

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - CHILE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Desarrollo, diseño e implementación de un equipo para
detección preventiva del estado de aisladores tipo cadena
para aplicaciones de alta tensión

por

Rodrigo Javier Villalobos San Martín

Profesor guía

Luis Morán Tamayo

Concepción, Mayo de 2024

Tesis presentada a la

ESCUELA DE GRADUADOS
DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN



para optar al grado de

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON MENCIÓN
EN INGENIERIA ELÉCTRICA

Desarrollo, diseño e implementación de un equipo para detección preventiva del estado de aisladores tipo cadena para aplicaciones de alta tensión

Rodrigo Javier Villalobos San Martín

Una Tesis del
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Presentada en Cumplimiento Parcial de los Requerimientos del Grado de
Doctor en ciencias con Mención en Ingeniería Eléctrica de la Escuela de
Graduados de la Universidad de Concepción, Chile

Mayo 2024

© Rodrigo Javier Villalobos San Martín, 2024

Resumen

El problema de conocer el nivel de contaminación sobre la superficie de los aisladores en instalaciones de alta tensión es de vital importancia, ya que la programación de los lavados es realizada principalmente en base a la experiencia, lo que no asegura que el sistema eléctrico esté libre de fallas ni tampoco de que la frecuencia de los lavados se realice de manera eficiente desde un punto de vista de costos. Aunque existen diversas soluciones para determinar el nivel de la contaminación en aisladores, la que parece ser la más recurrente es el análisis de la corriente de fuga. El aumento de la amplitud y de la distorsión de la corriente que circula por el aislador presenta una relación directa con el aumento de la contaminación y la humedad.

Por otro lado, la literatura presenta una serie de índices basados en la corriente de fuga como el valor efectivo, *peak*, THD y relaciones entre armónicos; que buscan determinar el nivel de contaminación sobre la superficie de los aisladores. En general, el resultado de los índices y su desempeño depende de diferentes variables como la humedad y la contaminación, pero también del tiempo de aplicación de la humedad y variables externas, por lo que es muy relevante el instante en el que se realiza la medición de corriente de fuga y el cálculo de estos índices. En aplicaciones industriales la humedad varía considerablemente y las mediciones de corriente de fuga pueden no ser continuas en el tiempo.

Por otra parte, para medir la corriente de fuga en cadenas de aisladores la literatura muestra diferentes soluciones principalmente orientadas a aplicaciones en laboratorio, la mayoría de tipo invasivo por lo que no son soluciones reales que sean atractivas para implementar en la industria.

Este trabajo presenta el desarrollo, diseño e implementación de un sistema para determinar el nivel de contaminación en aisladores tipo cadena. El sistema propuesto consta de un sensor de corriente de fuga tipo tenaza con núcleo de material ferromagnético abierto capaz de medir corrientes de fuga de baja amplitud, que no afecta la distancia de fuga de la cadena de aisladores y tampoco afecta la aislación al ser no invasivo. Este sensor es probado en laboratorio, también en un aislador dentro de una cámara de niebla artificial y en una subestación de alta tensión. Los resultados muestran que el sensor mide correctamente corrientes de fuga mostrando amplitudes del orden de los miliamperes y una relación directa con la humedad registrada. La tesis incluye un análisis detallado del efecto de la humedad y la contaminación en índices presentados en la literatura para determinar el nivel de contaminación sobre la superficie de los aisladores. El análisis de los parámetros de la corriente de fuga se realiza en función del tiempo y se destaca la importancia del tiempo de exposición

de la capa de contaminación de la superficie a la humedad. También, se introduce el concepto de impedancia armónica en aisladores, con tal de observar la evolución de la magnitud en el tiempo donde se destaca que algunos armónicos de la corriente de fuga son propios del efecto de la humedad y la contaminación en el aislador como otros que dependen de variables externas como el voltaje de la red. Finalmente, este trabajo muestra el resultado de la medición de variables ambientales y de corriente de fuga por medio del sistema diseñado en una subestación de 220 kV y en 4 puntos de medición en distintas líneas de alta tensión de 220 y 500 kV en el norte de Chile.

La principal contribución de este trabajo se centra en el diseño e implantación de un sensor de corrientes de fuga no invasivo, para aplicaciones en aisladores tipo cadena, y de un procedimiento de análisis detallado del comportamiento de la corriente de fuga que sirve para determinar el nivel de contaminación, lo que permite definir procedimientos de mantenimiento adecuados.



Summary

The problem of knowing the level of contamination on the surface of high voltage insulators is critical. Washing scheduling is mainly done on the basis of experience, which does not ensure that the electrical systems are free of faults or that the frequency of washing is cost-efficient. Although there are various solutions for determining the level of contamination in insulators, leakage current analysis is the most commonly used method. The increase in amplitude and distortion of the current flowing through the insulator is directly related to the increase in contamination and humidity.

On the other hand, the literature presents a series of indices based on the leakage current, such as RMS, peak, THD and harmonic ratios, which attempt to determine the level of contamination on the surface of the insulators. In general, the result of the indices and their performance depend on different variables such as humidity and contamination, but also on the time of application of the humidity and external variables, so the time at which the leakage current measurement and the calculation of these indices are performed is very relevant. In industrial applications, humidity varies considerably and leakage current measurements may not be continuous over time.

On the other hand, to measure the leakage current in insulator strings, the literature shows different solutions mainly oriented to laboratory applications, most of them invasive, so they are not real solutions that are attractive to implement in the industry.

This work presents the development, design and implementation of a system to determine the level of contamination in string insulators. The proposed system consists of a clamp-type leakage current sensor with an air gap ferromagnetic core that is capable of measuring low amplitude leakage currents that do not affect the leakage distance of the insulator string and do not affect the insulation since it is non-invasive. This sensor is tested in the laboratory, including on an insulator in an artificial fog chamber and in a high-voltage substation. The results show that the sensor correctly measures leakage currents with amplitudes in the order of milliamperes and a direct relationship to the recorded humidity.

The thesis includes a detailed analysis of the effect of humidity and contamination on the indices presented in the literature to determine the level of contamination on the surface of the insulators. The analysis of the leakage current parameters as a function of time is performed and the importance of the exposure time of the surface contamination layer to moisture is highlighted. Also, the concept of harmonic impedance on insulators is introduced in order to observe the evolution of the magnitude over time, where it is highlighted that some harmonics of the leakage current are due to the effect of

moisture and contamination on the insulator, as well as others that depend on external variables such as the mains voltage. Finally, this work shows the result of the measurement of environmental variables and leakage current by means of the system designed in a 220 kV substation and in 4 measuring points in different high voltage lines of 220 and 500 kV in the north of Chile.

The main contribution of this work focuses on the design and implementation of a non-invasive leakage current sensor for applications in string-type insulators and a detailed analysis procedure of the leakage current behavior to determine the level of contamination, which allows the definition of appropriate maintenance procedures.





A los interesados en aislación eléctrica de alta tensión.

Agradecimientos

A Beca ANID por su aporte a la realización de este doctorado y tesis. A los proyectos Fondef IDeA ID17I20421 Etapa 1 y Etapa 2, que permitieron la creación de un nuevo laboratorio y levantar una nueva línea de investigación en el Departamento de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de La Frontera, y al proyecto Fondap SERC #15110019.

Al profesor Sr. Luis Morán por sus aportes al diseño y conceptualización de la línea de investigación.



Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
ABREVIACIONES	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2. MANTENCIÓN EN LAS CADENAS DE AISLADORES	6
1.3. TRABAJOS PREVIOS	8
1.3.1 Contaminación en aisladores	8
1.3.2 Métodos para determinar la contaminación en aisladores	9
1.3.3 Sistema de medición de corriente de fuga	10
1.3.4 Análisis de la corriente de fuga para distintas condiciones de humedad y contaminación.....	12
1.4. PRINCIPALES APORTES DE ESTE TRABAJO.....	15
1.5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	18
2. SISTEMA DE MEDICIÓN DE CORRIENTE DE FUGA	19
2.1. SENSOR DE CORRIENTE DE FUGA PARA AISLADORES	20
2.1.1 Diseño de transformador de corriente.....	21
2.1.2 Diseño del circuito amplificador de tensión.....	23
2.1.3 Pruebas de sensor en laboratorio.....	24
2.1.4 Reconstrucción de la corriente de fuga	26
2.1.5 Validación.....	26
2.1.6 Conclusiones.....	31
2.2. MEDICIONES DE CORRIENTE DE FUGA EN TERRENO.....	33
2.2.1 Instalación N°1.....	33
2.2.2 Instalación N°2.....	35
2.2.3 Instalación N°3.....	37
2.2.4 Efecto del lavado en el tramo de línea.....	39
2.2.5 Conclusiones.....	41
3. ANÁLISIS DE LA CORRIENTE DE FUGA PARA DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN EN AISLADORES	42
3.1. AISLADOR U120B Y ESCENARIOS DE HUMEDAD Y CONTAMINACIÓN	42
3.2. PARÁMETROS E ÍNDICES DE LA CORRIENTE DE FUGA PARA LA DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN	43
3.3. EFECTO DE LA HUMEDAD EN LOS PARÁMETROS DEL AISLADOR	43
3.4. ANÁLISIS DE PARÁMETROS EN EL AISLADOR.....	47
3.5. ANÁLISIS DE IMPEDANCIA ARMÓNICA DEL AISLADOR.....	50
3.6. EFECTOS DE LA HUMEDAD Y LA VARIABILIDAD DE LOS ARMÓNICOS EN LOS ÍNDICES	54
3.7. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	56
4. CONCLUSIONES	57
4.1. CONCLUSIONES TÉCNICAS	57
4.2. LOGROS DESTACADOS.....	59
REFERENCIAS.....	60
A. ANEXOS	63
A.1. ANEXO 1 - CÁLCULOS ESDD Y NSDD	63
A.2. ANEXO 2 - MEDICIONES ADICIONALES DEL SENSOR.....	64
A.3. ANEXO 3 - GRÁFICA DE NIVELES DE CONTAMINACIÓN.....	66
A.4. ANEXO 4 - CÁLCULO DE ÍNDICES.....	66
A.5. ANEXO 5 – OTROS RESULTADOS A DIFERENTES NIVELES DE HUMEDAD Y CONTAMINACIÓN	68

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Límites de indisponibilidad Forzada. Fuente [6].	3
Tabla 2.1 Medidas de restricciones de diseño	22
Tabla 2.2 Parámetros constructivos de la bobina.	23
Tabla 3.1 Sitios de Mediciones de corriente de fuga	33
Tabla 3.2 Valores máximos de corriente.	39
Tabla 3.3 Índice <i>corriente/humedad</i>	40
Tabla 4.1 Cantidades y niveles de contaminación	42
Tabla 4.2 Escenarios	44
Tabla 4.3 Resultados de índices en estado estable	54
Tabla A.1 Límites para índice PD.	68



Lista de Figuras

Fig. 1.1 Cadena de aisladores. Fuente: Sector Electricidad.	2
Fig. 1.2: Falla en cadena de aisladores. Fuente: General Electric.....	5
Fig. 2.1: Sistema de medición de corriente de fuga.	19
Fig. 2.2: Ubicación física de sensor en cadena de aisladores.....	20
Fig. 2.3: Ganancia del transductor en función de la frecuencia.	24
Fig. 2.4: Ganancia en función de la amplitud de corriente de entrada.	25
Fig. 2.5: Desfase en función de la amplitud de corriente para distintas frecuencias.	25
Fig. 2.6: <i>Set-up</i> medición de LC en media tensión.	27
Fig. 2.7: Sensor de corriente en cámara de niebla.....	28
Fig. 2.8: Implementación en Laboratorio.....	28
Fig. 2.9: Espectro en frecuencia (a) sensor diseñado (b) sensor comercial	29
Fig. 2.10: Espectro en frecuencia de corriente comercial	30
Fig. 2.11: Corriente medida en subestación de 220 kV.	30
Fig. 2.12: Corriente reconstruida en un instante de alta humedad.	31
Fig. 3.1 Mediciones en Instalación 1.....	34
Fig. 3.2 Mediciones en Instalación 2.....	36
Fig. 3.3 Mediciones en Instalación 3 – Línea de alta tensión	37
Fig. 3.4 Mediciones en Instalación 3 – Señales de corriente y humedad.....	38
Fig. 4.1 Resultados para Prueba N°1 - (RH: 80% / Cont. Media).	45
Fig. 4.2 Resultados para Prueba N°2 (RH: 80% / Cont. Muy Alta).....	45
Fig. 4.3 Resultados para Prueba N°3 (RH: 100% / Cont. Baja).....	46
Fig. 4.4 Resultados para Prueba N°4 (RH: 100% / Cont. Alta).	46
Fig. 4.5 Parámetros del aislador (a) Impedancia (b) Resistencia (c) Reactancia	48
Fig. 4.6 Armónicos para Prueba N°1 - (RH: 80% / Cont. Media)..	51
Fig. 4.7 Armónicos para Prueba N°2 (RH: 80% / Cont. Muy Alta)	51
Fig. 4.8 Armónicos para Prueba N°3 (RH: 100% / Cont. Baja).	52
Fig. 4.9 Armónicos para Prueba N°4 (RH: 100% / Cont. Alta).....	52
Fig. A.1: Procedimiento para medición del NSDD Figura en IEC60517.....	64
Fig. A.2: V_s y I_p para una corriente primaria de 200 uA a 240 Hz	65
Fig. A.3: V_s y I_p para una corriente primaria de 20 mA a 540 Hz	65
Fig. A.4 Zonas de contaminación para un aislador U120B	66
Fig. A.5 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Baja)	68
Fig. A.6 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Media).....	69
Fig. A.7 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Alta).....	69
Fig. A.8 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Muy Alta)	70

Abreviaciones

Mayúsculas

LAT	: línea de alta tensión.
LC	: corriente de fuga.
ML	: marco de línea.
MB	: marco de barra.
CEN	: Coordinador Eléctrico Nacional.
RTV	: room temperatura vulcanized.
HTV	: high temperatura vulcanized.
NTSyCS	: Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.
CFCD	: costo de falla de corta duración.
SEN	: Sistema Eléctrico Nacional.
FO	: forma de onda.
ESDD	: densidad de depósito equivalente de sal.
NSDD	: densidad de depósito no soluble.
RH	: humedad relativa.

Minúsculas

flashover	: energización con circulación de corriente sobre la superficie de aislación.
trip	: señal de apertura de interruptor.
rms o RMS:	: valor eficaz (root mean square).
peaks	: máximos de la corriente o voltaje.
cap	: caperuza o capucha. Parte metálica superior de un aislador.
pin	: espiga. Parte metálica inferior del aislador.



1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia están compuestos por subestaciones y líneas de transmisión de alta tensión que usan aisladores cuya función es sostener mecánicamente los conductores. Estos aisladores deben ser lo suficientemente robustos para soportar mecánicamente los conductores y además deben proveer la suficiente distancia de fuga para aislar el conductor de la estructura metálica. La contaminación medioambiental ensucia la superficie de los aisladores, lo que provoca un aumento de la amplitud y distorsión de la corriente de fuga (LC) que circula por los aisladores. El aumento de la amplitud de la corriente puede producir un cortocircuito monofásico y la salida de operación de una línea o subestación afectando la continuidad del servicio eléctrico. La mantención de la aislación se realiza lavando con agua desmineralizada a presión cada una de las cadenas de aisladores de una línea o subestación eléctrica. Esta actividad debe realizarse con la suficiente frecuencia para evitar que la LC aumente y evitar la ocurrencia de fallas. La frecuencia de los lavados depende del sector geográfico en que se encuentre la instalación y también por la experiencia de la empresa. La periodicidad de los lavados finalmente la define la empresa tomando en consideración diversos factores como historial de fallas, reportes de personal de terreno y también costos asociados a los lavados. En informes del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) de Chile se puede observar que las fallas por acortamiento de distancia en la aislación son recurrentes en el sistema eléctrico con valores que llegan hasta el 3,5 % del total de las fallas ocurridas en un año, lo que provoca problemas de disponibilidad y confiabilidad.

En esta tesis se propone, a través del diseño de un sistema de medición de LC y del análisis de un conjunto de indicadores para determinar el nivel de contaminación en aisladores, proponiendo un procedimiento para evaluar el nivel de contaminación depositado sobre la superficie de los aisladores, que ayude a planificar la mantención con datos concretos obtenidos de la LC y así planificar de mayor forma la mantención, y evitar las fallas en los sistemas eléctricos por concepto de falla por acortamiento de distancia.

Los resultados de esta tesis han permitido la publicación de dos artículos científicos en Web of Sciences (WoS), específicamente en la revista IEEE Access.

1.1. Justificación del Problema

i. Problema

Los sistemas eléctricos de transmisión están compuestos principalmente por líneas de alta tensión (LAT) y subestaciones eléctricas, en adelante instalaciones. A su vez, las instalaciones están compuestas desde un punto de vista mecánico por postes o torres en el caso de las LAT, y por estructuras metálicas como marcos de línea (ML) y marcos de barras (MB); en las subestaciones eléctricas. Estas torres o estructuras metálicas entregan un soporte al conductor. Los conductores se sostienen a las estructuras metálicas por medio de un elemento que cumple la función de aislar eléctricamente la estructura del conductor energizado. El aislante puede estar compuesto por un conjunto de aisladores (cadena de aisladores) o por uno o varios aisladores de tipo “varilla” o “long-road” [1]. La Fig. 1.1 muestra cadenas de aisladores en un ML de una subestación eléctrica. También se muestra una persona realizando la mantención preventiva de las cadenas de aisladores.



Fig. 1.1 Cadena de aisladores. Fuente: Sector Electricidad.

Dentro de los sistemas eléctricos la aislación puede ser considerada uno de los elementos más vulnerables, por lo tanto, puede ser causante de fallas [2]. En general, la falla que se produce en los aisladores es de tipo monofásica a través del conductor y la estructura metálica. Los aisladores pueden presentar fallas por diferentes motivos. Existen fallas en el aislante que provienen de la etapa de fabricación, como el rompimiento del vidrio y corrosión electrolítica en las partes metálicas de los aisladores (*cap* y *pin*) [3] en los aisladores de vidrio. También, quebrado de material en caso de los aisladores varilla con recubrimiento de silicona (aisladores poliméricos) tipo RTV o HTV (*Room Temperature Vulcanized* y *High Temperature Vulcanized*) [4]. Estos últimos también pueden ser

afectados por la radiación UV y el tiempo de exposición, lo que afecta su característica de material hidrofóbico [5] . Ambos tipos de aislación (vidrio/cerámico, de material polimérico o recubiertos de silicona) están siempre expuestos a contaminantes externos en las zonas geográficas donde se ubiquen. Los contaminantes pueden ser muy diversos y pueden calificarse como naturales y artificiales. En el caso de los naturales, pueden ser excremento de aves, el polvo en suspensión, el polvo levantado por el viento, la brisa marina, entre otros. Los contaminantes artificiales son producidos por las industrias, que generan materiales en suspensión que el viento transporta hasta la superficie de los aisladores [1], [2].

ii. Problemas en la transmisión de energía eléctrica

Debido a la importancia del abastecimiento energético sin interrupción, los países fijan estándares para asegurar la continuidad de servicio en los sistemas de transmisión. En el caso de Chile se define en la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio Eléctrico (NTSyCS) [6]. Esta norma define los límites para duración y frecuencia de interrupción o indisponibilidad de suministro eléctrico para subestaciones y líneas eléctricas. En el caso de que las empresas no cumplan con este marco regulatorio, pueden ser multadas por la autoridad (Superintendencia de Electricidad y Combustible) y mandatadas a compensar a sus clientes finales. Se establecen límites de indisponibilidad energética del sistema de transmisión en función de la frecuencia anual de fallas y las horas máximas permitidas durante un año (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Límites de indisponibilidad Forzada. Fuente [6].

Elemento	Horas [horas/año]	Frecuencia [eventos/año]
Líneas > 500 kV	5	2
Líneas 220 a 500 kV	10	3
Líneas 100 a 220 kV	15	4
Líneas 44 a 100 kV	30	5
Transformadores y Equipos	45	1

*Por cada 100 km o inferior de longitud de líneas hasta 300 km. Por cada 100 km o inferior del exceso sobre 300 km aplica solo el 65% de la tabla.

En la Tabla 1.1 se puede observar el número de veces con indisponibilidad de energía que

permite la norma técnica durante un año. En el caso de líneas largas (sobre 300 km), solo se puede desconectar tres veces en un año. Es por esto que el mantenimiento de los elementos del sistema eléctrico, y con esto de la aislación, es de vital importancia para las empresas de transmisión, generadoras y distribuidoras de energía eléctrica. Cuando una empresa no cumple con la normativa tiene la obligación de compensar a sus usuarios, lo que se traduce en pago de multas.

Por otro lado, la autoridad con la Comisión Nacional de Energía (CEN) han determinado el costo que tienen las pérdidas de suministro eléctrico para el sistema eléctrico. El costo de falla es referenciado en el informe “Estudio Costo de Falla de Corta y Larga Duración SEN y SSMM” [7] En este documento se define que el costo de falla es de 14,02 US\$/KWh para el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Por otro lado, una forma de valorizar el costo de las fallas es utilizando el concepto de energía no suministrada (ENS). Este término está relacionado con la cantidad de energía que no es suministrada al SEN por la ocurrencia de fallas durante un año. Según el informe “Estudio de Continuidad de Suministro” [8], las fallas por “pérdida de aislación debido a fenómenos ambientales” (DIS1) y por “falta de limpieza en aisladores o terminales” (OPE17) y “pérdida de aislación debido a contaminación por actividades de terceros” (OPE19), corresponden a un 2,12 %, 1,2 % y 0,18 % de la total ENS acumulada entre los años 2018 y 2022. El total por pérdidas de aislación llega a 3,5 %. El promedio de ENS entre los años 2015 y 2019 (valores más actualizados) fue de 30,6 GWh/año [9]. El costo anual por concepto de fallas puede calcularse según la ecuación (2.1):

$$\text{costo de falla} = Q_{ENS (\%)} \cdot ENS_{total} \cdot C_{ENS(\$)} \quad (1.1)$$

Donde:

$Q_{ENS (\%)}$: es la cantidad porcentual de ENS por concepto de aislación.

$C_{ENS(\$)}$: es el costo promedio de la ENS.

ENS_{total} : es la ENS total en un año.

Al reemplazar los valores en la ecuación (2.1), se encuentra lo siguiente:

$$\text{costo de falla} = 3,5 \% \cdot 30,6 \text{ GWh} \cdot 14,02 \frac{\text{USD}}{\text{KWh}} = 15,015 \text{ millones de USD} \quad (1.2)$$

Dependiendo del año del análisis, el costo de las fallas asociados a aisladores puede cambiar

por los factores que intervienen en la ecuación (2.1). Para el año 2022, el costo de la falla alcanzó un valor cercano a 15 millones de dólares.

Este alto costo de falla, la reputación corporativa de las empresas y las compensaciones con respecto a los clientes, hacen que las fallas en los sistemas eléctricos deben ser abordadas con compromiso por parte de la autoridad y las empresas. Por este motivo, las empresas con activos en el sector eléctrico están evitando cada vez más las fallas por desperfectos o por falta de mantenimiento en sus instalaciones.

Anteriormente, las empresas realizaban la mantención de forma reactiva, lo que significa que el mantenimiento se realiza luego de ocurrida una falla. Debido a las nuevas exigencias de los usuarios y la autoridad; la mantención se realiza bajo el concepto de mantenimiento basado en condición (en inglés Condition-Based Maintenance). Esto implica que mediante el monitoreo de variables específicas se evalúa la condición en tiempo real de los elementos y equipos de las instalaciones. Esto permite conocer el estado de los equipos y programar su mantención basándose en su condición real, y no de manera reactiva, con la finalidad de evitar las fallas.

iii. Fallas en aislación

Las principales fallas en aislación en sistema de alta tensión son las que se producen en las cadenas de aisladores, que corresponden a la pérdida de la aislación o acortamiento de la distancia de fuga (mm/kV) entre el conductor y la estructura metálica. Esta falla corresponde a un cortocircuito monofásico denominado *flashover*, mostrado en la Fig. 1.2.



Fig. 1.2: Falla en cadena de aisladores. Fuente: General Electric.

El principal motivo de la falla en cadenas de aisladores es la contaminación superficial. Cuando los contaminantes en el medio ambiente provienen del suelo y son transportados por el viento, pueden adherirse a la superficie de los aisladores principalmente cuando el aire es húmedo. Luego, las partículas de agua (humedad alta) que posee el aire, disuelven las partículas solubles de la contaminación depositadas en la superficie del aislador, propiciando el aumento de la magnitud de la corriente de fuga, debido al potencial eléctrico entre el conductor y la estructura. Esta contaminación puede estar compuesta por material soluble y no soluble. El soluble corresponde a material que al mezclarse con agua se disuelve, produciendo un camino conductor de la electricidad sobre la superficie del aislador entre sus partes metálicas: caperuza (*cap*) y la espiga (*pin*).

En casos de alta contaminación, la conjunción entre el material soluble, no soluble y la humedad producen en la superficie de los aisladores bandas de conducción y bandas secas [2]. Esto corresponde a áreas del aislador donde existe circulación de corriente debido al voltaje aplicado. Las bandas secas son “saltadas” por la corriente que busca un camino para continuar entre el *cap* y el *pin*, lo que produce pequeños arcos. Estos arcos tienen una menor resistencia, lo que aumenta y a la vez distorsiona la LC. Cuando estos arcos se producen al mismo tiempo en distintos aisladores y áreas de los aisladores, generan el aumento de la corriente y finalmente el *flashover*. Por otro lado, el material no soluble no tiene la capacidad de conducir la corriente, pero sí cumple la función de adherir el material soluble a la superficie del aislador. Finalmente, durante la falla una LC de gran magnitud circula por los conductores de la línea de alta tensión y es medida por los transformadores de corriente de las subestaciones cercanas, lo que genera la activación (*trip*) de las protecciones de sobre corriente monofásica, y con esto la desconexión de la línea.

1.2. Mantenimiento en las cadenas de aisladores

Actualmente, las empresas propietarias de los sistemas de transmisión recurren a un procedimiento periódico de lavado de cadenas de aisladores para reducir el riesgo de fallas por contaminación. Esta actividad consiste en aplicar agua destilada a presión mediante un procedimiento establecido a cada una de las cadenas de aisladores de una línea o subestación eléctrica; tarea que debe ser ejecutada por personal especializado. La periodicidad del lavado de cadena de aisladores de una subestación y de los diferentes tramos de una línea de AT dependen principalmente del personal y la experiencia de la empresa. La periodicidad de los lavados se realiza mediante un proceso iterativo (prueba y error). En la práctica, si está establecido una periodicidad de “x” meses, y ocurre una falla a “y” meses (con $y < x$), entonces la periodicidad de los lavados se debe reducir a un valor menor a

“y”, con tal de evitar una falla futura. En algunos casos, pero menos frecuente, se instalan aisladores testigos en distintas zonas de las líneas de alta tensión, los que son retirados para realizar pruebas de contaminación en laboratorio. Con esto se puede estimar la contaminación de una determinada zona y asignar una frecuencia de lavado.

Dependiendo de la zona geográfica en la que se ubique la instalación, la frecuencia de lavado se puede realizar entre 4 a 12 veces al año. En general en zonas que están cercanas al mar, tienen baja pluviometría o con actividad industrial cercana a la línea, hace necesario que los lavados sean requeridos cada 1 y 4 meses. En zonas con mayor pluviometría, los lavados pueden requerirse una vez al año y a veces ser innecesarios dependiendo de las variables atmosféricas. En promedio, en la zona norte y centro de Chile, la frecuencia de lavado se realiza entre 4 y 2 veces al año. En el sur de Chile el lavado se realiza una vez al año, ya que las lluvias limpian de manera natural los aisladores.

Actualmente las empresas eléctricas planifican la mantención de las cadenas de aisladores de una subestación o línea de transmisión en base al siguiente procedimiento:

1. Experiencia: a lo largo de los años, las fallas ocurridas han definido la frecuencia de lavado de zonas de líneas y subestaciones eléctricas, haciéndolas cada vez más frecuentes si ocurre una falla con anterioridad a la mantención.

2. Verificación visual: el personal realiza verificaciones visuales a lo largo de las LAT y mediante binoculares estiman el nivel de contaminación.

3. Cadenas de aisladores testigos: con una periodicidad determinada, generalmente cada un mes, las empresas retiran aisladores testigos que luego son analizados en un laboratorio.

4. Equipos contadores de pulsos (peaks) de corriente: se implementa con un sensor que mide la corriente por medio de bypasear un aislador con una resistencia en paralelo (*shunt*).

Finalmente, las empresas no utilizan un método certero y preciso, como también no invasivo, que les permita conocer el nivel de contaminación en tiempo real de sus cadenas de aisladores. Por lo que las fallas por falta de lavado en aislación siguen ocurriendo en los sistemas de transmisión, siendo causante del 3,5 % del total de la ENS.

Además, es importante mencionar que el costo de realizar lavados en las LAT con mayor frecuencia involucra un alto costo que las empresas no están dispuestas a realizar sin que exista certeza de que hay una real necesidad. Por este motivo, este trabajo se concentra en diseñar un sistema de medición de variables como la corriente de fuga y la humedad, que permitan mediante un análisis conocer en tiempo real el estado y nivel de contaminación de las cadenas de aisladores.

1.3. Trabajos previos

1.3.1 Contaminación en aisladores

El material contaminado presente en aisladores se puede dividir en Sales Solubles y No Solubles. El material soluble es capaz de diluirse en agua generando una solución compuesta por iones que al exponerse a un campo eléctrico produce la conducción de la corriente [10]. Por otro lado, el material no soluble no es conductivo, pero si aporta en la retención o contención de material sobre el aislador. Por lo tanto, ambos materiales son importantes para la generación de la capa superficial compuesta por material contaminante. Tanto el material soluble como el no soluble se levantan desde el suelo como micropartículas que se depositan sobre la superficie de los aisladores. El agua en estado gaseoso o niebla (camanchaca) también puede contener material soluble como Cloruro de Sodio. Este material puede adherirse tanto en la superficie superior como inferior del aislador, generando, al entrar en contacto con el agua una capa conductora que facilita la circulación de la LC [11]. Esta capa contaminada adherida a la superficie, en presencia de humedad o partículas de agua hace que las sales se disuelvan generando la solubilización de las sales, creando un camino de alta conductividad para la circulación de la corriente [12].

El material contaminado presente en el aire como polvo en contacto con la humedad, no se adhiere de manera homogénea sobre la superficie del aislador, generando distintas zonas que puede no conducir. A estas zonas se les llama “bandas secas” [13]. Estas bandas al estar en presencia de una diferencia de potencial generan pequeños arcos eléctricos en la superficie, lo que distorsiona la LC, para dar luego origen al flashover. Esta discontinuidad en la LC distorsiona su forma de onda, aumentando el contenido armónico de la corriente del aislador [14] [15], [16]. La clasificación de los niveles de contaminación es definida en la misma norma IEC 60815 desde bajo a muy alto, como: Baja (*Light*), Media (*Medium*), Alta (*Heavy*) y Muy Alta (*Very Heavy*)[1] [17], los que están relacionados directamente con el nivel de sales soluble y no-solubles depositadas en la superficie del aislador. La norma también introduce los términos ESDD (Densidad de Depósito Equivalente de Sal) y NSDD (Densidad de Depósito No Soluble) para establecer rangos de valores de material soluble y no soluble en las mediciones de contaminación en aisladores. La metodología para los cálculos de ESDD y NSDD luego de la toma de muestra de contaminación de aisladores, se detalla en el Anexo A.1.

1.3.2 Métodos para determinar la contaminación en aisladores

Las compañías eléctricas requieren estimar en tiempo real el nivel de contaminación de las cadenas de aisladores para planificar eficazmente el mantenimiento de sus líneas eléctricas y así gastar lo necesario evitando fallas. Entre las soluciones disponibles para el monitoreo destacan las presentadas en [13], que desarrolla una red satelital para la monitorización remota de líneas de 220 y 500 kV, o en [18], que presenta una unidad remota con conexión GPRS. Ambas soluciones miden la LC con un sensor óptico. No obstante, ambas soluciones presentan desventajas desde el punto de vista de la factibilidad técnica en su implementación. Tanto en la primera como en la segunda solución requiere desviar la corriente entre el primer y segundo aislador de la cadena, con tal de forzar la circulación de la corriente por el sensor óptico, generando un puente eléctrico en el primer aislador. Esta solución reduce el nivel de aislación de la cadena ya que elimina el efecto aislante de uno de los aisladores de la cadena. Para evitar la pérdida de aislación es posible introducir un aislador adicional en serie, pero para esto se requiere desconectar la LAT o bien intervenir la cadena de aisladores, lo que implica reducir la disponibilidad de la línea y un alto costo en personal especializado.

Por otro lado, algunos métodos destacados para medir la LC son los sensores de fibra óptica, que se conectan en serie para obtener una señal óptica con amplitud modulada. Este método permite obtener una forma de onda completa y es inmune al ruido magnético. Además, otros autores [19] utilizan un anillo colector consistente en un anillo metálico unido al cap del aislador capaz de desviar la corriente. Este sistema permite obtener la señal de corriente haciéndola pasar a través de una resistencia en paralelo, que determina la corriente midiendo la caída de tensión. Estas alternativas se basan en desviar la LC entre el último y penúltimo aislador de la cadena, conectando diferentes sensores en paralelo, lo que podría disminuir la distancia de fuga (mm/kV) al bypasear el último aislador.

El trabajo [20] presenta un análisis de contaminación de aisladores mediante el diseño de una bobina Rogowski. Se analiza la tensión de salida del sensor y sus armónicos para determinar el nivel de contaminación. Esta técnica determina el nivel de contaminación por medio del voltaje de salida del sensor Rogowski, sin reconstruir la LC. Utilizando la función FFT calcula los armónicos del voltaje, y mediante el análisis de la relación entre el 3er/5to armónico identifica el nivel de contaminación en la superficie. Este trabajo muestra resultados satisfactorios para un aislador tipo disco y para un aislador tipo espiga, permitiendo relacionar el aumento de la amplitud de la relación 3er/5to del voltaje de salida con el aumento del ESDD. Esto es explicado indicando que el aumento de la contaminación genera aumentos pulsantes de la LC que se reflejan en la distorsión del voltaje

del sensor. No obstante, la respuesta del sensor depende de la capacitancia parásita que se produce entre el pin del aislador y la bobina Rogoswki, por lo que la distancia debe ser conocida y precisa. No se muestran resultados de la bobina Rogoswki en una aplicación de terreno, donde la calidad de la instalación podría jugar un papel preponderante. Esta aplicación además no permite utilizar los numerosos avances propuestos en la literatura que centran la determinación del nivel de contaminación de aisladores en el análisis de la LC.

El trabajo [3] muestra el diseño de un sensor de LC para aplicaciones en HVDC orientado a determinar la corrosión electrolítica en el aislador que se produce por el voltaje aplicado entre el cap y el pin. El sistema consiste en incorporar un anillo de acero sobre el material aislante (vidrio o cerámica) del aislador. Este anillo sirve para desviar y recolectar la LC a través de un conjunto de diodos y resistencias. El sistema mide los voltajes en las resistencias para calcular la LC. Este sistema permite medir efectivamente corrientes de fuga en aisladores para calcular la carga eléctrica. No obstante, no ha sido desarrollado para aplicaciones en AC, y puede ser difícil de implementar, ya que requiere retirar la cadena de aisladores de servicio para reemplazar el primer aislador con el colector inserto en la parte aislante.

En los últimos años, se ha producido un importante desarrollo en la forma de determinar el nivel de contaminación en función de la LC; sin embargo, las soluciones para medir la LC en las cadenas de aisladores de las líneas de transmisión y subestaciones sin afectar la capacidad de aislación son limitadas.

1.3.3 Sistema de medición de corriente de fuga

Durante los últimos 20 años, la investigación se ha centrado en la determinación de la contaminación de aisladores por medio del análisis de la corriente de fuga. Por este motivo el análisis de la LC puede ser considerada como la herramienta más relevante y desarrollada para este fin. Los autores algunas características procedentes de cálculos de la LC como el valor efectivo (rms), la amplitud máxima, la cantidad de máximos (peaks) por ciclo, el contenido armónico (THD) y amplitud de armónicos de corriente. Estos parámetros han sido relacionados directamente con los distintos grados de contaminación en aisladores [12], [19], [21], [22], [23], [24], [25].

Uno de los primeros trabajos relativos a la medición de corriente es expuesto en los artículos [26] [27], que muestran un transformador de corriente de núcleo de material no ferroso. El sensor es de relativa gran envergadura y peso. El sensor permite medir pulsos de corriente que se producen en

la corriente de fuga cuando el aislador se ensucia. Debido a esto, este sensor solo puede ser utilizado para determinar contaminación en base a pulsos.

El artículo [19] utilizan un anillo “colector”, que consiste en una argolla metálica que se adosa al cap en aisladores de disco y a la falda en el caso de aisladores de pedestal. En ambos casos se desvía la corriente en un disco o tramo de aislación. Este sistema permite obtener la señal de corriente a través de una resistencia shunt, lo que obtiene la corriente al medir la caída de voltaje en la resistencia conectada en paralelo. Esta alternativa, si bien permite medir la LC con una buena precisión y ancho de banda; también se basa en desviar la LC entre el primer y segundo aislador de la cadena, lo que disminuye la capacidad de aislación. Si bien son soluciones con muy buenos resultados para pruebas en laboratorio, tienen desventajas para aplicaciones reales, ya que en general, las cadenas de aisladores se dimensionan para las condiciones de operación, y no se permite la eliminación de un aislador sin poner en riesgo el sistema eléctrico.

En [23] se presenta un transductor toroidal cerrado, sin entrehierro, con un ancho de banda teórico infinito y una buena respuesta para bajas corrientes, pudiendo medir corrientes del orden de los miliamperes. Su desempeño es avalado con pruebas de laboratorio en cámara de polución artificial, pero no se describe su comportamiento en aplicaciones reales. Además, esta solución también requiere de la desconexión de la cadena para su instalación.

Como se ha mencionado, es importante destacar que la determinación del nivel de contaminación basado en la LC ha sido usada en numerosos artículos durante los últimos años. No obstante, las soluciones propuestas en general, no permiten medir la forma de onda, son invasivas y otras desvían la corriente entre el primer y segundo aislador, lo que disminuye la aislación de la cadena o bien requiere de instalar un aislador adicional, alterando la LC real y afectando la continuidad de suministro eléctrico. Si bien en el artículo [23] se propone un transductor no invasivo, requiere desenergizar la línea eléctrica para su instalación, además no presentan resultados fuera de laboratorio ni su comportamiento frente al ruido electromagnético.

En esta tesis se propone el diseño, construcción y prueba en una subestación de alta tensión de un sensor de LC que permite medir en tiempo real y de manera no invasiva la LC en una cadena de aisladores. El sensor propuesto permite su instalación de manera segura y sin necesidad de desenergizar el sistema de potencia. También, mediante un proceso de adquisición de datos de la corriente medida pueden ser transmitidos de manera inalámbrica para ser recibidos en un servidor, para su respectivo análisis.

1.3.4 Análisis de la corriente de fuga para distintas condiciones de humedad y contaminación

Como introducción a esta investigación en el artículo [28] se muestra el comportamiento de diferentes variables ambientales con respecto a la LC en una subestación de 230 kV ubicada en Brasil. Se observa una correlación entre la humedad relativa y el número de máximos/hora (peaks/hora) que presenta la LC sobre distintos umbrales: 5, 10 y 20 mA. También, en el artículo [19] en una instalación en China, se muestra la relación que tiene el valor efectivo de la LC con la humedad relativa y la temperatura; para mediciones de periodos de un mes. Se muestra en el tiempo (horas) una correlación directa de la corriente con la humedad, y una correlación inversa con la temperatura. Estos dos resultados permiten visualizar que existe una relación entre la LC y el comportamiento de la humedad en el tiempo, y que permite suponer una relación entre algunas características (parámetros) de la LC con la humedad. Cabe destacar que ambos trabajos muestran solo tiempo en minutos y horas. No se visualiza un análisis de los parámetros de la LC en el tiempo, ni tampoco se muestran las formas de onda de la corriente donde sea posible observar el comportamiento de la corriente para distintos momentos del día.

Desde antes del año 2003 a la fecha, numerosos autores han trabajado para relacionar el nivel de contaminación de la superficie de un aislador (ESDD y NSDD) con la LC. Para determinar la contaminación en la superficie de un aislador, la literatura se ha centrado en relacionar índices o características de la LC con el grado de contaminación para condiciones de humedad fijas y constantes [29]. La medición de la LC es aceptada como un indicador confiable para determinar el nivel de contaminación en aisladores [12] [15]. Se ha propuesto utilizar índices específicos para establecer una correlación entre el grado de contaminación y parámetros de la LC. Según lo planteado por los artículos [15], [30] existe una correlación entre la Distorsión Armónica Total de la LC (THDi), la humedad y el nivel de contaminación. En el trabajo [30], se demostró que la THDi disminuye a medida que aumenta la humedad ambiental. El THDi es de 24,5% con una humedad del 28,6%, y del 18,7% con una humedad del 91%. Por el contrario, el artículo [15] presenta un punto de vista diferente, donde para una contaminación de $0,2 \text{ mg/cm}^2$ el THDi es de 25% a 20% de humedad, y aumenta a 40% con 80% de humedad. Estos trabajos muestran resultados contradictorios en cuanto al comportamiento del THD de la corriente cuando aumenta el nivel de contaminación, y no se puede concluir si la relación es directa o inversamente proporcional.

El índice time-integral se calcula a partir del área bajo la curva de la LC [31]. Este artículo muestra buenos resultados para niveles de humedad constantes del 50-60 %, 65-70 % y 80-90 %. Se concluye una relación directa de este índice con la humedad y la contaminación. En el artículo se

destaca que su rendimiento no se ve afectado por los armónicos de tensión a pesar de que sólo se ha probado para limitados puntos de operación.

El índice de ángulo de diferencia de fase (PD o P.I) [21] mide el coseno del ángulo entre la tensión del aislador y la corriente de fuga. Este método distingue entre aisladores limpios ($PD < 30\%$) y contaminados ($PD > 30\%$). No obstante, no distingue entre los 4 niveles de contaminación definidos por la norma IEC 60815. Un valor alto de PD por sobre 85 % señala un alto riesgo flashover. Para el uso de este índice, es necesario medir además de la LC, el voltaje en el aislador. Este método sólo se ha probado para algunos puntos de operación específicos, y parece interesante plantear y observar los resultados para otros puntos adicionales.

Los armónicos de la LC son utilizados también para evaluar el nivel de contaminación en los aisladores. Algunos índices como los denominados “ R_{hi} ” [16] y “K” [15] relacionan las amplitudes de los armónicos de 3^{er}, 5^{to} y 7^{mo} orden de la LC con la contaminación. Estos índices revelan una correlación directa con el nivel de contaminación del aislador. Los autores en el trabajo [16] muestran una relación directa entre el valor del índice y la humedad. A medida que aumentan los niveles de contaminación o humedad aumenta el valor del índice. Los resultados se esbozan para puntos específicos de humedad, y son proyectados para humedades intermedias. Finalmente, se muestran resultados relevantes en condiciones de funcionamiento específicos con humedad constante y, se asume que los resultados de las pruebas son adquiridos cuando el aislador y la capa de contaminación son estables. No obstante, no se ha mostrado si el índice R_{hi} es sensible a los armónicos del voltaje, ya que algunos cambios en la amplitud de los armónicos 3^{er}, 5^{to} y 7^{mo} podrían tener un efecto en los armónicos de corriente del mismo orden que determinan los valores de R_{hi} .

El artículo [32] muestra información anexa de la evolución temporal de la LC para un nivel de contaminación y humedad dado. Se pueden visualizar los valores máximos de corriente efectiva durante una prueba de 40 minutos. Los autores definen etapas en función del tiempo transcurrido, como: seco, mojado, inicio de descargas (arcos) y finalmente descargas. Al inicio la corriente es 0,1 mA, para luego alcanzar algunos *peaks* de 1,4 mA. Posteriormente se estabiliza volviendo en 0,9 mA. Además, muestra el comportamiento del 3^{er} armónico en función de estas distintas etapas, mostrando valores de mayor magnitud cuando existen arcos de descargas.

En los trabajos de investigación se muestran resultados de cálculos de distintos índices para niveles de humedad constantes aplicado al aislador durante un tiempo determinado. En términos generales, los autores no suelen hacer referencia al momento específico de la prueba en el cual se deben calcular los índices. Por otro lado, al examinar algunos trabajos, se observa que la corriente de

fuga exhibe un comportamiento variable a medida que el aislador se humedece. Este hecho sugiere que el momento en que se toma la muestra de la corriente de fuga para el cálculo de índices podría ser un factor relevante para considerar. En este ámbito, el artículo [33] muestra como resultado una gráfica donde la conductividad superficial en un aislador tipo HTV-SiR (Silicone Rubber) tiene un valor inicial de $0 \mu S$, para luego alcanzar $10 \mu S$ en 50 minutos de prueba. Luego, la medida de conductividad se estabiliza (en $10 \mu S$). Esto muestra que la capa de contaminación del aislador en la medida que absorbe humedad cambia su conductividad, lo que implica un cambio en la magnitud de la LC. Aunque este trabajo está realizado en un aislador de material polimérico, puede ser considerado como un antecedente importante para realizar un análisis en aisladores de tipo vidrio, tema que se abordará en los capítulos siguientes de este documento.

Por otra parte, en los artículos que involucran tomas de muestra de terreno, se evidencia que la humedad en ciertas zonas geográficas específicas experimenta variaciones a lo largo del día y la noche [34]. Esto sugiere que la conductividad de la capa también exhibe fluctuaciones temporales como resultado de los cambios en la humedad. En aplicaciones de terreno, las mediciones de corriente de fuga no son continuas, sino más bien discretas. Esto se debe a limitaciones de energía y transmisión de datos hacia un centro de control. Como consecuencia, los datos de la corriente de fuga no son conocidos en todo momento. Esta limitación implica que los datos obtenidos pueden representar únicamente un punto específico en la evolución de la conductividad superficial del aislador, y no necesariamente reflejar la contaminación generalizada de la capa a lo largo del tiempo.

En cuanto al análisis de los armónicos de LC para determinar el nivel de contaminación existe una limitación que generalmente no es considerada por los autores, ésta hace referencia a la influencia de los armónicos del voltaje de la red en los armónicos de la corriente de fuga. Los autores del artículo [12] hacen referencia a este inconveniente con respecto a los armónicos del voltaje, y proponen una herramienta basada en la técnica Análisis de Fluctuación Detallada (DFA) que se independiza del efecto de los armónicos de voltaje. Si bien este artículo obtiene resultados interesantes, los resultados de la técnica DFA pueden ser difíciles de interpretar y no presenta resultados para cambios en la contaminación. Por lo tanto, parece esencial estudiar la variación de la LC a lo largo del tiempo en las pruebas a humedad constante, y no sólo conocer su valor en estado final o estable, ya que la variación de la conductividad a lo largo de las pruebas puede afectar el desempeño de los índices presentados en la literatura. Estudiar el origen y la variación en el tiempo de los armónicos de la LC también es relevante para comprender el comportamiento y concluir sobre el efecto que tienen los armónicos de la tensión sobre la determinación del nivel de contaminación en un aislador.

En esta tesis se desarrolla un análisis sistemático de los efectos que tiene la humedad en la amplitud y en los armónicos de la corriente de fuga. El tiempo de aplicación de humedad en un aislador o bien el momento en que se mide la LC, puede afectar significativamente el desempeño de los índices utilizados en la literatura. Además, se evaluará la importancia de conocer el nivel de humedad para identificar los niveles de contaminación en los índices que utilizan las mediciones de LC.

Con este fin, se llevarán a cabo pruebas en aisladores que presentan diferentes niveles de contaminación, siguiendo los lineamientos establecidos por la norma IEC 60815. Estas pruebas se realizarán en el entorno controlado de una cámara de niebla artificial, diseñada de acuerdo con las especificaciones de la norma IEC 60507 [35]. En esta cámara, se recrearán diversos escenarios con diferentes niveles de humedad. Se anticipa que los resultados obtenidos constituirán una contribución al avance de dispositivos industriales de medición de corriente de fuga (LC) en tiempo real. Esto posibilitará una mejora en la utilización de los índices disponibles para proporcionar un valor preciso del nivel de contaminación, facilitando así una planificación efectiva de los lavados en la industria.

1.4. Principales aportes de este trabajo

Hasta ahora las empresas con activos en transmisión realizan la mantención de las cadenas de aisladores mediante lavados que se planifican con una periodicidad que depende de la experiencia adquirida, y con el historial de fallas ocurridas en sus instalaciones dependiendo de la zona geográfica donde se ubican.

Esta tesis propone el diseño de un nuevo sensor de corriente de fuga capaz de medir corrientes de baja amplitud en aisladores de alta tensión. La principal característica del sensor propuesto es que no es invasivo y no requiere desconectar la línea para su instalación. Los datos adquiridos en terreno desde el sensor son transmitidos hacia un centro de visualización de datos, que permite a los usuarios conocer en tiempo real el estado de las cadenas de aisladores. El sistema tiene las siguientes características diferenciadoras:

- Medición de corrientes de fuga de amplitudes del orden de los micro y miliampers (μA y mA): el sensor tipo tenaza propuesto es capaz de medir corrientes de fuga de micro y miliamperes para ser usado en la identificación del nivel de contaminación en el aislador. El rango de medición del sensor propuesto permite medir de manera precisa y dentro de rango suficiente para distintas condiciones de operación.
- No invasivo durante la instalación: existen soluciones para medir corrientes de fuga en aisladores

de terreno y en laboratorio que requieren intervenir la cadena de aisladores durante su instalación. El sensor propuesto es del tipo tenaza por lo que su instalación no requiere desconectar la línea eléctrica de servicio. Para la sujeción del sensor al herraje del aislador se propone una pieza de plástico o silicona que sirve para ajustar el sensor al herraje o aislador. Otra ventaja del sensor, es el lugar de la cadena donde se ubica, ya que no queda sometido a tensiones de línea.

- No afecta la distancia de fuga de la cadena: el sensor propuesto es de tipo tenaza con principio electromagnético, por lo tanto, no interviene la cadena de aisladores. No existe un contacto eléctrico entre el primario (herraje de aislador) y el secundario (sistema de adquisición). Esto permite que la distancia de fuga de la cadena de aisladores no se vea afectada, ya que la LC circula a través de la cadena entre el conductor de alta tensión y la estructura metálica de la torre, tal cual lo haría sin el sensor.

El sistema de medición propuesto presenta las siguientes características:

- Corriente de fuga: la salida del sensor de corriente propuesto es conectada, por medio de un conductor, a un gabinete que contiene un sistema de adquisición, procesamiento y transmisión inalámbrica de datos (corriente de fuga, humedad y temperatura). Este sistema tiene la función principal de realizar los cálculos de parámetros y transmitir los resultados a internet. Se ubica en el cuerpo de la torre a la misma altura que el sensor.
- Procesamiento de la LC: el sistema procesa la señal de la LC en sus distintas magnitudes (μA y mA) y calcular los armónicos significativos múltiplos de la fundamental. Los armónicos calculados sirven para determinar el nivel de contaminación en la superficie de los aisladores. Los armónicos utilizados en la literatura para la identificación de la contaminación son de 3^{er}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no} y 11^{vo} orden.
- Medición en tiempo real: el sensor en conjunto con el sistema de adquisición y procesamiento de los datos de la LC permite mostrar los parámetros más relevantes de la LC. Estos parámetros son utilizados para visualizar las tendencias y comportamiento en tiempo real. Los parámetros mostrados en tiempo real son la corriente *rms*, la corriente peak, los armónicos indicados anteriormente, temperatura y humedad.
- Con la visualización los usuarios finales pueden conocer la evolución de la LC y el nivel de contaminación de los aisladores en el tiempo. Esta información permite a los usuarios planificar adecuadamente las mantenciones de las cadenas de aisladores.

- Alertas: la amplitud de los parámetros de la LC y el nivel de contaminación puede aumentar por algún cambio ambiental repentino en las condiciones medioambientales del sector. Por ejemplo, humedad y movimiento de tierra bajo la línea de transmisión. Para esto el sistema puede emitir alertas automáticas que dependen de umbrales prefijados. El sistema emite alertas mediante correos electrónicos automatizados.

Por otra parte, se ha detectado en pruebas preliminares de laboratorio que algunos de los índices presentados por la literatura, como el R_{hi} , K, PD y THD, presentan importantes variaciones de magnitud en el tiempo. En las pruebas se observa que la magnitud de los índices cambia considerablemente de un instante a otro, por lo tanto, el nivel de contaminación detectado depende del momento de la medición y no de la condición real del aislador. Por este motivo, en este trabajo se presenta un análisis detallado de la LC y sus armónicos, que sirve para entender su comportamiento bajo distintas condiciones de contaminación y humedad. En una cámara de niebla artificial se somete a pruebas a un aislador bajo distintos niveles de humedad y también distintos niveles de contaminación. Los datos de estas pruebas son procesados para realizar los cálculos de índices.

El análisis por realizar posee las siguientes características diferenciadoras con respecto a otros trabajos:

- Se analiza el comportamiento de la amplitud de la corriente *rms* y la impedancia del aislador en el tiempo. Se registran los valores mínimos, máximos y en estado estacionario. Esto permite mostrar las tendencias de la amplitud de la LC y de la impedancia del aislador, y concluir si existen tendencias en función de la humedad y la contaminación.
- Se realiza un análisis detallado de la amplitud de armónicos en función del tiempo. Se observa si existe tendencia de los armónicos 3^{er}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no} y 11^{mo} de la LC para distintos niveles de contaminación y humedad. En este trabajo se investigarán las causas que provocan las variaciones de amplitud de los armónicos en el tiempo.
- Se introduce el concepto de impedancia armónica para aisladores, que consiste en calcular la impedancia por cada uno de los armónicos impares entre el 3^{ero} y 11^{vo}. La importancia de este análisis radica en que algunos índices son dependientes de la amplitud de la corriente armónica, y mediante la impedancia armónica se propone explicar las diferencias de amplitud en los índices.
- Para cada una de las pruebas se calculan los índices R_{hi} , K, PD y THD; y se concluirá cuál es el índice que ofrece mejores resultados en la determinación del nivel de contaminación. También se incluye las condiciones de borde para cada índice.

1.5. Hipótesis y Objetivos

Hipótesis:

El análisis de la impedancia armónica de un aislador define límites de borde para el uso de los armónicos de la corriente de fuga lo que mejora el diagnóstico del grado de contaminación existente en aisladores.

Objetivo General:

Desarrollar un sensor no invasivo de corriente de fuga para aisladores, y un sistema para monitorear la humedad junto a un sistema de procesamiento y análisis que permita determinar el nivel de contaminación en aisladores.

Objetivo 1:

Diseñar e implementar un sistema de medición de corriente de fuga (sensor) no invasivo, que no afecte la aislación ni la continuidad de servicio de la instalación eléctrica, para uso en aisladores de alta tensión.

Objetivo 2:

Medir la corriente de fuga y humedad en aisladores de terreno para relacionar analizar el efecto de la humedad y los lavados en la magnitud de corriente.

Objetivo 3:

Definir el efecto que tiene la humedad relativa en los parámetros del aislador y en la corriente de fuga, para así mejorar el desempeño de los índices utilizados para determinar el nivel de contaminación en aisladores.

Objetivo 4:

Desarrollar un procedimiento de análisis de la corriente de fuga registrada, basada en el cálculo de la impedancia armónica que permita estimar el nivel de contaminación de los aisladores.



2. Sistema de Medición de Corriente de Fuga

Esta tesis forma parte de un sistema de integral para el monitoreo del nivel de contaminación en aisladores mediante la medición de la corriente de fuga.

El sistema de monitoreo está constituido por sensores de variables de terreno (corriente y ambientales), un sistema fotovoltaico para proveer energía (con almacenamiento), y una plataforma de visualización y análisis de datos.

La Fig. 2.1 muestra el sistema de monitoreo desarrollado para determinar el nivel de contaminación en aisladores de alta tensión.

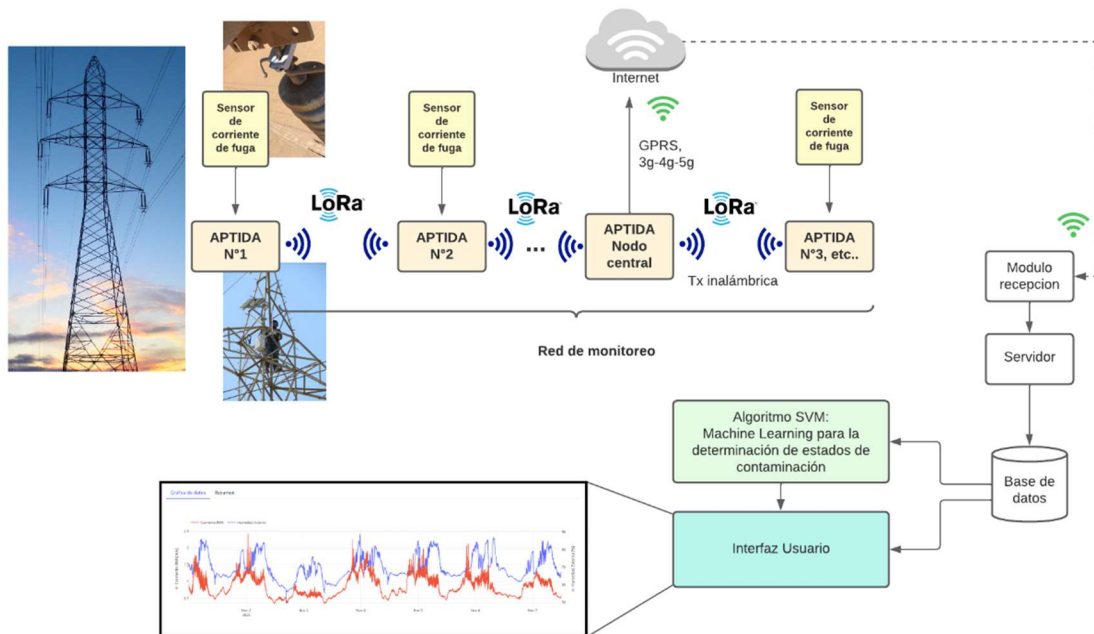


Fig. 2.1: Sistema de medición de corriente de fuga.

Cada torre de alta tensión tiene asociado un dispositivo. Este dispositivo está constituido por un sensor de corriente de fuga, sensores de humedad y temperatura, y un sistema electrónico para la adquisición, el procesamiento y la transmisión inalámbrica de los datos (*APTIDA*). La información que fluye entre las torres es transmitida mediante una red de comunicaciones propia de tecnología *LoRa*. Luego, un nodo central es el encargado de aglutinar los datos de los *APTIDAS* de cada torre. El nodo central se conecta a 3G y sube los datos a internet. Luego, los datos son almacenados en un servidor alojado en la nube donde son procesados. Un algoritmo basado en las variables medidas determina el nivel de contaminación en terreno. Finalmente, las variables medidas de terreno son

presentadas en una plataforma de visualización para el usuario final. Este trabajo de investigación se centra en desarrollar el sensor de corriente de fuga para utilizar en los aisladores, y también aportar al conocimiento del comportamiento de la corriente de fuga y los armónicos que debe utilizar el algoritmo de identificación del estado de aislación.

2.1. Sensor de corriente de fuga para aisladores

En esta sección se presenta el diseño del transformador de corriente de fuga no invasivo para uso en el monitoreo de contaminación en tiempo real. La solución de medición se centra en un transformador de corriente con un núcleo partido tipo tenaza de material ferromagnético, y un circuito electrónico adosado al secundario del transformador que cumple la finalidad de amplificar la salida de voltaje. De acuerdo con lo revisado en la literatura la LC en aisladores puede presentar amplitudes variables dependiendo del tipo de aislador, la distancia de fuga de la cadena y la contaminación. Se encuentran magnitudes entre los $50 \mu A$ y los $500 mA$. Con estos datos se diseña un sensor de LC, no invasivo del tipo tenaza, que cumple con las condiciones de ser instalado en la cadena sin necesidad de sacar de servicio la LAT o la subestación. En la Fig. 2.2 se muestra la ubicación del transductor de corriente en la cadena de aisladores. De izquierda a derecha, se muestra una torre de alta tensión con un circuito trifásico, luego, en el centro y en azul la ubicación del sensor de corriente sobre el primer aislador de la cadena, y finalmente a la derecha, el sensor de corriente en el herraje (ferretería) que une el aislador a la torre de alta tensión.

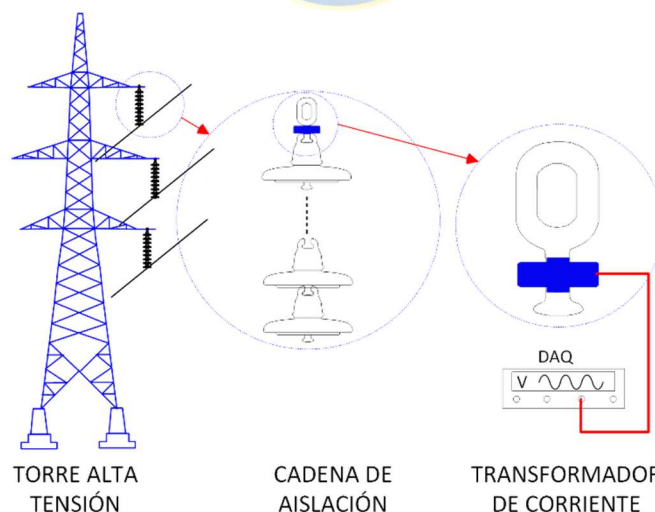


Fig. 2.2: Ubicación física de sensor en cadena de aisladores

El núcleo del transformador de corriente se propone como toroidal con entrehierro de un

material de alta permeabilidad con tal de aumentar la amplitud del voltaje de salida y facilitar la adquisición de los datos. Este material permite obtener una mayor amplitud de voltaje de salida, que es necesario para facilitar su lectura debido a las bajas magnitudes de corrientes de fuga en el primario. La solución considera a la salida del transformador de corriente un circuito electrónico basado en Amplificadores Operacionales, que aumentan la amplitud de la señal de voltaje para facilitar la lectura y la transmisión de los datos hacia un receptor de la información. Para el encapsulado del transductor se propone un material conductor y conectado a tierra, con tal de aislar el sensor del ruido electromagnético presente en las subestaciones y líneas de alta tensión.

El diseño del transformador de corriente se apoya en los fundamentos de electromagnetismo desarrollando las ecuaciones necesarias que relacionan el voltaje de salida y la corriente de entrada, que permiten encontrar la mejor relación de parámetros para que el sensor cumpla con las limitaciones de espacio físico. El transductor es probado en laboratorio para las distintas frecuencias y amplitudes de LC, con tal de obtener la función de transferencia que posteriormente será utilizada para reconstruir la señal de LC en base a la ganancia en cada uno de los armónicos característicos. En una cámara de pruebas con un aislador sometido a un voltaje de 10 kV, se prueba el sensor y se compara la medición obtenida con un sensor comercial tipo LEM modelo CTSR 0.6 P. Por último, el transductor es instalado en una subestación de 220 kV para evaluar su funcionamiento.

A través de este conjunto de pruebas se evaluará el desempeño del sensor para determinar el nivel de contaminación mediante la LC.

2.1.1 Diseño de transformador de corriente

Para el diseño del transformador de corriente, en esta sección se describe el proceso de selección del material, dimensiones del núcleo ferromagnético y determinación del número de vueltas de la bobina secundaria. Como se muestra en la Fig. 3.2 el sensor debe diseñarse para ser montado en el herraje que ancla la cadena con la estructura de soporte. Esta condición establece una restricción de diseño, puesto que el diámetro interior del sensor no puede ser inferior al diámetro del herraje. Lo mismo ocurre con la altura del sensor que no puede superar ciertas dimensiones para calzar entre la parte superior e inferior del herraje.

Las dimensiones que son parte de las restricciones del diseño se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Medidas de restricciones de diseño

Tipo	medida
Diámetro herraje	15 mm.
Altura herraje	20 mm.

Para el diseño del sensor, se debe indicar que opera bajo el principio de inducción magnética, es decir se busca medir la LC a través de la tensión que se induce en la bobina secundaria, producto del campo magnético alterno que induce la LC en el núcleo electromagnético del sensor. De las ecuaciones de electromagnetismo se puede deducir que el flujo en el núcleo del transformador puede ser escrito como muestra en la ecuación 3.1.

$$\phi = \mu_{core} \frac{A_{core} i_f}{l_{core}} \quad (2.1)$$

De la ecuación (3.1) se puede observar que, para maximizar la presencia de flujo en el núcleo del sensor, se debe elegir un material con alta permeabilidad, aumentar el área y reducir el camino o trayectoria del flujo. El material Supermalloy presenta una alta permeabilidad inicial y su disponibilidad en el mercado es relativamente amplia. Luego de elegido el material, se procede a deducir una ecuación para el voltaje de salida del transformador. La tensión de salida del sensor está dada por la ecuación (3.2):

$$V_s = \frac{d}{dt} (N_s \phi) = \frac{d}{dt} \left(N_s \mu_{core} \frac{A_{core} i_f}{l_{core}} \right) = N_s \mu_{core} \frac{A_{core}}{l_{core}} \cdot \frac{di_p}{dt} \quad (2.2)$$

La tensión inducida por la LC resulta ser directamente proporcional a la cantidad de vueltas de la bobina secundaria N_s . Se puede deducir que la ganancia del sensor dada por la relación entre el voltaje de salida (V_s) y la corriente de entrada (i_p), y queda definida en la ecuación (3.3).

$$G_s = \frac{V_s}{i_p} = N_s \frac{\mu_{r_{core}} \mu_0 (R_0 - R_i)^2}{\pi (R_i + R_0) + 2A_g \mu_{r_{core}}} 2\pi f \quad (2.3)$$

Finalmente, la ganancia del sensor es directamente proporcional al número de vueltas de la bobina secundaria y tiene una relación directa con la frecuencia de la LC y sus armónicos. Para maximizar la ganancia, el radio interno (R_i) debe ser lo más pequeño posible, mientras que el radio

externo (R_o) lo más grande posible. No obstante, existe una limitación de montaje. Finalmente, y considerando los espacios que se deben considerar para la bobina y el encapsulado, se define las medidas físicas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros constructivos de la bobina.

Nombre	Descripción
<i>Toroide Seccionado</i>	<i>Supermalloy</i>
Radio Interno (R_i)	16 mm
Radio Externo (R_o)	21 mm
Altura (h)	$5 \cdot 10^{-2}$ m
Ancho (d)	$5 \cdot 10^{-2}$ m
N_s	4000
<i>Conductor</i>	<i>Cobre esmaltado</i>
Nº de vueltas	2000
Diametro	0.2 mm
Air gap (A_g)	$1.0 \cdot 10^{-5}$ m
<i>Parametros</i>	<i>Valor</i>
Permeabilidad del vacio (μ_0)	$4\pi \times 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1}$
Frecuencia (f)	50 Hz

Por razones de fabricación y disponibilidad de espacio se define que la bobina secundaria tenga 4000 vueltas.



2.1.2 Diseño del circuito amplificador de tensión

Los valores de voltaje obtenidos a la salida del sensor de corriente son de magnitudes relativamente bajas (entre los *micro* y los *milivolts*), es por esta razón que se diseña un circuito de amplificación capaz de aumentar el nivel de voltaje a la salida. Esta etapa de amplificación se realizó con un integrado INA121P que permite seleccionar una ganancia con el valor de una resistencia externa (R_g). La entrada es diferencial, lo que permite no depender de una tierra de referencia. La ganancia del amplificar está dada por la ecuación (3.4).

$$G_A = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_g} \quad (2.4)$$

La resistencia R_g es elegida en un valor de $50 \text{ k}\Omega$. Esta resistencia es agregada al circuito como un potenciómetro de valor $50 \text{ k}\Omega$.

2.1.3 Pruebas de sensor en laboratorio

Con la finalidad de obtener la respuesta en frecuencia del sensor de LC conformado por el transformador de corriente y el circuito de amplificación se procede a realizar pruebas en laboratorio que permiten obtener la ganancia y desfase experimental. Las pruebas consisten en hacer circular corriente por el primario con distintos niveles de amplitud y frecuencia. La corriente de entrada fue elegida entre $50 \mu A$ y $500 mA$, y la frecuencia entre 50 y $550 Hz$ con múltiplos de $50 Hz$. La ganancia del sensor (G) se define como la división del voltaje efectivo de salida (v_{s_rms}) dividido por la corriente efectiva de entrada de sensor (i_{f_rms}) para cada frecuencia ($\omega = 2\pi f$), y se puede escribir como la ecuación (3.5).

$$G(\omega) = \frac{v_{s_rms}}{i_{p_rms}} \quad (2.5)$$

El desfase (θ) entre el voltaje de salida (v_s) y la corriente de entrada (i_p), se calcula con la ecuación (3.6).

$$\theta = \varphi_{(v_s)} - \varphi_{(i_p)} \quad (2.6)$$

En la Fig. 2.3 se presentan los resultados de las pruebas para la obtención de la ganancia para distintas magnitudes de corriente y frecuencia en la corriente de entrada.

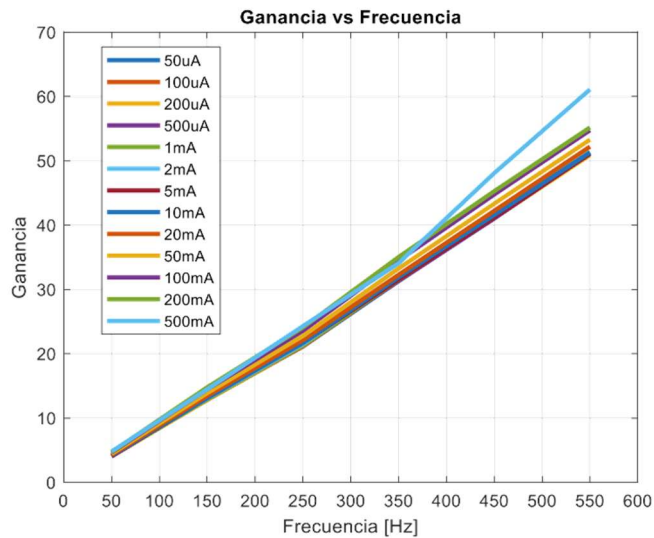


Fig. 2.3: Ganancia del transductor en función de la frecuencia.

En la Fig. 2.3 se observa que la ganancia es prácticamente lineal desde los 50 a los 550 Hz para cualquier nivel de corriente de entrada a excepción de 500 mA, donde se observa una despreciable desviación, posiblemente producto de la medición. En la Fig. 2.4 se observa que la ganancia del sensor es constante para las distintas frecuencias independiente del nivel de corriente. Solo se observa un aumento en la ganancia a altas frecuencias y mayor amplitud de corriente.

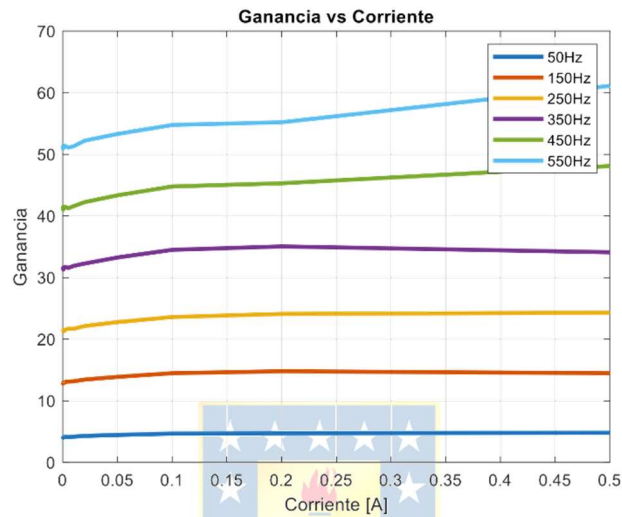


Fig. 2.4: Ganancia en función de la amplitud de corriente de entrada.

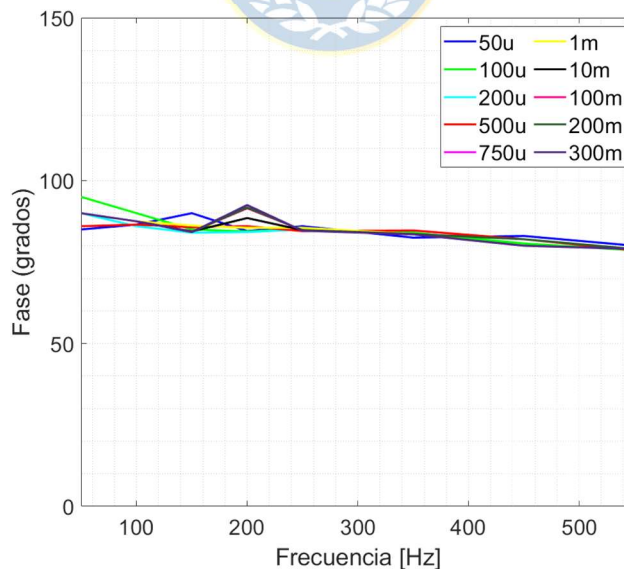


Fig. 2.5: Desfase en función de la amplitud de corriente para distintas frecuencias.

La Fig. 2.5 muestra el desfase (θ) entre el voltaje de salida (v_s) y la corriente de entrada (i_f) para distintas magnitudes de corriente y distintas frecuencias. Se observa que el desfase tiene valores

cercanos a 90°, con una leve dependencia de la frecuencia. Las diferencias observadas a bajas frecuencias pueden deberse a las mediciones realizadas en laboratorio.

Finalmente, conocida la respuesta del sensor en función de la frecuencia, en cuanto a ganancia y fase, es posible conocer su función de transferencia que es utilizada para reconstruir la señal de corriente primaria (fuga) en función de la medición del voltaje de salida.

2.1.4 Reconstrucción de la corriente de fuga

Para reconstruir la LC del primario se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a la señal de voltaje de salida, y con esto se obtienen las amplitudes para cada uno de los armónicos de orden 1^{er}, 3^{er}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no} y 11^{vo}. Luego, se genera una tabla con los datos de amplitud para cada frecuencia. A esta tabla se le asigna una ganancia dependiendo de la frecuencia y se obtienen los armónicos de la LC. Para cada frecuencia se obtiene la amplitud de la LC mediante la ecuación (3.7).

$$i_{p_h} = \frac{v_{s_h}}{G_h} \quad \text{con } h = 1, 3, 5 \dots 11. \quad (2.7)$$

Luego, la corriente de fuga se calcula como la suma de las corrientes para cada armónico calculadas mediante la ecuación (3.7). La ecuación que define la corriente de fuga es (3.8).

$$i_f = \sum_1^{11} i_{p_h} \quad \text{con } h = 1, 3, 5 \dots 11. \quad (2.8)$$

2.1.5 Validación

En esta sección se muestran los detalles de las pruebas realizadas para validar el sensor de corriente sobre un aislador expuesto a un voltaje (nominal) de 9 kV. También, se muestra la respuesta del sensor en una cadena de aisladores de una subestación de 220 kV.

A. Validación en cámara de niebla artificial

Para validar el sensor en condiciones de operación se diseña un *set-up* de laboratorio que permite aplicar a un aislador un voltaje de hasta 11 kV. Además, para simular condiciones de alta humedad se construye una cámara de niebla artificial basada en la norma IEC 60507. La Fig. 2.6 muestra el *set-up* de laboratorio construido para probar aisladores bajo condiciones de humedad controlada. Con un Variac monofásico de 380 V y un transformador de 380/13.2 kV se obtiene a la

salida la tensión que se aplica al aislador. Por otro lado, se implementa un sensor de corriente comercial (marca LEM), y una sonda para medir el voltaje entre la fase y tierra. Los datos son adquiridos y procesados por una tarjeta de adquisición y procesamiento de datos marca National Instruments y visualizados a través del software LabView. Las mediciones son procesadas a una frecuencia de muestreo de 25 kHz. También, la cámara de niebla contiene varios aspersores de microgotas encargados de generar la humedad dentro de la cámara.

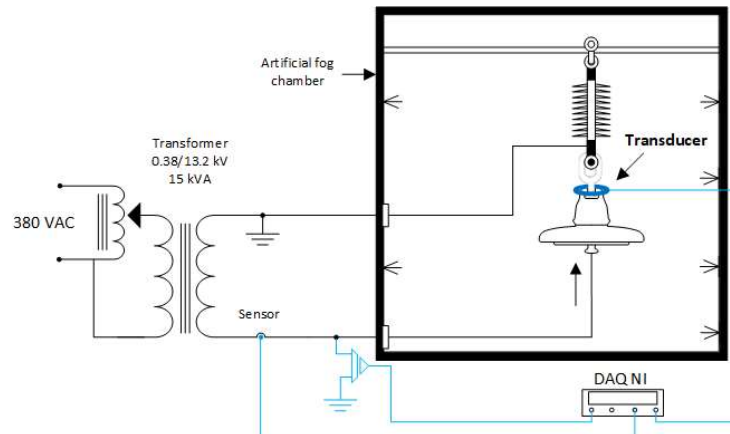


Fig. 2.6: Set-up medición de LC en media tensión.

El voltaje requerido para simular las condiciones de operación de un aislador dentro de una cadena se explica a continuación. Las cadenas de aisladores de una subestación de 220 kV se encuentran expuestas a una tensión nominal de $220 \text{ kV}/\sqrt{3}$.

Las cadenas de aisladores pueden estar compuestas por 13 a 15 unidades de aisladores dependiendo del voltaje entre líneas y la contaminación. El voltaje entre *cap* y *pin* de aislador ($V_{cap-pin}$) se calcula con la ecuación (3.9).

$$V_{cap-pin} = \frac{\text{Voltaje nominal}_{L-L}}{\sqrt{3} \cdot \text{Número de aisladores}} \quad (2.9)$$

Por lo tanto, el voltaje V_{cap-p} de un aislador presenta valores entre 8,5 y 9,7 kV. En este caso, para las pruebas de laboratorio se utiliza 9 kV. La Fig. 2.7 muestra el sensor de corriente conectado al herraje de un aislador que sostiene el aislador.



Fig. 2.7: Sensor de corriente en cámara de niebla.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas de laboratorio. La Fig. 2.8(a) muestra el voltaje de salida del sensor. La Fig. 2.8(b) presenta el resultado de la medición de la corriente de fuga en el aislador medida con el sensor diseñado (en color azul) y con el micro amperímetro comercial (en color negro). Se observa que el voltaje de salida tiene un primer armónico en los 50 Hz , con un alto componente armónico. No obstante, luego de aplicar la función de transferencia inversa los resultados de la forma de onda de la corriente obtenida con el sensor diseñado son similares a los obtenidos con el sensor comercial.

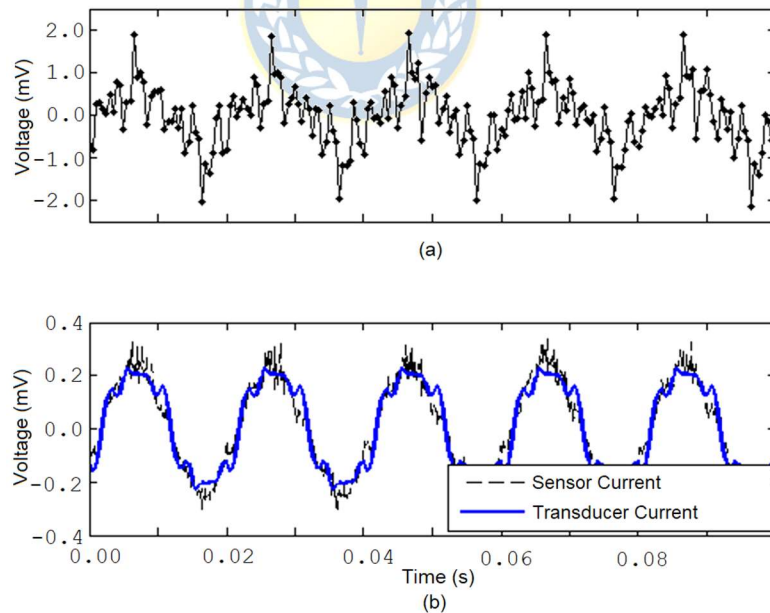


Fig. 2.8: Implementación en Laboratorio.

En las Fig. 2.9(a) y 2.9(b) se muestra el espectro armónico para la LC medida con cada uno de los sensores.

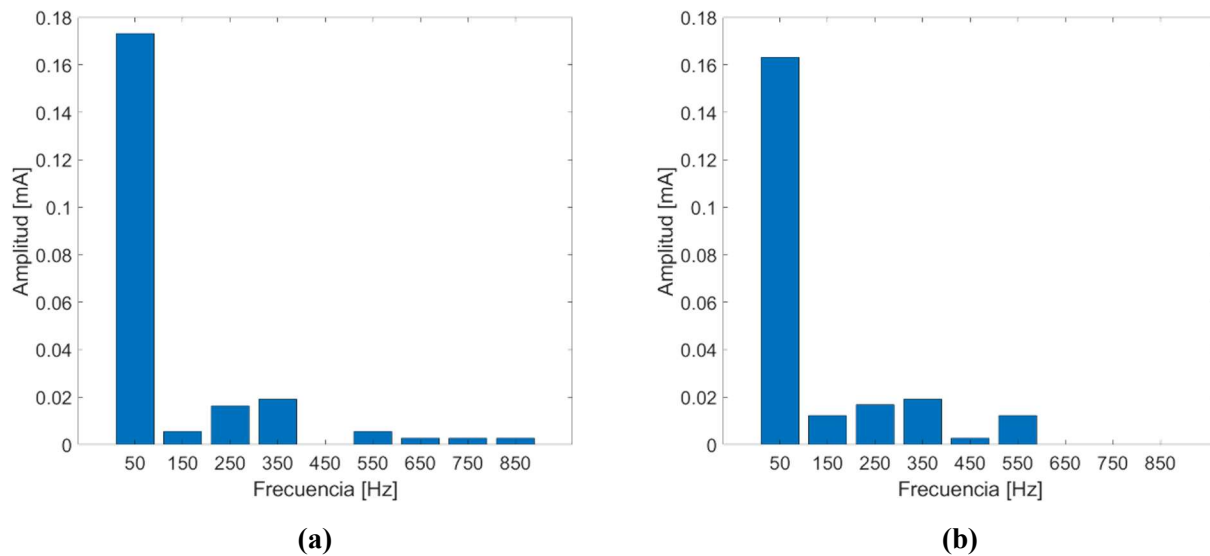


Fig. 2.9: Espectro en frecuencia (a) sensor diseñado (b) sensor comercial

Se observa que la LC reconstruida tiene armónicos característicos de la LC para este tipo de aisladores, y además tiene amplitudes similares a los medidos con el sensor comercial. La amplitud de la corriente medida a 50 Hz por el sensor comercial es de 0,167 mA y la medida por el sensor diseñado es de 0,160 mA, con una diferencia del 3.9 %. Algo similar ocurre para los armónicos de corriente de orden 3^{ero}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no} y 11^{vo}, en donde las diferencias en promedio son de 1,23 %. Estos resultados muestran que el sensor presenta un correcto funcionamiento cuando es instalado en el herraje de un aislador y sometido a una fuente de 9 kV en un ambiente controlado.

B. Validación en subestación de 220 kV

La subestación elegida está ubicada en el desierto del norte de Chile a 100 metros del mar. La zona presenta una importante actividad industrial que permite probar el sensor en un ambiente salino y de alta contaminación. Para la evaluación, el sensor es instalado en una de las cadenas de aisladores energizada. Su instalación fue realizada en el herraje del aislador más cercano a la estructura metálica (primer aislador). La salida del sensor es conectada a un cable apantallado encargado de transmitir los datos hacia el equipo de adquisición y procesamiento de datos ubicado en la parte inferior del marco de línea (ML). La Fig. 2.10(a) muestra una fotografía de la cadena de aisladores y el sensor a 20 metros de altura. En la Fig. 2.10(b) se observa el sensor instalado en el herraje, específicamente en el tensor que sostiene la cadena del ML. También se observa el cable encargado de transportar los datos desde el sensor al equipo de adquisición.

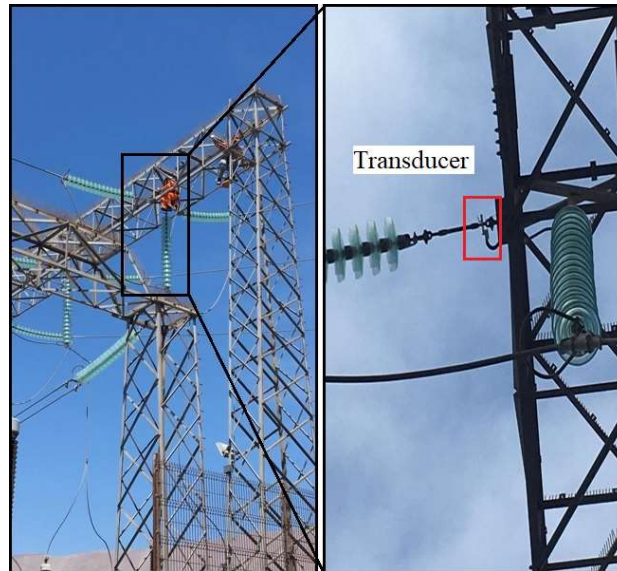


Fig. 2.10: Espectro en frecuencia de corriente comercial

Para la validación se muestran los datos obtenidos de la medición de LC en un periodo de 7 días. La LC reconstruida es mostrada en la Fig. 2.11(a). Se observa que la LC presenta un valor promedio de $0,48 \text{ mA}$ que fluctúa entre $0,22$ y $0,65 \text{ mA}$. Esta fluctuación tiene una periodicidad de 24 horas y depende de la humedad presente en la zona, y tiene una relación con el día y la noche. Específicamente la LC aumenta su amplitud en los horarios de madrugada cuando la humedad aumenta, ver Fig. 2.11(b). Estos resultados son concordantes con los discutidos en la sección Trabajos Previos.

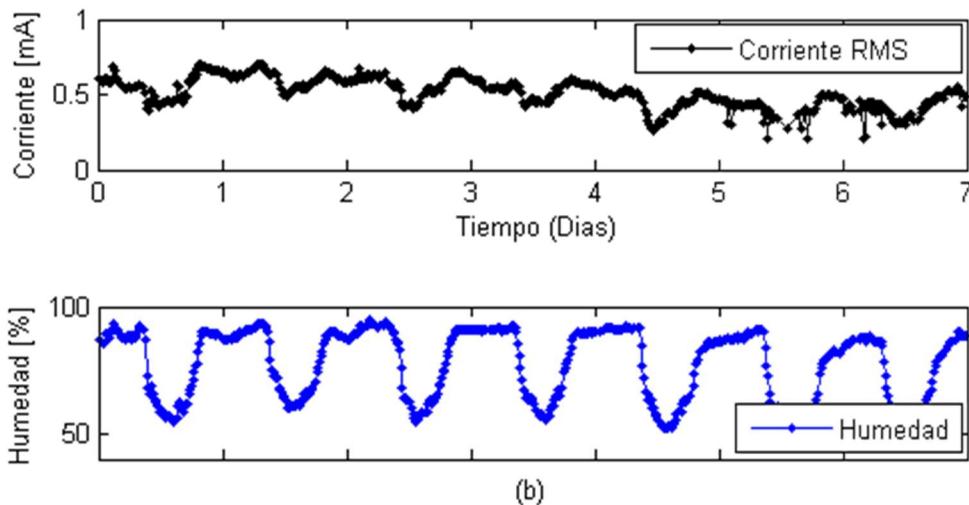


Fig. 2.11: Corriente medida en subestación de 220 kV.

(a) Corriente *rsm* (b) Humedad

En la Fig. 2.12(a) se muestra la forma de onda de la corriente reconstruida para un instante determinado cuando la humedad es alta. En la Fig. 2.12 (b) se observa el espectro armónico de esta corriente que contiene armónicos de baja amplitud (menos a $0,1 \text{ mA}$) de 3^{er}, 5^{to} y 7^{mo} orden. El THD calculado alcanza un valor de 14,8 %.

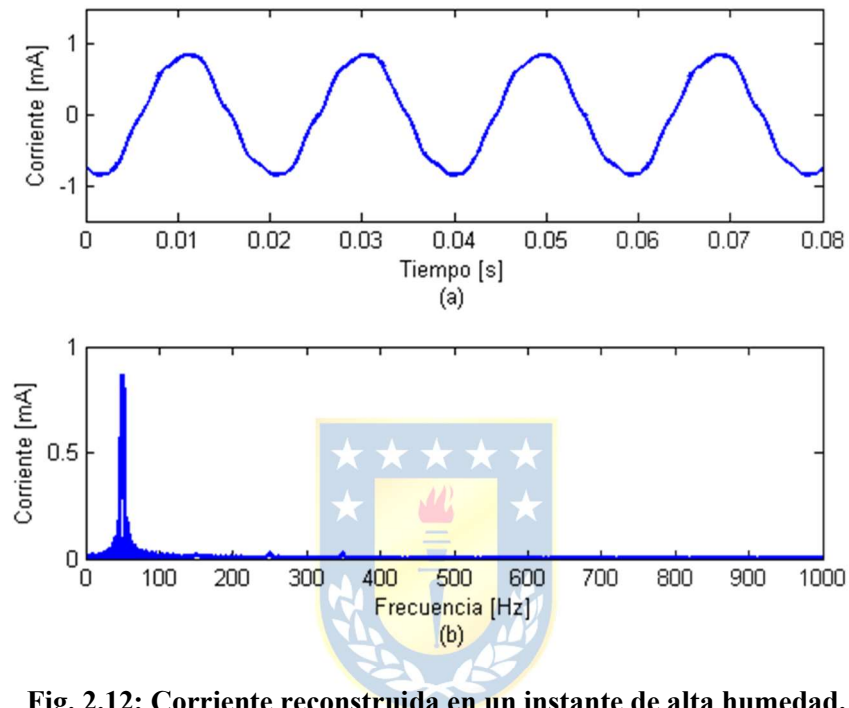


Fig. 2.12: Corriente reconstruida en un instante de alta humedad.

(a) Forma de onda (b) Espectro armónico

2.1.6 Conclusiones

Se diseñó, fabricó y evaluó un nuevo sensor de corriente de fuga para cadenas de aisladores de LAT. El sensor obtiene la forma de onda de la LC de la cadena de aisladores a partir de sus armónicos característicos, por lo que puede ser usado para aplicar las técnicas más recientes de determinación del nivel de contaminación. El sensor de corriente presenta una ganancia directamente proporcional a la frecuencia de los armónicos de la corriente de fuga. Para 50 Hz la ganancia es de 4,05. Para reconstruir la señal de corriente, se aplicó la FFT al voltaje de salida del sensor y la función de transferencia. Esta técnica permitió medir la LC mostrando un contenido armónico similar al medido con un sensor comercial, con diferencia de 3,9 % para el 1^{er} armónico y 1,29 % en promedio para el resto de los armónicos. Finalmente, el sensor fue instalado y probado en una cadena de

aisladores de 220 kV sin necesidad de interrumpir la operación del sistema eléctrico y también sin afectar la aislación propia de la cadena. Los niveles de corriente de fuga obtenidos en la subestación de 220 kV son del orden de magnitud que se presentan en la literatura ($480 \mu A$), mostrando una variabilidad dependiente de la humedad presente en el sector.

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que el sensor puede ser utilizado para medir corrientes de fuga, y como una herramienta para determinar el nivel de contaminación en aisladores.

Por otro lado, los resultados del diseño y validación del sensor se han publicado en un artículo científico [36] en WoS.



2.2. Mediciones de corriente de fuga en terreno

En esta sección se presentan los resultados de medición de corriente de fuga y variables medioambientales realizadas en terreno con el sistema de monitoreo descrito en la sección 3.

En total se instalaron 6 sistemas de medición (dispositivos) en 3 zonas geográficas del norte del país, para 2 empresas de transmisión de energía. Del total, 1 dispositivo fue instalado en una subestación, 1 dispositivo en una línea de 500 kV, y 4 unidades en un tramo de una línea de 220 kV. Estos últimos 4 conforman una red de comunicaciones que incluye un nodo central encargado de subir los datos a internet.

Por confidencialidad, se obvia mencionar el nombre de las empresas, y también los nombres específicos de la subestación y de las líneas de alta tensión. En la Tabla 3.1 se presentan las 3 instalaciones que serán mostradas y analizadas en este trabajo. Las unidades corresponden a la cantidad de aisladores en cada cadena.

Tabla 2.3 Sitios de Mediciones de corriente de fuga

Núm. Instalación	Tipo	Ubicación	Tipo de Aislación	Dist. de Fuga (mm)
1	Subestación 220 kV	Iquique	Vidrio	545 (16 unidades)
2	LAT 500 kV	Antofagasta	Vidrio Siliconado	620 (27 unidades)
3	LAT 220 kV	Mejillones	Vidrio	445 (15 unidades)

La elección de las instalaciones se hace por las particularidades que presentan. La Instalación N°1 corresponde a una subestación de 220 kV cercana al mar donde la contaminación es muy alta, y los lavados de aislación son muy frecuentes. La Instalación N°2 es una línea de alta tensión de 220 kV con un aislador de tipo vidrio siliconado. La Instalación N°3 es una línea de alta tensión de 220 kV donde se instalaron 4 dispositivos de manera contigua, y se podrán observar si existen diferencias entre las mediciones.

2.2.1 Instalación N°1

La Fig. 3.1 muestra la corriente eficaz en una cadena de aisladores de una subestación y la humedad ambiental mediante el mismo dispositivo instalado cerca de la ciudad de Iquique.

La humedad muestra una evolución de valores entre mínimos cercanos a 38% y máximos de 83%. Las corrientes registradas para estos niveles de humedad son de 0,25 y 1,8 mA, respectivamente. Las variaciones esta relacionadas con el día y la noche. En las noches la humedad es alta y en el día

la humedad es baja. Se observa que la amplitud del valor eficaz de la LC tiene una variación que está directamente relacionada con la variación de la humedad ambiental.

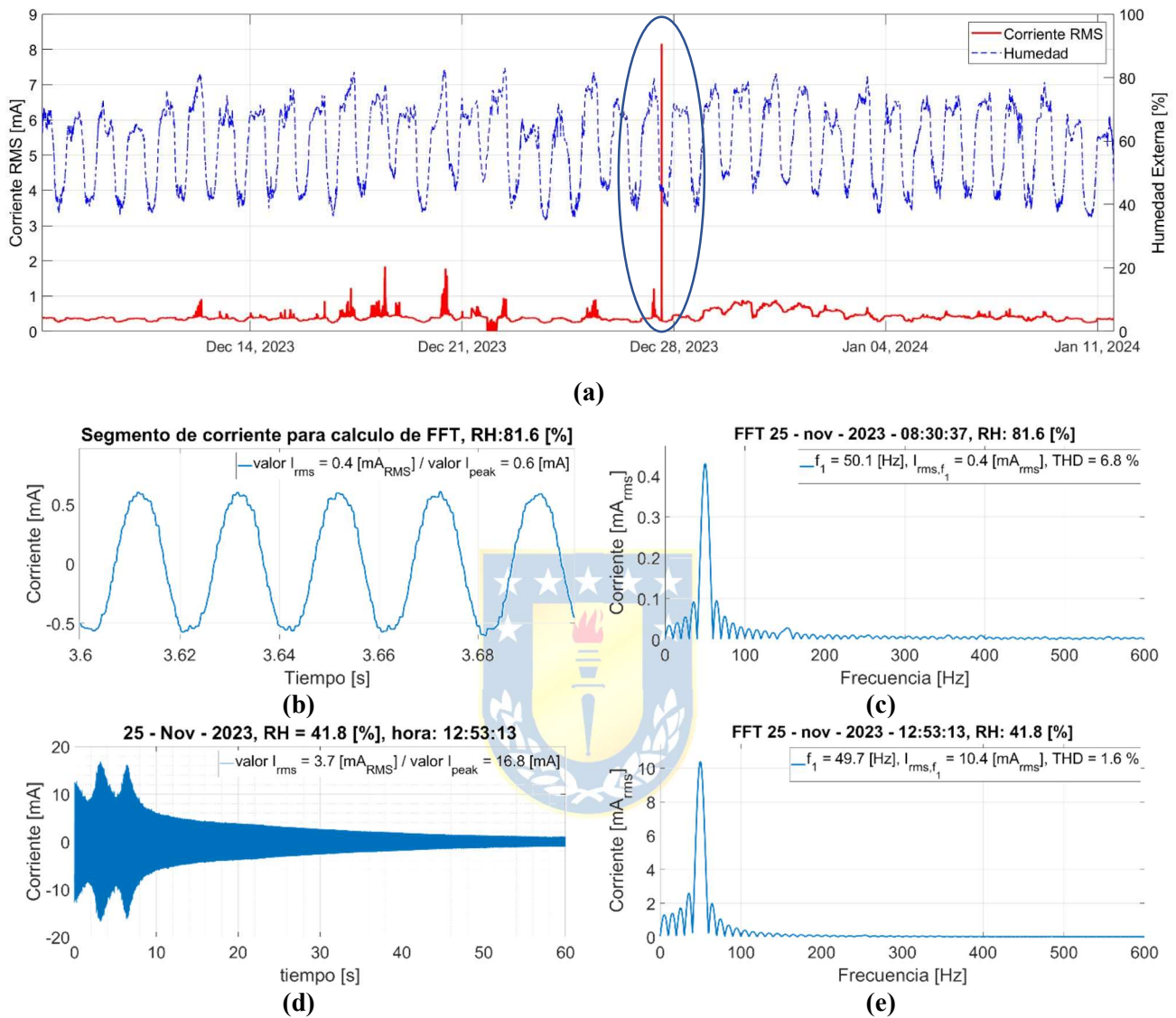


Fig. 2.13 Mediciones en Instalación 1

(a) Un mes de medición (b) FO corriente en condición normal (c) Espectro de corriente en condición normal (d) FO de corriente en lavado (e) Espectro en F. de corriente en lavado.

Los máximos de la corriente están relacionados con las máximas humedades registradas. Por ejemplo, para el 20 de diciembre, la medición de humedad fue de 83 % y el valor de corriente registrado fue de 1,8 mA. El mínimo de corriente está relacionado con la mínima humedad. Por ejemplo, para el 26 de diciembre, la humedad fue de 38% y la corriente de 0,25 mA.

El día 27 de diciembre se observa un máximo en corriente que sobresale del resto de las mediciones. Este valor se debe a un lavado de aislación. Se puede observar que el chorro de agua a

presión genera un aumento de la LC que en este caso puede alcanzar los 8,2 mA. Un valor 4,5 veces mayor que los otros máximos observados en este periodo.

Las altas magnitudes de corriente durante el proceso de lavado han sido mencionadas por algunos autores del artículo [37] que relacionan el agua o alta humedad en el ambiente al momento del lavado con las alzas de magnitud de LC.

En las Fig. 3.1 (b) y Fig. 3.1 (c) se muestra la FO de la corriente para un alto nivel de humedad (81,6 %) y el espectro armónico de la LC, respectivamente. La corriente de fuga presenta un THD de 6,8 %, con armónicos de 3^{er} orden de un 6,4 % con respecto al primer armónico. En las Fig. 3.1 (d) y Fig. 3.1 (e) se muestra la FO y espectro para la corriente de fuga durante el lavado. Aunque la corriente de fuga aumenta su magnitud considerablemente, el contenido armónico baja a un THD de 1,6 %, prácticamente sin armónicos relevantes. Esto se debe a que el agua utilizada es agua desmineralizada.

Finalmente, se puede destacar que la magnitud de la corriente de fuga está relacionada con la humedad ambiental medida en la torre. La corriente muestra un rango de magnitud previa al lavado entre 0,35 y 1,8 mA, y post lavado entre 0,30 y 0,85 mA a 37 y 80 % de humedad, respectivamente. Si bien se observa una pequeña disminución de la amplitud de la magnitud de la corriente de post lavado, estos valores se encuentran en un rango muy cercano uno del otro.

2.2.2 Instalación N°2

Se muestran los resultados de mediciones obtenidas con el sistema de medición en la zona de Antofagasta, con la particularidad de que el aislador es de vidrio siliconado. La silicona es un recubrimiento de goma que se aplica a aisladores de vidrio a zonas con alta contaminación. El material tiene características hidrofóbicas por lo que repele la humedad y al agua, y con esto la adhesión de la contaminación en la superficie.

En la Fig. 3.2 se muestran las variables de humedad y valor efectivo de la corriente en el tiempo. La magnitud de la corriente también está relacionada con la humedad del día y la noche. No obstante, se observan algunos máximos de magnitud importante. La corriente en condiciones de humedad menores al 80% presenta un valor promedio de 0,47 mA. Cuando la humedad aumenta, la máxima corriente registrada alcanza los 14 mA con una humedad del 92 %. Estos máximos representan un valor mayor por 30 veces. En este caso, los máximos de corriente se repiten cuando la humedad supera el 85% aproximadamente.

En las Fig. 3.2 (b) y Fig. 3.2(c) se muestra la FO de la corriente y la FFT para una condición sin máximos. La FO se observa prácticamente sinusoidal pura con un THD de 4,3 %. En la Fig. 3.2 (d) y Fig. 3.2 (e), se muestran 1 segundo durante uno de los instantes de máximos registrados. Los armónicos de 3^{er}o y 5^{to} orden son importantes con valores de 69 % y 29 %, respectivamente. El THD alcanza el 74%.

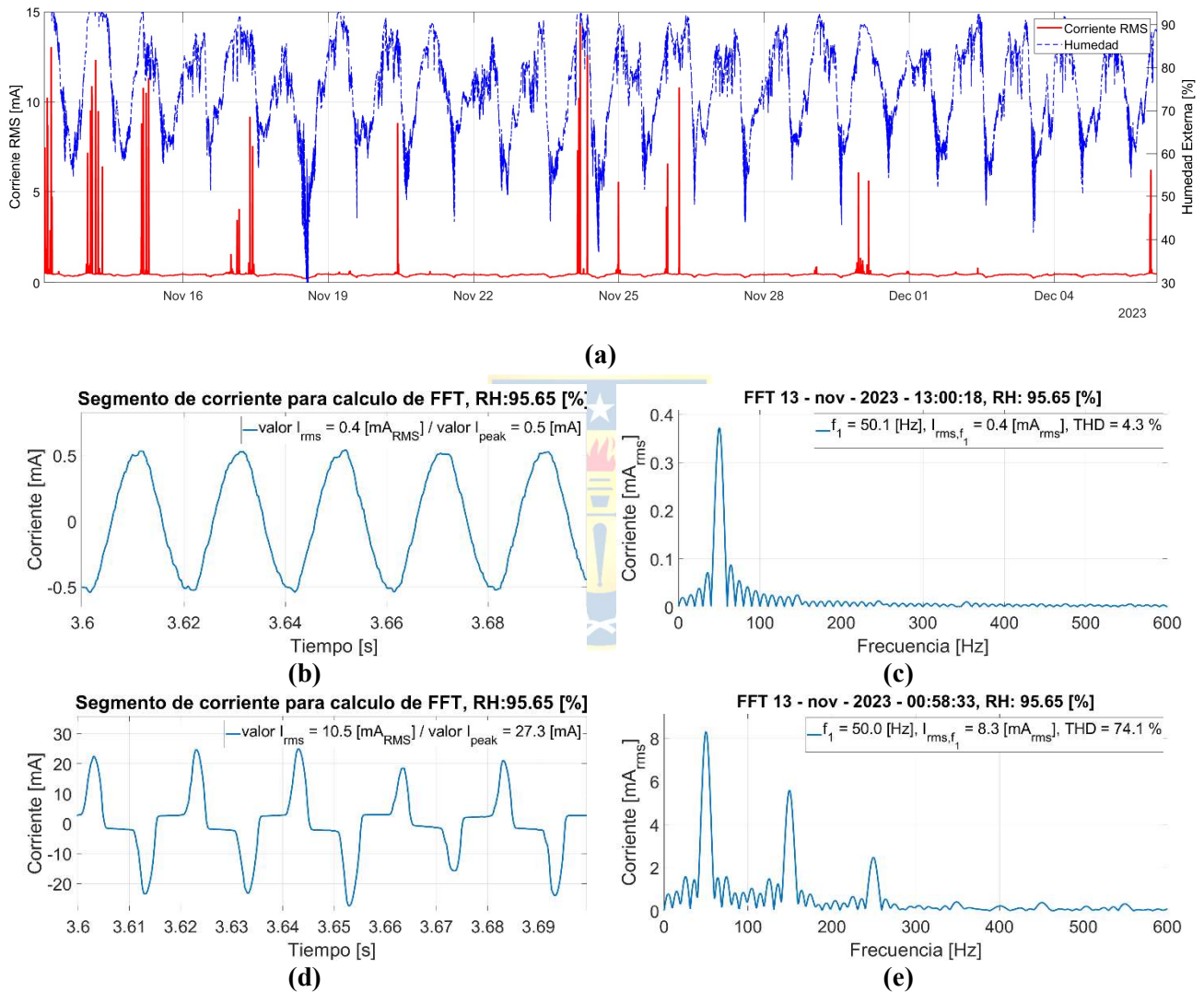


Fig. 2.14 Mediciones en Instalación 2

(a) Un mes de medición (b) FO corriente en condición normal (c) FFT de corriente en condición normal (d) FO de corriente en máximo (e) FFT de corriente en máximo.

En la Instalación N°2, nuevamente se observa una relación entre el nivel de corriente y la humedad. No obstante, las diferencias de magnitud son mayores al caso anterior (30 veces). Esto se puede deber al material del aislador (vidrio siliconado).

2.2.3 Instalación N°3

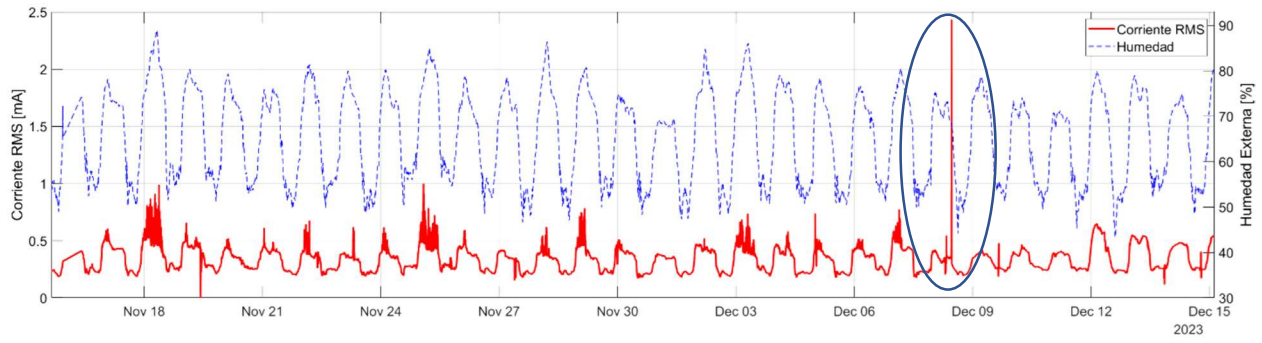
En la Instalación N°3 se muestran los resultados para los 4 dispositivos de sistema de monitoreo de medición de corriente de fuga y variables medioambientales instalados en una línea de alta tensión. Los dispositivos son instalados en 4 cadenas de aisladores de 4 torres diferentes (torre 1 a torre 4). Con estos dispositivos se puede estimar si la separación de 1,3 kilómetros (aproximada) entre dispositivos muestra diferencias en los niveles de corriente de fuga.



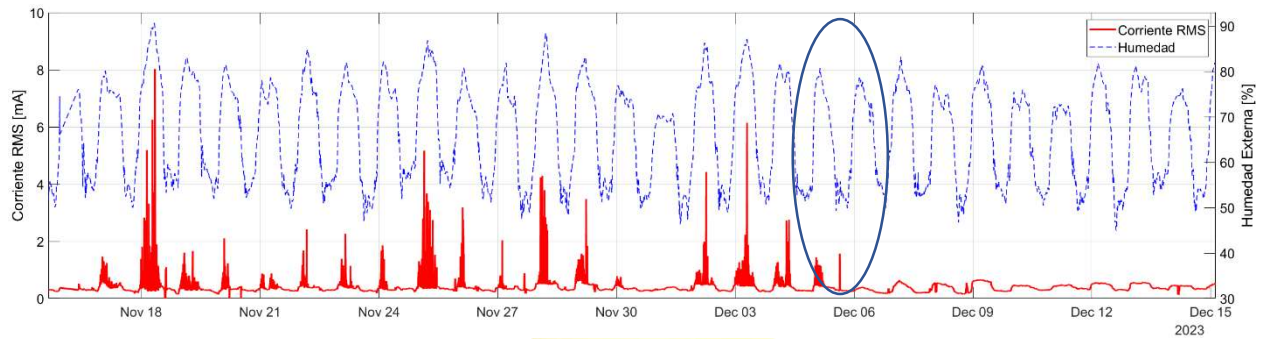
Fig. 2.15 Mediciones en Instalación 3 – Línea de alta tensión

Los dispositivos se encuentran ubicados en línea recta dirección poniente-oriente con la siguiente asignación: 1, 2, 3 y 4, como se muestra en la Fig. 3.3. Longitud total del tramo de línea es de 3,9 kilómetros. Las cadenas de aisladores donde se instalaron los dispositivos son cadenas de suspensión (posición vertical) para las torres 1, 3 y 4. La torre 2 presenta montaje horizontal.

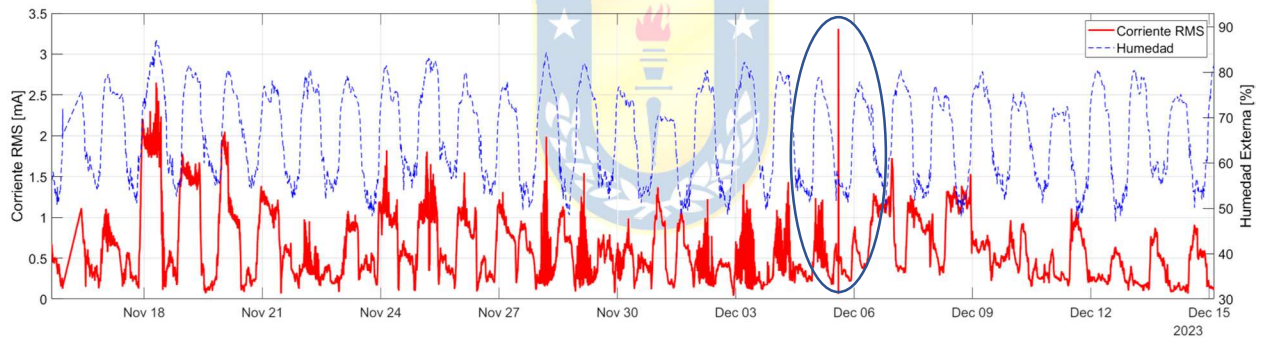
Los resultados de corriente de fuga y humedad relativa para cada dispositivo se muestran en la Fig. 3.4. La Fig. 3.4 (a) representa las mediciones en el dispositivo N°1. La Fig. 3.4 (b) representa las mediciones en el dispositivo N°2. La Fig. 3.4 (c) representa las mediciones en el dispositivo 3 y la Fig. 3.4 (d) representa las mediciones en el dispositivo N°4.



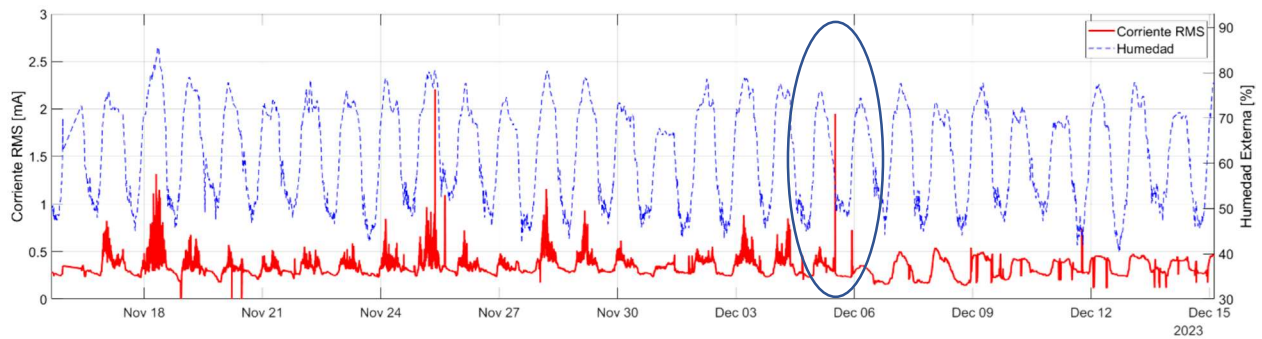
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2.16 Mediciones en Instalación 3 – Señales de corriente y humedad
(a) Dispositivo N° 1 (b) Dispositivo N° 2 (c) Dispositivo N° 3 (d) Dispositivo N° 4

En color azul se encierra la corriente en el instante de lavado de aislación para cada cadena de cada torre de alta tensión.

Al igual que los casos anteriores (Instalaciones N°1 y N°2) se observa que la magnitud de la corriente está relacionada con la magnitud de la humedad. Los dispositivos 1 y 2 ubicados más cercanos al mar, presentan una humedad máxima más alta (90%) con respecto a los dispositivos 3 y 4 (86%).

Los rangos de magnitud de la corriente en los 4 dispositivos son diferentes y varían entre 1,0 y 8,1 *mA*. Los valores mínimos para los 4 dispositivos presentan un rango entre 0,11 y 0,25 *mA*.

Las condiciones de contaminación pueden considerarse similares, ya que los 4 dispositivos son instalados en los mismos aisladores y la ubicación geográfica es la misma; por lo tanto, al mostrar un rango variable la magnitud de la corriente de fuga, parece que ser que por si sola no puede ser relacionada con la contaminación.

2.2.4 Efecto del lavado en el tramo de línea

En la Tabla 3.2 se muestran los valores máximos de corriente para la etapa previa al lavado (pre-lavado), durante el lavado y después del lavado (post-lavado). La máxima corriente eficaz registrada de 8,1 *mA* se observa en el dispositivo 2 a los 90,4% de humedad en la etapa pre-lavado.

Debido a que las condiciones de lavado se asumen igual para las 4 torres y realizadas anteriormente en la misma fecha, se puede estimar que la mayor corriente puede estar relacionada a que la torre 2 recibió mayor contaminación de sales solubles.

Durante el proceso de lavado, las corrientes alcanzadas son altas y corresponden a las máximas registradas para los dispositivos 1 y 3; con magnitudes de 2,43 *mA* y 3,31 *mA*, respectivamente. Para el dispositivo 2 la corriente solo alcanza los 1,55 *mA*. Esto puede estar relacionado con la posición horizontal de la cadena de aisladores, que tiene la capacidad de adherir más contaminación en la superficie.

Tabla 2.4 Valores máximos de corriente

Disp.	Pre-Lavado		Lavado		Post-Lavado	
	Imáx rms (mA)	Hum (%)	Imáx rms (mA)	Hum (%)	Imáx rms (mA)	Hum (%)
1	1,0	76,8	2,43	67,5	0,65	79,5
2	8,1	90,4	1,55	53,2	0,66	79,2
3	2,6	87,0	3,31	56,9	1,72	62,9
4	2,2	80,0	1,95	55,4	0,74	44,9

Por otro lado, se puede observar que los lavados tienen un efecto en los niveles de corriente de fuga en las cadenas de aisladores. La magnitud de la corriente de fuga luego de los lavados se redujo en los 4 dispositivos.

Si se considera un índice que relacione la corriente con la humedad (*corriente/humedad*), se puede obtener un valor que identifique la magnitud de la corriente con el porcentaje de humedad. Se puede concluir que los lavados redujeron la magnitud del índice de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 4.3.

Tabla 2.5 Índice corriente/humedad

Disp.	Pre-lavado Índice (mA/%)	Post-lavado Índice (mA/%)
1	0,013	0,008
2	0,090	0,008
3	0,030	0,016
4	0,028	0,016

La efectividad de lavado se puede calcular como la relación entre el índice *corriente/humedad* del pre-lavado y post-lavado. Los resultados se muestran en la Tabla 3.3.

Para el dispositivo 1 y 2 el lavado de ambas cadenas de aisladores logró magnitudes similares (0,08 mA/%). Para el dispositivo 3 y 4 el valor post-lavado es de 0,016 mA/%.

Si se considera que los lavados realizados con anterioridad a la medición fueron hechos de la misma forma y en la misma fecha, se observa que los aisladores de montaje o posición horizontal acumulan mayor cantidad de contaminación que los de posición vertical. Esto puede ser relacionado con la forma del aislador y la disposición de los aisladores (vertical y horizontal).

Los lavados de aisladores producen un aumento momentáneo de la amplitud de la corriente de fuga. El aumento de la magnitud de la corriente puede variar dependiendo del procedimiento de realizar el lavado en la torre. Las tasas de aumento registradas fueron desde 2,43 a 4,5 veces para el caso de aisladores de vidrio. La limpieza de los aisladores producto del lavado es más efectiva mientras mayor suciedad exista en el aislador.

Se define un nuevo índice que relaciona la corriente y la humedad (*corriente/humedad*) con unidades "mA/%". Esto permite determinar que las 4 torres presentan distintos niveles de corriente en función de la humedad medida, y por lo tanto, podrían estar afectas a distintos niveles de contaminación.

Durante el lavado la forma de onda de la corriente en aisladores de vidrio es más sinusoidal con un THD de 1,6 % (previo un 6,8 %). En el caso de aislador de vidrio siliconado aumenta de 4,3 a 73 %.

2.2.5 Conclusiones

Con las distintas mediciones de terreno se ha podido deducir que la magnitud de la corriente de fuga muestra un rango de magnitud que va desde los 0,11 a los 8,1 *mA*.

En la Instalación N° 1 la corriente puede aumentar hasta 7 veces su magnitud cuando la humedad pasa de 38 % a 83 %. En el caso de aisladores de vidrio siliconado (Instalación N° 2) el aumento registrado fue de hasta 30 veces con una humedad de 92 %. En la Instalación N° 3 se observa que los máximos valores de corriente en alta humedad se encuentran entre 1,0 y 8,1 *mA*.

Se observa que existe una relación entre la corriente y la humedad, y que queda de manifiesto en los cambios de humedad y corriente que existen entre la noche y el día.

Las magnitudes de corriente registradas son diferentes entre las distintas instalaciones y en algunos casos mantienen valores similares antes y después del lavado. Por lo tanto, parece ser que la magnitud de la corriente por sí sola, no es un indicador suficiente para determinar el nivel de contaminación en aisladores.

Por lo anterior, en la siguiente sección se realizará un análisis detallado de la magnitud de la corriente de fuga en el aislador y la influencia de la humedad. Además, se presentará un análisis de los parámetros de la corriente de fuga, y algunos índices propuestos por la literatura para determinar el nivel de contaminación en aisladores.

3. Análisis de la corriente de fuga para determinación del nivel de contaminación en aisladores

Con el propósito de observar el efecto de la humedad y la contaminación en la corriente de fuga de un aislador se calculan los parámetros eléctricos del modelo equivalente del aislador, y se analiza su comportamiento en el tiempo. Los parámetros estudiados son parte del modelo serie del aislador: impedancia, resistencia serie y reactancia serie. Los resultados son relacionados con el proceso de la absorción de humedad del aislador y la capa de contaminación que se produce a lo largo de las pruebas. Este análisis es de interés ya que sirve para entender las variaciones que se observan en la magnitud de la LC. Además, se introduce por primera vez, el concepto de impedancia armónica en aisladores que sirve para analizar el comportamiento de los armónicos de la corriente de fuga.

3.1. Aislador U120B y Escenarios de Humedad y Contaminación

El aislador U120B es frecuentemente utilizado en trabajos de investigación y referenciado en normas internacionales como la IEC 60507 e IEC60815, por este motivo este aislador es elegido para las pruebas y el análisis. Se recrean distintos escenarios con distintos niveles de humedad y diferentes niveles de contaminación para el aislador U120B (en adelante aislador). Para cada una de las pruebas, cada unidad es contaminada sumergiendo el aislador en una mezcla de Sal y Caolín. Luego, se retira y es secado en ambiente natural por un periodo de 12 horas.

Las cantidades de Sal y Caolín son elegidas para conseguir 4 niveles de contaminación. Estos 4 niveles están ubicados dentro de 4 rangos de contaminación definidos en la norma IEC 60815, correspondientes a contaminación: Baja, Media, Alta y Muy Alta. Los rangos o zonas de contaminación (ESDD y NSDD) de cada nivel están establecidos en la Fig. A.4 del Anexo A.3. En la Tabla 4.1 se muestran las combinaciones de Sal y Caolín utilizadas para las pruebas realizadas en esta sección.

Tabla 3.1 Cantidades y niveles de contaminación

Mezcla	Agua (ml)	Caolín (g)	NaCl (g)	Nivel de Cont.
1	5000	200	100	Alta
2	10000	400	200	Alta
3	5000	200	0	Baja
4	5000	600	0	Baja
5	5000	600	300	Alta
6	5000	600	1450	Muy Alta
7	5000	200	30	Media
8	5000	50	100	Alta

Previo a la ejecución de las pruebas, la cámara de niebla artificial (en adelante cámara) debe alcanzar el nivel de humedad requerido y preestablecido dependiendo de la prueba. Los niveles de humedad utilizados son 60%, 80%, 90% y 100% de humedad relativa. Las pruebas mantienen un nivel de humedad constante por medio de un control automático que es comandado con LabView. Durante el proceso se ejecutaron aproximadamente 66 pruebas. Del total se seleccionaron las que cumplieran con las características de duración mínima, y que no presentasen errores de medición. Finalmente se utilizaron 43 de las 66 pruebas.

3.2. Parámetros e Índices de la corriente de fuga para la determinación del nivel de contaminación

Los parámetros del aislador son calculados con los datos medidos de voltaje y corriente en laboratorio. El modelo utilizado para el aislador está definido en la ecuación (5.1).

$$Z = R + jX_c \quad (3.1)$$

El módulo de la impedancia se calcula mediante la ecuación (5.2). Donde los datos son calculados cada 50 ciclos.

$$|Z| = \frac{|V_{rms}|}{|I_{rms}|} \quad (3.2)$$

La resistencia R se calcula con el *coseno* del ángulo entre el voltaje y la corriente. La X_c se calcula con el *seno* del ángulo entre el voltaje y la corriente. Por otra parte, la determinación del nivel de contaminación con índices presentados en la literatura se calcula a partir de la medición de la LC que circula por el aislador. En el Anexo A.4 se describe la teoría usada para los cálculos de algunos de los índices para la determinación del nivel de contaminación, como son el THD, R_{hi} , time-integral, y PD.

3.3. Efecto de la humedad en los parámetros del aislador

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio, y se muestra la evolución de los parámetros del aislador en el tiempo para los distintos escenarios estudiados. Se utilizaron 16 pruebas, con los escenarios que surgen de las humedades de 60, 80, 90 y 100% y con contaminación Baja, Media, Alta y Muy Alta. Debido a lo extenso que resulta mostrar

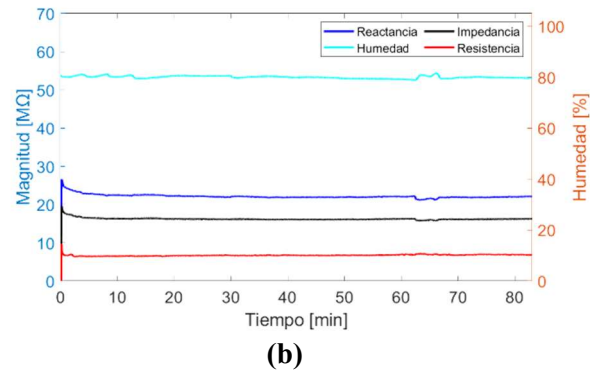
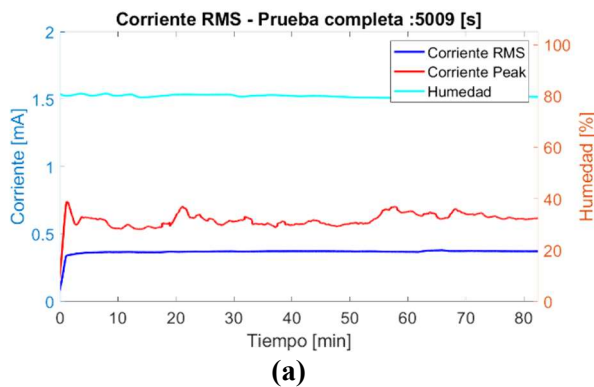
todas las figuras asociadas a cada uno de los escenarios, en esta sección se presentan solo algunos casos característicos, que permiten emitir algunas conclusiones. El resto de los resultados pueden ser consultados en el Anexo A.5. Los resultados mostrados en esta sección corresponden a los escenarios indicados en la Tabla 4.2.

Tabla 3.2 Escenarios

N° de Prueba	Humedad	Nivel de Contaminación
1	80 %	Media
2	80 %	Muy Alta
3	100 %	Baja
4	100 %	Alta

Las Fig. 4.1, Fig. 4.2, Fig. 4.3 y Fig. 4.4 muestran los resultados para la Pruebas N°1, N°2, N°3 y N°4, respectivamente. En las sub-figuras con letra (a) se muestra la corriente de fuga eficaz (*rms*) y máxima observada (*peak*). En las sub-figuras con letra (b) la impedancia, resistencia y reactancia del aislador. En las sub-figuras con letra (c) la forma de onda (F.O.) de la corriente de fuga en un instante determinado, y en las sub-figuras con letra (d) el espectro en frecuencia para el mismo instante.

Al observar las Fig. 4.1 (a)-(b) Fig. 4.2 (a)-(b) y Fig. 4.3 (a)-(b) y Fig. 4.4 (a)-(b) se observa que la magnitud (*rms*) de la LC es variable a lo largo de las pruebas y se acentúa mientras mayor es la humedad y la contaminación. Las perturbaciones observadas en la Fig. 4.2 (a)-(b) son producto de la acción del agua impulsada por la bomba dentro de la cámara.



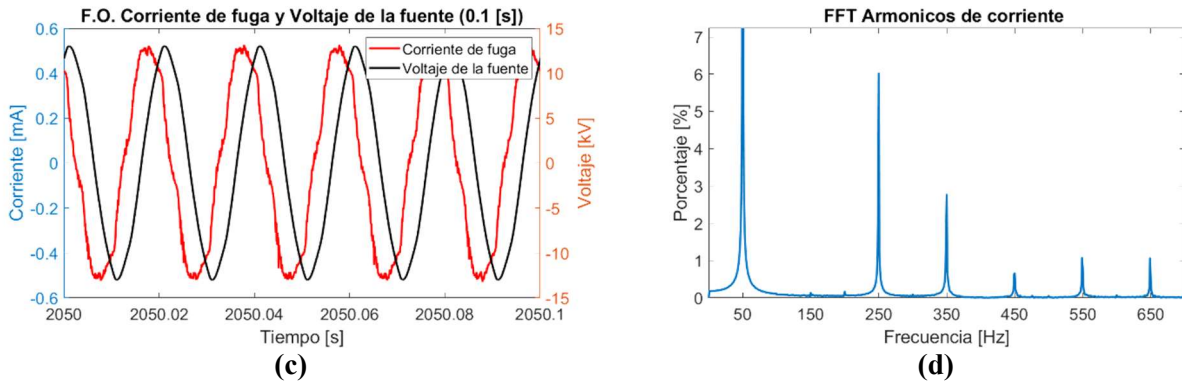


Fig. 3.1 Resultados para Prueba N°1 - (RH: 80% / Cont. Media) (a) Corriente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O de corriente. (d) FFT de corriente.

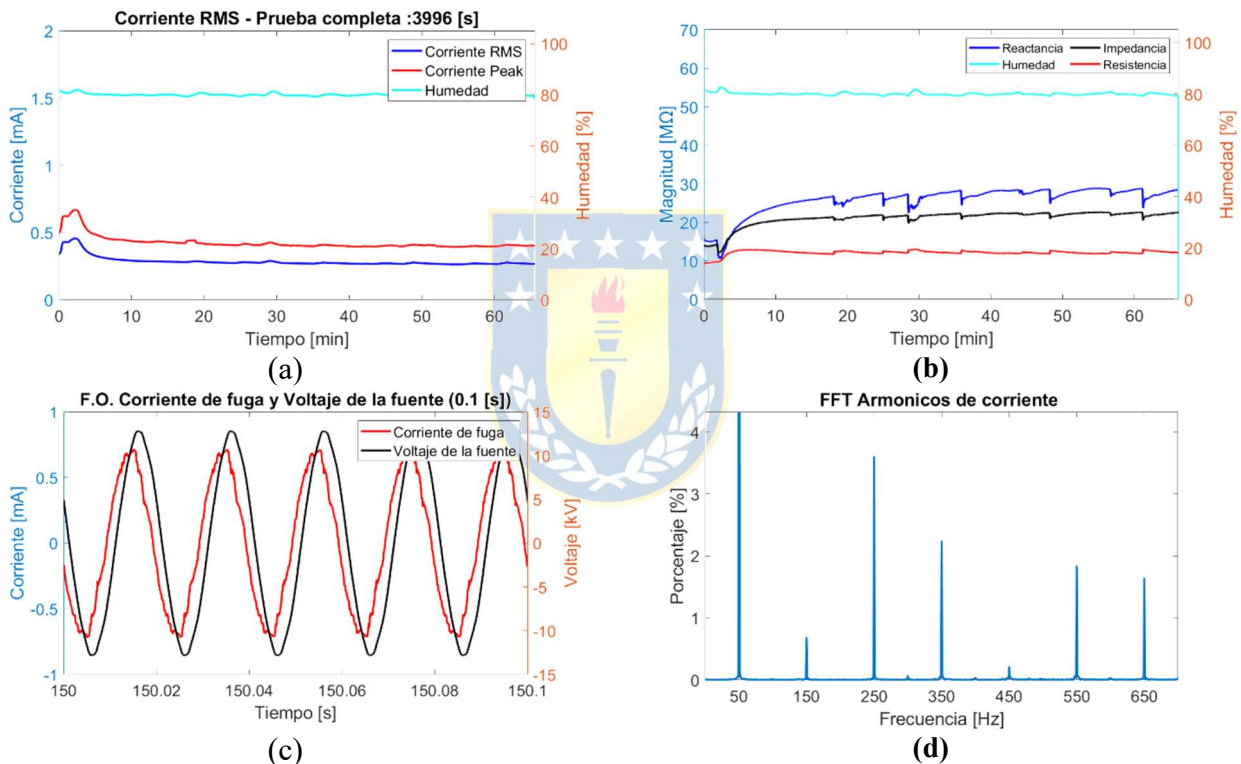
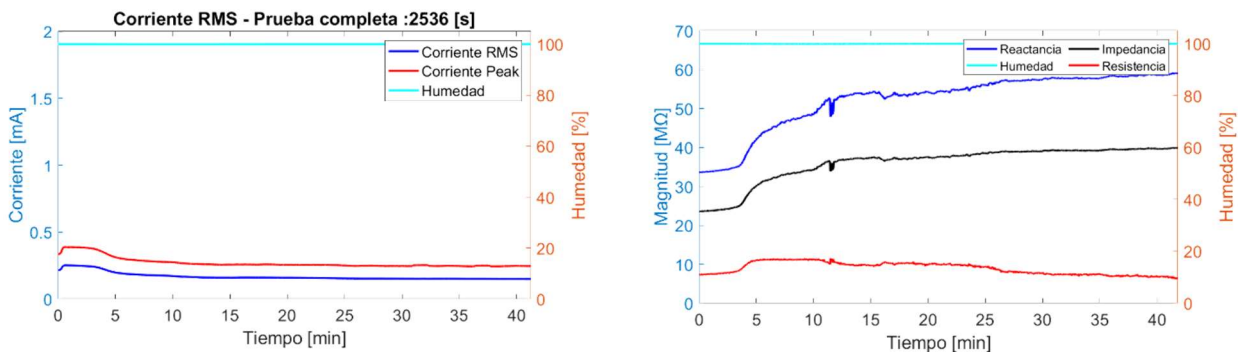


Fig. 3.2 Resultados para Prueba N°2 (RH: 80% / Cont. Muy Alta) (a) Corriente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O de corriente. (d) FFT de corriente.



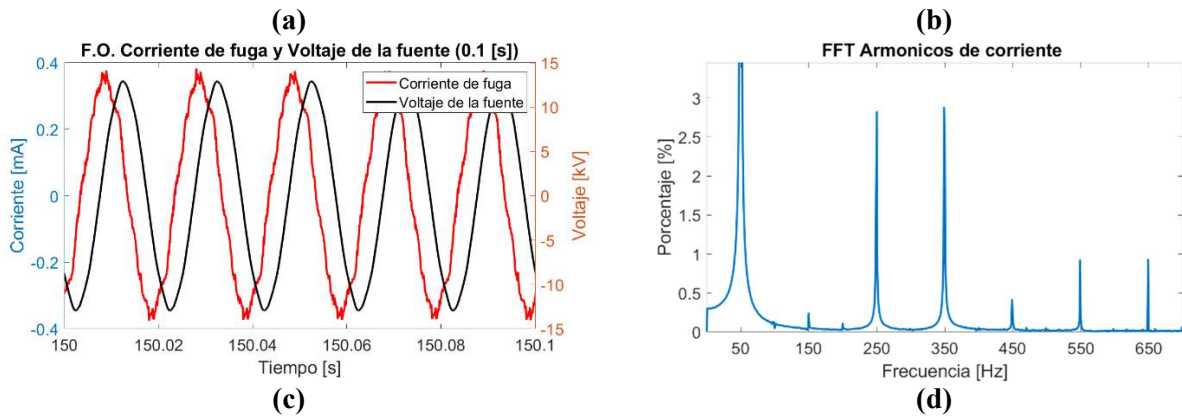


Fig. 3.3 Resultados para Prueba N°3 (RH: 100% / Cont. Baja) (a) Corriente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O. de corriente. (d) FFT de corriente.

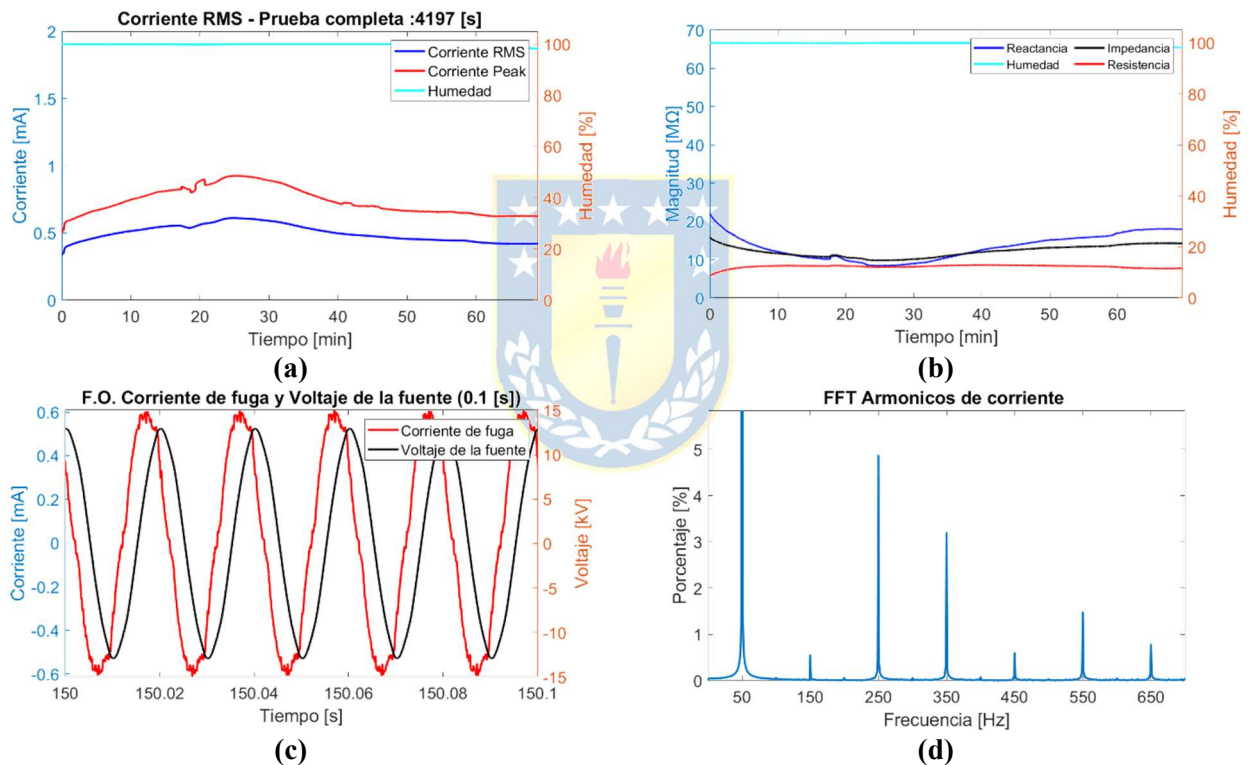


Fig. 3.4 Resultados para Prueba N°4 (RH: 100% / Cont. Alta) (a) Corriente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O. de corriente. (d) FFT de corriente.

La corriente eficaz está relacionada de manera inversa con la amplitud de la impedancia a lo largo de todo el tiempo de las pruebas.

Para la contaminación Muy Alta (Prueba N°2) el valor máximo de corriente es de 0,6 mA, mientras que para contaminación Baja (Prueba N°3) la corriente solo alcanza 0,4 mA. Esto se repite para los otros escenarios, por lo tanto, mientras mayor es la contaminación, mayor es la amplitud

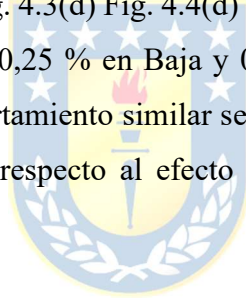
máxima de la corriente.

Algo similar se puede observar con respecto a la humedad. Para la Prueba N° 2 la corriente alcanza un valor máximo de 0,5 mA, para luego estabilizarse en 0,4 mA. En la Prueba N° 4 la corriente llega a un máximo de 0,55 mA para luego llegar a 0,45 mA. Si bien las diferencias no son tan marcadas, esto también se debe a que la contaminación es mayor en la Prueba N° 2.

Finalmente, se puede concluir de estas pruebas que mientras mayor es la humedad y/o la contaminación, mayor es el valor de corriente. También, se puede observar que en la medida que exista humedad sobre 80% y contaminación, la corriente tiene una respuesta en el tiempo que depende de la variación de los parámetros del aislador.

En las Fig. 4.1(c), Fig. 4.2(c) Fig. 4.3(c) Fig. 4.4(c) se muestran las F.O. para un instante a estado estacionario (final). Se observa que siempre la corriente adelanta al voltaje como es de esperar por la componente capacitiva del aislador. Los resultados muestran que la magnitud máxima de la corriente varía a lo largo de las pruebas mientras mayor es la contaminación y la humedad.

En las Fig. 4.1(d), Fig. 4.2(d) Fig. 4.3(d) Fig. 4.4(d) se observa que, para el instante mostrado, el 3^{er} armónico tiene una magnitud de 0,25 % en Baja y 0,1 % en Media, para Muy Alta muestra valores del orden del 0,8 %. Un comportamiento similar se puede observar con los otros armónicos. No es posible observar una tendencia respecto al efecto de la humedad y la contaminación y la magnitud de los armónicos.



3.4. Análisis de parámetros en el aislador

Como se comentó en la sección anterior, las magnitudes de los parámetros del aislador y de la LC son variables a lo largo del tiempo, observándose valores mínimos, valores en estado estable y valores máximos. En la Fig. 4.5 se presentan gráficas de barras con los resultados de la impedancia equivalente (Z), resistencia (R) y reactancia (X_c) para los distintos niveles de contaminación y humedad de tipo constante. Cada color representa un nivel de contaminación diferente tal cual se muestra en la misma figura.

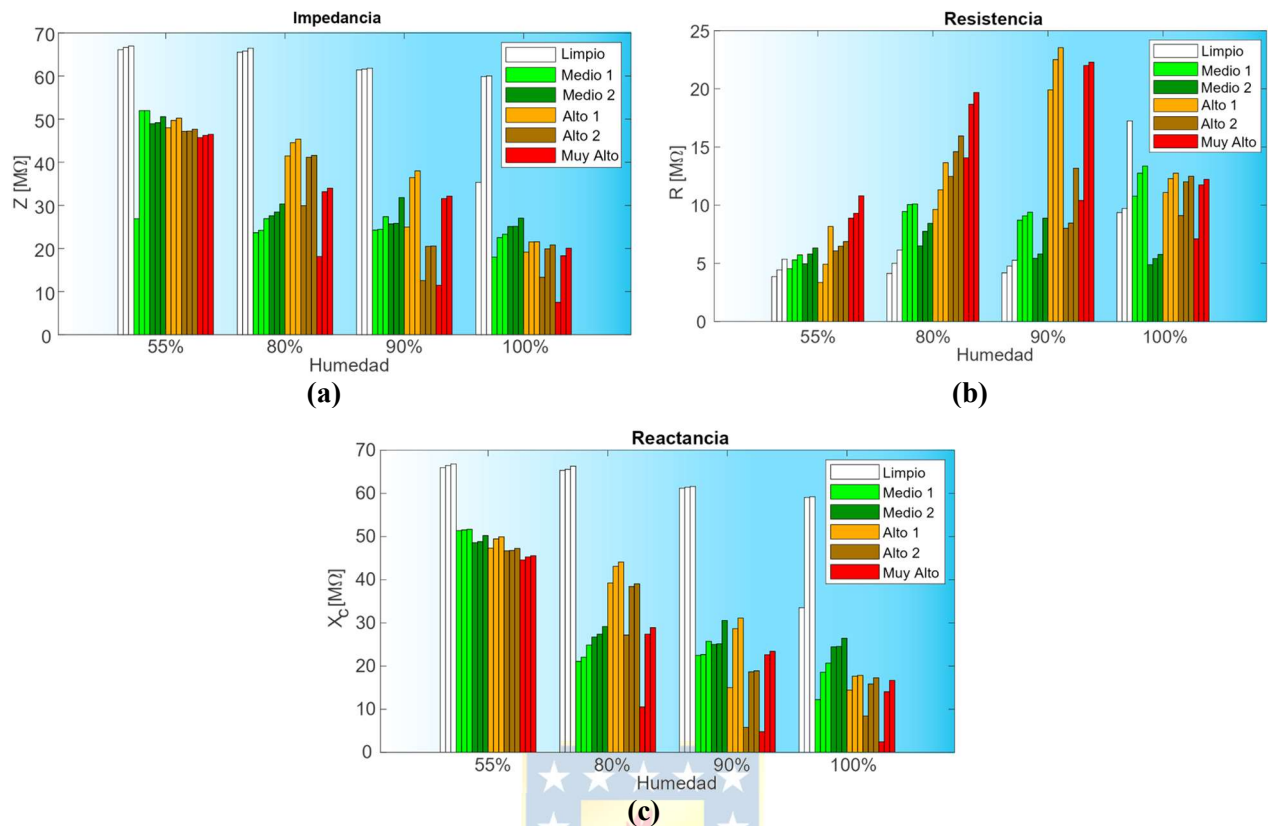


Fig. 3.5 Parámetros del aislador (a) Impedancia (b) Resistencia (c) Reactancia

En la Fig. 4.5 (a) se observa que independiente del nivel de contaminación existe una clara tendencia a la disminución de la impedancia del aislador al aumentar la humedad en la cámara. En el caso de menor contaminación (limpio), la impedancia disminuye, pero en forma menos pronunciada. Esto puede ser explicado por cantidad de agua o humedad que se deposita sobre la superficie del aislador. El agua utilizada tiene una conductividad mayor a cero que hace posible la circulación de corriente. Por otra parte, se puede observar que mientras más contaminado esté el aislador, mayor es el efecto de la humedad. Por lo tanto, se puede ratificar lo observado en la sección anterior. Existe una relación directa entre la humedad y la magnitud de la corriente. No obstante, al considerar los valores mínimos, estado estable, y máximos, se puede observar que, para una impedancia dada, por ejemplo, de 25 M Ω , los escenarios que muestran esta magnitud son varios. La diferencia de amplitud entre el valor mínimo y máximo puede alcanzar un 260 %.

Para las pruebas con humedad de 55 % (aislador seco), la impedancia se mantiene prácticamente constante independiente del nivel de contaminación, con diferencias de un 13% entre contaminación Media y Muy Alta. Esto permite concluir que el efecto de la contaminación sobre la impedancia del aislador es muy reducido para condiciones secas. Esto se debe a que la contaminación

superficial del aislador no es diluida por la humedad, y por lo tanto no se favorece la conductividad eléctrica producida por el voltaje en el aislador.

En la medida que la humedad aumenta, se observa la disminución de la impedancia. Esto se produce por la dilución de las sales (NaCl) con las partículas de agua de la humedad en la cámara. Por otro lado, en la medida que aumenta la contaminación de la capa, la disminución de la impedancia se hace más importante y la tendencia es más clara cuando aumenta la humedad.

En la Fig. 4.5 (b) se muestra la resistencia equivalente para distintos niveles de humedad y contaminación. Para humedades entre 50 y 90%, la resistencia tiene una tendencia opuesta a la impedancia equivalente, ya que aumenta su magnitud con mayor contaminación. También, en este mismo rango de humedad, aumenta la resistencia con el aumento de la humedad relativa de la cámara. En el caso de 100% de humedad se observa que aumenta la resistencia para los aisladores limpios y de media contaminación. Para valores altos de contaminación no se mantiene la tendencia, ya que la resistencia disminuye su valor considerablemente. Se puede concluir que la tendencia de aumento en la resistencia equivalente para niveles de humedad de hasta 90%, presenta un quiebre cuando la humedad alcanza el 100% en la cámara. La resistencia equivalente disminuye su valor cuando un alto contenido de partículas de agua entra en contacto con la contaminación.

La Fig. 4.5 (c) muestra la reactancia capacitiva serie del aislador. La tendencia de la reactancia es similar al de la impedancia. Al igual que la impedancia equivalente, el módulo de la reactancia es determinada mayormente por la humedad más que por el nivel de contaminación.

Finalmente, para escenarios con humedad constante el módulo de la impedancia disminuye su amplitud con el aumento de la humedad. Mientras mayor es la contaminación la diferencia de módulo es más significativa entre un valor de humedad y el siguiente. Cuando el aislador está limpio o los niveles de contaminación son bajos la diferencia de amplitud es menos importante.

Por otro lado, en la Fig. 4.5 se observa que en general los valores de impedancia, resistencia y reactancia son variables en el tiempo ya que muestran importantes diferencias entre los valores mínimos, máximos y estables. No obstante, estas diferencias son menores cuando la humedad es baja o el aislador está seco. Aunque la humedad en la cámara se mantenga constante en la capa del aislador se produce un fenómeno producto de la absorción de humedad de la capa de contaminación. Esto es un antecedente relevante para monitoreo en tiempo real de aisladores en terreno donde las mediciones de corriente y voltaje no son continuas, sino que discretas.

3.5. Análisis de impedancia armónica del aislador

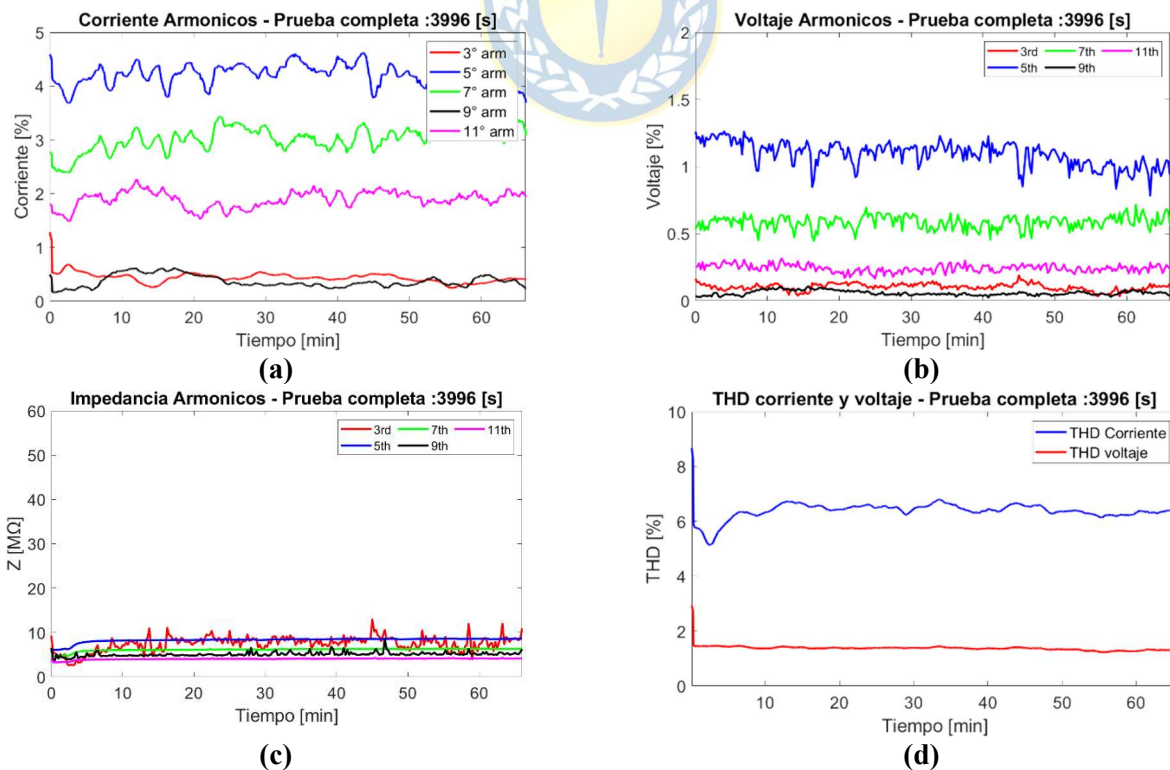
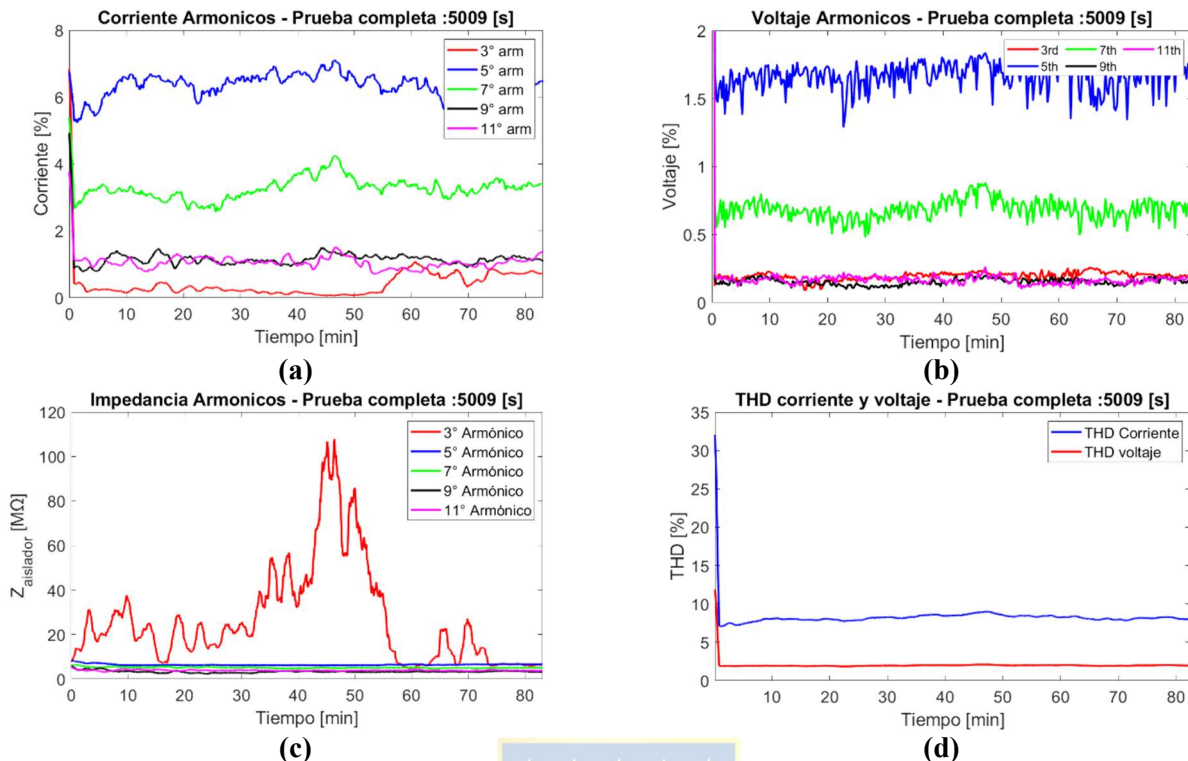
Para los mismos escenarios indicados en la Tabla 4.2 se analizan los armónicos de la LC que son utilizados por algunos de los índices.

En las Fig. 4.6, Fig. 4.7, Fig. 4.8 y Fig. 4.9 se muestra la magnitud en el tiempo de la corriente *rsm*, el voltaje *rms*, impedancia para cada armónico estudiado, y THD de voltaje y corriente.

En las sub-figuras (a) y (b) se observa que la magnitud (en el tiempo) de los armónicos de corriente de 5^{to}, 7^{mo} y 11^{vo} orden está relacionada con la evolución de la magnitud de los armónicos de voltaje del mismo orden. Los armónicos más relevantes en corriente y voltaje son el 5^{to} y 7^{mo}. Los armónicos de corriente de 3^{er} y 9^{no} orden parecen no tener una relación directa con los armónicos de voltaje en el tiempo.

Con la finalidad de observar el origen de las variaciones de magnitud en las corrientes armónicas, se calcula la impedancia para los armónicos de 3^{er}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no} y 11^{vo} orden.

En las sub-figuras (c) de las Fig. 4.6, Fig. 4.7, Fig. 4.8 y Fig. 4.9, se muestra el cálculo de la impedancia armónica para cada uno de los armónicos analizados. Para todos los escenarios, las impedancias armónicas de 5^{to}, 7^{mo} y 11^{vo} muestran un comportamiento sin variaciones importantes en el tiempo (constante), excepto en algunos casos al inicio de las pruebas. Por lo tanto, si las impedancias armónicas son constantes se puede concluir que, para estos armónicos, las magnitudes de armónicos de corriente dependen de las magnitudes de los armónicos del voltaje aplicado al aislador. Lo que implica que, la magnitud de los armónicos de la corriente de fuga depende directamente de los armónicos del voltaje de la fuente. Para la impedancia armónica de 3^{er} orden se observa que cuando la contaminación es Baja o Media presenta un comportamiento errático. La magnitud de la impedancia de 3^{er} orden muestra grandes diferencias de amplitud, incluso dentro de la misma prueba. El comportamiento errático puede ser explicado por discontinuidades de la corriente en el aislador. Cuando la contaminación aumenta a Alta o Muy Alta (Fig. 4.8 y 4.9), la impedancia armónica de 3^{er} orden se muestra sin grandes variaciones (más plana). No obstante, en instantes su magnitud está bajo y en otros instantes sobre la impedancia del resto de los armónicos. Esto puede afectar el desempeño de algunos índices como el K y R_{hi}.



(a) Corrientes armónicas (b) Voltajes armónicos (c) Impedancia armónica. (d) THD voltaje y corriente.

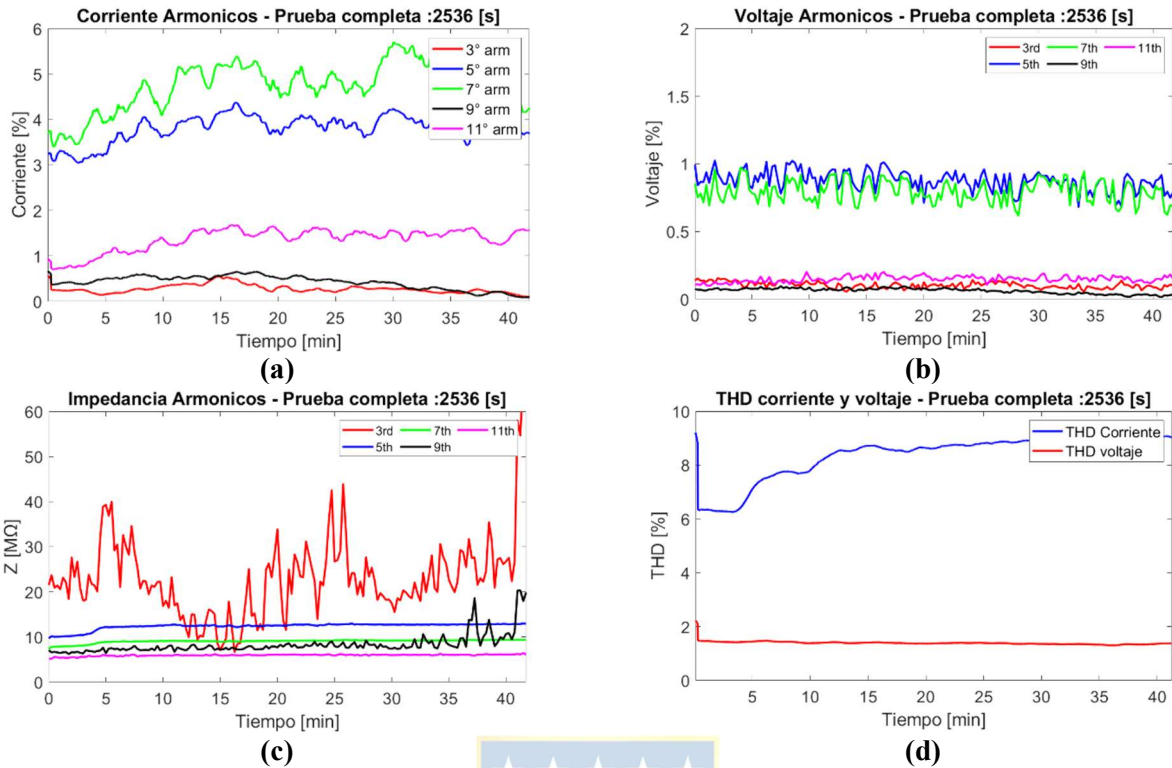


Fig. 3.8 Armónicos para Prueba N°3 (RH: 100% / Cont. Baja) (a) Corrientes armónicas (b) Voltajes armónicos (c) Impedancia armónica. (d) THD de voltaje y corriente.

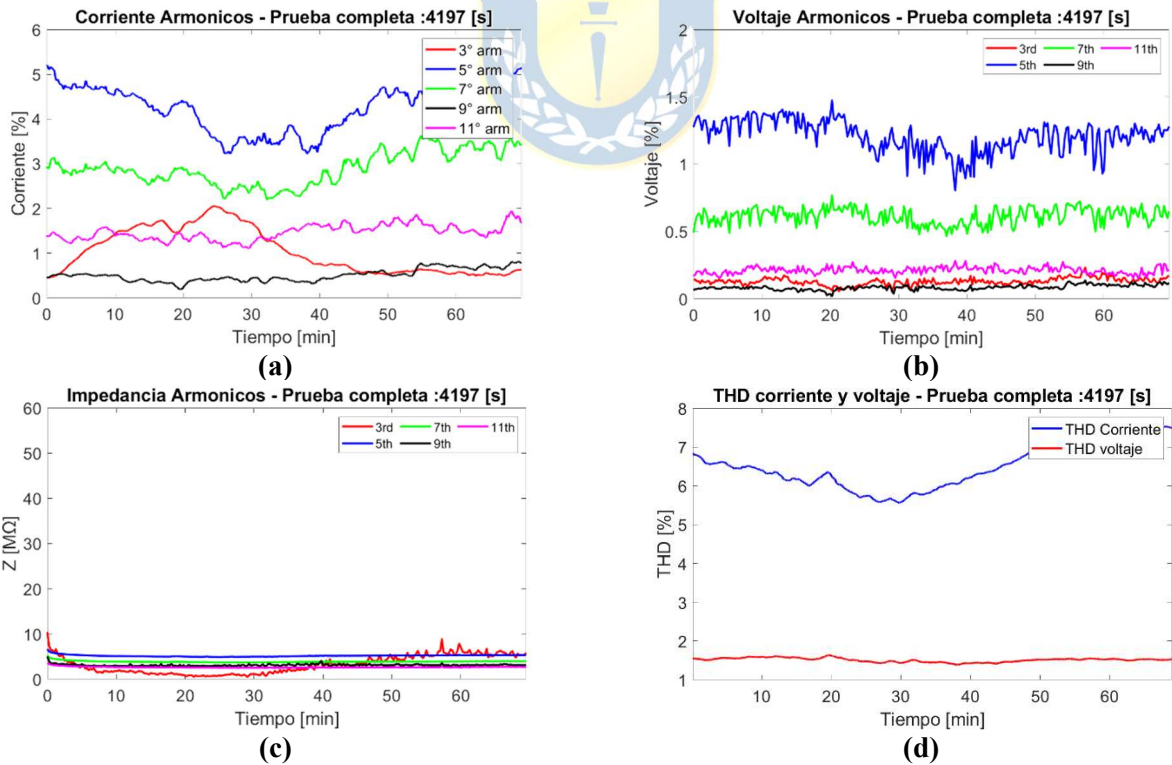


Fig. 3.9 Armónicos para Prueba N°4 (RH: 100% / Cont. Alta) (a) Corrientes armónicas (b) Voltajes armónicos (c) Impedancia armónica. (d) THD de voltaje y corriente.

Las sub-figuras (d) muestran el THD de voltaje y corriente. Se observa que el THD de voltaje se mantiene constante a lo largo de las pruebas. El valor promedio es cercano a 1,8 %. El THD de corriente presenta un valor de 6 % para baja humedad. Para humedad alta, la magnitud del THD de corriente varía considerablemente en el tiempo con cambios del orden del 3 %, como se observa en las Fig. 4.8 (d) y Fig. 4.9 (d).

Para las pruebas con alta contaminación, aunque la amplitud de la impedancia de 3^{er} orden es variable en el tiempo, disminuye su valor (promedio) con la humedad. Con 100% de humedad se muestra estable y con una amplitud bajo las otras impedancias. Esto muestra que el índice R_{hi} y K pueden ser utilizado con mayor seguridad para 100% de humedad y teniendo el resguardo de que las mediciones pueden presentar variaciones de amplitud en el tiempo.

La impedancia del 9^{no} armónico muestra variaciones temporales en amplitud principalmente para 100% de humedad y en contaminación Baja o Media. En contaminación Muy Alta no muestra variaciones. Esta característica podría ser estudiada para la implementación de un nuevo índice que utilice el 9no armónico de la corriente.

Se ha podido observar que el comportamiento de la impedancia de 3^{er} armónico tiene una amplitud constante (plana) solo en algunos escenarios de humedad. Esto debe ser considerado cuando se utilizan índices como R_{hi} y K . La relación entre los armónicos 3^{er}, 5^{to} y 7^{mo} parece disminuir su desempeño cuando los armónicos en voltaje no son conocidos o son variables en el tiempo, ya que como se explicó, las amplitudes de los armónicos de corriente dependen de la amplitud de los armónicos de voltaje, por lo tanto, las relaciones entre armónicos que utilizan el índice se ven fuertemente afectadas.

En este análisis de impedancia armónica en aisladores se puede observar el comportamiento de la magnitud en el tiempo para cada armónico relevante. Se concluye que, para ciertos niveles de contaminación (baja y media), los armónicos de corriente de 3^{er} orden muestran magnitudes erráticas que pueden afectar índices que dependen de los armónicos de corriente, como el R_{hi} y K . Además, las impedancias de 5^{to}, 7^{mo} y 9^{no} orden se muestran planas (constantes) por lo que se concluye que la variación en el tiempo de la magnitud de los armónicos de corriente depende únicamente de la variación de los armónicos del voltaje. Esto hace suponer que, si la magnitud de los armónicos del voltaje cambia en el tiempo, el desempeño de los índices puede verse comprometido.

3.6. Efectos de la humedad y la variabilidad de los armónicos en los índices

En esta sección se presenta el efecto que tiene la humedad y la variabilidad de los armónicos en algunos de los índices propuestos por la literatura, como son: R_{hi} , PD y time-integral. Para esto, se utilizan las pruebas expuestas en la sección anterior y se calculan los valores en estado estable. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados del cálculo de los índices para cada nivel de contaminación y nivel de humedad. Además, para cada nivel de contaminación se calcula el promedio del índice entre los resultados obtenidos para 50, 80, 90 y 100% de humedad.

Para el caso del índice R_{hi} , para cada nivel de contaminación, con excepción de contaminación Baja, se puede mencionar que existe una tendencia entre las magnitudes y la humedad. Mientras mayor es la humedad mayor es el índice. En cuanto al valor promedio no se observa una tendencia que permita distinguir entre un nivel de contaminación y otro. No obstante, para contaminación Alta y Muy Alta, se observa que el índice aumenta con el aumento de la humedad. Esto tiene relación con lo observado en las impedancias de 3^{er} armónico para niveles de contaminación donde se observa más estable (plana), y con una tendencia a la disminución en su amplitud.

Tabla 3.3 Resultados de índices en estado estable

Cont.	Humedad (%)	R_{hi}	PD. (%)	Time-integral (μC)
Baja	50	0,0203	6,67	2,38
	80	0,0396	7,65	2,43
	90	0,0313	7,73	2,63
	100	0,0163	17,06	2,67
	Promedio	0,0269	9,78	2,53
Media	50	0,0659	10,20	3,10
	80	0,0224	41,22	6,63
	90	0,0672	37,15	6,57
	100	0,0935	56,62	7,11
	Promedio	0,0623	36,30	5,85
Alta	50	0,0131	13,74	3,40
	80	0,0128	36,19	3,95
	90	0,0335	42,01	7,82
	100	0,0757	58,58	7,79
	Promedio	0,0338	37,63	5,74
Muy Alta	50	0,0365	20,36	3,46
	80	0,0556	54,93	4,83
	90	0,0806	71,08	5,21
	100	0,0820	65,11	8,85
	Promedio	0,0637	52,87	5,59

En el caso del índice PD se observa una tendencia al aumento del índice con el aumento de la

humedad, para todos los niveles de contaminación. Además, se muestra una relación entre el aumento del nivel de contaminación y el promedio calculado del índice PD . Se puede evidenciar que para baja contaminación el aislador es altamente capacitivo ($PD=17,06\%$ a 100% de humedad), y en la medida que aumenta la contaminación el aislador es más resistivo ($PD=35,11\%$ a 100% de humedad). No obstante, para identificar el nivel de contaminación con el índice PD es importante conocer que siempre se debe comparar el valor de índice para un mismo nivel de humedad. Esto podría presentar una dificultad para toma de muestras en terreno ya que las mediciones no son continuas. Por otra parte, se observa que mientras mayor es la humedad, mayor es el índice PD , y por lo tanto el factor de potencia. Al considerar las fronteras para los distintos niveles de contaminación indicados en el artículo [21], el índice PD muestra buenos resultados hasta 90% de humedad. Luego, a 100% humedad y para estas condiciones de laboratorio, el índice disminuye su valor cambiando la tendencia. Esto se debe a que la parte resistiva de la impedancia equivalente aumenta su valor en comparación a la reactancia. Esto es importante de considerar al utilizar este índice para la determinación del nivel de contaminación.

Para el índice time-integral se observa una tendencia con el aumento de la humedad para un mismo nivel de contaminación. Sin embargo, al comparar el promedio del índice entre un nivel de contaminación y otro, no existe una tendencia clara. Se concluye que puede ser utilizado solo para algunos niveles de humedad específicos como son aislador seco y con 100% de humedad.

Finalmente, los índices R_{hi} , PD y time-integral muestran una buena correlación con la humedad, para cada uno de los niveles de contaminación estudiados. No obstante, considerando las pruebas realizadas, no muestran una correlación directa entre magnitud del índice para todos los escenarios analizados. Por lo tanto, para identificar el nivel de contaminación se propone utilizar una combinación de los tres índices estudiados.

Se sugiere utilizar el índice R_{hi} para diferenciar entre contaminación Alta y Muy Alta; comparando para mismos niveles de humedad. El índice time-integral puede ser utilizado para diferenciar entre diferentes niveles de contaminación solo en condiciones de aislador seco y con humedad del 100% . Por otra parte, el índice PD puede ser utilizado con buenos resultados para determinar el nivel de contaminación bajo comparaciones a una misma humedad.

Para precisar los bordes para cada nivel de contaminación relativo a cada índice, se sugiere someter al aislador a pruebas adicionales de laboratorio para completar un rango más amplio de condiciones de humedad y contaminación.

3.7. Conclusiones del capítulo

En esta sección se ha mostrado detalladamente como la corriente eficaz que circula por el aislador está relacionada con la impedancia serie equivalente del aislador.

La impedancia del aislador disminuye con el aumento de la humedad y también con el aumento de la contaminación. Se observa que, al aplicar el voltaje constante entre el *cap* y *el pin* del aislador, la magnitud de la corriente de fuga muestra un comportamiento variable en el tiempo. Este fenómeno se debe a la absorción de humedad de la capa de contaminación en el aislador. Mientras mayor es la contaminación en la superficie del aislador, y la humedad es alta, la subida o el *peak* de corriente es mayor. Además, entre los valores mínimos, máximos y estado estable de la corriente pueden existir diferencias de hasta un 260 %. Por lo tanto, se debe considerar el tiempo de exposición del aislador a la humedad para establecer alguna relación entre la contaminación y la corriente de fuga.

Se presentó un análisis de la impedancia armónica para los armónicos de 3^{er}, 5^{to}, 7^{mo}, 9^{no} y 11^{vo} orden. La magnitud de las impedancias se mantiene constante a lo largo de las pruebas excepto para la de 3^{er} orden. La impedancia de 3^{er} orden muestra un comportamiento errático en el tiempo para baja contaminación y humedad; con magnitudes fluctuantes que en instantes son mayores y en otros instantes menores a la magnitud de las otras impedancias armónicas. Esto puede producir fluctuaciones importantes en las magnitudes de corriente armónica, y por lo tanto afecta el desempeño de algunos índices.

Se evaluaron los índices R_{hi} , PD y *time-integral*. Ninguno de los índices por sí solo muestra resultados satisfactorios para todos los niveles de humedad y contaminación estudiados. Debido a que el 3^{er} armónico muestra importantes fluctuaciones a baja contaminación y humedad, se propone utilizar el índice R_{hi} solo para alta humedad. El índice *time-integral* muestra buenos resultados solo para baja y alta humedad (60 y 100%).

El índice PD es el que obtuvo mejores resultados cuando se correlaciona su magnitud con la contaminación, siempre a un mismo nivel de humedad.

Los resultados de este capítulo han servido de insumo para la publicación de un segundo artículo [38] en WoS.

4. Conclusiones

4.1. Conclusiones técnicas

Se ha diseñado, fabricado e implementado un sensor de corriente de fuga para aisladores de alta tensión. Este sensor forma parte de un sistema de monitoreo para determinar el nivel de contaminación superficial de aisladores de alta tensión. También, se incluyó un análisis detallado del comportamiento de la impedancia del aislador con respecto a la humedad y la contaminación. Se introduce el concepto de impedancia armónica para aisladores. Finalmente, se probó el sistema de monitoreo en 3 zonas geográficas del norte de Chile.

Del sensor de corriente de fuga:

- El sensor diseñado fue probado en laboratorio con amplitudes de corriente de fuga de $50 \mu A$ hasta $500 mA$. La ganancia voltaje de salida versus la corriente de entrada es lineal con respecto a la frecuencia. Las diferencias se observan para frecuencias entre 350 y $550 Hz$ y son de tan solo 2% .
- La señal de corriente de fuga reconstituida se determina a través del uso de la función de transferencia inversa aplicada al voltaje de salida del sensor.
- Se probó el sensor, en conjunto con este mecanismo de reconstitución de la señal, en un aislador sometido a $9 kV$. Los resultados mostraron diferencias con respecto a un sensor comercial (LEM) del orden del 4% para $50 Hz$ y de 1.2% para armónicos impares hasta la frecuencia de $550 Hz$.
- También, el sensor fue probado en una subestación eléctrica de $220 kV$ donde se obtuvieron valores de corriente *rms* entre $0,25$ y $0,65 mA$ con una relación directa con la humedad entre el día y la noche. Los valores medidos están de acuerdo con los valores encontrados en la literatura.

De las mediciones realizadas en terreno:

- Se instalaron 6 dispositivos de monitoreo en 3 zonas distintas del país. Los dispositivos envían datos de la corriente de fuga y la humedad. Esto datos puede ser visualizados remotamente.
- En terreno se puede observar que la amplitud de la corriente de fuga tiene una relación directa con la humedad, con diferencias de amplitud de hasta 7 veces cuando la humedad cambia de 38% y 83% en aisladores de vidrio.

- En los 4 dispositivos instalados en el mismo tramo de línea, las magnitudes de corriente mostraron diferentes máximos y mínimos, aunque se suponen con el mismo nivel de contaminación. También, la diferencia de magnitudes de corriente antes y después de los lavados es mínima para algunos casos. Lo anterior, indica que la corriente de fuga requiere de un mayor análisis para relacionarla con el nivel de contaminación.
- El índice (*corriente/humedad*) presenta un valor más alto cuando la cadena está en posición horizontal que en posición vertical, por lo que se puede deducir que la posición tiene un efecto en la adhesión de contaminación en la superficie.

Del análisis de la impedancia y de la impedancia armónica del aislador:

- Independientemente del nivel de contaminación y humedad, la amplitud de la impedancia del aislador es variable a lo largo del tiempo de las pruebas. Estas diferencias, en cada prueba, pueden alcanzar valores de hasta 4 veces entre el mínimo y el máximo. Esto se debe al proceso de absorción de humedad del aislador y de la capa de contaminación.
- La impedancia armónica de 5^{to}, 7^{mo} y 11^{vo} son prácticamente constantes, con pequeñas variaciones que en promedio son del 9 %. Esto implica que la variación de la amplitud de los armónicos de corriente para este rango de frecuencias depende solamente de las variaciones de amplitud de los armónicos del voltaje.
- La impedancia armónica de 3^{er} y 9^{no} orden e variables en el tiempo con diferencias de hasta 9 veces entre el mínimo y máximo. Esto se debe a la discontinuidad que se produce en la corriente.
- Esto implica que el uso de la amplitud y los armónicos de la corriente de fuga no pueden ser utilizados para todos los escenarios (contaminación y humedad).
- Se analizó el desempeño de distintos índices que utilizan la corriente de fuga para determinar el nivel de contaminación. Se determinó que ningún índice por sí solo es suficiente para determinar el nivel de contaminación de un aislador.
- Se establecen los bordes de uso (humedad-contaminación) en los cuales se recomienda la utilización de cada índice.
- Para las pruebas realizadas en laboratorio, el índice que obtuvo una mejor correlación con la contaminación y la humedad fue el PD.
- Como trabajo futuro queda la tarea de implementar en los equipos de terreno estos índices considerando los bordes de uso identificados en laboratorio.

4.2. Logros destacados

- El presente trabajo ha aportado con conocimiento científico-práctico a dos Fondef IDeA de ANID desarrollados entre los años 2017 y 2023, ambos relativos al monitoreo de cadenas de aisladores para alta tensión.
- La tesis permitió publicar dos artículos científicos del tipo WoS. El primero de ellos tiene relación con el sensor de corriente de fuga para medición de corriente de baja amplitud con características no invasivas. El segundo es un análisis detallado de las características de la corriente de fuga que circula por los aisladores, con un enfoque en el análisis de magnitudes de parámetros en el tiempo. Ambos trabajos tributan directamente a una aplicación industrial, denominada APTIDA, que actualmente se está desarrollando para introducirse al mercado como un producto.
- Este trabajo de doctorado ha permitido crear una nueva línea de investigación en la Universidad de La Frontera, aportando con los primeros 2 artículos científicos en la materia.
- El sistema de medición ha sido instalado en dos empresas en Chile, monitoreando una subestación de 220 kV y 3 líneas de alta tensión de 220 y 500 kV. Actualmente el sistema está siendo utilizado por las empresas como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en cuanto a planificación en el lavado de aisladores.
- El laboratorio creado puede ser considerado como un referente a nivel nacional en temas aislamiento eléctrica, avalado por la adjudicación del primer estudio de contaminación de aisladores por zonas que se utilizará para el diseño de una línea en corriente continua de alta tensión de 1500 km de longitud. El estudio se denomina “Determinación del nivel de contaminación para LAT HVDC Kimal-Lo Aguirre \pm 600 kV”. Este estudio tiene una duración de 18 meses con toma de muestras mensuales y determinación de contaminación en aisladores a partir de la instalación de aisladores testigos.
- Finalmente, el autor de esta tesis ha sido invitado a formar parte de un nuevo grupo de trabajo creado en el CIGRE. El grupo se denomina JWG C4/A3/B2/B4.75 “Guide to procedures for the creation of contamination maps required for outdoor insulation coordination”. La primera reunión fue realizada en Roma Italia, en el mes de febrero de 2024.

Referencias

- [1] IEC 60815-1, “Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 1: Definitions, information and general principles,” *International Electrotechnical Commission*, pp. 1–2, 2018, [Online]. Available: papers3://publication/uuid/88519C43-BEA6-4CA0-909D-FA19A25647BB
- [2] A. R. Of and C. Knowledge, “158-- Polluted insulators a review of current knowledge (CIGRE).pdf,” no. June, 2000.
- [3] D. Yang, F. Yin, H. Mei, L. Wang, and C. Guo, “In-Situ Monitoring of Electrolytic Corrosion on the Caps of HVDC Insulators,” *IEEE Sens J*, vol. 18, no. 20, pp. 8569–8577, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2865521.
- [4] A. A. Salem, K. Y. Lau, Z. Abdul-Malek, and C. W. Tan, “Classifying insulator conditions of room temperature vulcanized coated glass insulators under different coating damage modes,” *Measurement (Lond)*, vol. 194, May 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2022.111032.
- [5] M. Akbar, R. Ullah, and I. Qazi, “Multi-stress aging investigations of HTV silicone rubber filled with Silica/ATH composites for HVAC and HVDC transmission,” *Eng Fail Anal*, vol. 110, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104449.
- [6] Comisión Nacional de Energía (CNE), “Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio para sistemas medianos,” *Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio para sistemas medianos*, p. 183, 2020.
- [7] Comisión Nacional de Energía, “Informe Técnico Final ‘Estudio Costo de Falla de Corta y Larga Duración SEN y SSMM,’” pp. 26–29, 2021, [Online]. Available: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2021/07/Res.Exta_.N°234-Aprueba-ITF-Estudio-de-Costos-de-Falla-21.07.21.pdf
- [8] “ESTUDIO DE CONTINUIDAD DE SUMINISTRO 2023 Informe Preliminar DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS ELÉCTRICOS GERENCIA DE OPERACIÓN,” 2023. [Online]. Available: www.coordinadorelectrico.cl
- [9] “Res.Exta_.N°234-Aprueba-ITF-Estudio-de-Costos-de-Falla-21.07.21”.
- [10] C. Ilomuanya, A. Nekahi, and S. Farokhi, “A Study of the Cleansing Effect of Precipitation and Wind on Polluted Outdoor High Voltage Glass Cap and Pin Insulator,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20669–20676, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3148709.
- [11] D. Maadjoudj, A. Mekhaldi, and M. Tegar, “Flashover process and leakage current characteristics of insulator model under desert pollution,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 6, pp. 2296–2304, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.007112.
- [12] S. Deb, S. Das, A. K. Pradhan, A. Banik, B. Chatterjee, and S. Dalai, “Estimation of Contamination Level of Overhead Insulators Based on Surface Leakage Current Employing Detrended Fluctuation Analysis,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 7, pp. 5729–5736, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2934008.
- [13] E. Fontana *et al.*, “Sensor network for monitoring the state of pollution of high-voltage insulators via satellite,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 2, pp. 953–962, 2012, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2183623.
- [14] N. Bashir and H. Ahmad, “Odd harmonics and third to fifth harmonic ratios of leakage currents as diagnostic tools to study the ageing of glass insulators,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 3, pp. 819–832, 2010, doi: 10.1109/TDEI.2010.5492255.

- [15] A. A. Salem, R. Abd-Rahman, S. A. Al-Gailani, M. S. Kamarudin, H. Ahmad, and Z. Salam, "The Leakage Current Components as a Diagnostic Tool to Estimate Contamination Level on High Voltage Insulators," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 92514–92528, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993630.
- [16] A. A. Salem *et al.*, "Risk assessment of polluted glass insulator using leakage current index under different operating conditions," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 175827–175839, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3026136.
- [17] J. Wang, K. Wang, M. Zhou, L. Zhao, S. Yao, and C. Fang, "The natural contamination of XP-70 insulators in Shenzhen, China," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 1, pp. 349–358, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.004807.
- [18] Tambi, S. Manjang, Syafaruddin, and I. Kitta, "Development of Real - Time Monitoring and Identification System of Aging Insulators in the Tropics," *Proceedings of the 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems: Towards Sustainable and Reliable Power Delivery, ICHVEPS 2019*, pp. 213–217, 2019, doi: 10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011152.
- [19] J. Wang, Y. Xi, C. Fang, L. Cai, J. Wang, and Y. Fan, "Leakage current response mechanism of insulator string with ambient humidity on days without rain," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 55229–55236, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2910660.
- [20] M. E. Ibrahim and A. M. Abd-Elhady, "Rogowski Coil Transducer-Based Condition Monitoring of High Voltage Insulators," *IEEE Sens J*, vol. 20, no. 22, pp. 13694–13703, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.3005223.
- [21] M. F. Palangar and M. Mirzaie, "Diagnosis of porcelain and glass insulators conditions using phase angle index based on experimental tests," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1460–1466, 2016, doi: 10.1109/TDEI.2015.005586.
- [22] H. De Santos and M. A. Sanz Bobi, "A Cumulative Pollution Index for the Estimation of the Leakage Current on Insulator Strings," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 5, pp. 2438–2446, 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2968556.
- [23] W. Chen, C. Yao, P. Chen, C. Sun, L. Du, and R. Liao, "A new broadband microcurrent transducer for insulator leakage current monitoring system," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 355–360, 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2007.905833.
- [24] A. H. A. D. Abeysekara, J. R. S. S. Kumara, M. A. R. M. Fernando, M. P. B. Eakanayake, G. M. R. I. Godaliyadda, and J. V. Wijayakulasooriya, "Remote leakage current detector for identification of insulators discharges," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 4, pp. 2449–2458, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006300.
- [25] J. M. de B. Bezerra, A. M. N. Lima, G. S. Deep, and E. G. da Costa, "An evaluation of alternative techniques for monitoring insulator pollution," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1773–1780, 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2016628.
- [26] O. E. Gouda, "A new monitor for pollution on power line insulators," pp. 24–30, 1988.
- [27] M. Khalifa, A. El-Morshedy, O. E. Gouda, and S. E. D. Habib, "New Monitor for Pollution on Power Line Insulators. Part 2: Simulated Field Tests.," *IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution*, vol. 135, no. 1, pp. 24–30, 1988, doi: 10.1049/ip-c.1988.0003.
- [28] S. C. Oliveira and E. Fontana, "Optical detection of partial discharges on insulator strings of high-voltage transmission lines," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 58, no. 7, pp. 2328–2334, 2009, doi: 10.1109/TIM.2009.2013924.
- [29] M. F. Palangar, U. Amin, H. Bakhshayesh, G. Ahmad, A. Abu-Siada, and M. Mirzaie, "Identification of Composite Insulator Criticality Based on a New Leakage Current Diagnostic Index," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 70, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3096869.

- [30] Waluyo, D. Fauziah, and I. M. Khaidir, "The Evaluation of Daily Comparative Leakage Currents on Porcelain and Silicone Rubber Insulators under Natural Environmental Conditions," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 27451–27466, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3057626.
- [31] R. Ghosh, B. Chatterjee, and S. Chakravorti, "A novel leakage current index for the field monitoring of overhead insulators under harmonic voltage," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1568–1576, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2733490.
- [32] H. Terrab, A. El-Hag, and A. Bayadi, "Characterization of leakage current on the surface of porcelain insulator under contaminated conditions," *2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2015*, vol. c, no. 1, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1109/EPECS.2015.7368527.
- [33] I. Ahmadi-Joneidi, A. A. Shayegani-Akmal, and H. Mohseni, "Leakage current analysis of polymeric insulators under uniform and non-uniform pollution conditions," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 11, pp. 2947–2957, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.2101.
- [34] J. Wang, Y. Xi, C. Fang, L. Cai, J. Wang, and Y. Fan, "Leakage current response mechanism of insulator string with ambient humidity on days without rain," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 55229–55236, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2910660.
- [35] Commission électrotechnique internationale and Commission électrotechnique internationale., Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems.
- [36] R. J. Villalobos, L. A. Moran, F. Huenupan, F. Vallejos, R. Moncada, and C. Pesce, "A New Current Transducer for On-Line Monitoring of Leakage Current on HV Insulator Strings," *IEEE Access*, vol. 10, no. April, pp. 78818–78826, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3191349.
- [37] S. C. Oliveira, E. Fontana, and F. J. do Monte de Melo Cavalcanti, "Real-time monitoring of the leakage current of 230-kV glass-type insulators during washing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2257–2260, 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2016814.
- [38] R. J. Villalobos, L. A. Moran, M. Inostroza, A. Hoffer, G. C. Pesce, and F. Huenupan, "Humidity and Harmonic Current Considerations for Indices to Estimate Contamination Levels on HV Insulators," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 130931–130941, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3335001.

A. Anexos

A.1. Anexo 1 - Cálculos ESDD y NSDD

A. Cálculo de densidad de depósito equivalente de sal (ESDD)

El valor de ESDD se obtiene por medio de limpiar totalmente el aislador con agua desmineralizada o desionizada. En la muestra con la solución resultante se mide la conductividad volumétrica ($\sigma\theta$) en Siemens por metro (S/m) a la temperatura de la solución (θ) en grados celsius. Luego se realiza la corrección de temperatura para obtener la conductividad volumétrica a 20°C (σ_{20}). Para esto se utiliza la relación en la ecuación A.1(según la norma IEC60507, 2013):

$$\sigma_{20} = 1 - b(\theta - 20) \quad (A.1)$$

Donde:

- θ : representa la temperatura de la solución limpiada del aislador en °C.
- $\sigma\theta$: es la conductividad volumétrica de la superficie limpiada a la temperatura θ en S/m.
- σ_{20} : es la conductividad volumétrica de la superficie a 20°C en S/m.
- b : es un factor previamente definido en la ecuación 2.4.

Luego, la salinidad (Sa) de la solución se determina mediante la ecuación A.2.

$$Sa = 5.7 \cdot 20^{1.03} \quad (A.2)$$

Finalmente, la densidad de depósito de sal equivalente (ESDD) se calcula mediante la ecuación A.3:

$$ESDD = Sa \cdot V / A \quad (A.3)$$

Con:

- Sa : salinidad de la solución en kg/m³.
- V : volumen de agua utilizado para la solución en cm³.
- A : área de la superficie limpiada del aislador en cm².

B. Medición de la densidad de depósito no soluble (NSDD)

Para la obtención del NSDD se filtra la solución a la cual se le midió la conductividad volumétrica, mediante un embudo y haciéndola pasar por un papel filtro de 1.6 μm o similar. El papel filtro que contiene la contaminación se seca y luego se pesa, como se muestra en la Fig. A.1 de la norma IEC 60815, 2008.

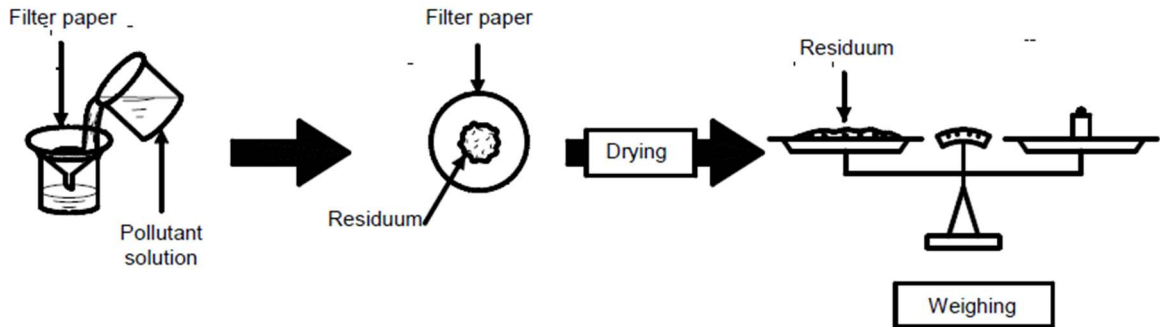


Fig. A.1: Procedimiento para medición del NSDD Figura en IEC60517.

El NSDD se calcula con la ecuación (A.4):

$$NSDD = 1000 \cdot (W_f - W_i) / A \quad (A.4)$$

Con:

NSDD: densidad de depósito no soluble en mg/cm^2 .

W_f : peso del papel filtro que contiene la contaminación en condiciones secas (g).

W_i : peso del papel filtro inicialmente en condiciones secas en gramos (g).

A : es el área de la superficie limpiada del aislador en cm^2 .

A.2. Anexo 2 - Mediciones adicionales del sensor

Se presentan algunos resultados de formas de onda de corriente y voltaje medidas por el sensor. Se muestran tres resultados de ejemplo con una corriente de entrada de 200 μA a 240 Hz y 20 mA a 540 Hz .

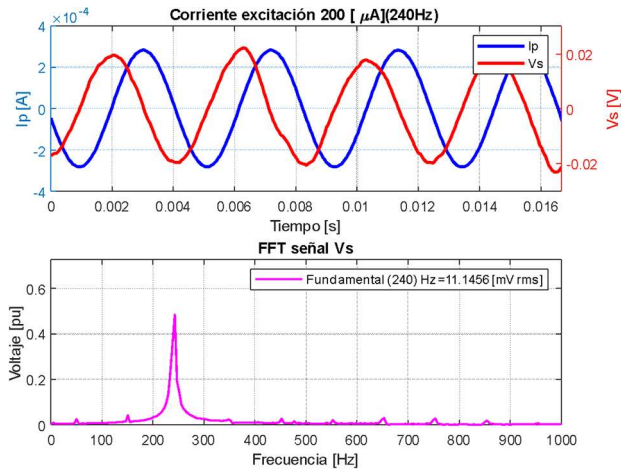


Fig. A.2: V_s y I_p para una corriente primaria de 200 μA a 240 Hz (a) Forma de onda (b) FFT

La Fig. A.2(a) muestra la corriente efectiva de 200 μA que se mide en la entrada al sensor y voltaje de salida. El valor del voltaje de salida es de 11,15 mV. La Fig. A.2(b) muestra el espectro en frecuencia para el voltaje de salida. El armónico fundamental es de 0.5 p.u a los 240 Hz. Se observan otros armónicos, pero con magnitudes menores al 0.05 p. u.

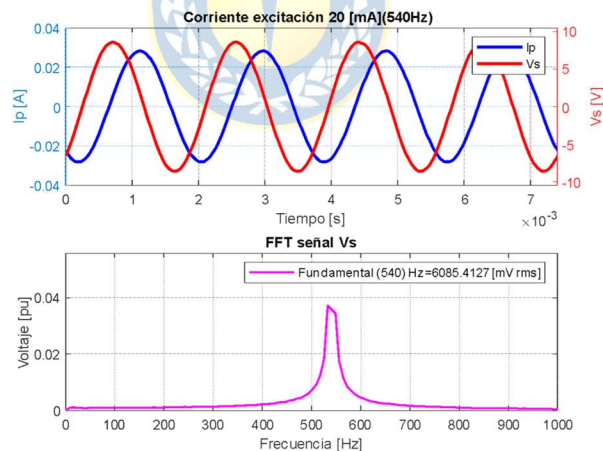


Fig. A.3: V_s y I_p para una corriente primaria de 20 mA a 540 Hz (a) Forma de onda (b) FFT.

La Fig. A.3 muestra la forma de onda de corriente de entrada y el voltaje de salida, para 20 mA de corriente. Debido a que la corriente de entrada es mayor (20 mA), la forma de onda de la corriente y el voltaje de salida se observa más sinusoidal. Esto se debe a que la medición contiene menor ruido por la magnitud de la variable a medir. El espectro en frecuencia de la corriente (Fig. A.3(b)) muestra que la fundamental está en 540 Hz y que los otros armónicos son de muy baja

amplitud.

A.3. Anexo 3 - Gráfica de niveles de contaminación

En la norma IEC 60815 se establece los rangos de contaminación de acuerdo con el nivel de ESDD y NSDD. La Fig. A.4 muestra las zonas del nivel de contaminación por rangos.

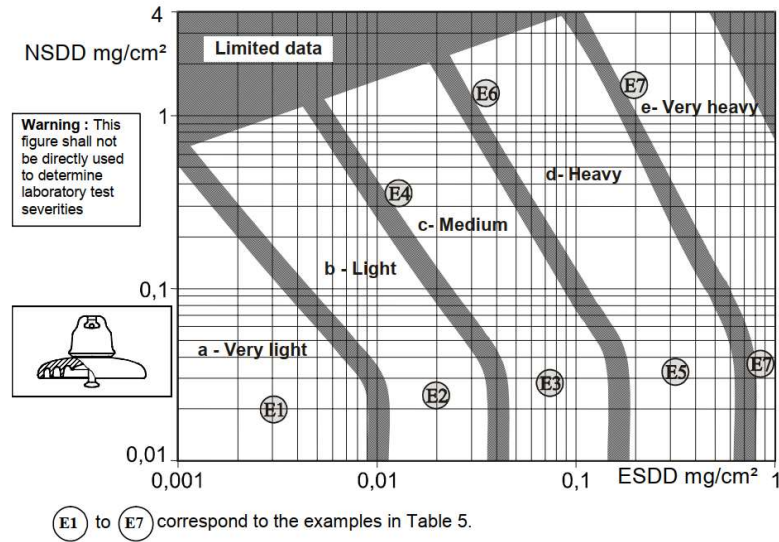


Fig. A.4 Zonas de contaminación para un aislador U120B

A.4. Anexo 4 - Cálculo de Índices

Índice THD

El índice THD se calcula para la variable de corriente o voltaje considerando la amplitud de la fundamental y armónicos impares. En este artículo se utilizan los armónicos hasta el 11vo., y se calculan por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT). La ecuación (A.5) representa la expresión del THD.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{11} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (A.5)$$

Donde I_1 es el valor efectivo del primer armónico e I_n el valor efectivo de los armónicos de orden n .

Índice Rhi:

Este índice presentado en el artículo [15] determina el nivel de contaminación con una relación entre la amplitud de algunos armónicos de la señal de corriente. La ecuación que la define es A.6.

$$Rhi = \frac{I_3}{I_5 + I_7} \quad (A.6)$$

Donde I_3 , I_5 e I_7 representa la amplitud de los armónicos de corriente de 3^{er}, 5^{to} y 7^{mo} orden.

Índice time-integral:

Este índice time-integral señalado en el artículo [31] tiene relación con la carga acumulativa de la LC. Se calcula como la integral del valor absoluto de la corriente en un periodo de tiempo. Luego de algunas deducciones matemáticas se puede obtener que la carga acumulativa para cada uno de los armónicos es la presentada en (A.7).


$$Q_n = \frac{P_n}{n} \cdot Q_1 \cdot \cos\theta_n \quad (A.7)$$

Donde Q_n y Q_1 es la carga acumulativa para el armónico fundamental y el n th-orden, respectivamente. P_n es la amplitud peak del n th armónico, n el número del armónico y θ_n corresponde a la diferencia de fase entre la fundamental y el n th armónico.

La sumatoria de todas las cargas acumulativas de los n armónicos son igual a la carga acumulativa de la LC (A.8).

$$Q = \sum_{k=1}^N Q_n \quad (A.8)$$

Si bien el θ_n es un parámetro que depende de las variables externas y tiene baja influencia sobre todo para armónicos de orden superior. Además, solo se limita a un ciclo, ya que luego se elimina porque al segundo semiciclo de la fundamental, el área es negativa y se anula.

Índice PD:

El índice PD [21] es similar al factor de desplazamiento por 100 %. La ecuación se representa en (A.9).

$$PD = \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1}) \cdot 100\% \quad (\text{A.9})$$

Donde θ_{v1} representa el ángulo respecto a una referencia del 1er armónico del voltaje aplicado al aislador, y θ_{i1} es el ángulo respecto a una referencia del 1er armónico de la LC.

Los niveles de contaminación están definidos para las líneas de bordes del 30 y 85%, como se muestra en la Tabla A.1:

Tabla A.1 Límites para índice PD.

Rango	Nivel de Cont.
P.D. < 30%	Limpio
30% < P.D. < 85%	Condición extrema
P.D. > 85%	Alta Probabilidad de Flashover

De lo anterior, se puede deducir que cuando el aislador está limpio, el factor de potencia del aislador es menor, y cuando está contaminado el factor de potencia aumenta.

A.5. Anexo 5 – Otros resultados a diferentes niveles de humedad y contaminación.

Se presentan otros resultados para distintos escenarios de humedad y contaminación.

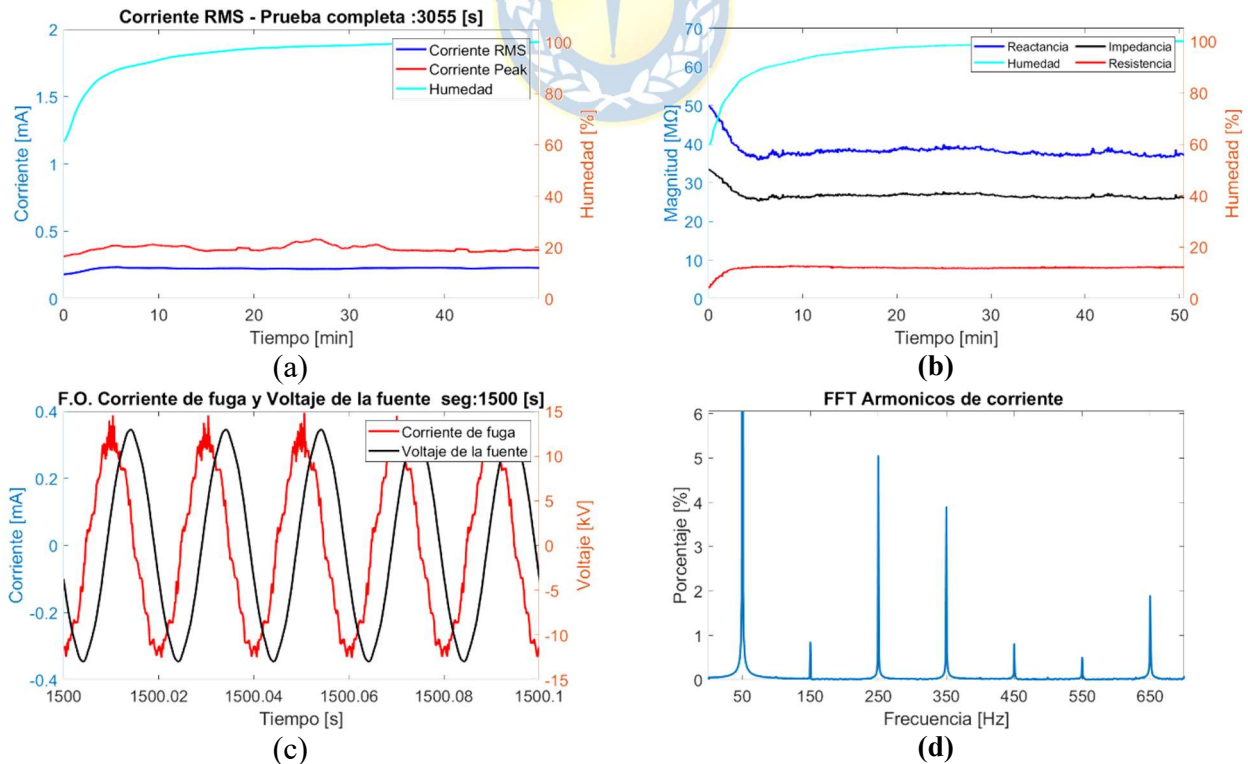


Fig. A.5 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Baja) (a) Corrente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O de corriente. (d) FFT de corriente.

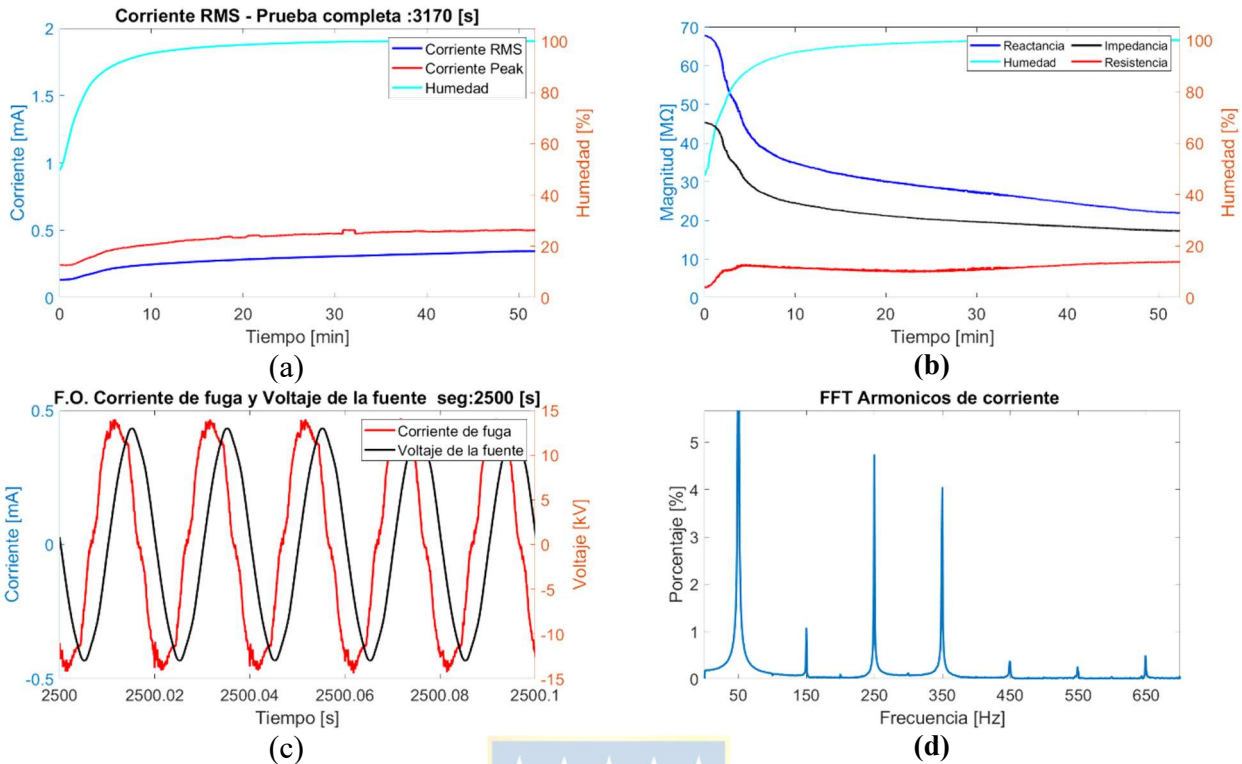


Fig. A.6 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Media) (a) Corriente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O de corriente. (d) FFT de corriente.

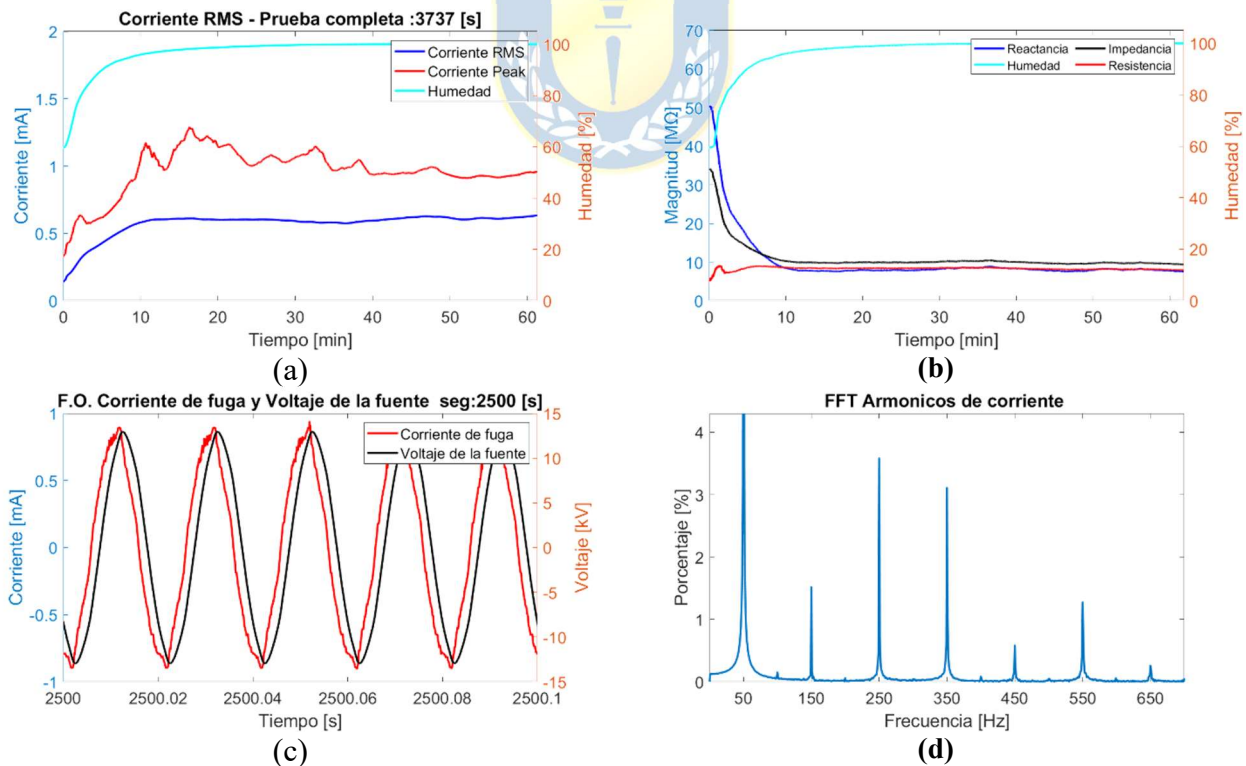


Fig. A.7 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Alta) (a) Corriente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O de corriente. (d) FFT de corriente.

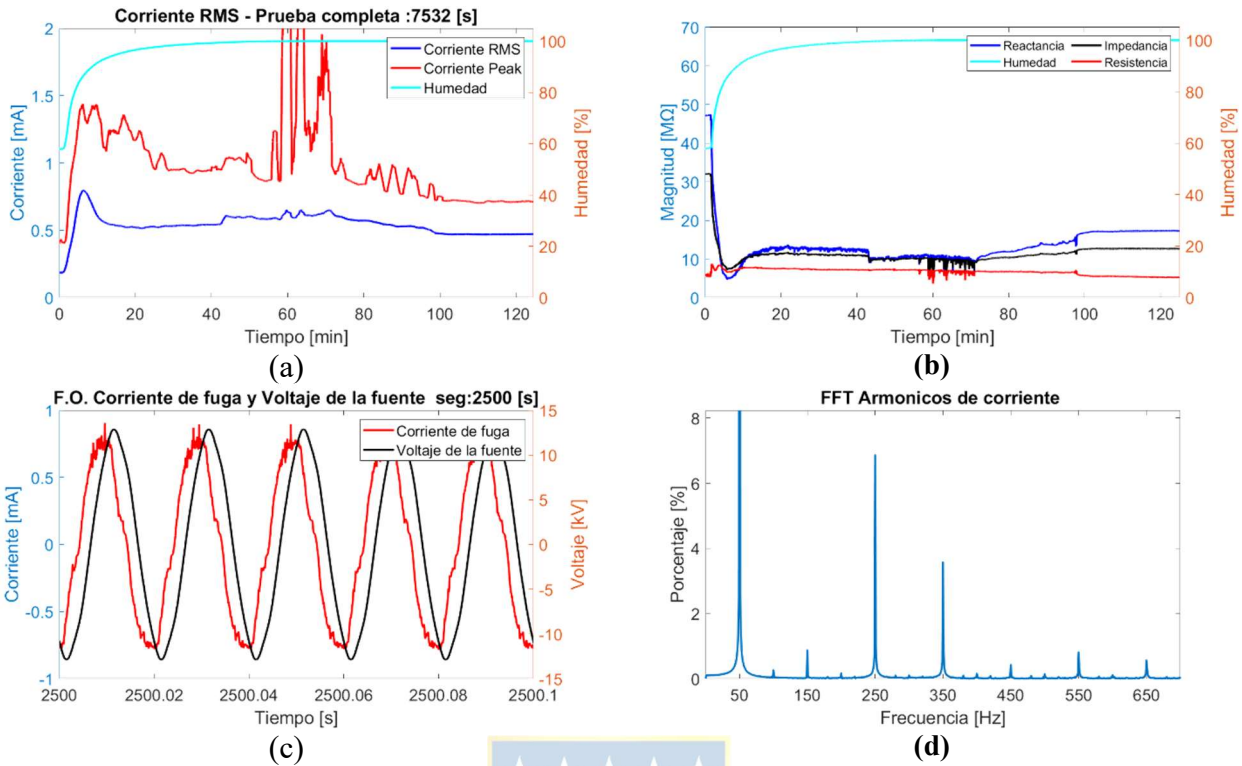


Fig. A.8 Resultados (RH: 60 a 100% / Cont. Muy Alta) (a) Corriente RMS y Peak. (b) Impedancia, reactancia y resistencia del aislador. (c) F.O de corriente. (d) FFT de corriente.

