

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

PROYECTO TÉCNICO INVESTIGATIVO:

**“DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUGA, DESCARGAS
PARCIALES Y SUPERFICIALES EN AISLADORES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE
CORRIENTES.”**

AUTORES:

**QUIZHPI CUESTA FLAVIO MATEO
GÓMEZ JUCA FRANCISCO XAVIER**

TUTOR:

ING. WALTER HUMBERTO OROZCO TUPACYUPANQUI PhD.

CUENCA-ECUADOR

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Flavio Mateo Quizhpi Cuesta, con cédula de identificación N° 0105599864, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del trabajo de grado titulado: ***“DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUGA, DESCARGAS PARCIALES Y SUPERFICIALES EN AISLADORES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CORRIENTES.”***, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado por la Ley de Propiedad Intelectual, en condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2017



Flavio Mateo Quizhpi Cuesta

C.I. 0105599864

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Francisco Xavier Gómez Juca, con cédula de identificación N° 0105739148, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del trabajo de grado titulado: ***“DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUGA, DESCARGAS PARCIALES Y SUPERFICIALES EN AISLADORES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CORRIENTES.”***, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado por la Ley de Propiedad Intelectual, en condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2017



Francisco Xavier Gómez Juca

C.I. 0105739148

CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación **“DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUGA, DESCARGAS PARCIALES Y SUPERFICIALES EN AISLADORES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CORRIENTES.”**, realizado por Flavio Mateo Quizhpi Cuesta y Francisco Xavier Gómez Juca, obteniendo el **“Proyecto Técnico Investigativo”**, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio del 2017



Ing. Walter Humberto Orozco Tupacyupanqui, PhD.
C.I. 0102523974

TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Flavio Mateo Quizhpi Cuesta con C.I: 0105599864 y Francisco Xavier Gómez Juca con C.I: 0105739148 autores del trabajo de titulación “**Determinación de las condiciones de fuga, descargas parciales y superficiales en aisladores mediante el análisis de corrientes.**”, certificamos que el total contenido del proyecto técnico investigativo es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio del 2017



Flavio Mateo Quizhpi Cuesta
C.I. 0105599864



Francisco Xavier Gómez Juca
C.I. 0105739148

RESUMEN

El análisis de Descargas Parciales (DP) es uno de los métodos más utilizados para determinar el estado de los Sistemas de Aislamiento, se plantea en este trabajo un método alternativo para la medición de DP. El método propuesto obtiene los datos de la señal de carga eléctrica desplazada por descargas parciales sobre elementos dieléctricos mediante una impedancia de medida en serie con el dispositivo a ser analizado; en el proceso de investigación se definió realizar ensayos sobre aisladores tipo pin porque son lo más utilizados en redes de distribución (22 kV) en el área residencial de las empresas eléctricas del sector ecuatoriano. La funcionalidad del laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca permitió que a partir de ensayos normalizados se pueda proyectar, evaluar y analizar los resultados del método propuesto. El ensayo consiste en la aplicación de voltajes de frecuencia industrial ajustables a niveles permisibles en los aisladores a ser probados, las normativas de seguridad impuestas por los organismos internacionales como la IEC son respetadas en cada uno de los montajes evaluados y que condujeron a plantear el método innovador que será presentado en el desarrollo del presente trabajo. El montaje realizado consiste en una fuente de alta tensión (HVAC) libre de descargas parciales, una impedancia de bloqueo que evita que las descargas producidas en el dieléctrico, motivo del ensayo, sean devueltas a la fuente, un partidor capacitivo que tiene dos funciones: la primera es la de medir la tensión de ensayo y la segunda de servir como condensador de acoplamiento para la adquisición de datos, y una impedancia de medida en la cual se conecta el instrumento de medida. Se visualiza la señal captada por la impedancia en un osciloscopio de alta gama, el instrumento de visualización cuenta con la posibilidad de acceder al software de manejo; por lo tanto, fue posible implementar un filtro digital (FIR) pasabanda de un orden mayor a cien, se logró eliminar las componentes no deseadas de la señal, tales como ruido, distorsión electromagnética y la componente fundamental de la fuente utilizada para el ensayo. La salida del filtro presentó las componentes de las señales características de las descargas parciales producidas al interior del material dieléctrico, estos valores fueron almacenados para una posterior aplicación de segmentación y clasificación de los diferentes tipos de descargas parciales: corona, superficial y descargas internas mediante redes neuronales. El procedimiento propuesto es innovador y valedero para la aplicación en laboratorios que no dispongan de analizadores directos de descargas parciales.

ABSTRACT

Partial Discharge (DP) analysis is one of the most widely used methods for determining the state of Insulation Systems, an alternative method for the measurement of "DP" is presented in this paper. There are methods which use circuit topologies that are already standardized for detection and measurement of DP. The proposed method obtains data from the electrical charge signal which is displaced by partial discharges on dielectric elements by means of impedance of mediated in series with the device to be analyzed. In the research process it was defined to carry out tests on pin type insulators because they are considered as the most used in distribution networks at the 22 kV level in the residential area of the Ecuadorian companies. The functionality of the High Voltage Laboratory of the "Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca" allowed performing standardized tests to project, evaluate and analyze the results of the proposed method. The test consists in the application of adjustable frequency industrial voltages to permissible levels in the insulators to be tested, the safety regulations imposed by the international organisms like the IEC are respected in each of the evaluated assemblies and that led to the innovative method that will be presented to the world scientific community. The assembly made consist of a high voltage (HVAC) source which is free of partial discharges, a blocking impedance that prevents the discharges produced in the dielectric from the test motif from being returned to the source, a capacitive divider having two functions, the first is to measure the test voltage, and the second to serve as a coupling capacitor for data acquisition, and a measurement impedance at which the measuring instrument is connected. The signal detected by the impedance is displayed on a high-end oscilloscope, the visualization instrument has the possibility of accessing the management software, therefore, it was possible to implement a bandpass digital filter (FIR) of a higher order to one hundred, the unwanted components of the signal, such as noise, electromagnetic distortion and the fundamental component of the source used for the test were eliminated. The output of the filter presented the components of the signals characteristic of the partial discharges produced inside the dielectric material, values that were contrasted by the methodology quoted by E. Gulski in his work Computer-aided Measurement of Partial Discharges in HV Equipment. The scaling process was performed starting from a known electrical charge signal injected at the measurement impedance, the sampling characterization of the oscilloscope used in the method allows the scale to be displayed in nano Coulomb's (nC) and these values were stored for a subsequent application of segmentation and classification of different types of partial discharges. The different analyzes performed by the segmentation of data obtained in the method allow to affirm that it is valid for its implementation. It is innovative and valid for the application in laboratories that do not have direct analyzers of partial discharges. In a later stage from the data obtained in the presented method a methodology of classification of partial discharges will be realized by techniques of digital signal processing (DSP).

ÍNDICE

Índice.....	I
Índice de Figuras.....	III
Índice de Tablas	IV
Índice de Nomenclatura	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ANTECEDENTES.....	VI
JUSTIFICACIÓN.....	VII
GRUPO OBJETIVO	VIII
OBJETIVOS.....	VIII
METODOLOGÍA	IX
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	1
1.1 AISLAMIENTO ELÉCTRICO.....	1
1.1.1 Clasificación del Aislamiento eléctrico.....	1
1.1.2 Aislamiento eléctrico y descargas parciales (DP).	1
1.2 DESCARGAS PARCIALES (DP).....	2
1.2.1 Origen y evolución del fenómeno de DP.	2
1.2.2 Patrón de DP en AC.	3
1.3 TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES.	4
1.3.1 Descargas Parciales Internas.	4
1.3.2 Descargas Parciales Superficiales.	5
1.3.3 Descargas Parciales Corona.	6
1.4 DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE DP.....	6
1.4.1 Normativa IEC 60270.	7
1.5 CLASIFICACIÓN DE DP.....	9
1.5.1 Extracción y clasificación de DP.....	9
2. METODOLOGIA PROPUESTA	11
2.1 DETECCIÓN DE DP.....	12
2.2 MEDICIÓN DE DP.	14
2.3 CLASIFICACIÓN DE DP.....	15
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
3.1 DETECCIÓN DE DP.....	25
3.2 MEDICIÓN DE DP.	26
3.3 CLASIFICACIÓN DE DP.....	27
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	30
PUBLICACIONES.	31
ANÉXOS.....	32

ANEXO A. PROGRAMACIÓN	32
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Campo eléctrico en un sistema de aislamiento.....	2
Figura 2 Fenómeno de Descargas Parciales. [11]	3
Figura 3 Patrón de descargas parciales en elipse.....	4
Figura 4 Descarga parcial de tipo Interna.	5
Figura 5 Descarga parcial de tipo Superficial.	5
Figura 6 Descarga parcial de tipo Corona.	6
Figura 7 Circuito directo para la detección y medición de DP.	8
Figura 8 Circuito indirecto para la medición y detección de DP.	8
Figura 9 Circuito para la calibración de escalas.	9
Figura 10 Diagrama de bloques para el análisis de DP.	11
Figura 11 Flujograma del modelo matemático de la metodología propuesta.....	12
Figura 12 Circuito propuesto para la detección de DP.	13
Figura 13 Diagrama de bloques del filtro FIR implementado.	14
Figura 14 Diagrama de flujo para la clasificación de DP.	16
Figura 15 Descargas consideradas como conocidas para la clasificación.....	19
Figura 16 Estructura de la red neuronal para clasificar descargas superficiales y corona.....	19
Figura 17 Evolución del error medio cuadrático de la primera red neuronal en los 5 primeros entrenamientos.....	21
Figura 18 Estructura de la red neuronal para la clasificación de los distintos tipos de descargas internas.....	22
Figura 19 Evolución del error medio cuadrático de la segunda red neuronal en los primeros 5 entrenamientos.	24
Figura 20 Señal de Carga Eléctrica sin Filtrar, test 1.....	25
Figura 21 Señal de Carga Eléctrica sin Filtrar, test 2.	25
Figura 22 Señal de Carga Eléctrica Filtrada, test 1.	26
Figura 23 Señal de Carga Eléctrica Filtrada, test 2.	26
Figura 24 Distribución de Picos Máximos.....	27
Figura 25 Distribución Promedio de Descargas.....	27
Figura 26 Distribución de Número de Descargas por ángulo de fase.....	28
Figura 27 Portada del paper publicado en el ATEE 2017.....	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Elementos utilizados para el circuito detector de DP.....	13
Tabla 2	Patrón de DP tipo Corona.....	20
Tabla 3	Patrón de DP tipo Superficial.....	20
Tabla 4	Tabla de verdad para la red neuronal que clasifica descargas corona y superficiales.....	21
Tabla 5	Patrón de DP internas de tipo ramificación.....	22
Tabla 6	Patrón de DP internas de tipo cavidad rectangular.....	22
Tabla 7	Patrón de DP internas de tipo cavidades múltiples.....	23
Tabla 8	Tabla de verdad de la red neuronal que clasifica las distintas descargas internas en análisis.....	24
Tabla 9	Patrón de DP del aislador Tipo pin en análisis.....	28
Tabla 10	Resultados de las Capas de Salida de las Redes Neuronales.....	29

ÍNDICE DE NOMENCLATURA

DP.....	Descargas Parciales
GIE.....	Grupo de Investigación de Energías.
HVAC.....	Alto Voltaje de corriente alterna.
HFCT.....	Transformadores de Corriente de Alta Frecuencia
SF ₆	Hexafluoruro de Azufre
IEC.....	Comisión Electrotécnica Internacional.
FIR.....	Respuesta Finita al Impulso
GS/s.....	Un millón de muestras por segundo.
NN.....	Redes Neuronales.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, María Auxiliadora y Don Bosco por permitirme culminar esta etapa de formación profesional a lo largo de todas las instituciones educativas salesianas en las que he estado.

A mi madre por ser ese pilar fundamental en mi vida, mis hermanas y mi pequeña Vale por sus sonrisas, mi papi por sus consejos en todo y compartir el amor por la ingeniería eléctrica conmigo. A

mi gran amigo Paco, por todos los momentos vividos en la U y en todo lado, por ser ese amigo incondicional. A mi tutor, doctor Walter Orozco, su sabiduría es uno de los grandes obsequios que compartió con nosotros, gracias.

Mateo Quizhpi Cuesta.

Agradezco a Dios por haberme permitido vivir esta etapa única en mi vida, también agradezco a las instituciones salesianas por haberme formado con esa convicción de ser un buen cristiano y honrado ciudadano. A mi amigo Mateo, por ser como un hermano, quien siempre confió en mí. Al doctor Walter Orozco el tutor de este gran trabajo por esas grandes enseñanzas que supo compartir conmigo, de igual manera a Flavio Quizhpi quien supo siempre ayudarme para que este trabajo culmine. En especial agradezco a mi familia por siempre apoyarme, esto es para ustedes Rodrigo, Hilda y Gilda.

Francisco Gómez Juca

ANTECEDENTES.

El Grupo de Investigación de Energías (GIE) de la Universidad Politécnica Salesiana en su afán de involucrarse en los Sistemas de Alta Tensión ha propuesto diversos temas de investigación, en este caso particular al no contar con instrumentos de medida directa para las descargas parciales en el laboratorio de Alta Tensión, se propone el análisis de este fenómeno mediante el estudio de la forma de onda de corriente de fuga en un aislador.

Las investigaciones realizadas en torno a la problemática planteada se enfocan en la detección de las descargas parciales mediante la medición de la onda de corriente de fuga, para lo cual se han desarrollado diversos tipos de sensores y transductores que permiten medir la corriente de fuga, la misma que brinda información sobre el fenómeno de descargas parciales, las cuales ocurren a alta frecuencia. Los dispositivos de medida que se han desarrollado son: Transformadores de corriente de alta frecuencia (HFCT) y la bobina de Rogowski, las más significativas y utilizadas.

Para conseguir la medición de descargas parciales, en primer lugar, la onda de corriente de fuga debe pasar por un proceso de filtrado, donde, se pueda notar de manera significativa las características propias de los diferentes tipos de descargas parciales. Una vez detectada la descarga parcial se clasifica en tres tipos que son: descargas internas, descargas superficiales y descargas corona, con trabajos investigativos se ha logrado establecer características específicas vistas en la onda resultante después del filtrado de la señal de corriente de fuga, lo cual ayuda a la clasificación de la descarga parcial solamente analizando la forma de onda de corriente de fuga, lo cual se plantea en este trabajo investigativo.

En los últimos años el procesamiento digital de señales ha tenido un avance estupendo, logrando con sus herramientas matemáticas bajar los tiempos de procesamiento y sobre todo llegar a tener simplicidad aplicativa en la resolución de problemas, por lo tanto, este trabajo utilizara dos herramientas del procesamiento digital, filtros digitales los cuales ayudarán a minimizar los efectos de la señal de corriente de fuga, y las redes neuronales para la clasificación de descargas parciales.

JUSTIFICACIÓN.

El análisis de las descargas parciales da como resultado el estado de aislamiento, considerando este análisis muy importante para la detección de posibles fallas en equipos eléctricos de alta tensión. La Universidad Politécnica Salesiana en su sede Cuenca cuenta con un laboratorio de Alta Tensión, el mismo que no posee un equipo específico de medición de descargas parciales, por lo que este trabajo se enfoca en brindar un método alternativo para la medición y clasificación de descargas parciales en aisladores tipo pin.

Al desarrollar este trabajo se podrá realizar pruebas y análisis en el Laboratorio de Alta Tensión para la medición y clasificación de los diferentes tipos de descargas parciales en aisladores tipo pin sin utilizar equipos de medición específicos para este fenómeno.

GRUPO OBJETIVO

El grupo objetivo de la investigación es la comunidad científica en general, puesto que el método alternativo para medición, detección y clasificación de descargas parciales en aisladores tipo pin puede ser utilizado en los distintos laboratorios de Alta Tensión de universidades a nivel mundial. Además, los resultados obtenidos en la investigación podrán ser utilizados para futuros trabajos del Grupo de Investigación en Energías (GIE) dentro del ámbito de sistemas de alta tensión.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar las condiciones de fuga, descargas parciales y superficiales en aisladores tipo pin mediante el análisis de la señal de corriente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener la forma de onda de corriente en un aislador.
- Filtrar perturbaciones en los datos obtenidos.
- Determinar la presencia de posibles descargas parciales y/o superficiales en aisladores.

METODOLOGÍA

Existen diferentes métodos para la medición de la corriente de fuga en un aislador, pero al incluir el estudio de descargas parciales se deben tener presente los efectos directos e indirectos de las mismas.

- Etapa Investigativa: se recopilará la información necesaria en cuanto a: aisladores, alta tensión, sensores, análisis de señales, etc.
- Etapa de Medición: Para la medición de la corriente en un aislador se plantea utilizar un transformador de corriente de alta frecuencia (HFCT) que es un sensor inductivo para medición de descargas parciales, para la visualización y adquisición de la información se utilizará un osciloscopio digital de alta gama en el registro de datos.
- Etapa de Filtrado: una vez obtenidos los datos necesarios de corriente se debe realizar un filtrado inicial de aquellos datos, ya que debido a los campos electromagnéticos de alta frecuencia presentes en el medio ambiente o incluso en el conductor contaminan los datos obtenidos.
- Etapa de Análisis: para el análisis de la información se plantea la utilización de redes neuronales para la clasificación entre descargas: internas, superficiales y corona.

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1 AISLAMIENTO ELÉCTRICO.

En la actualidad, las actividades que mueven al mundo dependen del suministro de energía eléctrica, por ende, una suspensión de energía por más corta que sea tiene costos económicos muy importantes, por tales motivos, el sector eléctrico debe gestionar de manera eficiente el funcionamiento de los activos de la red eléctrica asegurando un suministro adecuado de energía hacia sus clientes, la eficiencia se ve reflejada en una distribución continua y de alta calidad de la energía eléctrica.

Para mantener a los activos de la red funcionando de manera eficiente los sistemas de aislamiento juegan un papel de mucha importancia, los sistemas de aislamiento poseen una alta rigidez dieléctrica que les permite soportar altos niveles de tensión, además, separan y sostienen zonas activas de máquinas eléctricas y conductores. [1]

1.1.1 Clasificación del Aislamiento eléctrico.

Los sistemas de aislamiento eléctrico pueden ser sólidos, líquidos y en los últimos años también gaseosos. En los sistemas de aislamientos sólidos los materiales utilizados pueden ser la mica, el vidrio, poliestireno, grafito, resina, papel entre otros; en los sistemas de aislamiento líquidos se tiene el aceite, en los últimos años se trabaja con sistemas de aislamiento gaseosos como el hexafluoruro de azufre (SF_6), cuyo uso ha sido muy determinante para reducir tamaños en subestaciones. [1]

1.1.2 Aislamiento eléctrico y descargas parciales (DP).

Los sistemas de aislamiento pierden de manera gradual con el tiempo su característica de alta rigidez dieléctrica por varios motivos algunos de estos son: esfuerzos tanto mecánicos como térmicos, factores químicos y ambientales a los que el aislamiento puede ser sometido. [2]

Las descargas parciales (DP) se encuentran entre las razones y fenómenos que producen una degradación de los sistemas de aislamiento, las DP son consideradas como un síntoma relevante para poder determinar el estado del envejecimiento de los sistemas de aislamiento. [3], [4]

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

La degradación gradual con el tiempo que sufren los sistemas de aislamiento debido al fenómeno de DP se desarrolla a través de 3 etapas. La primera se conoce como *Streamer*, donde, las DP tienen una amplitud grande ocasionando corrientes entre los 10 y 100 mA y rápidas en la escala de los nanosegundos. La segunda etapa ocurre después de varios minutos que la primera, la amplitud de corriente disminuye, pero ya se presentan deterioros, esta etapa es conocida como *Townsend*. Finalmente, se tiene la etapa llamada *Pitting*, la corriente decrece considerablemente alrededor del orden de 200 μA en una cantidad reducida de tiempo, unos cuantos microsegundos; ya se pueden observar fuertes deterioros como la corrosión encontrándose muy cerca de la falla del sistema de aislamiento. [3], [5]

1.2 DESCARGAS PARCIALES (DP).

Las Descargas Parciales (DP) hace referencia a un fenómeno de degradación local, que genera impulsos de corriente de magnitud muy pequeña siendo visibles estos impulsos en el intervalo de microsegundos y nanosegundos a través del sistema de aislamiento, como resultado de los impulsos de corriente se tiene la descomposición del dieléctrico y por ende los defectos en el sistema de aislamiento como huecos e irregularidades constructivas tanto dentro como fuera reduciendo notablemente la vida útil de todo el sistema de aislamiento.[6], [7], [8]

1.2.1 Origen y evolución del fenómeno de DP.

Al aplicar tensión a un sistema de aislamiento se genera un campo eléctrico (E_a), el mismo que se distribuye de manera uniforme siempre y cuando se posea un material en perfectas condiciones constructivas y homogéneo, caso contrario, el campo eléctrico (E_c) aumentara dentro de las imperfecciones que el aislamiento presente por consecuencia de las condiciones de frontera perpendiculares, en la Figura 1 se detalla este fenómeno. [9]

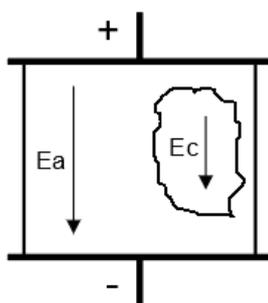


Figura 1 Campo eléctrico en un sistema de aislamiento.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

El campo eléctrico existente en el pequeño volumen de la imperfección del aislamiento produce un fuerte estrés eléctrico teniendo como consecuencia la ruptura de la rigidez dieléctrica y de esta manera dando lugar al fenómeno de descargas parciales. [10]

El fenómeno de descarga se produce cuando el voltaje dentro de la falla ($u_{c1}(t)$ con DP) supera los valores de tensión de ignición ($+u_{cli}$) y desaparece cuando dicho voltaje se encuentra por debajo de la tensión de extinción ($+u_{cle}$), la tensión en la vacuola sigue su forma normal hasta un próximo encuentro con los niveles de tensión de ignición y extinción, en donde, al superar dichos niveles de tensión se produce nuevamente el fenómeno de descargas parciales, de igual manera, sucede con la parte negativa de la onda, ya que al superar los niveles de tensión tanto de ignición ($-u_{cli}$) como de extinción ($-u_{cle}$) se producen las descargas parciales solo que con otra polaridad, en la Figura 2 se puede observar lo antes mencionado. [10], [11]

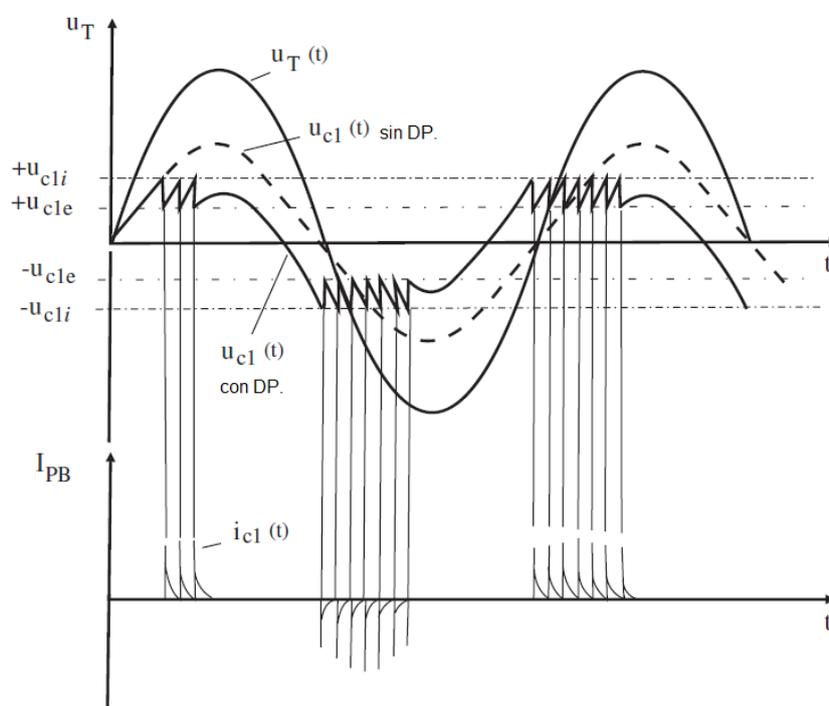


Figura 2 Fenómeno de Descargas Parciales. [11]

1.2.2 Patrón de DP en AC.

En la Figura 2 se puede observar el número y amplitud de las descargas que se producen, tanto en el semiciclo positivo y negativo, estas varían, debido a que los defectos que posee cada aislante son

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

distintos, siendo esto muy importante para poder identificar los distintos fenómenos individuales que ocurren en el sistema de aislamiento, a esta figura también se la conoce como patrón de descargas parciales, por las razones antes mencionadas la detección de descargas parciales es considerada como una técnica selectiva y sensible para analizar el estado del dieléctrico del sistema de aislamiento [12].

El patrón de descargas parciales también puede ser interpretado mediante una elipse, como se observa en la Figura 3, donde, el semiciclo positivo es representado por la parte superior de la elipse y el semiciclo negativo por la parte inferior, el cruce por cero es representado por el semieje mayor. [12]

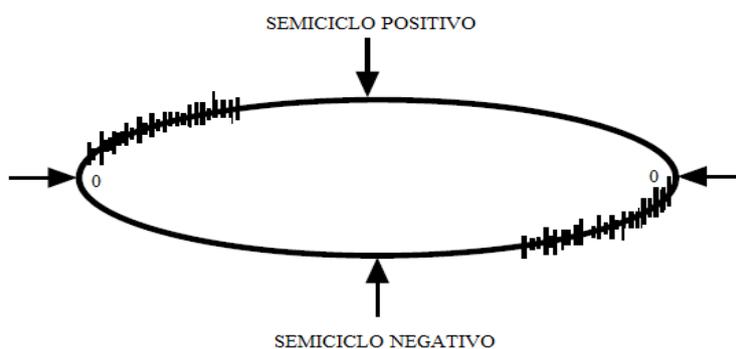


Figura 3 Patrón de descargas parciales en elipse.

1.3 TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES.

Según el lugar de ocurrencia las descargas parciales se clasifican en tres tipos: descargas internas, descargas superficiales y descargas corona.

1.3.1 Descargas Parciales Internas.

Las descargas parciales de tipo internas se dan en aislamientos de tipo sólido y líquido. En los aislantes sólidos ocurren dentro de huecos o irregularidades con baja rigidez dieléctrica, dichas irregularidades son resultado de fallas contractivas o fallas operativas; en los aislantes líquidos este tipo de descarga ocurre en burbujas.

Las descargas parciales de tipo internas presentan impulsos en regiones donde la señal de tensión aplicada al aislante en prueba tiene mayor pendiente, esto quiere decir que presenta repeticiones de impulsos en los pasos por cero de la señal de tensión. En la Figura 4, se puede observar el esquema de una descarga interna. [10], [13]

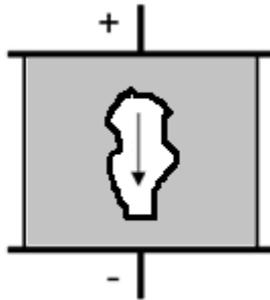


Figura 4 Descarga parcial de tipo Interna.

1.3.2 Descargas Parciales Superficiales.

Este tipo de descarga tiene lugar en interfaces de dos medios dieléctricos, en nuestro medio casi siempre estos dieléctricos son aislante y aire, se da debido a que aparecen componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad, también la contaminación y factores ambientales como la humedad aceleran la aparición de este tipo de descarga.

En cuanto al patrón que siguen los impulsos generados por las descargas superficiales, son muy parecidas a las de las descargas internas, solo que son un poco más asimétricas teniendo mayor concentración de impulsos en el semiciclo negativo. En la Figura 5 se observa un esquema de la descarga superficial. [10], [14]

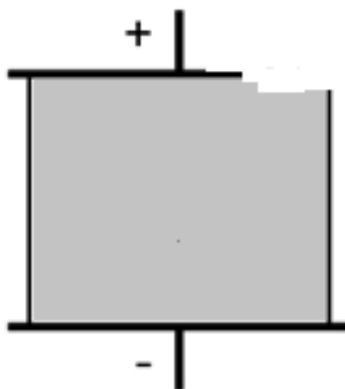


Figura 5 Descarga parcial de tipo Superficial.

1.3.3 Descargas Parciales Corona.

Este tipo de descargas se da en zonas afiladas dentro de gases o dieléctricos líquidos sometidos a un fuerte campo eléctrico, como por ejemplo en los bordes afilados de las máquinas, los tornillos o pernos de los cables. [15]

Las descargas parciales tipo corona poseen un patrón muy característico debido a que su tensión de ignición para la ocurrencia del fenómeno es distinta entre los semiciclos positivo y negativo de la señal de tensión, por este motivo los impulsos aparecen alrededor de los 270 grados. [10] En la Figura 6 se muestra un esquema de la descarga corona.

Un aislador sometido bajo estrés en condiciones de contaminación y/o lluvia presenta disminución en su línea de fuga característica, por lo que se podría evidenciar una mayor cantidad de efectos corona.

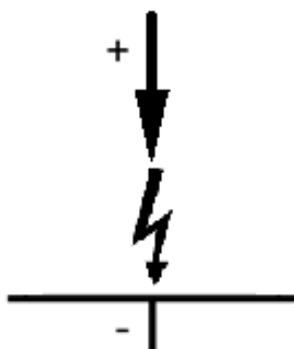


Figura 6 Descarga parcial de tipo Corona.

1.4 DETECCIÓN Y MEDICION DE DP.

Se requiere de un circuito específico para poder detectar y medir las descargas parciales en un aislante, dicho circuito debe contemplar la característica de brindar un camino de baja impedancia para el pulso de corriente que provoca la descarga, además, se debe ubicar de manera correcta y eficiente los sensores y transductores necesarios para dicho fin. [16]

La norma IEC 60270 es el documento que dicta los circuitos y pasos necesarios para lograr detectar y medir las descargas parciales en un aislante, esta norma se refiere a las mediciones convencionales ya que también existe una normativa que brinda los sistemas no convencionales para medir las descargas parciales, esta norma es la IEC 62478.

1.4.1 Normativa IEC 60270.

La norma IEC 60270 plantea los circuitos que deben ser utilizados tanto para la medición como para la detección de descargas parciales, se basa en la integración del pulso de corriente lo que da como resultado el valor de la carga aparente, la misma que es similar a la medida del pulso de corriente que provoca la descarga parcial. [16], [17]

En el dominio de frecuencia la norma IEC 60270 dice que el espectro de los pulsos de las descargas parciales es aproximadamente constante, debido a que la duración de dicho pulso es muy pequeña asemejándose mucho a la respuesta en frecuencia de un pulso de Dirac, por ende, para llegar a detectar y medir las descargas parciales en aislantes se debe aplicar un filtro pasabanda de tal manera que se pueda analizar las características propias de las descargas parciales. [17], [18], [19]

La normativa en análisis brinda los circuitos de medición directa e indirecta para la detección y medición de DP; el circuito directo se caracteriza por tener la impedancia de medida en serie con el aislante en prueba y el circuito indirecto donde la impedancia de medida se encuentra en serie con el condensador de acoplamiento [16], además, los circuitos están conformados por los elementos que se detallan a continuación y que se observan en las Figuras 7 y 8. [17].

- Fuente de Alta tensión libre de interferencias.
- Impedancia Filtro Z_n , que impide el paso de perturbaciones hacia la fuente de alta tensión.
- El objeto de prueba, su comportamiento es semejante a un capacitor C_a .
- Condensador de acoplamiento C_k , facilita el paso de los pulsos de corriente de alta frecuencia.
- Impedancia de medida Z_m , por donde fluye el pulso de la descarga parcial.
- Instrumento de medición de descargas parciales.

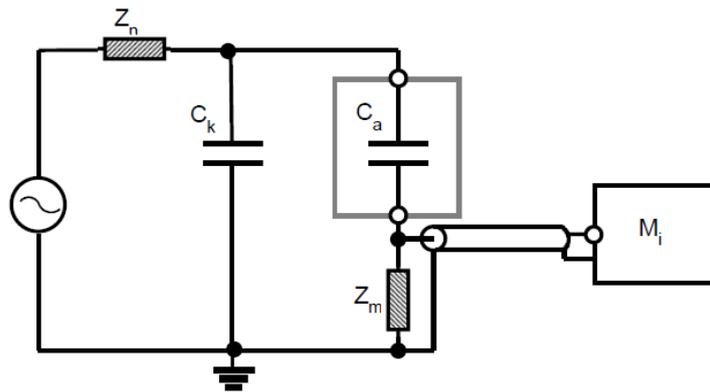


Figura 7 Circuito directo para la detección y medición de DP.

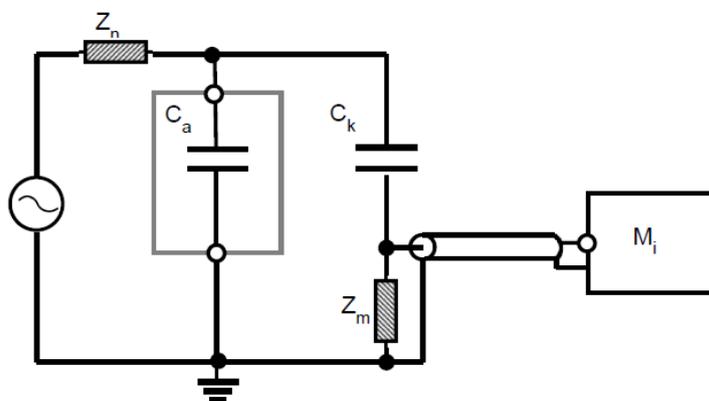


Figura 8 Circuito indirecto para la medición y detección de DP.

Para lograr medir carga eléctrica la norma IEC 60270 brinda un llamado proceso de calibración, donde, recomienda utilizar el esquema mostrado en la Figura 9; el proceso de calibración inyecta un valor de carga eléctrica conocida a la resistencia de medición R_m , para la generación de una carga eléctrica conocida se hace uso de una señal tipo escalón en serie con un capacitor, el valor de la carga que se obtiene es igual al producto entre el valor del escalón U_o y el capacitor C_o , el paso siguiente es medir con el osciloscopio y darle una escala adecuada al valor de carga eléctrica en el osciloscopio para después poder tener mediciones reales de carga eléctrica. [17]

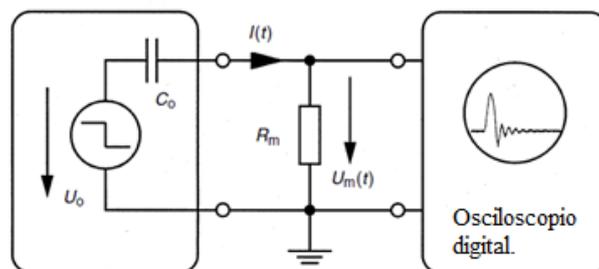


Figura 9 Circuito para la calibración de escalas.

También existen métodos no convencionales para medir las descargas parciales y estos métodos se encuentran contemplados en la norma IEC 62478, donde recoge todas las técnicas utilizadas para llegar a este fin de manera no convencional, en general los métodos no convencionales jamás siguen ningún circuito normalizado para llegar a medir, sino que se basan en la utilización de una amplia gama de sensores conectados directamente a los equipos que se desea medir, algunos ejemplos de estos tipo de mediciones convencionales son: [14]

- Técnicas de detección EMI (Interfaz de Medición Electromagnética)
- Detección Acústica.
- Detección Óptica.

1.5 CLASIFICACIÓN DE DP.

Una vez que se ha logrado detectar y medir las descargas parciales, el paso siguiente es extraer las características principales de mencionado fenómeno y proceder con la clasificación, de esta manera poder concluir tanto con el tipo de descarga que está sufriendo el sistema de aislamiento y la fuente que la produce.

1.5.1 Extracción y clasificación de DP.

El proceso consiste en extraer los rasgos característicos de los pulsos que ya fueron detectados y medidos, la extracción se puede realizar tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de frecuencia.

Para lograr extraer los rasgos característicos que marcan la diferencia entre los distintos tipos de descargas parciales, en el dominio del tiempo, se utiliza el análisis estadístico, donde se manejan elementos y conceptos como: la tasa de repetición de los pulsos por ciclo y la magnitud de carga

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

aparente. El análisis consiste en crear distribuciones de probabilidad en función del ángulo de fase de la señal de tensión aplicada, siendo estas las siguientes. [20]

- $H_{qmax}(\varphi)$ presenta el valor máximo del pulso producido en cada ángulo de fase φ
- $H_{qn}(\varphi)$ presenta el valor medio de la magnitud de los pulsos producidos en cada ángulo de fase φ .
- $H_n(\varphi)$ presenta el número de descargas por cada ángulo de fase φ .

A las antes mencionadas distribuciones se aplican operadores estadísticos como: el valor medio, la varianza, el sesgo o Skewnes (Sk) y la Kurtosis (Ku), siendo los dos últimos evaluados respecto a una distribución normal de referencia, donde, Sk determina la asimetría y Ku determina el grado de concentración. Una vez que sea realizado el análisis estadístico de las descargas parciales el resultado es la llamada “huella dactilar” de la descarga parcial. [21]

La clasificación de las descargas parciales es el último paso para completar un análisis completo de descargas parciales, es la comparación de las huellas dactilares que resultan del proceso de extracción con huellas dactilares de descargas parciales conocidas, para este fin se tiene algunas herramientas como: Algoritmos de funciones de distancia, Redes Neuronales artificiales, Lógica difusa entre otras.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGIA PROPUESTA

Para analizar las descargas parciales en aisladores tipo pin se plantea toda una metodología con tres ejes importantes que son la detección, medición y clasificación de las DP, en la Figura 10, se observa el diagrama de bloques con la metodología propuesta para el análisis de descargas parciales.

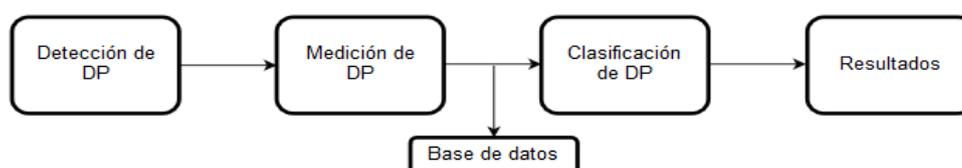


Figura 10 Diagrama de bloques para el análisis de DP.

En la Detección de DP se plantea un circuito detector, el objetivo es obtener una señal muestral (S_e) de 40000 muestras que contenga características de las DP para su posterior medición; en la etapa de medición la señal obtenida en la detección de DP es afectada por la implementación de un filtro digital FIR (Finite Impulse Response) con el objetivo de obtener una señal ya en valores de carga eléctrica (C_e) con 16542 muestras únicamente ya con características propias del fenómeno de DP.

La base de datos es resultado de realizar el ensayo para el análisis de DP al aislador tipo pin durante un tiempo de 20 minutos, dicho ensayo está conformado por los procesos de detección y medición según la metodología propuesta, donde, se obtienen 120 señales muestrales de carga eléctrica lo que se convierte en la base de datos.

El proceso de clasificación parte de la base de datos a la cual se aplica el análisis estadístico que al final da como resultado el patrón de DP o “huella dactilar” correspondiente al aislador tipo pin en análisis. Redes Neuronales (NN) son ocupadas para realizar la clasificación del patrón de DP del aislador bajo ensayo, previamente las redes neuronales son entrenadas con patrones de DP correspondientes a fallas en aisladores ya conocidas (PC), siendo estos: descarga superficial (DS), descarga corona (DC), descarga interna ramificación (DIR), descarga interna cavidad rectangular (DICR) y descarga interna de múltiples cavidades (DIMC); las redes neuronales realizan la clasificación entre el patrón de DP obtenida después del ensayo y los patrones de DP con la que fue entrenada la red neuronal dando como resultado una matriz de combinaciones binarias que

representan un posible defecto en el aislador tipo pin en estudio. En la Figura 11 se detalla matemáticamente la metodología propuesta.

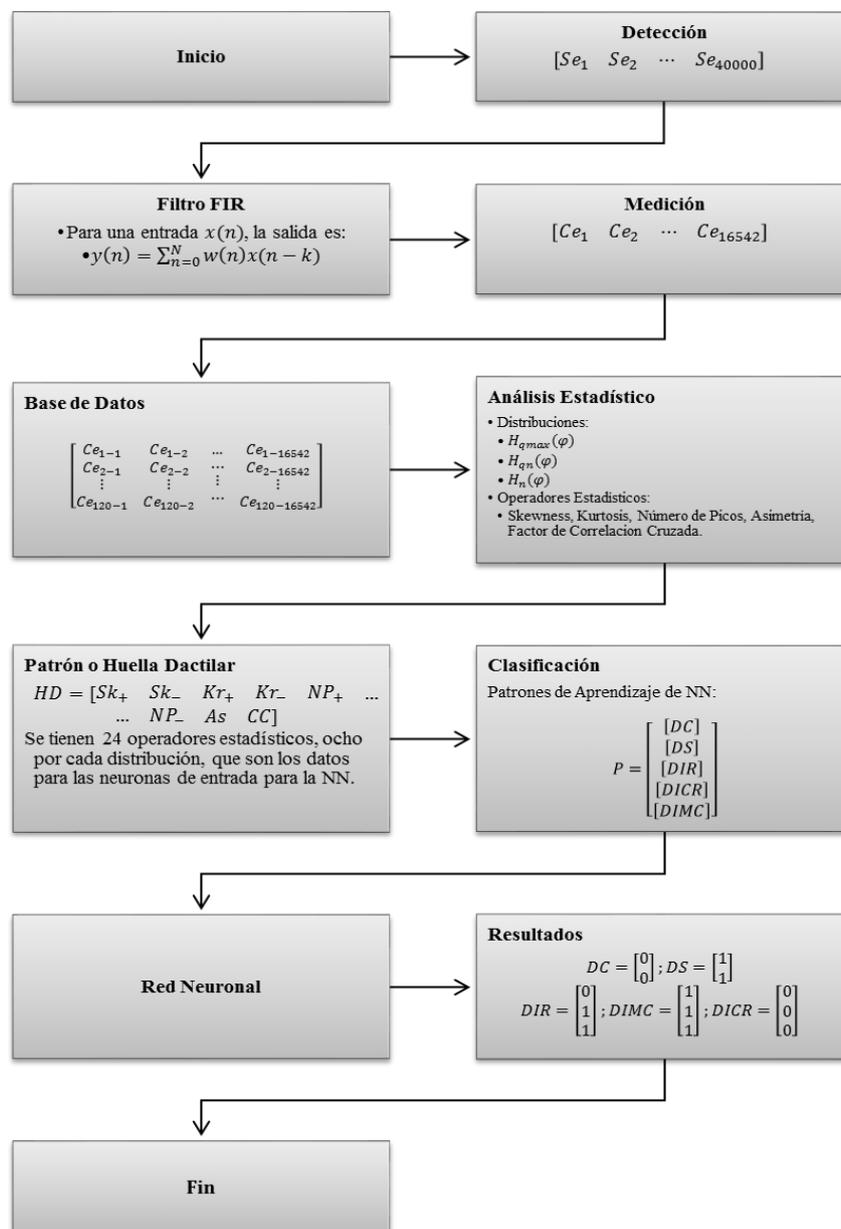


Figura 11 Flujoograma del modelo matemático de la metodología propuesta.

2.1 DETECCIÓN DE DP.

Partiendo de la Norma IEC 60270 se plantea un circuito detector de descargas parciales, el cual eficientemente fue adaptado y configurado con los elementos que posee el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana, en la Figura 12 se muestra el circuito propuesto.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PROPUESTA.

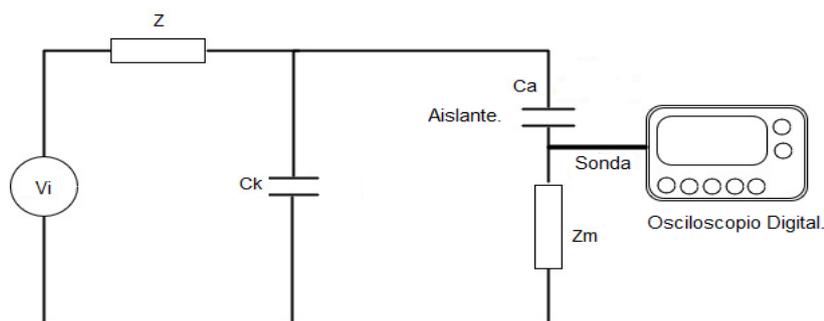


Figura 12 Circuito propuesto para la detección de DP.

Los elementos que conforman el circuito detector de DP se detallan en la Tabla I.

Tabla 1 Elementos utilizados para el circuito detector de DP.

ELEMENTO	MARA	CARACTERÍSTICAS
Vi: Fuente de alta tensión	<i>TERCO</i>	100kV, 5kVA
Z: Impedancia	<i>TERCO</i>	1MΩ, 100kV
Ck: Capacitor de acoplamiento.	<i>TERCO</i>	100pf, 100kV
Zm: Impedancia de medida.	<i>SEC</i>	1000Ω
Ca: Aislante en prueba.	<i>GAMMA</i>	Tipo pin 15kV
Osciloscopio	<i>TEKTRONIX</i>	BW de 350MHz y 5 GS/s.
Laboratorio de Alta Tensión	<i>TERCO</i>	100kV

El circuito está conformado por **Vi** que es la fuente de alta tensión, **Z** la impedancia que impide el paso de perturbaciones hacia la fuente de alta tensión, **Ck** el capacitor de acoplamiento, **Ca** el aislante en prueba, **Zm** que corresponde a la impedancia de medida o el sensor de medida con la característica de que al medir voltaje en esta impedancia se está obteniendo una medición directamente

proporcional a la corriente de fuga y a la carga eléctrica del aislador en análisis, siendo éstas últimas las señales más importantes para el análisis de descargas parciales planteado.

La señal obtenida del osciloscopio es de tipo muestral, por lo que se puede considerar como un vector de datos, el mismo que se convertirá en el vector de entrada ($x(k)$) para el filtro digital. Donde, C_e representa el valor de carga eléctrica de los 40000 datos de cada ciclo, durante el ensayo.

$$x(k) = C_e k \quad k = 1, 2, 3, \dots, 40000 \quad (1)$$

2.2 MEDICIÓN DE DP.

Primeramente en el proceso de medición de descargas parciales, se debe hacer el ajuste de escalas con el objetivo de poder medir la carga eléctrica desplazada debido a las descargas parciales en Coulombs, el proceso es detallado en la sección 1.4.1 del capítulo anterior, en síntesis, se aplica una carga eléctrica conocida con el objetivo de obtener un factor de atenuación, el mismo que es utilizado dentro del sistema de medición con el fin de poder obtener mediciones reales de carga eléctrica en Coulombs.

Para el proceso de medición de las descargas parciales, las señales resultantes del proceso de detección de DP deben pasar por un proceso de filtrado. En este caso se plantea la utilización de filtros digitales tipo FIR (*Finite Impulse Response*) de tal manera que resulten señales de carga eléctrica con características propias del fenómeno de descargas parciales.

Los filtros FIR son de fase lineal, son estables debido a que no poseen elementos de retroalimentación y por último su implementación es relativamente simple, son motivos por los que se ha escogido este tipo de filtro [22], La Figura 13 muestra el diagrama de bloques elemental de un filtro FIR.

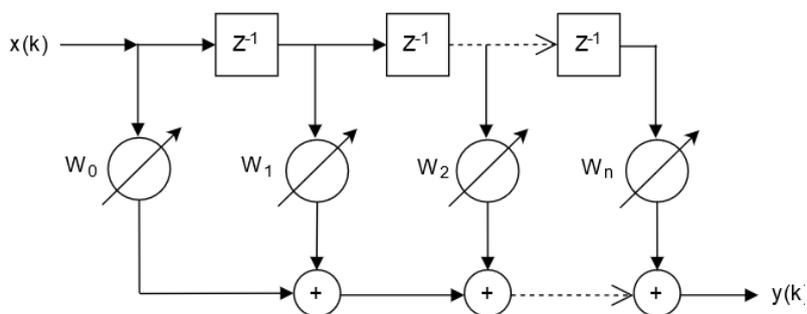


Figura 13 Diagrama de bloques del filtro FIR implementado.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PROPUESTA.

Un filtro FIR causal tiene una función de sistema que es un polinomio en z^{-1} .

$$W(z) = \sum_{n=0}^N w(n)z^{-n} \quad (2)$$

Para una entrada $x(n)$, la salida es:

$$y(n) = \sum_{n=0}^N w(n)x(n - k) \quad (3)$$

Para cada valor de n , la evaluación de esta suma requiere $(N+1)$ multiplicaciones y N adiciones. [23]

De igual manera, de forma vectorial la salida $y(n)$, se puede representar como:

$$w(n) = \begin{bmatrix} w(0) \\ w(1) \\ w(2) \\ \vdots \\ w(N) \end{bmatrix} \quad x(n) = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$y(n) = x(n)^T \times w(n) \quad (5)$$

Se realiza la implementación del filtro FIR de tipo pasabanda con un ancho de banda de 250KHz, la programación del filtro se realiza mediante el software Matlab®, una ventaja más de este tipo de filtros digitales es que el orden de los mismos es mucho mayor comparado con los filtros analógicos, en este caso el filtro implementado posee un orden mayor a cien esto hace que los resultados sean de muy alta calidad al final del filtrado, la ventana de Hamming fue el método que se utilizó para el diseño del filtro FIR.[24]

2.3 CLASIFICACIÓN DE DP.

Para el proceso de clasificación de DP se realizan varias operaciones y análisis, en la Figura 14 se detalla las operaciones de manera lógica que se realizan para cumplir con el objetivo de clasificar las DP.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PROPUESTA.

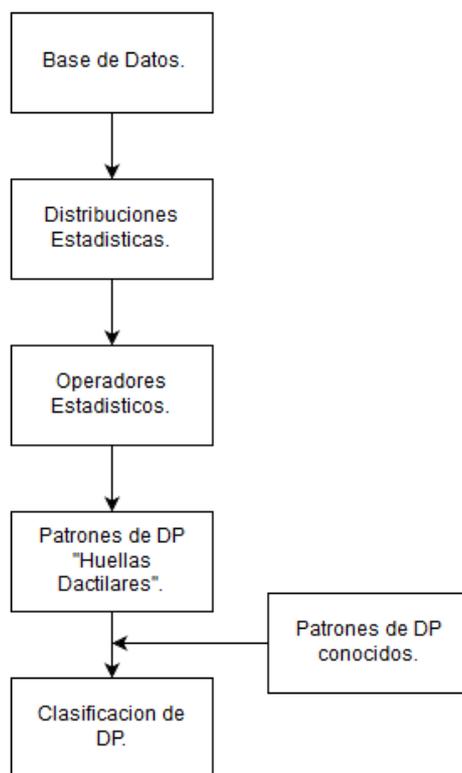


Figura 14 Diagrama de flujo para la clasificación de DP.

Para construir la base de datos se realiza el ensayo (procesos de detección y medición de DP) durante el tiempo de 20 minutos, tomando la señal de carga eléctrica desplazada por la descarga parcial cada 10 segundos, en total obteniendo 120 señales, cada una conformada por 16542 muestras que corresponde a un ciclo de una señal de 60Hz, estas 120 señales forman una matriz de 120x16542 siendo esta matriz la base de datos que posteriormente servirá para el análisis estadístico, como sugiere E. Gulski y F. H Kreuger en [25] y [26]

El análisis estadístico se basa en el cálculo de distribuciones de probabilidad y el cálculo de operadores estadísticos a las distribuciones de probabilidad, el objetivo es formar el patrón de DP o la llamada “huella dactilar”, que es la que contiene las características específicas de las descargas parciales del aislador tipo pin en análisis. Las distribuciones de probabilidad y operadores estadísticos que se estudian se detallan a continuación.

Distribuciones de probabilidad.

- **Distribución de picos máximos, $H_{q_{max}}(\varphi)$:** Presenta el pulso con la máxima magnitud en función del ángulo de fase de todas las muestras.
- **Distribución de picos promedio, $H_{q_n}(\varphi)$ s:** Presenta el promedio de la magnitud del pulso en función del ángulo de fase de todas las muestras.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PROPUESTA.

- **Distribución de número de picos, $H_n(\varphi)$:** Presenta el número de pulsos que se dan en cada ventana del ángulo de fase de todas las muestras.

Operadores estadísticos.

- **Skewness-Sk:** representa la asimetría existente entre la distribución de carga y la distribución normal de Gauss. Y está definido como:

$$Sk = \frac{\sum(x_i - \mu)^3 \cdot P_i}{\sigma^3} \quad (6)$$

Donde x_i es el valor guardado, P_i es la probabilidad de aparición para el valor x_i en la i -ésima ventana de fase, μ es el valor medio:

$$\mu = \sum x_i \cdot P_i \quad (7)$$

Y σ es la varianza:

$$\sigma^2 = \sum (x_i \cdot u)^2 \cdot P_i \quad (8)$$

- **Kurtosis-Kr:** mide la mayor o menor concentración de datos alrededor de la media.

$$Ku = \frac{\sum(x_i - \mu)^4 \cdot P_i}{\sigma^4} - 3 \quad (9)$$

- **Número de picos-Pe:** se utiliza para calcular cuántos valores de pico existe en la distribución de carga.

$$\frac{dy_{i-1}}{dx_{i-1}} > 0; \quad \frac{dy_{i+1}}{dx_{i+1}} < 0 \quad (10)$$

- **Asimetría:** es el cociente del valor medio de carga entre el semiciclo positivo y negativo de cada distribución.
- **Factor de correlación cruzada (CC):** representa las diferencias que existen en la forma de cada una de las distribuciones de carga entre el semiciclo positivo y negativo.

$$CC = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum \frac{y_i}{n}}{\sqrt{\left[\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]}} \quad (11)$$

Para la clasificación de patrones de DP se utiliza la herramienta de Redes Neuronales (NN), donde se clasifica el patrón de DP del aislador tipo pin en estudio con respecto a patrones de DP de aisladores con fallas ya conocidas, el tipo de red neuronal que se ocupa es de retropropagación o backpropagation.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PROPUESTA.

El funcionamiento de una red backpropagation consiste en un aprendizaje de un conjunto predefinido de pares de entrada-salidas dados como ejemplo, empleando un ciclo propagación-adaptación de dos fases: primero se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de las neuronas, se va propagando a través de todas las capas superiores hasta generar una salida, se compara el resultado obtenido en las neuronas de salida con la salida deseada y se calcula un valor de error para cada neurona de salida. A continuación, estos errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa intermedia que contribuyan directamente a la salida, recibiendo el porcentaje de error aproximado a la participación de la neurona intermedia en la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aportación relativa al error total. Basándose en el valor del error recibido, se reajustan los pesos de conexión de cada neurona, de manera que en la siguiente vez que se presente el mismo patrón, la salida esté más cercana a la deseada; es decir, el error disminuya.

La forma de entrenamiento se puede realizar de una manera recursiva empleando las siguientes expresiones. Primero, considere las ecuaciones de la capa oculta,

$$Vh_j = \sum_{i=1}^{Ni} Wh_{ji}X_i + \theta h_j \quad j = 1,2,3, \dots Nh \quad (12)$$

$$Uh_j = f(Vh_j) \quad (13)$$

A continuación, las muestras de salida estarán dadas por:

$$Vo_k = \sum_{j=1}^{Nh} Wo_{kj}Uh_j + \theta o_k \quad k = 1,2,3, \dots No \quad (14)$$

$$Uo = f(Vo_j) \quad (15)$$

La adaptación de la capa de salida se realiza a través del error cuadrático promedio:

$$Ep = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{No} e_k^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{No} (d_k - Uo_k)^2 \quad (16)$$

La expresión para la adaptación de los pesos de salida es:

$$\frac{\delta Ep}{\delta Wo_{kj}} = -(d_k - Uo_k)(1 - Uo_k)Uo_kUh_j \quad (17)$$

La adaptación de los pesos de la capa oculta se realiza a través del error cuadrático promedio

$$Wh_{ji}(n) = Wh_{ji}(n - 1) + \alpha \frac{\delta E_p}{\delta W_{okj}} \quad (18)$$

Se considera 5 patrones de DP o “huellas dactilares” de aisladores con fallas conocidas para la clasificación, en la Figura 15 se observa dichas fallas en aisladores que van a ayudar para la clasificación, con estos 5 patrones de DP se entrena a la red neuronal para la posterior clasificación del patrón de DP que se obtiene del aislador tipo pin en análisis.

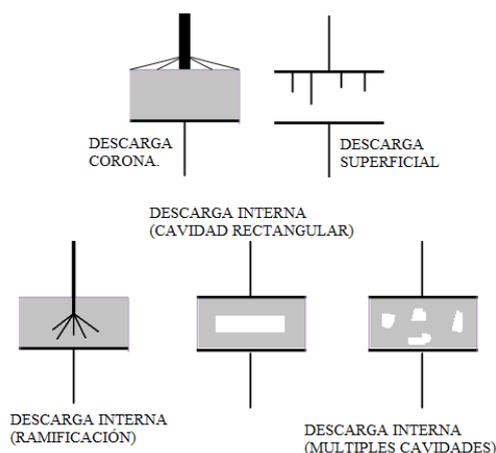


Figura 15 Descargas consideradas como conocidas para la clasificación.

Se propone dos redes neuronales, la primera será para clasificar entre descarga corona y superficial y la segunda para clasificar entre las tres descargas internas que se plantean. La estructura de la primera red neuronal se presenta en la Figura 16, está compuesta por 24 neuronas de entrada que corresponde a los 24 operadores estadísticos que se calculan de las distintas distribuciones, 20 neuronas en la capa oculta y 2 neuronas en la capa de salida.

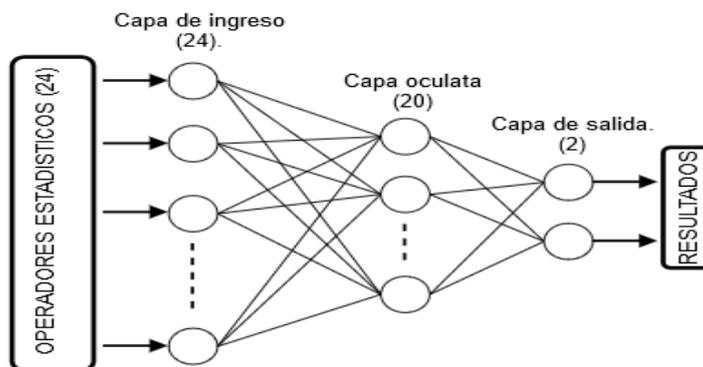


Figura 16 Estructura de la red neuronal para clasificar descargas superficiales y corona.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PROPUESTA.

En las Tablas 2 y 3 se muestra los patrones de DP conocidos que sirven para el entrenamiento de la red neuronal diseñada para la clasificación de DP tanto de tipo corona y superficial del aislador tipo pin en análisis.

Tabla 2 Patrón de DP tipo Corona

	DESCARGA CORONA		
Operador Estadístico	Distribución picos máximos	Distribución picos promedio	Distribución número de picos
Skewness SP	0	-0.02	0.02
Skewness SN	0.02	0	0.08
Kurtosis SP	-1.22	-1.23	-1.11
Kurtosis SN	-1.22	-1.2	-1.37
Num Picos SP	3	3	3
Num Picos SN	3	3	3
Asimetría	-0.57	-0.64	0.34
Cross-Correlation	0.67	0.68	0.23

Tabla 3 Patrón de DP tipo Superficial.

	DESCARGA SUPERFICIAL		
Operador Estadístico	Distribución picos máximos	Distribución picos promedio	Distribución número de picos
Skewness SP	-0.04	-0.04	0.18
Skewness SN	0.27	0.24	0.34
Kurtosis SP	-0.88	-0.93	-0.94
Kurtosis SN	-0.72	-0.8	-0.64
Num Picos SP	4	3	2
Num Picos SN	2	3	3
Asimetría	-0.55	-0.53	-0.02
Cross-Correlation	0.5	0.49	0.38

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PROPUESTA.

Para el entrenamiento de la red se necesitó de 9 épocas en promedio llegando a tener un promedio de error medio cuadrático de 2.46×10^{-9} en 20 entrenamientos, en la Figura 17 se muestra la evolución del error medio cuadrático en el proceso de aprendizaje de la red.

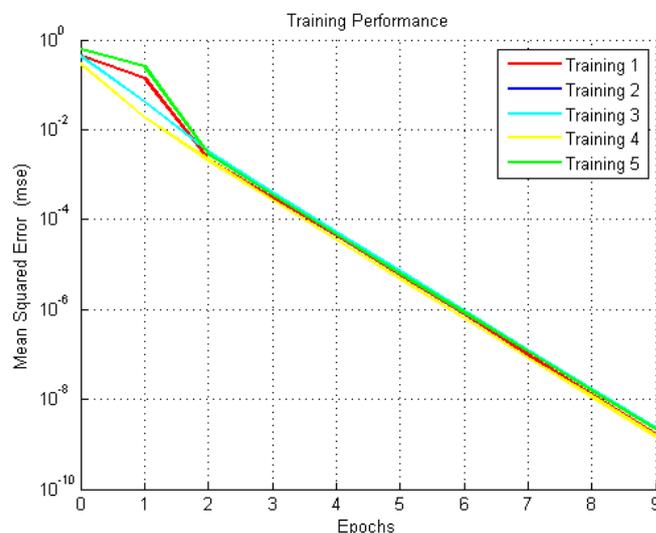


Figura 17 Evolución del error medio cuadrático de la primera red neuronal en los 5 primeros entrenamientos.

La Tabla 4 detalla los posibles resultados que la capa de salida puede brindar, es también llamada como tabla de verdad debido a que se deben cumplir algunas condiciones para poder concluir en un tipo específico de descarga.

Tabla 4 Tabla de verdad para la red neuronal que clasifica descargas corona y superficiales.

Clasificación Descargas Corona y Superficial				
Defecto	Descarga Corona	Descarga Superficial	Ninguna	
			Neuronas de salida.	0
	0	1	0	1

La segunda red neuronal que clasifica entre los distintos tipos de descargas internas como son: ramificación, cavidad rectangular, múltiples cavidades, posee una estructura con 13 neuronas en la capa de entrada, es menor respecto a la anterior red neuronal debido a que no es necesario los operadores estadísticos correspondientes a los picos máximos, posee 10 neuronas en la capa oculta y 3 neuronas en su capa de salida, esta estructura de red neuronal se puede ver en la Figura 18.

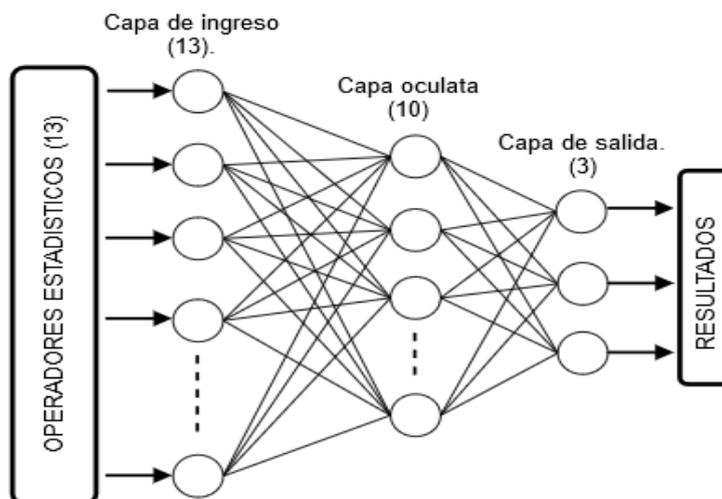


Figura 18 Estructura de la red neuronal para la clasificación de los distintos tipos de descargas internas.

Los patrones de DP que son utilizados para el entrenamiento de la red neuronal, se encuentran en las Tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5 Patrón de DP internas de tipo ramificación.

	DESCARGA INTERNA RAMIFICACIÓN	
	Distribución picos promedio	Distribución número de picos
Skewness SP	-0.39	0.4
Skewness SN	-0.39	-
Kurtosis SP	-0.41	-0.39
Kurtosis SN	-0.3	-0.5
Num Picos SP	2	3
Num Picos SN	1	2
Asimetría	0.44	
Cross-Correlation	0.38	

Tabla 6 Patrón de DP internas de tipo cavidad rectangular.

	DESCARGA INTERNA CAVIDAD
--	--------------------------

	RECTANGULAR	
Operador Estadístico	Distribución picos promedio	Distribución número de picos
Skewness SP	0.2	0.6
Skewness SN	0.25	0.83
Kurtosis SP	-0.8	0.02
Kurtosis SN	-0.83	0.39
Num Picos SP	4	4
Num Picos SN	4	3
Asimetría	0.85	
Cross-Correlation	0.95	

Tabla 7 Patrón de DP internas de tipo cavidades múltiples.

	DESCARGA INTERNA MULTIPLES CAVIDADES	
Operador Estadístico	Distribución picos promedio	Distribución número de picos
Skewness SP	0.075	-0.12
Skewness SN	0.2	-0.1
Kurtosis SP	-1	-0.88
Kurtosis SN	-0.9	-0.58
Num Picos SP	4	2
Num Picos SN	2	1
Asimetría	0.62	
Cross-Correlation	0.925	

La Tabla 8 detalla de manera clara las distintas posibilidades que se obtiene en la capa de salida una vez que se emplee la red neuronal, como anteriormente se menciono es la tabla de verdad la cual nos permite con los resultados obtenidos clasificar entre los tres tipos de descargas internas que se encuentran en análisis, también, en la Figura 19 se observa la evolución del error medio cuadrático llegando a un promedio de 2.46×10^{-9} con 10 épocas durante 20 entrenamientos.

Tabla 8 Tabla de verdad de la red neuronal que clasifica las distintas descargas internas en análisis.

Clasificación de Descargas Internas								
Defecto	Cavidad	Múltiples	Treeing	Ninguno				
	Rectangular	Cavidades						
Tres neuronas de salida	0	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	0	1	0	0	1
	0	1	1	1	0	0	1	0

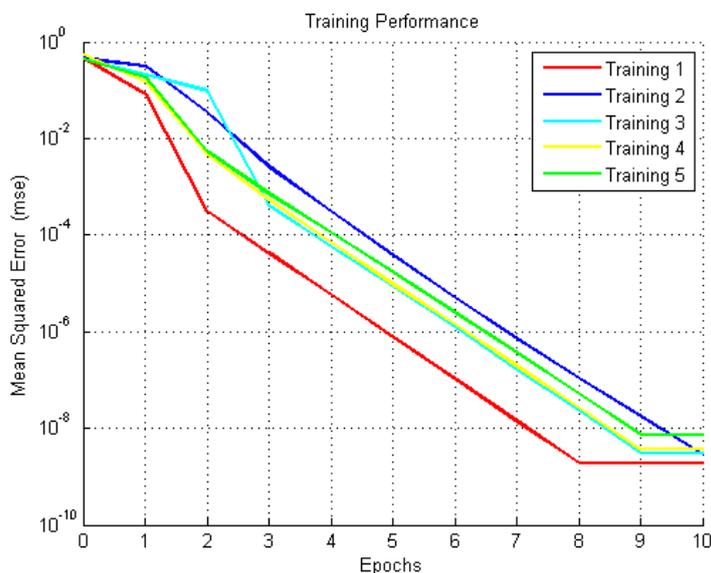


Figura 19 Evolución del error medio cuadrático de la segunda red neuronal en los primeros 5 entrenamientos.

Los resultados obtenidos durante el proceso planteado son mostrados en el Capítulo 3, cabe recalcar que tanto los filtros FIR como las redes neuronales fueron implementada en el software Matlab®, en cuanto a las redes neuronales se utilizó los paquetes ya existentes en el antes mencionado software.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 DETECCIÓN DE DP.

La primera parte para el análisis de descargas parciales se basa en la detección de la misma, esto mediante el circuito propuesto en el capítulo 2, sección 2.1.

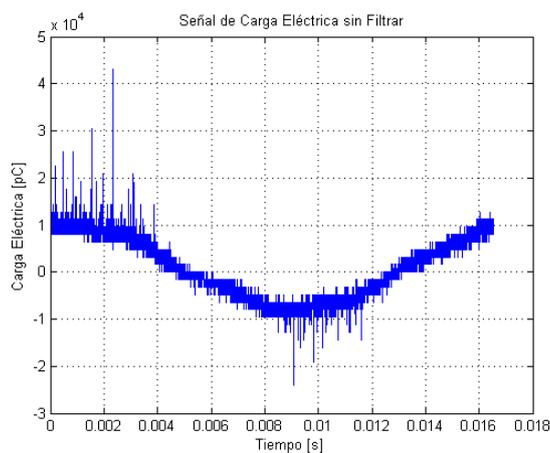


Figura 20 Señal de Carga Eléctrica sin Filtrar, test 1.

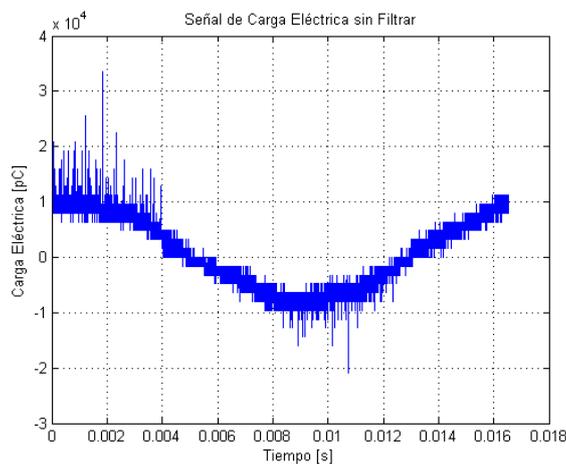


Figura 21 Señal de Carga Eléctrica sin Filtrar, test 2.

Las figuras 20 y 21 muestran la señal de carga eléctrica desplazada por la descarga parcial en diferentes ensayos. La forma de onda es de tipo cosenoidal debido al efecto capacitivo que presenta el aislador, es decir la corriente de fuga del aislador se adelanta 90° con respecto a la tensión de ensayo, al mismo tiempo se observan las perturbaciones existentes en el medio tales como ruido,

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

interferencias electromagnéticas, ondas de radio, etc. Y finalmente los picos típicos de descargas parciales en dieléctricos sólidos es la información que interesa en el proceso de análisis, y debido al proceso de ajuste de escalas y el proceso de calibración detallado en el capítulo 2, se obtienen valores de carga eléctrica en picoCoulombs (pC).

3.2 MEDICIÓN DE DP.

Una vez detectadas las descargas parciales en el aislador, se procede a aislar esta información del resto de la señal, para cumplir este objetivo se utilizó un filtro tipo FIR. Las figuras 22 y 23 muestran los resultados del filtrado de la señal.

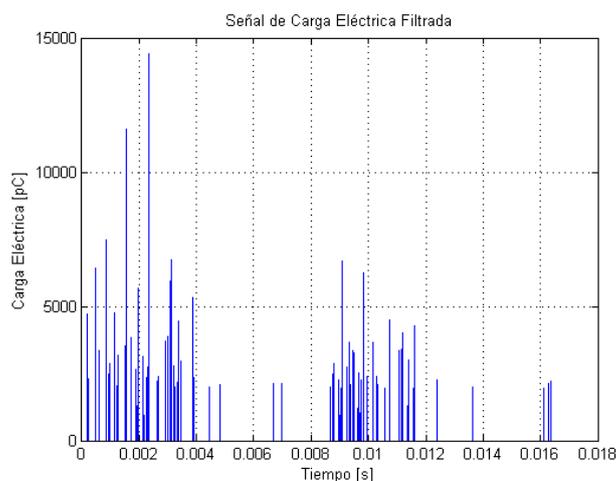


Figura 22 Señal de Carga Eléctrica Filtrada, test 1.

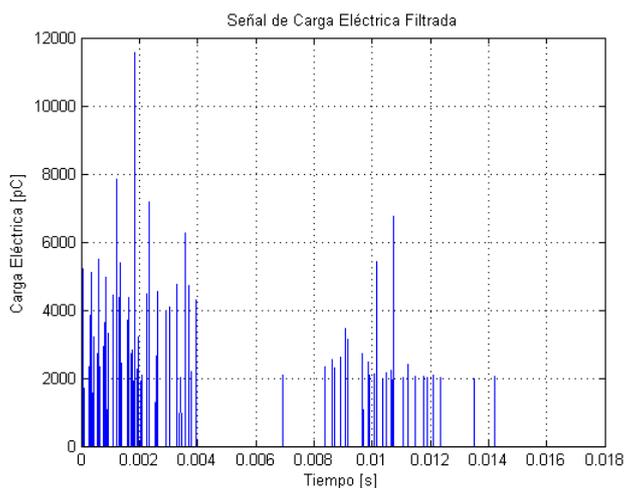


Figura 23 Señal de Carga Eléctrica Filtrada, test 2.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El filtro FIR cumple la función de eliminar las perturbaciones en la señal de carga eléctrica del aislador. Lo que permite evidenciar de una manera más concreta los picos de carga eléctrica generados por las DP, las Figuras 20 y 21 muestran estos resultados.

3.3 CLASIFICACIÓN DE DP.

De la base de datos creada a partir del ensayo realizado al aislador es posible obtener las distribuciones de carga: Distribución de Picos Máximos, Distribución Promedio de Descargas, Distribución de Número de Descargas por fase.

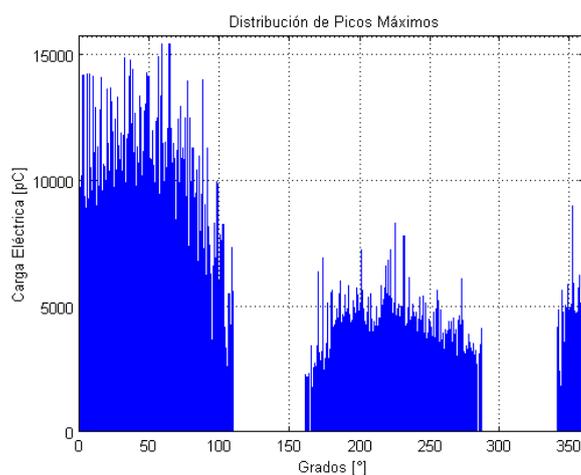


Figura 24 Distribución de Picos Máximos

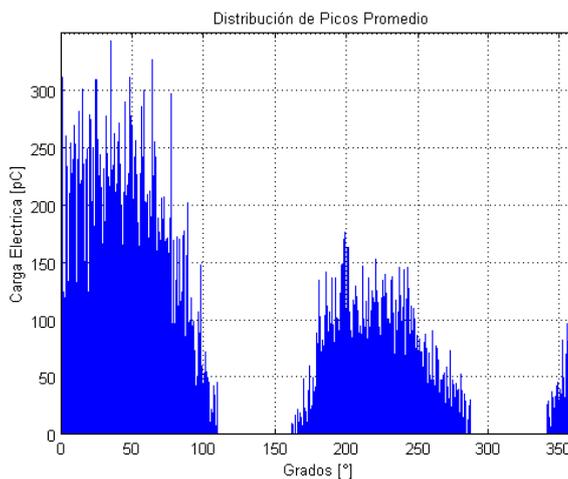


Figura 25 Distribución Promedio de Descargas

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

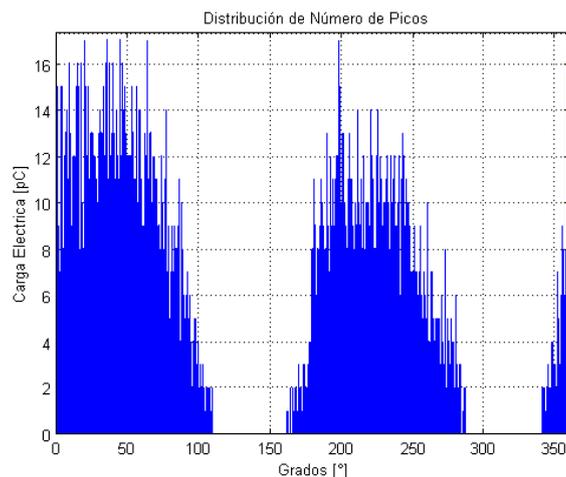


Figura 26 Distribución de Número de Descargas por ángulo de fase

La Figura. 24 muestra la distribución de picos de carga con su valor máximo en cada ventana, la escala está normalizada en picoCoulombs (pC) para una mejor interpretación de la magnitud de la descarga. La Figura. 25 indica el valor promedio de carga eléctrica en cada ventana, y finalmente la Figura. 26 indica el número de picos de carga eléctrica sucedidos en cada ventana durante todo el ensayo.

Teniendo las distribuciones de carga, el siguiente paso es aplicar los operadores estadísticos a cada una de ellas, cabe recalcar que cada una de ellas fue subdividida en distribución de semiciclo positivo y distribución de semiciclo negativo para cada una, es decir, ahora se tiene seis distribuciones. La Tabla. 9 muestra el valor de los operadores estadísticos aplicados a cada distribución, obteniéndose así el patrón de DP del aislador tipo pin en análisis o la llamada “huella dactilar”.

Tabla 9 Patrón de DP del aislador Tipo pin en análisis.

Operadores Estadísticos para cada Distribución			
Operador Estadístico	Distribución de Picos Máximos	Distribución de Picos Promedio	Distribución de Número de Picos por fase
Skewness (+)	0.647814730040	1.37341640688	1.06128574872
Skewness (-)	0.260372248399	1.39776335675	1.28897359229
Kurtosis (+)	2.24604114802	4.36357820160	3.25018793284
Kurtosis (-)	1.83916075566	4.79154079582	4.33390137607
Número de Picos (+)	2	1	4

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Número de Picos (-)	1	1	1
Asimetría	-0.515660490992	-0.485579998114	-0.727873271486
Factor CC	0.625388916467	0.504514749419	0.549194401132

Los 24 operadores descritos en la Tabla. 9 son los valores para las neuronas de entrada de la primera red neuronal que clasificará entre: Descarga Superficial y/o Descarga Corona. Para la clasificación de descargas internas: descargas en cavidades rectangulares, múltiples cavidades y treeing (cavidades en forma de ramificaciones); se utiliza una segunda red neuronal en la que se descartan los datos de la distribución de picos máximos, asimetría, factor CC y skewness del semiciclo negativo, ya que la base de datos para este defecto no considera dichos valores.

En la Tabla. 10 se observa de manera resumida los resultados que arrojan una vez aplicadas las redes neuronales planteadas.

Tabla 10 Resultados de las Capas de Salida de las Redes Neuronales

Clasificación de Descargas Parciales en aisladores tipo Pin			
Red Neuronal	Neuronas de Entrada	Neuronas de Salida	Defecto
NN1 Corona-Superficial	24 operadores estadísticos	0.99804209322	Descarga Superficial en Aire
		0.99961458806	
NN2 Descargas Internas	13 operadores estadísticos	0.00000017866	No Presenta Descargas Internas
		0.15855573129	
		0.62593600256	

La primera red neuronal da como resultado el vector [0.9980420932; 0.9996145880] el cual puede ser interpretado como un vector [1;1] y observando la Tabla.4 se concluye que el aislador presenta una descarga superficial en aire. Para la segunda red neuronal se tiene el vector de salida [0.0000001786; 0.1585557312; 0.6259360025] el cual no puede ser directamente interpretado como un valor entero y comparado con un valor de la Tabla.8, por lo que se concluye que el aislador no presenta un tipo de descarga parcial interna de los tres bajo estudio. El resultado está acorde a la realidad, ya que el ensayo fue realizado a un aislador con un tiempo de uso no muy elevado, es decir, existe la típica corriente de fuga que es considerada como una descarga superficial, pero no existe un tipo de descarga interna debido a que al corto tiempo de uso del aislador.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método alternativo propuesto para la medición y detección de descargas parciales demostró ser una técnica eficiente para su implementación en laboratorios de alta tensión que no disponen de un detector propio de descargas parciales. La clasificación de los defectos en aisladores tipo Pin es la continuación del método alternativo para la medición y clasificación de descargas parciales y a más de determinar el valor de carga eléctrica desplazada por la descarga parcial, determina el tipo de defecto presente en el aislador, pudiendo dar un primer criterio en cuanto al estado del aislador y sus condiciones para seguir funcionando.

La implementación del método alternativo es mucho más eficiente en el osciloscopio Tektronix MSO5000 ya que debido a sus características propias permite optimizar la adquisición de datos, si no se dispone de este instrumento la técnica no varía mucho, y solo se tendría que implementar o variar el código en Matlab para lograr el mismo objetivo, teniendo presente que la frecuencia de trabajo de los osciloscopios digitales es óptima para este tipo de análisis (mayor a 2 MS/s o 1 GHz).

Gracias al uso del software Matlab se pudo reducir la sobreutilización de expresiones matemáticas, ya que el mismo ya tiene comandos específicos para los operadores estadísticos, y para la creación y entrenamiento de la red neuronal; permitiendo consolidar un solo proceso de análisis para descargas parciales, desde la adquisición hasta la respuesta de la clasificación del defecto.

El presente trabajo ha servido de motivación para trabajos futuros como: descargas parciales en dieléctricos líquidos, detección y medición online de descargas parciales, cuantificar el valor del tipo de descargas parciales, y otros temas relacionados con Alta Tensión para la Universidad Politécnica Salesiana.

PUBLICACIONES.

M. Quizhpi-Cuesta, F. Gómez-Juca, W. Orozco-Tupacyupanqui and F. Quizhpi-Palomeque, "An alternative method for Partial Discharges measurement using digital filters," *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, 2017, pp. 92-97.
doi: 10.1109/ATEE.2017.7905172



THE 10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING
March 23-25, 2017
Bucharest, Romania

An Alternative Method for Partial Discharges Measurement Using Digital Filters

M. Quizhpi-Cuesta, F. Gómez-Juca, W. Orozco-Tupacyupanqui, F. Quizhpi-Palomeque, *Member IEEE*
Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador
{fquizhpic, fgomezj}@est.ups.edu.ec, {worozco, fquizhpi}@ups.edu.ec

Abstract- Partial Discharge (PD) or Partial Breakdown (PB) analysis is one of the most widely used methods to determine the state of electrical power insulation systems. An alternative method to measure PD is presented in this paper. In this proposed approach, data are obtained from electrical charge signals displaced by partial discharges on dielectric elements, pin type insulators. An electrical assembly consisting of a high voltage (HVAC) source, a blocking impedance, a capacitive divider and a measurement impedance was designed to obtain data. The signal detected by the measurement impedance is displayed on a high-end oscilloscope, the visualization instrument has the possibility of accessing the management software; therefore, it was possible to implement a bandpass finite impulse response (FIR) digital filter of a higher order than one hundred. The output of the filter presents the components of typical signals in partial discharges produced inside the dielectric material. Different analyzes were performed by using data segmentation which allows affirming that this approach is valid for its implementation. In this case, this method is innovative and appropriate for application in laboratories where there does not exist PD analyzers.

Keywords: Partial discharge measurement, FIR digital filter, isolation systems, electrical charge, dielectric elements.

I. INTRODUCTION

Detection of partial discharges is one of the most common techniques used to evaluate insulation quality in electrical power devices [1-4]. Conventional methods regarding detection and measurement of PD are usually based on normalized circuits and oscilloscopes. Partial discharges are one of the most significant reasons why dielectric elements suffer insulation degradation [5]. In this context, partial discharge analysis can help identifying the origin of failures and how critical it is. Thus, it is possible to determine insulation deterioration in a short time and the way in which we can solve this problem before it becomes worse [6], [7]. Commercial and regular PD devices, which usually work on a bandwidth of 250 KHz, examine the current signal that flows through the insulator; therefore, it is feasible to obtain important characteristics of the partial discharge phenomenon.

In this paper, a novel alternative method to measure PD is proposed considering the data obtained from a digital filter and a measurement impedance. For this purpose, a power electrical assembly was designed. This system consists of a high voltage ac power source (HVAC) which is free of partial discharges, a blocking impedance that prevents feedback source from the discharges generated in the tested dielectric, and a capacitive

divider that has two main functions: the first one is to measure the test voltage and the second reason is to serve as a coupling capacitor for data acquisition. In this approach, it was defined to perform several tests on pin type insulators due to they are frequently used in distribution networks, at the 22 kV level, in residential areas by Ecuadorian electrical companies. The safety regulations imposed by international organisms such as the IEC are considered in each of the evaluated tests and assemblies.

The paper is organized as follows. The concept about partial discharges is discussed in section II. In section III, a discussion about some classic PD measurement methods is considered. The proposed method to measure partial breakdown and some results are explained in section IV. Finally, section V concludes the paper.

II. PARTIAL DISCHARGES

Partial discharge is a local degradation phenomenon that produces current pulses, which have a very small magnitude and are visible in the range of microseconds and nanoseconds, through the insulation system. As a consequence of this, there is a partial decomposition of the dielectric [9-11], resulting in some defects such as voids, contamination and constructive irregularities that are found inside and outside of the dielectric. PD phenomenon gradually degrades and erodes the dielectric material or ceramic; thus the useful life of the whole insulation system is reduced [12].

PD phenomenon can be distinguished according to the place where it occurs on the dielectric. For example, when partial breakdown befalls at a free electrode in a gaseous environment it is known as corona. Inside a dielectric, solid or liquid, it is defined as Internal Breakdown. Finally, the phenomenon is described as Surface Breakdown if the PD takes places on the dielectric surface, but in gas [13].

Partial breakdown is sequential in solid dielectrics as shown in Fig. 1, where U_T is the ac test voltage applied to the insulator, while U_{c1} represents the voltage that we have in the dielectric whether or not the PB phenomenon affects it. Every time the signal is affected by a dielectric breakdown, it reaches the break voltages $+U_{db}$ and $-U_{db}$; thus a discharge is generated up to the voltage values of $+U_{c1e}$ and $-U_{c1e}$ [1], [14]. If the

978-1-5090-5160-1/17/\$31.00 ©2017 IEEE

Figura 27 Portada del paper publicado en el ATEE 2017

ANÉXOS

ANEXO A. PROGRAMACIÓN

```
%% Creación de Distribuciones para Análisis de Descargas Parciales en
Aisladores.
```

```
clc
```

```
clear all
```

```
disp('----- Descargas Parciales -----');
```

```
disp(' ');
```

```
%% IMRPORTAR DATOS
```

```
NomArch = input('Ingrese el nombre del archivo: ','s');
```

```
NomColVol = input('Ingrese el nombre de la columna de datos donde se
encuentra la señal de Voltaje (p.e. A): ','s');
```

```
NomColCarSF = input('Ingrese el nombre de la columna de datos donde se
encuentra la señal de Carga Sin Filtrar (p.e. B): ','s');
```

```
NomColCar = input('Ingrese el nombre de la columna de datos donde se
encuentra la señal de Earga Eléctrica (p.e. C): ','s');
```

```
NumCiclos = input('Ingrese el Número de Ciclos de la prueba: ');
```

```
NumMuestra = input('Ingrese el Número de Muestras: ');
```

```
tm = input('Ingrese el valor del Tiempo de Muestreo (tm): ');
```

```
NumMuestras = ceil((1/60)/tm);
```

```
fm = 1/(tm); %Frecuencia de Muestreo
```

```
NumMuesString = int2str(NumMuestras+3);
```

```
ColTie = strcat('A129:A',NumMuesString);
```

```
ColVol = strcat(NomColVol,'129:',NomColVol,NumMuesString);
```

```
ColCarSF = strcat(NomColCarSF,'129:',NomColCarSF,NumMuesString);
```

```
ColCar = strcat(NomColCar,'129:',NomColCar,NumMuesString);
```

```
NumMuestrasC = NumMuestras-125;
```

```
t = zeros(NumMuestrasC,1);
```

```
MatDatVol = zeros(NumMuestrasC,1);
```

```
MatDatCarSF = zeros(NumMuestrasC,NumCiclos);
```

```
MatDatCar = zeros(NumMuestrasC,NumCiclos);
```

```
MatDatVol(:,1)=xlsread(NomArch,'Hoja1',ColVol);
```

```
t(:,1)=xlsread(NomArch,'Hoja1',ColTie);
```

```

for p=1:NumCiclos
    NumHoja = int2str(p);
    P = strcat('Hoja',NumHoja);
    MatDatCarSF(:,p)=xlsread(NomArch,P,ColCarSF);
    MatDatCar(:,p)=xlsread(NomArch,P,ColCar);
end

% MatMaxCorr = max(MatDatCorr, [],1);
MatMaxCar = max(max(MatDatCar));
disp(MatMaxCar);
asfsa = input('Funciona');
mit = ceil(NumMuestrasC/2);

ti = t-t(1,1);
tiem = ti';
MatDatCarpC = MatDatCar/(1e-12);
disp(' ');
disp('Datos Importados Correctamente');
disp(' ');

%% Graficar Señales
DecGraf = input('Desea graficar alguna señal (SI(1) - NO(0)): ');
CanCicloGraf = 0;
f = 0;
p = 1;
if DecGraf == 1
    CanCicloGrafSF = 0;
    DecVol = input('Desea graficar la Señal de Voltaje de Ingreso (SI(1) -
NO(0)): ');
    disp(' ');
    if DecVol > 0
        f = 2;
        figure(f)
        plot(tiem,MatDatVol'/1e3);
        title('Voltaje de Ensayo')
        ylabel('Voltios [kV]')
        xlabel('Tiempo [s]')
        hold on;
        grid on;
    end
end

```

```

        sprintf('Usted a graficado la Señal de Voltaje de Ensayo en la
figura %d',f)
        disp(' ');
    end
    %Graficar Carga Eléctrica sin Filtrar.
    DecCargaSF = input('Desea graficar la Señal de Carga Eléctrica Sin
Filtrar (SI(1) - NO(0)): ');
    if DecCargaSF > 0
        CanCicloGraf = input('Cuantos Ciclos desea graficar: ');
        for p=1:CanCicloGraf
            NumCicloGraf = input('Qué número de ciclo desea graficar: ');
            figure(f+p)
            plot(tiem,MatDatCarSF(:,NumCicloGraf)*1e12);
            title('Carga Electrica No Filtrada')
            ylabel('Carga Electrica [pC]')
            xlabel('Tiempo [s]')
            hold on;
            grid on;
            sprintf('Usted a graficado la Señal de Carga sin Filtrar del
ciclo %d en la figura %d',NumCicloGraf,f+p)
            disp(' ');
        end
    end
    %Graficar Carga Eléctrica Filtrada
    DecCargaF = input('Desea graficar la Señal de Carga Eléctrica Filtrada
(SI(1) - NO(0)): ');
    if DecCargaF > 0
        CanCicloGraf = input('Cuantos Ciclos desea graficar: ');
        for p=1:CanCicloGraf
            NumCicloGraf = input('Qué número de ciclo desea graficar: ');
            figure(CanCicloGraf+f+p)
            plot(tiem,MatDatCarpC(:,NumCicloGraf));
            title('Carga Eléctrica Filtrada')
            ylabel('Carga Electrica [pC]')
            xlabel('Tiempo [s]')
            hold on;
            grid on;
            sprintf('Usted a graficado la Señal de Carga Filtrada del ciclo
%d en la figura %d',NumCicloGraf,CanCicloGraf+f+p)
            disp(' ');
        end
    end

```

```

end
disp('Las señales fueron graficadas en su totalidad');
end

%% FILTRO FIR

fcbe1 = 70e3; %Frecuencia de corte 1 en HERTZ de la banda eliminada
fcbp1 = 130e3; %Frecuencia de corte 1 en HERTZ de la banda de paso
fcbp2 = 420e3; %Frecuencia de corte 2 en HERTZ de la banda de paso
fcbe2 = 480e3; %Frecuencia de corte 2 en HERTZ de la banda eliminada

ws1=(fcbe1/fm)*pi; %Frecuencia de corte 1 normalizada de la banda eliminada
wp1=(fcbp1/fm)*pi; %Frecuencia de corte 1 normalizada de la banda de paso
wp2=(fcbp2/fm)*pi; %Frecuencia de corte 2 normalizada de la banda de paso
ws2=(fcbe2/fm)*pi; %Frecuencia de corte 2 normalizada de la banda eliminada
As=60;

delta_w=min(wp1-ws1,ws2-wp2);
M=ceil(15*pi/delta_w)+1;
n=0:1:M-1;
wc1=(ws1+wp1)/2;
wc2=(ws2+wp2)/2;
%Filtro pasabajo uno (ideal)
alpha1=(M-1)/2;
m1=n-alpha1;
fc1=wc1/pi;
hd1=fc1*sinc(fc1*m1);
%Filtro pasabajo dos (ideal)
alpha2=(M-1)/2;
m2=n-alpha2;
fc2=wc2/pi;
hd2=fc2*sinc(fc2*m2);
%Filtro pasabanda
hd=hd2-hd1;
% figure(1);clf
% stem(n,hd,'fill')
% xlim([0 M-1])
% title('Filtro pasabanda')
% ylabel('Amplitud')
% xlabel('Muestra')

```

```

%-----
w_black=(hamming(M))'; %Ventana de Hamming
h=hd.*w_black; %Filtro pasa-banda diseñado
% figure(2);clf
% stem(n,w_black,'fill')
% xlim([0 M-1])
% title('Ventana de Blackman')
% ylabel('Amplitud')
% xlabel('Muestra')
% figure(3);clf
% stem(n,h,'fill')
% xlim([0 M-1])
% title('Filtro FIR diseñado')
% ylabel('Amplitud')
%-----

%Filtro pasa-banda en frecuencia
[H,wf]=freqz(h,[1],1000,'whole');
H=(H(1:1:501))';
wf=(wf(1:1:501))';
mag=abs(H);
db=20*log10((mag+eps)/max(mag));
pha=angle(H);
grd=grpdelay(h,1,wf);
figure(1);clf
plot(wf/pi,db);grid
title('FIR filter designed')
ylabel('Magnitude [dB]')
xlabel('Frequency [\pi]')
% figure(9)
% plot(wf/pi,pha);
%-----

%% Distribuciones
%Distribución de Picos Máximos
nu = 2;
MatDatCarpCT = MatDatCarpC';
DistMax = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/nu));
c = 1;
for a=1:length(MatDatCarpC)/nu
    b = c+1;
    DistMax(1,a)=max(max(MatDatCarpCT(:,c:b)));
end

```

```

        c = b+1;
end

%Distribución del Promedio de Picos
DistPro = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/nu));
c = 1;
for a=1:ceil(length(MatDatCarpC)/nu)
    b = c+1;
    DistPro(1,a)=mean(mean(MatDatCarpCT(:,c:b)));
    c = b+1;
end

%Distribución de Cantidad de Picos
DistNum = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/nu));
ang = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/nu));
cont = 0;
e = 0;
for i=1:NumMuestrasC
    for j=1:NumCiclos
        if MatDatCarpC(i,j)~= 0
            cont = cont+1;
        end
    end
    if mod(i,2)==0
        e = e+1;
        DistNum(1,e)=cont;
        ang(1,e) = tiem(1,i)*360/(1/60);
        cont = 0;
    end
end

end

%Graficar Distribuciones
disp(' ');
disp('Distribuciones creadas correctamente');
disp(' ');
decDist = input('Desea graficar las distribuciones (SI(1) - NO(0)): ');
if decDist > 0
    figure(CanCicloGraf+f+p+1)
    bar(ang,DistMax, 'b');
    axis([0 360 0 max(DistMax)*1.02]);
end

```

```

title('Distribución de Picos Máximos');
ylabel('Carga Eléctrica [pC]');
xlabel('Grados [°]');
hold on;
grid on;

figure(CanCicloGraf+f+p+2)
bar(ang,DistPro, 'b');
axis([0 360 0 max(DistPro)*1.02]);
title('Distribución de Picos Promedio');
ylabel('Carga Electrica [pC]');
xlabel('Grados [°]');
hold on;
grid on;

figure(CanCicloGraf+f+p+3)
bar(ang,DistNum, 'b');
axis([0 360 0 max(DistNum)*1.02]);
title('Distribución de Número de Picos');
ylabel('Carga Electrica [pC]');
xlabel('Grados [°]');
hold on;
grid on;
else
    disp('Gracias');
end

%% CREAR DISTRIBUCIONES SEPARADAS

DistMaxP = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/4));
DistMaxN = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/4));
DistProP = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/4));
DistProN = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/4));
DistNumP = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/4));
DistNumN = zeros(1,ceil(length(MatDatCarpC)/4));
for a =1:length(MatDatCarpC)/2
    if a < ceil(length(MatDatCarpC)/4)
        DistMaxP(1,a) = DistMax(1,a);
        DistProP(1,a) = DistPro(1,a);
        DistNumP(1,a) = DistNum(1,a);
    end
end

```

```

else
    DistMaxN(1,a-fix(length(MatDatCarpC)/4)) = DistMax(1,a);
    DistProN(1,a-fix(length(MatDatCarpC)/4)) = DistPro(1,a);
    DistNumN(1,a-fix(length(MatDatCarpC)/4)) = DistNum(1,a);
end
end
end

%% OBTENER OPERADORES ESTÁTICOS

% Skewness
SkewMaxP = skewness(DistMaxP);
SkewMaxN = skewness(DistMaxN);
SkewProP = skewness(DistProP);
SkewProN = skewness(DistProN);
SkewNumP = skewness(DistNumP);
SkewNumN = skewness(DistNumN);

% Kurtosis
KurMaxP = kurtosis(DistMaxP);
KurMaxN = kurtosis(DistMaxN);
KurProP = kurtosis(DistProP);
KurProN = kurtosis(DistProN);
KurNumP = kurtosis(DistNumP);
KurNumN = kurtosis(DistNumN);

%Número de Picos
NumPicDisMaxP = 0;
NumPicDisMaxN = 0;
NumPicDisProP = 0;
NumPicDisProN = 0;
NumPicDisNumP = 0;
NumPicDisNumN = 0;
maxDisMaxP = max(DistMaxP);
maxDisMaxN = max(DistMaxN);
maxDisProP = max(DistProP);
maxDisProN = max(DistProN);
maxDisNumP = max(DistNumP);
maxDisNumN = max(DistNumN);

for g=1:length(DistMaxP)

```

```

    if DistMaxP(1,g) >= maxDisMaxP*0.97
        NumPicDisMaxP = NumPicDisMaxP+1;
    end
    if DistProP(1,g) >= maxDisProP*0.97
        NumPicDisProP = NumPicDisProP+1;
    end
    if DistNumP(1,g) >= maxDisNumP*0.97
        NumPicDisNumP = NumPicDisNumP+1;
    end
end

for g=1:length(DistMaxN)
    if DistMaxN(1,g) >= maxDisMaxN*0.97
        NumPicDisMaxN = NumPicDisMaxN+1;
    end
    if DistProN(1,g) >= maxDisProN*0.97
        NumPicDisProN = NumPicDisProN+1;
    end
    if DistNumN(1,g) >= maxDisNumN*0.97
        NumPicDisNumN = NumPicDisNumN+1;
    end
end

%Cross-correlation Factor
CCDistMax = corrcoef(DistMaxP',DistMaxN');
CCDistPro = corrcoef(DistProP',DistProN');
CCDistNum = corrcoef(DistNumP',DistNumN');

CCDistMax=CCDistMax(2);
CCDistPro=CCDistPro(2);
CCDistNum=CCDistNum(2);

% Asimetria
QmasMax = 0;
QmenMax = 0;
QmasPro = 0;
QmenPro = 0;
QmasNum = 0;
QmenNum = 0;
NmasMax = 0;

```

```

NmenMax = 0;
NmasPro = 0;
NmenPro = 0;
NmasNum = 0;
NmenNum = 0;
for e = 1:length(DistMaxP)
    QmasMax=DistMaxP(1,e)+QmasMax;
    QmasPro=DistProP(1,e)+QmasPro;
    QmasNum=DistNumP(1,e)+QmasNum;
    QmenMax=DistMaxN(1,e)+QmenMax;
    QmenPro=DistProN(1,e)+QmenPro;
    QmenNum=DistNumN(1,e)+QmenNum;
    if DistMaxP(1,e)>0
        NmasMax = NmasMax+1;
    end
    if DistMaxN(1,e)>0
        NmenMax = NmenMax+1;
    end
    if DistProP(1,e)>0
        NmasPro = NmasPro+1;
    end
    if DistProN(1,e)>0
        NmenPro = NmenPro+1;
    end
    if DistNumP(1,e)>0
        NmasNum = NmasNum+1;
    end
    if DistNumN(1,e)>0
        NmenNum = NmenNum+1;
    end
end
if QmasMax>QmenMax
    AsyDistMax = (-QmenMax/NmenMax)/(QmasMax/NmasMax);
else
    AsyDistMax = (QmenMax/NmenMax)/(QmasMax/NmasMax);
end
if QmasPro>QmenPro
    AsyDistPro = (-QmenPro/NmenPro)/(QmasPro/NmasPro);
else
    AsyDistPro = (QmenPro/NmenPro)/(QmasPro/NmasPro);
end

```

```

if QmasNum>QmenNum
    AsyDistNum = (-QmenNum/NmenNum) / (QmasNum/NmasNum);
else
    AsyDistNum = (QmenNum/NmenNum) / (QmasNum/NmasNum);
end

% Mostrar Resultados en Tabla
Resultados = table(categorical({'Skewness Semiciclo Positivo';'Skewness
Semiciclo Negativo';'Kurtosis Semiciclo Positivo';'Kurtosis Semiciclo
Negativo';'Número de Picos Semiciclo Positivo'; 'Número de Picos Semiciclo
Negativo'; 'Asimetria'; 'Factor Cross-
Correlation'})), [SkewMaxP;SkewMaxN;KurMaxP;KurMaxN;NumPicDisMaxP;NumPicDisMa
xN;AsyDistMax;CCDistMax],
[SkewProP;SkewProN;KurProP;KurProN;NumPicDisProP;NumPicDisProN;AsyDistPro;C
CDistPro],
[SkewNumP;SkewNumN;KurNumP;KurNumN;NumPicDisNumP;NumPicDisNumN;AsyDistNum;C
CDistNum;], 'VariableNames',{'Operador_Estadistico' 'Distribucion_MAX'
'Distribucion_PROMEDIO' 'Distribucion_NUMERO'});
ResultadosMatD1 = [SkewMaxP SkewMaxN KurMaxP KurMaxN NumPicDisMaxP
NumPicDisMaxN AsyDistMax CCDistMax SkewProP SkewProN KurProP KurProN
NumPicDisProP NumPicDisProN AsyDistPro CCDistPro SkewNumP SkewNumN KurNumP
KurNumN NumPicDisNumP NumPicDisNumN AsyDistNum CCDistNum]';

%% DEFECTOS DE ENTRENAMIENTO

A1 = [0 0.02 -1.22 -1.22 3 3 -0.57 0.67 -0.02 0 -1.23 -1.2 3 3 -0.64 0.68
0.02 0.08 -1.11 -1.37 3 3 0.34 0.23]'; %MULTIPLE POINT CORONA
A2 = [-0.04 0.27 -0.88 -0.72 4 2 -0.55 0.5 -0.04 0.24 -0.93 -0.8 3 3 -0.53
0.49 0.18 0.34 -0.94 -0.64 2 3 -0.02 0.38]'; %DESCARGA SUPERFICIAL EN AIRE
AD1 = [A1 A2];
BD1 = [0 1;0 1];

ResultadosMatD2 = [];
co = 1;
for ka = 9:22
    if ka ~= 18
        ResultadosMatD2(co,1) = ResultadosMatD1(ka,1);
        co = co+1;
    end
end
end

```

```

A3 = [0.2 0.25 -0.8 -0.83 4 4 0.85 0.95 0.6 0.02 0.39 4 3]'; %Flat
electrode bounded cavity
A4 = [0.075 0.2 -1 -0.9 4 2 0.62 0.925 -0.12 -0.88 -0.58 2 1]'; %Multiple
cavity
A5 = [-0.39 -0.39 -0.41 -0.3 2 1 0.44 0.38 0.4 -0.39 -0.5 3 2]'; %TREEING
INITIATED BY A CONDUCTOR
AD2 = [A3 A4 A5];
BD2 = [0 1 0; 0 1 1; 0 1 1];

%% GUARDAR DATOS Y MOSTAR RESULTADOS
decGua = input('Ingrese el nombre para el archivo de las variables: ','s');
save(decGua);

%% CLASIFICACIÓN MEDIANTE RED NEURONAL

disp('***** Clasificación de Defectos en Aisladores *****');
disp(' ');
disp('Clasificación de Descargas Corona o Superficiales');
disp('Datos de Entrada: ');
disp('Resultados: ');
cla1 = sim(Red1,ResultadosMatD1);
if cla1(1,1) > 0.9 && cla1(2,1) > 0.9
    disp('Descarga Superficial en Aire');
    disp(cla1);
end

if cla1(1,1) < 0.1 && cla1(2,1) < 0.1
    disp('Descarga Corona (Multiple Point)');
    disp(cla1);
end

%Clasificación de Descargas Internas
disp(' ');
disp('Clasificación de Descargas Internas');
disp('Datos de Entrada: ');
ResultadosMatD2
disp('Resultados: ');
cla2 = sim(Red10,ResultadosMatD2);
if cla2(1,1) < 0.1 && cla2(2,1) < 0.1 && cla2(3,1) < 0.1
    disp('Cavidad Rectangular');

```

```
disp(cla2);  
end  
  
if cla2(1,1) > 0.9 && cla2(2,1) > 0.9 && cla2(3,1) > 0.9  
    disp('DMultiples Cavidades');  
    disp(cla2);  
end  
  
if cla2(1,1) < 0.1 && cla2(2,1) > 0.9 && cla2(3,1) > 0.9  
    disp('Ramificaciones dentro del Aislador');  
    disp(cla2);  
end
```

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] C. J. A. Martínez Velasco. Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión. MacGraw-Hill y Red Eléctrica de España, Madrid, 2008.
- [2] P. Gill. Electrical Power Equipment Maintenance and Testing. Marcel Dekker, New York, 1998.
- [3] P. Morshuis. Partial Discharge Mechanisms. Delft University Press, Netherlands, 1993.
- [4] A. J. M. Pemen. Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators. Tesis Doctoral, Technische Universiteit Eindhoven, 2000.
- [5] E. Carminati, L. Cristaldi, M. Lazzaroni y A. Monti. _Partial discharge mechanism detection by neuro-fuzzy algorithms_. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE, Vol. 2, 744_748, 1998.
- [6] G. Robles, J. M. Martinez-Tarifa, M. V. Rojas-Moreno, and J. Sanz-Feito, “Inductive sensor for measuring high frequency partial discharges within electrical insulation,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 11, pp. 3907–3913, Nov 2009.
- [7] B. Fruth, “Partial discharge mechanisms in solid insulation systems,” in *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1992., Proceedings of the 4th International Conference on*, Jun 1992, pp. 297–307.
- [8] P. Sreejaya, “Study of solid dielectric degradation using partial discharge test,” in *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Oct 2008, pp. 408–412.
- [9] W. Hayt. Engineering Electromagnetics. Mc Graw Hill, New York, 2006.
- [10] F. H. Kreuger. Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment. Butterworths, Londres, 1989.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [11] ———, *Solid Dielectrics, their Sources, Properties, and Behavior in Electric Fields*. Wiley-IEEE Press, 2011, pp. 319–370. [Online]. Available:<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6047710>.
- [12] M. Fernández, M. García, G. A. J. Cano y J. Solares. *Técnicas de mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Marcombo, Barcelona, 1998.
- [13] G. Paoletti y A. Golubev. *_Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment_*. Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 37(1): 90_103, 2001.
- [14] R. Arora and W. Mosch, *Electric Fields, their Control and Estimation*. Wiley-IEEE Press, 2011, pp. 11–68. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6047697>.
- [15] H. Zhang. *Advanced techniques application of on-line partial discharge detection in power cables*. Tesis Doctoral, University of New South Wales, 2006.
- [16] E. Lemke. “Guide for Electrical Partial Discharge in compliance to IEC 60270”. *Electra*, Vol. 241: 61:67, 2008.
- [17] IEC 60270. *High Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurements*, 3a edición, 2000.
- [18] S. Goyarola, L. Martínez, J. Izaguirre, A. Rodrigo y A. Kortajarena. “Seminario sobre descargas parciales: sus conceptos y medida”. LABEIN, 1996.
- [19] S. Boggs y G. Stone. “Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge”. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, Vol. EI-17(2): 143-150, 1982.
- [20] A. Mazroua, R. Bartnikas y M. Salama. “Neural network system using the multi-layer perceptron technique for the recognition of PD pulse shapes due to cavities and electrical trees”. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Vol. 10(1): 92-96, 1995.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [21] N. Sahoo, M. Salama y R. Bartnikas. "Trends in partial discharge pattern classification: a survey". *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, Vol. 12(2): 248-264, 2005.
- [22] A.V. Oppenheim and R.W. Chafer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed., Prentice Hall, 2009.
- [23] Monson H. Hayes, *Schaum's Outline of Digital Signal Processing*, McGraw-Hill, Inc., New York, NY, 1998
- [24] J.G Proakis and D.M. Manolakis, *Digital Signal Processing*, 4th ed., Pearson, 2006.
- [25] E. Gulski, "Computer-aided measurement of partial discharges in HV equipment," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 969-983, Dec 1993.
- [26] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of discharge sources," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 27, no. 1, pp. 82-92, Feb 1992. doi: 10.1109/14.123443