



Universidad  
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Técnica Industrial: Electricidad

**DISEÑO DE SOFTWARE OFF-LINE  
PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO  
DE DESCARGAS PARCIALES**

Autor: Beatriz Lozano Avilés

Tutor: Jorge Alfredo Ardila Rey

Leganés, julio de 2013



Título: DISEÑO DE **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** OFF-LINE PARA  
EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DESCARGAS PARCIALES

Autor: Beatriz Lozano Avilés

Director: Jorge Alfredo Ardila Rey

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 8 de julio de 2013 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



# Tabla de contenido

Tabla de contenido .....	1
Lista de figuras .....	3
Lista de tablas .....	5
Abreviaturas .....	6
1 Introducción y objetivos .....	8
2 Estado del arte .....	9
2.1 Introducción a las descargas parciales.....	9
2.2 Tipos de descargas parciales .....	13
2.2.1 DP internas .....	13
2.2.2 DP Superficiales .....	15
2.2.3 DP Externas (corona) .....	16
2.3 Mecanismo de la descarga .....	17
2.3.1 Estado Streamer .....	17
2.3.2 Estado Townsend.....	17
2.3.3 Estado Pitting.....	18
2.4 Circuito equivalente para modelado de DP .....	19
2.5 Métodos de detección .....	21
2.5.1 Métodos no eléctricos .....	21
2.5.2 Métodos eléctricos .....	22
2.5.3 Métodos no convencionales .....	24
2.6 Descripción y análisis de parámetros estadísticos .....	25
2.6.1 Cálculo de parámetros estadísticos en amplitud .....	25
2.6.2 Cálculo de parámetros estadísticos en fase.....	27
3 Desarrollo del software off-line para el análisis de descargas parciales .....	31
3.1 Adquisición de datos.....	31
3.2 Software del sistema.....	33
3.2.1 Visualización .....	34
3.2.2 Procesamiento.....	38
3.3 Resultado final del software.....	40
4 Análisis y comparación de resultados .....	42

4.1	Ensayos realizados .....	42
4.2	Patrones PRPD y parámetros estadísticos .....	46
4.2.1	DP Corona.....	46
4.2.2	DP interna.....	49
4.2.3	DP Superficiales .....	52
4.2.4	Verificación de resultados (2ª muestra) .....	55
5	Conclusiones y líneas de trabajo.....	62
6	Bibliografía .....	64
Anexo	.....	67

# Lista de figuras

Figura 1: Representación DP en diagrama elíptico y forma pulsante del fenómeno.....	10
Figura 2: Defectos presentes en aislamientos sólidos.....	11
Figura 3: Curva de Paschen .....	12
Figura 4: DP interna .....	13
Figura 5: Patrón PRPD típico de una DP interna.....	13
Figura 6: DP producidas en una cavidad de un dieléctrico .....	14
Figura 7: Descarga parcial superficial .....	15
Figura 8: Patrón PRPD típico de una DP superficial.....	15
Figura 9: Descarga parcial corona.....	16
Figura 10: Patrón PRPD típico de una DP corona .....	16
Figura 11: Estado Streamer .....	17
Figura 12: Estado Townsend .....	18
Figura 13: Estado Pitting .....	18
Figura 14: Circuito equivalente para el aislante afectado por DP.....	19
Figura 15: Descargas parciales en una vacuola sometida a tensión alterna .....	20
Figura 16: Arborescencias creadas en una vacuola de aislamiento sólido .....	20
Figura 17: Métodos de Detección DP .....	21
Figura 18: Circuito indirecto de detección .....	23
Figura 19: Circuito directo de detección .....	23
Figura 20: Sesgo de la distribución .....	28
Figura 21: Curtosis de la distribución.....	28
Figura 22: Factor de correlación cruzado.....	29
Figura 23: Asimetría de la distribución .....	29
Figura 24: Huella dactilar .....	30
Figura 25: Circuito indirecto de detección de DP .....	31
Figura 26: Diagrama esquemático .....	33
Figura 27: Panel principal del software.....	34
Figura 28: Ejemplo de histograma .....	35
Figura 29. Configuración de histogramas.....	36
Figura 30: Ejemplo de un patrón PRPD .....	36
Figura 31: Mapa PRH-PRL .....	37
Figura 32: Abrir archivo y su configuración .....	38
Figura 33: Distribución de las DP .....	39
Figura 34: Ejemplo de análisis de parámetros estadísticos .....	39
Figura 35. Software final .....	40
Figura 36: Punta-plano.....	42
Figura 37: Par trenzado .....	43

Figura 38: Papel aceite .....	44
Figura 39: Ejemplo de colocación del papel perforado .....	44
Figura 40: Montaje del laboratorio.....	45
Figura 41: Patrón PRPD e histogramas de Labview y Excel (DP corona) .....	46
Figura 42: Patrón PRPD e histogramas de Labview y Excel (DP interna).....	49
Figura 43: Patrón PRPD e histograma de Labview y Excel (DP superficial) .....	52
Figura 44: Histogramas de verificación de DP corona .....	55
Figura 45: Histogramas de verificación de DP interna.....	56
Figura 46: Histogramas de verificación de DP superficial .....	57
Figura 47: Resumen de los 6 ensayos .....	60
Figura 48: Software off-line.....	68



# Lista de tablas

Tabla 1: Propiedades de las distribuciones por separado (DP corona) .....	47
Tabla 2: Parámetros de comparación de distribuciones (DP corona) .....	48
Tabla 3: Propiedades de las distribuciones por separado (DP interna).....	50
Tabla 4. Parámetros de comparación de distribuciones (DP interna).....	51
Tabla 5: Propiedades de las distribuciones por separado (DP superficial).....	53
Tabla 6: Parámetros de comparación de distribuciones (DP superficial) .....	54
Tabla 7: Resumen de skewness .....	58
Tabla 8: Resumen de curtosis .....	59
Tabla 9: Resumen de parámetros de comparación entre distribuciones.....	59
Tabla 10: Número de descargas .....	61

# Abreviaturas

DP	descarga parcial
q	carga
U	tensión
t	tiempo
mV	milivoltios
pC	picoculombios
mA	miliamperios
dBm	decibelios
Vb	tensión de ruptura [V]
Vbmin	tensión de ruptura mínima
$U_1$	tensión en la cavidad cilíndrica
$d_i$	espesores del hueco y total del aislante
$\epsilon_r$	permitividad dieléctrica relativa
Ca	capacidad del aislamiento sin descargas
Cb	capacidad del aislamiento sano
Cc	capacidad de la vacuola
ns	nanosegundo
$\mu A$	microamperio
Ue	tensión de extinción
Ui	tensión de ignición
Va	tensión aplicada
Vc	tensión en la cavidad
V+	tensión de ruptura positiva
V-	tensión de ruptura negativa
Z	impedancia filtro
Ca	objeto de prueba
Ck	condensador de acoplamiento
Zmi	impedancia de medida
CC	cables de conexión
MI	instrumento de medida
CD	dispositivo de acoplamiento
P(q)	probabilidad de tener una descarga
$\alpha$	magnitud de descarga que ha alcanzado el 63,2%
$\beta$	parámetro de forma de la distribución
$H_{q \max}(\varphi)$	valor máximo del pulso en pC
$H_{qn}(\varphi)$	valor medio de la magnitud de los pulsos en pC
$H_n(\varphi)$	número de descargas en cada ángulo de fase
Sk	skewness
Cu	curtosis
Cc	correlación cruzada
$x_i$	valor del dato
$P_i$	probabilidad de que aparezca dicho dato $x_i$ en un ángulo determinado
$\mu$	media ( $\mu = \sum x_i \cdot P_i$ )

$\sigma$	varianza ( $\sigma^2 = \sum(x_i - \mu)^2 \cdot P_i$ )
$x_i$	valor de la descarga en el semi-ciclo positivo
$y_i$	valor de la descarga en el semi-ciclo negativo
$Q_s$	valor medio de magnitudes de cada semi-ciclo
$n$	número de descargas producido en dicho periodo
HF	High Frecuency(alta frecuencia)
VHF	Very High Frecuency(muy alta frecuencia)
UHF	Ultra High Frecuency(ultra alta frecuencia)
$Q_{\max 95\%}$	magnitud de DP
N+	número de descargas positivas
N-	número de descargas negativas
Trigger	nivel mínimo de amplitud de las descargas que se adquieren
mm	milímetros
kV	kilovoltios
$\varphi$	grados
IEC 60270	High Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurements
$\Omega$	ohmios

# 1 Introducción y objetivos

Durante el último siglo ha crecido el interés en la medición de las descargas parciales por ser grandes indicadores del estado de degradación de los aislantes eléctricos.

La utilización de equipos eléctricos ha demostrado que las descargas parciales acortan el tiempo de vida de los sistemas de aislamiento y causan una serie de interferencias en las medidas, control y comunicaciones eléctricas.

El fenómeno de la descarga parcial (DP en español, PD "*Partial Discharge*" en inglés) se produce en el interior de las cavidades de los aislamientos. Estas descargas propician un deterioro del aislante y la perforación del dieléctrico con el tiempo. Por lo tanto, las descargas parciales pueden llegar a ser la causa de grandes pérdidas económicas al producir reparaciones y cambios prematuros en los equipos eléctricos, pérdidas de eficiencia y seguridad en la operación de los sistemas de comunicación e incluso la interrupción del servicio de suministro de energía. Dado que no son predecibles en el tiempo, su detección y cuantificación es una parte decisiva en el nivel de vida de un equipo eléctrico.

Las pérdidas económicas de esta naturaleza pueden ser prevenidas mediante pruebas en los sistemas eléctricos y sus equipos en el momento apropiado, para así asegurarse de que las descargas parciales no producirán efectos adversos al operar los equipos y sistemas bajo las condiciones de servicio para las cuales fueron especificadas.

El propósito de este trabajo es, en primer lugar, programar en Labview (herramienta de desarrollo para diseñar sistemas con lenguaje de programación visual gráfico) un software para el análisis estadístico de descargas parciales off-line que permite visualizar y calcular los parámetros estadísticos para el estudio de dichas descargas. En segundo lugar, realizar un análisis estadístico de los resultados variando diversos parámetros, como la tensión y los objetos de ensayo.

Para alcanzar estos objetivos se realiza una investigación sobre la base técnica de las descargas parciales en el capítulo 2. Partiendo de los conocimientos aquí adquiridos se programó un sistema off-line que está descrito en el capítulo 3. En el capítulo 4 se analizan los diferentes experimentos. Finalmente las conclusiones y las líneas de trabajo se resumen en el capítulo 5.

## 2 Estado del arte

### 2.1 Introducción a las descargas parciales

Las descargas parciales son descargas eléctricas que se producen por una ruptura parcial hallada en el medio aislante. Se localiza en una pequeña región de un sistema sólido o líquido de aislamiento eléctrico sometido a condiciones de estrés de alta tensión entre dos conductores que se encuentran a diferente potencial. Son rupturas locales que generan pulsos rápidos de corriente que propician un deterioro del aislante y la perforación del dieléctrico con el tiempo.

Estas descargas pueden ser consecuencia del aumento del campo eléctrico en un determinado espacio en una región finita. Este suele ser causado por un cambio brusco en el aislante, provocado por vacuolas en el caso de un aislante sólido o por espacios de gas entre las superficies del aislante en el caso de aislante líquido o espacios de gas con otro aislante. Debido a la diferencia de permitividades aumenta el campo eléctrico.

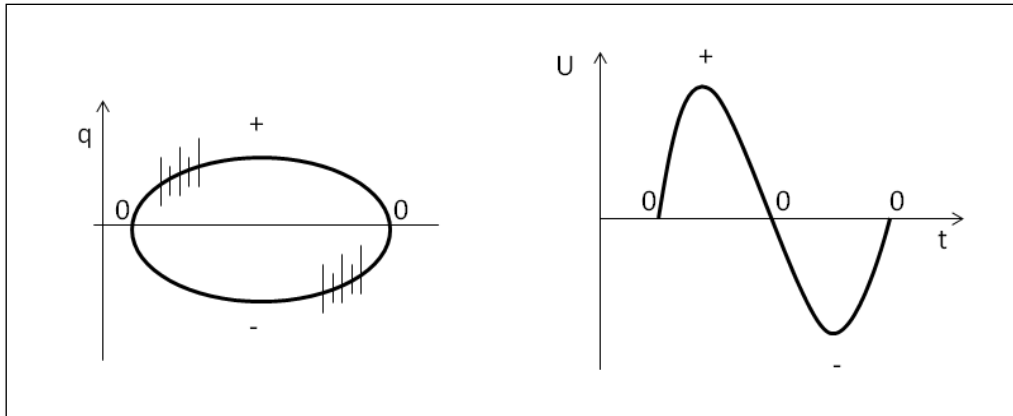
Las descargas parciales tratadas en este proyecto son únicamente las que se auto-extinguen, sin llegar a producir una ruptura del aislante en un corto periodo de tiempo. Las propiedades de la auto-extinción hacen que las DP sean pulsantes, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y se manifiestan como pulsos de corriente en un circuito externo.

La magnitud de las descargas parciales depende:

- de las dimensiones de la vacuola
- del material que la integra
- del tipo de impureza
- de la temperatura
- de la presión de la cavidad
- de las características y condiciones del aislante
- de la tensión aplicada

Estas variables hacen que el fenómeno de las descargas parciales sea de carácter estocástico.

En la Figura 1 se observa la típica representación de DP en el diagrama elíptico y la correspondiente forma pulsante del fenómeno. Esta representación elíptica es la superposición del fenómeno pulsante de la descarga parcial sobre la onda sinusoidal de la tensión aplicada.



**Figura 1: Representación DP en diagrama elíptico y forma pulsante del fenómeno**

Las descargas parciales suelen localizarse en regiones aislantes donde existen cavidades de moléculas de gas. Estas regiones podrían corresponder a obstrucciones en sólidos o a burbujas formadas por la vaporización en un líquido.

La magnitud máxima de las DP está relacionada directamente con el tamaño de la vacuola de mayor dimensión en el aislante bajo prueba, lo cual nos facilita en algunas ocasiones determinar la gravedad del daño.

Se debe recalcar que la presencia de una fase gaseosa es imprescindible para la formación de DP [Van Brunt, 1991]. Aunque existen descargas parciales en líquidos, la formación del canal ionizado asociado requiere que el líquido se halla vaporizado antes, y que se formen cavidades gaseosas.

Para la medida de la amplitud de los pulsos DP se usan las siguientes unidades de medida:

- Mili-Voltios ( $mV$ ). Aplicable a objetos inductivos.
- Pico-Culombios ( $pC$ ). Aplicable para objetos capacitivos. Representa la carga aparente de DPs. Usual en laboratorios de ensayo/fábricas.
- Mili-Amperios ( $mA$ ). En el caso de transformadores de corriente.
- Decibelios ( $dBm$ ). Para analizadores de espectros.

## Aislantes sólidos

Ocasionalmente los aislamientos sólidos tienen huecos o cavidades dentro de ellos, como por ejemplo burbujas en aceite, fracturas internas en aislamiento, desalineación entre dos superficies, impregnación defectuosa de aislamiento sólido, generación de gas en aceite o interfaces de aislamiento (Figura 2). Otro caso es en la frontera entre el dieléctrico y los electrodos. Al aplicar tensión existe una diferencia de potencial en las cavidades internas del material. Aunque algunas fuentes de DP no son cavidades (irregularidades superficiales, puntas, etc.) la formación es la misma.

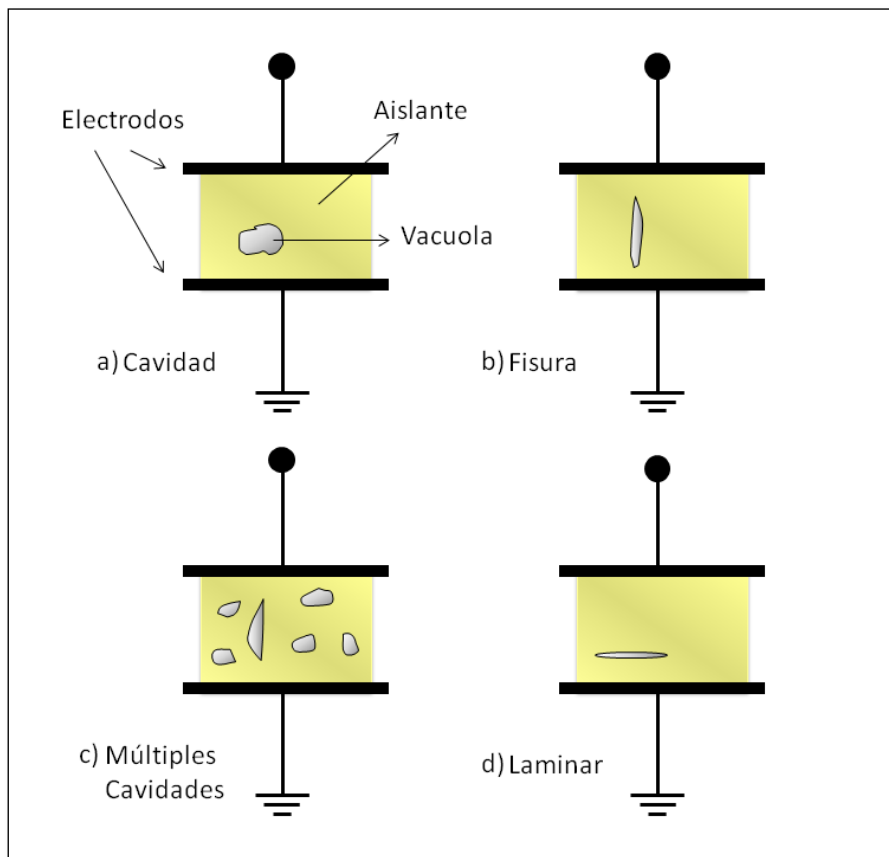


Figura 2: Defectos presentes en aislamientos sólidos

Los casos típicos de las descargas parciales son defectos comunes presentes en el interior de los materiales dieléctricos:

- burbujas, huecos o grietas en el interior del aislamiento,
- impurezas y elementos extraños,
- errores en el diseño del sistema de aislamiento,
- degradación de la homogeneidad en el aislamiento.

## Aislantes gaseosos

La actividad de la descarga parcial depende directamente de la presión a la que está sometido el gas. Esta dependencia se muestra en la curva de Paschen, Figura 3.

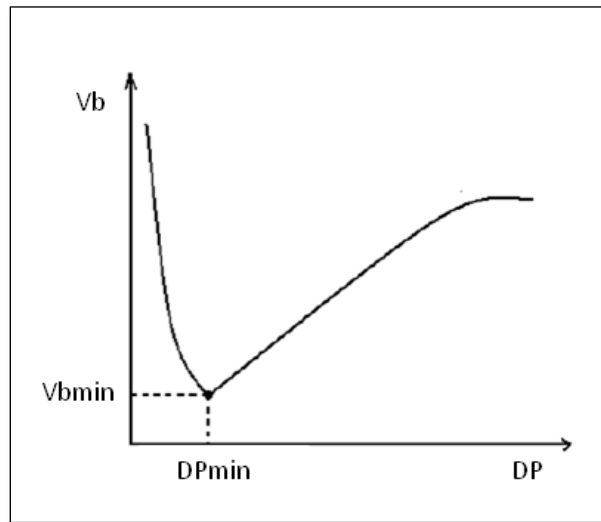


Figura 3: Curva de Paschen

Donde,

$V_b$  es la tensión de ruptura en voltios [V],

$V_{bmin}$  es la tensión de ruptura mínima,

$DP$  es el número de descargas parciales.

Se observa como varía la tensión de ruptura del gas en función de la presión y el espacio de los electrodos. Esta variación se debe a que a presiones muy bajas no hay medio que ionizar, por tanto la descarga no llega a producirse o se produce a tensiones muy altas. Según se aumenta la presión se incrementa el número de partículas existentes, por tanto la tensión de ruptura aumenta al aumentar la velocidad y energía de las partículas en movimiento necesarias para que se produzca la descarga.



## 2.2 Tipos de descargas parciales

### 2.2.1 DP internas

Son las descargas que se pueden producir debido a diferentes causas:

- en huecos de aire rodeados de dieléctrico sólido,
- entre el dieléctrico sólido y el electrodo metálico,
- incrustaciones de partículas extrañas,
- protuberancias metálicas,
- grietas internas en el material aislante.

Pueden ser las consecuencias de un fuerte estrés eléctrico en una pequeña cavidad debido a la diferencia de permitividad. Dan lugar a arborescencias eléctricas previas a la ruptura final del aislante.

Las DP internas (Figura 4) se caracterizan por la gran variabilidad estadística de sus magnitudes detectadas. Las descargas más probables son las de menor magnitud. En la Figura 5 se muestra un patrón PRPD típico de DP interna.

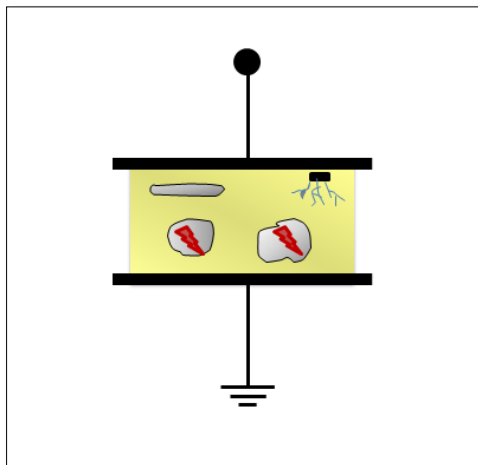


Figura 4: DP interna

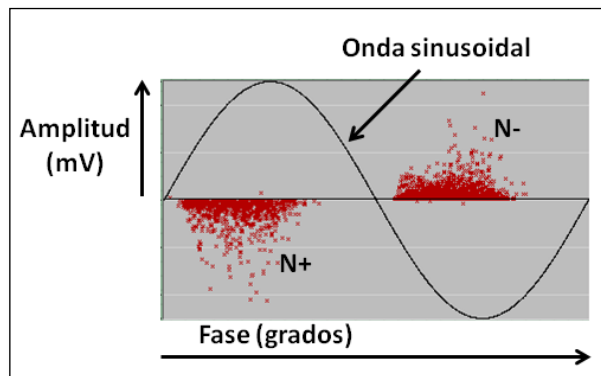


Figura 5: Patrón PRPD típico de una DP interna

Por esta razón, pueden llegar a aparecer DP en tensiones nominales como podemos observar en la ecuación (1):

$$\frac{U_1}{d_1} = \frac{\varepsilon_r \cdot U}{d_2} \quad (1)$$

donde,

U es la tensión aplicada,

$U_1$  es la tensión en la cavidad cilíndrica,

$d_1$  es el espesor del hueco,

$d_2$  es el espesor total del material aislante

$\varepsilon_r$  es la permitividad dieléctrica relativa del aislamiento (>1).

El número de descargas por ciclo se ve afectado por la aparición de carga espacial en la masa del material. Si U es máxima, el efecto sobre el cambio de N+ y N- es pequeño o poco significativo. Pero para la fase en que  $d_u/d_t$  es máxima, el efecto sobre el cambio de N+ y N- es muy significativo.

Tras una descarga las cargas que aparecen se distribuyen dentro de la cavidad en función de su polaridad (véase Figura 6) generando cúmulos de carga espacial en sus paredes. Ésta carga espacial provoca un campo eléctrico inducido en el interior del aislante ( $E_q$ ) que se superpone al campo eléctrico generado por la tensión aplicada ( $E_i$ ). En aislantes sometidos a tensiones alternas, el campo eléctrico aplicado cambia su sentido en cada ciclo. Ésta puede provocar que el campo total ( $E_t = E_i + E_q$ ) en el instante del cambio de polaridad sea intensificado, ya que el campo inducido por la carga acumulada mantiene la polaridad hasta que ésta se vuelve a redistribuir tras otra DP.

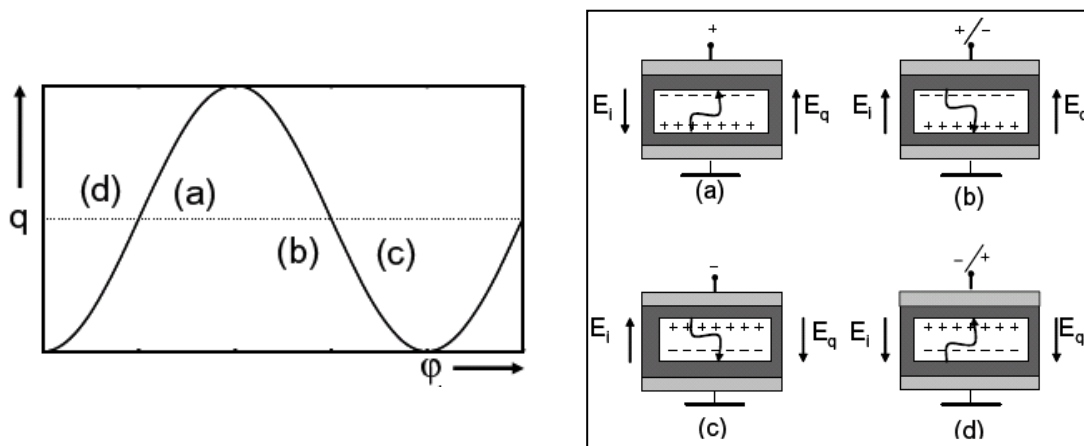


Figura 6: DP producidas en una cavidad de un dieléctrico

Estos inconvenientes pueden ser consecuencia de errores en el proceso de fabricación o producidos bajo condiciones normales de funcionamiento al que es sometido el material debido a esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y ambientales entre otros. Si este tipo de descargas ocurren continuamente, pueden incluso llegar a erosionar el material hasta destruirlo completamente.

### 2.2.2 DP Superficiales

Las descargas parciales superficiales, mostradas en la Figura 7, se producen en la superficie de contacto de dos materiales aislantes diferentes.

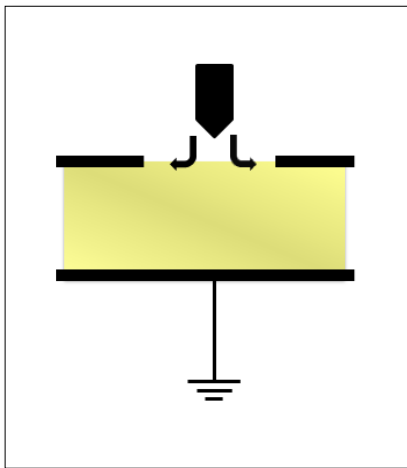


Figura 7: Descarga parcial superficial

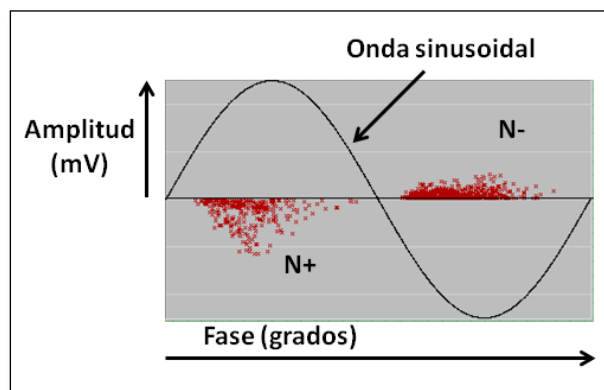


Figura 8: Patrón PRPD típico de una DP superficial

El patrón PRPD típico de la DP superficial está en la Figura 8 representado.

Las interfaces entre aislamiento sólido y líquido pueden originar una actividad de descargas parciales superficiales. La diferencia entre permitividades ocasiona el aumento del campo en cualquiera de los materiales que forman la interfaz y esto puede ocasionar una ruptura.

Este tipo de descarga puede ser el resultado de una mala distribución o de una corriente de fuga que fluye a través de una capa conductora debido a contaminación o humedad en la superficie de aislamiento.

En la práctica este tipo de descargas se presentan en terminales de cables, bornas y salientes de los devanados de un generador.

### 2.2.3 DP Externas (corona)

Las descargas parciales corona, que pueden observarse en la Figura 9, ocurren normalmente por el proceso de ionización del aire contenido entre los electrodos cuando el fenómeno comienza a ser visible. Suele ocurrir en medios gaseosos alrededor de conductores.

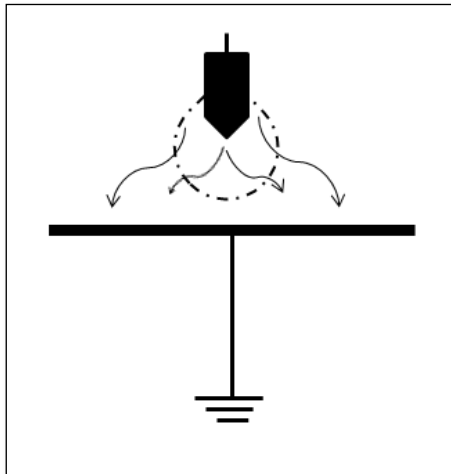


Figura 9: Descarga parcial corona

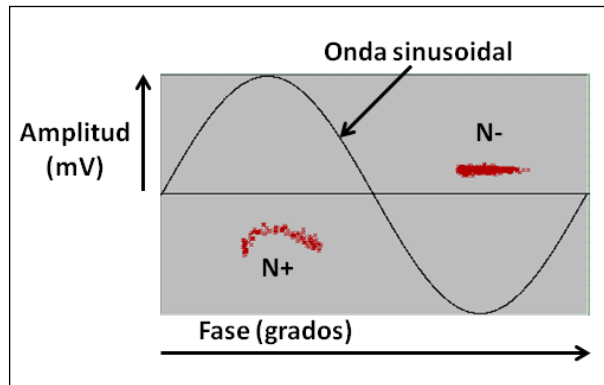


Figura 10: Patrón PRPD típico de una DP corona

Son descargas que se producen en un gas, causadas por la presencia de fuertes campos eléctricos alrededor del punto o los bordes de los electrodos de alta tensión. De acuerdo con su definición, las descargas corona ocurren en gas o dieléctricos líquidos, en los que su mecanismo es diferente de la descarga interna. En la Figura 10 se muestra el patrón PRPD típico de la DP corona.

Debido a un elevado gradiente de campo eléctrico estas descargas hacen que en el entorno de la punta se produzca una ionización del gas que lo rodea, y así una ruptura del aislante en esa zona. Siempre ocurren en el ciclo negativo de la señal de tensión y son de magnitud constante. No obstante, si las tensiones son muy altas, pueden aparecer pulsos esporádicos en el ciclo positivo. Estas descargas suelen ir acompañadas de luz visible y ruido.

## 2.3 Mecanismo de la descarga

Las descargas parciales evolucionan pasando por tres estados sucesivos: Streamer, Townsend y Pitting. Éstos presentan rasgos particulares en la amplitud, en el tiempo de subida y en la duración del pulso de la DP.

### 2.3.1 Estado Streamer

El estado Streamer (Figura 11) de una DP se caracteriza por tener una mayor amplitud comparada con las DP de los otros estados, con una intensidad típica entre 10 y 100 mA. Su tiempo de subida está alrededor de los picosegundos o nanosegundos y su duración completa puede ser de unos pocos nanosegundos.

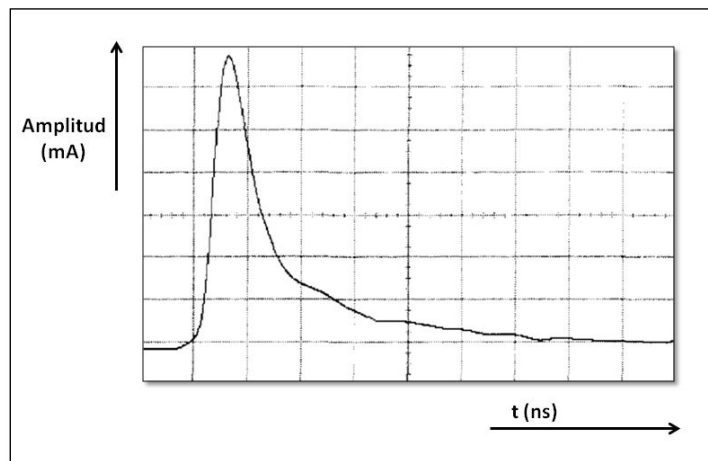


Figura 11: Estado Streamer

### 2.3.2 Estado Townsend

Después de un tiempo de actividad de DP, que puede variar entre 10 y 60 minutos, la formación de descargas cambia a un proceso más lento, surgiendo DP tipo-Townsend. Un ejemplo de un pulso característico de este estado se muestra en la Figura 12. Se puede observar que la amplitud del pulso de la DP disminuye. El tiempo de subida y la duración está alrededor de varias decenas o centenas de nanosegundos. En este estado se comienzan a apreciar ciertos indicios de deterioro del material y de oxidación.

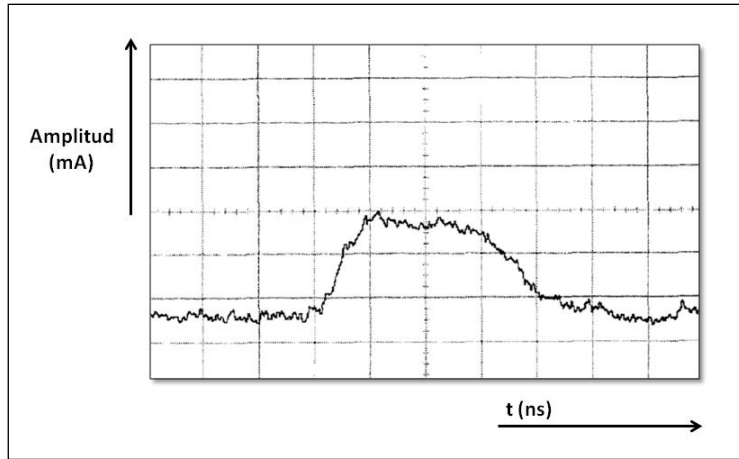


Figura 12: Estado Townsend

### 2.3.3 Estado Pitting

La magnitud de la DP decrece después de varias horas de actividad (en el orden de los  $200 \mu\text{A}$ ). Sin embargo, la repetición aumenta a varias descargas (decenas) por microsegundo. El tiempo de subida de estas descargas es comparable con el del estado Streamer. Sin embargo, su tiempo de caída es apreciablemente mayor, típicamente entre 10 y 15 ns. En la Figura 13, se encuentra un pulso del estado Pitting.

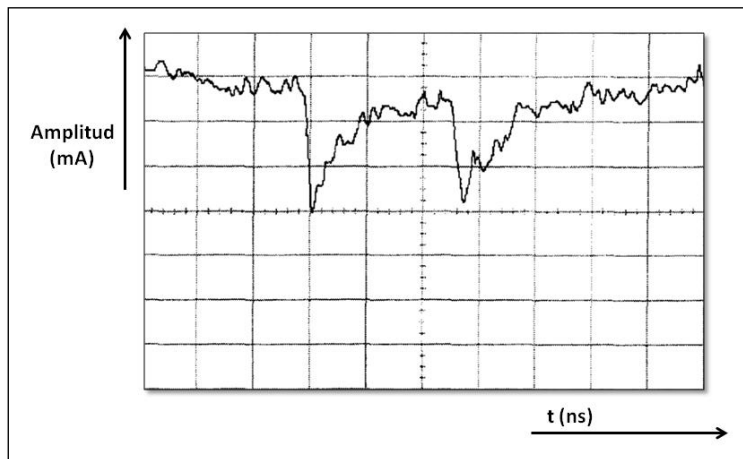


Figura 13: Estado Pitting

Debido al hecho de que este tipo de descargas producen una fuerte corrosión en el dieléctrico, reciben el nombre de Pitting.

## 2.4 Circuito equivalente para modelado de DP

Para el modelado de la descarga parcial propuso Whitehead el uso de un circuito equivalente llamado modelo a-b-c o modelo de los tres condensadores (véase Figura 14).

El aislamiento sin descargas es representado por un condensador a. El aislamiento sano que rodea la cavidad b y la vacuola son representados por dos condensadores en serie b y c, que a su vez se encuentran en paralelo con el condensador a.

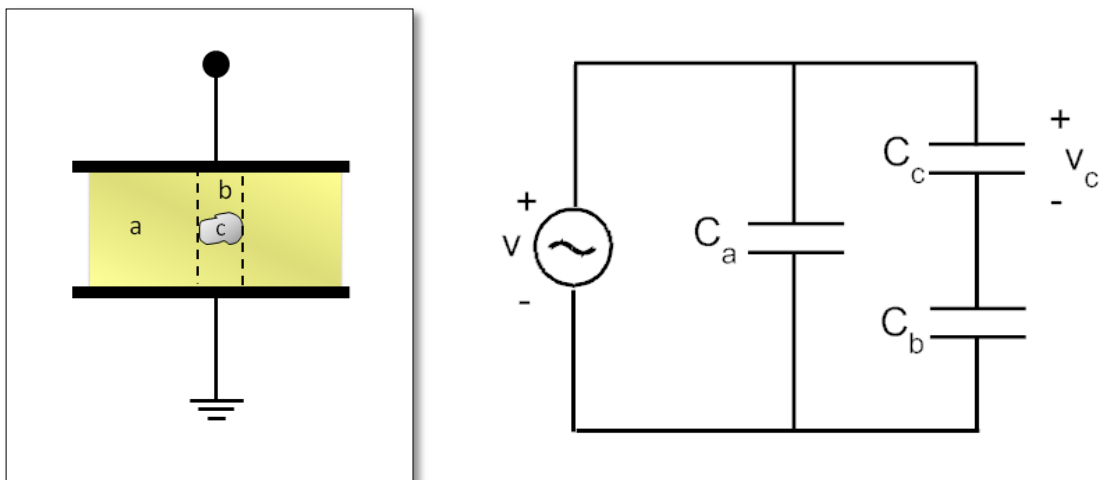


Figura 14: Circuito equivalente para el aislante afectado por DP

Este modelo facilita la comprensión de los procesos de descarga en defectos físicos reales por su sencillez. No obstante, no debe olvidarse que se desprecia el efecto de la pérdida superficial conocida como corriente parásita.

De acuerdo con el modelo de los tres condensadores, la tensión de la vacuola  $V_c$  depende de la tensión aplicada  $V$  y del reparto de las capacidades de los condensadores  $C_b$  y  $C_c$ , según la ecuación (2).

$$V_c = V \cdot \frac{C_b}{C_c + C_b} \quad (2)$$

Cuando se produce una descarga en la vacuola, la tensión cae bruscamente hasta un valor  $U_e$  que se denomina tensión de extinción de la descarga y aparece una corriente transitoria  $I$  (véase Figura 15). Tras esta descarga, el aislamiento en la vacuola se ve sometido a un progresivo crecimiento de la tensión. El aumento de la tensión provoca otra descarga cuando se alcanza el nivel de la tensión de ignición  $U_{i+}$ .

Este proceso se repite de forma continuada generando a través del aislamiento una corriente pulsante.

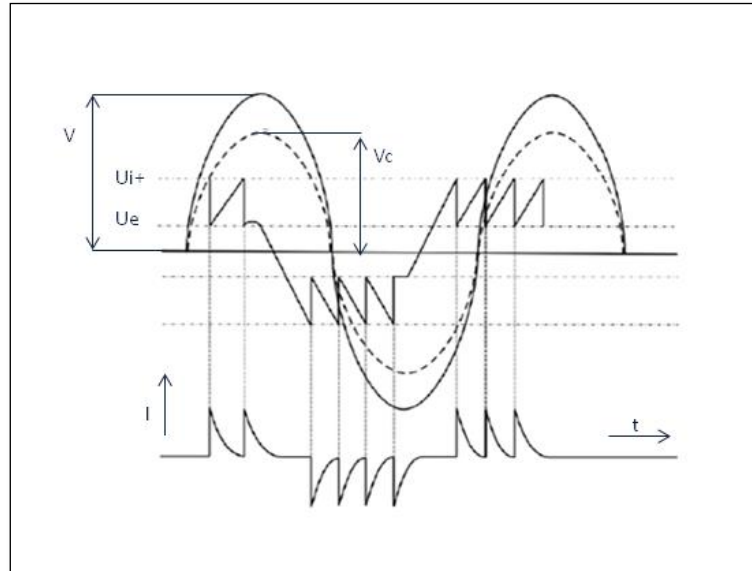


Figura 15: Descargas parciales en una vacuola sometida a tensión alterna

El proceso de descargas consecutivas acelera la degradación del aislante. En el caso de aislantes poliméricos, las descargas consecutivas pueden generar arborescencias (Treeing) que aceleran el proceso de ruptura final (véase Figura 16).

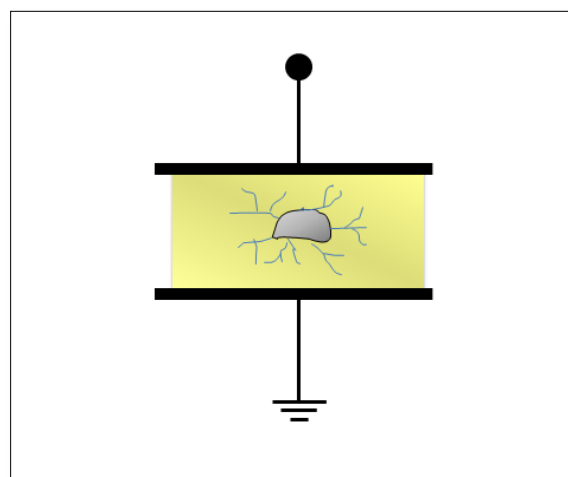


Figura 16: Arborescencias creadas en una vacuola de aislamiento sólido



## 2.5 Métodos de detección

Para detectar las descargas parciales en aislamientos existen métodos eléctricos y no eléctricos. En la Figura 17 se muestra un esquema de los distintos métodos. Éstos están basados en el intercambio de energía originada durante dicha descarga (pulsos de corriente, pérdidas dieléctricas, radiación electromagnética, sonido y reacciones físico-químicas).

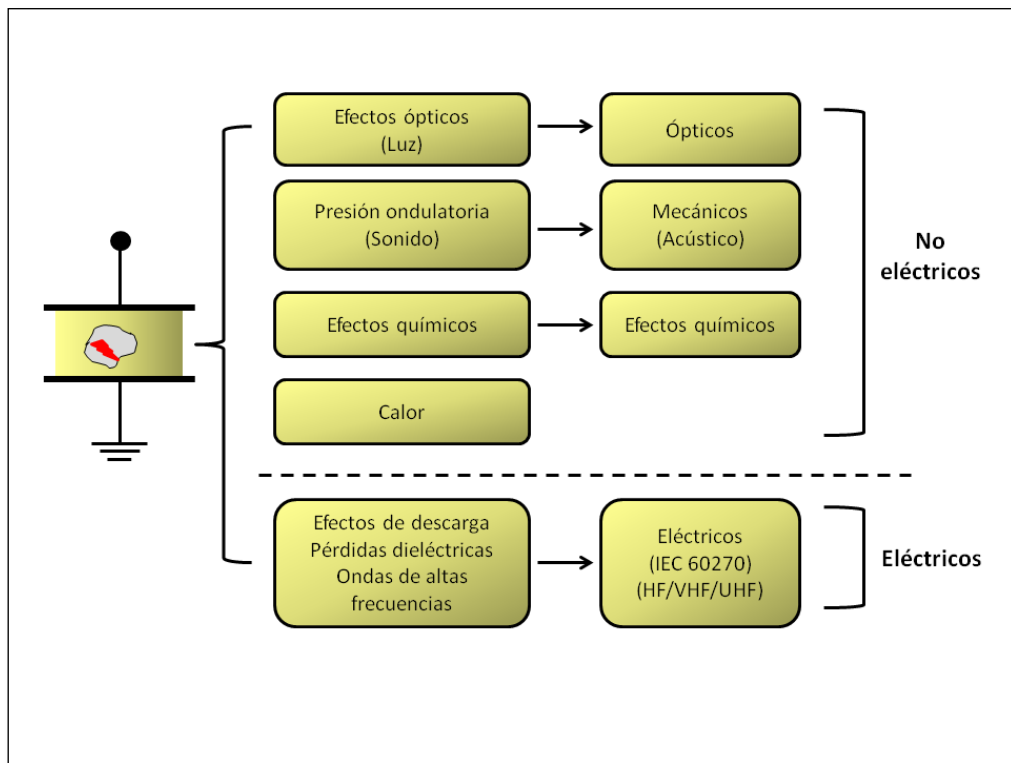


Figura 17: Métodos de Detección DP

### 2.5.1 Métodos no eléctricos

Los métodos no eléctricos son menos populares porque suelen tener menos sensibilidad que los métodos eléctricos. Suelen ser de carácter destructivo puesto que llevan a cabo muestras de cables seleccionadas aleatoriamente. Dada su complejidad no son adecuados para el ámbito industrial.

Dependiendo de la señal se diferencian los siguientes métodos:

- **Químicos:** aprovechan la información aportada por los gases que aparecen en el aceite mineral del transformador para detectar DP o sobrecalentamientos. Las descargas parciales provocan cambios en estos gases (etileno, acetileno, metano, hidrógeno, dióxido de carbono y oxígeno en forma de ozono) que se generan a mayor velocidad. La medida de estos cambios detecta la presencia de las descargas. Una desventaja de este método es la imposibilidad de entregar la ubicación de la descarga exacta, solo puede indicar una zona amplia.
- **Acústicos:** estos métodos detectan la actividad de descargas por medio de sensores que se instalan en el tanque del transformador. Estas descargas son ondas que se propagan a través del medio aislante. Miden la magnitud y entregan la ubicación física de las fuentes de las descargas parciales. Se realizan con micrófonos o transductores acústicos combinados con amplificadores y osciloscopios.
- **Ópticos:** detectan la luz que producen los procesos de descarga parcial: ionización, excitación y recombinación. Una desventaja es la variación del espectro óptico puesto que no siempre es el mismo. El espectro depende de la intensidad de la descarga y de factores como la temperatura y la presión del aislante.

### 2.5.2 Métodos eléctricos

Son los métodos más usados y son los que se basa este trabajo. Sus características se encuentran definidas en el estándar IEC 60270.

Estos métodos miden la carga aparente de un pulso de descarga parcial en pC, utilizando los circuitos y métodos de medición, la calibración y la instrumentación descrita en el IEC 60270.

Los pulsos se caracterizan por ser de corta duración (alrededor de los ns). La forma del pulso cambia desde el origen de la descarga hasta los terminales del objeto de prueba. La información de la intensidad se puede obtener mediante la integral de la corriente ya que es relativamente estable. El valor de la integral se llama carga aparente y el IEC la define de la siguiente manera:

“La carga, que inyectada en un intervalo de tiempo muy corto entre los terminales del objeto de ensayo en un circuito específico de prueba, dará la misma lectura en el instrumento de medida que el pulso de corriente de la DP por sí mismo”.

## Circuitos de detección

El IEC 60270 recomienda 2 circuitos básicos de medición, indirecto (Figura 18) y directo (Figura 19), para garantizar que las mediciones de descargas parciales sean reproducibles y comparables. La diferencia de los dos circuitos reside en la posición de la impedancia de medida. Los circuitos están compuestos de:

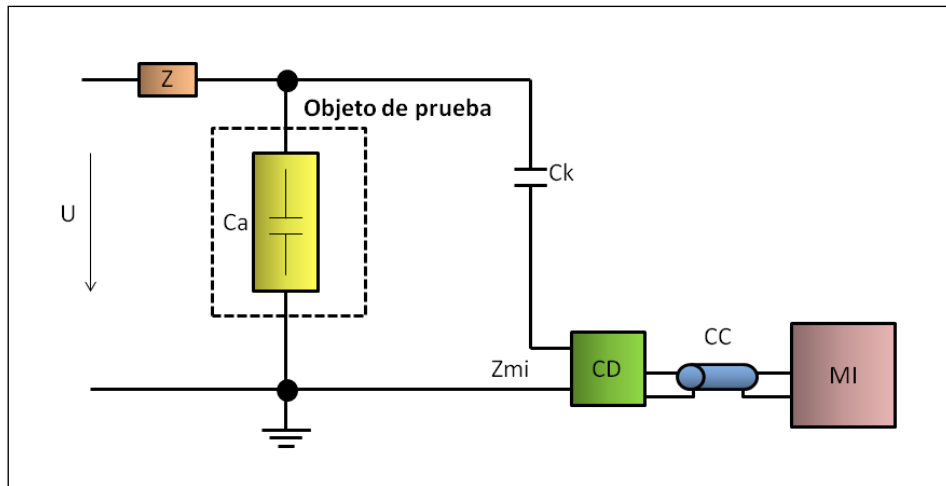


Figura 18: Circuito indirecto de detección

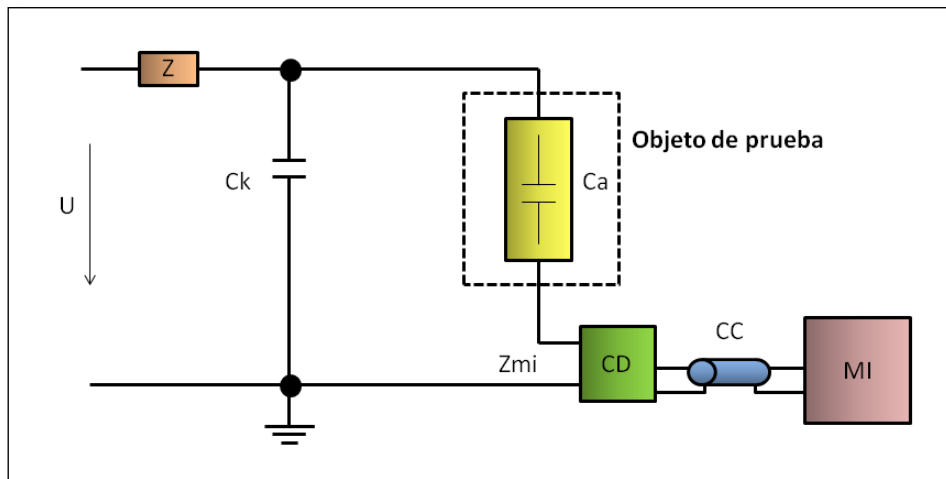


Figura 19: Circuito directo de detección

- una fuente de alta tensión  $\underline{U}$ ,
- una impedancia filtro  $\underline{Z}$ , que reduce las perturbaciones generadas en la fuente,
- el objeto de prueba, cuyo comportamiento se aproxima a una capacidad  $\underline{C}_a$ ,
- un condensador de acoplamiento  $\underline{C}_k$ , que facilita el paso de los pulsos de corriente de alta frecuencia,
- una impedancia de medida  $\underline{Z}_{mi}$  (cuadripolo), a través de la que va a fluir el pulso de la DP,

- un cable de conexión CC,
- un instrumento de medida de DP, llamado MI.

El circuito de detección más usado en la práctica es el indirecto (Figura 18) porque protege mejor la impedancia de medida en caso de la ruptura inesperada del objeto bajo prueba.

La fuente de alimentación de alta tensión se conecta al objeto de prueba. La tensión se va aumentando gradualmente hasta que se producen descargas en el objeto. La corriente originada por la descarga circula hacia la rama capacitiva que ofrece un camino de baja impedancia para señales de alta frecuencia, dado que la rama opuesta tiene una impedancia inductiva que bloquea su paso. Esta rama capacitiva, compuesta por el condensador de acoplamiento  $C_k$  y la impedancia de medida  $Z$ , facilita la circulación de la DP y actúa como un divisor de tensión protegiendo al sistema de medida.

### 2.5.3 Métodos no convencionales

El análisis de la forma del pulso de una DP en el dominio del tiempo ofrece más información sobre el fenómeno porque permite su localización, el reconocimiento de sus diferentes fuentes y la identificación del estado de la actividad de la DP (Streamer, Townsend, o Pitting) para relacionarlo con el deterioro del aislante. Para obtener este tipo de información se necesitan sistemas de detección de alta frecuencia. Esto se debe a que el ancho de banda de la señal de la DP puede variar entre 100 kHz y 1 GHz según la literatura.

Los métodos no convencionales comprenden tres rangos de medida de frecuencia: alta frecuencia (HF, High Frequency), muy alta frecuencia (VHF, Very High Frequency) y ultra alta frecuencia (UHF, Ultra High Frequency). Los dos primeros rangos se encuentran en el intervalo entre 3 MHz y 300 MHz y el último entre 300 MHz y 3 GHz.

Las ventajas de los métodos no convencionales son:

- amplia inmunidad a las señales distorsionantes en el sitio de operación de los equipos,
- alta sensibilidad en la detección debido a los bajos niveles de ruido,
- mínima desenergización debido a la lejana posición del sensor con respecto al objeto de prueba dado que el sensor no necesita conexión eléctrica al circuito,
- determinación del lugar de la falla usando los tiempos de llegada de las señales.

En las medidas no convencionales se implementan varios sensores. Entre los más comunes se encuentran los siguientes: sensores capacitivos, sensores inductivos, bobina de Rogowski, transformadores de corrientes de alta frecuencia y sensores UHF.

## 2.6 Descripción y análisis de parámetros estadísticos

Como se ha descrito anteriormente, el fenómeno de descargas parciales es un fenómeno estocástico. Para poder estudiarlo y analizarlo se deben obtener las distribuciones estadísticas de sus principales características en función del ángulo de fase del voltaje en que ocurren.

### 2.6.1 Cálculo de parámetros estadísticos en amplitud

En el caso concreto del análisis de magnitudes, la herramienta más común para caracterizarlas es la distribución probabilística de *Weibull*  $P(q)$ .

La siguiente ecuación describe las distribuciones probabilísticas de *Weibull*. Es una distribución de probabilidad acumulativa muy utilizada para modelar tiempos de vida en ensayos de envejecimiento por esfuerzos eléctricos. Permite modelar de forma segura una probabilidad de tiempo hasta el fallo o probabilidad de una cierta magnitud de descarga a partir de un conjunto de datos empíricos. Pese a estas características, la distribución sólo es plenamente válida si los pulsos de DP que pertenecen a diversos fenómenos tienen distribuciones de amplitud y/o fase que no se solapan totalmente.

$$P(q) = 1 - e^{-\left(\frac{q}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3)$$

donde,

**P(q)** es la probabilidad de tener una descarga con una amplitud igual o menor que q.

**α** es el parámetro estadístico de escala que es siempre positivo. Es la magnitud de descarga que han alcanzado el 63,2% de los pulsos (análogo al significado de media de la distribución normal). Su significado estadístico pierde valor para valores de  $\beta$  muy bajos.

**β** es el parámetro de forma de la distribución. Es una medida de la variabilidad de las magnitudes de DP. Un valor pequeño de  $\beta$  ( $\beta < 2$ ) se asocia a una alta variabilidad, lo que explica una existencia de mucha diferencia entre la mínima magnitud de DP y la máxima detectada en el ensayo.

### 2.6.1.1 Cálculo de los parámetros de Weibull

Los parámetros de *Weibull* se pueden calcular mediante el uso de la regresión lineal por método de mínimos cuadrados. Partiendo de la ecuación y aplicando logaritmo en ambos lados y se obtiene la ecuación (4):

$$\ln(1 - P(q)) = -\left(\frac{q}{\alpha}\right)^\beta \quad (4)$$

Aplicando el logaritmo decimal:

$$\log(-\ln(1 - P(q))) = \beta \log\left(\frac{q}{\alpha}\right) \quad (5)$$

Se trata de una ecuación lineal de forma  $y=\beta x-b$ , donde  $\beta$  es la pendiente de la recta de regresión. Los valores de  $y, x, b$  y  $\alpha$  que se obtienen son:

$$\log(-\ln(1 - P(q))) = \beta \log(q) - \beta \log(\alpha) \quad (6)$$

$$y = \log(-\ln(1 - P(q))) \quad (7)$$

$$x = \log(q) \quad (8)$$

$$b = \beta \log(\alpha) \quad (9)$$

$$\alpha = e^{\frac{b}{\beta}} \quad (10)$$

Otro valor estadístico a tener en cuenta es la máxima amplitud estadística, para estimar la máxima magnitud de descargas parciales. Este valor no puede ser el mayor valor detectado en una adquisición por no ser estadísticamente significativo. Por eso se emplea  $Q_{max95\%}$ , que es la magnitud de DP por debajo de la cual están el 95% de todas las detectadas.

## 2.6.2 Cálculo de parámetros estadísticos en fase

La detección indirecta de desplazamiento de carga, mostrada en la Figura 18, es el método de medición escogido más frecuente.

En este método se trabaja con tres distribuciones estadísticas:

- la distribución  $H_{q\ max}(\varphi)$  muestra el valor máximo del pulso (pC) producido en cada ángulo de fase,
- la distribución  $H_{qn}(\varphi)$  proporciona el valor medio de la magnitud de los pulsos (pC) producidos en cada ángulo de fase,
- la distribución  $H_n(\varphi)$  que muestra el número de descargas producidas en cada ángulo de fase.

La experiencia enseña que las distribuciones son diferentes en el semi-ciclo positivo y en el semi-ciclo negativo del ciclo de la tensión. Por tanto, las tres distribuciones anteriormente definidas se dividen en seis:  $H_{q\ max}^+(\varphi)$ ,  $H_{qn}^+(\varphi)$ ,  $H_n^+(\varphi)$ ,  $H_{q\ max}^-(\varphi)$ ,  $H_{qn}^-(\varphi)$  y  $H_n^-(\varphi)$ .

Los parámetros estadísticos que se utilizan para describir las distribuciones son:

- **Skewness (sesgo):** describe la asimetría de la distribución con respecto a la distribución normal (Figura 20).

$$S_k = \frac{\sum(x_i - \mu)^3 \cdot P_i}{\sigma^3} \quad (11)$$

donde,

$x_i$  es el valor del dato,

$P_i$  es la probabilidad de que aparezca dicho dato  $x_i$  en un ángulo determinado,

$\mu$  es la media

$$(\mu = \sum x_i \cdot P_i) \quad (12)$$

$\sigma$  es la varianza

$$(\sigma^2 = \sum(x_i - \mu)^2 \cdot P_i) \quad (13)$$

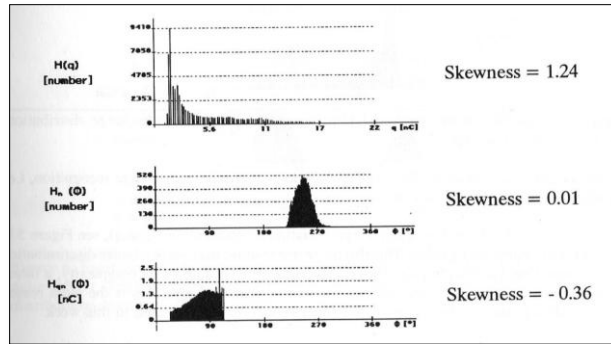


Figura 20: Sesgo de la distribución

Para una distribución normal  $Sk = 0$ , si es asimétrica hacia la izquierda  $Sk > 0$  y si es hacia la derecha  $Sk < 0$ .

- **Curtosis:** representa la nitidez de la distribución con respecto a la distribución normal (Figura 21).

$$C_u = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \cdot P_i}{\sigma^4} - 3 \quad (14)$$

Si la distribución es similar a una normal  $C_u=0$ , si es más abrupta  $C_u>0$ , y si es más llana  $C_u<0$ .

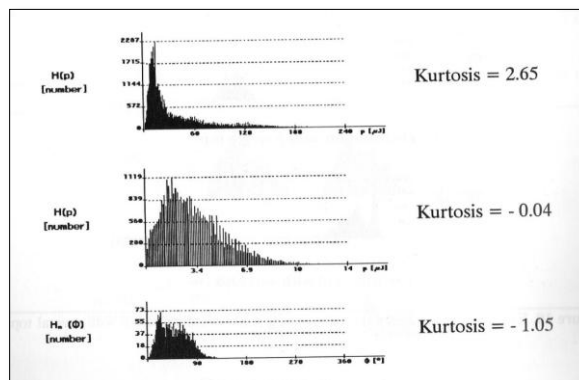


Figura 21: Curtosis de la distribución

- **Factor de correlación cruzado (cc):** muestra la diferencia de forma entre las distribuciones del semi-ciclo positivo y negativo  $H_{q\ max}^+(\varphi)$ ,  $H_{qn}^+(\varphi)$ ,  $H_n^+(\varphi)$ ,  $H_{q\ max}^-(\varphi)$ ,  $H_{qn}^-(\varphi)$ ,  $H_n^-(\varphi)$  (Figura 22).

$$cc = \frac{\sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i / n}{\sqrt{\left[ \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \cdot \left[ \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]}} \quad (15)$$



donde,

$x_i$  es el valor del semi-ciclo positivo

$y_i$  en el negativo

$n$  es el número de clases de la distribución

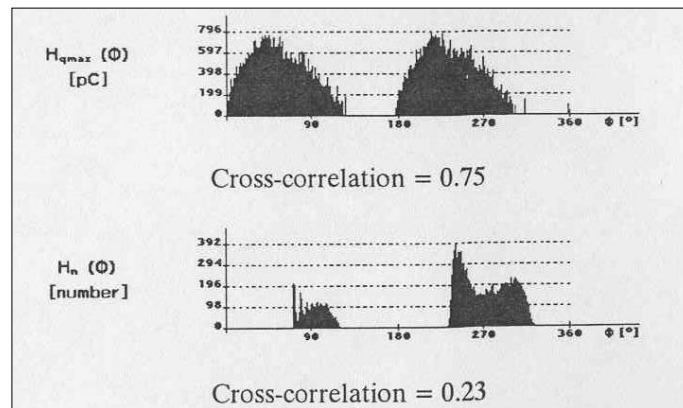


Figura 22: Factor de correlación cruzado

Un valor de correlación igual a 1 indica que los dos semi-ciclos tienen la misma distribución y un valor de cero indica que ambas son totalmente asimétricas.

- **Asimetría:** es el cociente del nivel medio del semi-ciclo negativo y positivo de las distribuciones  $H_{qmax}(\varphi)$ ,  $H_{qn}(\varphi)$ ,  $H_n(\varphi)$  (Figura 23).

$$Asimetría = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+} \quad (16)$$

donde,

$Q_s$  es el valor medio de magnitudes de cada semi-ciclo,

$N$  es el número de descargas producido en dicho periodo.

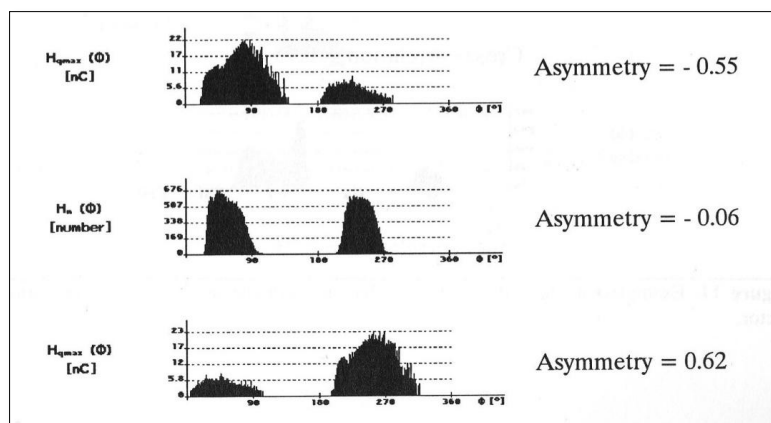


Figura 23: Asimetría de la distribución

La asimetría varía entre -1 y 1. Si vale 1 indica que solo se producen descargas en el semi-ciclo negativo y si vale -1 las descargas se producen en el semi-ciclo positivo. Si vale 0 indica que la distribución en ambos periodos tiene el mismo tamaño.

- **Factor de fase:** se utiliza para estudiar la diferencia entre el principio de cada semi-ciclo de la distribución en cuestión.

$$\text{Factor de fase} = \frac{\varphi_{inc}^-}{\varphi_{inc}^+} \quad (17)$$

Con estos cinco parámetros se puede describir perfectamente todas las distribuciones de las descargas parciales mediante un formato llamado “huella dactilar” (Figura 24) de las descargas parciales producidas [Krivda,1995].

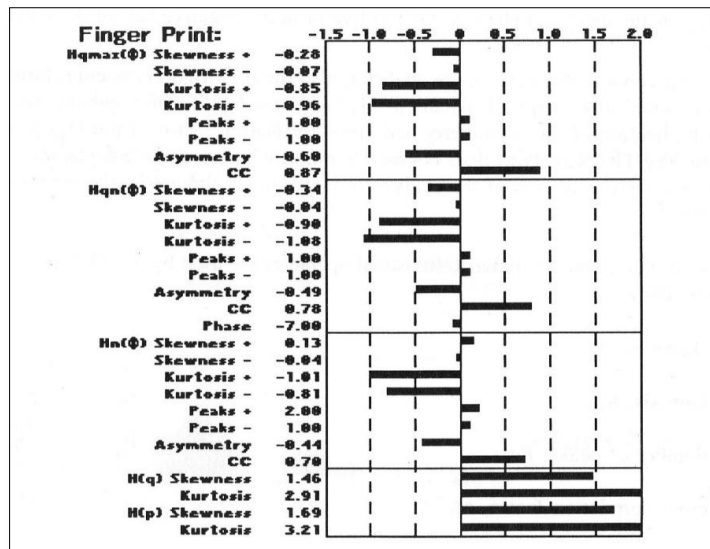


Figura 24: Huella dactilar

La huella dactilar es el elemento más utilizado en ciertos trabajos para el reconocimiento de DP, puesto que representa toda la información de una fuente particular de descargas parciales y permite la comparación con otras fuentes.

# 3 Desarrollo del software offline para el análisis de descargas parciales

## 3.1 Adquisición de datos

El circuito de detección utilizado para el sistema de adquisición de DP que se presenta en este trabajo es el que se muestra en la Figura 25. Se basa en la norma IEC 60270 y corresponde al circuito indirecto de detección explicado en el capítulo anterior.

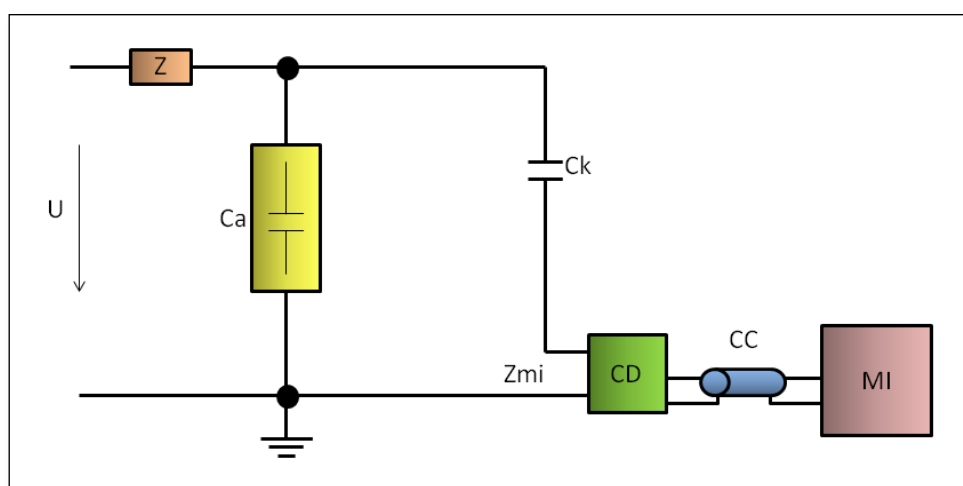


Figura 25: Circuito indirecto de detección de DP

Los elementos que componen el circuito indirecto son:

- una fuente de alta tensión  $U$ . Ésta alimenta al objeto de ensayo donde se produce la DP. También esta fuente alimenta a un divisor capacitivo que está formado por un condensador de acoplamiento y una impedancia de medida  $Z_{mi}$ ,
- una bobina,  $Z$ , que estabiliza y filtra la corriente que se inyecta en el circuito,
- $C_a$  es la capacidad del objeto de ensayo donde se estudian las descargas parciales,
- un dispositivo de acoplamiento  $CD$ ,

- un condensador de acoplamiento,  $C_k$ , que forma parte del divisor capacitivo. Permite medir la tensión aplicada al circuito,
- una impedancia de medida,  $Z_{mi}$ , que permite medir las descargas parciales y la tensión aplicada,
- $CC$  es un cable de conexión,
- $MI$  es un instrumento de medida.

Este circuito ha sido configurado con anterioridad a este proyecto [Ardila, 2012]. Aun así, ha sido necesaria su utilización para adquirir los datos de las descargas y utilizarlos en el software off-line explicado a lo largo de este capítulo. Como dato informativo, la tarjeta de adquisición de datos utilizada es un modelo NI-5105 de 8 canales. Tiene una frecuencia de muestreo simultánea de 60 MS/s por canal. Una resolución vertical de 12-bit insertada en una CPU con un procesador de doble núcleo y memoria RAM de 2 Gb. Para evitar cualquier posibilidad de fallas en el sistema de aislamiento, se configuró el canal de detección de DP para una impedancia de  $1M\Omega$ . Además, está conectado al coaxial un adaptador de  $50\ \Omega$  a través de un conector en "T".

## 3.2 Software del sistema

Como se indicó en el capítulo anterior, con el fin de caracterizar y cuantificar adecuadamente el fenómeno de DP, y así obtener resultados que sirvan como base a la hora de determinar si un equipo debe o no continuar en servicio, los sistemas de adquisición de DP deben estar en capacidad de adquirir y almacenar grandes cantidades de datos para generar de forma inmediata valores precisos de los patrones PRPD, ya sea para su visualización inmediata o su posterior análisis.

El software del sistema presentado en este trabajo debe permitir:

- abrir y visualizar los parámetros clásicos de descargas parciales (ángulo fase  $\phi$  – amplitud) de los datos almacenados previamente,
- visualizar los parámetros estadísticos en fase,
- visualizar el espectro de frecuencia de los pulsos de DP,
- visualizar los histogramas de las distribuciones,
- posibilidad de modificar los parámetros estadísticos con la variación del trigger.

La estructura del código desarrollado es la que se muestra a continuación en la Figura 26:

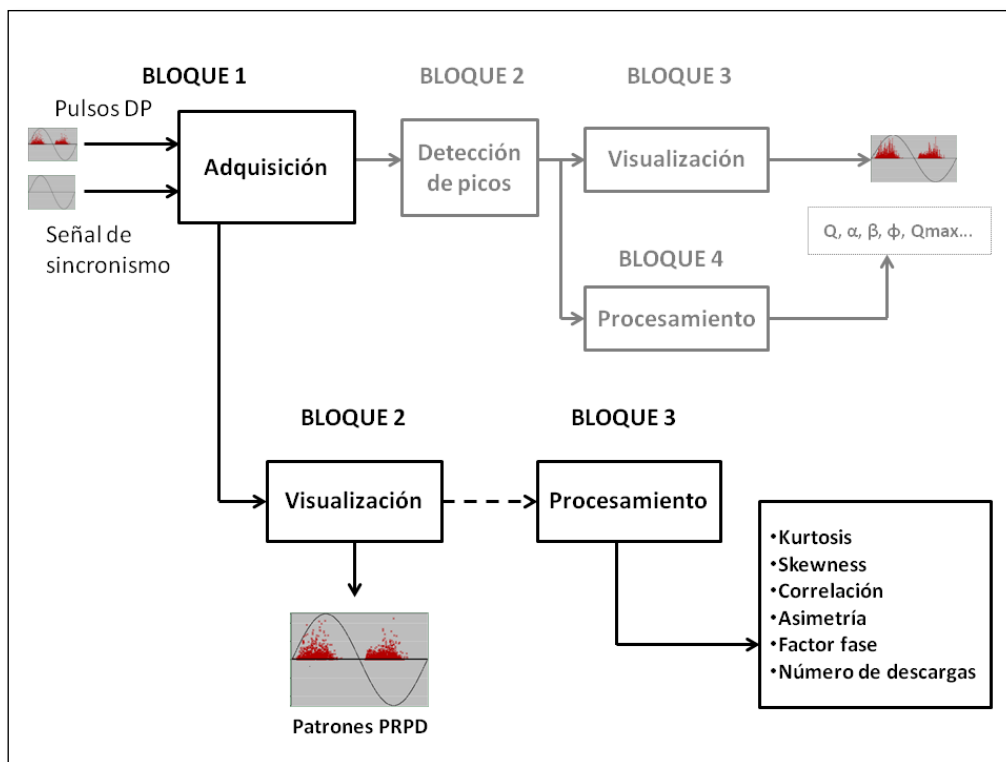


Figura 26: Diagrama esquemático

Podemos observar que dicho diagrama muestra la estructura interna del código desarrollado formado por 3 etapas. La etapa 1 y 2 se ejecutan de forma secuencial, mientras que la etapa 3 se inicia de forma opcional cada vez que el usuario desee obtener los parámetros estadísticos en fase.

Este trabajo está centrado en las dos últimas etapas del diagrama esquemático ya que es un software off-line. En este software están los resultados de los parámetros estadísticos ya explicados en el capítulo 2. Para obtener dichos resultados, se utilizan los datos ya guardados en el software online. De esta manera el usuario puede trabajar sin estar recibiendo constantemente los datos de las descargas.

La herramienta de programación utilizada para el desarrollo de esta aplicación es *Labview 9*.

### 3.2.1 Visualización

La representación de los datos adquiridos y los cálculos realizados por parte del software están mostrados en la Figura 27.

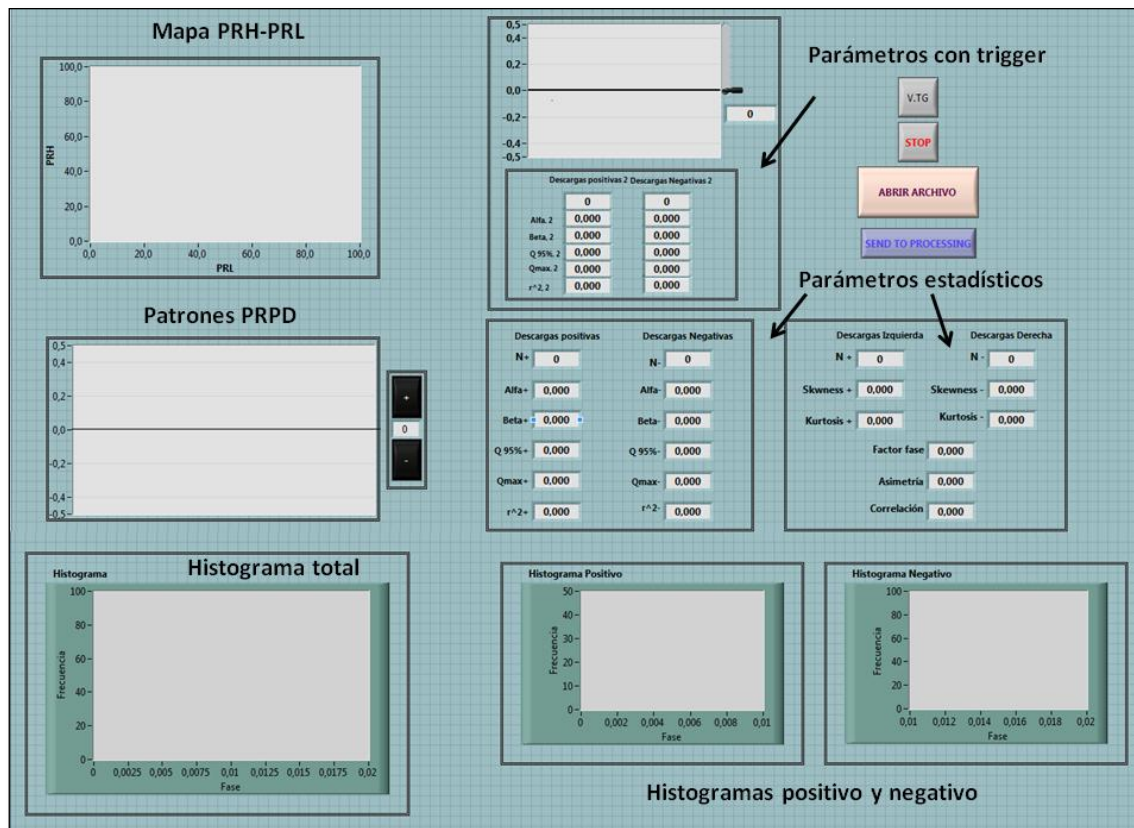


Figura 27: Panel principal del software

El interfaz de usuario contiene seis pantallas y tres cuadros de datos. Una pantalla visualiza los patrones PRPD (ángulo-fase, amplitud y polaridad). Otra muestra los patrones PRPD con la modificación del trigger. Otra pantalla visualiza un mapa PRH-PRL. Finalmente hay tres pantallas que visualizan los histogramas. Una de ellas muestra el histograma completo de ambos semi-ciclos. Las otras dos pantallas muestran el histograma de la distribución de cada semi-ciclo. Dos cuadros de datos presentan los resultados de los parámetros de amplitud, visualizando uno de ellos los resultados modificados por el trigger. Por último, un cuadro de datos presenta los resultados de los parámetros estadísticos en fase.

Además, este software permite abrir el archivo de la adquisición obtenido en el software online que es utilizado en el laboratorio. Por otra parte, el software tiene la opción de mostrar los resultados de los parámetros estadísticos si el usuario lo desea, “*send to processing*”.

### 3.2.1.1 Visualización de histogramas

Los histogramas mostrados en la Figura 28 están programados para obtener la frecuencia de las descargas.

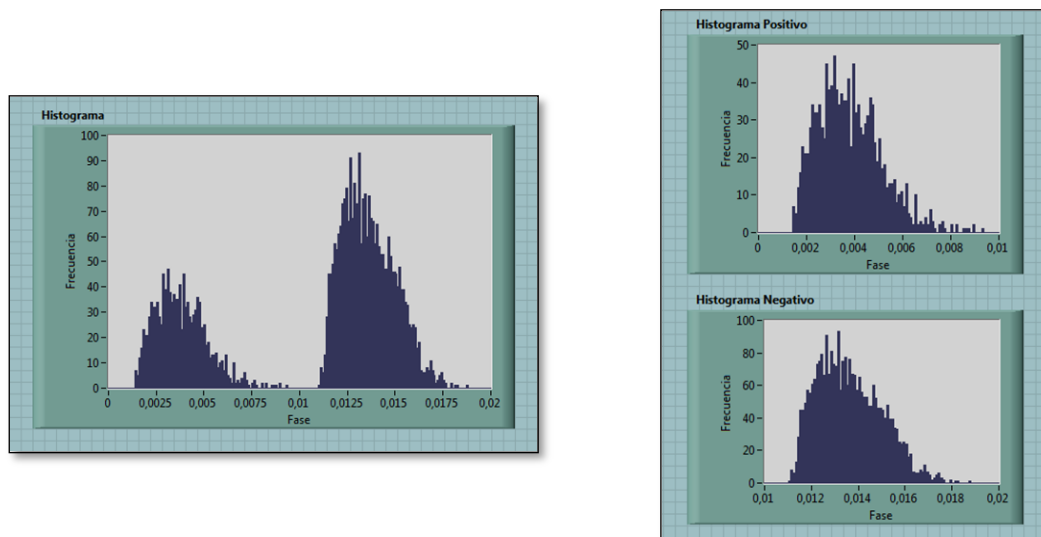


Figura 28: Ejemplo de histograma

El histograma general tiene 200 clases mientras que el histograma de cada semi-ciclo tiene 100 clases (véase Figura 29). En el eje x están determinadas las distintas clases de la fase y en el eje y la frecuencia de las descargas en esas clases.

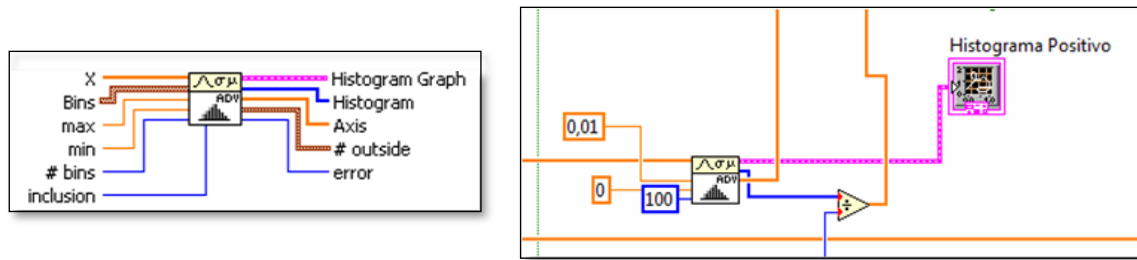


Figura 29. Configuración de histogramas

El software permite introducir el número de clases, el máximo y mínimo de la fase.

### 3.2.1.2 Visualización de patrones PRPD

Los datos de las descargas obtenidas en el laboratorio con el software online son los que se utilizan para la visualización de los patrones PRPD. Al abrir esta matriz se envían a la pantalla de visualización. Estos datos se muestran superpuestos a una onda sinusoidal en fase a la señal de sincronismo, Figura 30.

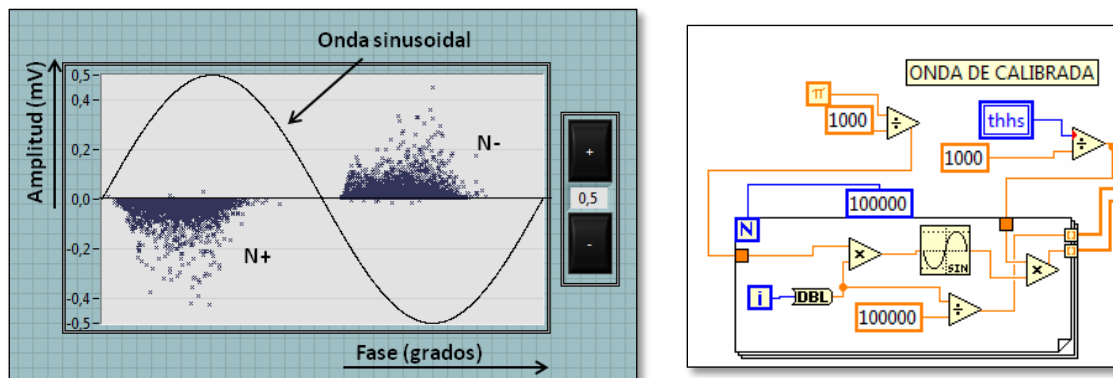


Figura 30: Ejemplo de un patrón PRPD

La onda sinusoidal está configurada en el software de la manera que muestra la Figura 30.



### 3.2.1.3 Mapa PRH-PRL

Para proporcionar un nuevo método gráfico, he reconfigurado un mapa PRH-PRL (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.**) para la separación de fuentes de DP y DP-ruido. Este mapa está desarrollado a partir de la potencia de las señales de los pulsos de DP. Estos parámetros PRH-PRL, Power Ratio for High frequency-Power Ratio for Low frequency, muestran el porcentaje de potencia en una banda de frecuencia alta o baja en comparación con la potencia de la señal.

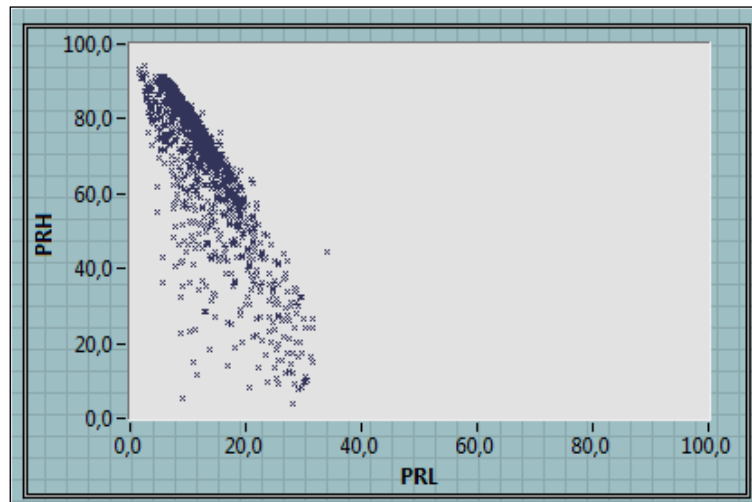


Figura 31: Mapa PRH-PRL

Las ecuaciones de PRH-PRL son (18) y (19):

$$PRH = \frac{\sum_{f_{1H}}^{f_{2H}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} |s(f)|^2} \quad (18)$$

$$PRL = \frac{\sum_{f_{1L}}^{f_{2L}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} |s(f)|^2} \quad (19)$$

donde:

$s(f)$  es la magnitud de la FFT de la señal del pulso de DP,  $s(t)$ ,

$(f_{1H}, f_{2H})$  es la banda de frecuencia alta,

$(f_{1L}, f_{2L})$  es la banda de frecuencia baja,

$f_T$  es la frecuencia máxima bajo análisis.

Cada DP detectada tendrá un parámetro PRH y otro PRL que se ubicará como un punto en el mapa mostrado en la figura anterior. El desarrollo inicial se encuentra explicado en Ardila,2012.

### 3.2.1.4 Abrir archivo

Este software off-line permite abrir los archivos adquiridos mediante el software online existente en el laboratorio. El usuario utiliza esta acción cuando desea visualizar las descargas y tratar los parámetros estadísticos explicados.

La Figura 32 muestra el botón y la configuración de la acción:

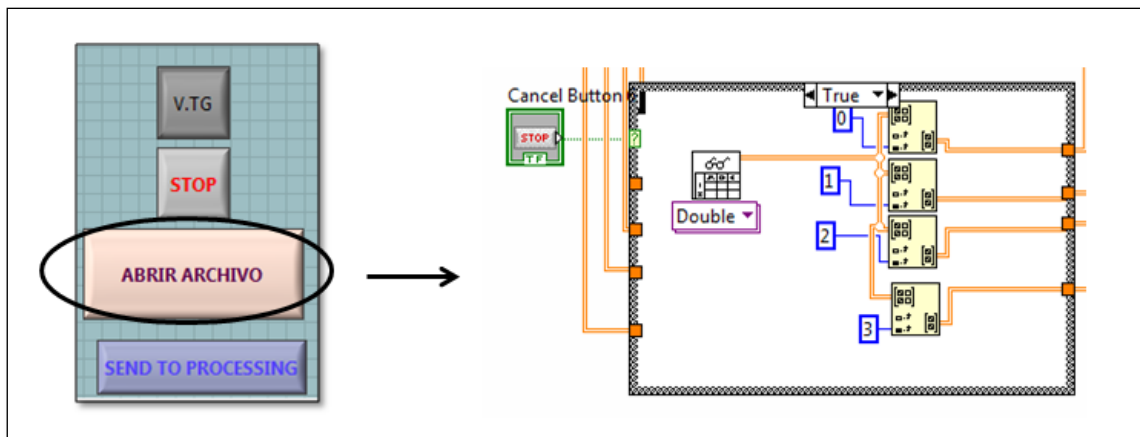


Figura 32: Abrir archivo y su configuración

### 3.2.2 Procesamiento

En esta etapa están procesados los resultados de los parámetros estadísticos ya explicados en el capítulo 2:

- $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $Q_{\max}$ ,  $Q_{95\%}$ ,  $r^2$ ,  $N1$ ,  $N2$ ,
- skewness, curtosis, asimetría, factor fase y correlación.

La señal de sincronismo es estudiada para cada semi-ciclo, tanto positivo como negativo (Figura 33). Las descargas positivas son las que se encuentran en el semi-ciclo positivo (izquierda) y las descargas negativas son las que están en el semi-ciclo negativo (derecha).

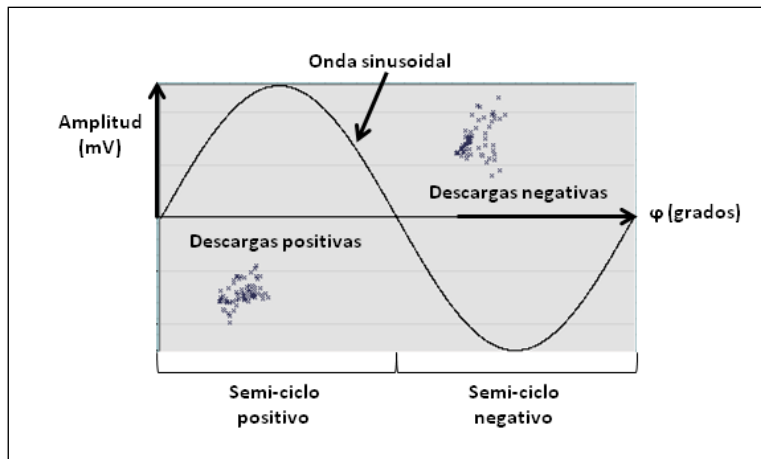


Figura 33: Distribución de las DP

En la Figura 34 se visualizan los parámetros estadísticos que son utilizados con la amplitud y la fase de las descargas.

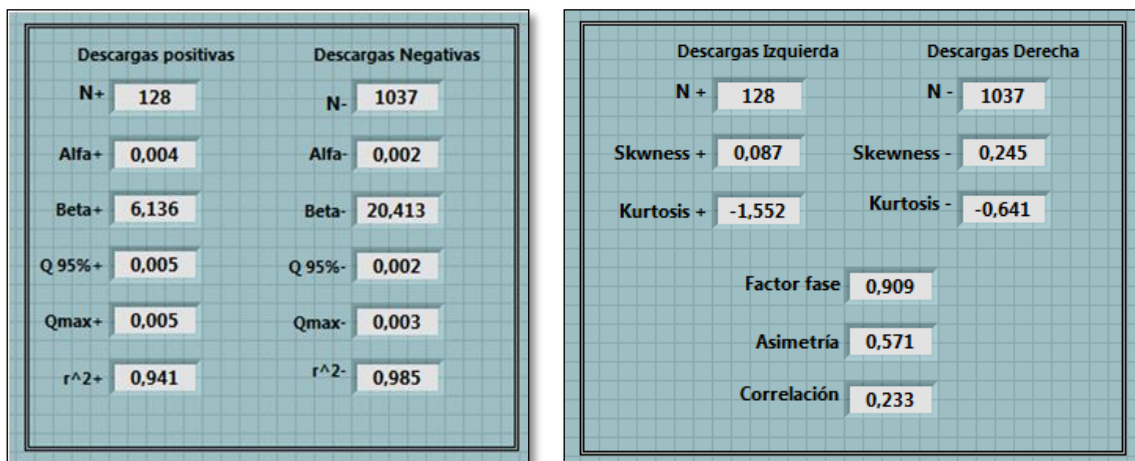


Figura 34: Ejemplo de análisis de parámetros estadísticos

### 3.3 Resultado final del software

El interfaz de usuario final del sistema realizado para la utilización de las descargas adquiridas por software online es el siguiente (Figura 35):

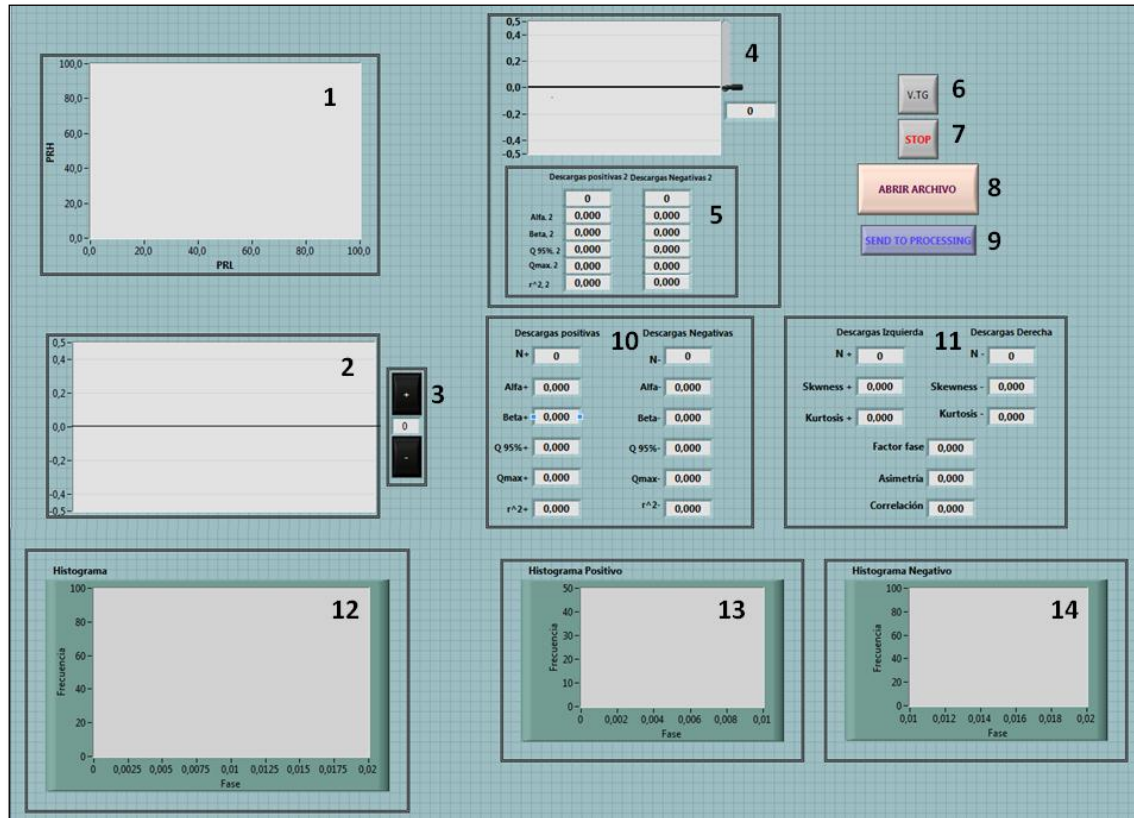


Figura 35: Software final

1. Mapa de clasificación PRH-PRL.
2. Pantalla fija de visualizaciones de patrones PRPD.
3. Selector de amplitud. Es la amplitud máxima de la ventana de visualización para las pantallas de visualización de los patrones PRPD y forma de onda de un pulso DP.
4. Trigger: nivel mínimo de amplitud de las descargas que se adquieren, tanto para PRPD y forma de onda. Se añade al mapa de patrones PRPD.
5. Visualización de parámetros estadísticos con el trigger añadido.
6. Muestra u oculta la pantalla de visualización de patrones PRPD y los parámetros estadísticos con el trigger añadido.
7. Finaliza la aplicación bajo la petición del usuario.
8. Abre el archivo de descargas guardado previamente en el software online.
9. Efectúan los cálculos de los parámetros estadísticos para la adquisición bajo petición del usuario.

- 10.** Visualización de los parámetros estadísticos utilizando la amplitud.
- 11.** Visualización de parámetros estadísticos utilizando la fase.
- 12.** Visualización del histograma general con 200 clases.
- 13.** Visualización del histograma del semi-ciclo positivo con 100 clases.
- 14.** Visualización del histograma del semi-ciclo negativo con 100 clases.

En el anexo se presenta el código de programación desarrollado para esta aplicación.

# 4 Análisis y comparación de resultados

## 4.1 Ensayos realizados

En este capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos. Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid. Cada ensayo es la aplicación práctica de lo explicado a lo largo del proyecto. Las pruebas están realizadas mediante la aplicación de alta tensión a los diferentes objetos de ensayo que se pueden observar en la Figura 36, Figura 37 y Figura 38.

En todos los ensayos se utilizó el circuito de detección indirecto, explicado en el capítulo 2.

Los tres tipos de ensayos realizados son:

### **Configuración Punta-Plano (DP corona)**

Este objeto de ensayo es el utilizado para obtener las descargas de efecto corona. En este caso, el elemento que forman parte del objeto de ensayo es una aguja de 0,5 mm de grosor (véase Figura 36). Esta aguja está colocada a 1 mm de distancia de un plano a tierra metálico. Es posible obtener dichas descargas gracias a la presencia de campo eléctrico altamente divergente.

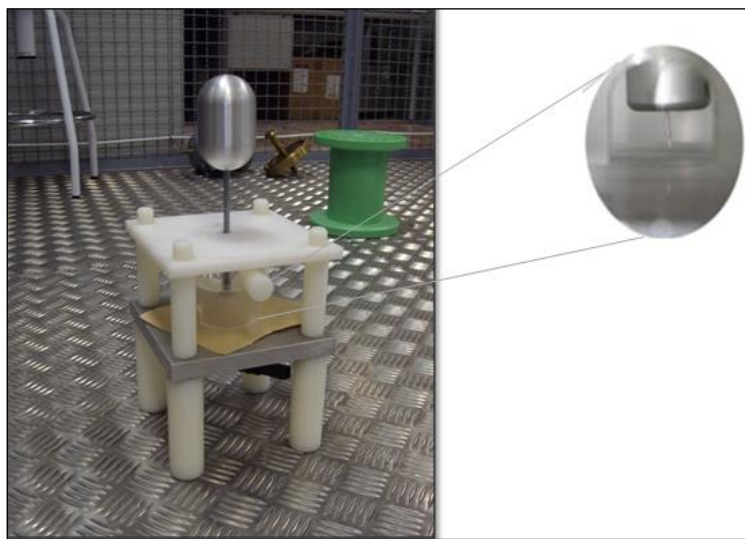


Figura 36: Punta-plano

La placa metálica está cubierta con una capa de aislante para evitar la ruptura total del aislamiento.

### **Configuración Par trenzado de hilo magnético esmaltado (DP superficial)**

Con este objeto de ensayo, mostrado en la Figura 37, es muy normal encontrar descargas parciales superficiales similares a las que ocurren en máquinas eléctricas. Estas descargas son las que se detectan en los aislamientos eléctricos entre espiras. El par trenzado de hilo magnético es el objeto utilizado para comprobar las descargas parciales superficiales.

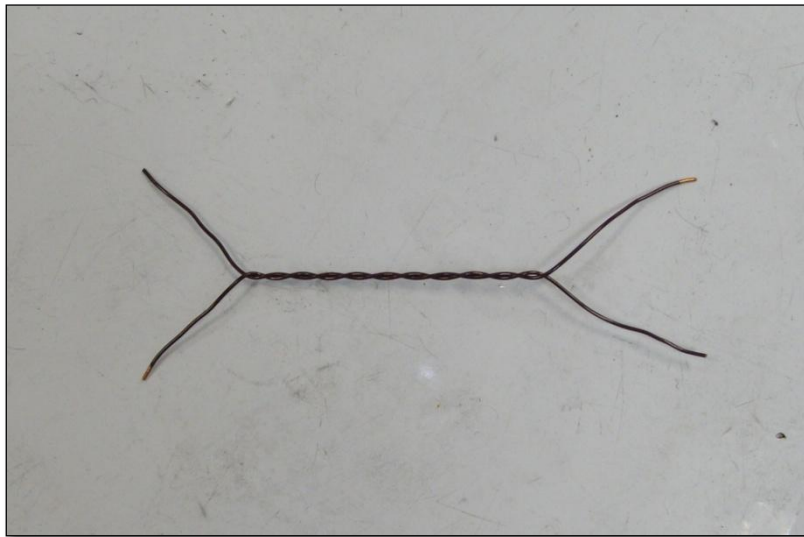


Figura 37: Par trenzado

### **Configuración Papel aceite (DP interna)**

El objeto de ensayo utilizado en este ensayo está compuesto por varias piezas de papel aislante de ranura de máquina rotativa. El papel tiene un espesor de 0,35 mm y las piezas están envasadas al vacío. Éstas están sumergidas en aceite mineral para evitar descargas superficiales a baja tensión. El papel aislante está colocado entre dos electrodos metálicos (véase Figura 38). Algunas de estas láminas de papel aislante están perforadas por una aguja de 1mm de grosor. Así está asegurada la aparición de descargas parciales internas al crear vacuolas cilíndricas de diferente tamaño.



Figura 38: Papel aceite

La configuración utilizada en este experimento es 4-3-4, donde 4 son los papeles sanos y 3 los papeles perforados. Un ejemplo de la colocación de este papel está mostrado en la Figura 39.

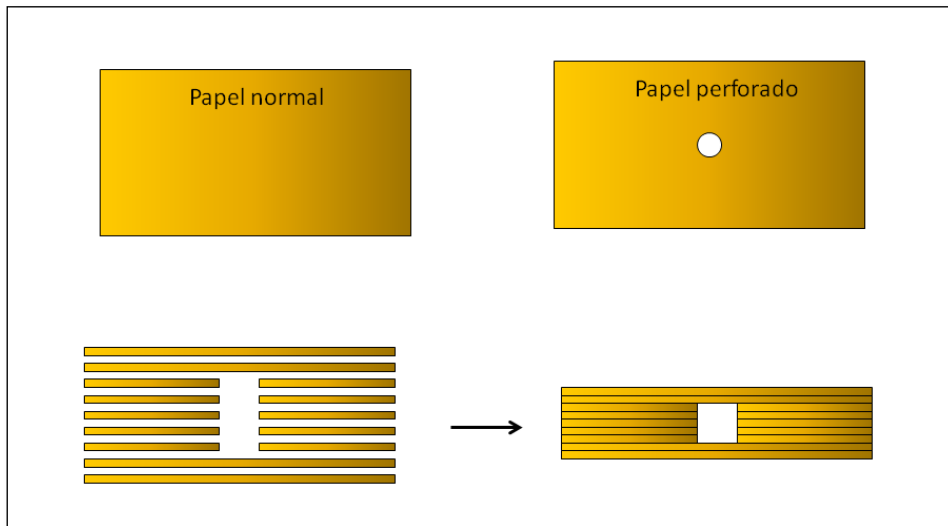
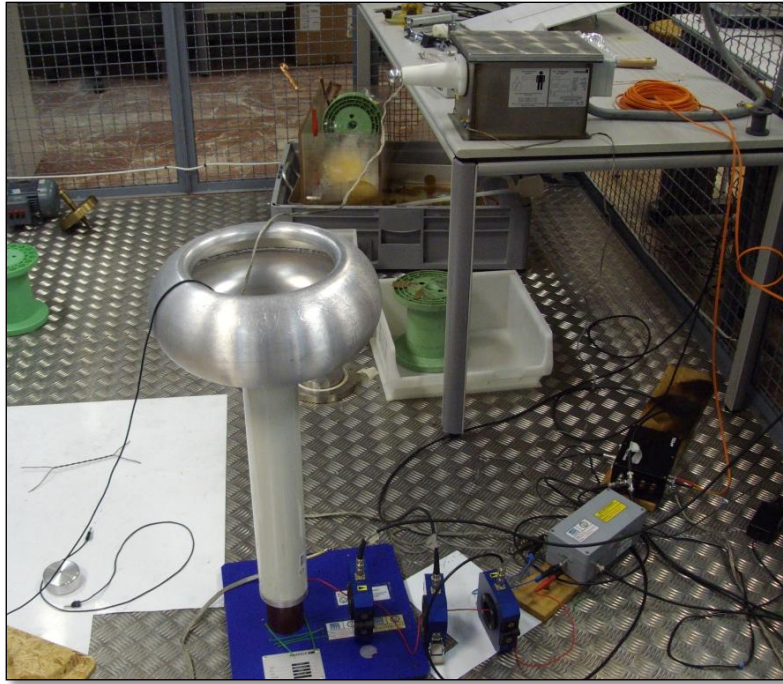


Figura 39: Ejemplo de colocación del papel perforado

Con el fin de llevar a cabo este proyecto, las medidas se tomaron en el laboratorio (Figura 40) con la ayuda del software online. Éste es el software sobre el que se ha trabajado para realizar este software off-line, utilizando *Labview 9*.





**Figura 40: Montaje del laboratorio**

## 4.2 Patrones PRPD y parámetros estadísticos

### 4.2.1 DP Corona

Para obtener las DP corona se ha utilizado el objeto de ensayo punta-plano (véase Figura 36). El nivel de tensión aplicado en este ensayo ha sido de 2,5 kV.

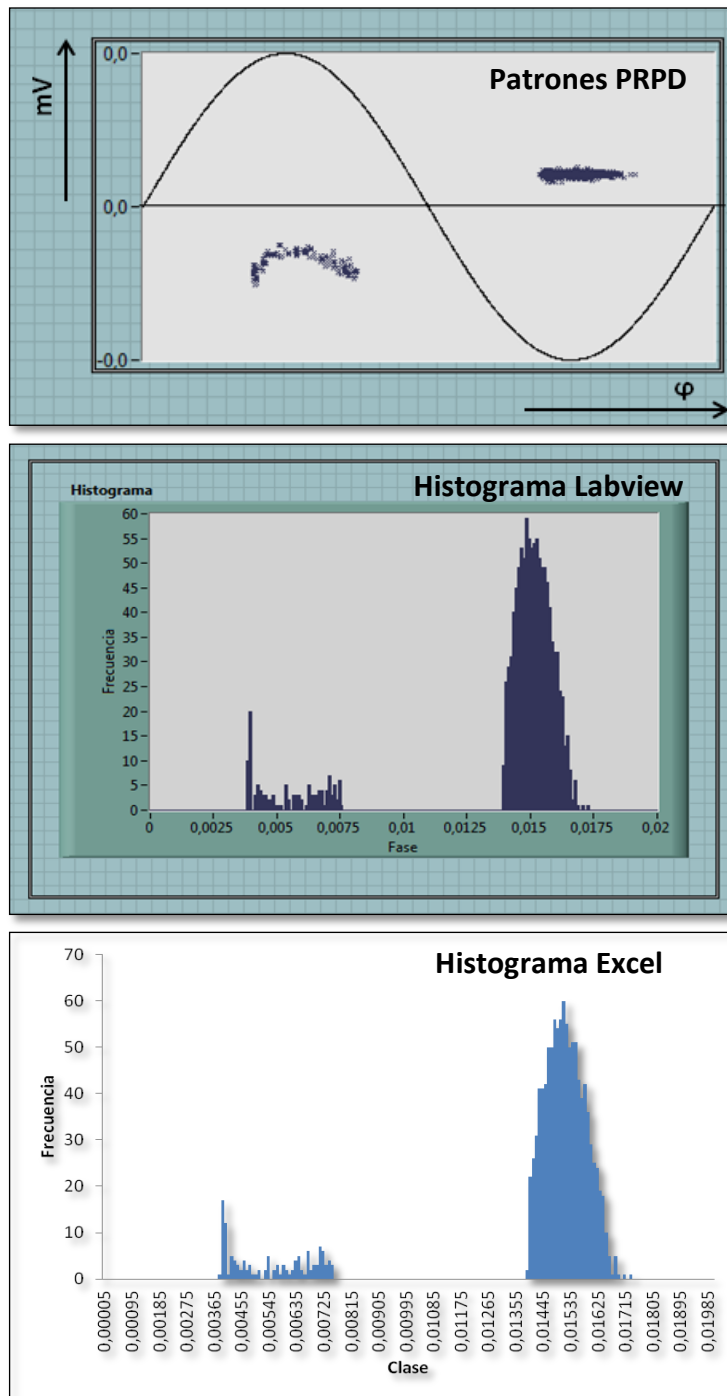


Figura 41: Patrón PRPD e histogramas de Labview y Excel (DP corona)

En primer lugar, los patrones PRPD (véase Figura 41) muestran los patrones clásicos de DP corona. Estos patrones manifiestan escasa dispersión de magnitudes que dificultan la caracterización de las descargas. Por eso es necesaria la utilización de los histogramas para poder observar la distribución de las frecuencias.

A partir de los datos obtenidos el programa muestra un histograma para el semi-ciclo positivo y el semi-ciclo negativo. Para la verificación los resultados, se ha utilizado el programa Excel. Los parámetros han sido configurados en Labview. Al igual que con los histogramas para ratificar. La similitud de los histogramas de Labview y Excel demuestra el funcionamiento apropiado.

### **Parámetros estadísticos descriptivos**

Con el fin de calcular los parámetros estadísticos de skewness, curtosis, factor de fase, asimetría y correlación cruzada, al igual que con los histogramas de las distribuciones, se han calculado estos parámetros con el programa Excel para ratificar los resultados obtenidos.

En la Tabla 1 se encuentran los resultados de skewness y curtosis para el semi-ciclo positivo y el negativo, tanto con el programa Labview y Excel.

		SEMI-CICLO POSITIVO		SEMI-CICLO NEGATIVO	
		Labview	Excel	Labview	Excel
CORONA	Skewness	0,090	0,090	0,244	0,247
	Curtosis	-1,556	-1,570	-0,638	-0,633

Tabla 1: Propiedades de las distribuciones por separado (DP corona)

El análisis de skewness ofrece información de la asimetría de la distribución respecto a la distribución normal. En el semi-ciclo positivo y negativo de la DP corona el valor de la skewness es mayor que 0. Este valor indica que existe una mayor concentración de valores a la izquierda de la media que a la derecha. A este tipo de distribución se la denomina *distribución asimétrica positiva*.

El resultado obtenido para curtosis en el caso de la DP corona es negativo en ambos semi-ciclos. Un valor de curtosis negativo significa que la distribución es menos apuntada respecto a una normal. Ese tipo de distribuciones se denomina *distribución platicúrtica*. En el semi-ciclo positivo el valor es más negativo que en el semi-ciclo negativo. Esto indica que el semi-ciclo positivo es menos apuntado que el negativo. Los histogramas de la Figura 41 verifican esta afirmación.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentran los parámetros estadísticos de comparación de distribuciones: factor de fase, asimetría y correlación cruzada. Estos datos igualmente han sido verificados en Excel.

		Labview	Excel
<b>CORONA</b>	<b>Factor de fase</b>	0,909	0,909
	<b>Asimetría</b>	0,571	0,571
	<b>Correlación</b>	0,233	0,274

Tabla 2: Parámetros de comparación de distribuciones (DP corona)

En el análisis de la correlación cruzada, la distribución ofrece información de la asimetría que existe entre ellas. En el caso de la DP corona, la correlación tiene un valor muy cercano a cero. Significa que es totalmente asimétrica.

El valor de la asimetría ofrece información entre el nivel medio de cada semi-ciclo. En este caso, la asimetría es cercana a 0. Este resultado indica que hay mayor distribución en el semi-ciclo negativo (derecha) que en el positivo (izquierda).

El factor de fase estudia la diferencia entre la tensión inicial de cada semi-ciclo. Éste es un valor meramente informativo.

Los parámetros estadísticos de comparación de distribuciones son operaciones básicas. Es evidente que se obtengan los mismos resultados en Labview y Excel.

#### 4.2.2 DP interna

El nivel de tensión utilizado para la configuración de papel aceite (Figura 38) es de 5,7 kV.

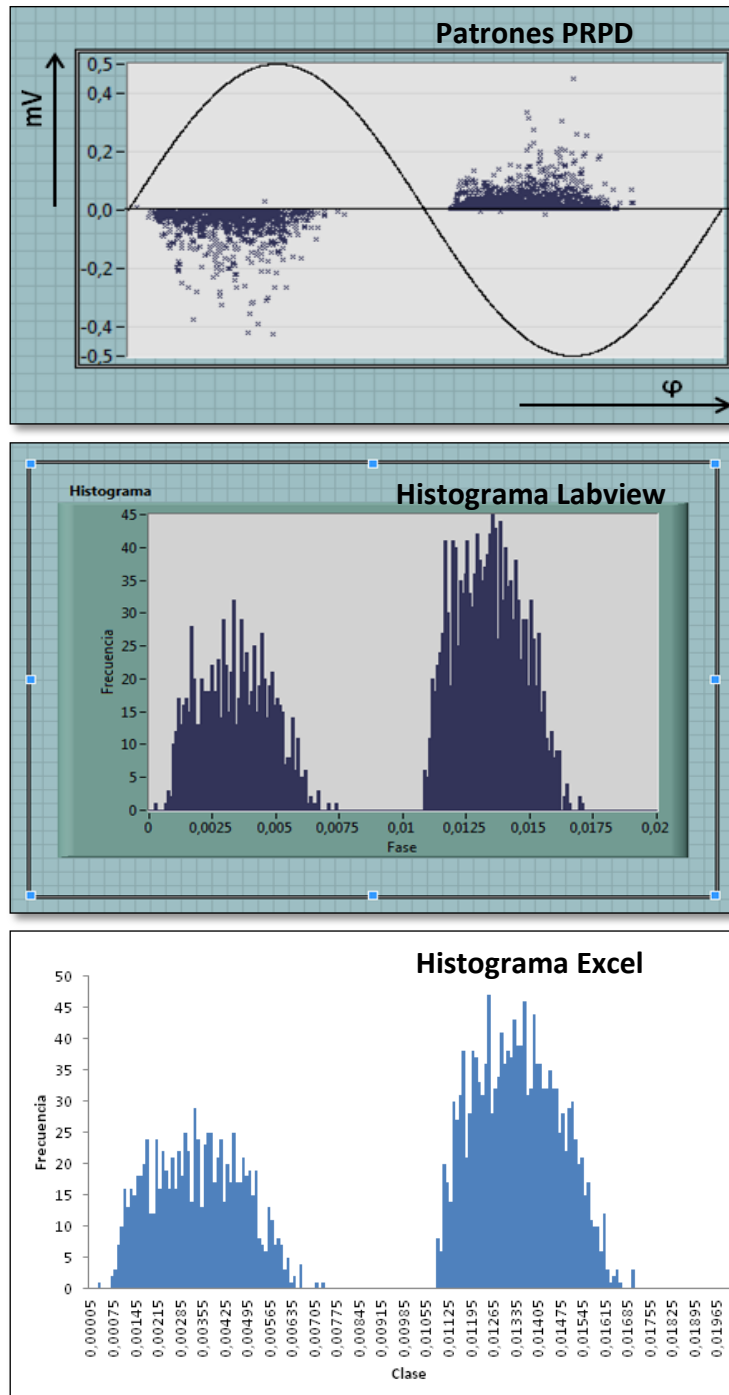


Figura 42: Patrón PRPD e histogramas de Labview y Excel (DP interna)

La visualización de patrones PRPD (Figura 42) muestra los patrones típicos de descargas internas. Estos patrones tienen grandes cantidades de DP concentradas en las regiones donde la tensión aplicada tiene cruces por cero. Gracias al hecho de sumergir en aceite mineral el objeto de ensayo solo aparecen descargas en el interior de la vacuola. Al igual que en el ensayo de DP corona, es complicado caracterizar las descargas. Por eso, es inevitable la utilización de los histogramas para la perfecta visualización de las descargas.

A partir de los datos obtenidos el programa muestra un histograma para el semi-ciclo positivo y el semi-ciclo negativo. Los parámetros han sido configurados en Labview. Al igual que con los histogramas, para ratificar los resultados se ha utilizado el programa Excel. La similitud de los histogramas de Labview y Excel demuestra el funcionamiento apropiado por la escasa variación que existe entre ellos.

### **Parámetros estadísticos descriptivos**

Al igual que en el análisis de la DP corona, se han calculado los parámetros estadísticos de skewness, curtosis, factor de fase, asimetría y correlación cruzada con el programa Excel para ratificar los resultados obtenidos.

En la Tabla 3 se encuentran los resultados de skewness y curtosis para ambos semi-ciclos. Como ya se explicaba en la DP corona, la verificación en Excel para estos resultados está disponible en la misma tabla.

		SEMI-CICLO POSITIVO		SEMI-CICLO NEGATIVO	
		Labview	Excel	Labview	Excel
INTERNA	Skewness	0,103	0,106	0,155	0,153
	Curtosis	-0,851	-0,848	-0,812	-0,809

Tabla 3: Propiedades de las distribuciones por separado (DP interna)

En el análisis de skewness, los valores obtenidos son mayores que 0. Estos datos, ya explicados en el apartado anterior, indican que son *distribuciones asimétricas positivas*. Los valores de cada semi-ciclo son parecidos. Estos datos demuestran que las distribuciones del semi-ciclo positivo y negativo son similares como se demuestra en la Figura 42.

El resultado de la curtosis tiene la misma explicación que el apartado de DP corona. Ambos semi-ciclos muestran un valor negativo que significa que es una *distribución platicúrtica*. Los dos semi-ciclos tienen un coeficiente de apuntamiento similar que se verifica con los histogramas de la Figura 42.

En la Tabla 4 está mostrados los parámetros estadísticos de comparación de distribuciones: factor de fase, asimetría y correlación cruzada. Al igual que con los histogramas, estos datos tienen la verificación en Excel.

		Labview	Excel
<b>INTERNA</b>	<b>Factor de fase</b>	0,881	0,881
	<b>Asimetría</b>	0,627	0,626
	<b>Correlación</b>	0,931	0,923

Tabla 4. Parámetros de comparación de distribuciones (DP interna)

En el análisis de los parámetros de comparación de las distribuciones la correlación cruzada muestra un valor cercano a 1. Este resultado indica que hay dependencia entre las dos distribuciones, con forma simétrica. La verificación de Excel demuestra que dicho valor es correcto.

El valor de la asimetría que muestra la tabla es entre 0 y 1. Éste indica que hay mayor distribución en el semi-ciclo negativo (derecha) que en el semi-ciclo positivo (izquierda).

La asimetría y el factor de fase son parámetros que se calculan con operaciones básicas (suma, resta, etc.). Por eso, es evidente que se obtengan los mismos resultados.

### 4.2.3 DP Superficiales

Para este ensayo, la tensión utilizada para el par trenzado (Figura 37) fue alrededor de 1 kV.

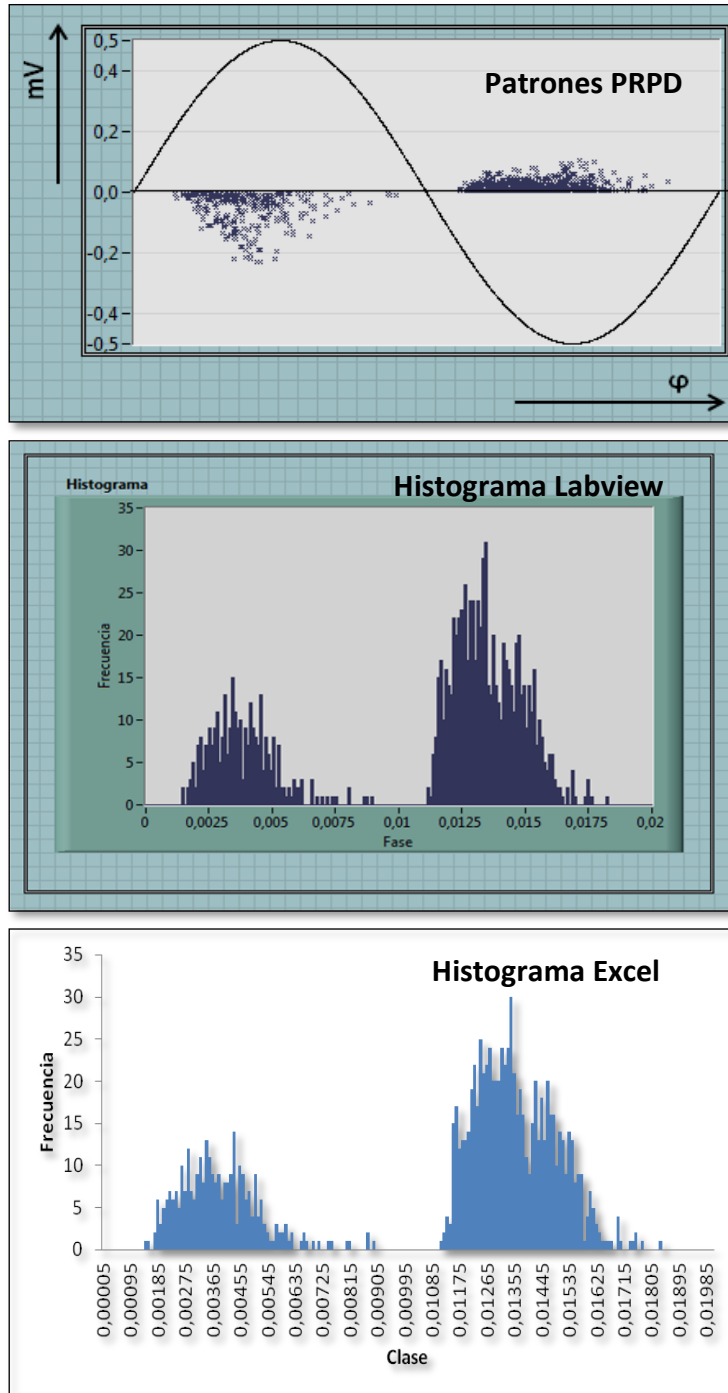


Figura 43: Patrón PRPD e histograma de Labview y Excel (DP superficial)



Los niveles de PRPD que se muestran en la Figura 43 son los patrones típicos de DP superficiales. Estos patrones muestran elevadas magnitudes de descargas para tensiones máximas aplicadas. Como ya se ha explicado en los ensayos anteriores, al ser dificultosa la visualización de las descargas en los patrones PRPD, se ha llevado a cabo la representación de los histogramas en Labview y así observar la distribución de las frecuencias.

Con los datos que se obtienen el programa muestra un histograma para cada semi-ciclo, tanto positivo como negativo. Primero los parámetros han sido configurados en Labview. Para la verificación de dichos resultados se ha utilizado el programa Excel. Esta comparación permite visualizar el correcto funcionamiento del software off-line.

### **Parámetros estadísticos descriptivos**

Se han calculado parámetros estadísticos de skewness, curtosis, factor de fase, asimetría y correlación cruzada en Labview. Al igual que con los histogramas de las distribuciones y las DP corona e interna, se han calculado estos parámetros con el programa Excel para ratificar los resultados obtenidos.

En la Tabla 5 se encuentran los resultados de skewness y curtosis para el semi-ciclo positivo y el negativo, con el programa Labview y Excel.

		SEMI-CICLO POSITIVO		SEMI-CICLO NEGATIVO	
		Labview	Excel	Labview	Excel
SUPERFICIAL	Skewness	0,955	0,952	0,478	0,482
	Curtosis	1,521	1,570	-0,284	-0,265

Tabla 5: Propiedades de las distribuciones por separado (DP superficial)

Los valores obtenidos en el análisis de la skewness son mayores que 0, tanto para el semi-ciclo positivo como para el negativo. Un valor de skewness positivo significa que hay mayor concentración de descargas a la izquierda de la media. Este tipo de distribuciones son *distribuciones asimétricas positivas*, como en los dos tipos de DP explicados anteriormente.

El resultado obtenido para curtosis tiene valor positivo en el semi-ciclo positivo. Estos valores indican un elevado grado de concentración de descargas y se caracteriza por ser una distribución más apuntada. Este tipo de distribución se denomina *distribución leptocúrtica*. En el semi-ciclo negativo, curtosis tiene un valor negativo que indica que la distribución es menos apuntada. Este tipo de distribución se denomina *distribución platicúrtica*. Los histogramas de la Figura 43 ratifican la explicación.

En la Tabla 6 se encuentran los resultados de factor de fase, asimetría y correlación para el semi-ciclo positivo y el negativo, tanto con el programa Labview y Excel.

		Labview	Excel
<b>SUPERFICIAL</b>	<b>Factor de fase</b>	0,946	0,946
	<b>Asimetría</b>	0,328	0,329
	<b>Correlación</b>	0,821	0,857

Tabla 6: Parámetros de comparación de distribuciones (DP superficial)

En el análisis de los parámetros de comparación de las distribuciones la correlación cruzada muestra un valor cercano a 1. Este parámetro tiene la misma explicación que en la DP interna. Éste indica que existe una dependencia entre las dos distribuciones y tienen forma simétrica.

La asimetría de las dos distribuciones tiene un valor positivo, cercano a 0. Este resultado indica que hay mayor distribución en el semi-ciclo negativo (derecha) que en el positivo (izquierda).

La asimetría y el factor de fase son parámetros que se calculan con operaciones básicas (suma, resta, etc.). Por eso es evidente que se obtengan los mismos resultados.

#### 4.2.4 Verificación de resultados (2ª muestra)

Para cada objeto de prueba existen dos tipos de ensayos al mismo nivel de tensión. Estas pruebas son realizadas para garantizar que los valores obtenidos son verídicos. Como ya se ha explicado en los apartados anteriores, el programa Excel es el programa elegido para verificar los resultados de cada ensayo.

La Figura 44 muestra los patrones PRPD y los histogramas de verificación de DP corona de Labview y Excel.

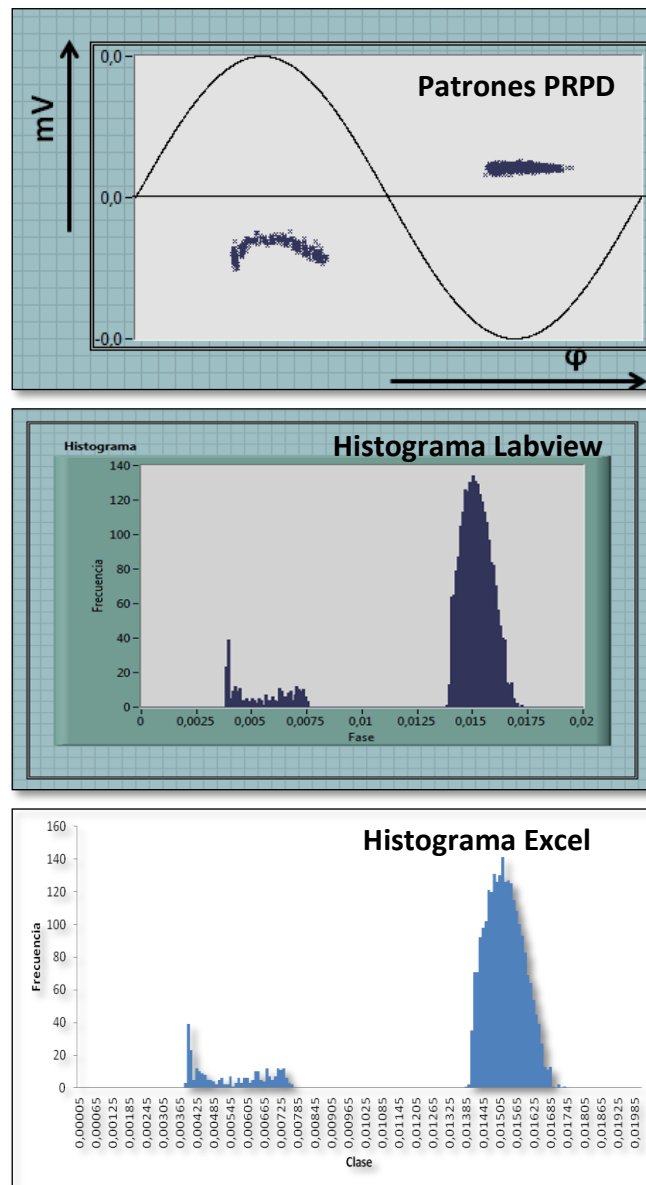


Figura 44: Histogramas de verificación de DP corona

Los patrones PRPD de la Figura 44 son los patrones típicos de una DP corona. Existe una mayor concentración de descargas y hay muy poca dispersión entre magnitudes. Al igual que en los ensayos de la primera muestra es inevitable la utilización de los histogramas que Labview crea a partir de los datos obtenidos para la visualización de las descargas parciales.

Como verificación del histograma creado en Labview se ha utilizado Excel. Esta comprobación sirve de ayuda para demostrar el funcionamiento satisfactorio del software off-line.

La Figura 45 muestra los patrones PRPD y los histogramas de verificación de una DP interna en Labview y Excel.

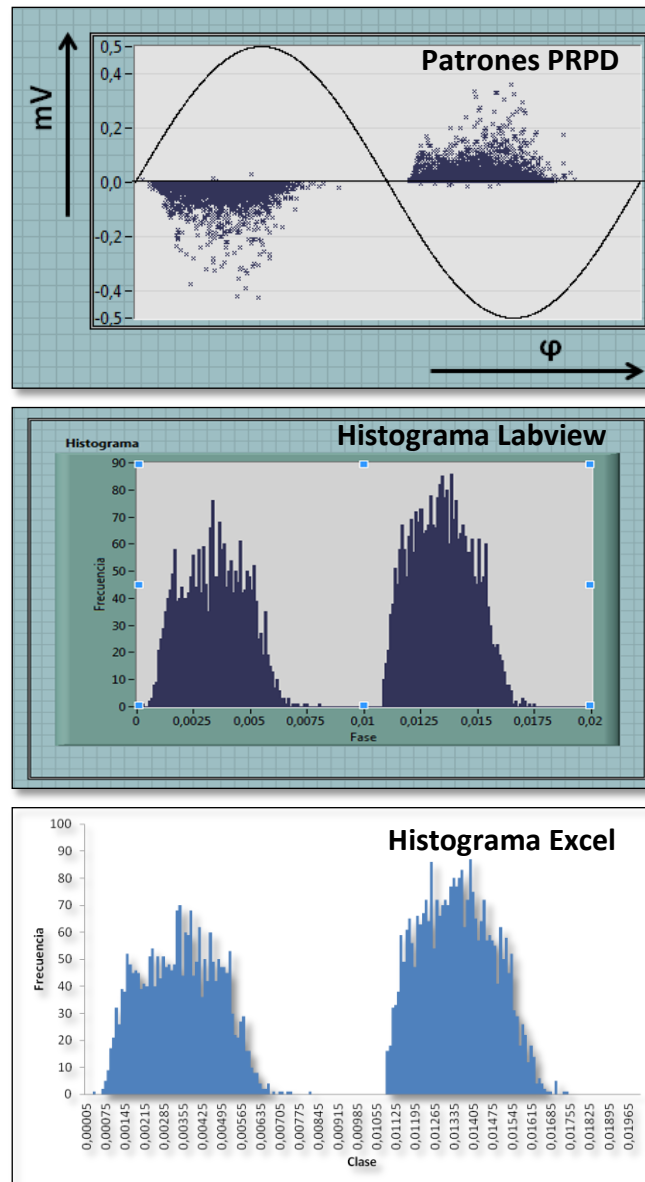


Figura 45: Histogramas de verificación de DP interna

Los patrones típicos de una DP interna (véase Figura 45) muestran elevadas cantidades de DP en las regiones donde la tensión aplicada tiene mayor pendiente. La configuración del histograma en Labview del semi-ciclo positivo y negativo ayuda a visualizar la frecuencia de las descargas en este ensayo. La verificación en Excel muestra la similitud que existe entre ellos.

La Figura 46 muestra los patrones PRPD y los histogramas creados en Labview y de verificación en Excel de una DP superficial.

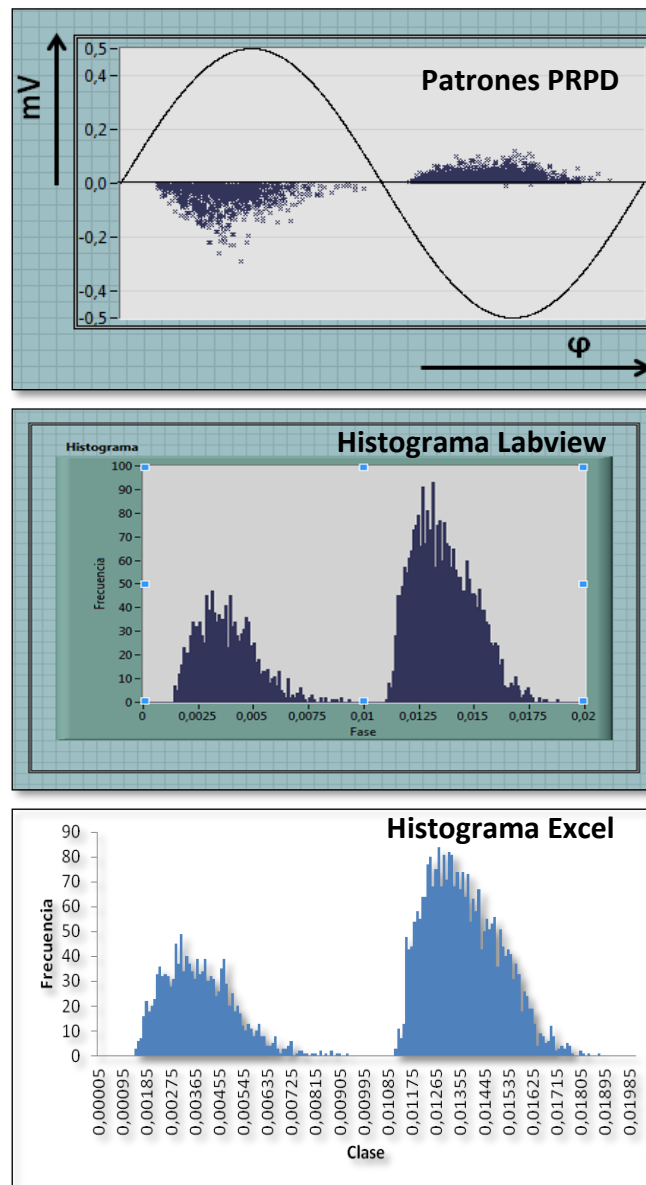


Figura 46: Histogramas de verificación de DP superficial

Los patrones PRPD muestran elevadas cantidades de descargas para tensiones máximas aplicadas. En este ensayo también es dificultosa la caracterización de las descargas. Por eso se ha configurado en Labview un histograma de ambos semi-ciclos para la correcta visualización de estas descargas. Para la ratificación de éstos se ha configurado en Excel otro histograma que ayuda a visualizar el buen funcionamiento el software.

### Parámetros estadísticos descriptivos (2ª muestra)

Los resultados de los parámetros estadísticos analizados se muestran en las siguientes tablas. En ellas se encuentran todos los ensayos junto con las dos muestras realizadas para la verificación de resultados. Como ya se ha explicado a lo largo de este capítulo, se ha utilizado Excel para ratificar los resultados obtenidos en el software off-line de Labview.

En primer lugar, la Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de skewness para todos los ensayos.

		SEMI-CICLO POSITIVO		SEMI-CICLO NEGATIVO	
		Labview	Excel	Labview	Excel
<b>SKEWNESS</b>	<b>Corona 1</b>	0,090	0,090	0,244	0,247
	<b>Corona 2</b>	0,126	0,127	0,250	0,251
	<b>Interna 1</b>	0,103	0,106	0,155	0,153
	<b>Interna 2</b>	0,062	0,060	0,146	0,147
	<b>Superficial 1</b>	0,955	0,952	0,478	0,482
	<b>Superficial 2</b>	0,730	0,732	0,488	0,488

Tabla 7: Resumen de skewness

Los resultados obtenidos para skewness tienen una escasa variación entre ensayos. Esto se debe a la posición tomada por el trigger a la hora de eliminar el ruido en la adquisición. Para cada ensayo se ha tomado un nivel de trigger distinto. Tanto la DP corona como la interna y la superficial tienen valores positivos. Esto indica que son *distribuciones asimétricas positivas*. La tabla muestra la diferencia entre el semi-ciclo positivo y el negativo. Cabe destacar que en la DP corona el semi-ciclo negativo es más asimétrica positiva porque tiene un valor más alto que en el positivo. La DP interna tiene valores muy similares lo que indica que son de forma muy simétrica. Ambas tienen la misma distribución. Por último la DP superficial es más asimétrica positiva en el semi-ciclo positivo.

En la Tabla 8 están resumidos los resultados de curtosis para cada ensayo.

		SEMI-CICLO POSITIVO		SEMI-CICLO NEGATIVO	
		Labview	Excel	Labview	Excel
<b>CURTOSIS</b>	<b>Corona 1</b>	-1,556	-1,570	-0,638	-0,633
	<b>Corona 2</b>	-1,556	-1,562	-0,646	-0,646
	<b>Interna1</b>	-0,851	-0,848	-0,812	-0,809
	<b>Interna 2</b>	-0,841	-0,841	-0,807	-0,804
	<b>Superficial 1</b>	1,521	1,570	-0,284	-0,265
	<b>Superficial 2</b>	0,598	0,615	-0,344	-0,341

Tabla 8: Resumen de curtosis

Los resultados de curtosis tienen una pequeña variación debida a la posición del trigger tomada en la adquisición. Como ya se explicó antes, para cada ensayo se tomó una posición para eliminar el ruido. Tanto la DP corona como la interna tienen valores negativo de curtosis. Este valor indica que son *distribuciones platycúrticas*. En ambos semi-ciclos es la misma distribución. Aún así, el semi-ciclo positivo es menos apuntado que el negativo porque tiene un valor más negativo. En las DP superficial el valor de curtosis en el semi-ciclo positivo es mayor que cero. Esto significa que la distribución es *leptocúrtica*. En el semi-ciclo negativo los valores obtenidos son negativos como en los ensayos anteriores. Tener un valor negativo indica que es una *distribución platycúrtica*.

Por último, la Tabla 9 resume los parámetros de comparación de distribuciones: factor fase, asimetría y correlación.

	FACTOR FASE		ASIMETRÍA		CORRELACIÓN	
	Labview	Excel	Labview	Excel	Labview	Excel
Corona 1	0,909	0,909	0,571	0,571	0,233	0,274
Corona 2	0,923	0,923	0,580	0,580	0,260	0,275
Interna 1	0,881	0,881	0,627	0,626	0,931	0,923
Interna 2	0,843	0,843	0,785	0,783	0,959	0,951
Superficial 1	0,946	0,946	0,328	0,329	0,821	0,857
Superficial 2	0,971	0,971	0,394	0,393	0,943	0,949

Tabla 9: Resumen de parámetros de comparación entre distribuciones

En la última tabla están todos los resultados obtenidos en la comparación de distribuciones: factor de fase, asimetría y correlación cruzada. Así esta resolución queda contrastada. Como en los casos anteriores, los ensayos tienen escasa variación.

En la DP corona, la correlación cruzada tiene un valor cercano a cero. Este dato significa que son dos distribuciones totalmente asimétricas. En la DP corona, el valor es muy cercano a 1, lo que significa que las distribuciones tienen una forma muy simétrica. Por último, en la DP superficial, el valor es cercano a 1 lo que significa que las dos distribuciones tienen una forma muy simétrica.

La asimetría de todas las descargas en cada ensayo es positiva. Esto indica que hay mayor distribución en el semi-ciclo negativo (derecha) que en positivo (izquierda).

La asimetría y el factor de fase son parámetros que se calculan con operaciones básicas (suma, resta, etc.). Por eso es evidente que se obtengan los mismos resultados.

En la Figura 47 se visualiza el resumen de los seis ensayos realizados para la caracterización de descargas parciales. Esta gráfica compara las dos muestras de cada ensayo. Ésta muestra la gran similitud que hay entre muestras del mismo ensayo explicando el funcionamiento satisfactorio del software off-line creado en Labview.

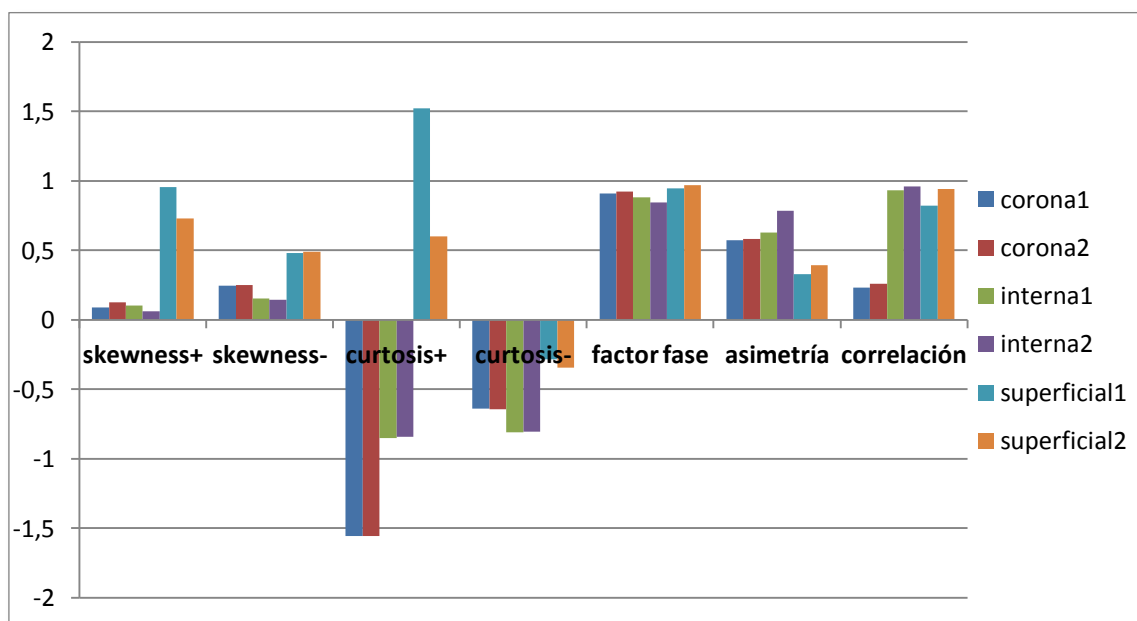


Figura 47: Resumen de los 6 ensayos



En la Tabla 10 se muestran el número de descargas parciales en cada semi-ciclo para cara ensayo.

	<b>SEMI-CICLO POSITIVO</b>	<b>SEMI-CICLO NEGATIVO</b>
<b>Corona 1</b>	128	1037
<b>Corona 2</b>	286	2457
<b>Interna 1</b>	909	1510
<b>Interna 2</b>	2275	2978
<b>Superficial 1</b>	305	763
<b>Superficial 2</b>	1289	2755

Tabla 10: Número de descargas

# 5 Conclusiones y líneas de trabajo

El objetivo de este trabajo ha sido programar off-line un software para el análisis estadístico de descargas parciales. En este software se visualizan y calculan los parámetros estadísticos cuando el usuario lo requiera. Adicionalmente, este sistema visualiza los patrones PRPD, un mapa PRH-PRL y los histogramas de las distribuciones. Estos histogramas sirven para identificar fuentes de descargas parciales. Como método de comparación se ha utilizado Excel.

La primera conclusión obtenida del estudio anterior es la información que ofrecen los patrones PRPD. En ellos se pueden visualizar los diferentes tipos de descargas parciales. Las DP internas y las DP superficiales tienen una forma muy similar pero las DP corona se diferencian notablemente.

Otra conclusión a la que se ha llegado ha sido la necesidad de utilizar histogramas para la caracterización de las descargas ya que los patrones PRPD no ofrecen información suficiente de las descargas. En estos histogramas se han mostrado los diferentes ensayos en cada semi-ciclo.

A través de los resultados obtenidos se pueden caracterizar las distintas descargas y visualizar las diferencias que existen entre ellas. Los resultados tienen una escasa variación entre ensayos. Esa pequeña variación se debe a la posición del trigger. Los resultados de los parámetros son:

- Todas las descargas son asimétricas positivas, tienen mayor concentración de descargas en la parte izquierda de la media. Las DP internas tienen un valor de skewness cercano a cero que significa que son distribuciones simétricas.
- Las DP corona y las DP internas son distribuciones platicúrticas en ambos semi-ciclos. La diferencia se encuentra en las DP superficiales que son distribuciones leptocúrticas en el semi-ciclo positivo y platicúrticas en el semi-ciclo negativo. En este caso las DP internas tienen un valor de curtosis cercano a cero que significa que es similar a una distribución normal.
- Las DP corona tienen un valor de correlación cercano a cero que indica que son totalmente asimétricas. Sin embargo, las DP internas y las DP superficiales tienen valores cercanos a uno. Estos valores significan que son distribuciones simétricas.

- La asimetría de los seis ensayos de las descargas parciales indica que estas DP tienen mayor distribución en el semi-ciclo negativo.

También se debe destacar la diferencia del número de descargas en cada semi-ciclo. Las DP corona obtienen el mayor contraste entre descargas positivas y negativas. En las DP internas existe una pequeña variación. En los histogramas se visualiza la gran similitud que existe entre los semi-ciclos. Las DP superficiales alcanzan mayor similitud que las DP corona y existe escasa variación.

Por última conclusión, se destaca la confirmación de que los resultados son satisfactorios. Esta ratificación se lleva a cabo gracias al análisis realizado con las fórmulas de Excel y los parámetros estadísticos estudiados. Esta comprobación ayuda a confirmar la escasa variación de los resultados obtenidos. Estas justificaciones demuestran que el software off-line es ejecutado de manera satisfactoria y puede ser utilizado para trabajos futuros sobre la detección de descargas parciales.

### **Trabajos futuros**

Una idea para futuros proyectos es implementar la programación de las distribuciones online.

Los histogramas de las distribuciones realizadas en este proyecto son realizados con la fase. Por otro lado se pueden observar las distribuciones y describir los parámetros con la amplitud de las descargas. No hay una función que sea directa pero se puede configurar con el valor medio de las descargas que están dentro de cada fase. Esta configuración se puede verificar en Excel, Visual Basic y Matlab.

Otra línea de trabajo sería la programación en Labview de las distribuciones  $H_{qn}(\varphi)$  y  $H_{qmax}(\varphi)$ . En este proyecto hemos calculado la distribución  $H_n(\varphi)$  que muestra el número de descargas en cada fase. Para la distribución  $H_{qn}(\varphi)$  se utilizaría el valor máximo de la descarga en cada fase y para  $H_{qmax}(\varphi)$  sería el valor medio para cada fase. Cabe la posibilidad de verificarlo con Excel.

Por último, la utilización de la huella dactilar obtenida para la identificación de las distintas descargas parciales en un estudio más detallado

# 6 Bibliografía

- **Ardila, J. A.** “Sistema de adquisición de descargas parciales. Caracterización de fuentes de descarga y ruido por análisis de potencia espectral”.
- **Ardila, J.A.; Martínez, J.M.; Robles, G.; Rojas, M.V.; Albarracín, R.;** “A Partial Discharges Acquisition and Statistical Analysis Software”, International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2012, IMTC 2012.
- **Bartnikas, 1997.** “Performance Characteristics of Dielectrics in the Presence of Space Charge”.
- **Bartnikas, R..** “Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement”. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, tomo 9(5): 763\_808, 2002.
- **Boggs, S. and Densley. J.** “Fundamentals of partial discharge in the context of eld cable testing”. Electrical Insulation Magazine, IEEE, tomo 16(5): 13\_18, 2000.
- **Boggs, S.; Stone, G.** “Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge”. Electrical Insulation, IEEE Transactions on, tomo EI-17(2): 143\_150, 1982.
- **Cacciari, M.; Contin, A.; Montanari, G.C.;** “Use of a mixed-Weibull distribution for the identification of PD phenomena” Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.2, pp.1166-1179, Dec 1995.
- **Cacciari, M.; Contin, A.; Rabach, G.; Montanari, G.C.;** “An approach to partial-discharge investigation by height-distribution analysis” Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings, vol.142, pp.102-108, Jan 1995.
- **Contin, A.; Contessotto, G.; Montanari, G.C.; Cacciari, M.;** “Comparing different stochastic models for the identification and separation of concurrent partial discharge phenomena” Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 473), pp.374-379, 2000.
- **Docavo, I.** “Separación de fuentes de descargas parciales en sistemas de aislamiento mediante el equipo PD Base.

- **Golinski, J.; Malewski, R.; Train, D.;** “Measurements of RIV on Large EHV Apparatus in High Voltage Laboratory” Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol.PAS-98, pp.817-824, May 1979.
- **Gulski, E.; Meijer, S.; Muhr, M.; Strehl, T.; Tenbolen, S..** “Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements”. Cigré, 2006.
- **IEC 60270,** “High Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurements”, 3.0 Ed, 2000.
- **Kreuger, F.** “Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment”, Butterworth & Co., Kent, pp 52-102, 1989.
- **Krivda,1995.** “Recognition of Discharges Discrimination and Classification”; Delft Press.
- **Kuffel, E.; Zaengl, W.S.; Kuffel, J.;** “High voltaje engineering fundamentals” second edition , 1984, pp 355-382.
- **Lajara Vizcaino, Jose Rafael.** “Labview. Entorno Gráfico De Programación Labview 8.20”.
- **Lapp, A.; Kranz, H.G.;** “The use of the CIGRE data format for PD diagnosis applications” Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.7, pp.102-112, Feb 2000.
- **Lemke, E.** “Guide for Electrical Partial Discharge in compliance to IEC 60270”. Electra, tomo 241: 61-67, Dic 2008.
- **Martínez, J.M.; Robles, G.; Rojas, M.V.; Sanz, J.** “Partial discharge pulse shape recognition using an inductive loop sensor”, vol 21, 2010.
- **Morshuis, P.** “Partial Discharge Mechanisms”. Delft University Press, Netherlands, 1993.
- **Muhr, M.; Schwarz, R.** “Partial discharge measurement as a Diagnostic Tool for HV-Equipments”. Properties and applications of Dielectric Materials, 2006. 8th International Conference on, 195\_198, 2006.
- **Muhr, M.; Schwarz, R.; Pack, S.; Koerbler, B.** “Unconventional partial discharge measurement [electrical insulation evaluation]” Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. CEIDP '04. 2004 Annual Report Conference on, 430\_433, 2004.
- **National Instruments España.**

- **Okubo, H.; Hayakawa, N.; Montanari, G.** “Technical Development on Partial Discharge Measurement and Electrical Insulation Techniques for Low Voltage Motors Driven by Voltage Inverters”. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, tomo 14(6): 1516\_1530, 2007.
  - **Reid, A.J.; Judd, M.D.; Fouracre, R.A.; Stewart, B.G.; Hepburn, D.M.;** “Simultaneous measurement of partial discharges using IEC60270 and radio-frequency techniques” Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.18, pp.444-455, April 2011.
  - **Robles, G.; Martínez, J.M.; Rojas, M.V.; Sanz, J.** “Inductive sensor for measuring high frequency partial discharges within electrical insulation”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, pp.3907-3913, Nov 2009.
  - **Robles, G.; Martinez, J.M.; Sanz, J.; Tellini, B.; Zappacosta, C.; Rojas, M.;** “Designing and tuning an air-cored current transformer for partial discharges pulses measurements” Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008, IEEE, vol., pp.2021-2025, 12-15 May 2008.
  - **Stone, G.; Boutler, E.A.; Culbert, I.; Dhirani, H.;** “Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair”; IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley Interscience; 2004.
  - **Stone, G.C.** “The statistics of aging models and practical reality” Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.28, pp.716-728, Oct 1993.
- Van Brunt, 1991.** “Stochastic Properties of Partial-discharge Phenomena”.

# Anexo

En este anexo se visualiza el código de programación desarrollado para esta aplicación.

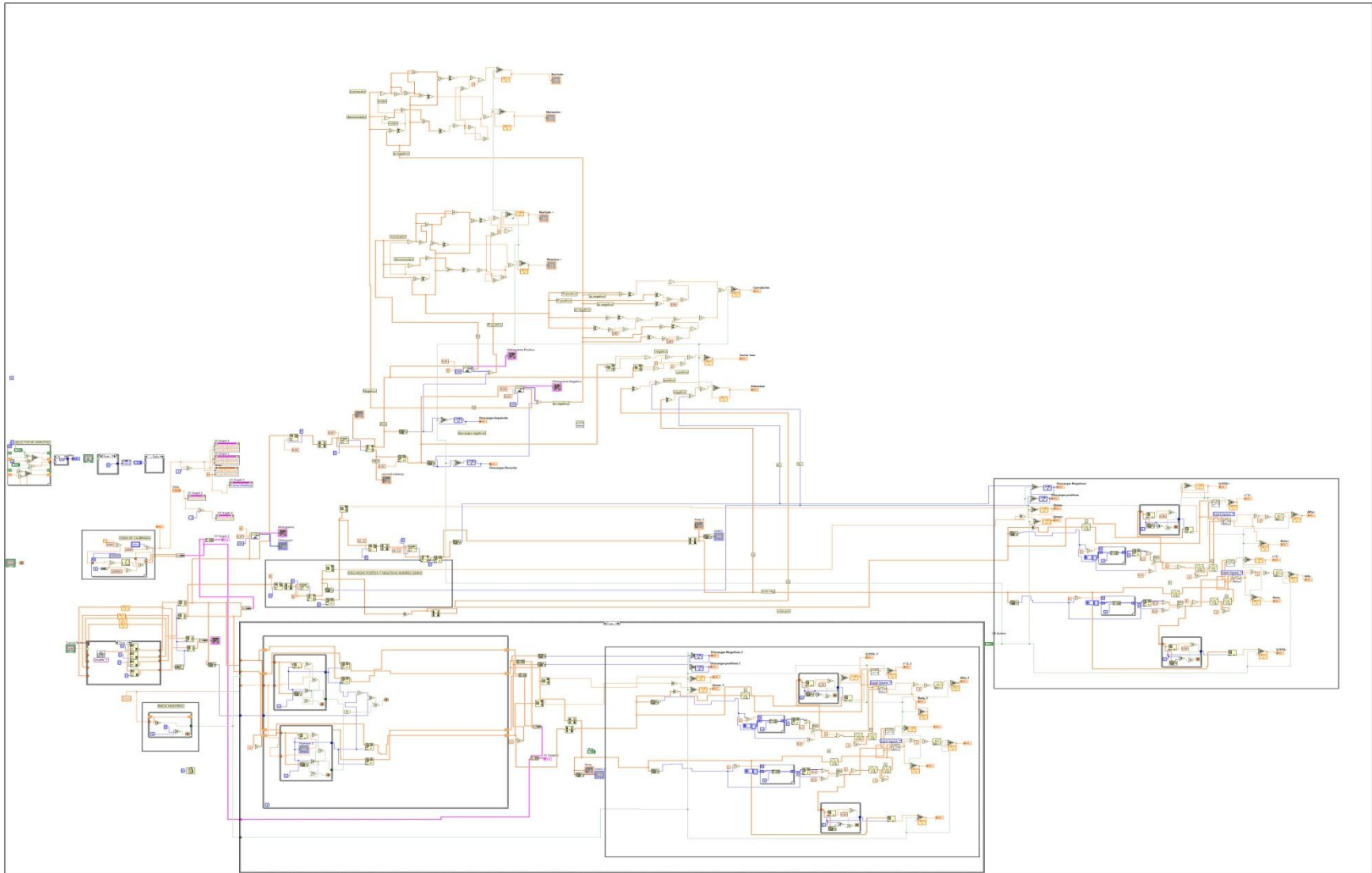


Figura 48: Software off-line