

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO
AMBIENTAL DEL RUIDO Y CAMPOS ELÉCTRICOS Y
MAGNÉTICOS GENERADOS POR LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS
DE ALTA TENSIÓN DE CORRIENTE CONTINUA EN EL MARCO
DEL SEIA**

PAZ VERÓNICA ARRIETA CARDICHIS

Profesor Guía : Ing. Roberto Quezada Barrera.
Profesor Patrocinante: Ms. Oscar Ricardo Pesse Löhr.

Trabajo de titulación presentado para
optar al grado de Ingeniero Físico.

Santiago – Chile

2012

PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO
AMBIENTAL DEL RUIDO Y CAMPOS ELÉCTRICOS Y
MAGNÉTICOS GENERADOS POR LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS DE
ALTA TENSIÓN DE CORRIENTE CONTINUA EN EL MARCO DEL
SEIA

Trabajo de Graduación presentado a la Facultad de Ciencia en cumplimiento
parcial de los requerimientos exigidos para optar al Título Profesional de
Ingeniero Físico.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

Santiago – Chile

2012

PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DEL RUIDO Y CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS GENERADOS POR LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN DE CORRIENTE CONTINUA EN EL MARCO DEL SEIA

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Ing. Roberto Quezada Barrera del Ministerio de Medio Ambiente de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora.

Dra. Yolanda Vargas Hernández.....

Ing. Igor Valdebenito Ojeda.....

Ing. Roberto Quezada Barrera.....

Ms. Oscar Ricardo Pesse Löhr.....

.....

Director Bernardo Carrasco Puentes

© PAZ VERÓNICA ARRIETA CARDICHIS

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

“Hay hombres que luchan un día y son buenos. Hay otros que luchan un año y son mejores. Hay quienes luchan muchos años, y son muy buenos. Pero hay los que luchan toda la vida, esos son los imprescindibles”.

Bertolt Brecht

Este trabajo está dedicado a Alejandro Arrieta Sanhueza (q.e.p.d.), un luchador hasta el final.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia, a mi padres Juan Carlos y Verónica y a mi hermano José, quienes siempre han estado conmigo entregándome su apoyo y cariño. También quiero agradecer a Roberto, quien con su amor me ha apoyado incondicionalmente, sobre todo en los momentos más difíciles.

También quisiera destacar la ayuda de Roberto Quezada (profesor guía) y del señor Oscar Pesse (profesor patrocinante) en la realización del presente trabajo. Gracias a ellos y a su experiencia pude enriquecerme de mucha información con respecto al tema, parte de la cual quedó reflejada en este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron durante mi etapa universitaria tanto a mi familia como académicos y funcionarios; pero especialmente a mis compañeros y amigos durante esta etapa, quienes hicieron de este difícil proceso una experiencia inolvidable.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN.....	xviii

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación del tema	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	5
1.3. Metodología utilizada en el desarrollo del trabajo	6
1.4. Resumen del contenido del trabajo de titulación	9

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE TRANSMISIÓN EN CORRIENTE CONTINUA.....	11
2.1. Antecedentes Históricos	11
2.2. Tipos de conexiones en ATCC	15

2.3. Componentes de un sistema de ATCC	17
2.3.1. Descripción de los principales componentes de un sistema de ATCC.....	18
2.3.1.1. Conversión	18
2.3.1.2. Sistema de puesta a tierra	26
2.3.1.3. Sistema de control	26
2.3.1.4. Sistema de transmisión	27
2.4. Ventajas y Desventajas de un sistema de ATCC	30
2.4.1. Ventajas	30
2.4.2. Desventajas	37

CAPÍTULO 3

EFFECTOS PRODUCIDOS POR LAS LÍNEAS DE ATCC.....	40
3.1 Efecto Corona	41
3.1.1 Efecto Corona en líneas de transmisión	41
3.1.1.1 Procesos Elementales	41
3.1.1.2 Descargas corona en conductores cilíndricos	44
3.1.1.2.1 Descarga corona con polaridad negativa en CC	45
3.1.1.2.2 Descarga corona con polaridad positiva en CC	47
3.1.1.3 Variables que afectan el fenómeno corona	50
3.1.1.4 Gradiente crítico	52

3.1.2 Cálculo del campo eléctrico en la superficie de los conductores.....	54
3.1.2.1 Método de los coeficientes de potenciales de Maxwell	54
3.1.2.2 Método de Mark y Mengele	57
3.1.2.2.1 Campo eléctrico superficial en líneas monopolares de ATCC.....	59
3.1.2.2.2 Campo eléctrico superficial en líneas bipolares de ATCC.....	60
3.1.3 Consecuencias del efecto corona en líneas de transmisión de ATCC.....	60
3.1.3.1 Ruido Audible	61
3.1.3.1.1 Aspectos teóricos del ruido audible	61
3.1.3.1.2 Ruido audible en líneas de transmisión	66
3.1.3.1.2.1 Ruido audible en líneas bipolares de ATCC.....	67
3.1.3.2 Generación de carga espacial	71
3.2 Ambiente Electromagnético	74
3.2.1 Campo eléctrico	74
3.2.1.1 Cálculo del campo eléctrico	75
3.2.1.1.1 Campo electrostático	75
3.2.1.1.2 Campo eléctrico por carga espacial y densidad de corriente iónica	76

3.2.1.1.2.1 Método “Grado de saturación de la corona (Degree of Corona Saturation)”	79
3.2.1.1.2.1.1 Aplicación del método	81
3.2.1.2 Consideraciones en el cálculo del campo eléctrico	85
3.2.2 Campo Magnético	86
3.2.2.1 Método de cálculo.....	86

CAPITULO 4

MÉTODOS PARA PREDECIR EL RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE ATCC.....	89
4.1. Descripción de los métodos de cálculo.....	89
4.1.1. Bonneville Power Administration (BPA)	92
4.1.2. FGH, Germany	95
4.1.3. Hydro Quebec Institute of Research (IREQ)	96
4.1.4. Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan (CRIEPI).....	97
4.2. Análisis y comparación de los métodos de predicción.....	99
4.2.1. Discusión de los antecedentes presentados	103

CAPITULO 5

NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE A LINEAS DE ATCC.....	110
5.1. Sistema de evaluación de impacto ambiental “SEIA”	111
5.2. Normativa nacional aplicable	113
5.2.1. Decreto Supremo N° 146/97 MINSEGPRES “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas”	114
5.3. Normativa internacional aplicable	121
5.3.1. Límites recomendados para campos eléctricos estáticos	121
5.3.2. Límites recomendados para campos magnéticos estáticos	123
5.4. Normativa técnica para las líneas de ATCC	125

CAPITULO 6

DISCUSIÓN.....	127
----------------	-----

CAPITULO 7

PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN LÍNEAS DE ATCC.....	133
--	-----

CAPITULO 8

PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DEL RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE ATCC	138
--	-----

CAPITULO 9

CONCLUSIÓN.....	145
-----------------	-----

REFERENCIAS.....	147
------------------	-----

ANEXO A

EXPOSICIÓN A CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS ESTÁTICOS Y AL RUIDO AUDIBLE.....	153
--	-----

ANEXO B

MEDICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA	166
---	-----

ANEXO C

FICHA DE MEDICIÓN RUIDO ESTABLE	171
---------------------------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Gráfico de la capacidad instalada por sistema.....	1
Figura 1.2. Proyección de generación bruta necesaria (GWh).....	2
Figura 2.1. Esquema de un sistema Thury.....	13
Figura 2.2. Enlace Monopolar.....	15
Figura 2.3. Enlace Bipolar.....	16
Figura 2.4. Esquema de un sistema de transmisión en Corriente Continua.....	18
Figura 2.5. Rectificador de 6 pulsos.....	20
Figura 2.6. Estados de las válvulas de un rectificador de 6 pulsos.....	20
Figura 2.7. a) Filtro pasa banda, b) Filtro doble pasa banda y c) Filtro pasa alto.....	24
Figura 2.8. Esquemas de configuraciones bipolares, a) horizontal b) vertical.....	29
Figura 2.9. Línea de transmisión bipolar (± 600 kV) de Itaipu, Brasil; el mayor existente en el mundo.....	30
Figura 2.10. Relación entre potencia del sistema y distancia de transmisión para líneas CC y CA de 1000 kV.....	31
Figura 2.11. Comparación de los costos totales v/s distancia	34

Figura 2.12. Torres típicas para transportar 1000 MW.....	36
Figura 2.13. Espacio utilizado para las torres en un sistema CA y CC de 500 kV y ± 500 kV, respectivamente, para transportar 3000 MW	36
Figura 3.1. Avalancha de electrones en la descarga de un conductor negativo.....	45
Figura 3.2. Desarrollo de la descarga en un conductor positivo.....	48
Figura 3.3. Efecto de la tensión sobre las descargas corona.....	50
Figura 3.4. Diagrama para el cálculo de los coeficientes de Maxwell.....	56
Figura 3.5. Esquema del campo eléctrico en la superficie de los conductores.....	59
Figura 3.6. Algunos Niveles de Presión Sonora típicos.....	64
Figura 3.7. Algunos Niveles de Potencia típicos	65
Figura 3.8 Curvas de ponderación acústica.....	66
Figura 3.9 Perfil transversal de una línea bipolar CC.....	68
Figura 3.10. Espectro de Frecuencia del RA para líneas CA.....	70
Figura 3.11. Espectro de Frecuencia del RA para líneas Bipolares CC.....	70
Figura 3.12. Representación de los flujos de iones en una línea bipolar CC.....	72
Figura 3.13. Efecto del viento sobre las cargas espaciales.....	73
Figura 3.14. Esquema de los parámetros de una línea bipolar.....	76
Figura 3.15. Perfil transversal de campo eléctrico y de corriente iónica en una línea de prueba	77

Figura 3.16. Esquema para el cálculo del campo magnético.....	87
Figura 3.17. Perfil típico del campo magnético de una línea bipolar de ± 400 Kv.....	88
Figura 4.1. Esquema de una línea de configuración bipolar con un arreglo horizontal de los polos con sus respectivos parámetros.....	100
Figura 4.2. Esquema del cálculo de la distancia radial entre el polo positivo y el receptor	101
Figura 4.3. Niveles sonoros obtenidos con los diferentes métodos de predicción y valores medidos	106
Figura 5.1. Orientación de un micrófono de campo libre	126
Figura A.1. Esquema para el cálculo de la altura equivalente.....	160
Figura A.2. Esquema de las partes que conforman el oído	162
Figura B.1. Medidor tipo Molino	168
Figura B.2. Medidor de campo eléctrico portátil tipo molino.....	169
Figura B.3. Medidor tipo cilindro.....	169
Figura C.1. Ficha de medición para el ruido estable.....	171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Distribución de costos de líneas ATCC y ATCA.....	28
Tabla 3.1. Valores de G_0 y K para diferentes condiciones ambientales.....	84
Tabla 4.1. Características de aplicación del método BPA.....	93
Tabla 4.2. Características de aplicación del método FGH.....	95
Tabla 4.3. Características de aplicación del método Hydro Quebec Institute of Research (IREQ).....	96
Tabla 4.4. Constantes para el método de Hydro Quebec Institute of Research (IREQ)	97
Tabla 4.5. Características de aplicación del método CRIEPI.....	98
Tabla 4.6. Datos para los cálculos de líneas de prueba CC.....	100
Tabla 4.7. Resultados de los cálculos y mediciones para líneas de prueba CC (todos los niveles en dB(A) para buen tiempo a 15 m de la línea).....	102
Tabla 4.8. Diferencia de los niveles de ruido calculados y medidos, para el caso de líneas de prueba CC (diferencia dada en dBA)	103
Tabla 4.9. Datos de la línea de prueba que se analizará.....	105
Tabla 5.1. Campos electrostáticos generados de forma natural.....	121
Tabla 5.2. Valores máximos recomendados para la exposición a los campos electrostáticos (en el borde de la franja de servidumbre).....	122

Tabla 5.3. Campos magnéticos estáticos generados de forma natural.....	123
Tabla 5.4. Valores máximos recomendados para la exposición a los campos magnéticos estáticos (en el borde de la franja de servidumbre).....	124
Tabla 5.5. Valores límites de campos magnéticos estáticos en el cuerpo humano	125
Tabla A.1 Niveles de tolerancia de la corriente eléctrica de las personas	159

RESUMEN

La necesidad de duplicar la capacidad eléctrica instalada en los próximos 10 a 12 años implica la creación de nuevas fuentes energéticas y eventualmente la creación sistemas de transmisión de alta tensión en corriente continua (ATCC), por lo que es necesario estudiar los posibles impactos ambientales que generarían. Por lo anterior, en este trabajo se presenta una *“Propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental del ruido y campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión de corriente continua en el marco del SEIA”*.

La metodología utilizada consistió en la investigación y el análisis de los sistemas de transmisión de ATCC desde un punto de vista teórico y de la normativa ambiental aplicable nacional e internacionalmente. Para estimar los campos eléctricos y magnéticos se proponen métodos de aplicación directa. Por otro lado, para predecir los niveles sonoros se realizó un análisis de los métodos presentados. Esto bajo condiciones climáticas de buen tiempo, que es cuando ocurre la mayor emisión de ruido, considerando buen tiempo máximo, L50 de buen tiempo y buen tiempo promedio. En base a las condiciones climáticas y al criterio preventivo, se propone el uso del método Forschungsgemeinschaft Für Hochspannung (e) und Hochstromtechnik (FGH).

Finalmente, y luego del análisis previo, se establecen los contenidos mínimos que se deben incluir en la propuesta de guía. Estos contenidos incluyen una descripción del proyecto, el área de influencia de éste, la normativa aplicable y los métodos de predicción de los valores.

INTRODUCCIÓN

En el este capítulo se presentan aquellos aspectos que dan origen a la realización del trabajo de titulación junto con un resumen de aquellos aspectos relevantes de su contenido.

1.1. Justificación del tema.

De acuerdo a cifras de la Comisión Nacional de Energía (CNE), Chile requiere del orden de 400 a 500 MW adicionales cada año o en otras palabras, necesita duplicar su capacidad instalada en los próximos 10 a 12 años y, probablemente, triplicarla en 20 a 24 años más. Hasta el año 2010 la capacidad eléctrica instalada en Chile era de cerca 16.000 MW, distribuidos por sistema como se muestra en la figura 1.1:

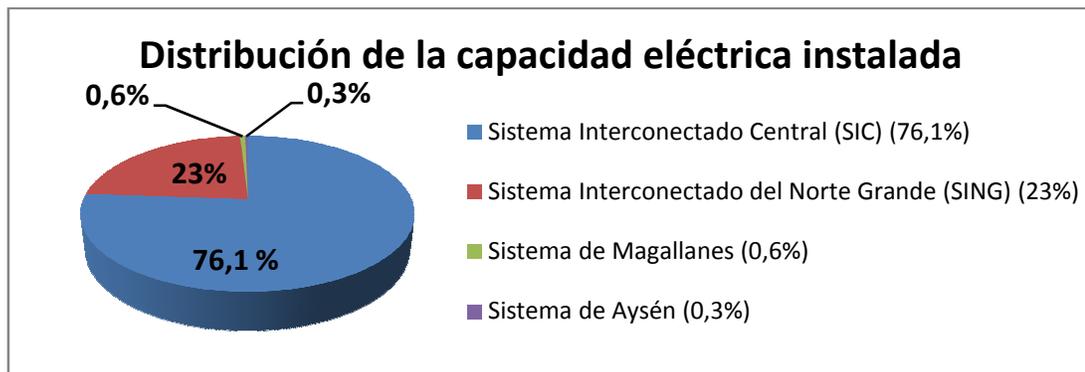


Figura 1.1. Gráfico de la capacidad instalada por sistema [34].

A diciembre del año 2010 la generación bruta de energía eléctrica destinada a servicio público alcanzó alrededor de 58.600 GWh (99,3% corresponde al SIC y SING), cifra que debiera elevarse a un ritmo estimado en torno a 5% anual durante la próxima década. Diversos analistas han estimado que para ser un país desarrollado se necesitará duplicar la producción y consumo de electricidad en los próximos 12 años, lo que obliga a asegurar un suministro suficiente de energía para evitar que éste se convierta en una traba al desarrollo social y económico del país [35].

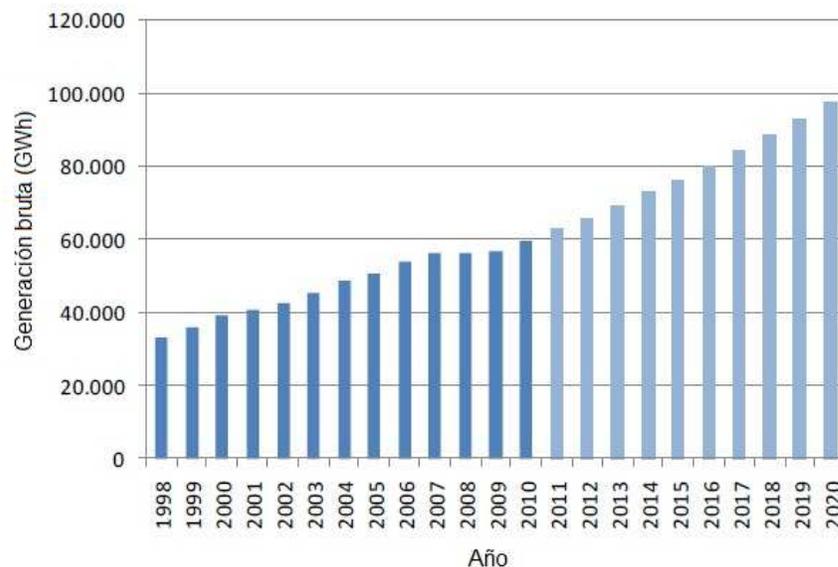


Figura 1.2. Proyección de generación bruta necesaria (GWh). (Fuente: Datos históricos: Comisión Nacional de Energía (CNE). Proyecciones: Instituto Libertad y Desarrollo)

Es en este escenario que se hace necesaria la creación de nuevas fuentes de energía integrando, en algunos casos, nuevas tecnologías no existentes en nuestro país, como el caso de la transmisión de energía eléctrica mediante el uso de corriente continua. Por tal motivo, se hace necesario el estudio de los

impactos que producirían este tipo de sistemas, y su evaluación en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Es importante destacar que el SEIA, es un instrumento que se encuentra bajo la administración del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), organismo público funcionalmente descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propio [18].

Para evaluar un proyecto en el marco del SEIA éste debe cumplir con la normativa ambiental aplicable, tanto la que determina su ingreso al sistema, como aquella de carácter específico (normas de calidad y emisión). Es por lo anterior que la existencia de una guía permitirá ayudar en el proceso de evaluación en el marco del SEIA, tanto a los titulares de los proyectos como a los evaluadores, ya que permitirá establecer los contenidos necesarios para la evaluación.

Un antecedente importante para la generación de la propuesta de guía para el ruido en el marco del SEIA, es el caso que se da para proyectos de líneas de transmisión eléctrica en corriente alterna, donde el ruido audible no es siempre considerado o no se predicen los valores con métodos suficientemente precisos. Un estudio realizado indica que hasta el 31 de Julio del 2009, de los proyectos de líneas de alta tensión eléctrica de corriente alterna, presentados en el SEIA un 68,8% no considera el ruido audible generado en la etapa de operación; y un 25% de los proyectos que lo considera lo asocia a la mantención de las líneas o a la franja de servidumbre¹. A pesar de esta escasa información entregada por los titulares, un 77% de los proyectos es aprobado,

¹Franja de servidumbre: Es un gravamen sobre un predio en utilidad de otro propietario. Su ancho debe ser al menos igual al de la franja de seguridad (que es calculada de acuerdo a normas técnicas eléctricas vigentes y tiene por objeto resguardar la seguridad de las personas). (Se propone ver DS N°327 que fija Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos).

un 6% desistido, un 8% no admitido, un 2% rechazado y un 7% se encontraba en proceso de calificación [37].

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general.

El objetivo general del presente trabajo de titulación es el diseño de una propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental del ruido y campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión de corriente continua (ATCC) en el marco del SEIA.

La propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental de los campos eléctricos y magnéticos se presenta como una primera aproximación para la regulación del tema, ya que en Chile no existe normativa ambiental aplicable, por lo que se debió recurrir a normativa internacional de acuerdo a lo señalado en el artículo 7 del Reglamento del SEIA

La propuesta de guía se compone por dos documentos independientes, ya que en el caso de los campos eléctricos y magnéticos la propuesta de guía pretende servir como antecedente y una primera aproximación para el futuro estudio y desarrollo de normativa y/o documentos relacionados con el tema; y en el caso de la propuesta de guía para la evaluación del impacto ambiental del ruido audible será incluida en una guía elaborada por el Ministerio del Medio Ambiente, la que está enfocada en la evaluación del ruido mediante la aplicación del D.S. N° 146/97 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República que establece la Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Analizar el funcionamiento y los efectos producidos por las líneas de transmisión de alta tensión en corriente continua (ATCC) en base a la recopilación de antecedentes, lo que permitirá establecer un buen marco teórico respecto a los antecedentes históricos y características de los sistemas de transmisión de ATCC.
- Determinar los métodos de cálculo de los campos eléctricos y magnéticos para este tipo de líneas.
- Investigar y analizar los modelos de predicción del ruido audible en líneas de ATCC, y determinar cuál es el método que debe utilizarse en nuestro país.
- Investigar y analizar la normativa aplicable a las líneas de transmisión de ATCC, en lo que se refiere al ruido audible y los campos eléctricos y magnéticos.
- Diseñar una propuesta de guía para la evaluación del impacto ambiental de los campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas aéreas de ATCC en el marco del SEIA.
- Diseñar una propuesta de guía para la evaluación del impacto ambiental del ruido generado por las líneas aéreas de ATCC en el marco del SEIA.

1.3. Metodología utilizada en el desarrollo del trabajo.

La metodología utilizada en este trabajo se basó principalmente en la recopilación de antecedentes, tanto técnicos como teóricos, acerca de las líneas de ATCC.

➤ Levantamiento de información

Para establecer el estado del arte en relación a las líneas de alta tensión en corriente continua, específicamente a lo que se refiere a los campos eléctricos y magnéticos y al ruido audible, se han establecido diferentes criterios de levantamiento de información.

- En primer lugar se recopilará información de los sistemas de transmisión de ATCC en lo que se refiere al funcionamiento y a los efectos generados por éstas. Para esto se consultaron diferentes tesis de grado de la Universidad de Santiago de Chile, dentro de las que se encuentran:
 - “Desarrollo de un programa computacional para la evaluación del impacto ambiental de líneas de transmisión de corriente continua” (Emilio Aranda, 2009) [2].
 - “Impacto medioambiental de líneas de transmisión. Evaluación a través de software de simulación” (Patricio Santana, 2007) [12].
 - “Estudio de pre factibilidad técnica de un sistema de transmisión en corriente continua (HVDC), aplicado a la zona austral de Chile” (Pablo Soto, 1998) [22].
 - “Software para evaluar el impacto sobre el medio ambiente de las líneas eléctricas de transmisión” (Enrique Pasten, 1995) [11].

También se consultó una tesis de la Universidad de Chile, llamada “Determinación de los efectos ambientales generados por la operación de una línea aérea en HVDC” realizada por el alumno Héctor Miranda Campos (2008) [36]

- En segundo lugar se recopilará información desarrollada por organismos técnicos y que se relaciona con estudios (publicaciones) anteriores. Esta información se obtuvo principalmente de documentos consultados a la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers/Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), cuyo reconocimiento a nivel internacional la definen como fuente de información confiable. Además, también se consultaron algunos documentos de las organizaciones EPRI y CIGRE.
- En tercer lugar se consulta la normativa ambiental aplicable nacional e internacionalmente. En el caso de los campos eléctricos y magnéticos no existe normativa de carácter nacional, por lo que se debe recurrir a la información entregada por organizaciones internacionales.

➤ Análisis de la información

El análisis de la información permitirá entregar de forma más clara todos aquellos antecedentes importantes para la comprensión del funcionamiento de los sistemas de transmisión en corriente continua, enfocándose principalmente en los métodos de predicción de los campos eléctricos y magnéticos, y del ruido audible generado por las líneas de ATCC.

En el caso de los campos eléctricos y magnéticos generados por líneas de transmisión CC, el análisis contempla aquellas suposiciones y

consideraciones que se deben tener en cuenta al determinar qué método se utilizará y como será su aplicación.

En el caso del ruido, el análisis es importante para poder establecer qué método de predicción es más adecuado para su uso en Chile, y por lo tanto se incluirá en la propuesta de guía. Primero se analizará el comportamiento de los métodos de predicción para una línea existente en otro país, ya que en Chile no existen líneas eléctricas de alta tensión en corriente continua. Luego se realizará un análisis del caso particular de nuestro país, para lo cual se considerarán dos criterios básicos: las condiciones climáticas (relacionadas con el método de predicción) y el criterio preventivo (relacionado con la normativa aplicable), en base a lo anterior se determinará cuál es el método más apropiado que se debe utilizar en Chile, considerando que no es posible comparar con mediciones reales porque no existen este tipo de líneas en nuestro país.

➤ Diseño de las propuestas de guía

En base a la información y análisis realizados, la propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental de los campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas de ATCC, y la propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental del ruido generado por las líneas de ATCC, presentarán de forma esquematizada y sintetizada aquellos aspectos relevantes que deben considerarse para una correcta evaluación de los impactos generados por las líneas de ATCC, en lo que se refiere a los campos eléctricos y magnéticos y al ruido audible.

1.4. Resumen del contenido del trabajo de titulación.

- **Capítulo 1.** Presentación de los antecedentes que justifican el tema desarrollado en el trabajo de titulación. Además se explican los objetivos, la metodología general utilizada y un resumen de los contenidos del trabajo.
- **Capítulo 2.** En este capítulo se hace una introducción a los sistemas de transmisión en corriente continua, indicando principalmente: antecedentes históricos, características de los sistemas de ATCC y ventajas y desventajas.
- **Capítulo 3.** En este capítulo se presentan los efectos producidos por las líneas de alta tensión en corriente continua (ATCC), tales como el efecto corona y los campos eléctricos y magnéticos producidos. Dentro de esto último se incluyen los métodos de cálculo de los campos eléctricos y magnéticos.
- **Capítulo 4.** Se presentan distintos métodos de cálculo del ruido audible, donde se incluye gran cantidad de información y el análisis para una línea particular.
- **Capítulo 5.** En este capítulo se presenta la normativa ambiental aplicable para el caso del ruido audible generado por las líneas de ATCC y aquellas normas internacionales que indican valores máximos para la exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos.
- **Capítulo 6.** Se presenta una discusión de aquellos aspectos más relevantes del trabajo de titulación y que hacen necesaria una aclaración

antes de presentar las propuestas de guía. En este capítulo se incluye un análisis del método de predicción que debe utilizarse en la propuesta de guía para la evaluación del impacto ambiental del ruido generado por líneas de ATCC.

- **Capítulo 7.** Se presenta la propuesta de guía para la evaluación del impacto ambiental de los campos eléctricos y magnéticos producidos por las líneas de ATCC.
- **Capítulo 8.** Se presenta la propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental del ruido audible generado por las líneas de ATCC.
- **Capítulo 9.** Se presentan las conclusiones obtenidas del desarrollo del trabajo realizado.
- **Anexo A.** Exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos y al ruido audible.
- **Anexo B.** Medición del campo eléctrico en líneas de corriente continua.
- **Anexo C.** Ficha de evaluación de niveles de ruido por lugar de medición para Ruido Estable.

SISTEMAS DE TRANSMISIÓN EN CORRIENTE CONTINUA

2.1. Antecedentes Históricos.

Los primeros estudios acerca de la electricidad y sus aplicaciones fueron realizados usando corriente continua, siendo uno de los más importantes el de Alejandro Volta cuando en 1799 inventó la pila eléctrica. Esta invención, entre otras, inició un importante desarrollo en el área de la electricidad que hasta hoy en día se observa en la importante evolución de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

La idea de utilizar la corriente continua para la distribución de energía eléctrica nació producto de que en aquel tiempo los principales estudios y avances se habían realizado en acumuladores y generadores eléctricos en corriente continua. Así, se realizó en 1882 el tendido de una línea de CC (corriente continua) de 2 kV de 50 km entre Miesbach y Munich (Alemania). Las primeras redes de distribución instaladas en Europa y USA funcionaron en CC y baja tensión, pero gran parte de la energía generada se perdía en los cables. El cambio de corriente continua a alterna en la distribución de energía eléctrica se debe al perfeccionamiento del generador en CA (corriente alterna) que permitía generar energía de forma barata mediante turbinas hidroeléctricas y al invento del transformador en 1885. Gracias a él fue posible el transporte de energía eléctrica a largas distancias con menores pérdidas [1].

A pesar de las ventajas que mostraba la corriente alterna, nunca se dejaron los estudios en corriente continua, y se desarrollaron paralelamente al avance de la tecnología en CA, aunque sólo eran considerados como un apoyo.

El primer sistema de Alta Tensión de Corriente Continua (ATCC) fue diseñado por el ingeniero francés René Thury cuando los sistemas de CA estaban en experimentación, y persistió en la era donde predominaba la CA. Este sistema se considera como un logro de la ingeniería producto de las similitudes con los sistemas modernos de transmisión de ATCC. En el extremo transmisor de la línea un cierto número de generadores CC movidos por motores CA se conectan en serie para generar el alto voltaje requerido para la transmisión, y en el extremo receptor un número similar de motores CC conectados en serie y a su vez conectados mecánicamente a un generador de CA. El sistema operaba a corriente constante y el voltaje de cada máquina en el circuito serie de alta tensión, era regulado moviendo los carbones del conmutador.

El controlar y medir este tipo de sistemas era muy simple, ya que cada máquina estaba provista de un interruptor de corto circuito. Para sacar una máquina de servicio, se reducía su voltaje terminal a cero y luego se puenteaban sus terminales. Para poner las máquinas en servicio, se realizaba el procedimiento inverso. Los instrumentos requeridos eran solo un amperímetro y un voltímetro.

En la Figura 2.1 se observa un esquema de un sistema Thury.

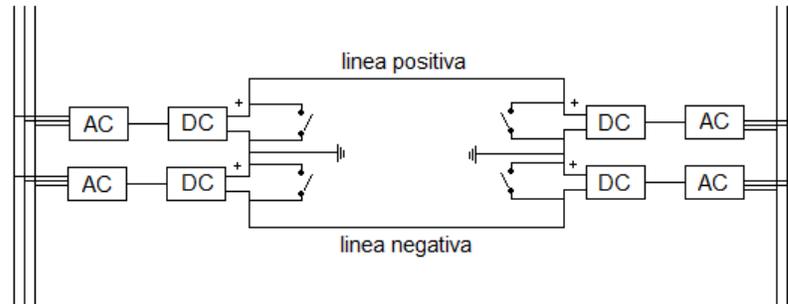


Figura 2.1. Esquema de un sistema Thury [2].

En 1930 se instalaron plantas de investigación en USA y Suecia, donde el Dr. Uno Lamm, considerado el “padre” de la transmisión en alta tensión en corriente continua, se convirtió en el máximo responsable de la investigación y el desarrollo de esta tecnología. La corriente continua resultaba interesante en la transmisión de energía a largas distancias, al no perder potencia en largos recorridos.

Luego de la Segunda Guerra Mundial y con el incremento de las necesidades energéticas, aumentó el interés en enlaces a larga distancia principalmente en Rusia y Suecia. Así en 1950 se construyó un enlace experimental de 116 km entre las ciudades de Moscú y Kasira a una tensión de 200 kV.

El primer sistema comercial se construyó en 1954 y unió, mediante un cable submarino de 98 km, la isla de Gotland (Suecia) con Suecia continental. Este sistema funcionaba a una tensión de 100 kV y transportaba hasta 200 A (20 MW). Dos años antes, en 1952 y también en Suecia, se ponía en marcha el que entonces fue el enlace en CA a mayor tensión del mundo (400 kV).

En 1967 se empezaron a utilizar válvulas de estado sólido (tiristores) en la transmisión en ATCC, siendo nuevamente el enlace de la isla Gotland con Suecia continental el primero en utilizar esta tecnología, en la que se utilizaron 180 tiristores en serie. Un año más tarde, en la interconexión Cahora Bassa-Apollo se conectaron 280 tiristores en serie, batiendo 4 récords del mundo: mayor tensión (533 kV), mayor potencia (1920 MW), mayor longitud (1420 km) y el primero que instalaba válvulas en intemperie.

Según la ABB (Asea Brown Boveri)², al año 2011 la capacidad eléctrica instalada en el mundo mediante el uso de corriente continua ascendía a casi 140.000 MW, a través de aproximadamente 145 proyectos alrededor del mundo, tanto existentes como en construcción [15]. Algunos de los proyectos más importantes usando esta tecnología son [1]:

- Itaipú, Brasil (Año 1985): 6300 MW, ± 600 kV. Enlace construido de mayor potencia.
- Gorges-Changzhou, China (Año 2002): 1500 MW, 500kV. El mayor convertidor.
- Murraylink, Australia (Año 2002): 180 km, 200 MW. El cable subterráneo de mayor longitud con tecnología VSC.
- Cross Sound, USA (Año 2002): 330 MW. El mayor sistema VSC.
- Plataforma petrolífera Troll, Noruega (Proyecto Año 2002): 2 x 45 MW. Primera carga en alta mar.
- Québec-Nueva Inglaterra, Canadá (Año 1992): 2000 MW. Primer sistema multiterminal.

² Empresa multinacional de ingeniería presente en más de 100 países. Destaca en el área de la energía eléctrica y su producción en forma sustentable.

- Italia – Grecia (Año 2001): 1000 m. El cable submarino tendido a mayor profundidad.

2.2. Tipos de conexiones en ATCC.

Un sistema de transmisión de alta tensión en corriente continua, puede tener diferentes tipos de configuraciones en su conexión. Estas son:

- *Monopolar:*

Esta configuración consiste en la utilización de un único conductor para transmitir la potencia entre una estación de conversión y otra, realizando el retorno por tierra, mar o un conductor metálico. El camino de retorno es necesario para cerrar el circuito y permitir la circulación de la corriente. El equipamiento (convertidor y línea de transmisión) que forma un conductor energizado de CC es llamado un “polo” [4].

Aunque este tipo de conexión supone el ahorro en un cable conductor, no siempre es recomendable utilizar el retorno por tierra, especialmente cuando las pérdidas son muy grandes o no se puede instalar por razones técnico-ambientales. En estos casos se puede instalar un retorno metálico. En la Figura 2.2 se observa un esquema de un enlace monopolar [5].

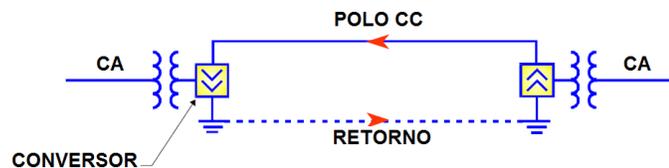


Figura 2.2. Enlace Monopolar [4].

- *Bipolar:*

Utiliza dos polos de corriente continua, es decir, dos sistemas monopolares uno de los cuales posee polaridad positiva y otro de polaridad negativa, transmitiendo la misma potencia simultáneamente. De esta forma ninguna corriente fluirá en el camino de vuelta a no ser que exista un desequilibrio entre los dos polos de corriente continua.

Al igual que en el caso anterior el retorno puede ser por tierra, mar o un conductor metálico. En el caso en que una línea entre en falla o tenga operaciones de mantenimiento programadas, la otra se puede operar como una línea monopolar con retorno por la tierra. La forma de expresar un enlace bipolar, en el que cada polo posee un voltaje de 400 kV, es ± 400 kV. En la figura 2.3 se observa este tipo de enlace:

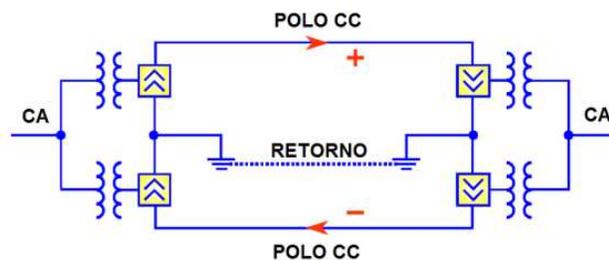


Figura 2.3. Enlace Bipolar [4].

- *Homopolar:*

Este tipo de enlace consiste en la operación de dos cables conductores con la misma polaridad utilizando la tierra o un conductor metálico como retorno. En este conductor habrá dos veces la corriente nominal de una línea. La ventaja de este tipo de enlace es la reducción de costos de

aislamiento, pero debido a la elevada corriente que circularía por el retorno a tierra no se recomienda su uso.

2.3. Componentes de un sistema de ATCC.

En la actualidad, la mayoría de los sistemas de transmisión en corriente continua instalados en el mundo están diseñados para funcionar mediante la conversión de corriente alterna (a la que están conectados) a corriente continua necesaria para el funcionamiento. Del mismo modo, se realiza la conversión de CC a CA para la generación de energía eléctrica. Los principales elementos de este doble proceso son [1,2]:

- Conversión:
 - Rectificadores (CA/CC) e Inversores (CC/CA).
 - Transformadores de conversión.
 - Reactores de alisamiento.
 - Filtros CA y CC.
 - Sistema de inyección de reactivos.
- Sistema de puesta a tierra.
- Sistema de control.
- Sistema de Transmisión.

En el siguiente esquema (figura 2.4) se observan los principales componentes de un sistema de transmisión de corriente continua:

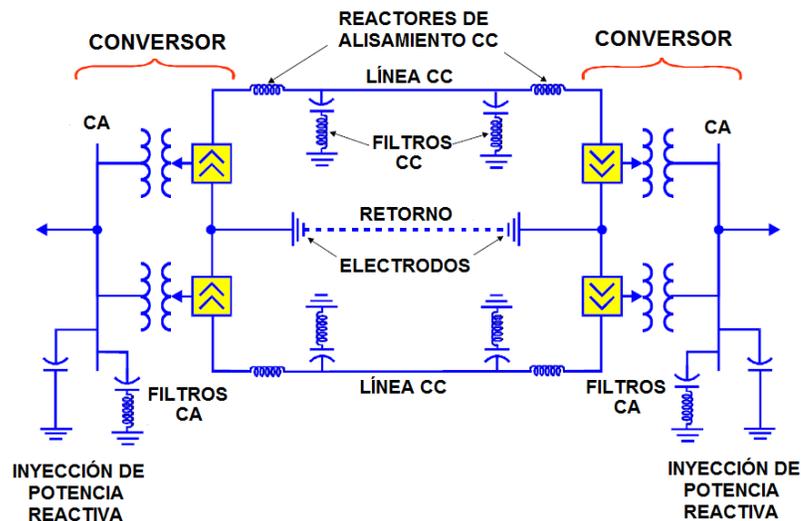


Figura 2.4. Esquema de un sistema de transmisión en corriente continua bipolar [4].

2.3.1. Descripción de los principales componentes de un sistema de ATCC.

A continuación se presenta una breve descripción de los principales componentes de un sistema de alta tensión en corriente continua.

2.3.1.1. Conversión.

Se puede considerar que la unidad de conversión es el principal componente de los sistemas de transmisión en CC. En él recae la responsabilidad de la conversión de corriente alterna a corriente continua, y viceversa. Cuando la potencia fluye desde el lado CA hacia el grupo de válvulas la configuración se denomina Rectificadora. Si la potencia fluye desde el grupo de válvulas en el lado CC al sistema CA, la configuración se denomina Inversora.

La estructura de conversión es la misma para la operación rectificadora e inversora, y deben su funcionamiento principalmente a dispositivos semiconductores como los tiristores³.

- **Rectificadores (CA/CC) e Inversores (CC/CA).**

- a) Rectificador.

Un rectificador es un conversor que actúa transformando la tensión CA en CC, para así lograr el funcionamiento del sistema de ATCC. En este caso, las formas de tensión sinusoidales son recortadas por las válvulas, obteniéndose así una señal que opera solo en un cuadrante, con lo que el flujo de potencia circula desde el lado CA al lado CC.

Un rectificador de 6 pulsos, como el que se muestra en la figura 2.5, es la unidad convertora básica en la transmisión en ATCC y es usada como rectificador e inversor. El término “6 pulsos” proviene del resultado de la rectificación de las tres fases en un ciclo, ya que la señal entregada está formada por 6 “pulsos” de igual período. Esta configuración es la unidad básica y dependiendo del desfase es posible obtener sistemas de 12, 18, 24, ..., 6n pulsos.

Las válvulas de tiristores actúan como interruptores que se encienden y dejan pasar corriente cuando les llega un impulso o señal de disparo por la puerta de control (el ángulo de disparo está entre 0° y 90°). Una válvula conducirá corriente en una dirección siempre que reciba una señal de encendido y que la diferencia de voltaje entre el ánodo y el

³ Junto con los tiristores, innovaciones recientes incluyen las tecnologías IGBT's (del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor) y GTO (del inglés Gate Turn-Off Thyristor).

cátodo sea positiva, de la misma forma la válvula dejará de conducir únicamente cuando la polarización sea negativa [6].

En las figuras 2.5 y 2.6 se pueden observar los estados de cada válvula; por ejemplo, en el primer tramo, la pareja de tiristores 1 y 2, en estado de conducción, permiten el ingreso de la corriente por el dispositivo 1 y el retorno por el 2. De manera similar, en el segundo tramo, la pareja empleada corresponde a 1 y 6, y así sucesivamente hasta finalizar con el ciclo de los tiristores 5 y 2. Además se observa la onda rectificada de “6 pulsos”:

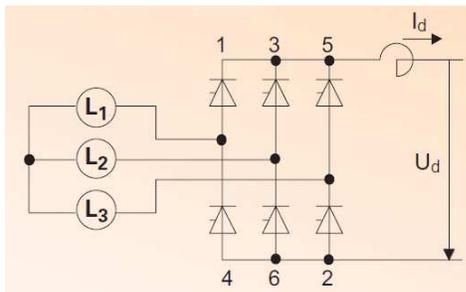


Figura 2.5. Rectificador de 6 pulsos [7].

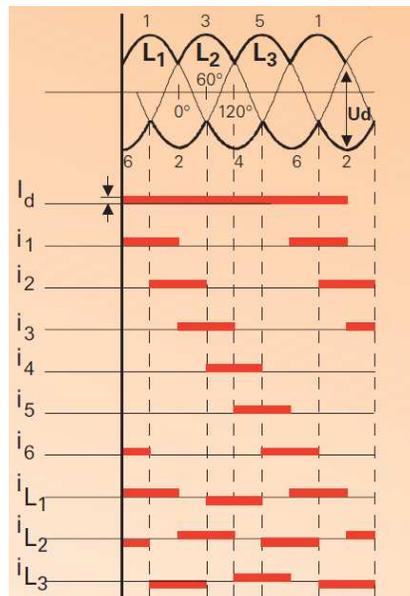


Figura 2.6. Estados de las válvulas de un rectificador de 6 pulsos [7].

Como se observa en la figura 2.6, producto de la rectificación se obtiene una señal continua que está en el cuadrante positivo (o negativo según la polaridad requerida). Sin embargo, a esta señal continua se le deben aplicar filtros y otros dispositivos para que elimine el rizado que tiene y se logre una señal totalmente continua.

El proceso en que la corriente pasa desde una válvula a otra, existiendo por lo tanto una disminución de la corriente en una válvula y un aumento en la siguiente, es llamado conmutación.

Si se considera el proceso de rectificación, cada válvula se encenderá al recibir una señal por la puerta de control (si está en polarización directa). En el proceso de conmutación la corriente de una válvula no se transferirá hacia la válvula siguiente simultáneamente, sino que esta conmutación se realizará a través de los enrollados del transformador o lo que existe antes del puente, ésta es la llamada reactancia de conmutación.

El momento en que la corriente comienza a circular por una válvula, o a conmutar desde una válvula a otra, puede ser retrasado posponiendo el momento en que se entrega el pulso de control a los tiristores. Este método permite variar el voltaje promedio entregado a la salida del rectificador.

b) Inversor.

Cuando es necesaria la transformación de CC a CA el conversor opera como inversor. En este caso el impulso o señal de disparo enviado desde la puerta de control genera un ángulo de disparo entre 90° y 180° (en el

caso de la rectificación el ángulo de disparo está entre 0 y 90°). Este proceso es similar al de la rectificación, por lo cual se rige con las mismas leyes que el proceso descrito anteriormente.

- **Transformador conversor.**

Su objetivo es convertir la tensión alterna de los sistemas CA en la tensión alterna de entrada de las conversoras CC. Este elemento, al igual que todo tipo de transformador basa su funcionamiento en las reglas de inducción electromagnética, impidiendo de esta forma la propagación de tensión y corriente en su característica continua desde el extremo continuo al alterno brindando así un aislamiento entre los lados CA y CC.

Estos transformadores se caracterizan por estar diseñados para soportar el alto contenido de armónicos generados por las estaciones conversoras sin sobrecalentarse. Además, están diseñados para soportar la premagnetización continua del núcleo, el ruido (eléctrico) y otras características de este tipo de montajes. Tienen un aspecto diferente a los utilizados normalmente en corriente alterna debido a la altura de sus contactos necesarios para alcanzar las torres de válvulas, que suelen estar suspendidas en techo del lugar de instalación de las estaciones conversoras. Habitualmente se utiliza una unidad conversora de 12 pulsos, la que está compuesta de dos unidades de 6 pulsos conectadas en serie. Algunas de las ventajas de una unidad de 12 pulsos sobre una de 6 pulsos, es que la primera posee mayor capacidad de proveer una mayor tensión al lado CC; además, permite reducir la cantidad de armónicos que inyecta el rectificador a la red CA [2].

Existen diferentes tipos de transformadores: trifásicos de tres enrollados, trifásicos de dos enrollados, monofásicos de tres enrollados y monofásicos de dos enrollados. La elección del transformador dependerá principalmente del tipo de proyecto.

- **Reactores de alisamiento.**

Su función principal es alisar la corriente que circula por el lado CC, es decir, reducir el rizado de la corriente debido a las armónicas inyectadas por el convertidor. Además se encarga de limitar la corriente de falla y reducir las armónicas de corriente incluida la limitación de interferencia telefónica [2, 7].

- **Filtros de armónicas.**

Debido al alto contenido de armónicos generados en el convertidor, es necesaria la instalación de filtros tanto en el lado CA como en el lado CC.

- a) Filtros de Corriente Alterna.

Los filtros CA poseen normalmente una doble función ya que por una parte se encargan de absorber los armónicos generados por las convertidoras y por otro proporcionan una parte de la potencia reactiva necesaria en el proceso de conversión. Los filtros para rectificadores de 12 pulsos se diseñan principalmente para filtrar armónicas características del orden de $12n \pm 1$, sin embargo, en condiciones anormales de funcionamiento de la estación se producen armónicas no características como los de 3er orden que también deben filtrarse [7].

Considerando todas las fuentes posibles de armónicas no características se pueden encontrar armónicas a partir del orden 2. La magnitud de éstas es pequeña si se compara con la de las armónicas características. La principal consecuencia de este tipo de armónicas son el incremento de las interferencias telefónicas e inestabilidad del sistema de control.

Algunos filtros usuales se presentan en la figura 2.7:

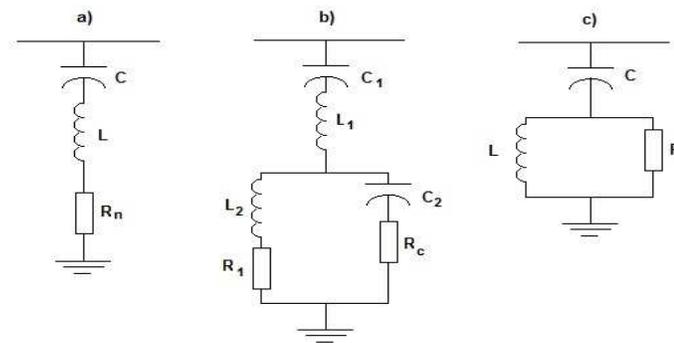


Figura 2.7. a) Filtro pasa banda, b) Filtro doble pasa banda y c) Filtro pasa alto.

b) Filtros de Corriente Continua

Estos filtros se encargan de reducir el componente CA de la señal continua que se desea obtener. Están diseñados básicamente para filtrar armónicas de varios órdenes, siendo los característicos del orden $12n$, aunque al igual que para los filtros CA pueden aparecer armónicos de otro orden. Se conectan en paralelo con la línea CC.

Las armónicas que puedan ocurrir en el lado CC de una estación convertidora producen corrientes CA, las que pueden sumarse a la corriente CC de la línea de transmisión. Estas corrientes alternas de alta frecuencia pueden crear interferencia en los sistemas telefónicos vecinos

a pesar de las limitaciones impuestas por el reactor de alisamiento. Los filtros CC son una efectiva herramienta para combatir estos problemas.

- **Sistema de inyección de reactivos.**

Una de las ventajas de los sistemas ATCC, es que la energía reactiva no fluye por el sistema de transmisión. Sin embargo, las unidades convertoras consumen gran cantidad de energía reactiva producto del proceso de conmutación.

Bajo condiciones normales de operación, un convertor, ya sea actuando como rectificador o inversor, consume como potencia reactiva aproximadamente un 50% de la potencia activa que se está transmitiendo por el sistema. Así, el consumo de la potencia reactiva varía casi linealmente con la potencia activa transmitida, siendo el consumo de reactivos de un rectificador, aproximadamente igual al de un inversor [2].

En algunos casos las necesidades del sistema de ATCC pueden ser entregadas por el sistema CA, caso especialmente frecuente cuando el rectificador está próximo a la estación generadora. En otros casos, debido al incremento en los niveles de transmisión, es necesario aportar cierta cantidad de potencia reactiva al sistema CA durante condiciones de sobrecarga, con el fin de que pueda mantener los niveles de voltaje, característica común en los sistemas CA débiles. Por lo general, los filtros CA proporcionan el 60% del consumo de potencia reactiva, siendo el resto aportado por diferentes medios, tales como: Banco de condensadores de derivación, Condensadores sincrónicos, Compensadores estáticos de reactivos (CER o SVC), Bancos de reactores de derivación, Máquinas sincrónicas [8].

2.3.1.2. Sistema de puesta a tierra.

La puesta a tierra de las estaciones convertoras es especialmente importante en el caso de sistemas monopolares, puesto que realiza las funciones de retorno de la corriente continua. En sistemas bipolares hace funciones similares al neutro en un sistema trifásico; en el caso de un sistema equilibrado no realiza ninguna función, pero en el caso habitual de asimetrías lleva a tierra la diferencia entre ambos polos. Las puestas a tierra suelen conectarse a cierta distancia de las estaciones de conversión (entre 10 y 50 km) para evitar interferencias con los equipos instalados en la estación. En función de las necesidades, pueden instalarse horizontal o verticalmente, en tierra, en zona costera o a mayor profundidad, pueden ser anódicos o catódicos, haciendo la función de electrodo en conexiones submarinas [1].

2.3.1.3. Sistema de control.

Una de las principales ventajas de los sistemas de transmisión en corriente continua es su alto nivel de control. Mediante el control de los ángulos de disparo de los tiristores en las estaciones convertoras, se puede modificar de forma casi instantánea el voltaje de salida de éstas, variando así la corriente continua y la potencia transmitida. El alto control de los sistemas de ATCC se usa, además de controlar la corriente o potencia transmitida, para estabilizar el sistema CA al que se encuentra conectado, para así controlar la frecuencia de la red o para auxiliar al control de frecuencia de los generadores conectados a la estación rectificadora ATCC.

Algunos de los requerimientos más importantes que debe tener el sistema de control son [8]:

- Suficiente rango de estabilidad y velocidad de respuesta en el control principalmente cuando el enlace se conecta a sistemas débiles.
- Operación aceptable del rectificador y del inversor a variaciones de la frecuencia. Grandes variaciones de la frecuencia se pueden obtener cuando la transmisión ATCC es la única carga en un sistema de potencia.
- Bajos montos de armónicas no características generadas por las estaciones convertoras.
- Un correcto funcionamiento en la operación de la estación inversora con el fin de tener la menor tasa de fallas de conmutación posible para distintas condiciones del voltaje.
- El menor consumo posible de potencia reactiva, es decir, operando con el menor ángulo de disparo posible y con el menor ángulo de extinción posible sin incrementar el riesgo de fallas de conmutación.
- Suave transición del control de corriente al control de voltaje CC (o ángulo de extinción)

2.3.1.4. Sistema de transmisión.

Al igual que en los sistemas de corriente alterna, el sistema de transmisión en corriente continua puede ser a través de cables de poder o líneas aéreas, o incluso una mezcla de ambos. Hasta el año 2011 la potencia instalada de enlaces de ATCC ascendía a 140.000 MW, divididos entre conexiones subterráneas/submarinas y aéreas, siendo estas últimas las mayormente utilizadas [1]. En este trabajo de titulación se estudiarán las líneas aéreas.

- **Líneas aéreas de ATCC.**

El diseño de las líneas es de suma importancia en el desempeño y economía de cualquier proyecto de transmisión de potencia. Para tener una idea de su importancia: el costo de la línea en transmisión en CC supone del 60 al 75% del coste total del proyecto, además de que la línea y sus pérdidas son parámetros decisivos a la hora de determinar el voltaje del proyecto [22].

El costo total de las líneas, tanto para CA como CC, puede ser desglosado en varios ítems, según se indica en la tabla 2.1:

ITEM	Línea CA (765 KV)	Línea CC (500 KV)
Conductores (incluidos los de masa y accesorios)	22%	26%
Aislantes y accesorios	4%	3%
Torres, vientos, fundaciones y tomas de masa.	22%	15%
Instalación, transporte y administración.	47%	50%
Administración central.	5%	6%

Tabla 2.1. Distribución de los costos en líneas ATCC⁴ y ATCA⁵ [22].

De la tabla 2.1 se desprende que tanto para las líneas CA como las líneas CC el costo de las torres y conductores supone una parte importante de los costos totales de la línea y que por lo tanto un dimensionamiento óptimo es muy importante si se persigue una buena rentabilidad. Esta optimización debe tener en cuenta las pérdidas de la línea y terminales.

⁴ ATCC: Alta Tensión en Corriente Continua.

⁵ ATCA: Alta Tensión en Corriente Alterna.

La configuración del circuito (monopolar, bipolar y homopolar) está determinada por el número de circuitos requeridos para la transmisión, por las limitaciones impuestas en utilizar la tierra como camino de retorno y por el hecho de que se acepte o no, que la ocurrencia de una falla en una torre cause la pérdida completa de la transmisión. El número y sección de los conductores de la línea están determinados principalmente por la corriente de carga, aunque las pérdidas por el efecto corona también deben ser consideradas.

Los aislantes deben ser seleccionados según la longitud de la cadena, la distancia más corta entre conductores medida a través del aislante y con respecto a la resistencia mecánica que deben poseer. Otros parámetros que influyen en la elección son el nivel isocerámico, máximo valor de sobrevoltaje de maniobra, niveles de contaminación en el área, probabilidad de nieve y heladas, etc. [22]

En la figura 2.8 se presentan dos tipos de configuraciones bipolares:

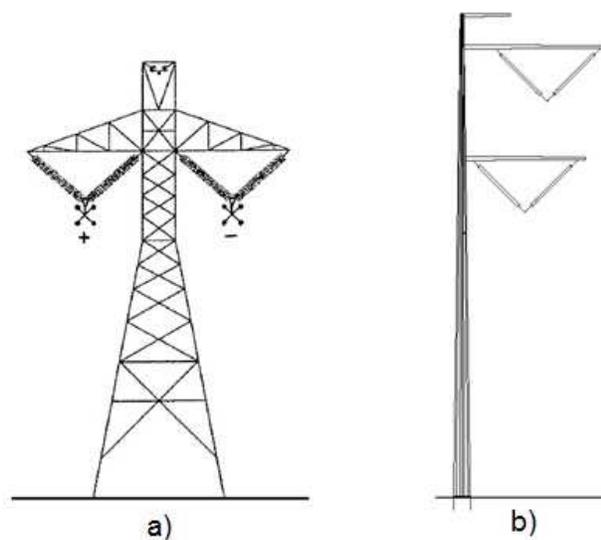


Figura 2.8. Esquemas de configuraciones bipolares, a) horizontal b) vertical.

En la figura 2.9 se observa una línea aérea bipolar del enlace Itaipú de Brasil-Paraguay, que es actualmente la mayor central hidroeléctrica del mundo en generación de energía. Con 20 unidades generadoras y 14.000 MW de capacidad instalada, suministra el 18,9% de la energía consumida en Brasil y alimenta el 77,0% del consumo paraguayo [9]:



Figura 2.9. Línea de transmisión bipolar (± 600 kV) de Itaipú, Brasil; el mayor existente en el mundo.

2.4. Ventajas y Desventajas de un sistema de ATCC.

Un sistema de ATCC puede ser usado para transmitir potencia bajo una variedad de circunstancias. Algunas de las ventajas y desventajas para su aplicación se presentan a continuación.

2.4.1. Ventajas.

Algunas de las principales ventajas de la transmisión CC por sobre la transmisión CA, son [1,2,4,8]:

Aspectos técnicos:

- Para la transmisión a larga distancias en sistemas de CC no existen los problemas de estabilidad típicos de los sistemas CA, por lo que no se hace necesario aumentar desmedidamente la tensión, de forma que la línea se puede operar con su carga económica. Además, la línea aérea requiere solo un conductor, frente a los tres de una línea alterna y se eliminan las transposiciones, que en tensiones extra altas tienen un costo elevado.

En la figura 2.10 se observa como la potencia del sistema de ATCC se mantiene prácticamente independiente de la distancia, mientras que con la transmisión en ATCA la capacidad de transmisión a lo largo de la línea disminuye debido a sus efectos inductivos. Por ejemplo, para una línea de transmisión CA de 1000 kV, la potencia comienza a disminuir a partir de aproximadamente 1000 km [38].

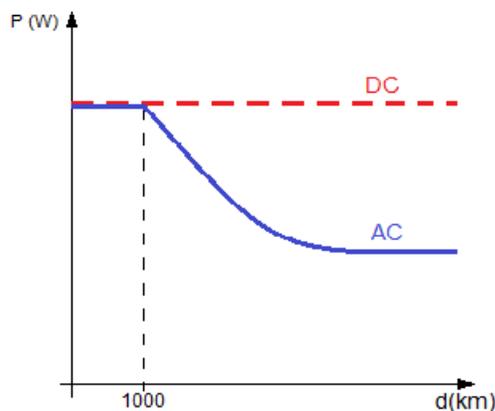


Figura 2.10. Relación entre potencia del sistema y distancia de transmisión para líneas CC y CA de 1000 kV. [1].

- Con la transmisión en ATCC se pueden realizar enlaces submarinos superiores a 30 – 40 kms., ya que no se hace necesario elevar la

corriente capacitiva (como en el caso CA). Además, en este tipo de sistemas es posible utilizar los cables sin limitaciones de longitud. Ejemplos de estas situaciones se presentan al apoyar consumos insulares desde un sistema interconectado continental (Suecia – Gotland, islas norte y sur de Nueva Zelanda, Italia – Cerdeña, Canadá – Vancouver, etc.); y en menor escala al apoyar metrópolis desde grandes centrales cercanas.

- Al utilizar corriente continua es posible realizar una interconexión entre sistemas de distinta frecuencia (asíncronos). Un ejemplo de lo anterior es Sakuma, en Japón, que une los sistemas de 50 y 60 Hz de ese país permitiendo la transmisión de cientos de MW en cualquier dirección. Otro ejemplo, es la unión entre el lado Paraguayo de Itaipú (50 Hz) y Sao Paulo (60 Hz) donde se transmiten alrededor de 6300 MW a Brasil.
- Comparando un sistema de ATCA con uno de ATCC utilizando la misma potencia, los mismos niveles de aislamientos y los mismos tamaños de conductores, el sistema de ATCC tiene aproximadamente un 33% menos pérdidas que un sistema de ATCA.
- La posibilidad de utilizar el retorno por tierra entrega una solución técnica para las fallas que puedan producirse en uno de los polos de las líneas bipolares, o su uso normal en otras configuraciones, aunque se deben tener presentes las restricciones ambientales que genera la transmisión por tierra.

- No se produce efecto skin⁶, a diferencia de los sistemas CA.
- Existencia de bajas corrientes de cortocircuito en la línea CC, ya que generalmente un enlace de ATCA eleva la corriente de cortocircuito al producirse una falla, pero en un enlace de ATCC no la incrementa más allá de la corriente establecida (por diseño) ya que el sistema de control del sistema de ATCC mantiene fija la transferencia de potencia en el enlace y con ello la corriente necesaria para la transmisión de potencia.
- Mayor facilidad de transporte y construcción de las estructuras del sistema. Además, las estructuras requeridas son más livianas y no se utilizan estructuras de transposición (que son utilizadas en las líneas CA a causa de problemas por fenómenos reactivos).
- La tecnología de ATCC entrega una gran ventaja con respecto a la ATCA en cuanto a la posibilidad de poder controlar rápida y de forma segura la potencia activa entregada a un sistema.
- El enlace CC actúa como un aislante para el sistema CA. Esto ayuda mucho cuando se producen fallas en el sistema, ya que así estas fallas no provocarán consecuencias en el sistema CA.

Aspectos económicos:

- Los costos de las instalaciones son, generalmente, las variables más importantes a la hora de escoger entre una tecnología u otra. Para esto, es usual tomar en cuenta los costos directos de una instalación (línea,

⁶ Efecto Skin: efecto que se produce en los cables de transmisión cuando son traspasados por una corriente eléctrica, provocando una redistribución que genera una densidad de corriente mayor en la superficie de los conductores que en el centro de éste.,

estaciones conversoras, transformadores, etc.) y los costos indirectos (pérdidas capitalizadas de la línea).

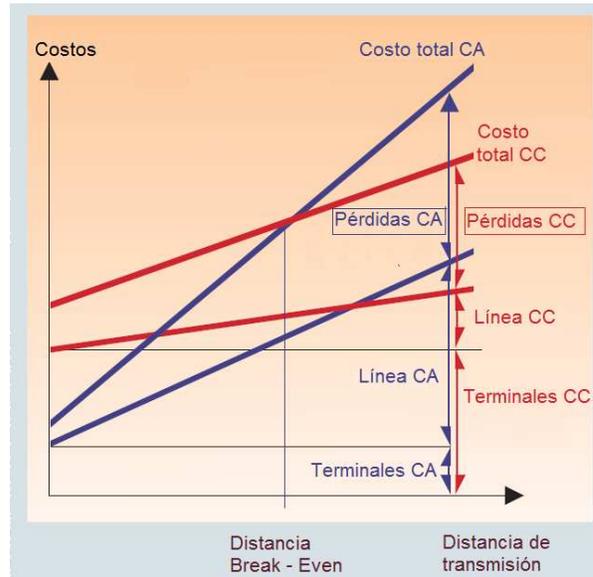


Figura 2.11. Comparación de los costos totales v/s distancia [7].

En los sistemas CC los costos de los terminales (estaciones conversoras y transformadores) son mayores que en el caso CA, aunque como se observa en la figura 2.11, los costos de la línea de transmisión (conductores y torres) son más bajos para la CC.

Cuando se contabilizan los costos indirectos existe una distancia crítica denominada "Break-Even" (no tiene ganancias ni pérdidas) donde comienza a ser económicamente conveniente utilizar un sistema de transmisión CC. Esto se debe principalmente, a que más allá de esta distancia las pérdidas producidas en corriente alterna comienzan a ser importantes, con un valor aproximado de 50% del costo total del sistema de transmisión.

Se estima que para líneas aéreas la distancia crítica (Break-Even) se encuentra en el rango de 500 a 800 km, lo que depende de varios factores como, por ejemplo, los costos específicos de los distintos componentes del sistema, tasas de interés de cada proyecto, costos de las pérdidas, costos de la franja de servidumbre, etc.

Aspectos Ambientales:

En un sistema de transmisión de ATCC las principales consideraciones medioambientales son el efecto corona y los campos eléctricos y magnéticos producidos. El campo eléctrico continuo alrededor de las líneas de alta tensión es producido generalmente por las cargas eléctricas en los conductores y por las cargas producidas al ionizarse el aire que rodea al conductor. El campo magnético continuo es producto de la corriente continua que circula a través de las líneas de transmisión. Las ventajas medioambientales del uso de un sistema de transmisión de ATCC son:

- Para una misma transmisión de potencia se requiere una menor franja de servidumbre y torres más esbeltas, esto porque se utilizan un menor número de líneas (generalmente 2 conductores) y por lo tanto, se necesita una menor resistencia mecánica en las torres. En la figura 2.12 se observa una comparación entre el tamaño de las torres para transmisión en CA y CC; y en la figura 2.13 se muestra el espacio total de las torres utilizado para la transmisión de una misma tensión en ATCA y en ATCC.

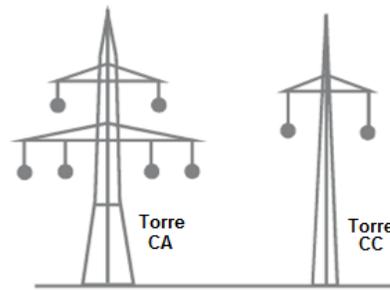


Figura 2.12. Torres típicas para transportar 1000 MW [7].



Figura 2.13. Espacio utilizado para las torres en un sistema CA y CC de 500 kV y ± 500 kV, respectivamente, para transportar 3000 MW [8].

En la línea Three Gorges de China (6000 MW y ± 500 kV), la relación entre la franja de servidumbre para transmisión en CA y CC es de 1:3.75 (5 x 75m para CA y 2 x 50m para CC) [3].

- El campo magnético producido por la Tierra de forma natural es semejante al que se produce alrededor de las líneas de transmisión CC, por lo que esta pequeña contribución al campo magnético de la Tierra no es preocupante [8].
- El campo eléctrico generado bajo de las líneas de transmisión CC no presenta efectos biológicos negativos. Actualmente no existen teorías o

mecanismos que puedan verificar si los niveles de campo eléctrico generados por líneas CC tienen efectos negativos en la salud humana.

- Producto del efecto corona se produce una pequeña contribución de ozono, la que es del mismo orden de magnitud que el generado en procesos naturales, por lo que no representa riesgo alguno [8].

2.4.2. Desventajas.

Algunas de las principales desventajas son:

Aspectos técnicos:

- Los transformadores CA trabajan por el principio de inducción electromagnética. Los sistemas de ATCC no producen campos magnéticos alternos y consecuentemente, no puede utilizar transformadores convencionales. Esto limita la posibilidad de que un sistema ATCC permita la conexión de cargas en el trayecto de la línea de transmisión.
- En la transmisión CA la corriente pasa por cero, mientras que en la transmisión CC esto no ocurre. De esta forma, la interrupción de la corriente en un sistema de ATCC es un proceso mucho más complejo que para CA.
- El proceso de conversión requiere de un equipamiento muy complejo. Además, la conversión (CA/CC y CC/CA) produce una gran cantidad de armónicos. Por este motivo, se hace necesaria la instalación de filtros para absorber los armónicos y así evitar daños en los sistemas CA y CC.

- Las estaciones conversoras consumen gran cantidad de potencia reactiva. Además, presentan poca capacidad de sobrecarga dada la limitante térmica de los semiconductores.
- En instalaciones monopolares con retorno por tierra, el campo magnético puede modificar la lectura de una brújula en las proximidades de la línea, lo que se puede solucionar instalando un retorno metálico. Por otra parte, un retorno por tierra puede inducir una corriente en tuberías o conductos metálicos que se encuentren cerca de las estaciones de conversión, lo que puede producir la oxidación o corrosión de estos elementos. Esto último es la principal razón por la que el retorno por tierra puede estar restringido a solamente algunas horas de uso [8].

Aspectos económicos:

Como se observa en la figura 2.11, antes de la distancia “Break – Even” los costos de un sistema de transmisión de ATCC son mayores que para la transmisión en ATCA. Por lo cual, bajo dicha distancia, la instalación de un sistema de ATCC presenta mayores desventajas que el uso de un sistema de ATCA desde el punto de vista económico.

Aspectos ambientales:

- En menor escala que para la transmisión en CA, el principal impacto de la transmisión en CC es el visual, producto de la altura de las torres y de la existencia de una franja de servidumbre.
- Aunque los campos magnéticos estáticos generados por las líneas de transmisión en CC no presentan efectos adversos a la población, si se

debe tener precaución en aquellas personas que posean dispositivos tales como marcapasos [25].

- Otra desventaja es el desplazamiento, por efecto del viento, de las cargas espaciales generadas en la vecindad de los conductores. Estas pueden llegar al contacto con personas, animales y plantas que se encuentren lejos de la franja de servidumbre. Este desplazamiento dependerá de las características de la línea y de condiciones de viento en el lugar.
- El efecto corona, además puede producir interferencias de radiofrecuencia y ruido audible que, dependiendo de las características de la línea, pueden generar niveles altos de emisión.

CAPÍTULO 3

EFFECTOS PRODUCIDOS POR LAS LÍNEAS DE ATCC

En este capítulo se presentan algunos de los efectos producidos por las líneas de transmisión de alta tensión en corriente continua (ATCC), especialmente en lo que se refiere al efecto corona y los campos eléctricos y magnéticos estáticos.

El efecto corona se entiende como una descarga parcial en un gas cuando su campo eléctrico de ruptura es superado. Por producirse la descarga en una zona limitada del gas, no pierde sus propiedades dieléctricas en el resto de él. Este efecto se produce en campos muy desuniformes, en zonas de gran intensidad de campo o cuando las dimensiones de los electrodos son muy pequeñas respecto a las distancias entre ellos. Básicamente la descarga consiste en un proceso de multiplicación de cargas libres dentro del gas, hasta constituir una zona completa o parcialmente conductora; esta conductividad se debe al fenómeno de ionización.

En el caso de los campos eléctricos y magnéticos, los cálculos de éstos han adquirido una gran importancia en el diseño de las líneas de alta tensión en CC. Esto, porque en las líneas eléctricas de alta tensión se produce una importante fuente de campos eléctricos y magnéticos. En el caso de las líneas CC, el campo generado es estático, es decir, estacionario, ya que no depende del tiempo. Además, producto de las cargas generadas por el Efecto Corona se produce un ambiente eléctrico complejo y dinámico bajo las líneas.

3.1 Efecto Corona

Cuando el campo eléctrico o gradiente de potencial alcanza la “rigidez dieléctrica del aire” (aproximadamente 30 kV/cm a presión atmosférica normal), el aire se ioniza, se hace conductor y se produce una descarga local. Este fenómeno va acompañado de un efluvio luminoso del que proviene su nombre. Además, se producen pérdidas de energía, ruido audible (caracterizado por un zumbido fácilmente perceptible en líneas CA) y ruido sobre señales de radio y televisión en las cercanías de la zona donde se localiza el fenómeno corona. También se produce ozono y en presencia de humedad, ácido nitroso, el que trae como consecuencia la corrosión de los conductores cuando el fenómeno es intenso.

3.1.1 Efecto Corona en líneas de transmisión.

3.1.1.1 Procesos Elementales.

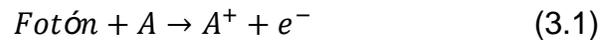
Existen diversos procesos elementales que contribuyen, detienen o retardan la producción de cargas eléctricas en el aire; de acuerdo con su acción, podemos clasificarlos en procesos favorables a la descarga y procesos desfavorables [10,11].

- Procesos Favorables a la descarga.

- Fotoionización:

El bombardeo fotónico sobre los átomos de un gas por luz ultravioleta, rayos cósmicos, radio actividad natural, radiaciones, etc., es capaz de ionizarlos cuando la energía del fotón incidente es

al menos igual a la energía de ionización de la partícula gaseosa. Si es que existe un excedente de energía, éste se transmite al electrón en forma de energía cinética.



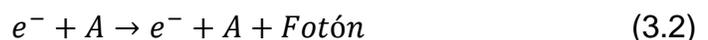
- Ionización por choque:

Los electrones libres se desplazan y aceleran por la acción de un campo eléctrico como por ejemplo, el generado por una línea de transmisión. En su movimiento, el electrón encuentra átomos y moléculas de los gases del aire, chocando con ellos. El choque puede ser de dos clases: elástico e inelástico (según si la energía del electrón sea alta o baja).

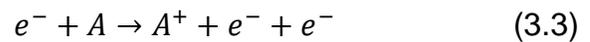
En el choque elástico no ocurren cambios en la energía interna de las partículas ni en su estructura, solamente el electrón pierde algo de su energía, que ya era relativamente baja.

Si el choque es inelástico, ocurren cambios de energía interna en el átomo neutro colisionado, los que pueden ser:

Excitación: El átomo pasa a un estado de mayor energía interna por desplazamiento orbital de sus electrones. Por lo general, este estado es inestable, desprendiéndose de la energía en exceso mediante la emisión de un fotón, al recuperar el electrón su órbita original. El proceso se puede esquematizar como:



Ionización: Si la energía del electrón es aún mayor, el choque tiene por consecuencia el desprendimiento de un electrón del átomo chocado. El átomo primitivamente neutro, al quedar con un electrón menos, adquiere carga positiva y se convierte en un ión positivo:



- Procesos Desfavorables a la descarga.

- Recombinación:

Para el caso de choque entre un electrón y un ión positivo, sin la energía suficiente para producir algunos de los resultados ya descritos, ocurre una neutralización de ambas cargas. La reacción produce la liberación de una cierta cantidad de energía la que es radiada en forma de un fotón, por lo tanto:



- Enlace con molécula neutra:

Un electrón libre dotado de escasa energía puede chocar con un átomo neutro ligándose a él y formando así un ión negativo:



El ión negativo tiene menor movilidad que el electrón y por ese motivo, a pesar de conservarse la carga, la descarga tiende a neutralizarse.

3.1.1.2 Descargas corona en conductores cilíndricos.

En el caso de una línea de transmisión, tanto para corriente alterna como para corriente continua, el campo eléctrico en la vecindad de los conductores se redistribuye por efecto de la ionización del aire alrededor de éste. Si el campo resultante en la superficie y vecindad de los conductores excede el valor de ruptura del aire, se producirá una descarga parcial. Pueden aparecer en forma aleatoria o estable en el tiempo, por ejemplo, aproximadamente en cada ciclo de un voltaje alterno o al menos varias veces por minuto en un voltaje continuo. Cualquier tipo de irregularidad en la superficie de los conductores causa una concentración del campo eléctrico formándose ahí una fuente puntual de descarga (efecto punta) [11].

Las características y ocurrencia de los diferentes tipos de corona dependen de la polaridad de la tensión en el conductor, las características de ionización del aire, la magnitud y distribución del campo eléctrico; además de la geometría de los conductores y la magnitud del voltaje aplicado. Los tipos de corona posibles en un medio ciclo de un voltaje alterno son esencialmente similares a los que ocurrirían con un voltaje continuo cuando las cargas creadas en el medio ciclo precedente se toman en cuenta pudiendo desarrollarse varios tipos de corona sobre un ciclo de voltaje alterno. Sin embargo, algunas descargas corona pueden ser difíciles de observar o son suprimidas por otras con un voltaje alterno [2,21].

3.1.1.2.1 Descarga corona con polaridad negativa en CC.

En torno al conductor, el campo eléctrico tiene su máxima intensidad. Un electrón libre en esa zona es acelerado, alejándose del conductor y creando una avalancha. En este caso las condiciones de desarrollo de la avalancha son más desfavorables a medida que se aleja del conductor, pues el campo disminuye rápidamente [10, 21]. En la figura 3.1 se observa el desarrollo de la avalancha de electrones a medida que se aleja del conductor negativo:

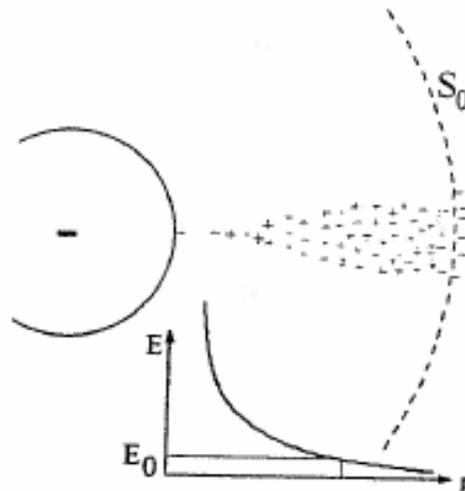


Figura 3.1. Avalancha de electrones en la descarga de un conductor negativo [21].

Algunos de los fotones producidos en esta avalancha golpean al conductor, liberando electrones que crean otras avalanchas y la cantidad de electrones libres crece rápidamente. Los electrones, al alejarse del conductor, dejan atrás los iones positivos producidos y finalmente se ligan a moléculas neutras, generalmente oxígeno, formando iones negativos.

El campo se deforma por efecto de las concentraciones de carga espacial: aumenta cerca del conductor por efecto de la carga espacial positiva, y esto provoca que los nuevos electrones libres en la superficie del conductor se recombinen con las cargas positivas antes de multiplicarse. Con el movimiento de la carga positiva hacia el conductor la ionización en la superficie cesa cuando el campo en esa zona disminuye bajo el valor inicial, tanto por neutralización de esta carga como por la presencia de la carga negativa más lejana.

Al alejarse la carga negativa por efecto del campo, retornan las condiciones iniciales y el proceso se repite cada vez que se produce un pequeño pulso de corriente. Se produce además radiación de energía que aparece en forma de luminosidad continua, por la elevada frecuencia de los pulsos que alcanzan desde 1 kHz hasta algunos MHz, lo que provoca ruido audible e interferencias a frecuencias de radio.

La energía para estos procesos es extraída del campo y constituye las pérdidas corona. Los pulsos de corriente y la frecuencia de éstos conforman las fuentes de interferencia.

Los tipos de descargas corona con polaridad negativa que se identifican son:

- ***Descarga Trichel Corona (Trichel Streamer Discharge):***

Aparece cuando se alcanza o excede ligeramente el gradiente crítico del aire. Se manifiesta como un abanico purpúreo que se mueve constantemente, y sigue un patrón de pulso regular en el que luego de que la corona se inicia, desarrolla y finaliza, viene un tiempo muerto y el ciclo se repite. El resultado de la descarga es un pulso regular negativo

de pequeña amplitud y corta duración (en el rango de 100 nanosegundos) y de alta repetición.

- ***Descarga Glow Corona Negativa no Pulsante (Negative Pulseless Glow Discharge):***

Se produce al aumentar el voltaje con que se genera una descarga de Trichel. Se caracteriza por ser no pulsante y generar una gran luminosidad. Físicamente en la corona glow no pulsante se puede distinguir una esfera brillante de glow negativa, seguida por una luminosidad cónica positiva desde el punto de descarga.

- ***Corona Streamer Negativa (Negative Streamer Discharge):***

Ocurre para valores de campo superiores al del campo crítico. Se manifiesta como un filamento azul. Está caracterizada por un pulso de poca amplitud y larga duración.

3.1.1.2.2 Descarga corona con polaridad positiva en CC.

Con el conductor positivo, la avalancha electrónica tiene su origen en el aire, en torno al conductor y se desarrolla hacia él. Los electrones son absorbidos por el conductor dejando atrás una nube de iones positivos, de mucha menor movilidad, alejándose del conductor. Esta avanzada de iones positivos actúa como prolongación del conductor, formando canales (streamer) que avanzan mucho más lejos que las avalanchas de polaridad negativa, producto del alto efecto de borde de campo eléctrico en su extremo. Por fotoionización se crean nuevas avalanchas de electrones libres y pares ión-electrón en el extremo del canal.

Cuando las ramificaciones del "streamer" alcanzan zonas de campo débil, su avance se detiene; los electrones se recombinan o forman iones negativos que se alejan del campo. Las condiciones iniciales se restablecen y el proceso se reinicia.

Este proceso de ionización se propaga lejos del conductor, mucho más que las avalanchas de polaridad negativa, genera corrientes cuyo valor sube muy rápido y alcanza amplitudes varias veces mayores que con polaridad negativa.

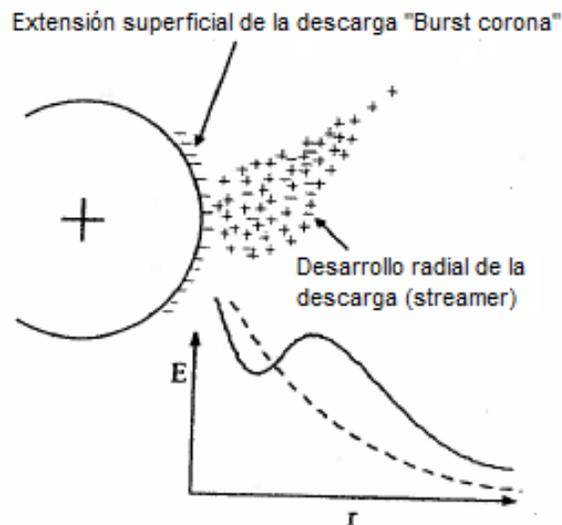


Figura 3.2. Desarrollo de la descarga en un conductor positivo [21].

Las descargas corona con polaridad positiva que se identifican son:

- **Burst Corona:**

Ocurre sólo con polaridad positiva. Aparece al alcanzar o exceder ligeramente el gradiente crítico del aire. Se manifiesta como un terciopelo azulado y se asocia con un pulso de corriente de poca amplitud y larga duración (fracciones de ms).

- ***Corona Plume:***

Se denomina así a las descargas positivas de las “Corona Streamer”. Éstas aparecen al desintegrarse las gotas de agua que se encuentran en la superficie del conductor.

- ***Onset Streamer Discharge:***

Resulta del desarrollo radial de la descarga. Durante el desarrollo de la “Corona Streamer” una considerable cantidad de carga positiva se forma en la región del campo. El efecto acumulativo de las sucesivas avalanchas de electrones y la absorción de los electrones libres en el ánodo resulta en la eventual formación de carga espacial residual en el frente del ánodo. La descarga se desarrolla en un modo pulsante, produciendo un pulso positivo de larga amplitud y relativamente baja tasa de repetición.

- ***Glow Corona Positiva (Positive Glow Discharge):***

Tiene una apariencia de una delgada capa luminosa adyacente a la superficie del ánodo, donde se produce la actividad intensa de ionización. Se caracteriza por producir pequeños pulsos con una alta tasa de repetición (de unos cientos de kHz).

- ***Hermstein Glow:***

Es una descarga poco frecuente que aparece sólo con polaridad positiva.

Para el caso de una línea de transmisión de ATCC lo anteriormente descrito se puede resumir en (en la figura 3.3 se observa la diferencia del efecto corona para líneas CC y CA):

- Polo positivo: aparecerán pulsos de mayor amplitud pero menos frecuentes.
- Polo negativo: aparecerán pulsos repetitivos de poca amplitud.

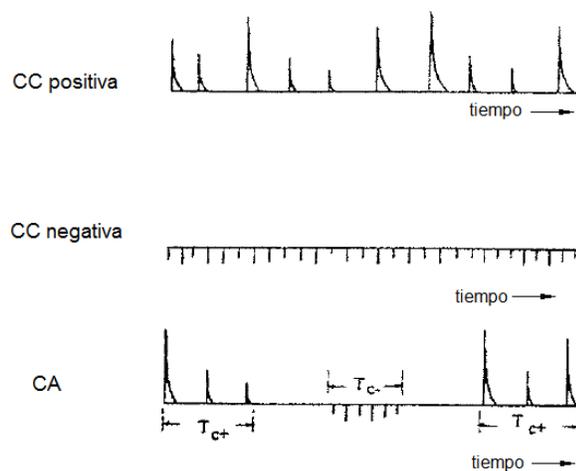


Figura 3.3. Efecto de la tensión sobre las descargas corona [21].

3.1.1.3 Variables que afectan el fenómeno corona.

Algunas de las variables más importantes que afectan la ocurrencia y características del fenómeno corona en las líneas de transmisión de ATCC, se describen a continuación [10]:

- *Gradiente superficial:*

El campo eléctrico en la superficie de los conductores es el factor determinante, ya que en un campo eléctrico uniforme es necesario un gradiente superficial de aproximadamente 29.8 kV punta/cm bajo

condiciones normales de temperatura y presión (25 °C y 760 mm de Hg) para causar la ionización del aire. Este valor depende de la configuración geométrica de la línea, la magnitud de la tensión, el número de conductores por haz y el diámetro respectivo de éstos.

- *Condiciones climáticas*⁷:

Los factores climáticos que más influyen en la ocurrencia del efecto corona son las precipitaciones y la humedad, principalmente cuando las gotas de lluvia se posan sobre los conductores, ya que por efecto de la gravedad en la parte inferior del conductor se acumula una mayor cantidad de gotas provocando una irregularidad y así una descarga corona producto del llamado efecto punta. Otro factor que influye es la densidad relativa del aire, la que depende de la temperatura y la presión. En el caso de las líneas CC el viento es una variable a considerar, sin embargo, es un factor de segundo orden.

- *Estado de la superficie del conductor:*

Producto de la operación de las líneas se produce un deterioro en ellas; como por ejemplo, contaminación por partículas inorgánicas (smog, polvo, etc.) y orgánicas (insectos, hojas, etc.). Además, algunos de los daños son producidos durante la etapa de construcción de la línea. Se considera un factor de corrección “m” para el gradiente crítico, llamado coeficiente de estado superficial, el que se determina por:

⁷ Se refiere a las condiciones que afectan la ocurrencia del efecto corona, y dependerá del tipo de transmisión (CA o CC) como influye en el ruido audible y campos eléctricos, lo cual es explicado más adelante.

$m = 1.00$	<i>Conductor liso ideal</i>
$m = 0.95$	<i>Conductor cableado nuevo y liso</i>
$m = 0.70 - 0.80$	<i>Conductor cableado envejecido</i>
$m = 0.50 - 0.70$	<i>Conductor tratado deficientemente</i>
$m \leq 0.60$	<i>Conductor bajo lluvia, nuevo o envejecido</i>

3.1.1.4 Gradiente crítico.

Cuando el campo eléctrico de la superficie del conductor de una línea de transmisión excede cierto valor, se produce la descarga eléctrica parcial en la vecindad del conductor produciendo así la descarga corona.

El campo eléctrico en la superficie del conductor se define como el gradiente crítico. Este valor depende de factores como el radio del conductor, las condiciones de la superficie de éste y la densidad del aire. También depende del tipo de voltaje aplicado al conductor; y en el caso de la corriente continua, de la polaridad del conductor.

El gradiente crítico de conductores cilíndricos ha sido determinado experimentalmente en estudio de laboratorios. El investigador Whitehead fue quien estudió el comportamiento del gradiente crítico en corriente continua, tanto para el polo positivo como para el negativo. Basado en los resultados obtenidos sobre un número de conductores cilíndricos lisos de pequeño diámetro, Whitehead derivó la siguiente fórmula empírica del gradiente crítico [23]:

$$E_c = mE_0\delta \left[1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right] \quad (3.6)$$

Donde;

E_c : es el gradiente crítico, kV/cm .

m : es un factor del estado superficial del conductor (sección 3.1.1.3).

δ : es la densidad relativa del aire

r : es el radio del conductor, cm .

Para CC positivo: $E_0 = 33.7$ y $K = 0.24$

Para CC negativo: $E_0 = 31.0$ y $K = 0.308$

Puesto que no se han observado grandes diferencias en el gradiente crítico para polaridad positiva y negativa, se desarrolló la siguiente fórmula que es aplicable para ambas polaridades:

$$E_c = 30m\delta \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta r}} \right] \quad (3.7)$$

Donde;

E_c : es el gradiente crítico, kV/cm .

m : es un factor del estado superficial del conductor (sección 3.1.1.3).

r : es el radio del conductor, cm .

δ : es la densidad relativa del aire, dada por:

$$\delta = \frac{(273+T_0) P}{(273+T) P_0} \quad \text{ó} \quad (3.8 a)$$

$$\delta = \frac{0,3921 (760-0,086h)}{273+T} \quad (3.8 b)$$

Donde;

T : es la temperatura del aire.

T_0 : temperatura de referencia, $25^\circ C$.

P : presión del aire.

P_o : presión de referencia, 760 mmHg.

h : altura sobre el nivel del mar de la línea de transmisión, m.

3.1.2 Cálculo del campo eléctrico en la superficie de los conductores.

Producto de la importancia que tiene el gradiente crítico en el cálculo de otros parámetros, como el ruido audible, se debe contar con un método suficientemente preciso para determinar este parámetro.

Existe una gran cantidad de métodos para evaluar el campo eléctrico superficial sobre conductores únicos y configuraciones en haz. La precisión real de los valores de gradientes calculados no depende sólo de la precisión del método de cálculo, sino que además de la precisión de los datos de entrada. Dentro de los métodos de cálculo existentes, los más efectivos en cuanto a simplicidad-precisión son el método de Maxwell y el método de Mark y Mengele [11]. Para la aplicación de éstos métodos, se realizan las siguientes suposiciones:

- La superficie del suelo se supone plana, conductora, horizontal e infinita.
- Los conductores se suponen cilíndricos, lisos, infinitamente largos, paralelos entre sí y con respecto a tierra.
- Los conductores se suponen superficies equipotenciales con potencial conocido y el plano de tierra con potencial cero.
- Se desprecia la influencia de las estructuras de soporte de los conductores y de cualquier otro objeto vecino.

3.1.2.1 Método de los coeficientes de potenciales de Maxwell.

Este método es aplicable a líneas con un conductor por fase (en el caso CA) o por polo (en el caso CC). El método consiste en reemplazar la carga en la

superficie de los conductores por una carga de longitud infinita en el centro del conductor [2,11].

Para una línea con n conductores, lo primero es determinar la carga Q de cada uno de ellos:

$$[Q] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad (3.9)$$

Donde los vectores $[Q]$ y $[V]$ representan, respectivamente, los valores complejos (caso CA) o reales (caso CC) de las cargas por unidad de longitud y las tensiones de línea con respecto a tierra de cada uno de los conductores; donde n es igual al número de fases o polos más los cables de guardia⁸. Por ejemplo, para una línea trifásica (CA) de doble circuito con un cable de guardia, n es igual a 7, o para una línea bipolar (CC) con un cable de guardia, n es igual a 3. $[P]$ es la matriz de los potenciales de Maxwell, cuyos términos están definidos por [2, 11]:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \text{Ln} \left(\frac{2H_i}{R_i} \right) \quad (3.10 a)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \text{Ln} \left(\frac{D_{ij}^{\wedge}}{D_{ij}} \right) \quad (3.10 b)$$

Donde;

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \text{ F/m, es la permitividad del aire.}$$

R_i es el radio del conductor i , m .

H_i es la altura del conductor i al plano tierra, m .

⁸Cable de guardia: es un cable que no transmite energía y se encuentra en la parte más alta de la torre. Sirve para proteger al sistema de sobretensiones, entre otros imprevistos. Sus características están determinadas por los parámetros y tipo de línea.

D_{ij} es la distancia entre los conductores i y j , m .

D'_{ij} es la distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j en relación al plano de tierra, m .

Por lo tanto, una vez conocida la magnitud de las cargas, el campo eléctrico en la superficie de cada conductor es normal a ésta y está dado por:

$$E_i = \frac{Q_i}{2\pi\epsilon_0 R_i} \quad \text{con } i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (3.11)$$

Donde;

Q_i es la carga por unidad de longitud del conductor i , C .

R_i es el radio del conductor i , m .

En la figura 3.4 se muestra un esquema del diagrama utilizado para el cálculo de los coeficientes de Maxwell:

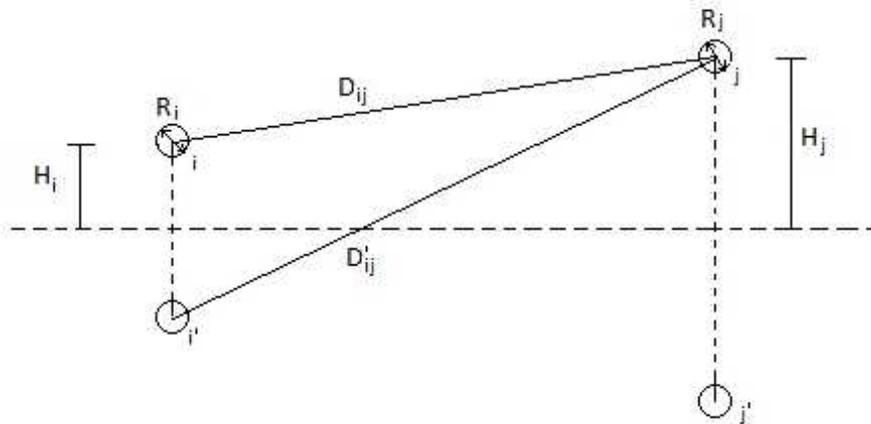


Figura 3.4. Diagrama para el cálculo de los coeficientes de Maxwell.

Donde (en la figura 3.4):

H_i es la altura del conductor i al plano de tierra, m .

R_i es el radio del conductor i , m

D_{ij} es la distancia entre los conductores i y j , m .

D'_{ij} es la distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j en relación al plano de tierra, m .

H_j es la altura del conductor j al plano tierra.

R_j es el radio del conductor j .

3.1.2.2 Método de Mark y Mengersle.

Este método de cálculo del campo eléctrico en la superficie de los conductores toma en consideración el efecto de la superficie del suelo y de los haces conductores separadamente. En el desarrollo del método cada haz de conductores es substituido por un conductor equivalente. Calculada la carga de los conductores equivalentes, la carga de cada conductor del haz se obtiene dividiendo la carga total del haz por el número de conductores en haz, y ésta es situada en el centro de cada conductor. Esto significa que la carga en la superficie de cada conductor del haz se supone idéntica. Entonces para que los valores del campo eléctrico calculado sean válidos, la distancia entre las fases y la distancia entre las fases y el suelo deben ser mucho mayores que el radio del haz [11,21] (ver figura 3.5).

- Cálculo del radio equivalente:

Cada haz de conductores es substituido por un conductor equivalente de radio R_e , que está dado por:

$$R_e = \sqrt[N]{NrR_h^{N-1}} \quad (3.12)$$

Donde;

N , es el número de conductores por haz.

r , es el radio de cada conductor del haz o subconductor, cm.

R_h , es el radio del haz que está dado por:

$$R_h = \frac{s}{2\text{sen}(\pi/N)} \quad (3.13)$$

Donde;

s , es la distancia entre los conductores del haz, cm.

Luego de reemplazar cada haz de conductores por su respectivo conductor equivalente, se procede por el método de los potenciales de Maxwell. Por ejemplo, una línea bipolar CC con 4 conductores por polo y dos cables de guardia queda representada por 4 conductores equivalentes sobre el plano de tierra. En el caso de los cables de guardia éstos solo serán representados por sus respectivos radios.

Por lo tanto, el campo eléctrico en medio de la superficie, de cada uno de los N conductores de un haz, es normal a ella y está dado por:

$$E_m = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 Nr} \quad (3.14)$$

El valor del campo eléctrico varía en torno del valor promedio, siendo su valor máximo:

$$E_{max} = E_m \left[1 + \frac{r}{R_h} (N - 1) \right] \quad (3.15)$$

En el caso del cable de guardia, el campo eléctrico superficial máximo es igual al campo medio.

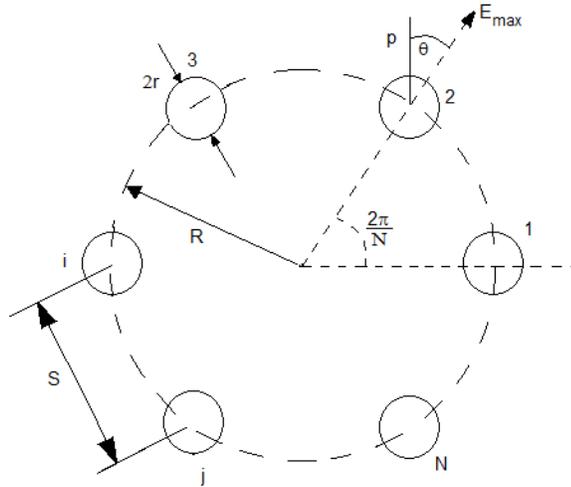


Figura 3.5. Esquema del campo eléctrico en la superficie de los conductores.

3.1.2.2.1 Campo eléctrico superficial en líneas monopolares de ATCC.

El gradiente eléctrico superficial para una línea monopolar de ATCC con un haz de conductores, ocupando el método de Mark y Mengersle y sin considerar el efecto del cable de guardia está dado por [2]:

$$E_{max} = \frac{V \left[1 + \frac{r}{R_h} (N-1) \right]}{Nr \ln \left(\frac{2H}{R_e} \right)} \text{ kV/cm} \quad (3.16)$$

Donde;

V , es el voltaje aplicado sobre los conductores de la línea, kV (polo – tierra).

r , es el radio de los conductores del haz, cm .

R_h , es el radio del haz.

N , es el número de conductores del haz.

H , es la altura de los conductores, m .

R_e , es el radio equivalente (ec. 3.12), m.

3.1.2.2 Campo eléctrico superficial en líneas bipolares de ATCC.

El gradiente eléctrico superficial máximo ocupando el método de Mark y Mengele, sin considerar el efecto del cable de guardia, queda dado por la siguiente expresión [2]:

$$E_{max} = \frac{V \left[1 + \frac{r}{R_h} (N-1) \right]}{Nr \ln \left(\frac{2H}{R_e \sqrt{\left(\frac{2H}{P} \right)^2 + 1}} \right)} \text{ kV/cm} \quad (3.17)$$

Donde;

V , es el voltaje aplicado sobre los conductores de la línea, kV (polo – tierra).

r , es el radio de los conductores del haz, cm.

R_h , es el radio del haz.

N , es el número de conductores del haz.

H , es la altura de los conductores, m.

R_e , es el radio equivalente (ec. 3.12), m.

P , es la distancia entre los polos, m.

La expresión 3.17 entrega resultados con una aceptable exactitud, con errores que no exceden el 2% para 4 o menos conductores por haz.

3.1.3 Consecuencias del efecto corona en líneas de transmisión de ATCC.

Como consecuencia del efecto corona se genera luz, calor, radio interferencia, ruido audible, vibraciones mecánicas, ozono y otros productos químicos.

Además, en las líneas ATCC se producen fenómenos eléctricos particulares, uno de ellos es la generación de carga espacial. Todo esto provoca una disipación de energía llamada pérdida corona [2,11].

En este trabajo de titulación se abordará especialmente el ruido audible y la generación de carga espacial, en las líneas de transmisión en CC.

3.1.3.1 Ruido Audible.

Un factor importante a considerar en el diseño de las líneas de transmisión en CC es el ruido audible (RA), esto por los impactos que se podrían generar de acuerdo a los niveles de emisión de la línea.

3.1.3.1.1 Aspectos teóricos del ruido audible.

En el proceso de ionización se generan cargas eléctricas particularmente electrones, los que se mueven a altas velocidades. Producto de esto, se producen colisiones, lo que da origen a una transferencia de energía cinética a las partículas neutras del aire. Dicha transferencia de energía se produce durante un corto periodo de tiempo, siendo similar a una explosión en el lugar de la descarga, generando así una onda acústica. En esencia, las descargas corona son una fuente de pulsos acústicos que se propagan por el aire generando ruido audible. Además estas fuentes de pulsos son distribuidas aleatoriamente a lo largo de cada conductor de la línea de transmisión. Los pulsos acústicos generados por las descargas positivas son la principal fuente de ruido que emiten las líneas de transmisión, ya sean de CA o CC [2,21].

Desde un punto de vista físico, se puede considerar el sonido como; la vibración mecánica de un medio elástico a través del cual la energía que produce una

fuerza se disipa por intermedio de una onda sonora progresiva. Todo objeto que se mueva o vibre puede considerarse como fuente de ruido, pues, parte de la energía involucrada en su movimiento se transfiere al medio en forma de sonido o ruido [13].

Un medio elástico está constituido por un conjunto de partículas que pueden vibrar en torno a posiciones de equilibrio y colisionar con sus vecinas transfiriéndoles energía. Cuando una de estas partículas se saca de su posición de equilibrio y es obligada a oscilar por una fuerza exterior, colisionará a sus vecinas próximas imprimiéndoles un movimiento análogo al original, las que a su vez colisionarán a sus respectivas vecinas, repitiéndose el mismo fenómeno a través de todo el medio elástico.

La intensidad acústica de una onda de sonido I , es definida como el valor promedio del flujo de energía a través de una unidad de área normal a la dirección de propagación, su unidad fundamental es $[W/m^2]$. Para una onda armónica plana viajando en dirección positiva del eje x , la intensidad acústica en términos de la presión efectiva es [12]:

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho \cdot v} \quad (3.18)$$

Donde;

I es la intensidad del sonido.

P_{rms} es la presión eficaz.

ρ es la densidad del aire (o medio de propagación).

v es la velocidad del sonido en el aire (o medio de propagación).

Para expresar un amplio rango de valores, se ha visto que es conveniente hacerlo empleando una escala logarítmica, una forma de lograr esto es el

decibel (dB). Para expresar una variable en decibeles, se debe escoger primero un valor de referencia y luego aplicar la siguiente definición:

$$\text{Nivel en dB} = 10 \text{ Log} \cdot \frac{\text{Cantidad}}{\text{Cantidad de referencia}} \quad (3.19)$$

Aplicando la expresión 3.19 para la intensidad del sonido, es posible expresar esta cantidad mediante un Nivel de Intensidad sonora en dB, este nivel se expresa como:

$$NI = 10 \text{ Log} \frac{I}{I_{ref}} \quad (3.20)$$

Donde;

I es la intensidad sonora, W/m^2 .

I_{ref} es la intensidad de referencia, $10^{-12} W/m^2$.

También es posible expresar la presión sonora mediante el Nivel de Presión Sonora en dB y está dado por:

$$NPS = 20 \text{ Log} \frac{P_{rms}}{P_{ref}} \quad (3.21)$$

Donde;

P_{rms} es la presión sonora efectiva, μPa .

P_{ref} es la presión sonora de referencia, $20 \mu Pa$.

En la figura 3.6 se observa un esquema con valores comunes de niveles de presión sonora:

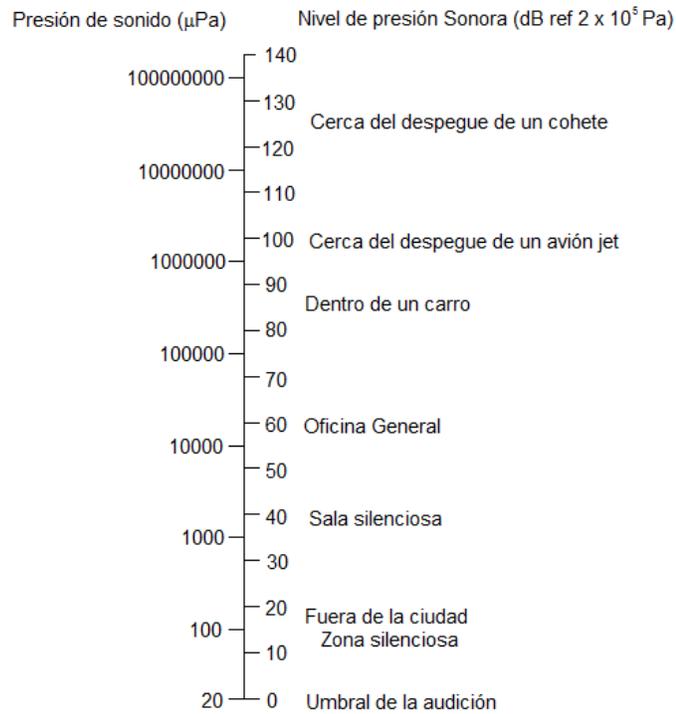


Figura 3.6. Algunos Niveles de Presión Sonora típicos [13].

Al igual que para la intensidad y la presión sonora, la potencia acústica es otra variable que suele expresarse en dB, en este caso, el Nivel de Potencia Acústica está dado por:

$$NW = 10 \text{ Log } \frac{W}{W_{ref}} \quad (3.22)$$

Donde;

W es la potencia acústica, Watts.

W_{ref} es la potencia acústica de referencia, 10^{-12} Watts.

En la figura 3.7 se observa un esquema con valores comunes de niveles de potencia acústica:

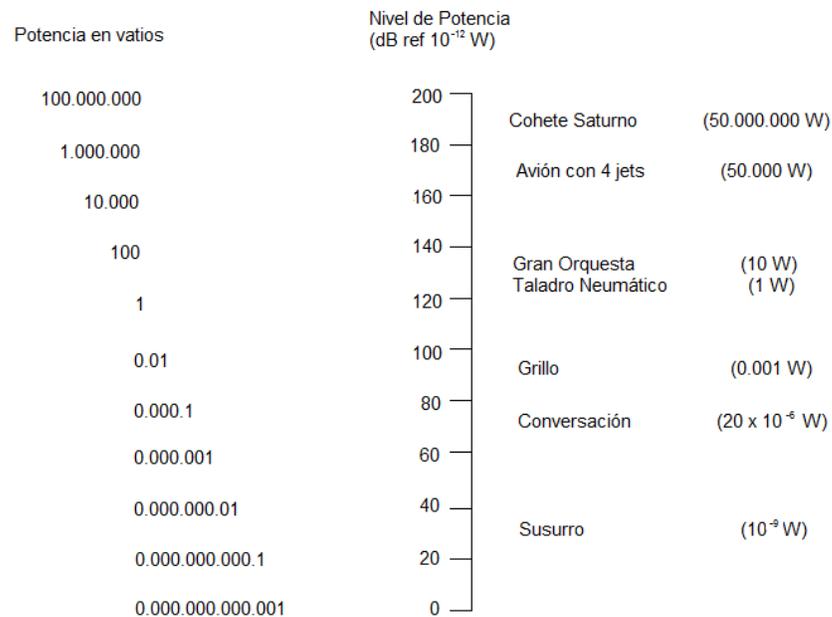


Figura 3.7. Algunos Niveles de Potencia típicos [13].

Otro factor importante en la medición del ruido audible, es la ponderación utilizada. Esto se hace necesario ya que el oído humano no tiene una respuesta de frecuencia plana, por lo tanto cuando se desea evaluar el nivel total de un determinado ruido, será necesario ponderar la respuesta de frecuencia del instrumento usado.

Los tipos de ponderaciones más utilizadas son las A, B y C (la D se definió después para evaluar el ruido de aviones, pero ya está en desuso), y se utilizan dependiendo del ruido que se desea evaluar. Estas ponderaciones son posibles de conseguir mediante el uso de filtros. En la figura 3.8 se observan las curvas de ponderación acústica:

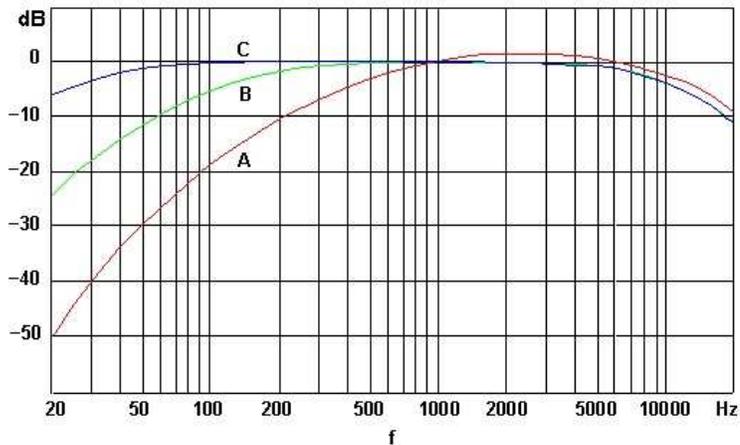


Figura 3.8 Curvas de ponderación acústica.

Actualmente, la ponderación más utilizada es la A, puesto que tiene una respuesta similar a la del oído humano, ya que presenta una gran atenuación para las componentes del ruido sobre 20 kHz y bajo 125 Hz. En este caso, el nivel de presión sonora se escribe dB(A). Es importante señalar que el rango audible corresponde a las frecuencias entre 20 Hz y 20 kHz.

3.1.3.1.2 Ruido Audible en líneas de transmisión.

Una caracterización correcta y completa del ruido audible de una línea de transmisión debe considerar principalmente los siguientes parámetros [2,21]:

- *Frecuencia*: Este parámetro provee información de la dependencia del ruido audible con respecto a la frecuencia, que comúnmente se resume en un espectro de frecuencia. Así, se puede examinar el tipo de ruido que emite la línea para poder percibir la contribución de las distintas componentes que conforman el ruido.

- *Perfil lateral (o transversal)*: Entrega información de la variación del ruido con respecto a la distancia perpendicular a la línea de transmisión. Para efectos del cálculo, este valor está representado por el radio que se forma entre la línea de transmisión (polo CC) y una distancia “x”, considerando el polo como el centro de la circunferencia.
- *Condición climática*: Entrega información de la variación del ruido en un punto dado, con respecto a las condiciones climáticas. Como éstas son fluctuantes en el tiempo, el nivel de ruido suele acompañarse de una probabilidad de ocurrencia; usualmente se habla de buen tiempo, mal tiempo y todo tiempo climático considerados sobre un período de tiempo.

3.1.3.1.2.1 Ruido audible en líneas bipolares de ATCC.

En una línea bipolar de CC, la principal fuente de ruido es el polo positivo, siendo despreciada la contribución del polo negativo. Lo anterior se debe principalmente a que en el proceso de descargas corona positivas se generan pulsos de mayor amplitud que los generados en las descargas corona negativas (figura 3.3). Pruebas realizadas en una pequeña jaula experimental⁹ establecieron que la diferencia entre el ruido generado por un conductor positivo y uno negativo son aproximadamente 15 dB(A). En cambio, en el caso de las líneas CA, la contribución al ruido es similar para todas las fases de la línea [2].

El perfil transversal del ruido de una línea bipolar de CC, es simétrico respecto al polo positivo. En la figura 3.9 se observa en perfil transversal de la línea CC bipolar de ± 400 kV y 1200 MW, los datos corresponden a uno de los diseños propuestos para la línea NYRI-NY (EE.UU.) [14]:

⁹En este caso el término “jaula experimental” hace referencia a un lugar cerrado donde se encuentra una línea de prueba de corriente continua utilizada solo para fines de investigación (no es un enlace para distribución de energía eléctrica).

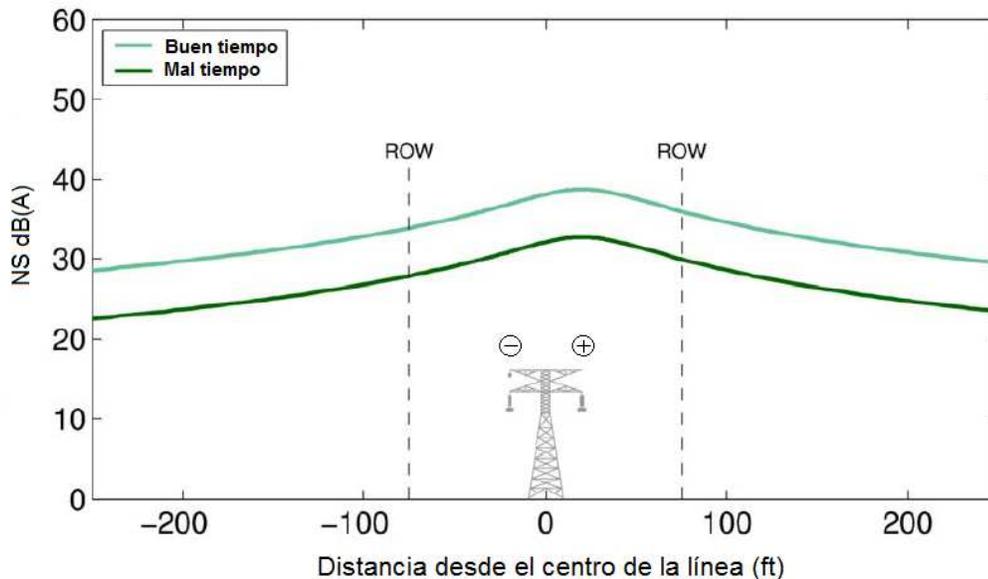


Figura 3.9 Perfil transversal de una línea bipolar CC [14].

Como se explicó anteriormente, un factor que afecta de manera importante la generación de ruido son las condiciones climáticas y, aunque las precipitaciones y humedad afectan la ocurrencia del efecto corona (aumenta la probabilidad de ocurrencia) y a diferencia de lo que ocurre en CA, en el caso de las líneas en CC los niveles sonoros aumentan en presencia de buen tiempo, cuando los conductores están totalmente secos. Estas condiciones de buen tiempo climático se entienden principalmente como la ausencia de lluvia, niveles altos de temperatura y bajos niveles de humedad. Otro factor que se debe considerar en el aumento de los niveles sonoros es el viento, especialmente en lugares en que la velocidad del viento supere los 5 m/s; a partir de este valor se hace necesaria una corrección por viento.

Aunque no se tiene certeza de lo que provoca este comportamiento (aumento de los niveles sonoros en buen tiempo) en las líneas CC, la explicación que han entregado algunos investigadores es que el ruido producido por las líneas aéreas de ATCC está más relacionado con la amplitud de los pulsos (producto

del efecto corona) que con la frecuencia de éstos. Por este motivo, en líneas CC se encuentran niveles de ruido más altos en buen tiempo, ya que los pulsos son de mayor amplitud, mientras que en presencia de lluvia la amplitud disminuye pero aumenta la frecuencia.

En lo que se refiere al espectro de frecuencias, en las líneas CA se distinguen dos componentes de ruido: un sonido crepitante (“chisporroteante”), que corresponde a un ruido de naturaleza aleatoria, y un sonido de tono puro¹⁰, caracterizado por un “zumbido”. Este último, es debido a pulsos acústicos generados cerca del peak del medio ciclo positivo del voltaje CA. Producto de la alternancia de la tensión, se genera un tono puro con una frecuencia del doble de la frecuencia del sistema; también pueden aparecer tonos con frecuencias mayores, pero son poco significantes. En el caso de las líneas de ATCC no se generan tonos puros, debido a la ausencia de alguna modulación creada por el voltaje, por lo que está presente solo el ruido de característica aleatoria.

En las figuras 3.10 y 3.11, se muestran espectros de frecuencia típicos de líneas CA y CC, respectivamente. En ellas se aprecia claramente la ausencia del tono puro (representativo del zumbido) en las líneas CC. El espectro de frecuencia de una línea de CC se extiende por una amplia gama de frecuencias, que refleja la corta duración de los pulsos acústicos generados por las descargas corona.

¹⁰ Se refiere a aquel valor del nivel sonoro que, en una determinada banda de frecuencia, posee el valor más alto con respecto al resto del espectro de frecuencias.

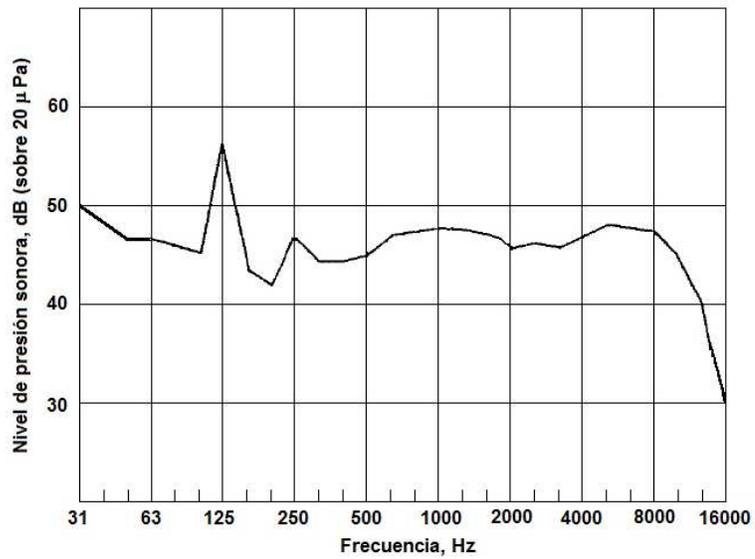


Figura 3.10. Espectro de Frecuencia del RA para líneas CA [21].

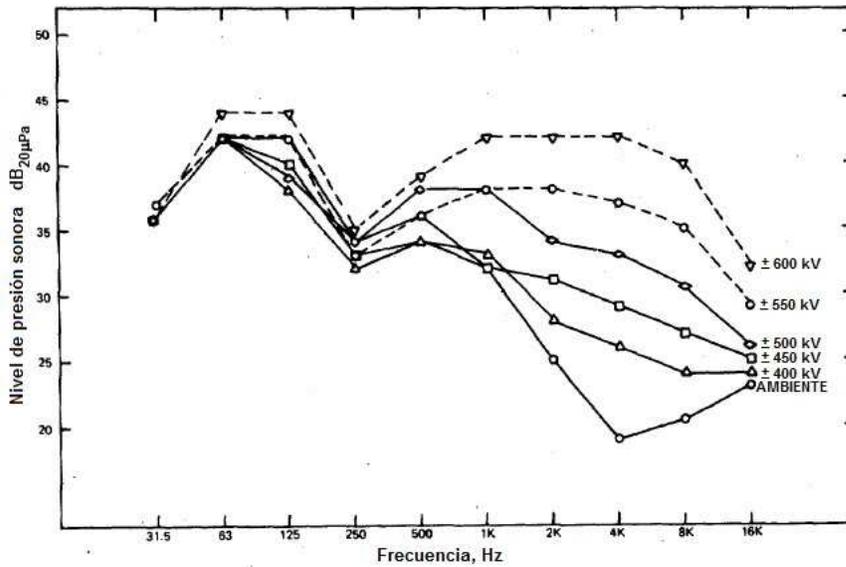


Figura 3.11. Espectro de Frecuencia del RA para líneas Bipolares CC (línea CC de prueba “The Dalles”) [17].

Los valores de los niveles sonoros de líneas bipolares de CC y de líneas CA, se pueden combinar para propósitos de comparación. Además, la metodología

para determinar límites máximos es la misma, incluso es posible determinar el ruido total de una configuración híbrida CC-CA. Lo anterior no forma parte de los objetivos planteados, por lo que no se profundizará en dicho tema.

3.1.3.2 Generación de carga espacial.

Producto de las descargas corona se generan iones positivos y negativos. En una línea CA estos iones son expuestos a un movimiento oscilatorio producto del campo eléctrico alternante presente en la inmediación de la superficie del conductor. Así, las cargas originadas por el efecto corona quedan confinadas en la vecindad de los conductores [2].

En las líneas CC, al igual que en las CA, también se generan iones positivos y negativos. Sin embargo, los iones con polaridad opuesta a la del conductor, son atraídos por éste y luego son neutralizados por contacto. Por otro lado, los iones con la misma polaridad del conductor son repelidos por éste, lo que provoca una migración más allá de la vecindad del conductor. Con esto, se genera un flujo continuo de iones lo que constituye una corriente iónica.

De esta forma, la ocurrencia de descargas corona en la superficie de los conductores provoca la aparición de cargas en el ambiente asociado a las líneas de CC, que altera el balance natural de los iones positivos y negativos del aire. Esta carga está caracterizada comúnmente por una “densidad de carga espacial”.

En el caso de una línea CC bipolar las descargas corona se producen simultáneamente en los dos polos, por lo que en cada uno de ellos se generan iones con la misma polaridad de su tensión. Estos iones generados en cada polo, fluyen hacia el polo opuesto y hacia tierra. En la figura 3.12 se observa un

esquema de lo que ocurre en una línea CC bipolar, en ella se distinguen 3 regiones de carga espacial:

- Región Monopolar negativa; que corresponde a la región entre el polo negativo y el plano de tierra.
- Región Monopolar positiva; que corresponde a la región entre el polo positivo y el plano de tierra. (Se dice Región Monopolar por su similitud a lo que ocurre en líneas CC monopolares).
- Región Bipolar; que corresponde a la región entre el polo positivo y el polo negativo.

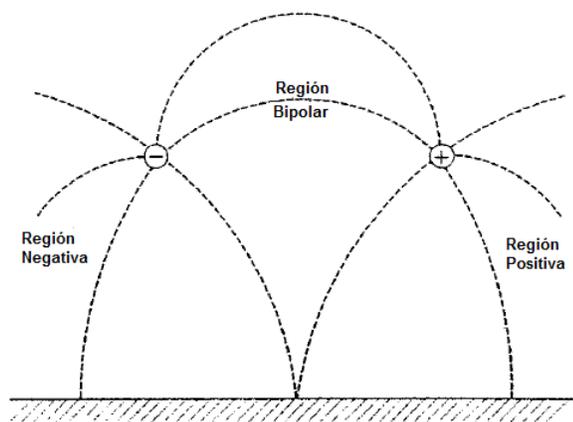


Figura 3.12. Representación de los flujos de iones en una línea bipolar CC [21].

En la región bipolar se produce una mezcla de iones de ambas polaridades que provoca la reducción neta de cargas espaciales, lo que implica una recombinación y neutralización de iones. En el caso de las líneas monopolares, la carga espacial en la región interelectródica provoca un efecto pantalla (acumulación de iones positivos o negativos) sobre el conductor, lo que produce una disminución del campo eléctrico en la vecindad del conductor, provocando la reducción de la intensidad de la ionización, que estabiliza las descargas corona y limita la corriente iónica producto de las descargas. En el caso de las

líneas bipolares la mezcla y recombinación de iones provoca la reducción del efecto pantalla, incrementando la corriente iónica producto de las descargas corona [2].

Al igual que otros fenómenos descritos anteriormente, la carga espacial también se ve influenciada por las condiciones climáticas y las condiciones del conductor. En general, las cargas espaciales aumentan con la lluvia. Además, el viento influye en la distribución de la carga espacial, e indirectamente en la generación de más carga (particularmente en líneas bipolares). En la zona de ionización, que se encuentra en las cercanías del conductor, la velocidad de los iones es extremadamente alta (del orden de 290 m/s), por lo que la influencia del viento es escasa. Sin embargo, a una distancia mayor del conductor, incluso a nivel del suelo, la velocidad de los iones disminuye por lo que llega a ser comparable a la velocidad del viento; lo que provoca un movimiento de los iones producto del viento (ver figura 3.13). Dicho movimiento provoca una dispersión aleatoria de las cargas eléctricas en la dirección del viento. A nivel del suelo y con viento nulo a moderado, las concentraciones de cargas espaciales mayores se encuentran, aproximadamente, bajo los conductores.

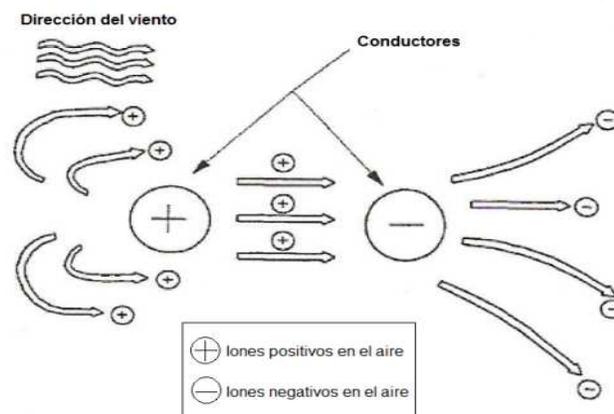


Figura 3.13. Efecto del viento sobre las cargas espaciales [26].

3.2 Ambiente Electromagnético en líneas de transmisión de CC.

3.2.1 Campo eléctrico.

El campo eléctrico bajo las líneas de transmisión de corriente continua es muy diferente al existente en las líneas de corriente alterna. Para gradientes eléctricos superficiales bajo el gradiente crítico, existe un campo electrostático sobre la línea. Sobre el gradiente crítico, los conductores positivos y negativos de la línea generan iones con la misma polaridad de su tensión. Es así como se generan cargas de polaridad positiva sobre el conductor positivo, y cargas de polaridad negativa sobre el conductor negativo. En el espacio existente entre los dos polos se produce una mezcla de carga espacial positiva y negativa, provocando una recombinación iónica (ver figura 3.12).

La carga espacial debido al efecto corona en un conductor de una línea de CC tiene el efecto de reducir el campo eléctrico en las cercanías de la superficie del conductor y aumentar el nivel de campo eléctrico en el suelo. Esta carga generada en las cercanías del conductor, es conducida por el campo eléctrico al suelo y al conductor de polaridad opuesta, resultando en una corriente de conducción entre los polos y el suelo. El campo eléctrico de una línea de transmisión de CC debe, por lo tanto, ser caracterizada en términos de tres parámetros básicos:

- Campo eléctrico $E(kV/m)$.
- Densidad de corriente iónica $J(A/m^2)$.
- Densidad de carga espacial $\rho(C/m^3)$.

Estos parámetros se ven fuertemente influenciados por las condiciones climáticas, como por ejemplo, la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa, presencia de aerosoles en el aire, etc.

3.2.1.1 Cálculo del campo eléctrico.

El cálculo del campo eléctrico, densidad de corriente y densidad de cargas espaciales en líneas CC, comúnmente se realiza en la superficie del suelo. Además se considera la altura mínima de los conductores sobre el plano de tierra.

La evaluación del campo electrostático no es de gran complejidad; sin embargo, el campo producido por las cargas espaciales es más difícil calcularlo, ya que éste se encuentra afectado por variables ambientales. Para la resolución de las ecuaciones se debe realizar un proceso iterativo que posee algunas complicaciones numéricas asociadas a convergencia producto de los parámetros físicos en juego [2].

3.2.1.1.1 Campo electrostático.

Para el cálculo del campo eléctrico libre de cargas espaciales, a nivel del suelo; se utiliza una expresión relativamente sencilla, la que se obtuvo mediante el método de las imágenes. Con la ayuda de la figura 3.14, el campo en cualquier punto sobre el suelo está dado por la fórmula:

$$E_{sc}(x) = \frac{2 \cdot V \cdot H}{\ln \left(\frac{2H}{R_{eq} \sqrt{\left(\frac{2H}{P}\right)^2 + 1}} \right)} \left[\frac{1}{\left(x - \frac{P}{2}\right)^2 + H^2} - \frac{1}{\left(x + \frac{P}{2}\right)^2 + H^2} \right] \quad (3.23)$$

Donde;

V es el voltaje (polo – tierra) aplicado sobre los conductores de la línea, comúnmente denotado como $\pm V, kV$.

H es la altura mínima de los conductores sobre el suelo, m .

P es la distancia entre los polos, m .

R_e es el radio equivalente dado por la ecuación 3.12, m .

x es la distancia lateral del punto de evaluación desde el centro de la línea, m .

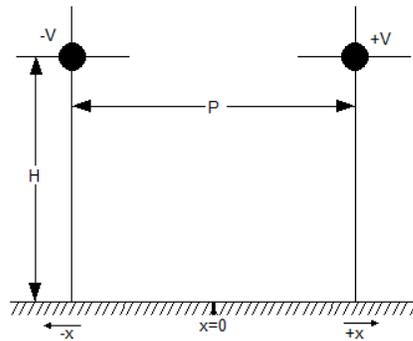


Figura 3.14. Esquema de los parámetros de una línea bipolar.

El campo electrostático a nivel del suelo posee sólo una componente vertical, la que se muestra en la ecuación (3.23). En el caso de no existir efecto corona la densidad de corriente y las cargas espaciales son nulas.

3.2.1.1.2 Campo eléctrico por carga espacial y densidad de corriente iónica.

El cálculo del campo eléctrico por carga espacial es un problema complejo de resolver, por lo que se han usado procedimientos de tipo numérico para su resolución, ya que los métodos analíticos son más complicados.

En la figura 3.15 se observa el perfil típico de campo eléctrico y de corriente iónica de una línea de prueba, donde, además, se observa la diferencia entre el campo sin presencia de cargas espaciales y el campo por cargas espaciales.

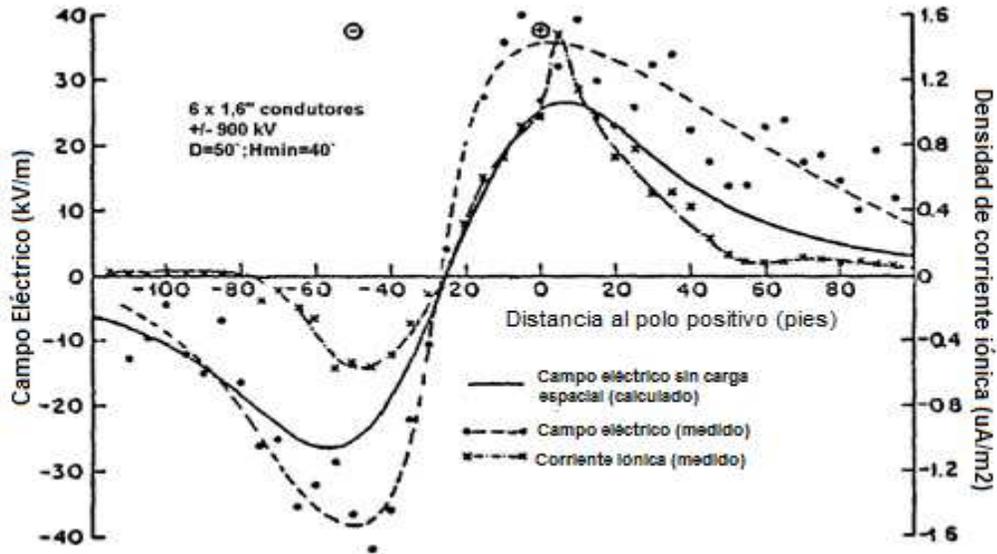


Figura 3.15. Perfil transversal de campo eléctrico y de corriente iónica en una línea de prueba [39].

El primer método numérico fue desarrollado por P. Sarma Maruvada y Wasyl Janischewskyj (1969), y posteriormente fue expresado de forma más sencilla en el libro "Transmission line reference book HVDC to ± 600 kV", de los investigadores S. Harrington y R. Kelley. Las simplificaciones supuestas para el desarrollo del método son [2]:

- El grosor de la capa de ionización alrededor de los conductores es despreciable.
- La movilidad de los iones es constante.
- La difusión de los iones es despreciable.

- La carga espacial sólo afecta la magnitud y no la dirección del campo eléctrico (suposición de Deutsch).
- Para tensiones sobre el valor de inicio de las descargas corona, la magnitud del gradiente superficial permanece constante en el valor de inicio de la corona (suposición de Kaptzov).
- No se considera el viento.

Con la ayuda de las suposiciones descritas anteriormente, el problema de campo bidimensional puede ser reducido a un problema unidimensional; así, la forma de expresar el campo eléctrico producto de las cargas espaciales sobre el plano del suelo, se expresa como:

$$E(x) = k_c(x) \cdot E_{sc}(x) \quad (3.24)$$

Donde;

$k_c(x)$ es un factor que depende de la intensidad de la corona sobre el haz de conductores usados y de la geometría de la línea.

$E(x)$ es el campo en presencia de cargas espaciales.

$E_{sc}(x)$ es el campo electrostático.

El factor $k_c(x)$ es obtenido de la solución numérica de un set de ecuaciones diferenciales no lineales definidas en las regiones monopolares. En general, $k_c(x)$, y de esta forma $E(x)$, aumentan en forma no lineal con el voltaje aplicado a la línea.

Producto de la crítica por parte de algunos investigadores del uso de la “suposición de Deutsch”, especialmente cuando se considera la presencia del viento; aparecieron en la década del 70’ los métodos que prescindían de ella. Muchos de ellos consideran además el efecto del viento y recurren a métodos

matemáticos como por ejemplo: elementos finitos, algoritmos de optimización, etc. En particular, algunos resultados obtenidos por el método de elementos finitos demuestran que la “suposición de Deutsch” provoca errores importantes en algunas configuraciones especiales. Sin embargo, para aplicaciones como las líneas CC, el método unidimensional entrega resultados con “relativa” exactitud [2].

Posteriormente, cerca de la década del 90’, aparece una nueva metodología, la que se aborda de manera similar a los problemas de la “corona”, es decir, por medios estadísticos y experimentación. En este método son utilizados los conceptos: “Grado de saturación (Degree of Saturation)” y “Saturación de la corona (Corona Saturation)”.

3.2.1.1.2.1 Método “Grado de saturación de la corona” (Degree of Corona Saturation)

Este es un método de naturaleza empírica, que permite determinar el campo eléctrico en presencia de cargas espaciales y la densidad de corriente iónica a nivel del suelo y sin considerar el efecto del viento. El método por “Grado de Saturación de la Corona” entrega una herramienta segura para el cálculo, ya que mezcla el enfoque teórico con la experimentación [2,19].

El objetivo del método es estimar los valores “peak” de campo eléctrico y densidad de corriente (los que se encuentran cerca de los conductores) y los valores en la franja de servidumbre. Los valores estimados de alguna variable eléctrica son entregados con una probabilidad de ocurrencia del tipo “nivel de excedencia”, y bajo una condición ambiental. Además, influye la polaridad de los conductores, ya que el valor peak del campo eléctrico emitido por el polo positivo y por el polo negativo puede diferir.

Los niveles de actividad de la corona, se encuentran limitados por un nivel mínimo y un nivel máximo. El nivel mínimo corresponde a la ausencia de descargas corona, es decir, al caso del campo electrostático. Por otro lado, el nivel máximo de actividad de la corona, también llamado “saturación de la corona” o “corona saturada”, ocurre cuando el conductor posee varias fuentes de descargas corona, como puede ser una gota de agua, insectos, etc. La existencia de muchas fuentes de descarga corona no implica un crecimiento ilimitado del nivel de actividad de la corona, por el contrario, este nivel alcanza un valor máximo. Este límite es causado por la carga espacial que provocan las descargas corona en líneas CC. Dichas cargas tienden a disminuir el gradiente eléctrico superficial en el conductor y así suprimir nuevamente la corona. En el estado electrostático no hay carga sobre el conductor, mientras que en el estado saturado toda la carga generada es enviada al espacio.

Explicado lo anterior, el nivel de actividad está caracterizado por un “Grado de saturación” (DS), que es función del gradiente superficial y de las condiciones ambientales, y está dado por la siguiente ecuación:

$$DS = 1 - e^{-K(G-G_0)} \quad (3.25)$$

Donde;

G es el gradiente superficial.

K y G_0 son constantes dependientes de las condiciones ambientales.

A nivel del suelo, el campo eléctrico y la densidad de corriente iónica, están dados por:

$$E = E_{sc} + DS \cdot (E_s - E_{sc}) \quad (3.26)$$

$$J = DS \cdot J_s$$

Donde;

E es el campo eléctrico en presencia de cargas espaciales.

E_{sc} es el campo electrostático.

E_s es el campo eléctrico por saturación de la corona.

DS es el grado de saturación de la corona.

J_s es la densidad de corriente iónica por saturación de la corona.

Los valores por corona saturada, del campo eléctrico y la densidad de corriente, son calculados de forma simultánea, suponiendo que la carga espacial afecta sólo la magnitud y no la dirección del campo eléctrico (suposición de Deutsch).

3.2.1.1.2.1.1 Aplicación del método.

Para determinar el campo eléctrico y la densidad de corriente se debe calcular el campo electrostático, el gradiente superficial, el campo eléctrico y densidad de corriente por corona saturada, grado de saturación, y finalmente el campo eléctrico y densidad de corriente iónica por presencia de carga espacial bajo una condición ambiental (valores con 50% y 95% de probabilidad de no ser excedidos).

Los pasos a seguir para determinar las variables eléctricas son:

- Cálculo de los valores saturados. En este caso, las expresiones fueron obtenidas en base a mediciones. Las fórmulas para determinar el peak (o sea, cerca de los conductores) del campo y la densidad de corriente, están dadas por:

$$E_S = 1.31 \cdot \left(1 - e^{-1.7\frac{P}{H}}\right) \cdot \frac{V}{H}$$

$$J(+)= 1.65 \cdot 10^{-15} \cdot \left(1 - e^{-0.7\frac{P}{H}}\right) \cdot \frac{V^2}{H^3}$$

(3.27)

$$J(-)= -2.15 \cdot 10^{-15} \cdot \left(1 - e^{-0.7\frac{P}{H}}\right) \cdot \frac{V^2}{H^3}$$

Los signos + y - , se refieren a la emisión de los respectivos polos. Y el valor absoluto del campo saturado positivo, es igual al negativo.

Para realizar el cálculo a una distancia “x” desde el centro de la línea (franja de servidumbre), se utilizan las siguientes expresiones:

$$E_S = 1.46 \cdot \left(1 - e^{-2.5\frac{P}{H}}\right) \cdot e^{\frac{-0.7(|X|-0.5\cdot P)}{H}} \cdot \frac{V}{H}$$

$$J(+)= 1.54 \cdot 10^{-15} \cdot \left(1 - e^{-\frac{P}{H}}\right) \cdot e^{\frac{-1.75(|X|-0.5\cdot P)}{H}} \cdot \frac{V^2}{H^3}$$

(3.28)

$$J(-)= -2.0 \cdot 10^{-15} \cdot \left(1 - e^{-1.5\frac{P}{H}}\right) \cdot e^{\frac{-1.75(|X|-0.5\cdot P)}{H}} \cdot \frac{V^2}{H^3}$$

Las ecuaciones (3.28) son válidas para: $1 < \frac{(|X|-0.5\cdot P)}{H} < 4$

Donde, para las expresiones (3.27) y (3.28);

V es el voltaje polo – tierra; positivo para el polo positivo y negativo para el polo negativo, V.

H es la altura mínima de los polos sobre el suelo, m.

P es la distancia entre los polos, m.

x es la distancia lateral del punto de evaluación (ver figura 3.14), desde el centro de la línea, m.

E_s es el campo eléctrico saturado, V/m.

J es la densidad de corriente, A/m².

Los pasos a seguir en este caso son:

- Cálculo del campo electrostático utilizando la expresión 3.23 según se requiera para el punto donde se alcanza el peak o para una distancia x desde la franja de servidumbre, con $1 < (|X| - P/2)/H < 4$
- Cálculo del gradiente superficial. Según lo requiera el cálculo se debe utilizar la altura mínima de la línea.
- Cálculo del grado de saturación dado por la expresión 3.25. Las constantes empíricas K y G_0 son obtenidas de la tabla 3.1. En ella se debe escoger una probabilidad de ocurrencia, que implica valores del tipo L_{50} o L_5 , del campo y la densidad de corriente.
- Cálculo de los valores estimados de campo eléctrico y densidad de corriente, según las expresiones 3.26. Estos serán del tipo L_{50} o L_5 , y bajo una condición ambiental.

Verano. Buen tiempo.			
		$G_0(kV/cm)$	K
Campo y corriente, positivos	L_{50}	9	0,037
	L_5	3	0,067
Campo y corriente, negativos.	L_{50}	9	0,015
	L_5	3	0,032
Lluvia			
		$G_0(kV/cm)$	K
Campo y corriente, positivos y negativos.	L_{50}	6	0,058
	L_5	6	0,087
Nieve.			
		$G_0(kV/cm)$	K
Campos y corriente, positivos y negativos.	L_{50}	12	0,03
	L_5	11	0,045
Alta humedad/Niebla.			
		$G_0(kV/cm)$	K
Campo y corriente, positivos	L_{50}	7,5	0,06
	L_5	3	0,086
Campo y corriente, negativos.	L_{50}	8,5	0,045
	L_5	3	0,063
Primavera. Buen tiempo.			
		$G_0(kV/cm)$	K
Campo y corriente, positivos	L_{50}	14,5	0,041
	L_5	11	0,086
Campo y corriente, negativos.	L_{50}	14,5	0,021
	L_5	11	0,065
Otoño. Buen tiempo			
		$G_0(kV/cm)$	K
Campo y corriente, positivos	L_{50}	12	0,039
	L_5	10	0,092
Campo y corriente, negativos.	L_{50}	12	0,017
	L_5	10	0,07

Tabla 3.1. Valores de G_0 y K para diferentes condiciones ambientales.

3.2.1.2 Consideraciones en el cálculo del campo eléctrico.

Aunque estudios en líneas de prueba han demostrado que la asimetría del campo eléctrico se produce bajo el polo positivo, mediciones en líneas reales indican que dicha asimetría se produce bajo el polo negativo. Investigadores del BPA utilizando el método unidimensional de Maruvada estimaron que el peak del campo eléctrico de la línea “Pacific Intertie” sería de 30 kV/m para cada polo. Sin embargo, las mediciones realizadas en dicha línea arrojaron resultados diferentes, ya que se midió un peak cercano a 17 kV/m bajo el polo positivo y cercano a 30 kV/m bajo el polo negativo. Los mismos resultados se encontraron en las mediciones de la línea Itaipú, ya que se observó una predominancia de los valores de campo eléctrico y densidad de corriente bajo el polo negativo [2, 20].

Los investigadores creen que estas diferencias podrían deberse a la corriente que circula por las líneas, puesto que esta es la principal diferencia que existiría entre una línea de prueba y una real; y dicha corriente afectaría en el proceso de las descargas corona. Otros factores que se cree que influyen en estas diferencias son los aspectos ambientales, principalmente la densidad relativa del aire y el viento. Este último afecta el valor del campo eléctrico y la densidad de corriente, ya que puede desplazar y modificar los valores peak de las variables eléctricas. Mediciones realizadas en la línea Itaipú demostraron que, en el lado opuesto al ataque del viento (sotavento) los valores de campo eléctrico son mayores que en el lado de barlovento.

Otra consideración importante respecto a los métodos de cálculo son sus limitaciones, ya que producto de la utilización de un método “amigable” para aplicaciones prácticas, los métodos matemáticos utilizan gran cantidad de aproximaciones y de parámetros menos exactos. Como se explicó

anteriormente, también influyen algunas variables ambientales, como el viento y la humedad.

Producto de lo anterior es que hasta hoy en día se sigue estudiando el comportamiento del campo eléctrico en el polo negativo y la diferencia que existe en el comportamiento entre una línea real y una de prueba.

3.2.2 Campo Magnético.

El campo magnético en líneas de ATCC se caracteriza por ser un campo estático. En algunos casos se produce un campo magnético alternante debido a los armónicos que fluyen por la línea, pero en general éstos son insignificantes en magnitud.

3.2.2.1 Método de cálculo.

Puesto que el campo magnético generado por una línea CC es estático, para el cálculo en algún punto cercano de la superficie del suelo (o en el suelo), se utiliza la llamada “Ley de Ampère”, que relaciona un campo magnético estático con la causa que lo produce, es decir, una corriente estacionaria.

En la figura 3.16, se muestra un esquema que ayuda al cálculo del campo magnético. En ésta se observa una línea CC, en la que los polos se consideran conductores infinitos y perpendiculares al plano transversal. Para orientar los vectores de intensidad del campo magnético se utiliza la llamada “regla de la mano derecha”.

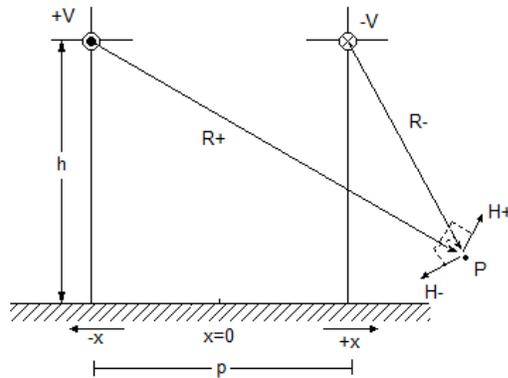


Figura 3.16. Esquema para el cálculo del campo magnético.

En la figura 3.16 se observan los vectores de intensidad de campo magnético, los que se definen como:

$$|H_+| = \frac{I}{2\pi R_+} \quad (3.29)$$

$$|H_-| = \frac{I}{2\pi R_-}$$

Donde;

I es la corriente que fluye por los conductores, A.

R_+ y R_- son las distancias desde el polo positivo y negativo, respectivamente, hasta el punto de evaluación, m.

Para obtener el valor del campo magnético, se debe realizar una suma vectorial de las componentes de la intensidad de campo magnético en el punto de evaluación, para luego calcular la densidad de flujo magnético dada por la siguiente expresión:

$$|B| = \mu_0 \cdot |H| \quad (3.30)$$

Donde;

B es la densidad de flujo magnético, Tesla.

H es la intensidad de campo magnético, A/m.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ es la permeabilidad del aire, Henry/m.

El campo magnético de una línea bipolar CC se supone simétrico respecto al centro de la línea. En la figura 3.17 se observa el perfil transversal típico del campo magnético de una línea bipolar de ± 400 kV y 1200 MW; estos datos corresponden a uno de los diseños propuestos para la línea NYRI-NY (EE.UU.) [14].

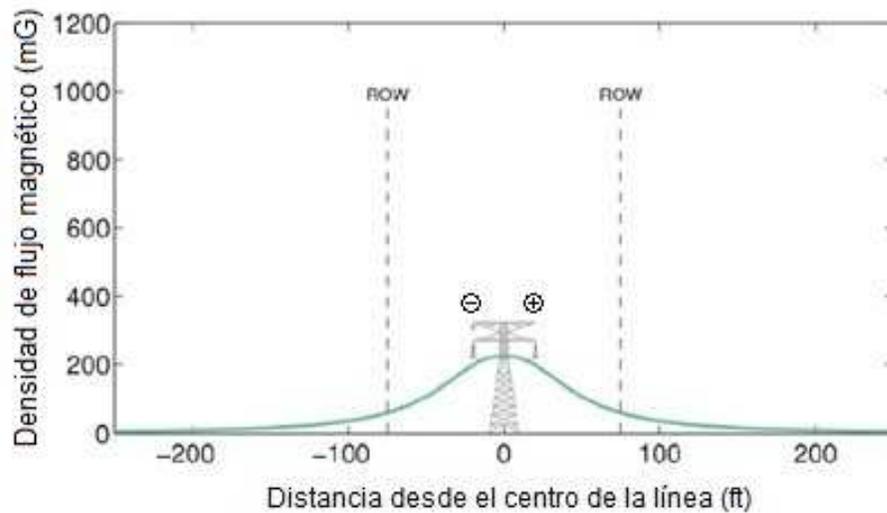


Figura 3.17. Perfil típico del campo magnético de una línea bipolar de ± 400 kV [14].

MÉTODOS PARA PREDECIR EL RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE ATCC

Como se indicó en el capítulo 3 del presente trabajo, el ruido audible producido por el efecto corona es una de las principales consideraciones al momento del diseño de las líneas de transmisión de alta tensión. Por este motivo, muchas organizaciones han desarrollado diferentes procedimientos para el cálculo del ruido audible. Muchos de estos procedimientos han sido previamente publicados en conjunto con reportes de medidas de niveles de ruido de líneas en operación o líneas de prueba. En este capítulo se presentará una descripción de los métodos de cálculo para el ruido audible en líneas de corriente continua (CC) [16].

4.1. Descripción de los métodos de cálculo.

De forma general, los métodos de cálculo pueden ser divididos en dos tipos: aquellos que son específicos para un diseño de línea y en algunos casos una clase específica de voltaje; y aquellos que tienen una naturaleza más general y que pueden ser aplicados a diferentes geometrías de la línea (como por ejemplo configuraciones bipolares horizontales y verticales¹¹).

En el caso de las líneas de CC los métodos de cálculo predicen los niveles de ruido en términos de la ponderación A, es decir, dB(A). Esta ponderación es

¹¹ Ver figura 2.8 del “Capítulo 2: Sistemas de transmisión en corriente continua”.

ampliamente utilizada en las mediciones de ruido ambiental, ya que se ajusta de mejor forma a la respuesta del oído humano.

La medición del ruido en el caso de las líneas CC es especialmente importante cuando se está en presencia de buen tiempo, puesto que como se señaló en el capítulo 3 bajo estas condiciones el ruido audible aumenta, por lo que los métodos de predicción entregan los valores estimados de los niveles sonoros para condiciones climáticas de buen tiempo. Éstas se definen principalmente como cuando los conductores están totalmente secos; lo que implica la ausencia de lluvia, bajo niveles de humedad y altos niveles de temperatura.

Según el método de predicción existen diferentes condiciones climáticas de estimación de los niveles sonoros:

- L_{50} (en buen tiempo): es el nivel de condiciones climáticas de buen tiempo que es excedido el 50% del tiempo (considerado sobre un período de tiempo, usualmente un año).
- L_5 (en buen tiempo): es el nivel de condiciones climáticas de buen tiempo que es excedido el 5% del tiempo.
- Promedio (en buen tiempo): es el nivel promedio de condiciones climáticas de buen tiempo que se espera durante un período de tiempo (generalmente se asocia al nivel L_{50} , considerando un período de un año).

En el caso de los métodos para líneas CC, éstos son generales y pueden ser aplicados a diferentes geometrías de las líneas. Además, a diferencia de los métodos de cálculo de líneas CA donde la contribución de todas las fases es la misma, en el caso de líneas CC se considera que el ruido es generado solo por el polo positivo. Así, para el caso de una línea bipolar, existe la contribución de

sólo un set de conductores, y no se hace necesaria la suma sobre todos ellos. Si existen dos líneas bipolares sobre una misma estructura o sobre el mismo lado, el ruido de cada uno de los dos polos positivos debe ser calculado y luego sumado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$NS_{total} = 10 \log \sum_{i=1}^P 10^{NS_i/10} \quad (4.1)$$

Donde;

NS_{total} es el nivel sonoro total producido por la línea medido en el punto donde se ubica el receptor, dB(A).

P es el número total de polos positivos.

NS_i es el nivel sonoro generado por un polo positivo *i*.

Es importante destacar que los métodos descritos a continuación son métodos semi-empíricos, lo que significa que fueron obtenidos mediante mediciones en líneas de prueba y con fundamentos teóricos.

Lo anterior implica que los métodos de predicción sean muy dependientes de las condiciones climáticas del lugar donde se realizaron las mediciones. Esto se debe principalmente a que los niveles de buen tiempo que se definen en cada método no se relacionan con un nivel estándar (entendiéndose por tal un valor numérico único, como por ejemplo: grados de temperatura y porcentaje de humedad), por lo que al comparar dos métodos que estiman bajo condiciones climáticas de buen tiempo promedio es posible que no se obtengan los mismos valores de los niveles sonoros, ya que según cada organización los niveles de buen tiempo promedio pueden no corresponder a las mismas condiciones climáticas.

Se debe considerar que el hecho de que los métodos estén realizados por diferentes organizaciones supone también una diferencia en las expresiones obtenidas junto con las restricciones que se establecen para la aplicación de cada uno de ellos, especialmente en los parámetros y geometría de la línea.

Aunque es posible realizar una comparación de los diferentes métodos de predicción para una eventual evaluación de un proyecto en particular, no es posible establecer una correlación entre ellos.

El hecho de que los métodos de predicción sean semi-empíricos también implica que existen rangos recomendados de aplicación en lo que se refiere al número de conductores (por haz) y al diámetro de ellos, ya que en estos rangos se ha comprobado que los respectivos métodos funcionan mejor (según los estudios).

4.1.1. Método de Bonneville Power Administration (BPA).

La “Bonneville Power Administration (BPA)”, creada en 1937, es una organización de servicio público encargada del desarrollo de proyectos relacionados con la generación de energía con el fin de mantener siempre la sustentabilidad ambiental.

En la tabla 4.1 se observan las características establecidas por el método:

Configuración geométrica de la línea	Todas las geometrías.
Condición climática de predicción	L_{50} en buen tiempo.
Número de subconductores	$4 \leq n \leq 8$
Diámetro de subconductores (cm)	$d \leq 5$

Tabla 4.1. Características de aplicación del método BPA.

El nivel sonoro estimado para cada polo positivo es:

$$NS_i = 86 \log g + k \log n + 40 \log d - 11.4 \log D + NS_0 \quad (4.2)$$

Donde;

NS_i es el nivel sonoro producido por el polo positivo i , $dB(A)$.

g es el campo eléctrico máximo en la superficie del conductor, kV/cm .

n es el número de subconductores en un polo.

d es el diámetro de los subconductores, cm .

D es la distancia radial desde el polo positivo al punto donde se encuentra el receptor, m .

k y NS_0 ¹² son constantes que se definen como:

$$\begin{aligned} k &= 25.6 \text{ para } n \geq 3 & NS_0 &= -100.6 \text{ para } n \geq 3 \\ &= 0 \text{ para } n < 3 & &= -93.4 \text{ para } n < 3 \end{aligned}$$

Para una mejor aplicación de este método, el Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas CIGRE agregó una corrección al método BPA, que consiste en la inserción de un término referente a la altura sobre el nivel del mar que

¹² NS_0 : es un término definido como un "nivel sonoro de referencia" y que corresponde a una agrupación de constantes obtenidas durante la derivación de la expresión 4.2.

tiene la línea. De esta forma, aplicando la corrección propuesta por CIGRE, la ecuación 4.2 queda:

$$NS_i = 86 \log g + k \log n + 40 \log d - 11.4 \log D + NS_0 + \frac{q}{300} \quad (4.3)$$

Donde;

q es la altitud sobre el nivel del mar del conductor, m.

Como se explicó anteriormente, el método de cálculo de la BPA está basado en un procedimiento semi-empírico (se utilizó la línea de prueba “The Dalles DC Test Center”). En este sentido, los términos desarrollados se hicieron en base a mediciones que se realizaron bajo condiciones climáticas de buen tiempo (cuando ocurren los mayores niveles de ruido generados por las líneas), considerando el nivel L_{50} de condiciones climáticas de buen tiempo.

Durante el desarrollo del presente trabajo se pudo observar que el método de predicción BPA es el más utilizado y el más citado en la literatura, por lo que diferentes organizaciones han recomendado realizar correcciones para obtener los valores de predicción bajo otras condiciones climáticas: por ejemplo, cuando se desee obtener los valores de ruido para el valor L_{50} en mal tiempo se deben restar 6 dB(A) al valor L_{50} en buen tiempo. Para el caso en que se desee obtener el valor máximo en buen tiempo, se deben sumar 5 dB(A) al valor L_{50} en buen tiempo [2,21].

4.1.2. Método de Forschungsgemeinschaft Für Hochspannung und Hochstromtechnik (FGH), Germany.

“FGH” es un laboratorio de prueba creado en 1967 que trabaja de forma independiente, y que está acreditado por el Consejo de Acreditación Alemán. Tanto los laboratorios de prueba como los procedimientos, equipos de medición y sistema de dirección de calidad, están acordes con regulaciones nacionales e internacionales.

En la tabla 4.2 se muestran algunas características del método:

Configuración geométrica de la línea	Todas las geometrías.
Condición climática de predicción	Nivel de buen tiempo máximo
Número de subconductores	$2 \leq n \leq 5$
Diámetro de subconductores (cm)	$2 \leq d \leq 4$

Tabla 4.2. Características de aplicación del método FGH.

El nivel sonoro estimado para cada polo positivo es:

$$NS_i = 1.4 g + 10 \log n + 40 \log d - 10 \log D - 1.0 \quad (4.4)$$

Donde;

NS_i es el nivel sonoro producido por el polo positivo i , dB(A).

g es el campo eléctrico máximo en la superficie del conductor, kV/cm.

n es el número de subconductores en un polo.

d es el diámetro de los subconductores, cm.

D es la distancia radial desde el polo positivo al punto de medición del ruido, m.

4.1.3. Método de Hydro Quebec Institute of Research (IREQ).

El “Hydro Quebec Institute of Research (IREQ)” es uno de los institutos de investigación más grandes de Norte América. Fue creado el año 1967 y ha desarrollado una gran experiencia en áreas como aparatos eléctricos, análisis y control de redes, materiales, ingeniería química y mecánica, y aplicaciones de electricidad. Cuenta con laboratorios especializados como laboratorio de alto voltaje, laboratorio mecánico-termomecánico, centro de simulación y estudio de sistemas de poder, laboratorio de electrotecnología, entre otros.

En la tabla 4.3 se muestran algunas características del método:

Configuración geométrica de la línea	Todas geometrías.
Condición climática de predicción	Nivel de buen tiempo promedio.
Número de subconductores	$4 \leq n \leq 8$
Diámetro de subconductores (cm)	$d \leq 5$

Tabla 4.3. Características de aplicación del método Hydro Quebec Institute of Research (IREQ).

Para cada polo positivo, el nivel sonoro estimado es:

$$NS_i = k (g - 25) + 10 \log n + 40 \log d - 11.4 \log D + NS_0 \quad (4.5)$$

Donde;

NS_i es el nivel sonoro producido por el polo positivo i , dB(A).

g es el campo eléctrico máximo en la superficie del conductor, kV/cm.

n es el número de subconductores en un polo.

d es el diámetro de los subconductores, cm.

D es la distancia radial desde el polo positivo al punto de medición del ruido, m.

k y NS_0 son constantes que dependen de las condiciones climáticas, y se muestran en la tabla 4.4.

Estación del año	k	NS_0
Verano	1.54	26.5
Otoño/Primavera	0.84	26.6
Invierno	0.51	24.0

Tabla 4.4. Constantes para el método de Hydro Quebec Institute of Research (IREQ).

4.1.4. Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan (CRIEPI).

El “Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan (CRIEPI)”, es un centro de investigación tecnológica del área eléctrica. Creado en 1951 en Tokyo bajo el nombre de “Electric Technology Research Institute”, el año 1952 cambió su nombre al actual.

En la tabla 4.5 se muestran las características para la aplicación del método CRIEPI.

Configuración geométrica de la línea	Configuraciones bipolares.
Condición climática de predicción	Nivel de buen tiempo promedio.
Número de subconductores	$1 \leq n \leq 4$
Diámetro de subconductores (cm)	$2.24 \leq d \leq 4.94$
Distancia entre polos (m)	$w \geq 8.44$

Tabla 4.5. Características de aplicación del método CRIEPI.

Para cada polo positivo el nivel sonoro estimado es:

$$NS_i = NS_0 - 10 \log D \quad (4.6)$$

Donde NS_0 se define como;

$$NS_0 = 10 \frac{G_{60}}{G_{60} - G_{50}} \left(1 - \frac{G_{50}}{g} \right) + 50 \quad (4.7)$$

Donde G_{50} y G_{60} son los gradientes superficiales del conductor para un nivel sonoro de referencia de 50 dB(A) y 60 dB(A), respectivamente; y se definen como;

$$G_{50} = \left(\frac{\log n}{106} + \frac{\log d}{21} + \frac{1}{2w^2} + \frac{1}{113} \right)^{-1}$$

$$G_{60} = \left(\frac{\log n}{72} + \frac{\log d}{21} + \frac{1}{2w^2} - \frac{1}{2538} \right)^{-1}$$

Donde;

NS_i es el nivel sonoro producido por el polo positivo i , $dB(A)$.

g es el campo eléctrico máximo en la superficie del conductor, kV/cm .

n es el número de subconductores en un polo.

d es el diámetro de los subconductores, cm .

D es la distancia radial desde el polo positivo al punto de medición del ruido, m .

w es la distancia entre el polo positivo y el polo negativo, m .

4.2. Análisis y comparación de los métodos de predicción.

Para comparar los métodos de predicción presentados anteriormente, se presentarán datos y resultados obtenidos en un estudio realizado por la organización IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers/Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) llamado “A comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines” [16]. En él se busca comparar el comportamiento de los métodos de predicción para una determinada configuración de línea y luego compararlos con mediciones reales. Posteriormente, con estos resultados se podrá determinar qué método de predicción tiene mayor exactitud sobre otro para un cierto tipo de configuración de línea, bajo ciertas condiciones climáticas.

En la tabla 4.6 se muestran los datos de líneas bipolares con un arreglo horizontal de los polos, mientras que en la figura 4.1 se observa un esquema de una línea bipolar.

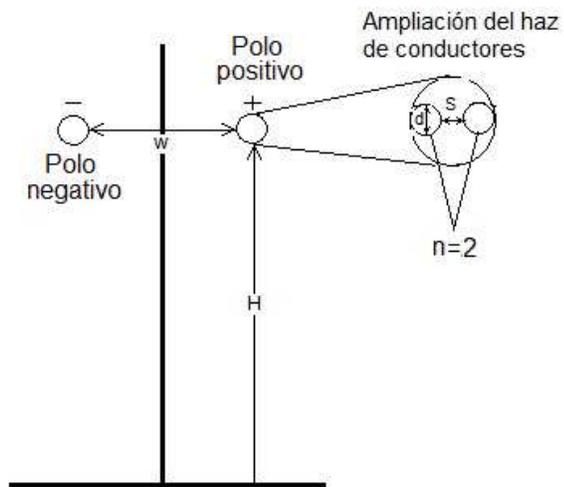


Figura 4.1. Esquema de una línea de configuración bipolar con un arreglo horizontal de los polos con sus respectivos parámetros (en este caso $n = 2$).

Configuración ¹³ de la línea	Voltaje de la línea	Geometría del Conductor			Distancia entre polos (w)	Altura de la línea (H)	Campo eléctrico máximo en la superficie del conductor
		n	d	S			
	kV		cm	cm	m	m	kV/cm
#19	± 750	4	4.06	45.7	13.7	16.6	27.6
#20	± 900	6	4.06	45.7	15.2	15.2	25.0
#21	± 1200	6	5.59	50.8	24.4	19.8	23.5
#22	± 800	4	5.59	61.0	18.3	24.4	21.2

Tabla 4.6. Datos para los cálculos de líneas de prueba CC.

¹³ Los números de la configuración de la línea han sido asignados en el marco del estudio de referencia para diferenciar entre una y otra, y no tiene relación con algún motivo en particular.

Donde;

Voltaje de la línea (V): es el voltaje nominal de la línea de transmisión, kV.

n: es el número de conductores por haz.

d : es el diámetro de los conductores del haz, cm.

S: es la distancia entre los conductores del haz ($n \geq 2$), cm.

Distancia entre polos (w): es la distancia que existe entre el polo negativo y el polo positivo de la línea de transmisión, m.

Altura de la línea (H): es la altura que se utiliza para estimar los niveles sonoros. Se recomienda que se utilice la altura mínima de la línea, m.

Campo eléctrico en la superficie de los conductores (g): es el valor del campo eléctrico crítico al cual comienza la descarga corona. Se obtiene mediante

la expresión (3.17), $\frac{kV}{cm}$.

En la figura 4.2 se observa un esquema en el que explica el procedimiento que se debe utilizar para calcular la distancia radial entre el polo positivo y el punto receptor (donde se va a estimar el nivel sonoro):

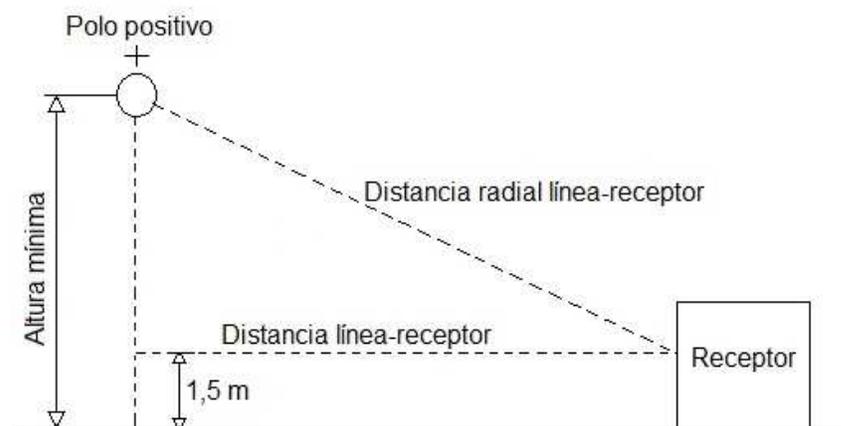


Figura 4.2. Esquema del cálculo de la distancia radial entre el polo positivo y el receptor.

Los cálculos del ruido audible fueron realizados independientemente por las diferentes organizaciones de acuerdo al método de predicción, para así asegurar que éstos fueran claros y sin ambigüedad. En la tabla 4.7 se muestran los resultados de los cálculos de los niveles sonoros obtenidos con los 4 métodos de predicción para cada configuración de la línea. Además se presentan los resultados de las mediciones realizadas para cada configuración.

Configuración de la línea	Método de predicción				Mediciones del ruido audible		
	BPA (L_{50})	IREQ ¹⁴ (Prom.)	CRIEPI (Prom.)	FGH (Máx)	Nivel de condición climática ¹⁵ (de medición)		
					L_5	L_{50}	Prom.
# 19	48.2	44.7	51.6	54.9	50.3	46.8	47.0
#20	48.7	44.4	49.2	52.8	56.0	51.0	50.0
#21	51.2	47.6	53.4	55.5	53.1	48.6	---
#22	42.2	43.1	42.1	50.1	Sin mediciones		

Tabla 4.7. Resultados de los cálculos y mediciones para líneas de prueba CC (todos los niveles en dB(A) para buen tiempo a 15 m de la línea).

Para efectos de comparación de estimaron los niveles sonoros para todas las configuraciones utilizando todos los métodos de predicción. En algunos casos los parámetros de la línea se encuentran fuera del rango recomendado de aplicación, lo que no afecta los resultados de forma importante en todas las configuraciones (ver discusión en sección 4.2.1). En la tabla 4.7 se observan celdas coloreadas que representan valores obtenidos con parámetros fuera del rango recomendado.

¹⁴ Los cálculos mediante el método IREQ fueron realizados bajo condiciones de Otoño/Primavera.

¹⁵ Se refiere al nivel de buen tiempo (L_{50} , promedio y máximo) en condiciones climáticas de buen tiempo, consideradas sobre un periodo de tiempo determinado.

- No cumple para el diámetro de los conductores.
- No cumple para el número de conductores por haz.
- No cumple para el número de conductores por haz y para el diámetro de los conductores.

Como forma de comparación de los diferentes métodos de cálculo, se procedió al cálculo de la diferencia entre los valores medidos y los valores obtenidos con cada método. En la tabla 4.8 se observa la diferencia que existe entre los valores del nivel del ruido audible medido y los obtenidos mediante los métodos de cálculo de la sección 4.1.

Método de Cálculo	Condición climática de predicción	Configuración de línea		
		#19	#20	#21
BPA	L_{50} de buen tiempo.	+1.4	-2.3	+2.6
FGH	Nivel de buen tiempo máximo	+4.6	-3.2	+1.6
IREQ	Nivel de buen tiempo promedio	-2.3	-5.6	-1.0
CRIEPI	Nivel de buen tiempo promedio	+4.6	-0.8	+4.8

Tabla 4.8. Diferencia entre los niveles sonoros calculados y medidos para el caso de líneas de prueba CC (diferencia dada en dB(A)).

4.2.1. Discusión de los antecedentes presentados.

Aunque los datos de las mediciones de los niveles sonoros (tabla 4.7) fueron realizados acorde con las consideraciones necesarias para las líneas de alta tensión en corriente continua, existen varios factores que pudieron afectar las mediciones, tales como: orientación incorrecta del micrófono, procedimientos incorrectos de calibración, altos niveles de ruido ambiental (el ruido ambiente podría ser atribuido a la línea) y efectos del campo eléctrico y de iones sobre los

micrófonos. Otro factor que influye es no contar con datos de entrada exactos para el cálculo del ruido mediante los métodos de predicción descritos.

En la tabla 4.8 se observan las diferencias entre los niveles sonoros obtenidos con los métodos de predicción y los valores medidos. En ella se observa que, considerando las 3 configuraciones de líneas (#19, #20 y #21) al mismo tiempo, el método de predicción BPA es el que entrega los niveles sonoros más cercanos al valor medido.

Sin embargo, se puede observar que si se consideran las 3 configuraciones de línea por separado, es posible encontrar que con un determinado método de predicción se obtiene un valor más cercano al valor medido. Esto se podría deber a que un método se ajusta mejor a ciertos parámetros de línea o a la fuerte dependencia climatológica que tienen los niveles sonoros estimados y medidos.

La utilización del método de predicción fuera del rango recomendado de aplicación también puede afectar el resultado obtenido, aunque no es considerado un factor de gran importancia, esto porque dentro de este rango el método se ajusta mejor, pero fuera de él no se imposibilita la aplicación. No obstante lo anterior, se recomienda que los métodos se apliquen respetando los rangos indicados por cada método de predicción.

Por lo anterior es que se ha escogido la configuración de línea #19 para realizar un análisis más profundo, ya que aunque el método FGH, que es el que se encuentra fuera del rango recomendado, no presenta una gran variación en los resultados de los niveles sonoros estimados.

Las mediciones de los niveles sonoros de la configuración de línea #19 fueron realizados por la organización IREQ, en el marco de una investigación cuyos resultados se presentan en el paper “Corona performance of a conductor bundle for bipolar HVDC transmission at ± 750 kV” [40] de la IEEE. Las mediciones fueron realizadas en la ciudad de Varennes, Québec, Canadá.

Los datos de la configuración de línea #19 que se analizará se observan en la tabla 4.9:

Voltaje de la línea	± 750 kV
Número de conductores por haz	4
Diámetro de los conductores del haz	4.06 cm
Distancia entre los conductores	45.7 cm
Distancia entre polos	13.7 m
Altura de la línea	16.6 m
Gradiente eléctrico	27.6 kV/cm

Tabla 4.9. Datos de la línea de prueba que se analizará.

Para obtener mayor información del perfil lateral se graficaron además las correcciones establecidas en el método BPA para obtener el nivel sonoro en condiciones climáticas de mal tiempo que son excedidas el 50% del tiempo (L_{50} en mal tiempo) y para obtener el valor máximo en buen tiempo climático. Además se calcularon los valores para las 3 condiciones climáticas que establece el método IREQ, esto es, verano, otoño/primavera e invierno.

En la figura 4.3 se observa el perfil lateral que incluye los valores obtenidos con los métodos de cálculo y además se señalan 3 puntos que corresponden a los valores de los niveles sonoros medidos a 15 metros de la línea.

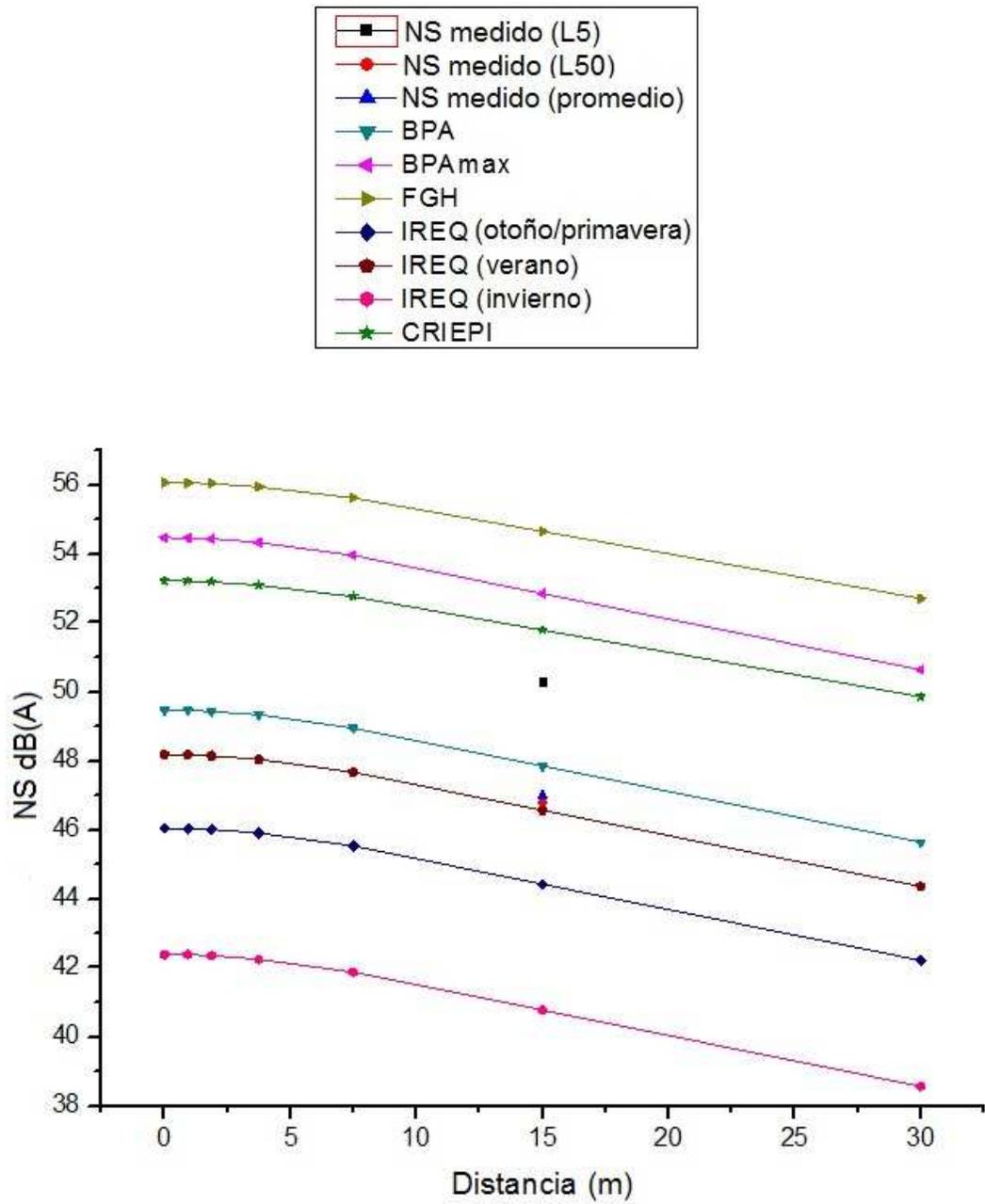


Figura 4.3. Niveles sonoros obtenidos con los diferentes métodos de predicción y valores medidos.

En la figura 4.3 se observa el comportamiento como fuente lineal que tiene la línea de transmisión CC para todos los métodos de predicción, ya que la tendencia en todos los casos es la misma y se mantiene prácticamente igual a medida que se aleja del polo positivo. Esto demuestra que en todos los métodos de predicción la relación funcional es la misma y que la diferencia solo está determinada por las constantes que utilice el método de predicción.

Además es posible observar que los valores de los niveles sonoros medidos en condiciones climáticas de buen tiempo promedio, y en el buen tiempo que es excedido el 50% del tiempo durante un período determinado (L_{50} en buen tiempo), se encuentran entre los valores estimados por el método BPA (L_{50} en buen tiempo) e IREQ (promedio en buen tiempo, en verano):

Condición climática	Niveles sonoros medidos (dB(A))	Niveles sonoros estimados (dB(A))
L_{50} en buen tiempo	46.8	47.8 (BPA)
Promedio en buen tiempo (verano)	47	46.6 (IREQ)

En el caso del valor del nivel sonoro en condiciones climáticas máximas de buen tiempo, éste se encuentra por debajo de los valores estimados con los métodos de predicción, tanto con el método BPA (con su corrección para obtener el valor máximo) y el método FGH:

Condición climática	Niveles sonoros medidos (dB(A))	Niveles sonoros estimados (dB(A))
Máximo en buen tiempo	50.3	52.8 (BPA máx) 54.6 (FGH)

Como se explicó en el capítulo 3 del presente trabajo, un factor que influye de forma importante en la generación de los niveles sonoros son las condiciones climáticas, específicamente bajo condiciones de buen tiempo donde los niveles sonoros aumentan. Aunque los métodos incluyen un factor explícito que depende de las condiciones climáticas (que corresponde al gradiente crítico), cada método obtuvo su expresión de forma semi-empírica, por lo que hay factores que se encuentran de forma implícita en los métodos, estos factores son principalmente las condiciones climáticas.

Es importante notar que los métodos IREQ y CRIEPI entregan los niveles sonoros en condiciones climáticas de buen tiempo promedio, por lo que se esperaría que entregaran los mismos valores (o con diferencias mínimas), lo que en este caso no es así. Una razón del por qué se produce esto es porque como los métodos fueron desarrollados de forma semi-empírica, las expresiones de cada método fueron obtenidas bajo una condición climática característica del lugar donde fueron realizadas. Esto implica que la condición de buen tiempo máximo o buen tiempo promedio puede ser diferente según cada organización, por lo que no es representativa de un clima específico. En la figura 4.3 se observa que con el método IREQ en condiciones de verano se obtuvo un nivel sonoro muy cercano al medido. Esto podría explicarse porque las mediciones fueron realizadas por la misma organización IREQ y es probable que para la obtención del método las condiciones climáticas consideradas sean las mismas (o similares) a las que existían durante las mediciones (para una determinada estación del año).

Es importante destacar que las condiciones climáticas en la región de Varennes en Québec (Canadá) se caracterizan por ser húmedas en casi todo el año lo que se acrecienta en invierno con la presencia de nieve y lluvia. Para tener una idea: Varennes se encuentra cerca de Montreal (Quebec, Canadá) donde la

temperatura media en invierno es de alrededor de -10°C , llegando a mínimas de -40°C . En verano la temperatura media es de aproximadamente 21°C y la máxima no sobrepasa los 35°C , estando siempre presente la humedad, incluso la lluvia en verano.

Como se observa, el clima de buen tiempo en esta región (Varenes) es muy diferente a los climas presentes en nuestro país, por ejemplo, las condiciones climáticas de buen tiempo promedio en Varenes son muy diferentes a las condiciones de buen tiempo promedio que podrían encontrarse en el norte del país. Bajo esta premisa, se podría suponer que el método IREQ podría tener un comportamiento mejor en el sur de nuestro país que en la zona norte.

Por lo anterior es que no es posible establecer un método general para su aplicación en todo Chile. Para esto, se debe tener más información del comportamiento de las líneas de transmisión en corriente continua en diferentes zonas del país, para lo que se deben realizar mediciones en líneas reales para evaluar el comportamiento de los métodos de predicción según la zona geográfica en la que se encuentre la línea.

No obstante todo lo anterior, y entendiendo que es necesario establecer un método de predicción para las líneas de alta tensión en corriente continua en nuestro país, es necesario justificar en base a la información presentada en este capítulo y a aquella que será entregada por la normativa aplicable¹⁶ a las líneas de transmisión CC, qué método es más adecuado para su aplicación en nuestro país.

¹⁶ Capítulo 5 “Normativa ambiental aplicable a las líneas de ATCC”, del presente trabajo.

CAPÍTULO 5

NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE A LAS LÍNEAS DE ATCC

En este capítulo se presenta la normativa ambiental aplicable a los proyectos de líneas de alta tensión en corriente continua, específicamente a los campos eléctricos y magnéticos estáticos y al ruido audible generado por las líneas de alta tensión en corriente continua.

La base de la legislación ambiental en nuestro país es la “Constitución Política de la República de Chile”, que en el artículo 19 número 8, establece:

“El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Es deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza. La ley podrá establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente.”

Por su parte, la ley 19.300 junto con darle contenido a lo señalado en la constitución, establece [41]:

“El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental se regularán por las disposiciones de esta ley, sin perjuicio de lo que otras normas legales establezcan sobre la materia.”

5.1. Sistema de evaluación de impacto ambiental “SEIA”.

El sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) es un instrumento de gestión ambiental que se crea a partir de la Ley 19.300. La entrada en vigencia del SEIA comienza con la promulgación del D. S. N° 30/1997 (modificado por el D.S. N 95/2001) que fija el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, en el que se establecen *“las disposiciones por las cuales se regirá el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental y la Participación de la Comunidad, de conformidad con los preceptos de la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente”* (Titulo I, Artículo 1, Reglamento SEIA) [42].

Para determinar si un proyecto de ***líneas eléctricas de alta tensión en corriente continua*** debe someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA), éste debe cumplir con lo establecido en la Ley 19.300.

De acuerdo con el **artículo 10** del la Ley 19.300 y con el **artículo 3** del Reglamento del SEIA, entre *“los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualesquiera de sus fases, que deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental...”* se encuentran los proyectos de líneas de transmisión. Éste tipo de proyecto se señala en el literal b) que indica: *“líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje y sus subestaciones. Se entenderá por líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje aquellas líneas que conducen energía eléctrica con una tensión mayor a veintitrés kilovoltios (23 kV)”*.

Una vez dentro del sistema, y de acuerdo a lo establecido en el **artículo 4** del Reglamento del SEIA, *“el titular de un proyecto o actividad que se someta al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, lo hará presentando una Declaración de Impacto Ambiental, salvo que dicho proyecto o actividad genere*

o presente alguno de los efectos, características o circunstancias contemplados en el artículo 11 de la Ley....en cuyo caso deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental”.

De acuerdo a lo anterior, es posible reconocer algunos de los efectos, características o circunstancias señalados en el **artículo 11** de la Ley 19.300 que aplican a los proyectos de líneas de transmisión en corriente continua:

a) Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos;

Para los efectos de evaluar lo indicado en el artículo 11 literal a) de la Ley 19.300, se debe recurrir a lo señalado en el **artículo 5** del reglamento del SEIA, que en sus literales a), f) y g) indica:

a) Lo establecido en las normas primarias de calidad ambiental y de emisión vigentes. A falta de tales normas, se utilizarán como referencia las vigentes en los Estados que se señalan en el artículo 7 del presente Reglamento;

f) La diferencia entre los niveles estimados de inmisión de ruido con proyecto o actividad y el nivel de ruido de fondo representativo y característico del entorno donde exista población humana permanente;

g) Las formas de energía, radiación o vibraciones generadas por el proyecto o actividad;

El **artículo 7** del reglamento del SEIA al que se hace referencia en el artículo 5 literal a) indica: “*Las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si se genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos señalados en la letra b), ambas del*

artículo 11 de la Ley, serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República Argentina, Australia, República Federativa del Brasil, Confederación de Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de Norteamérica, Nueva Zelandia, Reino de los Países Bajos, República de Italia, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza. Para la utilización de las normas de referencia, se priorizará aquel Estado que posea similitud, en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local”.

En el caso que un proyecto no esté listado en el artículo 10 de la Ley, podrá ingresar de forma voluntaria al SEIA, aunque deberá cumplir posteriormente con los requisitos señalados en el proceso.

Junto con los artículos señalados anteriormente, existen otros¹⁷ artículos que deben considerarse en el desarrollo de proyectos de líneas eléctricas de alta tensión en corriente continua.

5.2. Normativa nacional aplicable.

Para el diseño de la propuesta de guía del ruido y de los campos eléctricos y magnéticos se hace necesaria la presentación de normativa ambiental aplicable, por lo cual, y según lo señalado en el artículo 5 del Reglamento del SEIA, se debe recurrir a las normas primarias de calidad ambiental y de emisión vigentes.

¹⁷ Además, en el caso de los proyectos de líneas de alta tensión en corriente continua, se propone consultar también los siguientes artículos del Reglamento del SEIA: art. 12 al 16, art. 57 al 62.

Sin embargo, no existe normativa ambiental aplicable en nuestro país, por lo que se hace necesario recurrir a aquella normativa de referencia de acuerdo a lo indicado en el artículo 7 del reglamento del SEIA.

En el caso del ruido audible sí existe normativa de carácter nacional, la cual será revisada en esta sección.

La exposición¹⁸ al ruido audible puede producir diversos daños en la salud de las personas, llegando en algunos casos a provocar serios problemas irreversibles. Por este motivo es que se hace necesaria la aplicación de normativa que establezca límites permisibles que permitan asegurar la salud de las personas expuestas a estas fuentes de ruido.

Las líneas eléctricas de alta tensión en corriente continua se consideran fuentes fijas, ya que son instaladas en un lugar fijo y determinado. Por lo anterior es que deben cumplir con lo establecido en el D.S. N° 146/97 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, que establece la “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas”.

5.2.1. Decreto Supremo N°146/97 del MINSEGPRES “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas”.

Este decreto está elaborado a partir de la revisión de la norma de emisión contenida en el decreto N° 286 de 1984 del Ministerio de Salud. Este decreto surge por la necesidad de mejorar aquellos aspectos contenidos en el decreto N° 286 de 1984 del Ministerio de Salud, tales como: la zonificación, correcciones al interior de las viviendas y por ruido de fondo, y la tipificación adecuada de los tipos de ruido [31].

¹⁸ Ver anexo A: “Exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos y al ruido audible”.

Esta norma establece los niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos (NPC) junto con los criterios técnicos necesarios para evaluar y calificar la emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas hacia la comunidad [29].

Con esta norma se busca proteger a la comunidad que se ve afectada por problemas de contaminación acústica desde el punto de vista de la salud pública, y que son originados por las molestias generadas por el ruido producido por fuentes fijas, específicamente a aquellas personas que pudieran estar afectadas por altos niveles de ruido, o que pudieran sufrir molestia en lugares habitables, tales como sus viviendas, su lugar de trabajo (por una fuente fija distinta a su propia fuente laboral), de descanso o de esparcimiento, entre otras.

Los organismos a quienes corresponde fiscalizar el cumplimiento de lo establecido en el D.S. N°146/97 son los Servicios de Salud del país, y en la Región Metropolitana, al Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana. Lo anterior sin perjuicio de las atribuciones específicas que correspondan a los demás organismos públicos con competencia en la materia.

Su aplicación se produce principalmente por: denuncia de ruidos molestos, peritajes de certificación, proyectos que se acogen al sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) y proyectos de reducción de emisiones de niveles de ruido.

A continuación se presentan algunos aspectos importantes de la norma que permiten establecer un marco teórico para el presente trabajo y las consideraciones que se establecen posteriormente para la aplicación de la norma en líneas de transmisión. Sin embargo, no constituye un documento para

la correcta aplicación en terreno, para ello se debe consultar el texto completo de la norma [29]:

Del “*TITULO II: DEFINICIONES*”, algunas definiciones importantes de la norma:

- *Fuente Fija Emisora de Ruido*: Toda fuente emisora de ruido diseñada para operar en un lugar fijo o determinado. No pierden su calidad de tal las fuentes que se hallen montadas sobre un vehículo transportador para facilitar su desplazamiento.
- *Nivel de Presión Sonora Continuo Equivalente (NPSeq, ó Leq)*: Es aquel nivel de presión sonora constante, expresado en decibeles A, que en el mismo intervalo de tiempo, contiene la misma energía total (o dosis) que el ruido medido.
- *Nivel de Presión Sonora Máximo (NPSmáx ó SPL máx)*: Es el NPS más alto registrado durante el período de medición.
- *Nivel de Presión Sonora Corregido (NPC)*: Es aquel nivel de presión sonora que resulte de las correcciones establecidas en la presente norma.
- *Ruido de Fondo*: Es aquel ruido que prevalece en ausencia del ruido generado por la fuente fija a medir.
- *Zona I*: Aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a: habitacional y equipamiento a escala vecinal.
- *Zona II*: Aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a los indicados para la Zona I, y además se permite equipamiento a escala comunal y/o regional.

- Zona III : Aquella zona cuyos usos de suelo permitidos de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponden a los indicados para la Zona II, y además se permite industria inofensiva.
- Zona IV : Aquella zona cuyo uso de suelo permitido de acuerdo a los instrumentos de planificación territorial corresponde a industrial, con industria inofensiva y/o molesta.

Del “TÍTULO III: DE LOS NIVELES MÁXIMOS PERMISIBLES DE PRESIÓN SONORA CORREGIDO”:

4º.- *Los niveles de presión sonora corregidos que se obtengan de la emisión de una fuente fija emisora de ruido, medidos en el lugar donde se encuentre el receptor, no podrán exceder los valores que se fijan a continuación:*

NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE PRESION SONORA CORREGIDOS (NPC) EN dB(A) LENTO		
	De 7 a 21 hrs.	De 21 a 7 hrs.
Zona I	55	45
Zona II	60	50
Zona III	65	55
Zona IV	70	70

5º.- *En las áreas rurales, los niveles de presión sonora corregidos que se obtengan de la emisión de una fuente fija emisora de ruido, medidos en el lugar donde se encuentre el receptor, no podrán superar al ruido de fondo en 10 dB(A) o más.*

6º.- *Las fuentes fijas emisoras de ruido deberán cumplir con los niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos correspondientes a la zona en que se encuentra el receptor.*

La determinación de la zona en la que se encuentra el receptor será definida mediante el Plan Regulador Comunal u otro instrumento de Planificación Territorial vigente que disponga la comuna. En el caso que la fuente fija emisora de ruido y el receptor se encuentren en zonas con diferente uso de suelo, se aplicará la exigencia para la zona en donde se localiza el receptor. Para más información se recomienda consultar el manual de aplicación del D.S. N° 146/97 MINSEGPRES “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas”.

Del “*TITULO V: PROCEDIMIENTOS DE MEDICION*”:

El proceso de obtención del valor del Nivel de presión sonora corregido, está basado en un algoritmo de cálculo, cuyos detalles se encuentran en el DS N°146/97. Algunos aspectos importantes a considerar en este trabajo son:

- Instrumento de medición.
- Informe técnico
- Mediciones internas y externas.
- Tipos de ruido (en el caso de las líneas de ATCC el tipo de ruido es estable).

En lo que se refiere a las condiciones de medición, la norma indica que las mediciones se deben realizar en el *lugar, momento y condición de mayor*

*molestia*¹⁹. También se indican las correcciones que se deben aplicar a los niveles de presión sonora de mediciones internas:

- *Para ventana abierta: +5 dB(A)*
- *Para ventana cerrada: +10 dB(A)*

Además se indican las “Correcciones de los niveles de presión sonora por ruido de fondo”:

1. En el evento que el ruido de fondo afecte significativamente las mediciones, se podrá realizar una corrección a los valores obtenidos de la emisión de una fuente fija. Para tal efecto, se deberá seguir el siguiente procedimiento:

1.1 Se deberá medir el nivel de presión sonora del ruido de fondo bajo las mismas condiciones de medición a través de las cuales se obtuvieron los valores de la emisión de la fuente fija emisora de ruido. Esta medición se podrá realizar en cualquiera de los tres puntos de medición.

1.2. Para la obtención del nivel de presión sonora de ruido de fondo, se medirá NPSeq en forma continua, hasta que se estabilice la lectura, registrando el valor de NPSeq cada cinco minutos. Se entenderá por estabilizada la lectura, cuando la diferencia aritmética entre dos registros consecutivos sea menor o igual a 2 dB(A). El nivel a considerar será el último de los niveles registrados. En ningún caso la medición deberá extenderse por más de 30 minutos.

1.3. En el evento que el valor obtenido en el número 1.2. precedente provenga de una medición interna, se deberá realizar la corrección señalada en el número 8º, letra B, 2.4., "corrección para mediciones internas", de la presente norma.

1.4. El valor obtenido de la emisión de la fuente fija medida, se corregirá según la siguiente tabla:

¹⁹ Según lo explicado en el capítulo 3 del presente trabajo, en el caso de las líneas eléctricas de ATCC la peor condición de emisión de la fuente fija es bajo condiciones climáticas de buen tiempo.

CORRECCIONES POR RUIDO DE FONDO	
Diferencia aritmética entre el nivel de presión sonora obtenido de la emisión de la fuente fija y el nivel de presión sonora del ruido de fondo	Corrección
10 o más dB(A)	0 dB(A)
De 6 a 9 dB(A)	-1 dB(A)
De 4 a 5 dB(A)	-2 dB(A)
3 dB(A)	-3 dB(A)
Menos de 3 dB(A)	Medición nula

2. *En el evento que la diferencia aritmética entre el nivel de presión sonora obtenido de la emisión de la fuente fija y el nivel de presión sonora del ruido de fondo sea menor de 3 dB(A), será necesario medir bajo condiciones de menor ruido de fondo.*

3. *El procedimiento para obtener el nivel de ruido de fondo establecido en los números 1.1., 1.2. y 1.3. precedentes, será aplicable a lo dispuesto para áreas rurales en el número 5°.*

El valor del Nivel de presión sonora corregido (NPC) se obtiene a través de un algoritmo de cálculo que contempla diferentes parámetros registrados en las mediciones, además de las correcciones por ruido de fondo y por mediciones internas. Para lo anterior se sugiere utilizar las fichas de medición contenidas en el manual de aplicación de la norma. En el caso de los proyectos de líneas de transmisión de corriente continua el ruido generado es estable, por lo que se debe utilizar la ficha correspondiente a este tipo de ruido (ver anexo C).

5.3. Normativa Internacional aplicable.

Los campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas de corriente continua son estáticos, es decir, muy diferentes a los campos electromagnéticos generados por CA. Por lo anterior, y por los efectos adversos que produce en las personas la exposición²⁰ a los campos eléctricos y magnéticos estáticos, se hace necesaria la aplicación de normativa específica, que no existe actualmente en Chile, por lo que se deben utilizar normativas internacionales de aquellos países señalados en el artículo 7 del reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental.

5.3.1. Límites recomendados para campos eléctricos estáticos.

Aunque no hay evidencia de que los campos eléctricos estáticos afecten de forma significativa la salud de las personas, es necesario establecer límites para evitar la exposición de las personas a campos eléctricos muy elevados.

La Tierra genera de forma natural campos eléctricos estáticos que no afectan a las personas ya que son de poca intensidad, estos valores se muestran en la tabla 5.1 [25]:

Lugar	Valor promedio del campo eléctrico estático
Superficie (buen tiempo)	0.13 <i>kV/m</i>
A una altura de 1000 m	0.045 <i>kV/m</i>
Aproximación a una tormenta	0.1 – 3 <i>kV/m</i>

Tabla 5.1. Campos electroestáticos generados de forma natural [14].

²⁰ En el anexo A se presentan antecedentes de la exposición de las personas a los campos eléctricos y magnéticos estáticos y al ruido audible.

Es posible encontrar normativa de carácter internacional que establece los valores límites para la exposición de las personas a los campos eléctricos estáticos. Los potenciales impactos medioambientales generados por líneas de transmisión, generalmente son considerados durante el proceso de diseño de la línea y luego durante el emplazamiento de la línea.

La normativa de referencia establecida por organizaciones internacionales, es altamente aceptada por la comunidad internacional. En el caso de los campos eléctricos estáticos no se tiene mayor información de los países que utilizan como referencia esta normativa. Sin embargo, son valores establecidos mediante estudios experimentales y, por lo tanto son aplicables en cualquier lugar del mundo.

En la tabla 5.2 se muestran los límites de exposición a los campos eléctricos. Estos límites permitirán proteger la salud de las personas, por lo que deben ser considerados en la evaluación de los efectos ambientales [14].

Referencia	Límite de campo eléctrico	Comentario
NRPB ²¹ (2004)	25 kV/m	Bajo este valor de exposición no ocurrirán efectos adversos.
ICES (2002)	28 kV/m	Exposición para público en general

Tabla 5.2. Valores máximos recomendados para la exposición a los campos electroestáticos (en el borde de la franja de servidumbre) [14].

Los valores de la tabla 5.2 representan los límites (máximos) a los que puede estar expuesta una persona. Estos valores se obtuvieron mediante estudios

²¹NRPB: National Radiological Protection Board (1993).

experimentales en los cuales se observó que sobre estos valores se comienzan a producir efectos sobre las personas.

5.3.2. Límites recomendados para campos magnéticos estáticos.

En el caso de los campos magnéticos estáticos si se han observado efectos más importantes en personas (aunque no significativos). Al igual que el campo eléctrico estático, el campo magnético estático se produce de forma natural en la Tierra, sin que produzcan efectos de gran importancia dada su baja intensidad. En la tabla 5.3 se observa el campo magnético estático que se produce en diferentes lugares de la tierra [25]:

Lugar	Valor promedio del campo
Ecuador magnético	$35 \mu T$
Polos magnéticos	$70 \mu T$
Procesos atmosféricos	$< 1 \mu T$

Tabla 5.3. Campos magnéticos estáticos generados de forma natural [14].

En lo que se refiere a los límites de exposición al campo magnético estático de las líneas de ATCC, las diferentes organizaciones han definido valores que permiten resguardar la salud de las personas, evitando que se expongan a campos intensos que puedan afectar su salud. En la tabla 5.4 se muestran los valores límites establecidos por diferentes organizaciones [14]:

Referencia	Limite del campo magnético	Comentario
NRPB (2004)	40 <i>mT</i> (400 gauss)	Exposición continua de público general.
ICNIRP (1994)	40 <i>mT</i> (400 gauss)	
ICES (2002)	118 <i>mT</i> (1180 gauss)	

Tabla 5.4. Valores máximos recomendados para la exposición a los campos magnéticos estáticos (en el borde de la franja de servidumbre) [14].

En el caso del ICNIRP (International Commission on non-Ionizing Radiation Protection) se hace una observación especial en aquellos casos en que las personas que posean “dispositivos electrónicos médicos” o “implantes ferromagnéticos”, en cuyos casos la exposición debiera ser menor que 0.5 mT (IEC 2002).

Es importante destacar que los valores de referencia señalados por NRPB y ICNIRP de la tabla 5.4 también son utilizados en países como Austria, Francia, Portugal, Reino Unido, España, Holanda y Suiza, los tres últimos países citados en el artículo 7 del Reglamento del SEIA.

Esta organización entrega además límites de exposición recomendados para trabajadores, permitiendo que no se produzcan efectos adversos sobre ellos. En la tabla 5.5 se muestran los límites de exposición ocupacional recomendados por la ICNIRP [28]. Sin embargo, hace la observación de que en el caso de una exposición de 8T se debe justificar la utilización de las correspondientes técnicas de control de seguridad (en el caso de 2T no se observa ningún efecto adverso):

Lugar de exposición	Límite de campo
Cabeza y tronco	2T
Extremidades	8T

Tabla 5.5. Valores límites de campos magnéticos estáticos en el cuerpo humano.

5.4. Normativa técnica para las líneas de ATCC.

Una normativa técnica que se propone para complementar lo establecido en el D.S. N° 146/97 MINSEGPRES “Norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas” (y en su manual aplicación) es el documento llamado “IEEE Standard for the Measurement of Audible Noise From Overhead Transmission Lines. Std 656 - 1992”, en el que se busca establecer un procedimiento standard para la medición del ruido audible en líneas aéreas de transmisión, usando instrumentación conforme a las normas ANSI S1.4-1983, ANSI S1.6-1984, ANSI/SAE J184-1987, IEC 651 (1979) y IEEE Std 539-1990 [30].

Como apoyo a lo establecido en el D.S. N°146/97 MINSEGPRES, se citan a continuación algunos aspectos a considerar durante el proceso de medición de los niveles sonoros de las líneas de transmisión. Estos aspectos son:

- **Ubicación del micrófono:** El documento técnico propone una orientación especial del micrófono. Esto proveerá una respuesta más cercana a la de un micrófono ideal en el campo sonoro producido por una línea de transmisión.

En el caso de las mediciones realizadas en el marco de la normativa aplicable (D.S. N° 146/97 MINSEGPRES) el micrófono debe ser direccionado hacia el polo positivo (en el caso de más de un polo positivo debe ser al más cercano) como se muestra en la figura 5.1.

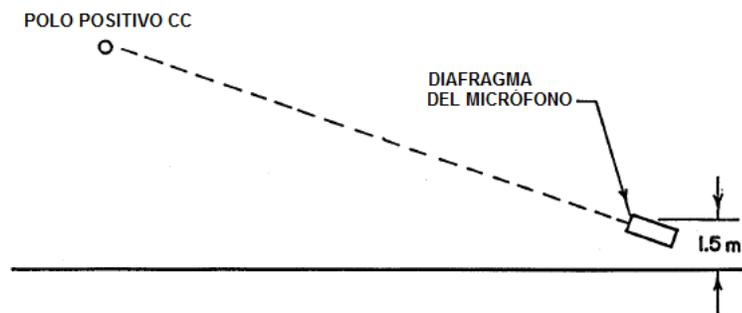


Figura 5.1. Orientación de un micrófono de campo libre.

- **Dispositivo de protección para el micrófono:** Como complemento a lo señalado en el D.S. N°146/97 MINSEGPRES, se recomienda que el protector de viento para el micrófono no tenga una pérdida por inserción mayor de ± 2 dB sobre el rango de frecuencias del micrófono.
- **Ubicación del operador:** Se recomienda que el micrófono esté separado del sonómetro y del operador por al menos 3 m. Si el micrófono y el sonómetro están juntos en la posición de medida, el operador deberá sostener el sonómetro con el brazo extendido. En ese caso además, el operador no podrá ubicarse entre el micrófono y la línea de transmisión.

DISCUSIÓN

Junto con el objetivo general establecido en el Capítulo 1, se estableció también la entrega de información relevante para posteriores estudios y para el correcto entendimiento de las propuestas de guía. Por tal motivo se incluyeron temas como: los efectos sobre la salud que producen las líneas de ATCC, la normativa ambiental aplicable nacional e internacional, modelos de predicción del ruido audible, entre otros.

A continuación se presentará una discusión de aquellos aspectos relevantes que fueron tratados durante el desarrollo del trabajo de titulación.

- Los sistemas de transmisión en corriente continua tienen características muy diferentes a los sistemas de transmisión de corriente alterna, principalmente en lo que se refiere al voltaje transmitido, ya que en líneas CC se debe realizar un complejo proceso de conversión (desde una fuente de alimentación CA) que permite obtener el voltaje continuo de una cierta polaridad (positiva o negativa). Lo anterior significa una diferencia entre el efecto corona producido en las líneas CC y CA, ya que las descargas son de la polaridad que tiene el conductor y no presenta alternancia como en el caso de las líneas CA.

La diferencia en el proceso de las descargas corona se traduce en una diferencia en los fenómenos asociados a ellas, como por ejemplo la generación de ruido audible, ya que se ha observado que bajo

condiciones climáticas de buen tiempo se obtienen niveles sonoros mayores a los que se encuentran en mal tiempo, caso contrario a lo que ocurre en las líneas CA. Aunque no existe evidencia de por qué ocurre esto, investigadores han señalado que se debe a que el ruido audible depende más de la amplitud de las descargas corona que de la tasa de repetición, lo que bajo condiciones de lluvia (mal tiempo) se produce por la presencia de gotas de agua sobre los conductores CC. Además, las descargas corona generadas con polaridad positiva son de mayor amplitud que las descargas con polaridad negativa, por lo que es el polo positivo el que aporta con mayores niveles sonoros.

- El perfil de frecuencia de ruido audible en una línea de transmisión en CC se caracteriza por no tener componentes puros (caso contrario a las líneas CA), siendo más bien plano. En el caso del perfil transversal, éste es simétrico con respecto al polo positivo y decae en forma casi lineal. Estudios han demostrado que para líneas de transmisión CA y CC de las mismas características, el ruido audible generado es menor en la línea CC. Por ejemplo, para una línea bipolar CC de ± 400 kV y 1200 MW y una línea trifásica CA de 400 kV y 1200 MW, la diferencia entre los niveles sonoros a 23 metros (aproximadamente) de la línea es de 6 dB(A); con 36 dB(A) para la línea CC y 42 dB(A) para la línea CA [14].
- Los métodos de predicción de ruido propuestos en el capítulo 4 del presente trabajo fueron desarrollados por diferentes organizaciones de prestigio internacional y constituyen por lo tanto una fuente confiable de información. Sin embargo, una característica que podría entorpecer la aplicación de los métodos es que éstos son semi-empíricos, y por lo tanto genera la existencia de parámetros que no se pueden considerar de forma explícita, en este caso principalmente lo que se refiere a

condiciones climáticas. Al no poder considerar de forma explícita estos parámetros no es posible relacionar de forma directa los métodos a un clima existente en nuestro país.

Los métodos de predicción de los niveles sonoros se caracterizan por ser de fácil aplicación. Sin embargo, se han establecido rangos donde los métodos funcionan mejor, por lo que se recomienda utilizar los métodos de predicción respetando cuanto sea posible los rangos indicados. Una característica de estos métodos es que permiten obtener los valores en un punto receptor a una cierta distancia de la línea de transmisión (de forma perpendicular), pero además tienen directa relación con la emisión de la línea, por lo que al obtener los niveles sonoros en un punto dado no se hace necesaria una corrección por ruido de fondo.

- En nuestro país la normativa aplicable a las líneas de transmisión CC en lo que se refiere a los campos eléctricos y magnéticos y al ruido audible es escasa y solo es posible encontrar aquella de carácter general para este tipo de proyectos (como la Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente) y aquella específica para el ruido. En el caso de la normativa aplicable a los campos eléctricos y magnéticos es necesario recurrir a normativa de referencia utilizada en otros países²². En el caso del ruido la normativa nacional aplicable corresponde al D.S. N° 146/97 MINSEGPRES “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas”, cuyo fin es la protección de la salud y bienestar de las personas y en la que se señalan los límites máximos permisibles de nivel de presión sonora corregido que se deben cumplir en el punto donde se encuentre el receptor.

²² Aquellos países señalados en el art. 7 del Reglamento del SEIA.

- En el marco del SEIA, para determinar el método de predicción más adecuado para su uso en Chile se deben considerar 2 aspectos principales: las condiciones climáticas y el criterio preventivo, el que está determinado por la normativa aplicable a las líneas CC que corresponde al D.S. N° 146/97 MINSEGPRES “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas”. En este decreto se señala que las mediciones se deben realizar en *lugar, momento y condición de mayor molestia* por lo que el método de predicción debe estimar los valores bajo estas mismas condiciones.

En el capítulo 4 se concluyó que existe una fuerte dependencia del método de predicción con las condiciones climáticas y que los mayores niveles de emisión sonora se producían cuando se estaba bajo condiciones climáticas de buen tiempo. Se estableció además que no era posible establecer un método general para su uso en Chile, ya que no existe mayor información sobre las condiciones bajo las cuales se obtuvieron los métodos, por lo que no es posible establecer si para un determinado método las condiciones climáticas son comparables a las existentes en Chile.

Todos los métodos de predicción del ruido presentados estiman los valores del ruido bajo condiciones climáticas de buen tiempo, aunque en el caso del método FGH se estima bajo una condición de buen tiempo máximo. Esto permitiría establecer que el método FGH presenta las condiciones climáticas bajo las cuales se producen los mayores niveles de emisión.

En el caso del criterio preventivo, éste hace referencia a la determinación de un valor que permita asegurar que no se sobrepasarán los niveles

máximos permisibles que indica la norma. En este sentido se debe considerar aquél método de predicción que permita asegurar que los niveles generados por la línea no sobrepasarán los niveles sonoros estimados con el método de predicción.

Finalmente, y considerando las condiciones y el criterio preventivo, el método que se deberá utilizar para la predicción de los niveles sonoros y por lo tanto, que será incluido en la propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental del ruido generado por las líneas de alta tensión en corriente continua es el método FGH, el cual estima los niveles sonoros en condiciones de buen tiempo máximo durante un período de tiempo determinado. Este método permitirá asegurar con más exactitud que el resto de los métodos que los valores de emisión de la línea de transmisión no sobrepasarán los niveles estimados.

En el caso que no sea posible utilizar el método FGH por las características que el método exige, se propone realizar un estudio completo de los niveles sonoros estimados con los cuatro métodos presentados, y en base al criterio preventivo determinar cuál es el que entrega los niveles sonoros más altos, para posteriormente elegir este método para la predicción del ruido.

Es necesario por lo tanto recomendar la realización de estudios futuros que puedan establecer a qué método se ajustan más los niveles sonoros medidos en una eventual línea de transmisión en CC en Chile. Estos estudios deberán considerar mediciones que se realicen en zonas representativas de nuestro país (desde el punto de vista climático), ya que las condiciones climáticas varían de gran forma según la zona

geográfica, por lo tanto existirá un método que represente mejor a un determinado lugar (zona norte, centro, sur y extremo sur).

***PROPUESTA DE GUÍA PARA LA
EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE
CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS EN
LÍNEAS DE ATCC***

En nuestro país no existe normativa aplicable para limitar la exposición a campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas de alta tensión en corriente continua, por lo cual, para asegurar la salud y calidad de vida de las personas se hace necesario recurrir a valores límites utilizados en aquellos países que establece el artículo 7 del reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA).

Por lo anterior, es que no existe en nuestro país algún documento que sirva como lineamiento para evaluar estos campos, por lo que en el presente capítulo se presenta una propuesta de guía que sirva como un documento estandarizado para la presentación de declaraciones de impacto ambiental (DIA) o estudios de impacto ambiental (EIA), cuyo uso por parte del titular del proyecto, como de los organismos fiscalizadores, permita establecer un nexo entre los contenidos necesarios para la evaluación y los presentados por los titulares del proyecto. Esta propuesta de guía está basada en lo establecido en los capítulos precedentes.

7.1. Guía para la evaluación de impacto ambiental de campos eléctricos y magnéticos.

1. Descripción del proyecto.

En el DIA o EIA, en el capítulo “Descripción del proyecto”, bajo el título de descargas, emisiones y residuos del proyecto, subtítulo “Radiaciones no ionizantes”, considerando la fase de operación, se debe incluir lo siguiente:

1.1. Fuente emisora de radiaciones electromagnéticas.

Se entiende por tal, a aquella actividad, proceso, operación o dispositivo, que genere, o pueda generar, emisiones de radiaciones electromagnéticas hacia la comunidad. Se debe identificar claramente la fuente emisora, en el caso de esta guía, corresponde a las líneas eléctricas de alta tensión en corriente continua.

Para estimar los valores de las emisiones electromagnéticas que generan las líneas eléctricas de ATCC, los parámetros mínimos que se deben indicar son:

- Tensión (kV)
- Potencia (MW)
- Número de conductores (por haz).
- Distancia entre conductores (cm).
- Diámetro de los conductores (cm).
- Altura de los conductores (mínima y máxima) (m).
- Distancia entre los polos (m).

2. Área de influencia del proyecto

Para identificar de forma correcta el área de influencia del proyecto se debe considerar:

- Incorporar un plano con la siguiente información cartográfica: escala, norte, simbología, cuadrícula de referencia indicando coordenadas UTM y/o geográficas, fuente del plano base y los siguientes datos geodésicos: el tipo y parámetros de la proyección cartográfica, el elipsoide, en Datúm WGS 84 y la zona correspondiente según el huso (18 o 19) en el caso de las coordenadas UTM.
- La localización del área de emplazamiento de las líneas de transmisión y su respectiva franja de seguridad y/o servidumbre²³. La franja de seguridad es aquella zona en la que se debe resguardar la seguridad de las personas, especialmente en lo que se refiere a la exposición a campos eléctricos y magnéticos. Además, se debe indicar la posición de los receptores que podrían verse afectados por la emisión de los campos eléctrico y magnético estáticos
- Señalar aspectos meteorológicos como por ejemplo: temperaturas, niveles de lluvia, velocidad del viento, humedad, etc.

²³ Franja de servidumbre: Es un gravamen sobre un predio en utilidad de otro propietario. Su ancho debe ser al menos igual al de la franja de seguridad (que es calculada de acuerdo a normas técnicas eléctricas vigentes y tiene por objeto resguardar la seguridad de las personas). (Se propone ver DS N°327 que fija Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos).

3. Normativa aplicable

En Chile no existe normativa específica para los valores máximos permisibles de exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos, por lo que la normativa propuesta aquí es de carácter internacional y utilizada como referencia en algunos países (España, Países Bajos y Suiza) señalados en el artículo 7 del reglamento del (SEIA). Los niveles de referencia que se citarán a continuación se basan en el valor más restrictivo asegurando la baja exposición a los campos eléctricos y magnéticos estáticos.

3.1. Campos eléctricos

Los niveles de referencia para la exposición a campos eléctricos estáticos se presentan en la siguiente tabla:

Referencia	Límite de campo eléctrico
NRPB (2004)	25 <i>kV/m</i>

3.2. Campos magnéticos estáticos.

Los niveles de referencia para la exposición a campos magnéticos estáticos se presentan en la siguiente tabla:

Referencia	Límite del campo magnético
ICNIRP (1994)	40 <i>mT</i> (400 gauss)

4. Predicción de los valores de los Campos eléctricos y Magnéticos.

4.1. Campos eléctricos estáticos.

Para la predicción de los campos eléctricos se propone el uso del método “Grado de saturación de la corona”. Este método entrega información adecuada para la predicción de los niveles de campo, incorporándola en el cálculo de las componentes electrostática y por cargas espaciales. Sin perjuicio de lo anterior, si el titular del proyecto quisiera utilizar otro método de predicción, éste debe ser correctamente justificado para su aplicación.

4.2. Campos magnéticos estáticos.

El campo magnético estático es de cálculo simple mediante la “Ley de Ampère”, la que relaciona un campo magnético estático con la corriente que lo produce.

5. Medición de campos eléctricos y magnéticos.

Para la medición de los campos eléctricos y magnéticos de líneas existentes, se propone el uso de los procedimientos indicados en el documento “IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities. Std 1227-1990”, en el que se señala el procedimiento para la medición, y el instrumental necesario, para los campos eléctricos producidos por las líneas de ATCC. En el anexo B se describen algunas de las consideraciones importantes que se deben tener en cuenta para la medición de los campos eléctricos estáticos de las líneas en CC.

***PROPUESTA DE GUÍA PARA LA
EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL
DEL RUIDO AUDIBLE EN LÍNEAS DE ATCC***

En este capítulo se presenta la propuesta de guía de evaluación de impacto ambiental del ruido audible generado por líneas de alta tensión en corriente continua (ATCC), basado en lo descrito en los capítulos anteriores.

Esta propuesta de guía formará parte de futura guía de evaluación de impacto ambiental del ruido. Esta guía se elaborará en el Ministerio del Medio Ambiente.

La propuesta de guía presentada se propone como una herramienta de apoyo para la evaluación ambiental (SEIA) de proyectos de líneas aéreas de alta tensión en corriente continua bipolares durante su fase de operación. Se estableció esta característica de línea por ser la más común en su uso.

Esta propuesta considera 4 aspectos relevantes que permitirán establecer los contenidos más importantes y mínimos que debería presentar una futura guía. En este caso solo se consideran los aspectos puntuales para la aplicación a líneas aéreas bipolares de ATCC durante la fase de operación.

Propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental del ruido.

1. Descripción del proyecto.

En el EIA, en el capítulo “Descripción del Proyecto”, bajo el título Descargas, Emisiones y Residuos del Proyecto, subtítulo Ruido, considerando la fase de operación, se debe incluir lo siguiente:

1.1. Fuentes emisoras de ruido

Se entiende por tal toda actividad, proceso, operación o dispositivo que genere, o pueda generar, emisiones de ruido en los futuros potenciales receptores.

En el caso de las líneas eléctricas de alta tensión en corriente continua, el ruido se genera producto del efecto corona que ocurre en la vecindad de las líneas. Para estimar los niveles de ruido generados por las líneas de transmisión, es necesario que en el informe se detallen ciertos parámetros de gran importancia de la línea, tales como:

- Tensión (kV)
- Potencia (MW)
- Número de conductores (por haz).
- Distancia entre conductores.
- Diámetro de los conductores.
- Altura de los conductores (mínima y máxima)
- Distancia entre los polos.

Debido a que las líneas funcionan de forma constante y no alteran sus condiciones de transmisión, los niveles de ruido emitidos por la línea solo se

verán afectados por condiciones meteorológicas (buen o mal tiempo) o factores físicos de la línea, como por ejemplo el desgaste de éstas. De esta forma no se debe hacer distinción entre los niveles de emisión de la línea de día y noche.

2. Área de influencia del proyecto.

Para una caracterización completa del área de influencia del proyecto se deben considerar los siguientes aspectos:

- Se debe incorporar un plano con la siguiente información cartográfica: escala, norte, simbología, cuadrícula de referencia indicando coordenadas UTM y/o geográficas, fuente del plano base y los siguientes datos geodésicos: el tipo y parámetros de la proyección cartográfica, el elipsoide, en Datúm WGS 84 y la zona correspondiente según el huso (18 o 19) en el caso de las coordenadas UTM.
- Se debe indicar el área de emplazamiento de las líneas de transmisión, indicando los potenciales receptores y las distancias respectivas. Se recomienda además, identificar las distancias correspondientes a las franjas de seguridad y servidumbre²⁴. Esto porque a partir de estas distancias debieran comenzar a situarse los potenciales receptores
- El área de influencia queda determinada mediante la aplicación de los límites permisibles a un modelo predictivo. Con esto es posible establecer el área susceptible donde los niveles sonoros podrían ser sobrepasados. Se deben incluir las coordenadas del polígono que define el área de influencia.

²⁴ Como referencia para el cálculo del ancho de la franja de servidumbre de una línea de transmisión, se sugiere consultar la norma NSEG 5 E. n. 71 del Reglamento de Instalaciones de corrientes fuertes de la Superintendencia de Servicios eléctricos y combustibles.

- Si existen potenciales receptores inmediatamente fuera del área de influencia obtenida, igual deben considerarse en la evaluación. Esto, porque, aunque el método propuesto considere la peor condición, existen factores meteorológicos, como el viento, que pueden aumentar los niveles sonoros en los potenciales receptores. Para un mejor resultado, cuando se estime que las velocidades del viento puedan aumentar (y sobrepasar los 5 m/s en el lugar de emplazamiento de la línea) se propone realizar una corrección por viento. Esta corrección se puede considerar cuando se calcule el área de influencia, para así proteger de antemano a los potenciales receptores que pueden verse afectados.
- Se deben indicar los accidentes geográficos relevantes que afecten la propagación del ruido, tales como: laderas de cerros y altura sobre el nivel del mar. Además, se deben registrar las condiciones meteorológicas del lugar, tales como temperatura, humedad relativa, presión y velocidad del viento. Con esta información es posible establecer en qué momento ocurre la peor condición de emisión de la línea.

3. Línea Base.

Algunas consideraciones importantes para establecer la línea base son:

- Se debe especificar el método de medición de acuerdo a lo señalado en el título V de la norma (DS N°146/97 MINSEGPRES “Norma de Emisión de Ruidos Molestos Generados por Fuentes Fijas”), respetando la metodología de medición indicada y las características del instrumento de medición.

- Para determinar los puntos de medición se deben considerar dos factores: aquellos lugares representativos de una determinada zona y de ésta, aquellos puntos donde se encuentren receptores más susceptibles.
- Las mediciones se deberán realizar en la condición de menor ruido de fondo, y como las líneas de transmisión funcionan de igual forma en horario diurno y nocturno, se debe considerar el horario en que se produzcan los menores valores de ruido de fondo.
- Se deben indicar, de acuerdo a la norma, la fecha, hora y duración de las mediciones, la descripción de la metodología de medición del ruido, las fuentes existentes y las condiciones meteorológicas del lugar, tales como, humedad relativa, presión, temperatura y velocidad del viento. Cabe recordar que éstas dos últimas son las que más afectan el aumento de los niveles sonoros en líneas de transmisión de ATCC.

4. Predicción de los valores del ruido audible.

En la presente guía se aborda la predicción de los niveles de ruido durante la fase de operación. Es importante destacar que en el caso de las líneas de alta tensión en corriente continua, la mayor contribución de ruido es generada por el polo positivo, por lo que los métodos de predicción solo entregan el valor del ruido generado por el polo positivo.

En este tipo de líneas, el peor escenario de generación de ruido se produce en condiciones de buen tiempo, cuando los conductores se encuentran totalmente secos. La elección del método de predicción debe ser justificada en base a la geometría de la línea y parámetros descritos en la descripción del proyecto.

Los métodos de predicción, con sus requisitos de aplicación, son:

- **Bonneville Power Administration (BPA)**

Aplicación : Todas las configuraciones de la línea.

Condición climática de predicción : L_{50} de buen tiempo.

Número de conductores : $4 \leq n \leq 8$

Diámetro de conductores (cm) : $d \leq 5$

Correcciones²⁵ del método:

- Para obtener el valor en buen tiempo máximo: + 5dB(A).
- Para obtener el valor en mal tiempo: -6dB(A).

- **FGH, Germany**

Aplicación : todas las configuraciones de la línea.

Condición climática de predicción : Nivel de buen tiempo máximo.

Número de conductores : $2 \leq n \leq 5$

Diámetro de conductores (cm) : $2 \leq d \leq 4$

- **Hydro Quebec Institute of Research (IREQ)**

Aplicación : todas las configuraciones de la línea.

Condición climática de predicción : Nivel de buen tiempo promedio.

Número de conductores : $4 \leq n \leq 8$

Diámetro de conductores (cm) : $d \leq 5$

²⁵ Se deben sumar al valor del nivel sonoro obtenido directamente con el método BPA para L_{50} en buen tiempo.

- **Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan (CRIEPI)**

Aplicación	: configuraciones bipolares.
Condición climática de predicción	: Nivel de buen tiempo promedio.
Número de conductores	: $1 \leq n \leq 4$
Diámetro de conductores (cm)	: $2.24 \leq d \leq 4.94$
Distancia entre polos (m)	: $w \geq 8.44$

En base a lo indicado en el capítulo 6 el método que se recomienda es el FGH, y en el caso que este método no pueda aplicarse a una cierta línea de transmisión, se propone evaluar la línea con todos los métodos y en base al criterio preventivo determinar el método que estima el nivel sonoro más alto.

CONCLUSIÓN

Algunas conclusiones que se desprenden de la realización del presente trabajo son:

- Se logró diseñar una primera propuesta de guía para la evaluación de impacto ambiental del ruido y campos eléctricos y magnéticos generados por las líneas eléctricas de alta tensión en el marco del SEIA (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental). En ella se lograron establecer los contenidos mínimos necesarios que deben presentar los proyectos que se sometan al SEIA de acuerdo a lo establecido en la normativa ambiental existente.
- La transmisión en CC posee ventajas sobre el uso de CA, tales como:
 - Transmisión a largas distancias sin pérdida de potencia.
 - Conveniente económicamente a partir de una distancia crítica (break-even).
 - Reducción del impacto visual por las características de las torres y de la franja de servidumbre.
- El ruido audible generado por las líneas de transmisión de CC se caracteriza por ser mayor en buen tiempo y disminuir con el mal tiempo. Además, por las características del efecto corona en las líneas CC, la principal fuente de ruido audible es el polo positivo.

- Aunque se presentaron y analizaron cuatro métodos de predicción del ruido audible, se determinó el método FGH para su aplicación en nuestro país. Esta elección se realizó en base a un análisis que consideró las condiciones climáticas y un criterio preventivo.
- El método FGH propuesto en la guía es un método que se puede aplicar a cualquier configuración de la línea y estima los niveles sonoros bajo condiciones climáticas de buen tiempo máximo.
- Los campos eléctricos en líneas CC no producen efectos biológicos sobre las personas; mientras que los campos magnéticos estáticos no producen efectos porque son del orden de los generados de forma natural por la Tierra, aunque se debe tener precaución en algunas personas (con uso de dispositivos cardíacos).
- Producto de que el ambiente eléctrico en las líneas CC es complejo, el método de cálculo debe considerar diversas variables. El método por “Grado de Saturación de la Corona” se propone por ser de fácil aplicación y obtener valores con un alto nivel de exactitud.
- Aunque se logró establecer un método de predicción para la propuesta de guía para la evaluación del ruido, es necesario realizar estudios futuros que permitan establecer un método que se ajuste de mejor forma las condiciones climáticas de nuestro país y así poder realizar un análisis más profundo en base a los criterios de aplicación de los métodos y al criterio preventivo que se debe respetar de acuerdo a lo establecido por la normativa ambiental aplicable.

REFERENCIAS

[1] Joan Ignasi Frau – Jordi Gutierrez. “Transporte de energía eléctrica en corriente continua: HVDC”. Artículo I Jornadas Internacionales de Innovación Energética. CERIEN (Cátedra EndesaRed de Innovación Energética). Abril 2005.

[2] Emilio Aranda. “Desarrollo de un programa computacional para la evaluación del impacto ambiental de líneas de transmisión de corriente continua”. Trabajo de Titulación. Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2009.

[3] Joan Frau. “High Voltage Direct Current. HVDC. More than 50 years in direct current”. Energy Innovation International Journal I. Endesa – Universidad politécnica de Cataluña - CITCEA”. Abril 2005.

[4] J. Bucciero – M. Terbruggen. “Interconnected Power System Dynamics Tutorial: Dynamics of Interconnected Power Systems- Tutorial”. Electric Power Research Institute, EPRI. 3ª ed. EE.UU,1998.

[5] Agustí Egea – Oriol Gomis. “Introducción a los sistemas de alta tensión en corriente continua: HVDC”. Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos (CITCEA). Barcelona, España. 2008.

[6] Dennis A. Woodford. “ HVDC Transmission”.Manitoba HVDC Research Centre. Canada. 1998.

[7] Siemens. “Power Transmission and Distribution: High Voltage Direct Current Transmission- Proven Technology for Power Exchange”. Documento en línea consultado en Julio de 2011. Sitio web:

http://www.siemens.com/sustainability/pool/en/environmental-portfolio/products-solutions/power-transmission-distribution/hvdc_proven_technology.pdf.

[8] Fabián Alonso Elgueta Jaque. “Control de Sistemas HVDC”. Trabajo de titulación. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2008.

[9] Itaipú Binacional. Sitio web www.itaipu.gov.py (consultado en Agosto de 2011).

[10] Nelson Morales O. “Fenómeno Corona en líneas aéreas”. Apuntes profesor. Universidad de Chile. 2006.

[11] Enrique Alejandro Pasten Barraza. “Software para evaluar el impacto ambiental sobre el medio ambiente de las líneas eléctricas de alta tensión”. Trabajo de titulación. Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 1995.

[12] Patricio Andrés Santana Fontanes. “Impacto Medio Ambiental de líneas de transmisión. Evaluación a través de software de simulación”. Trabajo de titulación. Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2007.

[13] Ricardo Pesse L. “Curso: Gestión ambiental de la prevención y control del ruido”. Magister en Medio ambiente con mención en Gestión y ordenamiento ambiental, PROGOA. Universidad de Santiago de Chile. 2006.

[14] Exponent Engineering P.C. "New York Regional Interconnection; Electromagnetic Fields". New York, EE.UU. Mayo 2006.

[15] ABB. HVDC reference projects. <http://www.abb.com/industries/es/9AAF400191.aspx?country=CL> (consultado en Octubre de 2011).

[16] IEEE Committee Report. "A comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-101. N° 10, 1982, pág. 4090-4100.

[17] IEEE Committee Report. " Formulas for predicting Audible Noise from overhead high voltage AC and DC lines". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-100. N°1, 1981, pág. 121-130.

[18] Servicio de Evaluación ambiental. Sitio web <http://www.sea.gob.cl/> (consultado en Junio de 2011).

[19] Gary B. Johnson. "Degree of corona saturation for HVDC transmission lines". IEEE/PES Power Delivery. Vol 5, N° 2. April 1990. Pág. 695-707.

[20] Fernando Chavez y otros autores "Linhas de Transmissão de Corrente Continua. Avaliação de Campos Interferentes". SNPTEE Seminário Nacional de produção e transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, Brasil. 2007.

[21] P. Sarma Maruvada. "Corona Performance of High Voltage Transmission Lines". Research Studies Press. Inglaterra. 2000.

[22] Pablo Soto Sepúlveda. “Estudio de prefactibilidad técnica de un sistema de transmisión en corriente continua (HVDC), aplicado a la zona austral de Chile”. Trabajo de titulación. Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 1998.

[23] José A. Jardini, J. Felix Nolasco. “Impacts of HVDC line son the economics of HVDC Projects”. CIGRE JWG-B2.17/B4/C1.17. Junio 2008.

[24] GreenFacts. Hechos sobre la salud y el medio ambiente. Disponible en <http://www.greenfacts.org/es/campos-estaticos/index.htm> (consultado en Abril de 2011).

[25] World Health Organization. “Environmental Health Criteria 232. Static Fields”.2006.

[26] W. H. Bailey, D. E. Weil, K. R. Stewart. “HVDC Power transmission environmental issues review”. Abril 1997.

[27] L. A. Koshcheev. “Environmental Characteristics of HVDC overhead transmission lines”. Prepared for the Third Workshop on Power Grid Interconnection in Northeast Asia, Vladivostok, Russia, September 30 - October 3, 2003.

[28] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP. “Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields”. Abril, 2009.

[29] Decreto Supremo N° 146 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República. Establece norma de emisión de ruidos molestos

generados por fuentes fijas. Santiago, 24 de diciembre de 1997, Diario Oficial 17 de abril de 1998.

[30] IEEE Standard for the Measurement of Audible Noise From Overhead Transmission Lines. Std 656 – 1992.

[31] Manual de Aplicación. Norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas. D.S. N° 146/97 del ministerio secretaría general de la presidencia.

[32]<http://www.sinia.cl/1292/w3-propertyvalue-15491.html>. SINIA: Sistema nacional de información ambiental. Consultado en enero 2012.

[33] IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities. Std 1227-1990.

[34] Comisión Nacional de Energía
http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/energia/Electricidad.html
Documento: Capacidad instalada por sistema eléctrico nacional 2010 (consultado en Junio de 2011).

[35] <http://centralenergia.cl/2010/09/17/futuro-de-la-generacion-energetica-una-mirada-realista/> (consultado en Junio de 2011).

[36] Héctor Miranda Campos. “Determinación de los efectos ambientales generados por la operación de una línea aérea en HVDC”. Trabajo de titulación. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 2008.

[37] Daniela Briceño. “Propuesta de guía para la evaluación del impacto acústico generado por líneas de transmisión eléctricas de alta tensión alterna, en el marco del SEIA” (Anexo D: Estudio de proyectos de líneas de transmisión de alto voltaje, o que las contemplen, sometidos al SEIA). Trabajo de titulación. Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ciencias. Departamento de Física. 2011.

[38] ABB. “Transmisión de ultra alta tensión: Escenarios alternativos para la transmisión masiva de energía eléctrica de 800 kV HVDC y 1000 kV HVAC a largas distancias”. 2007.

[39] Gomes de Andrade, V. H. y otros autores. “Parte do Relatório: Medições de Corona, campos e íons na linha de ± 600 kV de Itaipú. Relatório técnico DIE-44807/04”. Projeto 1164, CEPEL, Brasil, 2004.

[40] IEEE Committee Report. “Corona performance of a conductor bundle for bipolar HVDC transmission at ± 750 kV”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-96. N° 10, 1Noviembre – Diciembre 1977. Pág. 1872-1881.

[41] Ley 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

[42] D.S. N° 95/2001 “Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental”.

EXPOSICIÓN A CAMPOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS ESTÁTICOS Y AL RUIDO AUDIBLE.

A.1. Exposición a campos eléctricos y magnéticos estáticos.

El ambiente electromagnético generado por las líneas áreas de alta tensión en corriente continua se diferencia del generado por la corriente alterna en que genera campos estáticos, es decir, no varían con el tiempo. Además, por la frecuencia a la que se diseña una línea de transmisión (50-60 Hz para CA y 0 Hz para CC), la radiación generada es no ionizante, por lo que no genera ningún peligro para la población. Por tal motivo, estos tipos de campos no son capaces de inducir corrientes ni voltajes sobre las personas.

A.1.1. Campo eléctrico estático.

Los campos eléctricos estáticos se producen de forma natural en la atmósfera, especialmente bajo las nubes de tormenta, y pueden provocar la caída de rayos. Un ejemplo de esto es la fricción producida al caminar sobre una alfombra, la que puede generar intensos campos eléctricos estáticos y provocar chispas. Otros ejemplos son el uso de CC en ciertos sistemas ferroviarios, televisores y pantallas de computador, los que pueden generar también campos eléctricos estáticos. Estos campos no son capaces de penetrar en las personas, sin embargo, provocan una carga eléctrica en la superficie del cuerpo que

puede producir movimiento en el vello corporal o descargas de chispas como las que aparecen al tocar el pomo de la puerta después de haber andado sobre una alfombra.

Estudios realizados en animales indican que además de los efectos citados en el párrafo anterior, no se producirán efectos de gran importancia en los seres humanos [24].

La Organización Mundial de la Salud, en su reporte de campos estáticos, indica que *“no existen estudios sobre exposición a campos electrostáticos de los cuales se obtengan alguna conclusión sobre los efectos crónicos o retardados. La IARC (IARC 2002) notó que existía una evidencia insuficiente para determinar la carcinogenicidad de campos electrostáticos. Pocos estudios de los efectos agudos del campo eléctrico estático han sido realizados. En general, los resultados sugieren que el único efecto agudo adverso a la salud está asociado con la percepción directa de los campos y las molestias de los microshocks”*.

Además agrega, *“parece haber poco de beneficio de continuar la investigación relacionada con los efectos a la salud concernientes a los campos electrostáticos. Ninguno de los estudios realizados hasta la fecha sugiere algún efecto adverso a la salud, excepto al posible estrés resultante de la prolongada exposición a los microshocks. Por consiguiente no existen recomendaciones de mayor investigación concerniente a los efectos biológicos de exposición a campos electrostáticos. Además, solamente existe oportunidad limitada para exposición significativa a estos campos en el lugar de trabajo o el ambiente en el que vivimos y por consiguiente no garantiza ningún estudio epidemiológico”* [25].

A.1.1.1. Campo eléctrico estático en líneas de ATCC.

Los campos eléctricos estáticos son producidos por cargas eléctricas. La distribución de cargas en la atmósfera produce naturalmente un campo eléctrico entre 120 y 150 V/m, bajo condiciones atmosféricas normales. En condiciones de tormenta, puede ser medido un campo estático de miles de volts/m [26].

Es sabido que los campos eléctricos producidos por una línea de transmisión de ATCC son la combinación del campo electrostático creado debido al voltaje de línea y el campo de carga espacial producto de la carga producida por el efecto corona de la línea. Esto quiere decir que la presencia de una carga entre los conductores y la tierra tiene un impacto sobre el campo total eléctrico producido por la línea de corriente continua.

Una parte importante de las investigaciones de la influencia del campo eléctrico generado por las líneas de ATCC fue realizado usando la sección experimental de líneas de transmisión de NIIPT (the High Voltage Direct Current Power Transmission Research Institute for pulse technology, St. Petesburgo, Rusia). Estas investigaciones mostraron que bajo una línea de transmisión de ATCC la incomodidad percibida por las personas es menor que la sentida bajo líneas de transmisión de ATCA. Esta "incomodidad" incluye descargas de chispas de las personas a arbustos, hierba y otro tipo de vegetación. Estas descargas, sin embargo, son bastante poco frecuentes en contraste con las descargas causadas por campos eléctricos de líneas de transmisión de ATCA.

Los resultados de investigaciones realizadas por IREQ (Institut de Recherche d'Hydro-Québec, Quebec, Canada) y por EPRI (the Electric Power Research Institute, California, USA), han mostrado que con una descarga sola el nivel

perceptible para las personas es de $3 \mu A$ y con una descarga repetida el nivel perceptible es de aproximadamente $0.3 \mu A$.

Usando la sección experimental de líneas de transmisión en NIIPT, se realizaron mediciones de la corriente iónica que corre por una persona que está de pie bajo una línea de ATCC en el nivel de voltaje de ± 1000 kV, y de la corriente capacitiva bajo una línea ATCA en un voltaje de 1150 kV. Estos experimentos indicaron que la diferencia en la sensación de las personas era de aproximadamente $2-3 \mu A$ para la línea de ATCC, contra $0.2 mA$ para la línea ATCA. Además, la sensación percibida por una persona que está de pie bajo una línea aérea de ATCC por lo general no irá más allá del estímulo electrostático de movimiento de pelo sobre la cabeza.

Un estudio realizado en Canadá, en el que los voluntarios fueron expuestos a los campos de corriente continua de hasta 50 kV/m y de densidad de corriente iónica de hasta $120 nA/m^2$, tenía como objetivo evaluar la capacidad de las personas de descubrir la presencia de estas condiciones de campo. El umbral medio de detección era 45 kV/m. La alta densidad de corriente iónica fue asociada con una bajada sustancial de umbrales sensoriales en la mayoría de observadores.

Además, el hecho empírico de que grandes máquinas con neumáticos de goma (como cosechadoras y autos) no son cargadas eléctricamente a niveles peligrosos para un ser humano cuando están bajo las líneas aéreas de ATCC, debería ser considerado como un resultado significativo de la investigación. La resistencia eléctrica en los neumáticos de estas máquinas (aproximadamente 10 MOhm) resulta ser suficiente para prevenir la acumulación de cargas peligrosas, incluso cuando la máquina está sobre el asfalto seco. En el caso de

líneas aéreas de ATCA, las corrientes capacitivas inducidas sobre grandes máquinas pueden llegar a ser mortales [27].

Estos resultados sugieren que los campos eléctricos bajo las líneas de transmisión de ATCC no son suficientemente peligrosos para hacer necesario medidas de seguridad “significativas”. Aunque se debe ser cuidadoso, porque el nivel de carga espacial de líneas de ATCC es cambiante y difícil de predecir, ya que es resultado de la actividad corona y depende, entre otros factores, de las condiciones meteorológicas existentes.

A.1.2. Campo magnético estático.

Un campo magnético estático es un campo de fuerza producido por un imán o por un flujo constante de electricidad, como por ejemplo el campo producido por aparatos o sistemas que funcionan con corriente continua. En este caso, a diferencia de los campos electrostáticos, sí podrían producirse efectos sobre las personas, ya que los campos magnéticos estáticos podrían interactuar con el cuerpo en diferentes formas, tales como:

- Generar campos eléctricos y corrientes alrededor del corazón, así como dificultar ligeramente la circulación de la sangre.
- Tener efectos sobre implantes metálicos, y eventualmente sobre moléculas biológicas y estructuras celulares del cuerpo.
- Interferir eventualmente en determinadas reacciones químicas del cuerpo.

Estudios han demostrado que desplazarse dentro de un campo magnético estático de gran intensidad puede provocar sensación de vértigo y náusea, y en algunos casos un gusto metálico en la boca y la percepción de destellos de luz.

Junto con esto, se han estudiado otros efectos sobre la salud, como por ejemplo los efectos sobre el cerebro, la presión sanguínea y la temperatura corporal, así también, como los posibles efectos terapéuticos. Sin embargo, no hay pruebas de ningún efecto significativo, aunque tampoco es posible descartar su existencia [24].

A.1.2.1. Campo magnético estático en líneas de ATCC.

Estudios in vitro realizados en animales y humanos, junto con estudios epidemiológicos, han permitido examinar los posibles efectos sobre la salud de campos magnéticos estáticos. Esto fue resumido en una revisión realizada por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006), cuya investigación sugiere que los campos magnéticos estáticos del orden del campo geomagnético de la Tierra y líneas de transmisión de CC son demasiado bajos para producir cualquier respuesta biológica, por lo que los estudios han sido enfocados a los posibles efectos sobre la salud que genera la exposición a campos magnéticos estáticos muy intensos, incluyendo efectos conductuales, fisiológicos y reproductivos.

El Comité Internacional contra la Protección de la radiación no ionizante (ICNIRP, 1994), concluye lo siguiente [14]:

“El conocimiento científico actual no sugiere ningún efecto perjudicial sobre los principales parámetros del desarrollo, conductuales y fisiológicos, en organismos superiores para la exposición transitoria a una densidad de flujo magnético estático de hasta 2 T (20,000 G)”.

Sin embargo, el ICNIRP recomienda tener una especial consideración en personas con marcapasos cardíacos e implantes ferromagnéticos, que se

expongan a altos campos magnéticos. No obstante, los campos magnéticos generados por las líneas de CC se encuentran por debajo de los valores de preocupación.

A.2. Exposición a corriente CC interceptada por las personas.

Otro fenómeno asociado a las líneas de transmisión de ATCC es la corriente eléctrica que podría fluir por el cuerpo de las personas producto de la densidad de corriente iónica generada. Aunque estos valores son bajos, se han establecido límites para la tolerancia a la corriente eléctrica de las personas.

Aunque los campos e iones emitidos por una línea CC, no producen un riesgo importante sobre la salud de las personas, si pueden producir algunas molestias, como por ejemplo la estimulación del pelo y la piel, provocando una sensación de “hormigueo” [2].

En la tabla A.1 se muestran los valores de la tolerancia de las personas a la corriente eléctrica [36]:

	Corriente continua (mA)	
	Hombres	Mujeres
Corriente CC de intercepción	0,0025	----
Sin sensación en la mano	1,0	0,6
Nivel de percepción	5,2	3,5
Inconfortable, sin pérdida de control muscular	9	6
Pérdida de control muscular 99,5%	62	41

Tabla A.1. Niveles de tolerancia de la corriente eléctrica de las personas.

Como información adicional a los objetivos planteados en el presente trabajo de titulación, a continuación se indica un método para calcular la corriente que intercepta a una persona bajo las cercanías de la línea de CC, producto de la emanación de cargas desde los conductores, se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{CC} = J * S$$

Donde;

I_{CC} es la corriente que intercepta la persona .

J es la densidad de corriente iónica.

S es la superficie equivalente de la persona.

Para el cálculo de la altura equivalente se utilizará la figura A.1:

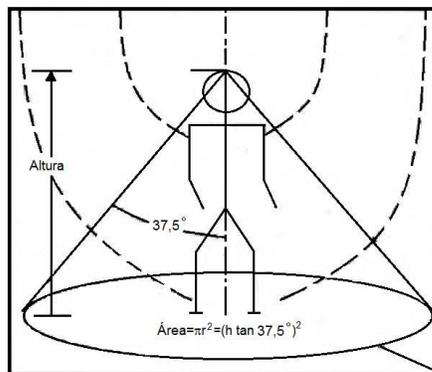


Figura A.1. Esquema para el cálculo de la altura equivalente.

La expresión matemática para el cálculo de la altura equivalente es:

$$S = 1,85 * h^2 \tag{5.2}$$

Donde;

h es la altura de la persona.

Con lo anterior es posible obtener el valor de la corriente interceptada por las personas y compararla así con los valores de tolerancia de las personas indicados en la tabla A.1.

A.3. Exposición al ruido audible.

Se puede definir el ruido como cualquier sonido no deseado o aquel calificado como desagradable o molesto por quien lo percibe. Así, el ruido ambiental se conforma por diferentes fuentes, tales como: vehículos, industrias, bocinas, gritos, música, etc. Estos ruidos pueden provocar efectos acumulativos adversos, como daño auditivo, estrés, pérdida de la concentración, interferencia con el sueño, entre otros. Así, la contaminación acústica se puede definir como la interferencia que el ruido provoca en las actividades que realizamos. [32].

Organizaciones internacionales, han indicado que se corre el riesgo de una disminución importante en la capacidad auditiva, así como la posibilidad de trastornos que van desde lo psicológico hasta lo fisiológico por la excesiva exposición a la contaminación acústica.

A.3.1. Mecanismo fisiológico de la audición

El oído consta de tres partes: el oído externo, el oído medio y el oído interno. En la figura A.2 se observa un esquema del oído humano:

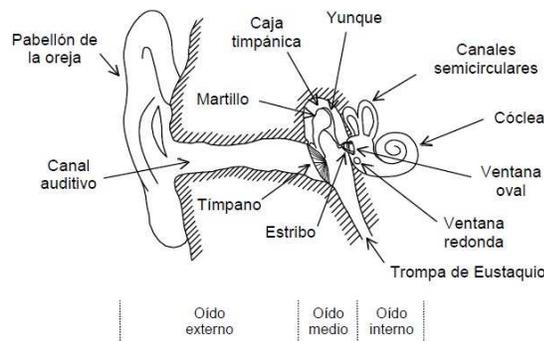


Figura A.2. Esquema de las partes que conforman el oído.

El oído externo, está compuesto por el pabellón de la oreja y el canal auditivo. El pabellón de la oreja, es pequeño comparado con las longitudes de onda del sonido, por lo que presenta un efecto direccional leve [13]. La función del oído externo es recepcionar y canalizar la onda incidente hasta el tímpano, membrana que está unida a tres huesecillos; martillo, yunque y estribo, que en conjunto conforman el oído medio. Es importante mencionar que el oído está comunicado con la cavidad bucal a través de la trompa de Eustaquio, conducto que permite igualar la presión que actúa sobre el tímpano en caso necesario, por ejemplo, un avión. Estos huesecillos actúan como un acoplador de impedancia entre el oído externo y el oído interno, esta adaptación es necesaria pues cuando a través de los huesecillos la onda incidente llega al oído interno, vía la ventana oral, tendrá que propagarse en un medio líquido. Además tienen la función de proteger de daños al oído interno. Es así como en presencia de niveles peligrosos de ruido los huesecillos se desvían lateralmente.

Finalmente, se encuentra el oído interno conformado por la ventana oval y la cóclea. Al vibrar la ventana oval por acción de los huesecillos, hace que la onda de sonido se propague a través del fluido que contiene la cóclea, ésta se encuentra dividida en dos partes por la membrana basilar, donde se encuentran distribuidos los sensores de sonido, los que a su vez están conectados a los

terminales nerviosos, estos sensores son capaces de discriminar las diferentes frecuencias que conforman la onda.

A.3.2. Efectos del ruido sobre la salud

Los efectos provocados por el ruido sobre la salud de las personas pueden dividirse en aquellos efectos auditivos y no auditivos; los que se describen a continuación:

- **Efectos auditivos:**

Cuando una persona se expone prolongadamente a un nivel de ruido excesivo, nota un silbido en el oído, ésta es una señal de alarma. Inicialmente, los daños producidos por una exposición prolongada no son permanentes, y desaparecen posteriores a los 10 días. Sin embargo, si la exposición a la fuente de ruido no cesa, las lesiones serán definitivas y la sordera irá creciendo hasta que se pierda totalmente la audición.

En lo que tiene relación con los objetivos planteados en el presente trabajo, se explican a continuación los efectos producidos por el ruido ambiental:

Alteraciones debidas al ruido ambiental. Si bien la exposición a este tipo de ruido no genera algún tipo de sordera grave, sí provoca otros efectos, tales como: debilidad auditiva y sensación de agotamiento no acorde con la actividad realizada. Además, durante los períodos nocturnos se producen molestias con relación al descanso de las personas, impidiendo así, entre otras cosas, la recuperación del oído durante el sueño. Sin

embargo, producto de una exposición prolongada a altos niveles de ruido puede producirse un déficit auditivo denominado *Socioacusia* [13].

- **Efectos no auditivos**

La contaminación acústica, además de afectar al oído puede provocar efectos psicológicos negativos y otros efectos fisiológicos, aunque dependerá de cada persona la forma en que afecte el comportamiento y la salud mental y física. Al parecer el estrés generado por el ruido se modula en función de cada individuo y de cada situación. Entre los efectos psicológicos que produce el ruido se encuentran:

Efectos fisiológicos: El ruido afecta fundamentalmente a:

- Sistema nervioso central.
- Sistema nervioso vegetativo.
- Funciones vitales y sistemas: cardiovascular, endocrino, respiratorio, digestivo, entre otros.

Efectos psicológicos: Entre estos se destacan:

- *Efectos sobre el sueño.* Dificultades para conciliar y continuar el sueño. Esta actividad ocupa un tercio de nuestras vidas y nos permite descansar, ordenar y proyectar nuestro consciente.
- *Efectos sobre la conducta.* Produce alteraciones momentáneas en la conducta, las que consisten en agresividad o mostrar un individuo con un mayor grado de desinterés o irritabilidad. Se

producen a consecuencia de un ruido que provoca inquietud, inseguridad o miedo en algunos casos. Estos efectos generalmente son pasajeros

- *Efectos en la memoria y la atención.* El ruido hace que la articulación en una tarea de repaso sea más lenta, especialmente cuando se tratan palabras desconocidas o de mayor longitud, es decir, en condiciones de ruido, el individuo se desgasta psicológicamente para mantener su nivel de rendimiento. En el caso de la atención, el ruido provoca que ésta no se localice en una actividad específica.
- *Efectos sobre los niños.* El ruido repercute negativamente sobre el aprendizaje y la salud de los niños. Cuando los niños son educados en ambientes ruidosos, éstos pierden su capacidad de atender señales acústicas, sufren perturbaciones en su capacidad de escuchar, así como un retraso en el aprendizaje de la lectura y la comunicación verbal. Todos estos factores favorecen el aislamiento del niño, haciéndolo poco sociable.

MEDICIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LÍNEAS DE CORRIENTE CONTINUA

La medida del campo eléctrico es un parámetro de gran importancia para la evaluación de las líneas de ATCC, para resguardar así la salud de las personas.

Un documento que entrega una guía para las medidas del campo eléctrico, densidad de corriente iónica y otros parámetros electromagnéticos, es el desarrollado por el IEEE, IEEE Std 1227-1990, titulado “IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities” [33]. En este documento se:

- Definen los términos que son usados.
- Describe la relación entre los parámetros eléctricos.
- Describen los principios de operación de los instrumentos.
- Sugieren métodos de calibración de los instrumentos.
- Describen los procedimientos de medida.
- Identifican fuentes probables de medidas erróneas.

B.1 Mediciones de campo eléctrico en líneas ATCC

A diferencia de lo que ocurre en las líneas de ATCA, las condiciones meteorológicas influyen de manera importante en la medición del campo

eléctrico, por lo que junto con registrarse los valores del campo, deben registrarse las condiciones meteorológicas existentes al momento de la medición. Producto de lo anterior, y porque los períodos de medición recomendables van desde varios días hasta varios meses, es recomendable que los resultados de las mediciones se expresen en términos de los valores estadísticos (percentiles).

Otra diferencia de las mediciones en CC con respecto a CA, es que en esta última las mediciones se realizan a un metro sobre el nivel del suelo, y en el caso de las líneas de ATCC sólo se registra una medición sobre el nivel del suelo, ya que producto de las cargas espaciales existentes, las mediciones en este punto se complican. Por lo anterior, es que la mayoría de las mediciones se registran a niveles del suelo.

Es recomendable que las mediciones se realicen en el medio del vano, ya que en este punto se registra la altura mínima que existe entre la línea y el suelo.

B.2 Instrumentación para la medición de los campos eléctricos.

Se consideran principalmente dos tipos de medidores de campo eléctrico: tipo molino (field mills) y el medidor de campo eléctrico tipo placa vibratoria (vibrating plate electric-field meters). Ambos dispositivos determinan la intensidad de campo eléctrico mediante la medición modulada, capacitivamente induciendo cargas o corrientes, que son censadas por electrodos metálicos.

En este anexo se presentarán los medidores tipo molino, ya que son los que cuentan con mayor estudio en la literatura técnica, y son de igual forma adecuados para la medición del campo eléctrico.

B.2.1 Medidor tipo molino.

En la literatura técnica se describen dos tipos del medidor tipo molino, uno con obturador y otro con forma de cilindro. El más común es el tipo obturador, cuyo funcionamiento consiste en que el electrodo es expuesto y protegido periódicamente del campo eléctrico por el obturador rotador. Este tipo de medidor es usualmente operado con el obturador cercano al nivel del suelo. En la figura B.1, se muestra un esquema del medidor tipo molino con obturador:

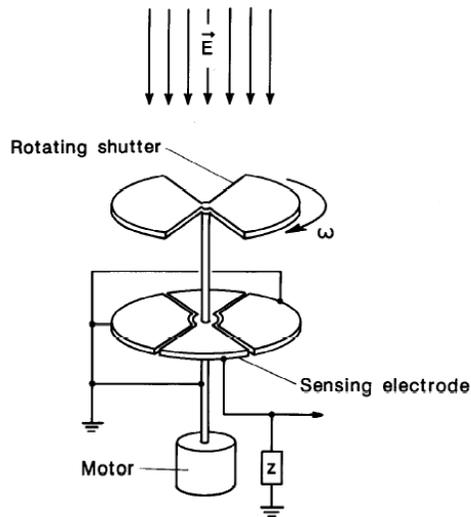


Figura B.1. Medidor tipo Molino.

En la figura B.2 se muestra el medidor de campo eléctrico portátil tipo molino junto a su sensor, el que fue utilizado en las mediciones de campo eléctrico bajo la línea bipolar Itaipu, en Brasil [2]:



Figura B.2. Medidor de campo eléctrico portátil tipo molino [39].

En el caso del medidor tipo cilindro, generalmente, las cargas son inducidas por el campo eléctrico sobre las dos mitades del cilindro de electrodos. Las cargas inducidas sobre los electrodos sensores varían periódicamente con la rotación de los electrodos sensores respecto al eje del cilindro con una frecuencia angular constante. Este tipo de medidor se muestra en la figura B.3:

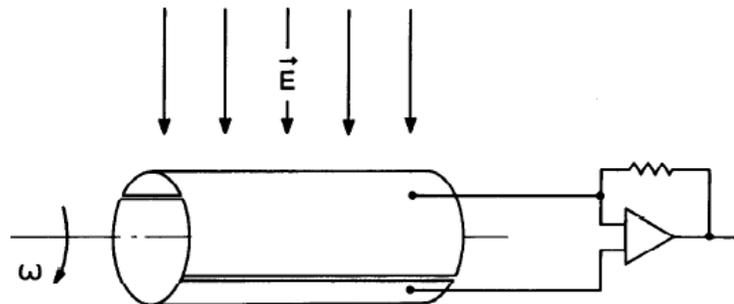


Figura B.3. Medidor tipo cilindro.

La ventaja principal que entrega este tipo de medidor es que las mediciones pueden realizarse sobre el nivel del suelo, aunque en este caso, se debe considerar que el campo eléctrico en la superficie del cilindro sensor, poseerá dos componentes, una debida al campo generado por la línea y otra debido a las cargas distribuidas simétricamente sobre el cilindro.

Para una correcta aplicación y elección del medidor de campo, se debe considerar consultar el documento IEEE Std 1227-1990, titulado “IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities”, en cual se señalan además, los métodos de calibración que se deben utilizar.

ANEXO C

FICHA DE MEDICIÓN RUIDO ESTABLE

RUIDO ESTABLE

FICHA DE EVALUACIÓN DE NIVELES DE RUIDO POR LUGAR DE MEDICIÓN

IDENTIFICACIÓN DEL LUGAR DE MEDICIÓN:

