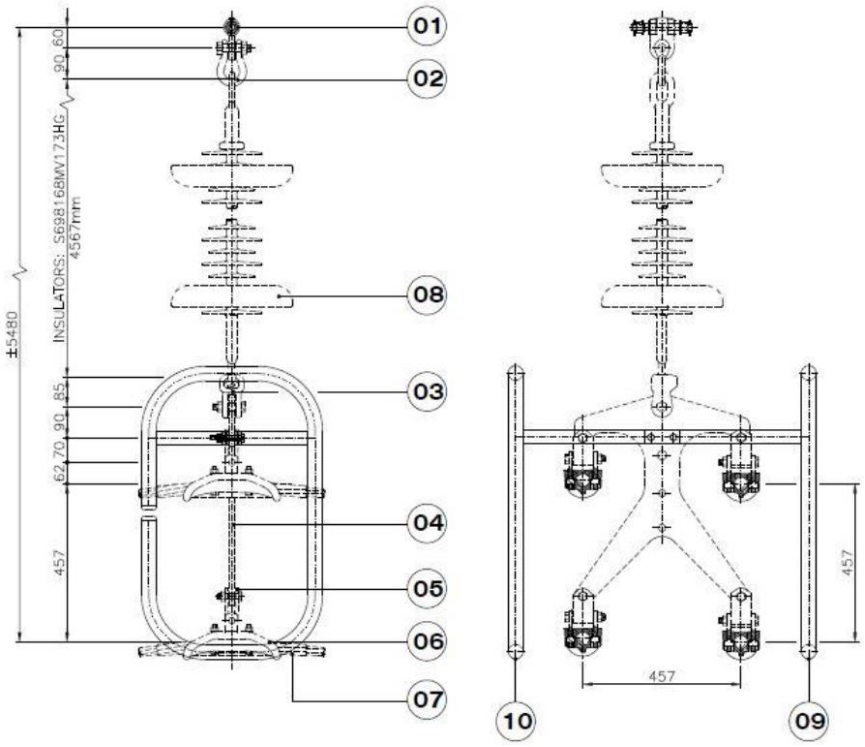


Figura 10: Cadena de aisladores con anillos Corona



Figura 11: Detalle del conjunto de cadena de aisladores con anillos Corona

El propósito de los anillos corona es:

- Reducir la descarga de Corona: a altos voltajes (normalmente superiores a 100 kV), el campo eléctrico alrededor de conductores y aislantes puede ionizar el aire circundante, provocando una descarga de Corona (luz púrpura tenue, ruido y pérdida de potencia).
- Uniformizar la distribución del campo eléctrico: sin anillos de Corona, el campo eléctrico se concentra considerablemente en los extremos de la cadena aislante en el punto de mayor potencial eléctrico. Los anillos de Corona distribuyen el campo de forma más uniforme, reduciendo el estrés eléctrico, así como la tensión sobre el aislante.
- Prevenir daños en el aislador: al minimizar la descarga de Corona y homogenizar el campo eléctrico, los anillos ayudan a prolongar la vida útil de los aisladores y previenen la erosión o perforación de la superficie.

Con referencia al AN, los anillos Corona reducen el ruido audible a través de 3 mecanismos principales:

1. Suavización del Campo: los anillos de Corona redistribuyen el campo eléctrico a lo largo de la cadena aislante. Esto reduce la intensidad máxima del campo en puntos con terminaciones no redondeadas (puntos afilados) o extremos del conductor, donde es más probable que se produzca la corona. Resultado: menos microdescargas y, por lo tanto, menos ruido.
2. Reubicación de la Zona de Descarga: sin un anillo Corona, pueden ocurrir descargas en el aislador o en los herrajes, que no están diseñados para manejarlas acústicamente. Con un anillo Corona, la descarga (si ocurre) ocurre en la superficie lisa y redondeada del anillo, lo que reduce y distribuye mejor la energía de cada descarga y produce ondas de sonido menos intensas.
3. Frecuencia de Descarga Más Baja: al reducir la cantidad de puntos con alto campo, los anillos de Corona disminuyen la frecuencia de los eventos de descarga. Esto conduce a un perfil acústico general más silencioso, especialmente en condiciones húmedas o con niebla.

En laboratorios de alto voltaje y en pruebas de campo, se ha demostrado que los anillos de corona reducen los niveles de ruido audible en varios decibeles (dB). Esto es especialmente importante cerca de áreas residenciales o entornos sensibles.

Se realizaron pruebas de laboratorio en la cadena de aisladores, con y sin anillos de corona, para demostrar estos conceptos y detectar niveles de interferencias de Radio. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 3: Cadena de aisladores de suspensión sin anillos Corona

Resultado de lo ensayo				
Ciclo	Tensión de ensayo (kV)	TRI (dB)	TIEMPO(s)	CONDICIONES ATMOSFÉRICAS
Primero	320	32	60	P = 759,7 mmHg Ts = 24,3ºC Ur = 65,5%
Segundo	320	32	60	
Tercero	350	32	15	
	340	31	15	
	330	31	15	
	320	31	60	
	310	30	15	
	300	30	15	
	290	30	15	
	280	29	15	
	270	29	15	
	260	29	15	
	250	29	15	
	240	29	15	
	220	29	15	
	200	29	15	
	180	29	15	
	160	29	15	
	140	29	15	
	120	29	15	
	100	29	15	
	0	22	15	

Tabla 4: Cadena de aisladores de suspensión con anillos Corona

Resultado de lo ensayo				
Ciclo	Tensión de ensayo (kV)	TRI (dB)	TIEMPO(s)	CONDICIONES ATMOSFÉRICAS
Primero	320	29,2	60	P = 765,7 mmHg Ts = 25,1 ºC Su = 69.5%
Segundo	320	29,2	60	
Tercero	350	29,5	15	
	340	29,3	15	
	330	29,3	15	
	320	28,8	60	
	310	29,2	15	
	300	28,8	15	
	290	28,8	15	
	280	28,7	15	
	270	28,7	15	
	260	28,7	15	
	250	28,7	15	
	240	28,7	15	
	220	28,7	15	
	200	28,7	15	
	180	28,7	15	
	160	28,7	15	
	140	28,7	15	
	120	28,7	15	
	100	28,7	15	
	0	22,0	15	

Tabla 5: Cadena de aisladores de tensión sin anillos Corona

Resultado de la prueba				
Ciclo	Tensión de ensayo (kV)	TRI (dB)	TIEMPO(s)	CONDICIONES ATMOSFÉRICAS
Primero	320	39	60	P = 759,7 mmHg Ts = 24,3 °C Ur = 73.4%
Segundo	320	39	60	
Tercero	350	73	15	
	340	71	15	
	330	68	15	
	320	38	60	
	310	38	15	
	300	36	15	
	290	35	15	
	280	34	15	
	270	33	15	
	260	30	15	
	250	29	15	
	240	27	15	
	220	26	15	
	200	26	15	
	180	26	15	
	160	24	15	
	140	24	15	
	120	24	15	
	100	24	15	
	0	24	15	

Tabla 6: Cadena de aisladores de tensión con anillos Corona

Resultado de la prueba				
Ciclo	Tensión de ensayo (kV)	TRI (dB)	TIEMPO(s)	CONDICIONES ATMOSFÉRICAS
Primero	320	28,7	60	P = 759,7 mmHg Ts = 24,3 °C Su = 73.4%
Segundo	320	28,7	60	
Tercero	350	28,7	15	
	340	28,7	15	
	330	28,7	15	
	320	28,7	60	
	310	28,7	15	
	300	28,7	15	
	290	27,8	15	
	280	27,8	15	
	270	27,8	15	
	260	26,7	15	
	250	26,7	15	
	240	26,7	15	
	220	26,7	15	
	200	26,7	15	
	180	26,7	15	
	160	26,7	15	
	140	26,7	15	
	120	26,7	15	
	100	26,7	15	
	0	24,2	15	

Se puede observar que, en ambas cadenas de aisladores (suspensiones y retenciones), los anillos de corona reducen la Interferencia de Radio (IR) en 3 dB en el caso de la cadena de suspensión y en 10 dB en el caso de la cadena de tensión. Dado que la línea está compuesta por torres de suspensión y de retención, la reducción promedio de la IR podría ser de 6 a 7 dB.

En razón a que, como se ha mencionado anteriormente el Ruido Audible y la Interferencia de Radio son consecuencias del efecto corona y dependen del gradiente superficial del conductor y del voltaje de inicio de la Corona, se espera que los anillos a instalar traigan como beneficios la misma reducción de AN.

Para la configuración actual de la línea, sin anillos Corona, el perfil RI es el siguiente.

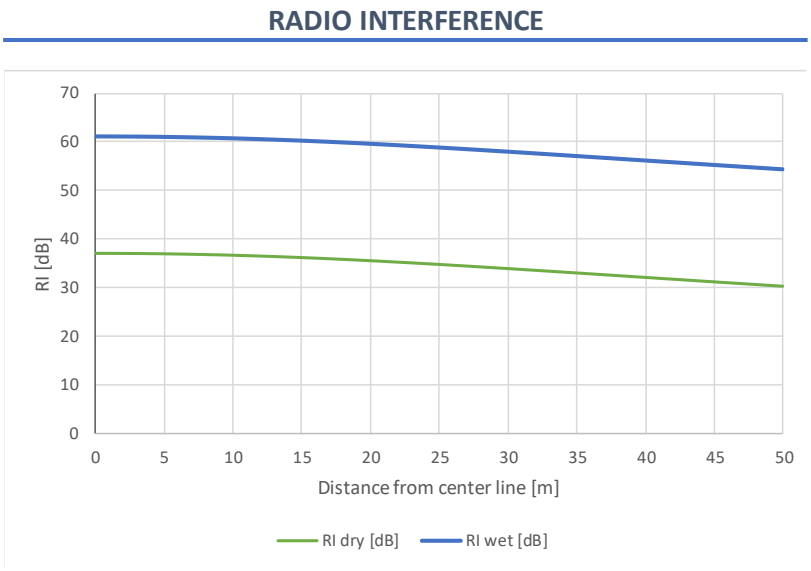


Figura 12: Perfil de RI

Para tener una reducción de RI de 6 dB considerando los anillos corona instalados, los gradientes superficiales del conductor deben ser los siguientes.

Circuito/Fase	g (kV/cm)
1.1	14.71
1.2	15.25
1.3	14.84
2.1	14.71
2.2	15.25
2.3	14.84

Tabla 7: Gradiente superficial del conductor con anillos de Corona

A partir de las consideraciones anteriores, con los gradientes superficiales del conductor de la Tabla 7, el nivel de ruido AN calculado, se muestra en el siguiente gráfico.

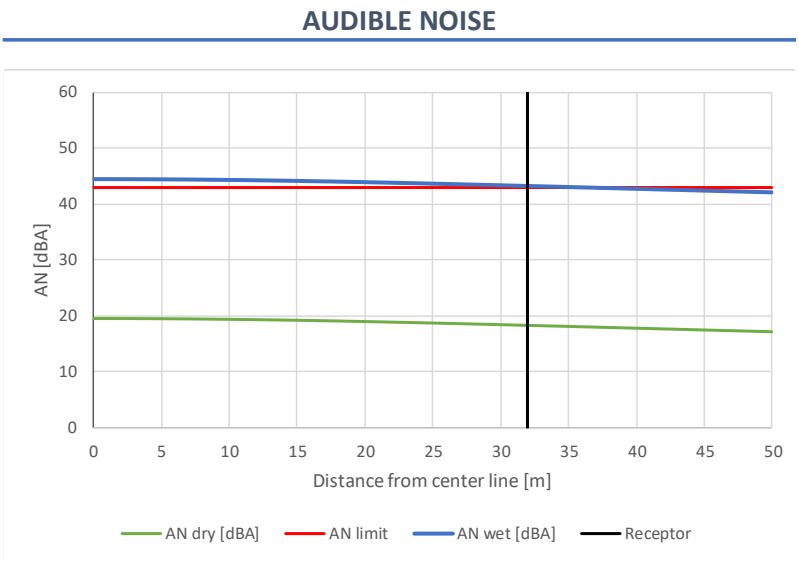


Figura 13: Perfil de AN con anillos Corona

Como esperado y consistente con los conceptos teóricos del efecto corona, la reducción de AN coincide con la reducción de IR al considerar la instalación de los anillos corona. A una distancia de 32 m desde la línea central, el límite de AN de 43 dBA está prácticamente verificado.

Es importante destacar que en el borde de la servidumbre, los valores de AN están siempre por debajo del valor de 50 dBA especificado para el Proyecto Cardones-Polpaico.

8 CONCLUSIÓN

Del análisis realizado en los capítulos anteriores, en la siguiente tabla se destacan los pros y contras de las soluciones de mitigación propuestas para la reducción del Ruido Audible: se ha asignado una puntuación a las soluciones propuestas para los principales aspectos a considerar:

- TÉCNICO: validez de la solución en términos de reducción de AN.
- FIABILIDAD: validez de la solución durante el tiempo de vida útil. La fiabilidad de las líneas de transmisión de alta tensión, ya sean subterráneas o aéreas, depende de varios factores técnicos, ambientales y operativos. Por ejemplo, las líneas de transmisión aéreas están sujetas a condiciones climáticas/ambientales más severas que las líneas de transmisión subterráneas.
- IMPLEMENTACIÓN: facilidad y duración de las obras de construcción/instalación. Por ejemplo, las líneas de transmisión subterráneas requieren excavaciones más extensas en comparación con las obras de fundación de las líneas de transmisión aéreas.
- AMBIENTAL: facilidad para obtener los permisos ambientales requeridos e impacto ambiental durante la construcción en términos de alteración del suelo, alteración del hábitat (flora y fauna) y uso del suelo.
- INTERFERENCIA DE OPERACIÓN: tiempo requerido para la salida de servicio debido al comisionamiento de la medida de mitigación. El comisionamiento de una línea de transmisión se refiere al proceso de verificar, probar y activar todos los componentes de la línea para garantizar que opera de manera segura, confiable y de acuerdo con las especificaciones de diseño antes de ser entregada para su operación regular. También se considera el tiempo requerido para la conexión eléctrica física de la medida de mitigación.

Luego de los análisis presentados en este documento y tomando en consideración las varibales más representativas que podemos evaluar desde lo técnico; se recomienda la instalación de los anillos Corona como la solución más adecuada y de mayor impacto para la reducción del ruido audible por efecto corona, solucción que fue validada con las pruebas en el laboratorio de alta tensión realizadas en CEPEL Brasil.

SOLUCIÓN DE MITIGACIÓN	TÉCNICO	FIABILIDAD	IMPLEMENTACIÓN	AMBIENTAL	INTERFERENCIA OPERACIÓN
Transición a una sección subterránea de la línea.	+++	++	−−−	−−−	−−
División de la línea de doble circuito en dos líneas independientes de circuito único.	−−−	−−	−−−	−−−	−
Instalación de anillos Corona en cadenas de aislamiento.	++	+	++	+++	+