



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

REVISIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE CAMPOS
ELÉCTRICOS EN LÍNEAS HVDC

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

CARLOS FRANCISCO DUARTE CONTE

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES OSORIO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA
RAUL ÁLVAREZ LÓPEZ

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO DE 2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: CARLOS DUARTE CONTE
FECHA: 27/06/14
PROFESOR GUÍA: NELSON MORALES OSORIO

**“ REVISIÓN DE EQUIPOS Y PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE CAMPOS
ELÉCTRICOS EN LÍNEAS HVDC”**

La pronta llegada de los eventuales proyectos energéticos que se planifican en la XI región de Aysén ha planteado el desafío de transportar grandes bloques de potencia a través de largas distancias, hacia los centros de consumo que se concentran en el SIC. La tecnología que permite posibilitar esto de manera eficiente es la transmisión en corriente continua en alto voltaje, conocida como HVDC (High Voltage Direct Current). La tecnología HVDC se puede considerar como una tecnología madura. Sin embargo, en nuestro país es un tema relativamente nuevo que se debe abordar para entender el funcionamiento del enlace y los problemas asociados.

Esta memoria está dividida en tres partes principales, la primera, relacionada con la física del efecto corona, clasificación y características; por otra parte, la segunda, tiene como objetivo estudiar en forma teórica algunos de los mecanismos de medición de campo eléctrico generados por líneas de transmisión en corriente continua, los cuales requieren distintos tipos de consideraciones. En la tercera parte, se incluye una comparación de varios medidores y su puesta a prueba en las líneas HVDC bajo diferentes condiciones de carga y/o campos estáticos.

Utilizando un modelo afín para evaluar el comportamiento de los medidores bajo distintos escenarios, se determina cuáles de ellos presentan mejor estabilidad al realizar una o varias mediciones. Esto será muy importante a la hora de implementar o importar un equipo de medición de campo eléctrico utilizado en líneas HVDC.

A mi familia y a la infinita paciencia de Don Nelson quienes siempre me apoyaron. A mi hermana.

Agradecimientos

A mi familia en especial a mi Madre quien soportó mis buenos y malos días, a Pedro Villalobos (mi padre por opción). Al distante de mi Padre y su familia.

Gracias también al gran profesor Nelson Morales que con su dedicación, comprensión y paciencia, pude sacar esto adelante.

Además a mis inseparables amigos: Alejandro Osorio, Rodrigo Díaz (Compana), Emmanuel Vrigneaud, Guido, Poli, Juank y en especial a Joven Boris Moreno quienes gracias a ellos pude salir a flote y literalmente a aprender a caminar de nuevo.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	I
Índice General	II
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VII
1. Introducción	1
1.1. Alcance	1
1.1.1. Motivación del tema	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Estructura de la memoria	4
2. Sistemas de transmisión HVDC	5
2.1. Sistemas de transmisión HVDC	5
2.1.1. Introducción a los sistemas HVDC	5
2.1.2. Aplicaciones	7
2.1.3. Costes de las líneas HVDC	8
2.1.4. Configuración de un centro de transformación	9

2.1.5.	Topología de conexiones y redes en HVDC	10
2.1.6.	Tecnologías convertidoras	14
2.1.6.1.	Tecnologías LCC	14
2.1.6.2.	Tecnologías VSC	16
2.2.	Física del Efecto Corona	16
2.2.1.	Clasificación según la naturaleza de descarga corona	19
2.2.1.1.	Descarga Corona Negativa	19
2.2.1.2.	Descarga Positiva Corona	21
3.	Mecanismos de Medición de Campos Eléctricos	24
3.1.	Parámetros Eléctricos en las vecindades de las líneas HVDC	24
3.2.	Medición Directa de Campos Eléctricos Intensos	25
3.2.1.	Instrumentación y principios de operación	25
3.2.1.1.	Voltímetro Generador	26
3.2.1.2.	Método del plato vibrante	29
3.2.2.	Calibración de los Instrumentos	30
3.2.2.1.	Calibración para campos eléctricos sin carga espacial.	31
3.2.2.2.	Calibración para campos eléctricos con carga espacial.	36
3.2.3.	Mediciones	39
3.2.3.1.	Mediciones de campo eléctricos intensos en líneas de transmisión	39
3.2.3.2.	Mediciones en el interior.	43
3.2.3.3.	Mediciones sobre el plano de tierra en ausencia de carga espacial.	43
3.2.4.	Fuentes de Error	45
3.3.	Medición Indirecta de Campos Eléctricos Intensos (Medición de densidad de corriente)	48
3.3.1.	Instrumentación y Principios de Operación	48
3.3.2.	Calibración de la Instrumentación.	49
3.3.3.	Mediciones	51

3.3.3.1.	Mediciones de densidad de corriente en líneas	51
3.3.3.2.	Medidas de densidad de corriente.	53
3.3.4.	Fuentes de Error.	53
4.	Análisis y comparación de medidores	57
4.1.	Los instrumentos de campo eléctrico	58
4.2.	Resultados de pruebas de calibración [35]	64
4.3.	Resultados de pruebas en línea HVDC [35]	71
4.4.	Procedimiento	74
5.	Conclusiones	76
	Bibliografía	79
A.	Regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados	84

Índice de Figuras

2.1. Comparación de los costos de inversión entre los sistemas HVDC y HVAC en función de la distancia de la línea aérea de transmisión.	9
2.2. Enlace HVDC Monopolar	11
2.3. Enlace HVDC Bipolar.	11
2.4. Enlace HVDC Homopolar.	12
2.5. Enlace HVDC Punto a Punto.	13
2.6. Enlace HVDC Back to Back.	13
2.7. Enlace HVDC Multiterminal.	14
2.8. Esquema Tecnología LCC.	15
2.9. Esquema Tecnología VSC.	16
2.10. Esquemas de coronas positiva y negativa. En a) la corona es positiva; una avalancha de electrones se propaga en el campo eléctrico que aumenta en magnitud. En b) una corona negativa; un puñado de electrones se propagan hacia regiones con campo eléctrico débil en magnitud	20
3.1. Vista esquemática del voltímetro de aspa	27
3.2. Vista esquemática de un molino cilíndrico medidor de campo eléctrico.	29
3.3. Vista esquemática del método del plato vibrante	30
3.4. Curvas normalizadas de campo eléctrico versus distancia en la superficie del plato y entre platos.[40]	32
3.5. Esquema de medición de campo con carga espacial [20]	36

3.6.	Perfil lateral del campo eléctrico medidas a nivel de tierra en condiciones normales, niebla y lluvia[25].	40
3.7.	Vista esquemática de un plato de Wilson ubicado sobre el plano de tierra	48
3.8.	Vista esquemática de un circuito de inyección de corriente para calibrar un medidor usando un plato de Wilson	50
3.9.	Perfil lateral de la densidad de corriente medidas a nivel de tierra en condiciones normales, niebla y lluvia [12].	52
3.10.	Vista Esquemática de un plato de Wilson colocado sobre el plano de tierra	55
3.11.	Errores dados por los sensores de corriente ubicados sobre el plano de tierra.	56
4.1.	Cámara de ensayo utilizado para la calibración [35]	61
4.2.	Esquema utilizado para calibración [35]	62

Índice de Tablas

3.1. Intensidad de Campos Eléctricos Normalizados entre platos y en su superficie. [12]	33
4.1. Lista de Medidores A Analizar.	58
4.2. Medidas de Campo Eléctrico Con Campo Eléctrico Negativo Estático Nulo [35] . .	65
4.3. Medidas de Campo Eléctrico Con Campo Eléctrico Positivo Estático Nulo [35] . .	66
4.4. Medidas de Campo Eléctrico Negativo Estático igual a $10\text{ Kv}/m$ [35]	67
4.5. Medidas de Campo Eléctrico Positivo Estático igual a $10\text{ Kv}/m$ [35]	68
4.6. Correlaciones obtenidas en las distintas configuraciones	70
4.7. Valores de Campo Eléctrico en (kV/m) para líneas de HVDC en configuración monopolar.	72
4.8. Parámetros del modelo afín por medidor.	73

Capítulo 1

Introducción

1.1. Alcance

Esta memoria tiene como propuesta estudiar los mecanismos de medición de campo eléctrico (CE) en sistemas de transmisión en alta tensión en continua (HVDC).

El trabajo se basa en la revisión de la literatura concerniente a la física del denominado efecto Corona, y su repercusión en la estimación cualitativa y/o cuantitativa de CE, con la idea de aportar a las evaluaciones de los eventuales proyectos en HVDC en nuestro país.

En la actualidad, la transmisión de corriente continua (CC) es un tema vigente y a la vez controversial, dado que la tecnología no siempre es bien recibida en los proyectos en que se utiliza esta corriente continua.

1.1.1. Motivación del tema

Uno de los sectores primordiales en los sistemas de potencia sin lugar a dudas es el de la transmisión. Un punto muy importante en la tecnología HDVC es la medición de CE en terreno, pues la determinación teórica eventualmente tendría errores, provocados por la presencia del fenómeno corona en el entorno de los conductores energizados; para ello previamente es importante la elección del mecanismo a utilizar. El conocimiento de los campos generados en el entorno de una línea de transmisión es imprescindible para incluirlo en un Estudio de Impacto Ambiental.

La instrumentación existente en el país para la medición de CE no considera el caso CC, es relevante considerar que los fenómenos electromagnéticos en corriente alterna (CA) difieren sustancialmente a los encontrados en CC en alta tensión.

Actualmente en el país existen dos proyectos de generación en HVDC para la transmisión de potencia al Sistema Interconectado Central (SIC) desde la región de Aysén. En el ámbito internacional como es bien sabido, existen proyectos emblemáticos en HVDC tal como la línea de 900 km. en Shangai (China) del 2007 que entrega una potencia de 3000 MW con una tensión de ± 500 kV o el de Gotland (Suecia) en 1999. Actualmente en China existen sistemas de ± 800 kV y

6400 MW En Sudamérica existen líneas en Brasil, en Itaipú, Río Madeira 6600 MW y 600 KV (en construcción final), Belo Monte 8800 MW y 800 KV (en construcción) y otros en otros países.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Los objetivos generales de este trabajo son los siguientes:

- Determinar el mecanismo y principio de medición óptimo de campo eléctrico para estudio de líneas existentes HVDC.

1.2.2. Objetivos específicos

Se fijan también objetivos específicos que son los siguientes:

- Revisión bibliográfica del fenómeno Corona.

- Estudio de los mecanismos y principios de funcionamiento de los instrumentos de medición de campo eléctrico en HVDC.
- Contraste de los diferentes mecanismos de funcionamiento y proposición de un método de medición.

1.3. Estructura de la memoria

La siguiente memoria se divide en 5 capítulos. En el capítulo 1 se da una introducción al tema explicando las motivaciones y objetivos dados en el trabajo. En el capítulo 2 se explican las principales características de los sistemas de transmisión en HVDC, la física del efecto corona y una introducción a la física de los mecanismos de medición de CEM en HVDC. En el capítulo 3 se verá un estudio (cualitativo y/o cuantitativo) acabado de los mecanismos de medición, sus ventajas y desventajas. En el 4º capítulo se analizará la información disponible en la literatura pertinente (teórico y/o práctico) y una posible elección de un medidor comercial. En el capítulo final se concluirá los resultados obtenidos en la parte anterior, resumiendo las razones de la elección del instrumento de medida y finalmente se establecerán los posibles trabajos a futuro.

Capítulo 2

Sistemas de transmisión HVDC

2.1. Sistemas de transmisión HVDC

2.1.1. Introducción a los sistemas HVDC

Los comienzos de la electricidad se encuentran en los sistemas de corriente continua (CC), pero la facilidad de transformación y transporte de la corriente alterna (CA) fomentó su uso e instalación a gran escala, dejando a un lado el uso de la corriente continua a sectores minoritarios.

En la segunda mitad del siglo XX, la investigación con semiconductores generó el desarrollo de la electrónica de potencia y con ello la posibilidad de convertir la corriente alterna en continua y viceversa con dispositivos sin partes móviles y altos rendimientos. La principal dificultad que tenían los primeros dispositivos era las bajas potencias capaces de procesar, alrededor de 30 [MW], y el elevado precio que poseían. Por esta razón se comenzó a utilizar esta tecnología en aquellos lugares en los que presentaba ventajas que no se podían conseguir con otras tecnologías como la transmisión de potencia a largas distancias o la interconexión de sistemas eléctricos vecinos que funcionan a distintas frecuencias.

Esta tecnología es conocida como HVDC (High-Voltage Direct Current), en castellano, alta tensión en corriente continua. Su evolución ha permitido aumentar las potencias a tratar; al día de hoy, hay operativas líneas de transmisión con potencias del orden de los 6000 MW y ± 800 kV en China e India.

Las principales ventajas de los sistemas HVDC incluyen [1]:

1. Mínimas pérdidas en líneas de transporte.
2. Posibilidad del control total de potencia activa
3. Corredor de paso menor en líneas en corriente continua comparado con la misma potencia en corriente alterna.
4. Menor magnitud del efecto corona.
5. Eliminación de las pérdidas por capacidad entre conductores.
6. Agregar capacidad de transmisión de potencia en ambos polos.

Por otra parte posee las siguientes desventajas:

1. Alto coste de los equipos de conversión.
2. Imposibilidad del uso de transformadores para variar la tensión.
3. Generación de armónicos en el lado de corriente alterna, a la hora de la conversión.
4. En algunos casos, la obligación de tener un generador de reactivos para compensaciones.
5. Requerimiento de controles complejos.
6. Imposibilidad de conexiones intermedias.

2.1.2. Aplicaciones

Las aplicaciones más usuales de los sistemas de corriente continua ocurren donde el uso de corriente alterna no es técnicamente y/ó económicamente viable. Dentro de las aplicaciones principales son: [2]

1. Líneas de transporte de potencia a largas distancias. A partir de una cierta distancia, situada entre 400 y 700 km, las pérdidas por corrientes parásitas y el coste de una línea de corriente alterna superan a los de una línea de corriente continua, por eso se utilizan instalaciones HVDC.

2. Transmisión de potencia en entornos marinos o subterráneos. En corriente alterna las pérdidas de las líneas subterráneas o marinas son considerables debido a la capacitancia de los conductores. Para eliminar este tipo de pérdidas se utilizan sistemas que trabajen en corriente continua, cabe mencionar la limitación en Km. para la corriente alterna en enlaces submarinos (menor a 60 km.).
3. Conexión de sistemas eléctricos asíncronos. En distintas zonas del mundo, las redes eléctricas colindantes trabajan a distinta frecuencia; para poder unirlos se utilizan estaciones convertidoras, que mediante convertidores modulan la tensión y la corriente a la frecuencia deseada. Esta configuración es conocida como back-to-back.
4. Estabilización del sistema eléctrico. En grandes sistemas eléctricos, el flujo puede verse inestable bajo ciertas condiciones transitorias, para facilitar el control de estas situaciones se instalan enlaces en corriente continua que permiten un rápido control de la potencia.

2.1.3. Costes de las líneas HVDC

Uno de los temas en los que más se ha estudiado es el coste de las instalaciones en corriente continua, son las líneas de transmisión de potencia. En este caso, debido al alto coste inicial de las instalaciones, solo es viable en proyectos donde la distancia sea larga o las pérdidas sean considerables.

Según varios estudios, a partir de un punto situado entre 400 y 700 km (dependiendo de las condiciones), en las instalaciones aéreas el coste de las líneas de CC es menor que las líneas de CA. En gran parte se debe a la eliminación de las pérdidas por reactancias que existen a lo largo del

trazado. También colabora el hecho de la eliminación de como mínimo un conductor y la reducción de la superficie de la franja de servidumbre, que hace el coste marginal por unidad de longitud de las líneas en CC menor que en las líneas de CA. Para ello véase la figura 2.1. Cabe agregar que aunque el costo de las líneas CC es menor que las líneas de CA, debe considerarse la longitud de manera que la diferencia de costo compense el costo de las estaciones convertidoras y los electrodos de tierra o retorno metálico.

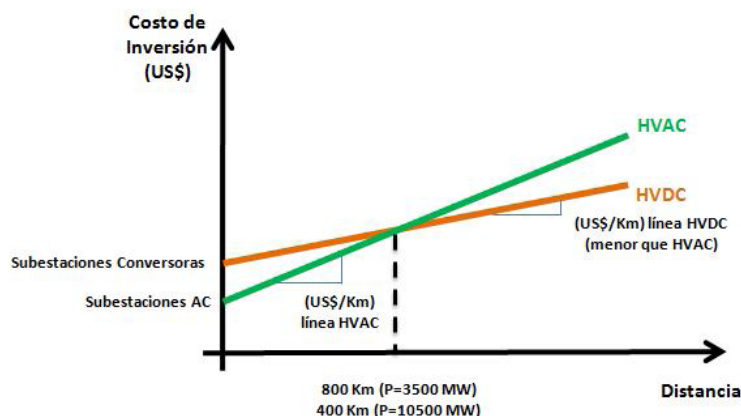


Figura 2.1: Comparación de los costos de inversión entre los sistemas HVDC y HVAC en función de la distancia de la línea aérea de transmisión.

2.1.4. Configuración de un centro de transformación

Como la corriente alterna y la corriente continua son de distinta naturaleza se requiere del uso de dispositivos que permita pasar de un tipo de corriente al otro; estos dispositivos son conocidos como convertidores.

Los convertidores que permiten el paso CA/CC son conocidos como rectificadores, los que permiten el paso CC/CA son conocidos como inversores. Las instalaciones donde se encuentran estos dispositivos se denominan estaciones convertidoras. Aparte de los convertidores encontramos otros elementos necesarios para un correcto funcionamiento como los filtros o el transformador de conversión [2].

Los convertidores no pueden ser conectados directamente entre las dos redes ya que su uso genera una gran cantidad de armónicos. Por esta razón se tienen que instalar filtros en las redes de AC y DC.

Además se requiere de un transformador para adecuar el voltaje de la red a los niveles requeridos para el buen funcionamiento del convertidor. Asimismo, proporciona aislamiento galvánico entre la red y el convertidor.

2.1.5. Topología de conexiones y redes en HVDC

Similarmente a los sistemas trifásicos de corriente alterna, en corriente continua se pueden distinguir diferentes tipos de conexiones entre dispositivos de una red. Estos pueden ser a uno o dos polos [3].

1. Monopolar: consiste en la utilización de un único polo para transmitir potencia entre

una estación de conversión y otra, realizando el retorno mediante los electrodos de las subestaciones conectados a tierra. Por otra parte, esta conexión supone un ahorro en el enlace pero se tiene que tener presente que no siempre es recomendable su uso, sobre todo cuando las pérdidas por la tierra son elevadas o no se puede instalar por razones medioambientales. En estos casos se puede instalar un retorno metálico.

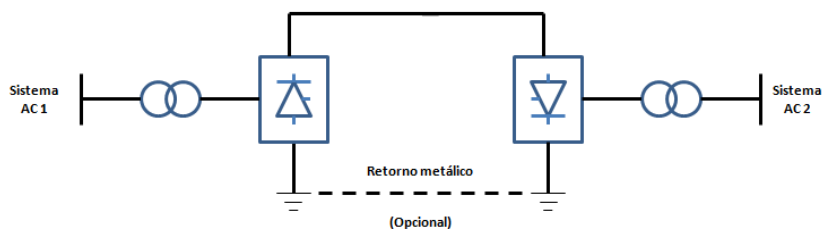


Figura 2.2: Enlace HVDC Monopolar

2. Bipolar: consiste en el uso de dos polos, uno trabajando con polaridad positiva y otro con polaridad negativa transmitiendo la misma potencia simultáneamente. El uso de esta conexión permite que en condiciones normales de operación la corriente de retorno sea casi cero con los sistemas de control actual de las convertidoras, debido a la primera ley de Kirchhoff de corrientes. En el caso en que una línea entre en falla o tenga programadas operaciones de mantenimiento, la otra se puede operar como una línea monopolar con retorno por la tierra o retorno metálico.

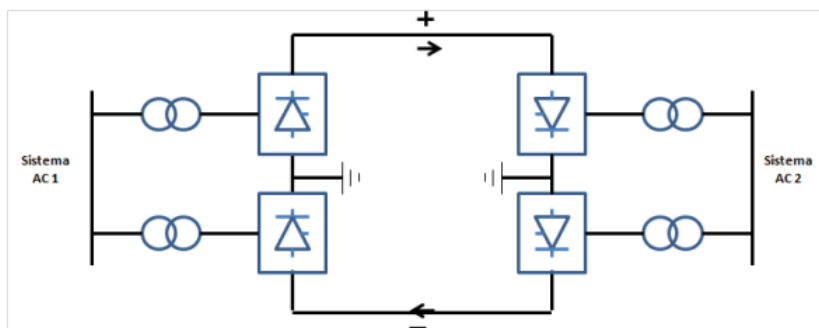


Figura 2.3: Enlace HVDC Bipolar.

3. Homopolar: este tipo de enlace consiste en la operación de dos polos 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. De forma análoga a los sistemas de corriente alterna en HVDC existen unas estructuras de red básicas. Estas configuraciones vienen fijadas por el uso y aplicaciones que hasta hoy han tenido las redes en corriente continua.

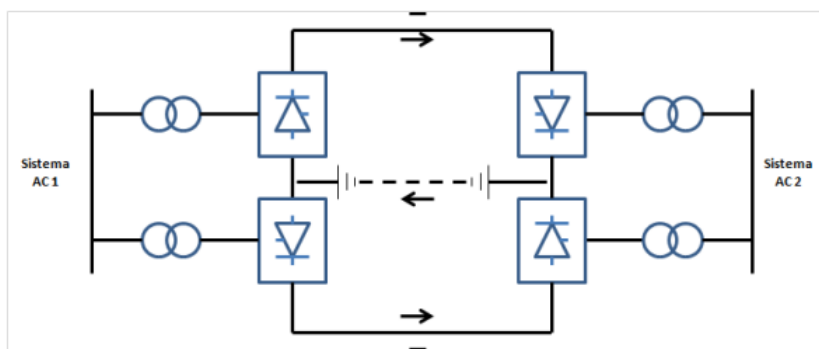


Figura 2.4: Enlace HVDC Homopolar.

De forma análoga a los sistemas de corriente alterna en HVDC existen unas estructuras de red básicas. Estas configuraciones vienen fijadas por el uso y aplicaciones que hasta hoy han tenido las redes en corriente continua.

1. Punto a punto: es la tipología más utilizada para conectar dos puntos lejanos mediante una línea de corriente continua. Esta instalación consiste en dos estaciones convertidoras conectadas mediante una línea de transmisión. Debido a las aplicaciones de la tecnología hasta el día de hoy, es la configuración más extendida hasta el momento.

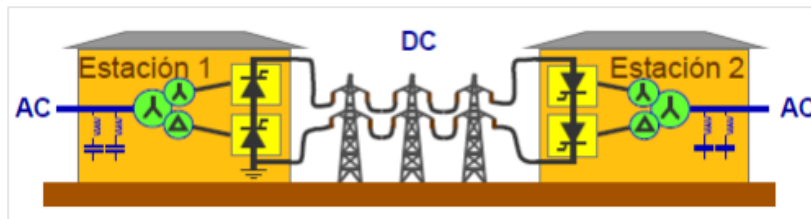


Figura 2.5: Enlace HVDC Punto a Punto.

2. Back-to-back: es la conexión utilizada para conectar dos sistemas asíncronos. La instalación consiste en la interconexión de dos convertidores situados en la misma estación convertidora, uno para cada sistema eléctrico. La interconexión se realiza mediante un enlace en corriente continua, sin la necesidad de una línea de transmisión.

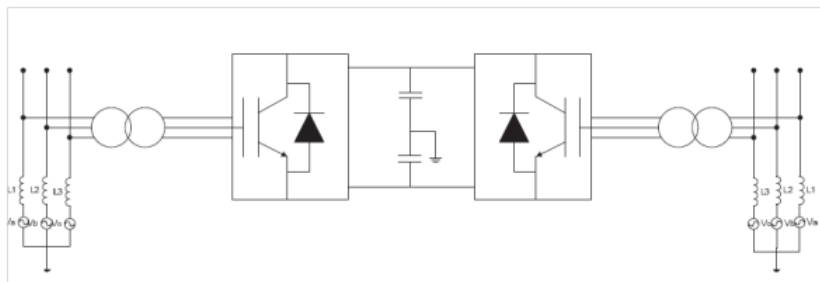


Figura 2.6: Enlace HVDC Back to Back.

3. Multiterminal: consiste en la conexión de más de tres conversores separados. Este tipo de configuración presenta las bases para crear el concepto de bus de transmisión en corriente continua. Existen dos tipos de conexiones multiterminales, una conocida como paralelo, la otra como serie, además pueden existir conexiones híbridas combinando serie y paralelo.

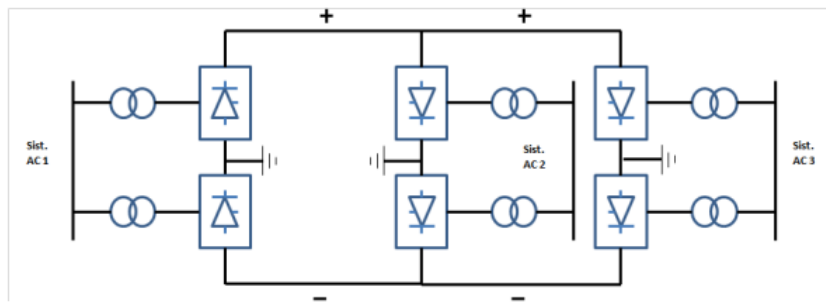


Figura 2.7: Enlace HVDC Multiterminal.

2.1.6. Tecnologías convertidoras

Desde los inicios de la tecnología HVDC el diseño de los convertidores se ha basado en el uso de los tiristores, dando lugar a la tecnología LCC (Line Commutated Converter), que solamente permite el control de la potencia activa. Pero gracias al desarrollo de equipos de potencia con transistores de capacidad de conmutación forzada, se ha desarrollado la tecnología VSC (Voltage Source Converter) que permite el control de la potencia activa y reactiva.

2.1.6.1. Tecnologías LCC

Se basa en el uso de la conmutación natural. Originalmente se usaban válvulas de mercurio pero durante los años 70, la evolución y aumento de las potencias y tensiones de los dispositivos semiconductores permitió sustituir las válvulas por tiristores. El empleo de tiristores permite el

control del momento del disparo del tiristor pero no del apagado. Como consecuencia de esto, los rectificadores LCC permiten controlar la potencia activa pero no la reactiva.

Para el rectificado en las estaciones de conversión equipados con la tecnología LCC, suelen usarse dos rectificadores de seis tiristores conectados a dos transformadores cuyos devanados están desfasados 30° entre sí, denominando a esta configuración rectificador de doce pulsos. Esta configuración de 12 pulsos, se destaca por reducir la distorsión armónica frente al rectificador convencional de seis pulsos. También se requieren filtros en el lado de continua como en el de alterna para minimizar el efecto de los armónicos en la red. Al mismo tiempo, se requiere una fuente de reactivos en el lado de alterna para asegurar un buen funcionamiento de la estación convertidora.

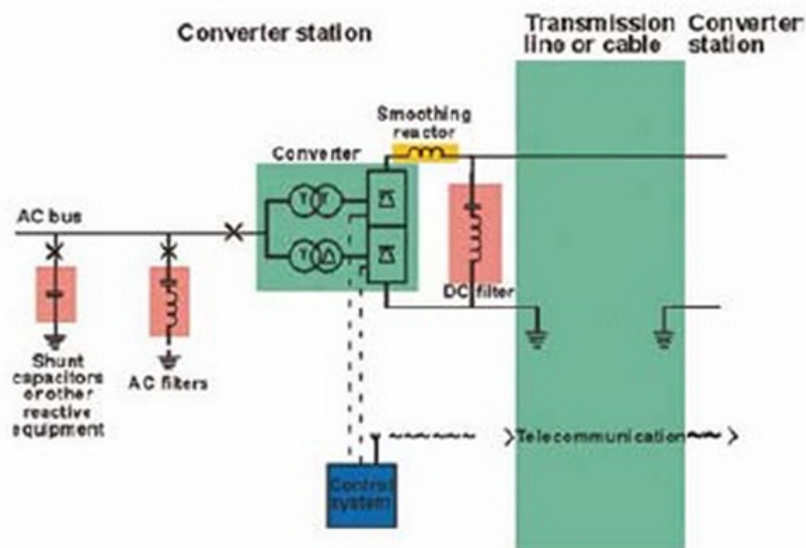


Figura 2.8: Esquema Tecnología LCC.

2.1.6.2. Tecnologías VSC

Se basa en el uso de dispositivos semiconductores de conmutación forzada; éstos pueden conmutar sin necesidad de la red, permitiendo el control simultáneo e independiente de potencia activa y reactiva. A nivel comercial, existen distintas configuraciones de convertidores aplicadas a la tecnología VSC, siendo las más importantes la tecnología HVDC Plus diseñada por Siemens y la tecnología HVDC Light desarrollada por ABB [4].

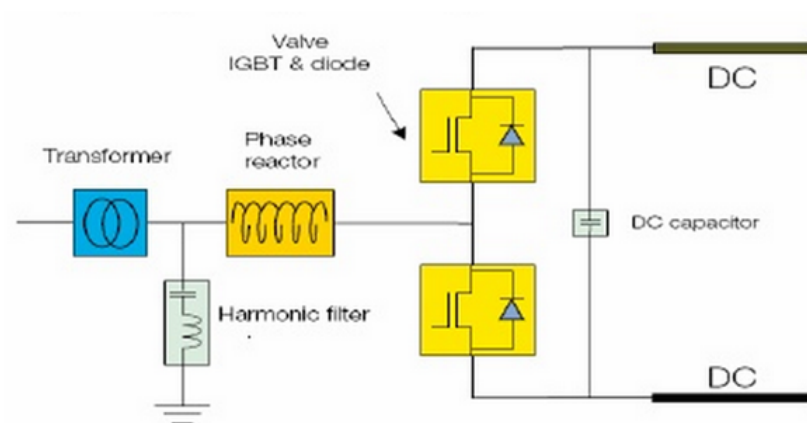


Figura 2.9: Esquema Tecnología VSC.

2.2. Física del Efecto Corona

El efecto corona consiste en la ionización del aire que rodea a los conductores de alta tensión por efecto de alto campo eléctrico. Este fenómeno tiene lugar cuando el gradiente eléctrico supera la rigidez dieléctrica del aire y se manifiesta en forma de pequeñas chispas o descargas a escasos

centímetros de los conductores [5].

La iniciativa de los estudios del efecto corona yace en sus efectos negativos que se dan principalmente en las líneas de transmisión. Estas líneas se diseñan para que el efecto corona sea mínimo, puesto que también suponen una pérdida en su capacidad de transporte de energía; en su aparición e intensidad influyen los siguientes condicionantes:

1. Tensión de la línea: cuanto mayor sea la tensión de funcionamiento de la línea, mayor será el gradiente eléctrico en la superficie de los cables y, por tanto, mayor el efecto corona. En la práctica solamente es significativo en líneas de tensión superior a 80 kV.
2. La humedad relativa del aire: una mayor humedad, especialmente en caso de lluvia o niebla, incrementa de forma importante el efecto corona, al generarse alteraciones de la superficie del conductor por condensación de la humedad.
3. El estado de la superficie del conductor: las rugosidades, irregularidades, defectos, impurezas adheridas, etc., incrementan el efecto corona, pues provocan concentraciones puntuales del campo eléctrico superficial.
4. Número de subconductores: el efecto corona será menor cuanto más subconductores tenga cada fase de la línea, pues esta configuración simula un conductor equivalente de mucho mayor diámetro.

Como consecuencia del efecto corona se produce una emisión de energía acústica y energía electromagnética en el rango de las radiofrecuencias, de forma que los conductores pueden generar ruido e interferencias en la radio y la televisión; otra consecuencia es la producción de ozono

y óxidos de nitrógeno. El efecto corona es un fenómeno ampliamente conocido y no representa ningún peligro para la salud. En este sentido, la Organización Mundial de la Salud en una Nota Descriptiva publicada en noviembre de 1998 manifiesta que ninguno de estos efectos (debidos al efecto corona) es suficientemente importante para afectar a la salud.

Uno de los resultados más importantes que cuantifica el efecto corona es la denominada fórmula de Peek[7]; pero en ciertos casos no es capaz de explicar, por ejemplo, la ionización de un conductor saturado. Es más, tampoco es capaz de explicar la influencia de la polaridad y el número de conductores [6].

Los factores físicos que influyen en la manifestación del efecto corona en líneas de transmisión son esencialmente:

1. Variación debido al radio de los haces de conductores: el promedio COEF (The Corona Onset Electric Field) positivo es siempre mayor que el negativo, y ambos crecen débilmente con el radio del conductor. Sin embargo, el campo eléctrico alrededor de los conductores decrece con el aumento del radio, para ambas coronas.
2. Distancia entre dos polos: debido a que el campo eléctrico es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, se puede deducir que el COEF disminuye cuando la distancia entre los polos aumenta.
3. Peso del conductor: al igual que en el caso anterior, al incrementarse el peso del conductor, éste alcanza una mayor estabilidad.

2.2.1. Clasificación según la naturaleza de descarga corona

Como es bien sabido el fenómeno corona es bastante complejo, pues depende de múltiples factores, principalmente la geometría del electrodo. Además, dada una configuración en la línea HDVC, la clasificación de la descarga obedece a la magnitud y polaridad del voltaje aplicado.

2.2.1.1. Descarga Corona Negativa

Cuando se aplica un voltaje en los conductores se produce un campo eléctrico no uniforme dada su configuración geométrica; en el caso que la tensión sea negativa se producirá una repulsión de los electrones que se ubican en la periferia del conductor. Esto último da pie a una avalancha que se detiene en el sector donde se cumple que los coeficientes de ionización y de enlace de electrones se igualan [8][9], da tal forma que se origina una frontera. En el proceso de descarga negativa, los electrones de la primera avalancha se estrellan con átomos neutros (principalmente aire) ionizándolos, con ello, se generan iones positivos que se van a dirigir al conductor, para chocar con él, liberando electrones lo que conlleva a una segunda ionización, sin embargo, los electrones de la primera ionización se dirigen a la frontera.

Debido a que los iones poseen mayor masa que los electrones, su rapidez es menor, lo que conlleva a que éstos se ubiquen entre la frontera y el conductor, por otra parte, los electrones se colocarán en la periferia de la frontera. La distribución del campo eléctrico se ve claramente afectada, ya que los electrones que se están alejando se enlazan con moléculas del exterior, como

por ejemplo, agua, oxígeno, etc. En virtud de la ley de Coulomb, a medida que nos alejamos de la frontera la magnitud del campo eléctrico decrece, lo que además nos lleva a que la separación entre la frontera y el conductor se reduzca [8][9].

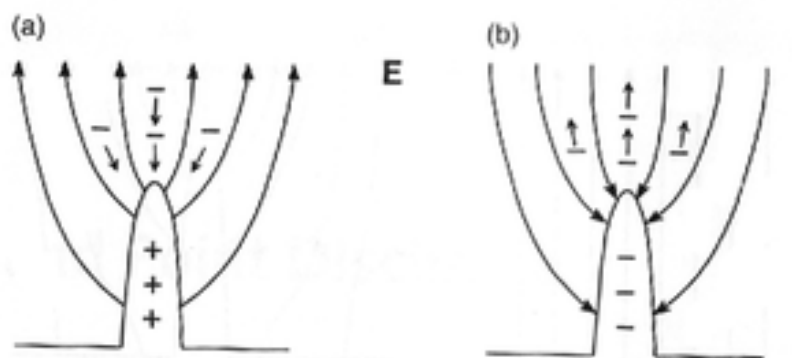


Figura 2.10: Esquemas de coronas positiva y negativa. En a) la corona es positiva; una avalancha de electrones se propaga en el campo eléctrico que aumenta en magnitud. En b) una corona negativa; un puñado de electrones se propagan hacia regiones con campo eléctrico débil en magnitud

Los tipos de descarga negativa son:

1. Descarga por Dardo de Trichel

Esta descarga se produce cuando la magnitud del campo eléctrico en la superficie del conductor supera al valor umbral corona. El origen del nombre de dardo, es debido a que esta descarga se genera a través de canales en forma de dardo (las que posee poca duración), producto de las avalanchas dada por las repulsiones que genera el conductor a esta avalancha [8][10][11]. Una de sus características es su luminosidad con forma de dardo de alta frecuencia de repetición [8][10].

2. Descarga De Brillo Sin Pulsación Negativa

En el caso que la magnitud del campo eléctrico superficial aumente y alcance una frecuencia crítica, la descarga corona presenta una descarga de tipo continua. El aspecto es similar a las descargas de brillo, que se forman a través de una esfera brillante junto a una columna cónica separadas, esta última se debe a que la distribución de los electrones libres está en la zona de menor campo eléctrico. También es importante destacar que la corriente producida está dada a la magnitud del voltaje aplicado [8][10][11].

3. Descarga Por Dardo Negativa

Cuando la tensión en el conductor aumenta, se produce un fenómeno adicional de descarga, a través de un canal angosto con forma de dardo. Esta descarga depende de los electrones repelidos por el conductor que además tiene un ingrediente adicional, el campo eléctrico dado por las cargas espaciales. Una característica importante que se debe señalar es que esta descarga no se detiene por completo a diferencia de los dardos de Trichel [8][10][11].

2.2.1.2. Descarga Positiva Corona

Esta descarga se inicia con avalanchas producidas por electrones cercanos a la frontera, los cuales son atraídos por el conductor; debido a lo anterior, estos electrones van a aumentar su energía cinética lo que conlleva a que los enlaces con el oxígeno son poco probables [8][9]. Estos electrones, dada su naturaleza ionizan las partículas neutras que encuentran a su paso generando iones cargados positivamente que se alejan del conductor. Dado que estos iones tienen poca movilidad, se ubican cercanos al conductor, lo que conlleva a la recombinación con las avalanchas secundarias [8][9]. El proceso de descarga se propaga a lo largo del espacio hasta que la magnitud del campo eléctrico sea capaz de sostener la descarga auto sostenida [8][9]. Es importante mencionar que la

descarga positiva también (al igual que la negativa) es responsable de los cambios existentes en la distribución del campo eléctrico.

La descarga positiva posee cuatro tipos de descarga, los cuales son en orden de magnitud: estallido de corona, descarga de dardo de inicio, descarga brillo y la descarga por dardos interrumpidas [8][9][10][11]. Los tipos de descarga positiva son:

1. Estallido de Corona

Esta descarga positiva se produce gracias al esparcimiento de los electrones atraídos por el conductor; éstos poseen una alta energía cinética lo que provoca que ellos no se recombinen con el conductor. En este proceso se crean iones positivos que se localizan en las cercanías del conductor. Se produce en este mecanismo una descarga de pequeños pulsos positivos, los que corresponden directamente al esparcimiento de los electrones en algunas zonas del conductor [8][9].

2. Descarga por Dardo De Inicio

Los iones que rodean al conductor aumentan la magnitud del campo eléctrico, lo cual hace que los electrones sean atraídos formando avalanchas a través de canales en forma de dardo. Esta carga se detiene cuando se crean suficientes cargas espaciales positivas que se localizan lejos del conductor que a la postre disminuyen la intensidad de campo eléctrico. La descarga dura hasta que las cargas que afectan al campo eléctrico se despejen. Características importantes que vale la pena mencionar son la gran amplitud de onda y baja frecuencia de la corriente generada, y por ser la principal razón de la interferencia electromagnética [8][9].

3. Descarga por Brillo

Es una capa de luminosidad que se localiza en la periferia del conductor, la cual produce una importante ionización en las inmediaciones del conductor, y es el resultado de una creación de iones positivos en el espacio. Sin embargo, la intensidad de campo eléctrico no es tan

grande para generar canales en forma de dardo. La corriente de la descarga es prácticamente continua superpuesta con pulsos de corriente de alta frecuencia [8][9].

4. Descarga por Dardos Interrumpida

Si el voltaje es alto, se producen canales de tipo dardo. A diferencia de la descarga por dardos de inicio, la frecuencia, la intensidad de corriente y los anchos de los canales son mucho mayores [8][9].

Capítulo 3

Mecanismos de Medición de Campos Eléctricos

3.1. Parámetros Eléctricos en las vecindades de las líneas HVDC

En las proximidades de las líneas HVDC se presenta campo eléctrico (E), densidad de corriente (J) y densidad de carga monopolar (ρ). Las líneas HVDC generalmente operan en configuración bipolar con un polo por polaridad. El campo eléctrico es debido esencialmente a los altos voltajes aplicados a los conductores. También podemos encontrar abundantes cantidades

de iones producidos por el efecto corona en cada haz de conductores; esta presencia contribuye significativamente a la intensidad del campo eléctrico a nivel de suelo. En ausencia de algunos factores climáticos, tal como el viento, los iones viajan a través de las líneas de los conductores en dirección a la polaridad opuesta, pasando por los cables y el plano de tierra. Dependiendo de la composición, cada tipo de ión posee una movilidad característica, los cuales forman reacciones iones-moléculas producto del efecto corona. La velocidad de drenaje de cada ión es igual al producto de esta movilidad y el campo eléctrico. En el caso de existencia de viento, su velocidad (v_{viento}) es un factor adicional a la densidad de corriente (J) y denotando la movilidad promedio de los iones con la letra K , se tiene la siguiente expresión [12]:

$$J = \rho(K E + v_{viento}) \quad (3.1)$$

donde ρ es la densidad de carga espacial monopolar.

3.2. Medición Directa de Campos Eléctricos Intensos

3.2.1. Instrumentación y principios de operación

Se considerarán dos principios de operación de medida de campos DC: rueda de molino (voltímetro generador) y platos vibrantes. Ambos operan en campos eléctricos intensos mediante medición modulada, capacitancia inducida por cargas o corrientes detectadas por electrodos metálicos. Existen otros instrumentos en la literatura especializada, pero no se entrará en detalle, pues no poseen suficiente validación [12].

3.2.1.1. Voltímetro Generador

En general existen dos tipos; uno de ellos es el denominado de aspa (ver figura 3.1), y el otro cilíndrico. El primero funciona con un aspa rotatoria, la cual posee un sensor que es periódicamente expuesto a un campo eléctrico, el aparato usualmente opera cercanamente al plano de tierra. Tanto la carga como la corriente inducida entre los sensores son directamente proporcionales al campo eléctrico DC:

$$Q_s(t) = \epsilon_0 E d a(t) \quad I(t) = \frac{dQ_s(t)}{dt} = \epsilon_0 E \frac{da(t)}{dt} \quad (3.2)$$

Con $a(t)$: el área expuesta al electrodo en un instante t y ϵ_0 : permitividad en el espacio libre. Así, el campo puede ser determinado por carga o corriente inducida; o un voltaje a través de una impedancia ubicada entre el sensor y la tierra.

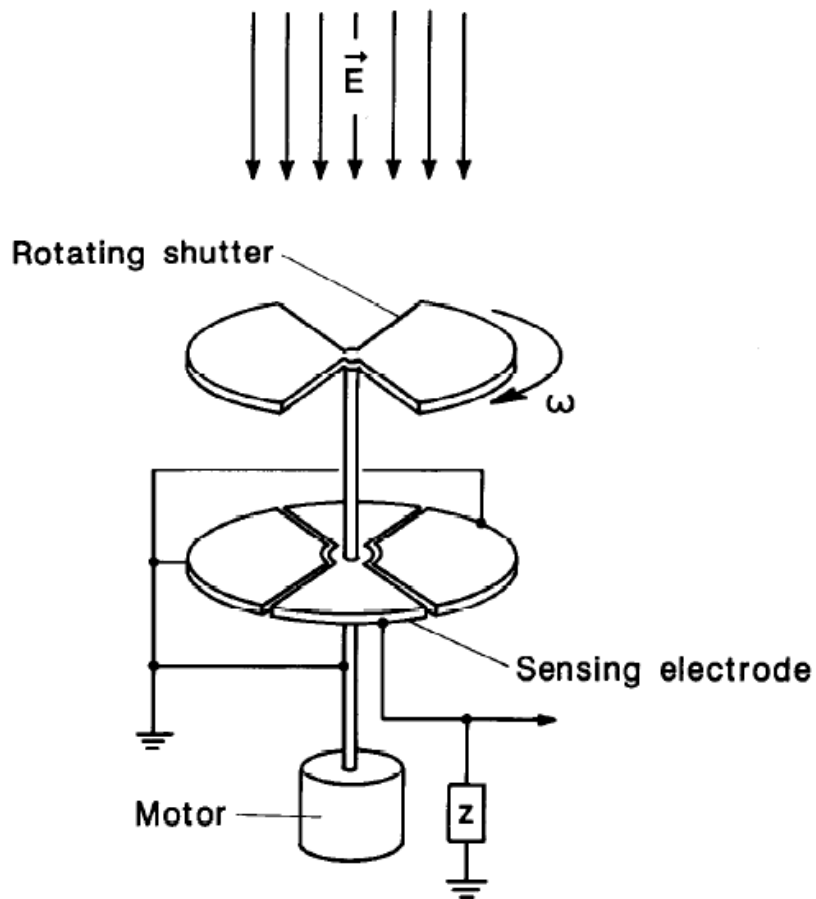


Figura 3.1: Vista esquemática del voltímetro de aspa

Si la señal del motor (aspa rotatoria) es rectificadora por un detector de fase con adecuado ángulo de fase con relación al movimiento del motor, la señal de salida indicará tanto la magnitud como la polaridad del campo eléctrico.

Debido a la presencia de carga en el espacio de la vecindad de las líneas de transmisión, es posible tener corriente inducida, además de corrientes de conducción en los electrodos del medidor;

ésta última, la cual es afectada por la rotación del aspa, representa un error de señal que deberá ser corregida por el instrumento. Una propuesta es usar la fase de la señal de procesamiento que discrimina contra la corriente de conducción, puesto que está en cuadratura con la señal de corriente inducida[13].

El instrumento opera normalmente en el plano de tierra; algunas medidas pueden ser hechas con este instrumento montado sobre un atril, esta condición debe ser considerada a la hora de calibrar. Cabe notar que la geometría existente durante el proceso de calibración debe ser mantenida durante el proceso de medición. Es importante tener en cuenta los factores climáticos, como por ejemplo: la nieve cerca del atril o el pasto, en tales casos se debe modificar el plano de tierra efectivo. Un método para establecer una buena tierra en el caso de la mayoría de las condiciones climáticas se describirá más adelante.

Durante las mediciones, el observador debe estar alejado para evitar perturbaciones eléctricas. Algunas señales de procesamiento se ubican en el sensor. El resto de las señales del circuito y campo eléctrico se presentan en el revestimiento del cable el cual es conectado con su sensor.

Dado que el campo eléctrico no es uniforme en las vecindades de las líneas de transmisión, podría ser interesante medir el campo en puntos cercanos al plano de tierra. Esto puede ser realizado con el molino sensor cilíndrico. La carga es inducida producto de la variación periódica de la rotación de los electrodos alrededor de su eje de simetría a una rapidez angular (ω) constante (Figura 3.2). Las expresiones de las cargas inducidas (Q_c) y corrientes (I_c) sobre un cilindro de largo L y radio r_0 , ignorando los efectos de borde:

$$Q_c = 4\epsilon_0 r_0 L E \sin(\omega) \quad I_c = 4\epsilon_0 r_0 L E \omega \cos(\omega) \quad (3.3)$$

Actualmente, los molinos cilíndricos de campo han sido desarrollados para realizar mediciones sobre el plano de tierra cerca de las líneas CC, es importante destacar que el campo eléctrico sobre la superficie es la superposición de dos componentes, las cuales son:

1. El campo de línea propiamente tal, claramente deformado por el cilindro.
2. La distribución constante de carga ubicada en la superficie del cilindro.

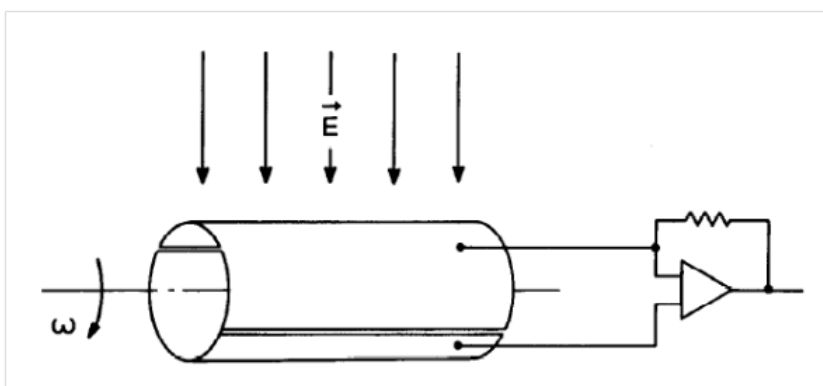


Figura 3.2: Vista esquemática de un molino cilíndrico medidor de campo eléctrico.

3.2.1.2. Método del plato vibrante

A diferencia del caso anterior, existen considerablemente menos publicaciones que tratan acerca del método del plato vibrante. Se muestra en la figura 3.3 un esquema simplificado de la prueba del electrodo sensor con plato vibrante. Las cargas inducidas en el plato producto del campo eléctrico son reguladas por la acción de un sistema mecánico. En la configuración mostrada en la figura 3.3, el medidor de campo responde a las cargas negativas inducidas en el plato vibrante producto de

un voltaje de realimentación V_{fb}, V_s ; la intensidad del campo eléctrico es proporcional al voltaje de realimentación [13]. Como en el caso del aspa, el probador de plato vibrante está montado y alineado en el plano de tierra durante la medición, y una parte de la señal procesada del circuito se ubicará remotamente en una caja aislada. Es importante mencionar que el observador debe estar suficientemente alejado del equipo para así evitar que el campo eléctrico se perturbe.

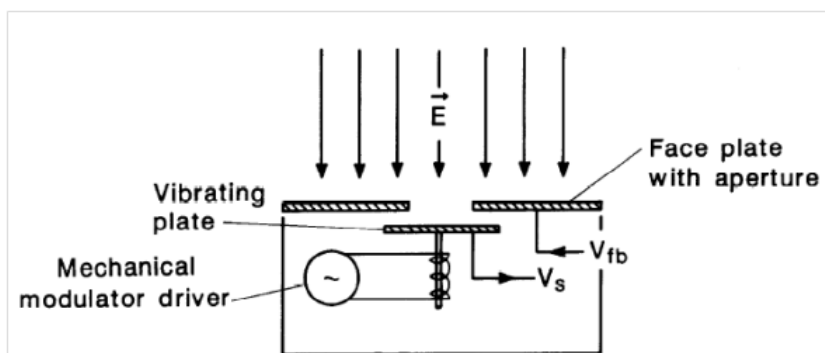


Figura 3.3: Vista esquemática del método del plato vibrante

3.2.2. Calibración de los Instrumentos

Es bien sabido que los campos eléctricos CC en las vecindades de las líneas de transmisión HVDC con carga espacial son inestables para los propósitos de calibración, otras características que debiesen ser consideradas en una calibración son:

1. La región considerada deber ser lo suficientemente uniforme para así reducir incerteza en el valor del campo eléctrico a un nivel aceptable.

2. El campo eléctrico no debe ser perturbado por objetos en las cercanías del instrumento o en el plano de tierra.
3. Las dimensiones del instrumento deben ser lo suficientemente cortas para que las pruebas no perturben significativamente la distribución de cargas en la superficie de los electrodos.

El aparato que produce un campo con carga espacial es más complicado en su construcción y operación que uno de carga espacial libre. Además, para densidades de corriente menores que 10^5 A/m^2 y campos eléctricos mayores a 10 kV/m , los errores de los medidores debido a carga espacial pueden ser despreciables. En muchas situaciones, la densidad de carga en el espacio libre puede ser adecuada para el propósito de calibración, por último, cabe decir que se deben aplicar además normas de seguridad si se tiene altos voltajes (como es en nuestro caso) para el procedimiento de calibración.

3.2.2.1. Calibración para campos eléctricos sin carga espacial.

Regiones uniformes de campo eléctrico (tanto en magnitud como en dirección) sin carga espacial pueden ser creadas mediante platos paralelos, previendo que la dimensión relativa entre los platos y las dimensiones de éstos son lo suficientemente pequeñas. El valor del campo eléctrico uniforme (E_0) está dado por V/d , donde V es el voltaje aplicado y d es la separación entre los platos. Las magnitudes de campo normalizado E/E_0 y la distancia normalizada x/d en la superficie y entre las placas seminfinitas se muestran en la curva de la figura 3.4. Las planchas de metal que puedan estirarse pueden ser usadas como platos paralelos [40].

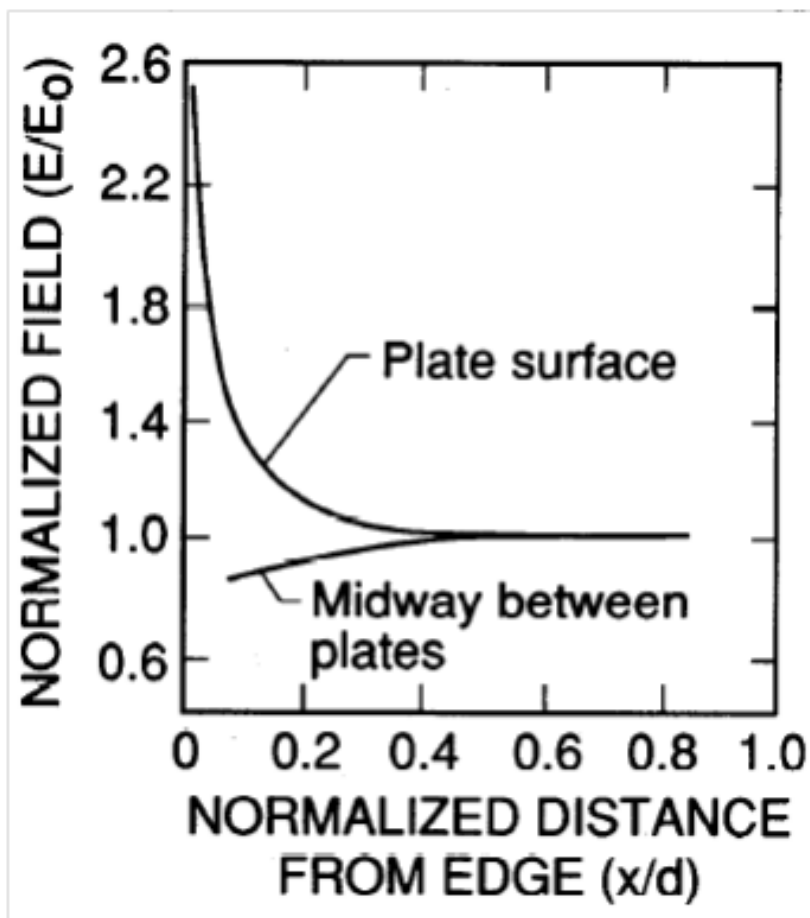


Figura 3.4: Curvas normalizadas de campo eléctrico versus distancia en la superficie del plato y entre platos.[40]

La tabla muestra que el error estimado en el campo uniforme debido a los efectos de borde es de un 0,1 % a una distancia normalizada igual a uno. Para platos cuadrados de dimensiones finitas, los efectos de borde pueden ser estimados por superposición cuando el efecto de cada borde es menor a un 0,1 %. Cálculos numéricos de campos entre los platos semi infinitos entregan un error de aproximadamente un 0,04 %. Cabe mencionar que estos valores son válidos en ausencia de perturbaciones debido a las razones expuestas en 3.2. Se presentan a continuación las calibraciones

de plano de tierra y sobre el plano de tierra. La tabla 3.1 en la figura 3.4:

Entre Platos		Superficie	
x/d	E/E_0	x/d	E/E_0
0,0698	0,837	0,0185	2,449
0,1621	0,894	0,0829	1,414
0,2965	0,949	0,1230	1,265
0,4177	0,975	0,1624	1,183
0,6821	0,995	0,2431	1,095
0,7934	0,997	0,4376	1,025
1,0000	0,999	0,6861	1,005
		0,7954	1,002
		1,0000	1,001

Tabla 3.1: Intensidad de Campos Eléctricos Normalizados entre platos y en su superficie. [12]

Calibración en el plano de tierra Los medidores de campo eléctrico que operan en el plano de tierra pueden ser calibrados haciendo una perforación en el centro del fondo del plato y montando el medidor alineado con el plano de tierra. El postigo debe estar también alineado con el plano de tierra y el sensor bajo este plano. Considerando lo anterior, debiese existir una perturbación del campo eléctrico debido al hoyo, lo cual decrece en un 0,7% a una distancia de 3 veces el radio del agujero [15][16]. De este modo, un plato paralelo colocado a 3 veces este radio elimina considerablemente las perturbaciones de densidad de carga sobre la superficie en la parte alta del plato. La distancia entre los platos paralelos y el plano de tierra debe ser al menos el largo de dos platos. Bajo estas condiciones, la calibración del campo puede ser calculada a partir de la expresión V/d con una incerteza del 0,5% [16].

Finalmente, es importante destacar que la sonda debe estar alineada con el plano de tierra para una precisa calibración y medidas consecuentes. Por ejemplo, una desalineación de uno o dos milímetros relativos a la línea de tierra, pueden llevar a un error de varios puntos porcentuales.

Calibración sobre el plano de tierra El sistema de platos paralelos el cual cumpla la relación $L/d = 2$, donde L es el largo del plato y d es la separación entre ellos, tendrá un campo en su centro que contendrá el 1 % del campo uniforme dado por V/d en ausencia del plano de tierra cercano. La perturbación de los campos entre los platos puede minimizarse mediante balances de energización, es decir, utilizar voltajes de igual magnitud, pero de polaridad opuesta. Para tal disposición y si $L/d = 2$, la influencia del plano vertical será despreciable en el centro de los platos paralelos.

El espaciamiento debe ser lo suficientemente largo para que la perturbación de la calibración por «imágenes de carga» sea insignificante. Dos tipos de efectos poseen las imágenes de carga que deben ser consideradas. El primero, el cual siempre está presente, es la perturbación del campo debido a las cargas inducidas sobre la sonda. El segundo efecto se presenta si la sonda tiene una carga propia, la cual puede poseer debido a que el campo eléctrico dado pasa a ser una tierra de referencia. Una estimación del error producido por las cargas inducidas en la sonda, puede ser modelada como una caja rectangular. En particular, Takuma [17] ha mostrado con la caja rectangular de 10 cm x 10 cm x 8 cm de alto, localizando ésta sobre un plato paralelo, además, considerando la condición $L/d = 2$, que el error porcentual debido a ambos platos puede ser expresado como $V/(8 \cdot D^3) \times 100$, donde V es el volumen de la carga y D es la distancia entre el centro de la sonda y uno de los platos.

La aislación eléctrica de un instrumento puede ser calibrada sobre un plano de tierra en la misma sonda como una tierra referenciada. Sin embargo, si el medidor de campo está ubicado en el centro entre ambos platos paralelos, el procedimiento de calibración no incluirá un chequeo de una adecuada adaptación al potencial espacial local. Si la aislación que debe poseer la sonda no está impecable, habría una fuga hacia la tierra.

Para chequear este efecto, el instrumento debe estar aislado sin presencia de carga en el espacio libre, además, este medidor debe posicionarse asimétricamente entre los platos paralelos. Porque en la cercanía del campo eléctrico entre los platos paralelos, el error de lectura del medidor no debiese ser significativo si el acoplamiento de éste al potencial espacial es el adecuado.

La existencia de polos aislados (limpios) en las proximidades de la sonda de campo eléctrico podría provocar dificultades durante la calibración a niveles de campos eléctricos ambientales (del orden de 120 V/m). La superficie aislada puede actuar como una trampa de carga espacial en el ambiente. Esta carga obviamente afectará la calibración del instrumento. La utilización de una fuente externa sobrepuesta en el polo puede eventualmente ayudar a resolver el problema, no obstante, podría incluir dificultades adicionales. Los errores en las estimaciones de los valores de V y d , junto a la incerteza de los efectos de borde (el error referido se calcula como la raíz de cada error al cuadrado) son del orden del 1 %.

3.2.2.2. Calibración para campos eléctricos con carga espacial.

A continuación se muestra el esquema de un aparato que mide el campo eléctrico con carga espacial, el cual es expuesto en la figura 3.5.

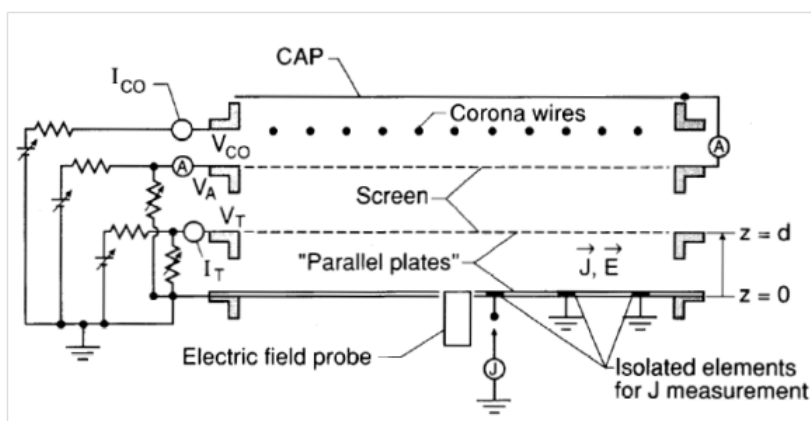


Figura 3.5: Esquema de medición de campo con carga espacial [20]

Los iones generados por los cables de acero inoxidable (CAP) están dirigidas tanto hacia arriba, como abajo de la primera pantalla. Los iones no atrapados por la primera pantalla siguen a la segunda, la cual está en la parte superior de los platos paralelos. Los iones pasan a través del plato paralelo superior a una distancia d respecto al plato inferior con una densidad de corriente J . Un electrómetro se usa para medir la corriente por los elementos aislados montados al pie del plato. Conociendo el área de las sondas del electrómetro se puede calcular el valor de J . En particular, las dimensiones de los platos son de 1,7 m por 1,7 m y la separación de estos platos es cercana a los 25 cm.

Según la teoría de campos la solución de la ecuación de Poisson unidimensional para un campo

eléctrico, $E(z)$, con potencial eléctrico espacial $f(z)$, entre los platos paralelos, [18] donde z es la distancia sobre la base del plato, V_t el potencial de la parte alta del plato ($z = d$) [18], es

$$E(z) = E_t^2 + \frac{2J(d-z)}{K\epsilon_0} \quad f(z) = V_t - \frac{k\epsilon_0[E(z)]^3}{3J} - E_t^3 \quad (3.4)$$

E_t = el campo eléctrico de la parte alta del plato y K = la movilidad promedio de los electrones.

Los procedimientos se encuentran en [18], los valores de K y E_t pueden determinarse experimentalmente, estos permiten el cálculo de la ecuación dada la densidad de corriente. El valor del campo eléctrico puede ser calculado con una incerteza del $\pm 2\%$ [18]. Se presentan a continuación las calibraciones de plano de tierra y sobre el plano de tierra.

Calibración en el plano de tierra Al igual que lo dicho anteriormente, estos medidores de campo eléctrico que operan en el plano de tierra pueden calibrarse haciendo un agujero en el centro de la superficie de fondo y luego, montando la sonda del medidor.

Los molinos cilíndricos de campo (como el de la figura 3.2) en su instalación introducirían pequeñas cavidades sobre el plano de tierra, lo que entregaría una perturbación del campo eléctrico existente en el plano de tierra, ésta decrece un 0,32% de la distancia equivalente de cuatro radios desde el centro del agujero, todo esto en ausencia de carga espacial. [15], [19], [21] y en tanto a mayor cantidad de carga espacial [19], [21]. Por lo tanto, una separación de placas paralelas que es cuatro veces el radio del agujero hecho por un molino cilíndrico de campo de tipo persiana eliminará las perturbaciones significativas de la densidad superficial de carga en la placa superior.

Calibración sobre el plano de tierra Para la calibración del plano de tierra o más bien de la aislación eléctrica del cilindro que opera sobre este plano de tierra, se utiliza una sonda cilíndrica colocada en el centro de los platos paralelos con la manija de la sonda en posición normal (alineada con la sonda). En caso de querer cambiar la orientación de la manija, ésta no debe ser reajustada durante la calibración y las posteriores mediciones que se realicen.

La separación de los platos paralelos debe ser suficientemente amplia para que las interacciones entre los platos y la sonda sean despreciables. Por ejemplo si se utiliza un cilindro infinito cargado que interactúa solamente con el plano de tierra, éste afectaría las lecturas alrededor de un 10 % si es que la distancia entre el centro del cilindro y el plano de tierra es mayor a cinco veces el radio del cilindro[21].

Este resultado es un tanto conservativo porque la aproximación considerando “cilindro infinito” ignora los efectos de imágenes de carga debido a las cargas inducidas en la superficie del cilindro.

Dada la ecuación (3.4) obtenida anteriormente, el valor del campo eléctrico será función de la distancia al plano de tierra, lo que conllevará a tener especial cuidado al determinar la altura del cilindro para las calibraciones en sistemas de platos paralelos que contiene carga espacial.

3.2.3. Mediciones

3.2.3.1. Mediciones de campo eléctricos intensos en líneas de transmisión

La medida del perfil lateral del campo eléctrico es generalmente considerado un procedimiento válido para caracterizar las líneas de transmisión. En las líneas AC, el campo puede ser determinado dentro de algunos minutos utilizando medidor de campo de cuerpo libre, un estudio acerca de estos aparatos permite medir la mayoría de los puntos sobre el plano de tierra [22], [23].

A diferencia con las líneas AC, la caracterización de los campos eléctricos cercanos a la línea de transmisión CC implica un proceso más complejo y que destina mayor tiempo. Producto de las grandes variaciones de los campos eléctricos intensos debido a factores como la lluvia, niebla, nieve, hielo, humedad relativa y efectos climáticos, se ha encontrado útil representar el campo eléctrico como una cantidad estadística puesto que las mediciones deben ser trabajadas en un extenso período de tiempo.

Al interpretar los datos correctamente, la relación entre los parámetros debiesen ser guardados simultáneamente con las medidas de campo eléctrico, por ejemplo, el uso de instrumentos para medir la velocidad del viento, lluvia y temperatura, debiese ser utilizado en conjunto con las medidas del campo eléctrico, con el fin de obtener mayor exactitud.

Un factor importante para las medidas es el período de duración de tal medición, ésta podría eventualmente durar desde días hasta algunos meses [13]. La instrumentación para medir a corta duración debe ser automatizada para así obtener los datos de mejor forma. Las medidas que se extienden a meses deben actuar con instrumentación múltiple para así tener observaciones si-

multáneas, con el fin de detectar con facilidad los errores en las mediciones. Porque en gran parte de los casos, los instrumentos están expuestos a severas condiciones climáticas, lo que conlleva a mayores requerimientos de calibración [25].

Cabe señalar que muchas de las técnicas para medir los campos eléctricos cerca de las líneas de alimentación de CC son aplicables a áreas fuera de la estación convertidora donde pueden existir campos eléctricos con carga espacial.

Mediciones en el plano de tierra. El perfil lateral del campo eléctrico en el plano de tierra bajo las líneas HVDC puede presentarse en términos de un valor medio. Los valores del 5 % y 95 % (del máximo) pueden ser considerados como valores prácticos para mínimos y máximos valores para condiciones climáticas específicas. Otros investigadores han considerado el $L_{0,5}$ (mediana), la confiabilidad de este valor depende principalmente de la ausencia de valores previos en la base de datos del aparato, pues estos podrían captar transitorios de conmutación (debido al fenómeno corona principalmente) existentes en la línea de operación. En la figura 3.5 se muestra algunos ejemplos de perfiles laterales de campo eléctrico, en condiciones de buen tiempo, niebla y lluvia [25].

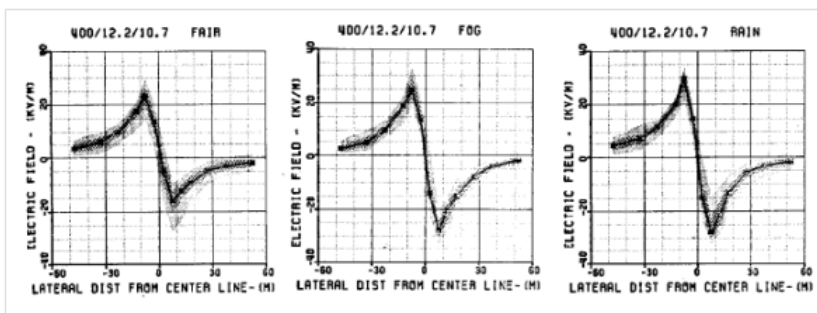


Figura 3.6: Perfil lateral del campo eléctrico medidas a nivel de tierra en condiciones normales, niebla y lluvia[25].

Los resultados fueron obtenidos con 13 medidores de campo eléctrico ubicados en la línea perpendicular a los conductores. Para obtener este tipo de datos, las medidas deben tomarse con una frecuencia de un minuto durante un par de meses. Esto se realiza más convenientemente con una adquisición automática de datos y sistema de almacenamiento bajo control por un computador. Cabe destacar que las mediciones automáticas de otros parámetros relevantes, tales como las condiciones climáticas, son necesarias para poder interpretar correctamente los datos [26]. La geometría del conductor, la tensión de la línea, y la hora también deben registrarse. En la medida de lo posible, se recomienda que el lugar de medición sea una zona plana, libre de torres, árboles, cercas, pastos altos y otras irregularidades.

Las mediciones de perfil lateral mostradas en la figura 3.6 representan los valores de intensidad de campo eléctrico en el plano de tierra; la instrumentación utilizada para obtener los datos fue afectada debido a la vibración de la sonda y los electrodos. Las respuestas de las sondas invertidas fueron calibradas mediante la comparación de lecturas con medidores de campo montado en el plano de tierra de manera habitual. Este enfoque de medición reduce los efectos perturbadores de la vegetación, los insectos, las precipitaciones y las inundaciones[25].

Otro enfoque que se ha utilizado para reducir los efectos de la vegetación, insectos, y las inundaciones es construir un gran, ligeramente elevado, plano de tierra artificial (3,6 m x 11,0 m) con malla de alambre clavado en un marco de madera [26]. El medidor de campo eléctrico se monta sobre el plano de tierra con otra instrumentación para la medición de iones de densidad de corriente y densidad de carga monopolar. Un plástico negro colocado en la tierra debajo de la malla disminuye los efectos del crecimiento de malezas.

Los medidores de campo que se utilizan para medir el campo eléctrico a nivel del suelo son

montados a ras con el plano del suelo con el fin de prever que el drenaje de agua de lluvia a partir de estas cavidades subterráneas provocadas no afecten los circuitos asociados. Por ejemplo, las bombas de sumidero se han utilizado para eliminar el agua de los agujeros que alojan los contadores de iones [25]. El montaje del medidor de campo eléctrico ubicado al centro y a ras con la superficie del plato de Wilson permite correlaciones más precisas entre la intensidad de campo eléctrico y las mediciones de densidad de corriente.

Cabe notar que la convención en la descripción de los campos eléctricos cerca de líneas eléctricas de corriente continua es designar como negativo el campo eléctrico en el suelo, y el campo eléctrico en el conductor positivo se considera positivo.

Mediciones sobre el plano de tierra. La instrumentación diseñada para mediciones de intensidad de campo eléctrico por encima del plano de tierra se describe en los documentos de Smiddy y Chalmers, Gathman, Maruvada, y Kirkhamy compañeros de trabajo [36][37] [38]. Los molinos cilíndricos de campo contienen elementos de circuito que proporcionan las señales de referencia que permiten la determinación de la dirección del campo eléctrico, así como su magnitud [12].

Las mediciones del campo eléctrico sobre el plano de tierra cerca de una línea HVDC se obtienen usando molinos cilíndricos de campo con enlaces de fibra óptica a los circuitos de detección según se describen en [27]. Las medidas de campo eléctrico por sobre el plano de tierra muestran una buena correlación, por lo tanto, una vez que se establece una relación de las medidas

entre el suelo y por encima del plano de tierra, la intensidad de campo eléctrico sobre el suelo se puede controlar en forma remota con el medidor de campo ubicado en el plano de tierra [12].

3.2.3.2. Mediciones en el interior.

Debido a la ausencia de ciertos efectos ambientales naturales tales como viento, lluvia y niebla, y la variación relativamente pequeña de parámetros tales como la humedad relativa y la composición del aire en interiores, la intensidad del campo eléctrico se espera que permanezca relativamente constante para un determinado electrodo de geometría y nivel de tensión. En estos casos, las mediciones de campo eléctrico por sobre del plano de tierra deben reflejar a largo plazo sus valores nominales correspondientes. Esto bajo el supuesto de que no hay objetos o superficies cercanas que pueden llegar a perturbar al campo eléctrico de una manera impredecible (por ejemplo, superficies aislantes). También se supone que los parámetros eléctricos asociados con los procesos de campo y generador de iones (es decir, geometría de los electrodos, tensiones, etc.) son invariantes en el tiempo.

3.2.3.3. Mediciones sobre el plano de tierra en ausencia de carga espacial.

Las mediciones de la intensidad de campo eléctrico de corriente continua por encima del plano de tierra puede hacerse en un entorno de carga espacial libre (por ejemplo, cerca de aparatos eléctricos, tales como aislantes y descargadores de sobretensión) con referencia de tierra y aislado eléctricamente. Debido a la auto-carga en la instrumentación, las mediciones cerca de

algunas superficies pueden ser afectadas por los campos producidos por las cargas imagen en los conductores [29]. En menor medida, las cargas inducidas en el molino de campo cilíndrico también influyen en las mediciones. El efecto resultante de los campos de carga imágenes es la medida de intensidad de campo eléctrico en un punto superior al valor de campo que existe antes de introducir la sonda de campo cilíndrico. Los valores aproximados de los errores debidos a las imágenes de la auto-carga para un cilindro infinito se discuten en [25].

Debido a la ausencia de carga espacial, la perturbación del campo eléctrico se limita al efecto mucho más pequeño de las cargas inducidas en la sonda. En los prototipos de instrumentación eléctricamente aislado desarrollado por Kirkham [39], las fibras ópticas se han utilizado para la transmisión de señales eléctricas de la sonda cilíndrica hacia el circuito de visualización de intensidad de campo. Sin embargo, se ha experimentado cierta dificultad en el mantenimiento de un aislamiento adecuado entre la sonda y tierra. Resistencias del orden de $10^{12}[\Omega]$ se han encontrado ser insuficientes para impedir que la sonda alcance eventualmente el potencial de tierra [25]. Los campos eléctricos dados por una imagen debido a la auto-carga de la sonda se convertirían en un problema.

El problema del acoplamiento de la sonda a la carga de espacio, puede ser resuelto por medio de una fuente de polonio radiactivo unido al extremo del mango aislante que normalmente se utiliza para apoyar la sonda cilíndrica en el campo eléctrico [25]. Sin embargo, este procedimiento puede resultar en la acumulación de carga en la sonda, de nuevo dando lugar a efectos campo de carga de imagen. Además, los aisladores cercanos pueden llegar a cargarse por los iones producidos por la fuente radiactiva, causando una perturbación adicional del campo eléctrico.

Sobre el suelo se han realizado mediciones de campo eléctrico al aire libre cerca de aisladores

de corriente continua como parte de un estudio para comprender los mecanismos de descarga disruptiva a través de superficies aislantes [25]. Debido a la ausencia de carga espacial y el uso de un molino cilíndrico de campo eléctricamente aislado durante las mediciones, las perturbaciones de las imágenes de carga en el campo se minimizan, al igual que las mediciones de intensidad de campo cerca de la superficie del aislador. Sin embargo, a la luz de los posibles problemas antes citado de las cargas superficiales debido al elemento radiactivo, los estudios adicionales parecen necesarios para definir mejor la incertidumbre asociada a este método de medición [12].

3.2.4. Fuentes de Error

Los instrumentos usados fuera del laboratorio para supervisar el comportamiento a largo plazo de una línea de alimentación de CC son generalmente sometidos a condiciones ambientales que pueden afectar el funcionamiento del dispositivo y la exactitud de las mediciones. Bajo estas condiciones, las mediciones fiables se obtienen solamente si los métodos de comprobación periódica (definida por el investigador) de la operación del instrumento, la calibración y la dispersión de datos se consideran como parte del protocolo de medición.

Debido a la posibilidad de acumulación de carga sobre superficies aislantes durante las medidas exteriores e interiores, estas superficies no deben ser expuestas al campo eléctrico. La acumulación de carga puede dar lugar a inestabilidad en la medición y la dispersión de datos a largo plazo. Por ejemplo, la carga de un molino cilíndrico de campo debido a la contaminación de la superficie puede dar lugar a inestabilidades o un cambio sistemático en los valores de campo. Otros efectos similares pueden ocurrir si se cargan las superficies dentro de la carcasa de la sonda. Otra vía para reducir estos efectos es utilizando una presión de aire depurado en el sistema de la sonda.[12].

Debido a las duras condiciones ambientales del aire, es posible que las superficies metálicas sensibles a la electricidad sean corroídas y adquieran una carga. Durante las mediciones, cuando se cargan las superficies de aislamiento, esto puede llevar a la inestabilidad y posterior colapso del instrumento.

En condiciones de grandes densidades de corriente, el exceso de éstas que normalmente se encuentran debajo de las líneas de corriente continua, provocan vibraciones en las placas, y las mediciones de campo pueden indicar valores de intensidad de campo que son demasiado bajas debido a un mecanismo asociado producto de una gran impedancia entre la placa de vibración y el plano de tierra [20].

Como se ha indicado anteriormente, los medidores de campo deben estar alineados con el plano del suelo cuando se utilizan para mediciones a nivel del suelo. En caso de que las sondas de campo sobresalgan por encima del plano de tierra, éstas indicarán valores excesivamente altos de campo, por el contrario, si la sonda está colocada debajo del plano de tierra, los valores de los campos indicados serán demasiado bajos.

Las gotas de lluvia puede cortocircuitar elementos en las sonda de campo eléctrico con lo cual perturban las mediciones. La elevación de sondas de molinos de campo y de placa vibratoria, por sobre el plano de tierra e invertirlas para que apunten hacia el suelo [28], [29] reduce la probabilidad del problema de corto circuito. Las respuestas de las sondas utilizadas para obtener los datos en la figura 3.6 fueron calibrados mediante la comparación de lecturas con un medidor de campo montado en el plano de tierra [26]. Sin embargo, hay que señalar que la calibración dependerá en parte de la distribución de la densidad de carga espacial. Por ejemplo, si la calibración del medidor de campo puesto de forma invertida se realiza en ausencia de carga espacial, es claro que habrá

cierto error de medición si el medidor de campo se usa más adelante cuando exista una capa de carga espacial cerca del nivel de tierra [29].

Los molinos cilíndricos de campo que operan en el plano del suelo se han utilizado con éxito durante la lluvia, la niebla y la nieve mediante la incorporación de elementos de calefacción de la sonda. [25].

La calibración de los molinos de campo colocado a ras con el plano de tierra se puede efectuar colocando una placa de energía por encima del molino de campo y utilizando el plano de tierra como la placa de fondo de un sistema de placas paralelas. Una forma de calibrar, es instalar un sistema de placas paralelas alimentado con un banco de baterías, el que se ha utilizado para tales calibraciones en el aire [25].

Los efectos del observador cercano durante las mediciones en el plano de tierra pueden conducir a valores de la intensidad de campo atenuado en ausencia de carga espacial y valores de intensidad de campo posiblemente pueda ser más precisa cuando no está presente la carga de espacio. En general, los efectos de la cercanía de un observador son una función de la distancia entre el observador, el lugar de medición, altura sobre el suelo, y el potencial eléctrico del observador [12].

3.3. Medición Indirecta de Campos Eléctricos Intensos (Medición de densidad de corriente)

3.3.1. Instrumentación y Principios de Operación

La medición de la componente vertical de la densidad de corriente J en la vecindad de las líneas de energía de corriente continua se realiza con una placa históricamente conocida como una placa o plato de Wilson [30], a nivel con el plano de tierra como se muestra esquemáticamente en la figura 3.7. La densidad de corriente promedio sobre el área de la placa (A), está dado por

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.5)$$

donde I = es la corriente medida

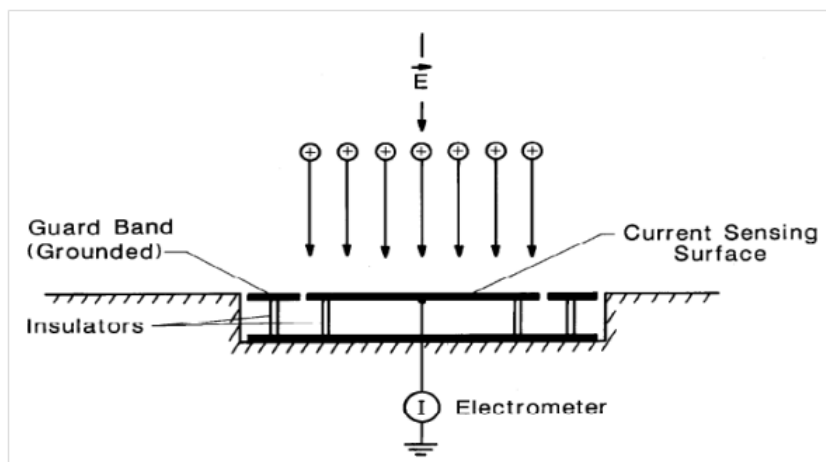


Figura 3.7: Vista esquemática de un plato de Wilson ubicado sobre el plano de tierra

El plato de Wilson debe estar aislado de tierra, pero no obstante se mantiene a potencial de tierra a través de la circuitería de electrómetro. Los platos de Wilson de 1 m x 1 m, por lo general utilizan bandas de guardia para reducir el campo marginal, éstos han sido comúnmente empleados para las mediciones de densidad de corriente cerca de las líneas HDVC [24]. Si es necesario, la sensibilidad de la medición de densidad de corriente se puede incrementar al aumentar el área de la placa de Wilson.

Los platos de Wilson que son de menor dimensión que los dispositivos de 1 m² utilizados al aire libre pueden emplearse en interiores. Por ejemplo, las placas de Wilson de 10 cm x 10 cm x 0,157 cm de espesor se han fabricado a partir de placas de cobre enchapadas en un circuito impreso y éste es utilizado para medir J en el aparato de placas paralelas [31].

3.3.2. Calibración de la Instrumentación.

Para la calibración de un sistema de medición de plato de Wilson, se requiere el conocimiento de las incertezas en los valores de la zona de detección (A) y la corriente medida (I) en la ecuación (3.3). La incertidumbre en el valor de A para una placa de Wilson puede hacerse más pequeña, reduciendo el espaciamiento entre la placa y la banda de seguridad y suponiendo que la zona “eficaz” se ubica en el punto medio de la brecha. El electrómetro se puede calibrar con un circuito de inyección de corriente que consiste en una resistencia adecuada con alto estándar, fuente de alimentación DC, y un voltímetro de precisión. La figura 3.8 muestra una vista esquemática simplificada del circuito de calibración; la corriente se calcula a partir de la ley de Ohm, $I = V/R$. Cabe señalar que la entrada del electrómetro se hace funcionar a potencial de tierra virtual durante

la calibración y así también con las siguientes mediciones de densidad de corriente. Las incertezas de medición en los valores de A e I se deben combinar (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados), con esto se obtiene la incertidumbre de la medición total.

Las miniaturas de platos de Wilson que se ubican sobre la superficie del plano de tierra pueden ser calibrados con campos eléctricos de frecuencia industrial en un aparato de placas paralelas con el fin de utilizarlas para la medición de J en interiores que emulan la alimentación de CC en torno de línea de transmisión [16], [31].

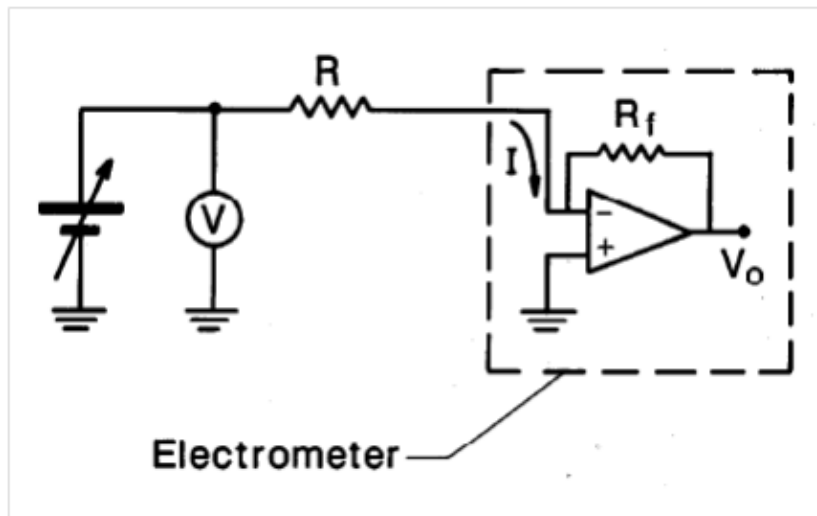


Figura 3.8: Vista esquemática de un circuito de inyección de corriente para calibrar un medidor usando un plato de Wilson

3.3.3. Mediciones

3.3.3.1. Mediciones de densidad de corriente en líneas

Gran parte de la discusión con respecto a las mediciones de la intensidad de campo en la línea de transmisión dicha anteriormente, se aplica a las medidas de densidad de corriente. En pocas palabras:

1. Los perfiles transversales pueden ser utilizados para caracterizar la densidad de corriente.
2. Los datos se pueden obtener durante un periodo prolongado para determinar el máximo, el mínimo, y la mediana de los valores de densidad de corriente para las distintas condiciones climáticas especificadas.
3. Una obtención automática de datos y sistema de almacenamiento y monitoreo de éstos controla las mediciones de densidad de corriente, por ello es necesario la instalación de platos de Wilson y de los sensores que indican las condiciones climáticas.
4. Las medidas representan los valores de densidad de corriente a nivel del suelo.
5. Las técnicas de medición son aplicables a áreas fuera de una estación convertidora donde es bien sabido que existen niveles significativos de carga espacial.

A corto plazo, las medidas tal vez menos automatizadas, con instrumentación portátil, que duran menos de una semana, también se puede realizar en los casos en que una base de datos completa

no es necesaria [24].

La figura 3.6 muestra los perfiles laterales de densidad de corriente obtenidos [12], la tensión de línea y la geometría, y el intervalo de tiempo de los perfiles de intensidad de campo eléctrico que se muestran en la figura 3.6. Los platos de Wilson utilizados para obtener los datos de la 3.6 fueron elevados 24 cm por encima del plano de tierra para evitar problemas con la precipitación, la vegetación y los insectos. Los valores reales de densidad resultantes al elevar las placas Wilson se han corregido a los valores a nivel de tierra [29].

NOTA: la mediana de los valores de densidad de corriente se indican con líneas continuas. Los percentiles 25 a 75 se indican con sombreado pesado, y los percentiles 5 a valores del percentil 95 se indican con sombreado claro.

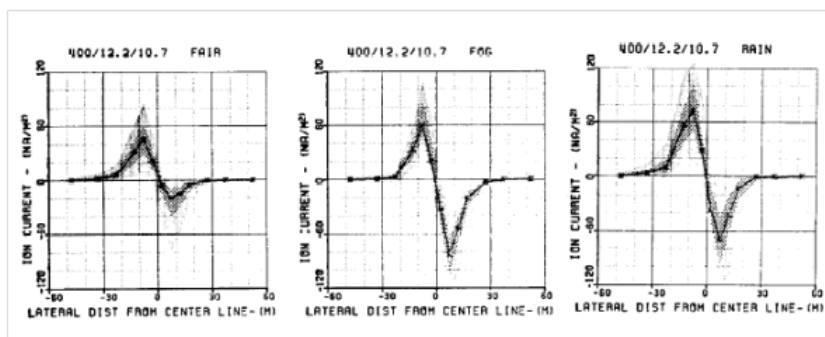


Figura 3.9: Perfil lateral de la densidad de corriente medidas a nivel de tierra en condiciones normales, niebla y lluvia [12].

3.3.3.2. Medidas de densidad de corriente.

La mayor parte de la discusión en 3.3.2 respecto de la intensidad de campo eléctrico interior se aplica a las mediciones de densidad de corriente interior actual. Por ejemplo, en ausencia de superficies y objetos cercanos que puedan cargarse en una forma impredecible, de las mediciones de la densidad de corriente de iones en el plano de tierra se espera que reflejen los valores de densidad de corriente nominales a largo plazo. Los prototipos de platos de Wilson pueden ser más convenientes para mediciones ya que proporcionarán una mayor resolución espacial que el dispositivo de 1 m^2 de uso común cerca de líneas HVDC.

3.3.4. Fuentes de Error.

Algunas de las precauciones que se deben considerar como parte del protocolo de medición durante largo tiempo al aire libre de intensidad de campo eléctrico son: verificar periódicamente el funcionamiento del instrumento, la calibración y la recopilación de datos; se aplican también a las mediciones de densidad de corriente J [25].

Aunque la medición de densidades de corriente parece sencilla, los errores sistemáticos pueden afectar su exactitud. Si el campo eléctrico en la superficie de la placa colectora cambia debido al cambio repentino de una sobrecarga, entonces esto conlleva a una variación en los resultados, lo que puede hacerla indistinguible de la densidad de corriente.

Las técnicas para la compensación de señales que resultan debido a los cambios en el campo eléctrico en la superficie del sensor se han descrito en la literatura. Estas técnicas incluyen la integración de la corriente durante períodos de tiempo conocidos para determinar el promedio de los valores de la corriente [24], [25], el uso de impedancia coincidente especial [32], y mediciones simultáneas del campo eléctrico adecuado y la resta de la corriente de desplazamiento de la corriente total [33]. Con el sistema de adquisición de datos utilizado para adquirir los perfiles laterales que se muestran en la Figura 3.6, el promedio de tiempo proporciona un valor promedio de J que está prácticamente libre de efectos por corrientes de desplazamiento.

Sin embargo, los valores máximos y mínimos de los valores de J pueden también estar influenciados por la corriente de desplazamiento. Los errores que resultan cuando el plato de Wilson es ubicado sobre el plano de tierra por razones prácticas, tales como: vegetación, precipitación e insectos pueden ser significativos. En tal caso, hay una mejora en la medida de campos eléctricos intensos y densidad de corriente en la superficie del plato de Wilson, tal cuando se utiliza un esquema como lo muestra la figura 3.10.

NOTA: La mejora geométrica del campo eléctrico para esta configuración resulta en una excesiva corriente que alcanza la superficie del sensor.

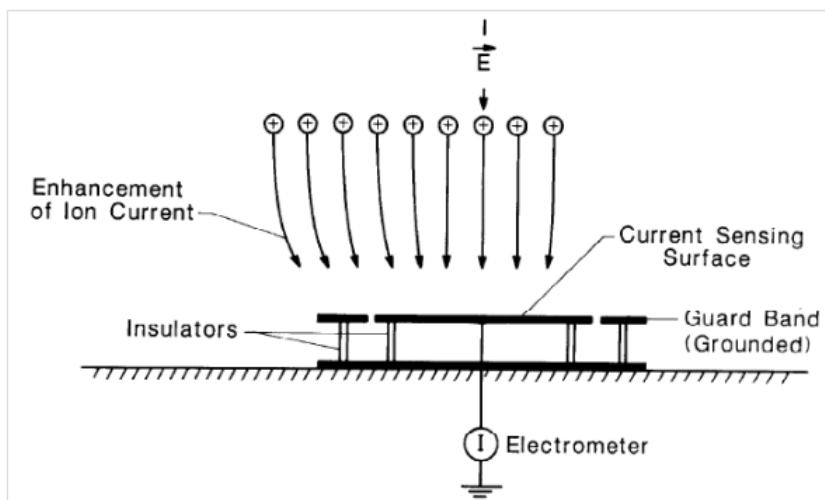


Figura 3.10: Vista Esquemática de un plato de Wilson colocado sobre el plano de tierra

Un estudio sistemático ha determinado los errores asociados con las medidas de J sobre el plano de tierra [24]. Esta investigación fue hecha en el laboratorio usando prototipos de platos de Wilson. Los resultados de este estudio están resumidos en la figura 3.11. En caso de poseer un cable de guardia se reduciría el exceso de corriente medida, no obstante, el error asociado al parámetro J puede ser considerable. Las mejoras a la configuración geométrica para un plato de Wilson dado fueron determinados usando campos eléctricos AC (60 Hz) y un campo DC. Bajo una línea de transmisión HVDC, los dos métodos debiesen dar el mismo resultado, tal como lo indica la figura 3.11. En esta figura, las curvas sólidas representan los datos obtenidos usando la técnica de campo AC, por otra parte, los datos de DC se muestran con puntos discretos. Por consiguiente, dada la configuración del plato de Wilson, el factor geométrico puede determinarse utilizando un sistema de platos paralelos energizados a 60 Hz [16], [31].

Cabe destacar que la acumulación de nieve sobre el plato de Wilson o aislantes en la superficie puede afectar su operación. Los elementos calefactores incorporados al interior de los platos de

Wilson previenen la acumulación de hielo y nieve [34]. El uso de un aislador en el centro del plato crea un efecto paraguas, lo que podría ser útil para la falta de corrientes entre el plato sensor y la tierra [25].

NOTA: Los parámetros a , c y d se indican en la figura 3.11. Las curvas se dibujan a través de datos obtenidos usando campos AC para así determinar mejoras. Los símbolos $+$ y \cdot indican datos de campos DC con carga. Las condiciones de operación DC fueron comparables con los encontrados en las líneas HDVC.

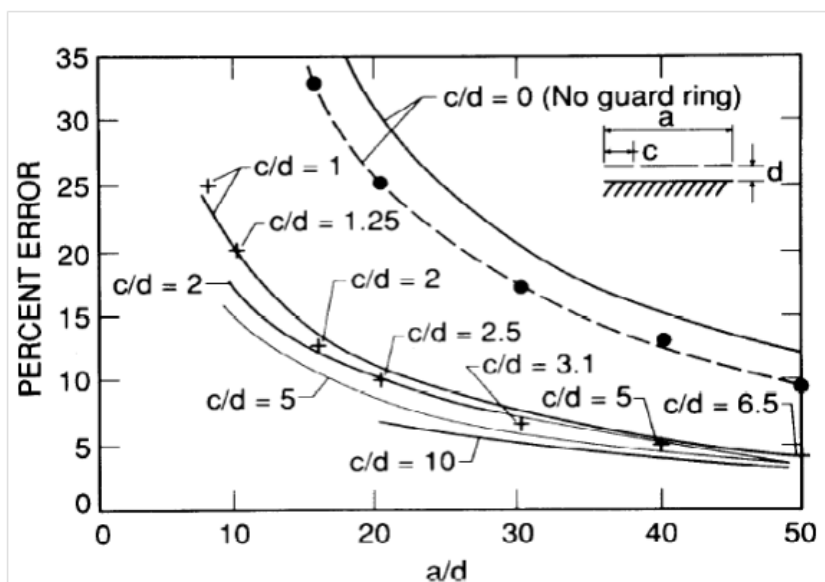


Figura 3.11: Errores dados por los sensores de corriente ubicados sobre el plano de tierra.

Capítulo 4

Análisis y comparación de medidores

A continuación se entrega la información recogida de la bibliografía referida a medidas efectuadas con 8 medidores, bajo ciertos criterios que luego definiremos. Para ello se utilizarán las medidas obtenidas de [35].

En general, todos los instrumentos utilizados en la comparación de pruebas de campo podrían ser clasificados como dispositivos de nivel de tierra: es decir, fueron diseñados para funcionar a, o cerca del nivel del suelo. Por lo general, se podría dividir en dos categorías:

1. los dispositivos de medida a nivel del suelo de campo eléctrico.

2. los dispositivos de medida a nivel del suelo de densidad de corriente [35].

Para efectos de este análisis se considerará el punto 1, tanto en el análisis de calibración como en las pruebas de estos instrumentos en las líneas HVDC.

4.1. Los instrumentos de campo eléctrico

En total se tiene información de 8 instrumentos diferentes usados en las pruebas, aunque no todos los instrumentos se han utilizado. Los diversos instrumentos utilizados se enumeran en la Tabla 4.1.

Medidor 1	Monroe, Inc. 225 United Power Association
Medidor 2	Monroe, Inc. 225 General Electric Co.
Medidor 3	Monroe, Inc. 245 Monroe, Inc.
Medidor 4	Trek, Inc. 320 Ohio State University
Medidor 5	Trek, Inc. 480 General Electric Co.
Medidor 6	Trek, Inc. 485 Trek, Inc.
Medidor 7	IREQ - IREQ
Medidor 8	GE Co. - General Electric Co.

Tabla 4.1: Lista de Medidores A Analizar.

Los primeros 6 son comercialmente disponibles, a pesar de que no han sido diseñados

específicamente para utilizarse en la medición de los campos eléctricos en líneas de transmisión HVDC. Todos estos medidores emplean sondas tipo “elemento vibratorio”, en el que se induce una señal en un pequeño electrodo expuesto a la vibración incidente del campo eléctrico a través de una abertura en un electrodo fijo de una pequeña distancia. La señal inducida es electrónicamente procesada para generar una salida directamente proporcional al campo eléctrico incidente.

La sonda tipo vibrante se usa principalmente en una disposición en la que el electrodo fijo esté a nivel con el plano del suelo, para así no perturbar el campo. Si este tipo de sonda se utiliza con el electrodo fijo, no a ras con el plano de tierra, se requiere una recalibración. (En tal uso se supone que la perturbación del campo, por no ubicarse la sonda a ras del suelo, equivale a la perturbación del campo en la instalación de calibración).

El medidor 7 IREQ es de tipo “campo-fábrica”, en el que una señal se induce en aspas de un electrodo rotativo que está expuesto alternadamente y protegido del campo incidente por medio de una placa fija situada a una pequeña distancia del electrodo giratorio. La placa fija es segmentada con aberturas en la superficie del electrodo de manera alternante y equidistante. El dispositivo se utiliza normalmente con la placa fija a ras con el plano de tierra. La señal inducida en las aspas giratorias se procesa electrónicamente para proporcionar una salida proporcional al campo incidente.

Finalmente, el medidor 8 es un prototipo a gran escala de la sonda “elementos de vibración”. La principal característica de este dispositivo son sus mayores dimensiones que puede hacer que sea más adecuado para mediciones al aire libre en condiciones de mal tiempo (por ejemplo, hay menos probabilidad de reducción de la brecha entre el plato vibratorio y los electrodos fijos por la lluvia o nieve).

Las referencias indican que el programa de pruebas realizadas se dividió en dos partes:

1. La calibración en un centro interior.
2. Comparación al aire libre durante el funcionamiento simultáneo cerca de una línea de prueba HVDC. La fase de calibración se dedicó a la obtención de un factor de escala para cada uno de los medidores de campo bajo las mismas condiciones, para luego ser utilizadas para interpretar mediciones de campo al exterior para fines de comparación.

La cámara de ensayo utilizado para la calibración del campo, se muestra en la figura 4.1. Su principio de operación se describe en el diagrama esquemático de la figura 4.2.

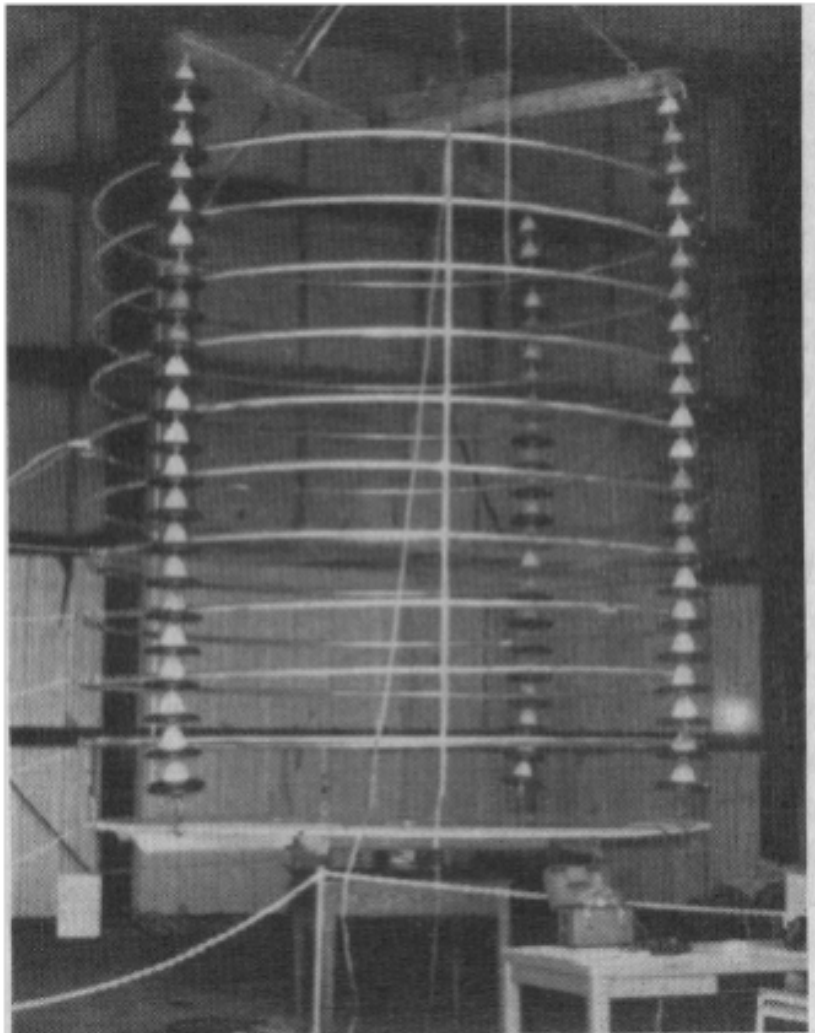


Figura 4.1: Cámara de ensayo utilizado para la calibración [35]

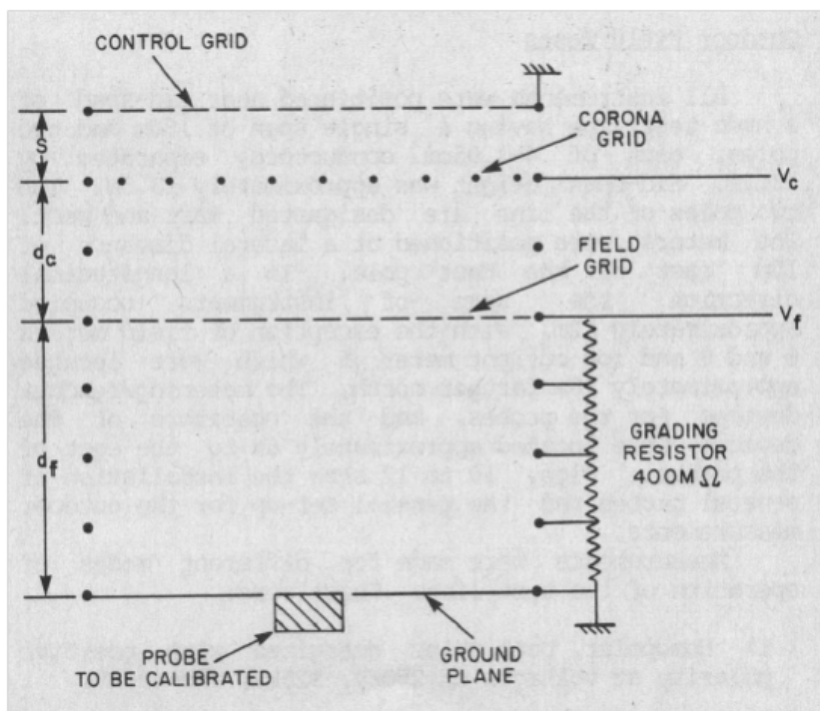


Figura 4.2: Esquema utilizado para calibración [35]

La cámara cilíndrica es de aproximadamente 3 m de diámetro. Tanto la red de control y la red de campo se fabrican a partir de malla de alambre de 2,5 cm. La tabla corona se compone de diez alambres de diámetro 0.1625 cm de cobre. La rejilla de control y la rejilla de campo se energizan desde fuentes dc de alimentación independiente. Por electrostática, la rejilla corona se desconecta y un voltaje conocido V se aplica a la rejilla de campo para proporcionar un campo uniforme de V_f/d respecto al electrodo de tierra. Los electrodos intermedios entre la red de campo y el electrodo de masa se utilizan para evaluar el potencial dentro de esta región. La sonda del medidor de campo está montada para ser utilizada en el campo al aire libre (es decir, si la sonda está prevista para funcionar sobre el plano de tierra), entonces se puede montar en el electrodo de tierra de la cámara de calibración. Las lecturas se obtuvieron para cada una de las sondas de campo para campos libres de carga de espacio, de ambos polaridades, hasta $75 (kV/m)$. El mejor ajuste lineal a las lecturas

(forzado a pasar a través del origen) se utilizó para derivar un factor de escala para cada medidor.

La cámara de calibración también se utilizó para generar campos en la presencia de iones generados por corona, con una gama de campos resultantes que consiste de varias combinaciones de campo electrostático y el campo de carga de espacio. Una tensión V ($|V_c| > |V_f|$) aplicado a la cuadrícula corona resulta en iones (positivos si V es positivo) que fluyen desde la red corona hacia el electrodo de control y la cuadrícula de campo. Algunos de los iones son capturados por la red de campo, pero los que penetran entonces se verán acelerados por el campo hacia el electrodo de tierra. La densidad de corriente de iones en el electrodo de masa se puede variar mediante el ajuste de los voltajes V_c y V_f y/o los espaciamentos s , d , y d_f . Para estas pruebas, se mantuvieron las distancias y los voltajes aplicados se variaron para obtener el rango deseado de campo y de iones de las condiciones actuales. El procedimiento general fue establecer V para proporcionar el campo electrostático necesario, a continuación, ajustar V hasta que se produjera la densidad de iones de corriente deseado. En la práctica, la fracción de la corriente generada recogida por la red de campo influye en el valor de V . Para estas pruebas, el valor real de V no se registraba y, por consiguiente, los valores de campo electrostático reportado en la sección de resultados de este documento se refieren al campo electrostático “nominal” o “preset”. Las lecturas del medidor se obtuvieron para carga espacial relacionados con la densidad de corriente de iones que van de 0 a 750 nA/m superpuesta a campos electrostáticos que van desde 0 a 75 kV/m.

En las pruebas de campo al aire libre, los instrumentos fueron colocados cerca de la mitad del tramo de una línea de prueba HVDC de dos polos, cada uno de 4 conductores con diámetro igual a 3.05 cm., separados estos polos por 13.2m. En el tramo intermedio la altura era de aproximadamente 13.5 m. Los dos polos de la línea se han designado como Oriente y Occidente.

4.2. Resultados de pruebas de calibración [35]

. Las medidas de calibración informadas en [35] se realizaron en 8 de los 9 medidores de campo listados en la Tabla 4.1. Las sondas “Sobre-tierra” sólo se pueden calibrar en esta línea si la distorsión del campo no ocurre a lo largo de la cámara de campo: es decir, si sólo a cierta distancia por debajo de la rejilla de campo el campo permanece inalterado cuando la sonda se introduce en el suelo. Para que esto suceda, la altura del conjunto de sonda debe ser pequeña en comparación con la altura de la cámara de campo, o el elemento sensible de la sonda debe estar contenido en un plano de tierra grande.

Para esta disposición, se puede suponer razonablemente que el campo eléctrico en la proximidad de la cabeza de la sonda no está distorsionado. Por consiguiente, era apropiado utilizar un campo de calibración eficaz con una altura de la cámara de 113.5cm en lugar de la altura 120 cm utilizado para todas las sondas. Dos medidores (3 y 6) fueron calibrados con la sonda situada en el electrodo de tierra.

Los medidores fueron entonces expuestos a una gama de campos combinados, compuestas de diferentes combinaciones de campo electrostático y campo de carga espacial [35]. Las lecturas obtenidas por cada medidor fueron luego ajustados por el factor de escala determinado previamente. Las lecturas ajustadas representan el campo eléctrico total (Combinación de carga electrostática espacial) como es medido por ese instrumento. Todos los medidores se expusieron a idénticas condiciones de campo durante sus calibraciones. Los resultados están dados en las tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5.

Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
1	8,3	50	5	9	50
	11	100		12,1	100
	16,1	200		17	200
	19	300		21	300
	25	500		27,1	500
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
2	8,4	50	6	7,7	50
	12	100		10,8	100
	16,4	200		14,5	200
	20,8	300		18	300
	25,3	500		23,8	500
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
3	7,8	50	7	8,1	50
	11,8	100		11,9	100
	16,2	200		16,1	200
	20,2	300		19,5	300
	25,2	500		24,9	500
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
4	8,3	50	8	8,2	50
	11,7	100		12,2	100
	16,2	200		16,6	200
	20	300		20,9	300
	25,1	500		27,3	500

Tabla 4.2: Medidas de Campo Eléctrico Con Campo Eléctrico Negativo Estático Nulo [35]

Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
1	7,8	50	5	10	50
	12,5	100		15,3	100
	18,4	200		22	200
	23,8	300		26	300
	32,5	500		32,3	500
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
2	10,3	50	6	10	50
	14,2	100		14	100
	20,8	200		19,2	200
	22	300		23	300
	31,1	500		29,3	500
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
3	11	50	7	10	50
	14,8	100		14	100
	20,8	200		20	200
	25	300		23,4	300
	31	500		30	500
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
4	11,3	50	8	10,2	50
	15,2	100		15	100
	21,5	200		21,3	200
	25,8	300		25,6	300
	33	500		34	500

Tabla 4.3: Medidas de Campo Eléctrico Con Campo Eléctrico Positivo Estático Nulo [35]

Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
1	9	0	5	10,2	0
	12,8	100		14,7	100
	18,7	300		21,1	300
	30,6	750		32,4	750
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
2	10	0	6	9,8	0
	14,2	100		13,4	100
	20,6	300		19	300
	31,1	750		29	750
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
3	10,8	0	7	9,8	0
	14,3	100		14,4	100
	20,3	300		19,8	300
	30,9	750		30,6	750
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
4	10,2	0	8	10	0
	14,5	100		14,6	100
	20	300		21	300
	31,1	750		32	750

Tabla 4.4: Medidas de Campo Eléctrico Negativo Estático igual a 10 Kv/m [35]

Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
1	8,4	0	5	10	0
	14,6	100		16	100
	23,4	300		25	300
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
2	10,3	0	6	10,2	0
	15,8	100		15,4	100
	23,2	300		23	300
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
3	10,2	0	7	10	0
	16	100		16,2	100
	24,4	300		24	300
Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$	Medidor	Medida(KV/m)	$J(nA/m^2)$
4	9,6	0	8	9,4	0
	15,8	100		16,1	100
	24,2	300		25	300

Tabla 4.5: Medidas de Campo Eléctrico Positivo Estático igual a 10 Kv/m [35]

Hay una considerable variedad en las medidas, es decir, de varios medidores de tipo de elementos vibración (de tres fabricantes diferentes) y un molino de campo. No existen diferencias obvias, con la excepción de uno de los medidores (medidor 6) cuya sonda se colocó en el plano de tierra en lugar de ser empotrado (este medidor particular se encontró que exhibía problemas operativos, por lo que sus datos de calibración podría ser considerado sospechosos). Esto sugiere que para las condiciones eléctricas examinadas, las lecturas se realizan con la densidad de corriente controlada, en caso de que los errores se introdujeran por densidad de corrientes en los medidores de campo, éstas deben ser proporcionales para todos instrumentos.

Los valores fueron tomados de [35]. Dadas todas las mediciones se establecerá un criterio para saber cuál o cuáles de los medidores en cuestión posee mayor estabilidad en las medidas, para poder estandarizar y tomar una correcta decisión se basará en la ecuación física siguiente:

$$E = E_0 + \frac{J}{\sigma} \quad (4.1)$$

Donde E es el campo medido, E_0 es el campo electrostático, J la densidad de corriente y σ es la conductividad del medio. Para ello se correlacionará utilizando el método de los mínimos cuadrados para cada medidor en cada condición de J y E_0 . El factor a usar será el coeficiente de correlación R^2 (ver apéndice) el cual mientras más cercano a 1, más correlacionados están los datos, de tal forma que se ajustan a 4.1. Dicho esto, cada medidor tendrá 4 coeficientes de determinación, de los cuales se obtendrá un promedio, a mayor promedio, se dirá que el medidor es más estable dadas las distintas condiciones. Los valores obtenidos se resumen en la tabla 4.6. Donde los casos representan:

- **Caso 1:** Medidas de Campo Eléctrico Con Campo Eléctrico Negativo Estático Nulo.
- **Caso 2:** Medidas de Campo Eléctrico Con Campo Eléctrico Positivo Estático Nulo.
- **Caso 3:** Medidas de Campo Eléctrico Negativo Estático igual a 10 KV/m .
- **Caso 4:** Medidas de Campo Eléctrico Positivo Estático igual a 10 KV/m .

Medidor	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Promedio
1	0,983	0,985	0,997	0,992	0,9893
2	0,965	0,964	0,987	0,989	0,9763
3	0,967	0,964	0,994	0,993	0,9795
4	0,974	0,975	0,992	0,989	0,9825
5	0,971	0,944	0,989	0,994	0,9745
6	0,964	0,971	0,992	0,993	0,9800
7	0,976	0,966	0,988	0,985	0,9788
8	0,968	0,977	0,987	0,988	0,9800

Tabla 4.6: Correlaciones obtenidas en las distintas configuraciones

De aquí se puede deducir que el medidor número 1 (en negrita) es el más estable en promedio, considerando que en los tres primeros casos es mejor correlacionado que los otros 7 medidores. En segundo lugar se encuentra el medidor 4 (en negrita). Los principales factores de error a considerar son:

- Factor Humano
- La conductividad no necesariamente es constante, pues la densidad del aire no es homogénea.
- Efecto Corona
- Interacción electrostática de los medidores con las sondas, y entre medidores.

4.3. Resultados de pruebas en línea HVDC [35]

Las mediciones se realizaron para el modo de operación monopolar, con el polo Oeste a tierra y el polo Este energizado con polaridad positiva a voltajes de 250, 325, 400, 475, 550, y 625kV.

Para cada condición de prueba (modo de funcionamiento y nivel de tensión), se tomó una serie de diez lecturas en cada medidor durante un periodo de 5 minutos. En una tentativa de minimizar las diferencias debidas a variaciones en el campo densidad de corriente, a los operadores se les pidió hacer mediciones sólo en una señal de “lectura” de una persona que actúe como coordinador de las mediciones.

Estos contadores se conectaron a un sistema de adquisición de datos por computadora que toman muestras de datos entrantes, una vez cada minuto. Los datos para los medidores fueron recuperados en registros informáticos de una fecha posterior para la comparación con los otros instrumentos. Los promedios obtenidos se muestran en la tabla 4.7:

Medidor	250 KV	325 KV	400 KV	475KV	550KV	625KV	R^2
1	8,1	14,4	16,5	19,6	20,6	24,9	0,952
2	9,4	15,1	17,4	19,3	25,1	28,3	0,977
3	8,9	14,6	17,9	20,1	27,3	32,4	0,978
4	10,2	13,5	15,6	20,2	25,7	29,2	0,982
5	7,6	12,7	15,1	17,1	23,5	27,5	0,975
7	8,2	13,4	17,0	17,9	25,5	30,1	0,967
8	7,0	8,9	12,3	16,2	16,3	18,5	0,956

Tabla 4.7: Valores de Campo Eléctrico en (kV/m) para líneas de HVDC en configuración monopolar.

Dada la directa proporcionalidad entre el campo eléctrico y el voltaje que posee la línea, se puede establecer una relación afín como en el caso anterior, para ello se utilizará nuevamente el método de los mínimos cuadrados, los coeficientes de determinación R^2 . De la tabla, se puede colegir que el medidor 4, posee mejor determinación entre campo eléctrico y voltaje. Cabe notar que en la tabla 4.7 no está incluido el medidor 6, pues tuvo problemas de operación.

Otra cosa importante, es que dadas las medidas anteriores, se puede establecer una interacción entre los modelos anteriores y el efecto corona, para ello se considerará el modelo calculado para el efecto corona considerando carga libre espacial, obtenido de [25]. La ecuación está dada por:

$$V_c = 32,609E \quad (4.2)$$

Donde V_c es el voltaje corona medido en kV y E es el campo eléctrico medido en kV/m , para

poder evaluar la estabilidad de las medidas otorgadas por los medidores en las pruebas de la tabla 4.7. Para ello el modelo afín que tiene la forma $V = aE + b$ donde E es el campo eléctrico medido y V es el voltaje teórico de la línea HVDC. Los valores de a y b de los medidores se muestran en la tabla 4.8.

Medidor	a	b
1	23,648	27,208
2	20,286	50,040
3	16,274	108,750
4	18,945	76,278
5	19,122	107,652
7	17,296	114,357
8	30,017	41,273

Tabla 4.8: Parámetros del modelo afín por medidor.

El parámetro dado por a representa la pendiente de la recta obtenida por el método de los mínimos cuadrados, si comparamos con la pendiente de la ecuación (4.2) el valor más cercano (con un 7,95 % de error) es el dado por el medidor 8, el cual utiliza el método de plato de Wilson. Cabe notar que b es no nulo por lo dicho anteriormente sobre la existencia de densidad de carga espacial que en general es un parámetro no constante.

4.4. Procedimiento

Los instrumentos debiesen operar sobre el plano de tierra debido a que la distancia a la línea debe ser relativamente fija, sin embargo, el instrumento de medición puede ser usado sobre un atril, esto y la geometría existente deben ser mantenidas y consideradas a la hora de obtener los datos.

Algunas de las consideraciones previas a la calibración que se deben tener en cuenta son:

- Factores climáticos (lluvia, humedad, pasto, etc).
- El recolector de datos debe estar lo suficientemente alejado para evitar perturbaciones eléctricas, puesto que actuamos como carga.
- A la hora de la adquisición del instrumento es importante considerar las dimensiones de éste, para que en caso de distribuciones de carga espacial u otra fuente de carga no perturben de manera significativa la obtención de datos.

En la calibración en el plano de tierra, se debe tener en consideración:

- El instrumento debe estar alineado al plano de tierra.
- El radio del agujero necesario para la instalación del instrumento debe ser al menos la tercera parte de la distancia entre platos (en caso de que el instrumento escogido funcione bajo esta

modalidad). Con ello se obtiene alrededor de un 0,5 % de error al calcular el campo eléctrico con la relación $E = V/d$.

En el caso de la calibración sobre el plano de tierra, se debe tener claro que ya sea con o sin carga espacial las medidas pueden ser afectadas por las cargas imagen de los conductores de las líneas HDVC, por otra parte un factor que puede ser determinante es el efecto de la sonda, pues esta genera auto-carga y descargas de sobretensión, lo que conlleva a que el material del cual está fabricada la sonda debe ser tal que minimicen estos efectos, tales como el polonio.

Capítulo 5

Conclusiones

Se ha efectuado una revisión de equipos y procedimientos publicados en la literatura para medir campos eléctricos en líneas HDVC. En base a la información recogida, este procedimiento consistió en tabular los datos de las mediciones hechas bajo diferentes condiciones, tales como: sin campo electrostático, campos electrostáticos positivos y negativos de $10 \text{ KV}/m$; luego de esto se aplicó un cálculo estadístico a las lecturas conocido como coeficiente de correlación (Ver Anexo A) y evaluar para cada condición de lectura del medidor si estos están cercanos a 1 (es decir, correlacionados bajo un modelo de función afín). Este procedimiento puede ser utilizado (idealmente con datos actualizados) para evaluar la estabilidad de un medidor de campo eléctrico en sistemas de transmisión HVDC. Esto es muy importante, pues al no existir estos dispositivos en nuestro país, es de sumo valor tener mecanismos a la hora de elegir cual instrumento de medida y saber en base a pruebas certificadas las medidas obtenidas. Estas pruebas se tomaron de referencias bibliográficas y son:

1. Medidas de calibración considerando campos electrostáticos y densidad de corriente espacial no nula.
2. Medidas en líneas HVDC y evaluación de estabilidad del efecto corona.

Por otra parte los modelos obtenidos de regresión lineal son bastante buenos, debido a que los coeficientes de determinación (R^2) son mayores a 0,95 que en la estadística representa un modelo confiable. Para la calibración de los instrumentos se concluyó que los instrumentos más estables son el medidor 1 (Monroe, Inc. 225 United Power Association) y el medidor número 4 (Trek, Inc. 320 Ohio State University) ambos utilizan el mecanismo de vibración de plato de Wilson. Sin embargo, la estabilidad considerando las medidas de campos eléctricos en las líneas la poseen los medidores 3 y 4. Y finalmente los medidores 1 y 8 para la estabilidad en determinar la magnitud del efecto corona.

No cabe duda, que estimar los valores de los campos eléctricos es muy importante para el impacto ambiental de un proyecto en el cual se trabaje en un sistema de corriente continua en alta tensión. De lo dicho en el capítulo 3, los protocolos de prueba, condicionantes y posterior medición son muy importantes a la hora de medir la magnitud de campo eléctrico.

Como trabajo a futuro hay bastante, primero que todo hacer un estudio similar a este con medidores de densidad de corriente, considerando quizás una mayor cantidad de datos teóricos con medidores que actualmente estén en el mercado. Por otra parte, existen otros métodos de mediciones indirectas que existen en la literatura, tales como:

1. *Conductividad*
2. *Densidad de Carga Monopolar*

3. Densidad de Carga Espacial

En el primer caso de medición indirecta se utiliza medir la movilidad (que está relacionada directamente con la conductividad), para ello se utiliza un tubo de Gerdien [41], por otra parte, en el segundo se usa un Contador de Iones en Placas Paralelas, y en el último tipo de medida, se emplea una caja de Faraday [12]. Además, incluir la parte económica a la hora de evaluar qué tipo de medidor de campo eléctrico, y porque no construir alguno en nuestro país.

Bibliografía

- [1] Vijay K. Sood, HDVC and FACTS Controllers. Kluwer Academic Publishers. 2004.
- [2] J. Frau, Automática e Instrumentación, Transporte de energía eléctrica en CC: HDVC, Abril 2005/n 361.
- [3] A. Aycaguer, Rectificadores Controlados, 2009, Apunte de Clase, Electrónica de Potencia, U. De Chile.
- [4] HVDC Proyects Listing. IEEE Tranmission and Distribution Committee.
- [5] Anexo 5 Efecto Corona en Líneas de Transmisión, Declaración de Impacto Ambiental: Modificación Línea existente 66 kV. Charrúa Cabrero.
- [6] Z. Li, G. Li, J. Fan and Yin Yu, Corona Onset Voltage of Bipolar Bundle Conductor of HVDC Tranmission Line, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol 2 N°2 pp. 693-702 Abril 2011.
- [7] F. Peek, Dielectric Phenomena In High Voltage Engineering. New York: McGraw-Hill, 1929.
- [8] Lings, R. Updating the EPRI Transmission Line Reference Book. EPRI California: s.n 2004.
- [9] Partial Discharge XIX: Discharge in Air Part I: Physical Mechanism. Giao, Trinth N. 2, 1995, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 11.

- [10] Maruvada, P. Sarma. Corona Performance of High Voltage Transmission Lines. Filadelfia: Research Studies Press Ltd., 2000. 0 86380 254 0.
- [11] Derakhshanian Mahin. Simulations Numériques des Vibrations Induites par Effet de Couronne Sur un Court Conducteur Soumis à une Pluie Artificielle. 2001.
- [12] IEEE Guide for the Measurement DC Electric Field Strength and Ion Related Quantities, std 1227-1990.
- [13] Secker, P. E. and Chubb, J. N. Instrumentation for Electrostatic Measurements. Journal of Electrostatics. Vol 16, 1984, pp. 1-19.
- [14] Vosteen, R. E., DC Electrostatic Voltmeters and Fieldmeters Conference Record of Ninth Annual Meeting of the IEEE Industrial Applications Society. Octubre 1974
- [15] Fry, T.C Two problems in Potential Theory American Mathematical Monthly. Vol 39, 1932, pp 199-209.
- [16] Misakian, M., Calibration of Flat 60 Hz Electric Field Probes Bioelectromagnetics. Vol 5, 1984, pp 447-450.
- [17] Takuma, T., Kawamoto, T., y Sunaga, Y. Analysis of calibration Arrangements for AC Field Strength Meters. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. Vol PAS-104, 1985, pp 489-496.
- [18] Misakian, M., Calibration of flat 60 Hz Electric Field with space charge. Journal of Applied Physis. Vol 52, 1981, pp. 3135-3144.
- [19] Misakian, M., McKnight, R., Fenimore, C. Calibration of Aspirator Type Ion Counters and Measurement of Unipolar Charge Densities. NBS Technical Note 1223, 1986.
- [20] Misakian, M., McKnight, R., Fenimore, C. Calibration of Aspirator Type Ion Counters and Measurement of Unipolar Charge Densities. Journal of Applied Physis. Vol 61, 1987, pp. 1276-1287.

- [21] Johnston, A. R., Kirkham, H., and Eng, B. T. dc electric Field meter with Fiber-optic readout. *Review of Scientific Instruments*. vol. 57, 1986, pp. 2746-2753.
- [22] IEEE Std 644-1987, IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines.
- [23] Electrostatic and Electromagnetic Effects Working Group Paper. Measurement of Electric and Magnetic Fields From Alternating Current Power Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. PAS-97, 1978, pp. 1104-1114.
- [24] Bracken, T. D., Capon A. S., and Montgomery, D. V. Ground Level Electric Fields and Ion Currents on the Celilo-Sylmar 400 kV DC Intertie During Fair Weather. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. PAS-97, March/April 1978, pp. 370-378.
- [25] Chartier, V.L., Dickson, L. D., Lee, L. T., and Stearns, R. D. Performance of A Long-Term Unattended Station for Measuring DC Fields and Air Ions From An Operating HVDC Line. Paper 88 SM 560-5, 1988, IEEE Summer Power Engineering Society Meeting, Portland, OR.
- [26] EPRI Report EL-2419, HVDC Transmission Line Research. Interim Report for Research Project 1282-2, May 1982.
- [27] Johnston, A. R. and Kirkham, H. A Miniaturized Space Potential D.C. Electric Field Meter. *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 4, n. 2, 1989, pp. 1253-1261.
- [28] Gathman, S.G. and Trent, E.A. Absolute Electric Field Measurements Using Field Mills. NRL Report 6538, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., April 1967.
- [29] Johnson, G.B. Electric Fields and Ion Currents of a 400 kV HVDC Test Line. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. PAS-102, 1983, pp. 2559-2568.
- [30] Chalmers, J.A. The Measurement of the Vertical Electric Current in the Atmosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. vol. 24, 1962, pp. 297-302.

- [31] McKnight, R.H., Kotter, F.R., and Misakian, M. Measurement of Ion Current Density at Ground Level in the Vicinity of High Voltage DC Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-102, 1983, pp. 934-941.
- [32] Kasimer, H.W. and Ruhnke, L.H. Antenna Problems of Measurement of the Air-Earth Current. Recent Advances in Atmospheric Electricity-Proceedings of the Second Conference on Atmospheric Electricity. Smith, L.G., ed. Portsmouth, N.H.: Pergamon, 1958.
- [33] Hutchison, W.C.A. Atmospheric Electric Field Charge Compensation When Measuring Air-Earth Conduction and Precipitation Currents. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. vol. 28, 1966, pp. 823-830.
- [34] EPRI Report EL-2419, HVDC Transmission Line Research. Interim Report for Research Project 1282-2, May 1982.
- [35] Comber, M, Kotter R., and McKnight, R. Experimental Evaluation Of Instrument For Measuring DC Transmission Line And Ion Currents IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, Vol. PAS-102, N 11, Nov 1983.
- [36] Smiddy, M. and Chalmers, J.A. The Double Field-mill. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. vol. 7, 1958, pp. 206-210.
- [37] Gathman, S.G. Guarded Double Field Meter. Review of Scientific Instruments. vol. 39, 1968, pp. 43-47).
- [38] Maruvada, P.S., Dallaire, R. D., and Pedneault, R. Development of Field-Mill Instruments for Ground- Level and Above Ground Electric Field Measurement Under HVDC Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. vol. PAS-102, 1983, pp. 738-744.
- [39] Kirkham, H., Johnston, A., Jackson, S., and Sheu, K. AC and DC Electric Field Meters Developed for the U. S. Department of Energy, Department of Energy. Report No. DOE/ET 29372-7, Jet Propulsion Laboratory Report No. 87-20, February 1987.

Bibliografía

- [40] Morse, P.M. and Feshbach, H. *Methods of Theoretical Physics, Part II*. New York: McGraw Hill, 1953, p. 1245.
- [41] *Journal of Electrical Engineering*, Vol 57. N° 8/S, 2006, 62-65.

Anexo A

Regresión lineal por el método de los mínimos cuadrados

Mediante el cálculo diferencial se trata de obtener una recta de estimación de la forma $y = ax + b$, para la ecuación de y sobre x , eligiendo a a y b que minimizan el error denotado por la letra e :

$$e = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (\text{A.1})$$

Al derivar parcialmente con respecto a a y b e igualando a 0 queda:

$$nb + a \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad b \sum_{i=1}^n x_i + a \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (\text{A.2})$$

Se resuelve y se obtienen los valores de a y b .

Para el coeficiente de correlación, éste se calcula

$$R^2 = \frac{cov(x, y)^2}{s_x^2 \cdot s_y^2} \quad (\text{A.3})$$

Donde $cov(x, y)$ es la covarianza de las variables, y s_x con s_y son las desviaciones típicas de las variables x e y .