

GRADO EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Simulación de descargas parciales en un dieléctrico

DOCUMENTO 1- MEMORIA DEL TFG

Alumno/Alumna: Artiagoitia, Fernández, Deiene

Director/Directora : Uriondo, Arrue, Felipe

Curso: 2017-2018

Fecha: 14, Febrero, 2018

Índice

1.	Resumen	4
2.	Lista de tablas/ilustraciones/acrónimos.....	6
3.	Introducción	12
4.	Contexto	13
4.1.	Introducción a las descargas parciales.....	14
4.2.	Detección y medida de descargas parciales	15
5.	Alcance/Objetivos	16
6.	Beneficios del trabajo realizado	17
6.1.	Beneficios técnicos	17
6.2.	Beneficios económicos.....	17
6.3.	Beneficios sociales.....	18
7.	Análisis de alternativas	19
7.1.	Metodología de medida considerada para la realización del TFG	20
8.	Descripción del trabajo realizado	24
8.1.	Modelización	24
8.2.	Análisis de resultados + breve conclusión del método eléctrico	33
9.	Descripción de tareas	43
9.1.	Definición de Paquetes de Trabajo y Tareas.....	43
9.2.	Diagrama de Gantt.....	45
10.	Presupuesto.....	47
11.	Análisis de Riesgos.....	49
12.	Conclusiones.....	52
13.	Referencias.....	53

1.Resumen

Este documento describe el Trabajo de Fin de Grado que se ha llevado a cabo con el objetivo de simular, mediante la extensión Simulink de Matlab, un modelo de descargas parciales.

Aunque los resultados prácticos de las mediciones de descargas parciales son la principal fuente para investigar y analizar el fenómeno de dichas descargas (a partir de ahora DP o PD), también el modelado y las simulaciones han tenido un papel importante en los estudios de las DP. Un buen modelo para DP puede ahorrar tiempo en experimentos prácticos que pueden desarrollarse durante horas o días, así como predecir la vida útil del aislamiento sin realizar pruebas tediosas. En este Trabajo de Fin de Grado se ha simulado el fenómeno de las DP mediante un modelo, obtenido a través de la librería digital IEEE Explore. El objetivo de la simulación de dicho modelo es investigar el fenómeno de las descargas parciales y la magnitud de éstas.

Gradu Amaierako Lanaren azalpenaren den dokumentu honek deskarga partzialen eredu simulatuko dituen, Matlaba-en Simulink luzapenaren bitartez, burutu da.

Deskarga horien fenomenoaz aztertu eta ikertu dituen funtsezko iturria deskarga partzialen neurketen emaitza praktikoak direlarik (aurrerantzean DP edota PD). DPen ikasketetan bai modelazioak eta baita simulazioak sekulakoa garrantzia izan dute. DP eredu on batek zenbait egunetan edo ordutan burutuko diren saiakuntza praktikoetan aurreztu dezake; eta halaber eta froga gogaikarriak egin gabe isolamenduaren bizitzaren iragarpena. Gradu Amaierako Lan honetan DPen fenomenoaz simulatu da IEEE Explore liburu-denda digitalaren bitartez lortutako eredu batekin. Esandako ereduaren simulazioaren helburua deskarga partzialen deskargen gertakaria aztertzea eta hauen garrantzia azpimarratzean legoke.

This document describes the Final Grade Work carried out with the aim of simulating an already developed PD model, with the aid of Simulink. Although practical results from PD measurements and test objects are the main source to investigate and discuss the PD phenomenon, modeling and simulating play a significant role in PD studies as well. A good model for PD can save time of practical experiments that can be achieved during hours or days and can predict insulation lifetime without performing the tedious long lifetime tests. In this final Grade Work, the PD phenomenon has been simulated throughout a model, which, as mentioned before, was already developed and obtained in the IEE Explore digital library. The object of this simulation to investigate the frequency impact on number of PDs per cycle and PD magnitude.

2.Lista de tablas/ilustraciones/acrónimos

<i>Lista de tablas</i>	<i>Pág.</i>
<i>Tabla 1.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 2.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 4.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 5.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 6.....</i>	<i>29</i>

Lista de imágenes

Pág.

Imagen 1.....9

Imagen 2.....10

Imagen 3.....10

Imagen 4.....11

Imagen 5.....12

Imagen 6.....17

Imagen 7.....17

Imagen 8.....19

Imagen 9.....20

Imagen 10.....20

Imagen 11.....22

Imagen 12.....23

Imagen 13.....23

Imagen 14.....24

Imagen 15.....24

Imagen 16.....25

Imagen 17.....25

Imagen 18.....28

Lista de acrónimos

IEEE	Institute of Electrical and Electronical Engineers
PD	Partial Discharges
DP	Descargas Parciales
TFG	Trabajo de Fin de Grado
UPV/EHU	Universidad Pública Vasca/ Euskal Herriko Unibertsitatea
V	Voltios
W	Watios
pC	picoCoulombs
A	Amperios
Hz	Hercios
kV	Kilovoltios
€	

3.Introducción

Este documento trata los detalles relativos a una simulación realizada para la observación de las descargas parciales, con el fin de evitar posibles problemas en equipos de alto voltaje.

Las descargas parciales son pequeñas chispas eléctricas que ocurren en el aislamiento eléctrico de la conexión, los cables, los transformadores y las bobinas en los grandes motores eléctricos y los generadores. Cada descarga parcial es el resultado de la distribución eléctrica de una bolsa de aire en el aislamiento. Las mediciones de las descargas eléctricas se pueden tomar de forma continua o intermitente y se detectan en línea o fuera de línea. Los resultados de las descargas eléctricas se utilizan para prever de manera fiable que el equipo eléctrico tiene la necesidad de mantenimiento.

Tal como cada material tiene un límite de resistencia a la tracción característico, cada material también tiene una interrupción eléctrica (dieléctrica) que representa la intensidad eléctrica necesaria para que la corriente fluya y una descarga eléctrica suceda. Los materiales aislantes comunes como el epoxy, el poliéster y el polietileno tienen una muy alta capacidad dieléctrica. A la inversa, el aire tiene una fuerza dieléctrica relativamente baja. La interrupción eléctrica en el aire provoca un muy breve (dura sólo fracciones de nanosegundos) flujo de corriente eléctrica a través de la bolsa de aire. La medición de descargas parciales es, de hecho, la medida de estas corrientes de interrupción.

Los equipos eléctricos pueden sufrir una variedad de defectos de fabricación o problemas de funcionamiento que merman su fiabilidad. El aislamiento eléctrico de los motores y generadores es susceptible a:

- Variaciones térmicas
- Ataques químicos
- Abrasión debido a un exceso de movimiento de la bobina

En todos los casos, estas tensiones debilitarán la unión de las propiedades de las resinas de poliéster o epoxy que protegen y aíslan los bobinados. Como resultado, se desarrolla en los bobinados una bolsa de aire.

Los niveles de descargas parciales no sólo proporcionan una alerta temprana de una inminente avería del equipo, sino que también aceleran el proceso de desgaste.

4.Contexto

Dado que el objetivo de este trabajo es el estudio de las descargas parciales internas, se introduce en este apartado el concepto de descarga parcial, así como los distintos tipos que existen. Además, también se explican los métodos más utilizados tanto para su detección como para su medición.

4.1. Introducción a las descargas parciales

El término descarga parcial (PD) hace referencia a una ruptura dieléctrica localizada en una pequeña región de un sistema tanto sólido como líquido de aislamiento eléctrico sometido a condiciones de estrés de alta tensión que no puentea el espacio entre dos conductores.

Una descarga de tipo PD puede dañar el material de aislamiento circundante por la erosión del aislamiento. Además, los gases corrosivos emitidos por una Fuente de descargas de tipo PD pueden producir daños adicionales al aislamiento circundante y a las piezas metálicas, estableciendo zonas adicionales sujetas a descargas de tipo PD. A la larga, el medio aislante puede fallar, produciendo llama, y éste, a su vez, daños en los aparatos eléctricos, interrupciones del suministro eléctrico, incendios y explosiones.



Imagen 1. Transformador de corriente seccionado para mostrar los daños de una descarga interna

La norma IEC 60270 define las descargas parciales como “descargas localizadas de electricidad que solo puentean parcialmente el aislante entre conductores”. Esta definición es muy amplia, e incluye desde descargas de tipo PD relativamente inofensivas hasta otras que son difíciles de detectar en campo y pueden ser muy destructivas. Es, por tanto, necesario dividir las descargas parciales en tres categorías:

- Descarga de corona
- Descarga superficial
- Descarga interna

Descarga de corona:

El efecto corona suele producirse en líneas de Alta Tensión, debido a la ionización del aire que rodea al conductor. La descarga que se origina en consecuencia de este efecto tiene lugar cuando el campo eléctrico localizado excede la tensión de ruptura del aire o el gas circundante. Esto ocurre típicamente en las puntas o en los bordes afilados de los conductores. En particular, es muy común en equipos de exteriores. La descarga en corona puede considerarse relativamente inofensiva en equipos de exteriores, ya que los gases corrosivos son eliminados o transportados lejos por los efectos meteorológicos. Sin embargo, si la descarga en corona tiene lugar en un entorno cerrado, los gases corrosivos no tienen salida y pueden producir daños adicionales. La descarga en corona en equipos de exteriores es, a menudo, difícil de eliminar; por otra parte, el diseño de ciertos equipos favorece intrínsecamente este tipo de descargas. Se considera una práctica recomendada, no obstante, eliminar las fuentes de descarga en corona siempre que ello sea posible, durante el mantenimiento habitual, ya que pueden enmascarar problemas más serios.

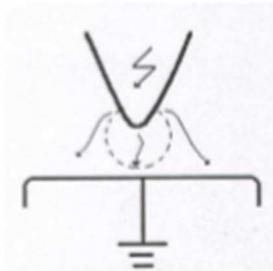


Imagen 2. Ejemplo descarga de corona

Descarga superficial:

La descarga superficial es la que se produce en la superficie de un aislador; su resultado más típico es la generación de pistas de conducción en la superficie del aislador y la reducción de su eficacia. Está estrechamente asociada a la contaminación y la humedad, y es una forma de descarga parcial relativamente común.

La descarga superficial es particularmente dañina en aislantes encapsulados en resina o poliméricos. Si no se detectan y reparan, los puntos de descarga crecen y pueden llegar a arder. Es también posible que se formen grietas en el esmalte de los aisladores de porcelana y la cerámica que contienen resulte dañada. Si la causa de la descarga superficial es la contaminación y aquella se detecta a tiempo, a veces es posible limpiar los aisladores de vidrio o porcelana antes de que se produzcan daños a largo plazo.

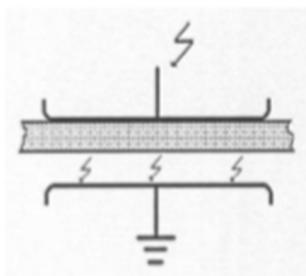


Imagen 3. Ejemplo descarga superficial

Descarga interna:

La descarga interna es un tipo de descarga que se produce en el interior del material o líquido aislante (de baja rigidez dieléctrica) y está asociada a pequeñas cavidades huecas, a menudo microscópicas en un principio, existentes en el interior del aislador sólido o líquido. Es una forma relativamente poco frecuente de descarga parcial y la que estudiaremos en este trabajo.

La descarga interna es la más difícil de diagnosticar en campo, ya que el problema no presenta síntomas visibles o audibles. Sin embargo, si no se repara y llega a producirse llama, no existirá una vía de escape para la liberación de la energía calorífica, de rápida emisión, y el aislador podría explotar.

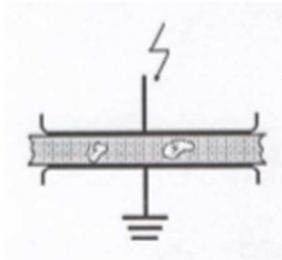


Imagen 4. Ejemplo descarga interna

4.2 Detección y medida de descargas parciales

Cuando se inicia la descarga parcial, aparecen pulsos transitorios de corriente de alta frecuencia cuya duración oscila entre los pocos nanosegundos y el microsegundo; luego desaparecen y vuelven a aparecer repetidamente.

En la simulación de este trabajo, detectaremos y mediremos las DP mediante dichos pulsos transitorios de corriente, sin embargo, en general, las corrientes procedentes de descargas de tipo PD son difíciles de medir a causa de su pequeña magnitud y corta duración. El evento puede detectarse como un cambio muy pequeño en la corriente consumida por la muestra sometida a prueba. Uno de los métodos que permiten medir tales corrientes es colocar una pequeña resistencia de medida de corriente en serie con la muestra, y ver en un osciloscopio la tensión generada utilizando un cable coaxial del calibre adecuado. La salida de esta prueba se detecta generalmente como un cambio en la carga, y se expresa en pC. Esta es la base de la metodología descrita en la norma IEC 60270, en ocasiones denominada “medida de carga aparente”.

Las medidas que describe la norma IEC son ideales para medidas de laboratorio, en las que el sistema puesto a prueba se puede alimentar con una fuente de laboratorio limpia, se dispone de accesorios de prueba y el sistema se sitúa en el interior de una jaula de Faraday. Las medidas de campo no pueden realizarse con una jaula de Faraday y la fuente de alimentación suele distar mucho de una fuente ideal en tales casos. Son medidas expuestas a ruido y, en consecuencia, menos sensibles.

Sin embargo, existen otros métodos que permiten realizar medidas en campo y, aunque no resultan tan sensibles como las medidas que describe la norma IEC, son notablemente más apropiados. Las medidas en campo deben ser, por necesidad, rápidas, seguras y sencillas si están destinadas a su aplicación por propietarios y operadores de equipos MT y AT.

Los picos de tensión o tensiones transitorias a tierra (TECV) son fenómenos muy útiles para detectar y medir descargas parciales, ya que pueden detectarse sin efectuar conexiones eléctricas ni retirar ningún panel.

Los TEV son picos de tensión inducidos en la superficie de las piezas metálicas circundantes. Estos se producen porque la descarga parcial crea picos de corriente en el conductor y, por tanto, también en las piezas metálicas conectadas a tierra situadas en las proximidades del conductor. Los pulsos TEV están repletos de componentes de alta frecuencia, como resultado de lo cual el conjunto metálico del sistema conectado a tierra presenta una considerable impedancia a tierra. Es el origen de los picos de tensión. Estos permanecen en la superficie de las piezas metálicas circundantes (hasta una profundidad de 0,5 micras en acero dulce a 100 MHz) y forman lazos de corriente alrededor de la superficie exterior allí donde exista una discontinuidad en la estructura metálica.

Existe un efecto secundario por el que las ondas electromagnéticas generadas por la descarga parcial generan también picos TEV en las piezas metálicas circundantes, actuando tales piezas metálicas como una antena.

Las medidas ultrasónicas se basan en el hecho de que una descarga parcial emite ondas sonoras. La banda de frecuencia de las emisiones suele centrarse en 40 kHz, pero se extiende hasta el área audible en el caso de descargas extremadamente perjudiciales. Las descargas internas no emiten ultrasonidos. La utilidad de la detección ultrasónica está, por tanto, restringida a descargas superficiales y descargas en corona.

La detección del campo electromagnético permite captar las ondas de radio generadas por la descarga parcial. Como ya se ha indicado anteriormente, las ondas de radio pueden generar picos TEV en la estructura metálica circundante. Puede lograrse una mayor sensibilidad de medida, especialmente a mayores tensiones, utilizando antenas UHF integradas o antenas externas montadas en separadores aislantes instalados en la estructura metálica circundante.

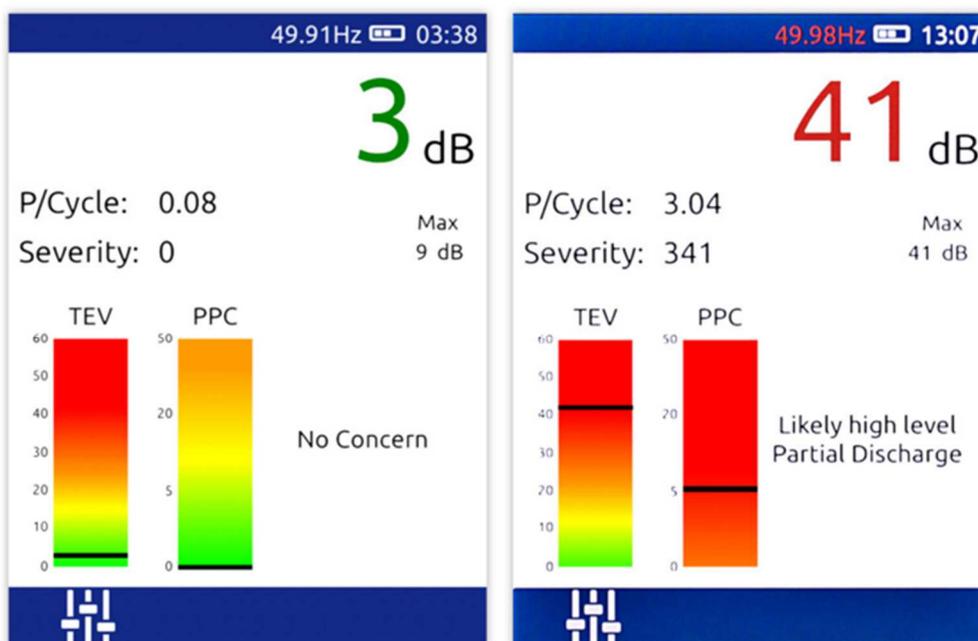


Imagen 5. Ultratev Plus^2. Medidor y detector de PD de EA Technology

5.Alcance/Objetivos

Como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal de este TFG se trata de estudiar la dependencia que las descargas parciales tienen de la frecuencia a través de una simulación.

La realización de dicho TFG comenzó a principios de abril, con idea de ser presentado en septiembre, lo cual finalmente no fue posible.

Como primer paso, se comenzó recabando información acerca del tema mencionado con a través de la página web *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* y otras fuentes de información como Wikipedia, esta última fuente empleada para tener una visión básica de las descargas parciales.

En teoría, la fecha límite de este TFG hubiera sido el 24 de Agosto, con su correspondiente entrega y la duración del mismo estaría estimada en unos 150 días, sin embargo, al no ser posible realizarlo en la fecha prevista en los meses de junio, julio y Agosto, el Proyecto sufrió un parón hasta Volver a ser retomado en septiembre. Sin embargo, en el reparto de tareas y organización del desarrollo del TFG se ha puesto que éste fue llevado a cabo desde abril hasta agosto.

Una vez recopilada y estudiada la información se procedió a construir el sistema sobre el que se realizaría la simulación mediante una herramienta informática. A continuación se dedicó un tiempo al análisis de los resultados obtenidos para determinar la solución que se habría de adoptar. Tras el análisis se estableció la solución técnica que se adoptaría y se preparó para la presentación ante el tribunal.

Esta memoria incluye los resultados obtenidos, la metodología empleada, los circuitos básicos y finales y la información complementaria requerida para la total comprensión del documento.

6. Beneficios del trabajo realizado

Conviene señalar los beneficios derivados de la ejecución del proyecto dado que estos justifican la utilidad de su realización. Es por ello que tales beneficios se detallan a continuación ordenados según su naturaleza técnica, económica o social.

6.1. Beneficios técnicos

Tras la simulación y la observación del efecto que tiene la frecuencia sobre la magnitud y el número de descargas parciales por ciclo, se espera tener conocimiento de una mejor manera tanto la variabilidad de este fenómeno así como cuál es el momento adecuado para actuar con tal de evitar que ocurra y con ello, evitar las consecuencias que pueda acarrear su aparición en los equipos eléctricos.

6.2. Beneficios económicos

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

Por lo tanto las descargas parciales pueden llegar a ser la causa de serias pérdidas económicas al producir, entre otras cosas, reparaciones y cambios prematuros en los equipos eléctricos,

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

6.3. Beneficios sociales

El efecto nocivo que estas descargas pueden causar, además de traducirse en pérdidas económicas para las empresas eléctricas, también se manifiesta en pérdidas de eficiencia y seguridad en la operación de los sistemas de comunicación derivando en la interrupción del servicio de suministro de energía.

7. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Desde un inicio se pensó en la simulación mediante un software para la observación del fenómeno de las DP sin tan siquiera pensar en realizar un modelado físico del circuito correspondiente. La precisión que ofrece el software de hoy en día es óptima, por lo que ambos métodos (tanto físico como virtual) resultan innecesarios. A priori se decidió que el modelo sería simulado por ordenador. Al tener acceso a diferentes herramientas de simulación se han de barajar las más relevantes para determinar cuál será la más adecuada para la construcción del modelo. Dentro de las posibilidades que nos ofrecía el ámbito de la ingeniería eléctrica las más usuales son las siguientes:

1. PSCAD®: constituye una herramienta indispensable para una amplia variedad de estudios de sistemas de potencia. La compañía que lo ha desarrollado es la canadiense Manitoba HVDC-Research Centre.

Se trata de una herramienta de propósito general, que permite abordar las tareas de diseño y simulación en áreas de electrónica de potencia, análisis de calidad de la energía, protecciones y estudios de planificación de sistemas eléctricos. El diseño y la optimización de dispositivos eléctricos y sistemas, previo a la creación de prototipos o de su fabricación, es más fácil y mucho más económica gracias a PSCAD® [3]. Este software es utilizado por los ingenieros de potencia.

Eleva la productividad, la eficiencia y la eficacia de los ingenieros dotando a los diseñadores de circuitos de potencia con la capacidad de crear y testear sus modelos. Como ejemplo de aplicación típico de este programa se destaca en la página web de la compañía el de la localización de sobretensiones debidas a faltas o diversas aplicaciones en redes de distribución. Los principales inconvenientes que presenta esta herramienta son el elevado precio de adquisición de la misma y la dificultad que supone hacer uso de ella. En la actualidad se reserva para la simulación en tiempo real y su uso está en declive.

2. Electromagnetic Transients Program (EMTP/ATP): EMTP es un software completo de simulación y análisis de tecnología avanzada para transitorios de sistemas de potencia. Es un programa de ordenador destinado al análisis de circuitos eléctricos, especialmente en régimen transitorio.

El programa permite modelar matemáticamente sistemas eléctricos, mecánicos y de control, monofásicos y polifásicos [4]. Es totalmente gratuito, pero muy complejo de utilizar.

3. MATLAB-SIMULINK (paquete SimPowerSystems): Simscape Power Systems permite modelar redes eléctricas completas y grids para que se pueda utilizar la simulación para explorar y mejorar la estabilidad de la red.

Provee una librería de componentes y herramientas de análisis para el modelado y la simulación de sistemas eléctricos de potencia [5]. Simscape Power Systems ofrece modelos para líneas y cables de transmisión monofásica y polifásica, así como fuentes y todos los elementos necesarios para la creación de un modelo que se asemeje a la realidad: interruptores, transformadores, cargas, tierras, faltas,...

Se podría decir que esta última herramienta se haya en el punto medio entre el PSCAD y el EMTP/ATP. La licencia es de pago, pero más económica que el PSCAD. Además es más sencillo de utilizar que el EMTP/ATP. En la actualidad este programa va ganando cada vez más importancia gracias a la potencia que tiene y es el programa conocido y empleado en la universidad en múltiples asignaturas que abarcan desde matemáticas aplicadas hasta tecnología eléctrica.

Teniendo en cuenta tanto la familiaridad que se tiene con este software, el coste y la accesibilidad proporcionadas por el centro docente, la herramienta utilizada para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado será MATLAB-SIMULINK.

8. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Para modelizar el fenómeno de las descargas parciales pueden emplearse dos métodos distintos: El método eléctrico o el método no eléctrico.

Por un lado, el método eléctrico consiste en evaluar la llamada «carga aparente» o amplitud de la descarga, expresada en coulomb (normalmente en picocoulomb),

Por otro lado, el método no eléctrico consiste en la captación y evaluación de las ondas de presión (básicamente en el dominio de los ultrasonidos) producidos por las DP.

En este caso se ha empleado el método eléctrico para la modelización.

Al finalizar este apartado, se realizará una pequeña conclusión acerca de la utilización del método eléctrico.

8.1 EQUIPO DE MEDIDA Y MODELIZACIÓN

Para introducir cómo se modelizaría mediante este método un circuito de simulación de DP, comenzamos con un circuito básico de prueba para después analizar el circuito que se ha utilizado para este trabajo.

Cuando en una cavidad del dieléctrico se produce una DP, una cierta parte de la energía que había en la cavidad se disipa en forma de carga eléctrica «q». A esos efectos la cavidad puede considerarse un condensador.

Como no es posible medir el valor de esta carga «q» que se ha puesto en juego con la DP, es necesario definir un valor que pueda medirse y que sea una imagen lo suficientemente buena de la energía disipada por la DP en el seno del dieléctrico.

Este valor se llama carga aparente «q» y se considera dimensionalmente como una cantidad de electricidad. La norma lo define de la forma siguiente:

La carga aparente «q» de una descarga parcial es la carga que, si se inyectara instantáneamente entre los bornes del objeto a ensayar, cambiaría momentáneamente la tensión entre los mencionados bornes, en la misma medida que cuando se produce una descarga parcial. El valor absoluto «q» de la carga aparente se llama habitualmente amplitud de la descarga. La carga aparente se expresa pues en coulomb. Normalmente es del orden de pC.

La carga aparente así definida, no es igual al valor de la carga transferida efectivamente a través de la cavidad en el interior del dieléctrico donde se ha producido la DP, pero se utiliza por ser un valor observable en los bornes del objeto ensayado y que es función del valor de la carga efectiva de la DP. Se trata por consiguiente de un valor que es posible medir.

Los equipos de medida de descargas parciales (figura X) se componen básicamente de:

- Fuente o generador de la tensión alterna a aplicar al objeto que se ensaya. Habitualmente es un transformador de salida en Alta Tensión.

En lo que se refiere al ensayo, el objeto que se prueba se comporta como un condensador «Ct» con una capacidad que dependerá de entre qué puntos se le aplica la tensión.

- Condensador «Ck» que se conecta en paralelo con el objeto que se ensaya. Se trata de un condensador de Alta Tensión, exento de descargas parciales. Su capacidad ha de ser mayor que la del objeto a ensayar. Se llama condensador de unión o de acoplamiento,
- Instrumento de medida (M) o equipo de instrumentos de medida, conectados a los bornes de la impedancia de medida.

Lo que mide realmente el equipo de instrumentos (M), son las corrientes ocasionadas por las DP.

Se trata de impulsos de corriente («pulsos») que se superponen a la onda sinusoidal de la corriente capacitiva que circula por el objeto a analizar (condensador «Ct») cuando se le aplica la tensión alterna de prueba. (Figura 2).

Estos impulsos de corriente debidos a las DP tienen valores de cresta proporcionales a los valores de «q» (carga aparente) y por lo tanto pueden calibrarse en picocoulombs.

Pueden visualizarse en la pantalla de un osciloscopio y de esta manera medir su amplitud, determinar su secuencia temporal y su correlación con el valor de la tensión alterna de prueba que se ha aplicado. Normalmente, este osciloscopio, que forma parte del equipo de instrumentos de medida «M», visualiza los impulsos sobre una base de tiempo sincronizada con la tensión alterna de ensayo.

Este equipo de instrumentos «M» puede medir también:

- valor de la mayor de las descargas que se producen en un cierto intervalo de tiempo, del orden de algunos periodos, en escala calibrada en pico coulombs,
- medición de la frecuencia de repetición de las descargas (número de descargas por unidad de tiempo), en función de la carga aparente q.

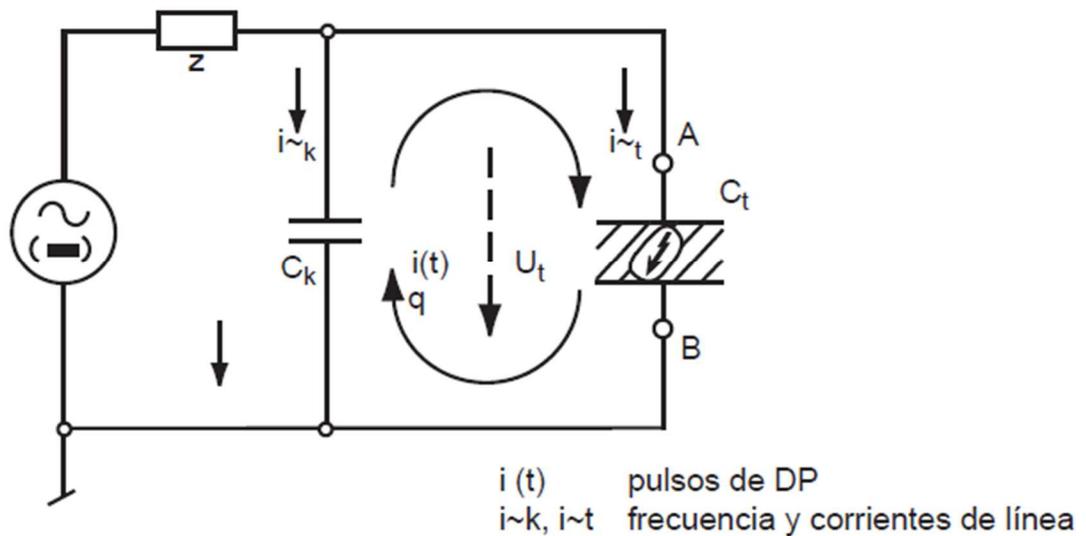


Imagen 6. Circuito de prueba para DP

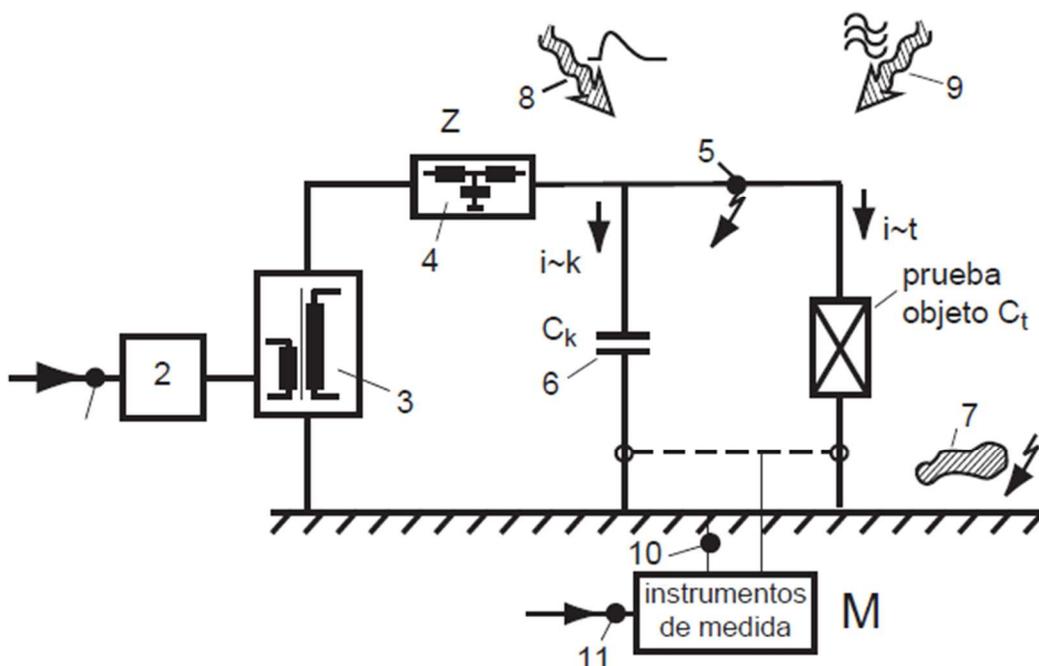


Imagen 7. Circuito de prueba de DP con fuentes de interferencia

Donde los distintos números representan lo siguiente:

- 1 y 11 : Red de alimentación
- 2 : Divisor o regulador de tensión
- 3: Fuente de alta tensión
- 4: Filtro de la fuente de alta tensión
- 5: Cables de interconexión y electrodos
- 6: Condensador de acoplamiento
- 7: Objetos metálicos varios cercanos al lugar
- 8: Interferencias de impulsos
- 9: Ondas electromagnéticas
- 10: Corrientes parásitas en el sistema tierra

Como podemos observar en esta última figura, en ella se incluyen distintas fuentes de interferencia. Dichas perturbaciones o interferencias electromagnéticas son un reto importante en lo que se refiere a la medición de las DP, ya que pueden falsear en gran medida los valores medidos. En las figuras 2 y 3, anexas se representan las fuentes típicas de interferencias que afectan a los equipos de medida de DP.

La norma UNE-21313 clasifica las interferencias en:

- a. Perturbaciones en principio independientes de la tensión aplicada al objeto a ensayar. Son básicamente las de procedencia exterior al equipo ensayado.
- b. Perturbaciones ligadas a la fuente de la tensión de prueba. Son básicamente las que tienen su origen en el propio equipo de ensayo y generalmente crecen con el aumento de la tensión de ensayo.

Por lo tanto, es preciso:

- Detectar estas perturbaciones, distinguiéndolas de las DP, es decir, sin confundir unas con las otras.
- Determinar su valor equivalente a una DP, o sea, medir el valor de la carga aparente q que tendrían si fueran realmente DP.
- Eliminarlas totalmente o en la mayor parte posible, sin que esta eliminación afecte a la medición correcta de las DP.

Los sistemas y métodos para eliminar estas perturbaciones son básicamente:

- filtros pasa-banda (ancha o estrecha) intercalados en la conexión entre la impedancia de medida « Z_m » y el equipo de instrumentos de medida « M ». Estos filtros «depuran» la señal captada en bornes de « Z_m ».
- impedancia de filtro « Z » colocada a la salida de la fuente de alta tensión para amortiguar las perturbaciones procedentes de esta fuente de alimentación.
- filtro en la entrada de la tensión auxiliar al equipo de instrumentación « M » para amortiguar las perturbaciones y/o armónicos procedentes de la red de baja tensión.
- antena para captar las interferencias de radiofrecuencia (RF) y mediante circuitos lógicos determinar su naturaleza y eliminarlas de los circuitos de medida
- circuitos lógicos que según la polaridad de los impulsos en el condensador de acoplamiento « C_k » y en el objeto a probar (condensador « C_a ») determinan si son DP (polaridad diferente) o si son perturbaciones (misma polaridad).

Cuando se trata de DP de valores pequeños los recursos explicados para eliminar las perturbaciones e interferencias pueden resultar insuficientes. En estos casos el ensayo se realiza dentro de un recinto blindado a manera de jaula de Faraday con todas las masas conductoras conectadas a tierra. Eso además de los otros recursos nombrados, en especial el filtro « Z » amortiguador de las perturbaciones provenientes de la fuente de alimentación de alta tensión.

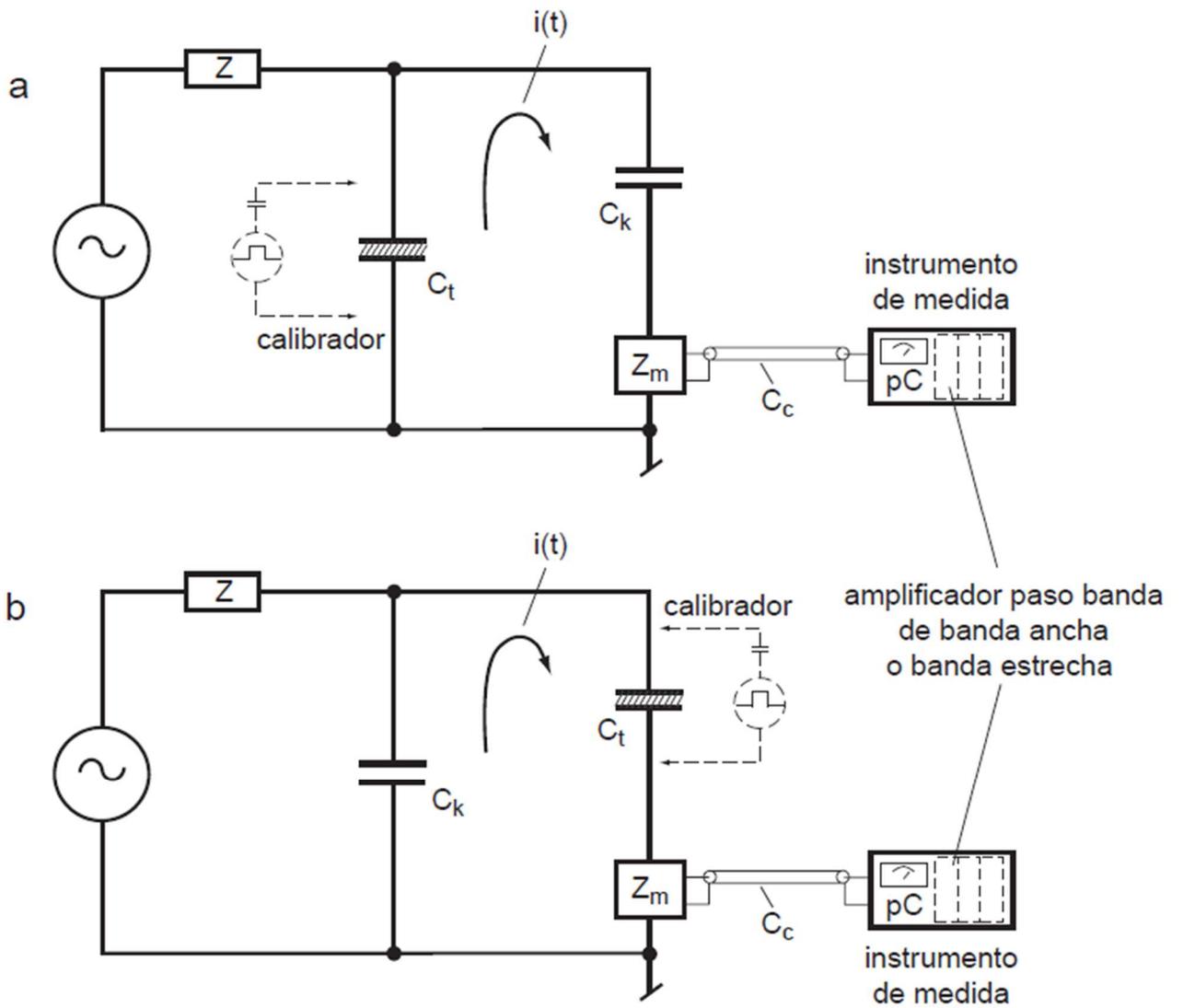


Imagen 8. Circuito con distintas fuentes de interferencia

A continuación, y una vez habiendo introducido un circuito básico de prueba de DP, analizamos el circuito utilizado para este trabajo, así como los distintos elementos que lo componen.

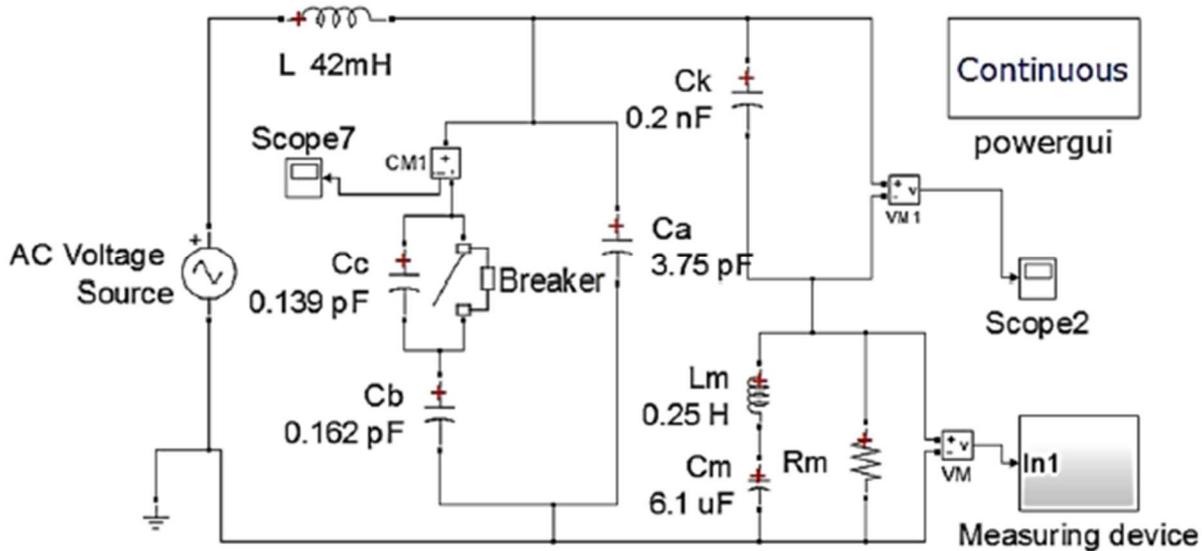


Imagen 9. Circuito para la simulación de DP empleado en Simulink

Empezaremos por describir las distintas partes que componen este circuito:

- La Bobina L de 42mH representa la resistencia que presenta la descarga
- Cm y Lm representan la cavidad rellena de aire y Rm, en paralelo a éstos, hace referencia a la conductividad a través y alrededor de dicha cavidad
- Justo por encima, la segunda parte del aislamiento tanto por encima como por debajo de la cavidad está modelizada por Ck, que representa la permitividad de esta parte del aislamiento.
- El resto del aislamiento está modelado por Cb, Ca y Cc.

Una vez que se cierra el interruptor Breaker, éste lo que hace es simular el cortocircuito que se origina en el aire produciendo así una ruptura dieléctrica.

Para la medición de las DP se utiliza un equipo de medida <<In1>>, que mirándolo más de cerca tiene el siguiente aspecto:

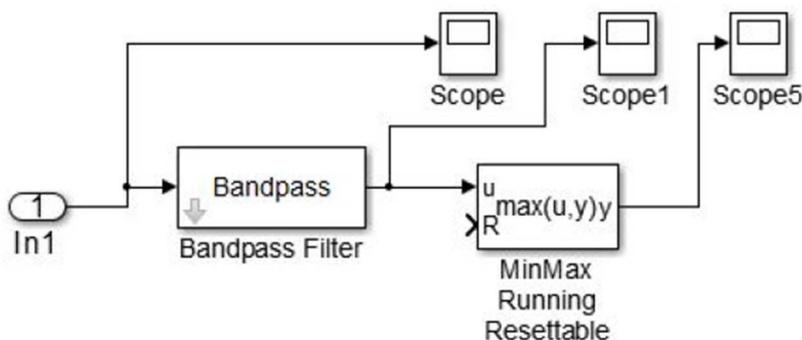


Imagen 10. Equipo de medida de DP perteneciente al circuito anterior

Tal y como se puede observar, consta de un filtro de paso de banda (band-pass filter) y un detector de pulsos para obtener los pulsos máximos o picos de intensidad, donde el filtro de paso de banda posee las siguientes características:

- Límite inferior de frecuencia: 70kHz
- Límite superior de frecuencia: 320kHz
- Ancho de banda: 250kHz
- Ganancia de paso de banda: 1

Las medidas de DP pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Medidas de DP de banda ancha
- Medidas de DP de banda estrecha

Estas se realizarán mediante un instrumento de medida de banda ancha y de banda estrecha respectivamente. Dichas formas de medida pueden distinguirse basándose en la norma IEC 60270 empleando el ancho de banda $\Delta f = f_2 - f_1$, siendo f_1 el límite de frecuencia inferior y f_2 el límite de frecuencia superior.

Por tanto, aplicando esto último distinguimos entre:

- Medidas de DP de banda ancha cuando:
Límite de frecuencia inferior: $30\text{kHz} < f_1 < 100\text{kHz}$
Límite de frecuencia superior: $f_2 < 500\text{kHz}$
Ancho de banda: $100\text{kHz} < \Delta f < 400\text{kHz}$
- Medidas de DP de banda estrecha cuando:
Frecuencia central f_0 : $50\text{kHz} < f_0 < 1000\text{kHz}$
Ancho de banda: $9\text{kHz} < \Delta f < 30\text{kHz}$

En el caso de que se den múltiples picos muy próximos los unos con los otros, utilizar un instrumento de banda estrecha puede provocar un error de superposición.

Por otro lado, los instrumentos de banda ancha evitarían esta situación, pero en su lugar, su utilización podría provocar ruido adicional.

Como el equipo de medida empleado en este caso se ha creado de forma general, éste se modeliza como un equipo de medida de banda ancha.

8.2 Análisis de resultados

Una vez se ha puesto la simulación del circuito anterior en marcha, se lleva a cabo el fenómeno de las DP.

En la siguiente imagen, y para una frecuencia cualquiera, empleada simplemente para comprobar que la simulación se ha desarrollado correctamente, podemos observar en los puntos rodeados en color azul, dónde se da el fenómeno que queremos analizar.

El primer gráfico representa el voltaje en la descarga y el segundo gráfico, la intensidad, mientras que el tercer gráfico expresa la tensión aplicada al circuito.

Efectivamente, como se veía en la teoría previa, al ocurrir la descarga, la intensidad presenta un pulso, coincidente con una bajada súbita en el voltaje.

Éste último permanece constante durante un mínimo periodo de tiempo hasta crecer de nuevo a un valor mayor que el que tenía previamente a la descarga parcial, y poco a poco va reestableciéndose hasta alcanzar este último valor.

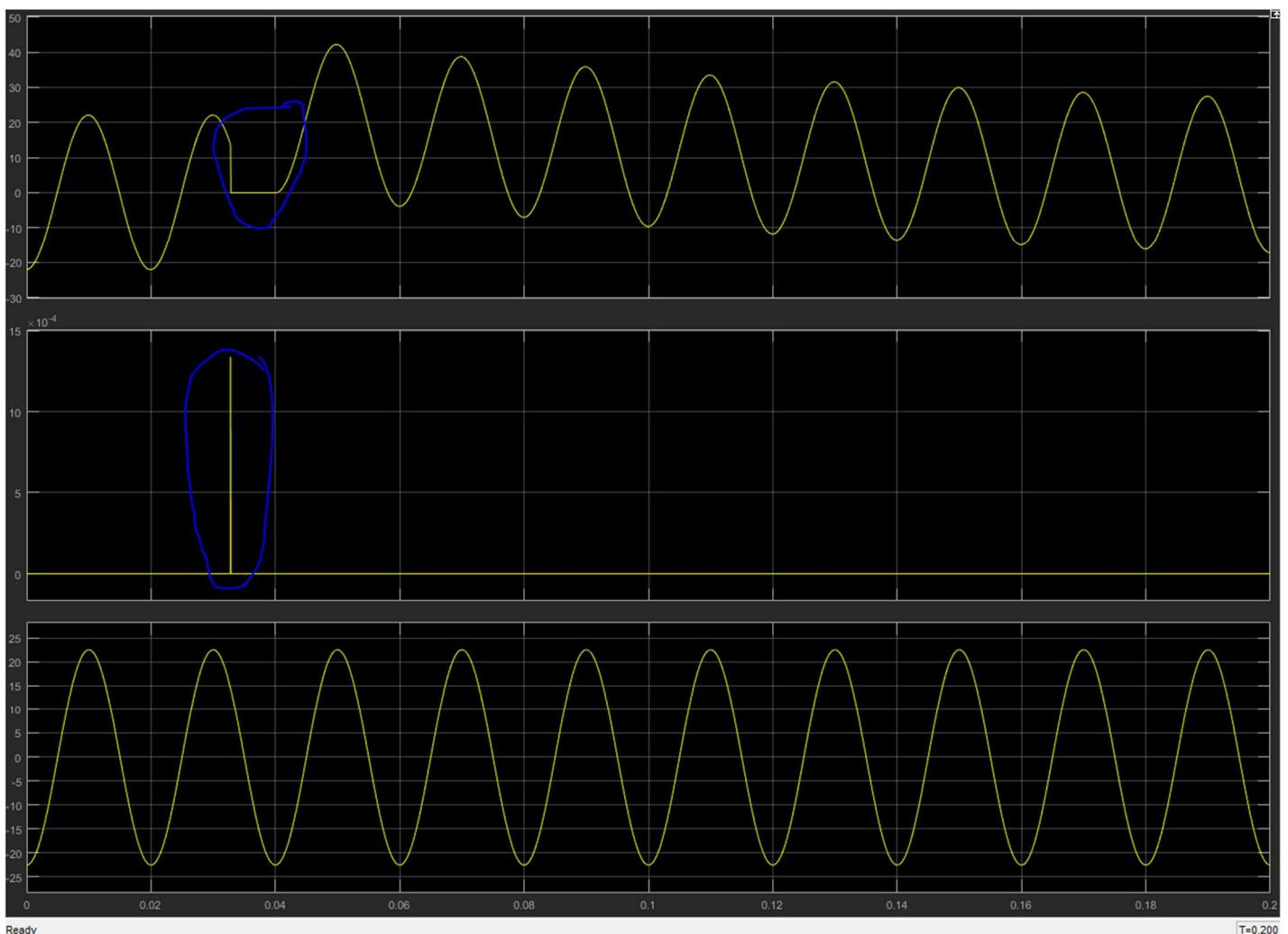


Imagen 11. Descarga parcial aleatoria

Para un periodo de $T=0,02$ s y un tiempo de simulación de $t=0,07$ s, cerrando el Breaker o interruptor en $t=2/61$ s y $t=2/31$ s, obtenemos la siguiente gráfica:

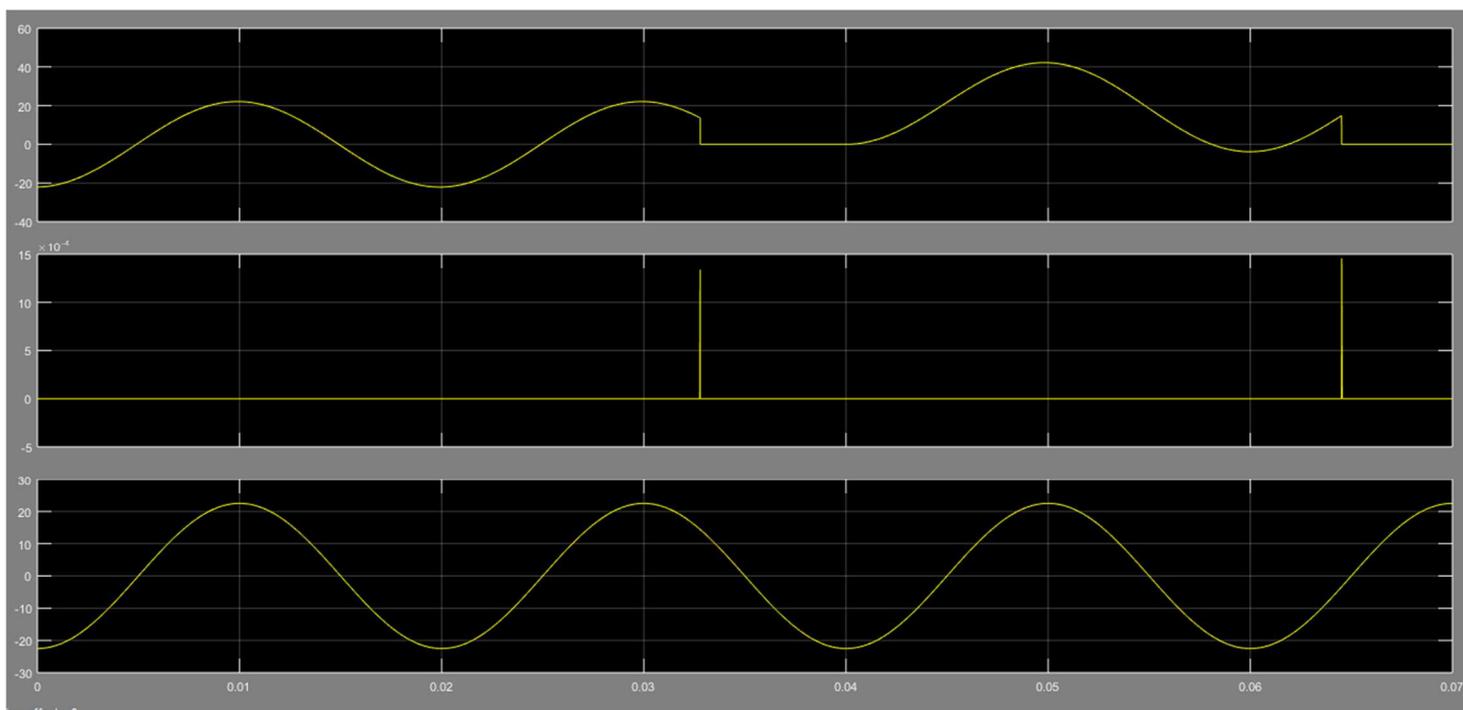


Imagen 12. Gráfica con dos DP en un tiempo de 0,7s

Como ya se ha mencionado anteriormente, al cerrar el Breaker lo que se hace es simular el cortocircuito que se produciría en el dieléctrico que se tenga entre las placas del condensador (aire), provocando de esa manera la ruptura dieléctrica y la consecuente descarga parcial interna.

Podemos observar que el primer pulso posee un valor algo menor que el segundo, dado que este primer pico se da cuando la senoide de la tensión comienza su descenso, mientras que el segundo pico se da cuando dicha senoide empieza a ascender hacia el punto máximo.

Esto es posible observarlo mejor mirando más de cerca cada pico.

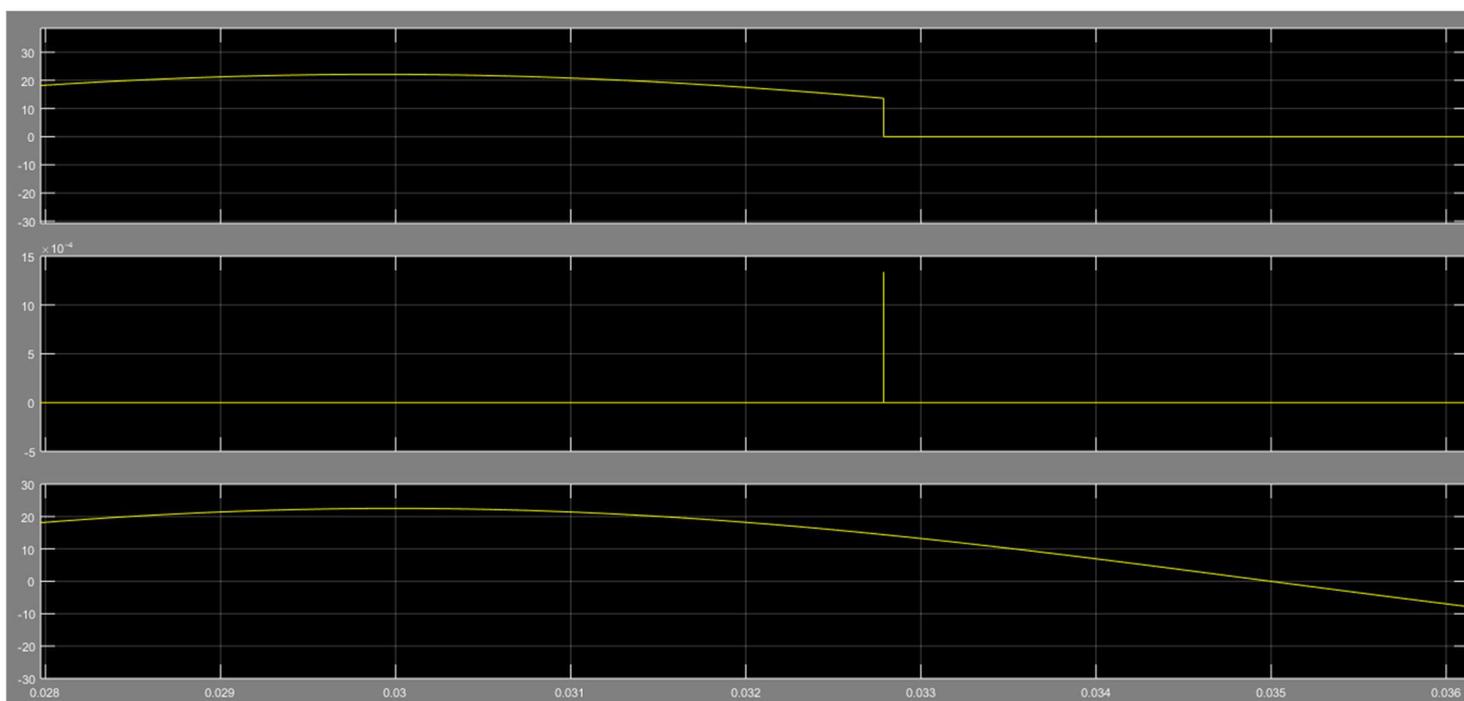


Imagen 13. Zoom con la primera DP en 0,7s

En la gráfica del primer pico vemos como la tensión interrumpe su trayectoria en su descenso, mientras que en el segundo ésta se interrumpe en el momento del ascenso de la sinusoide de tensión:

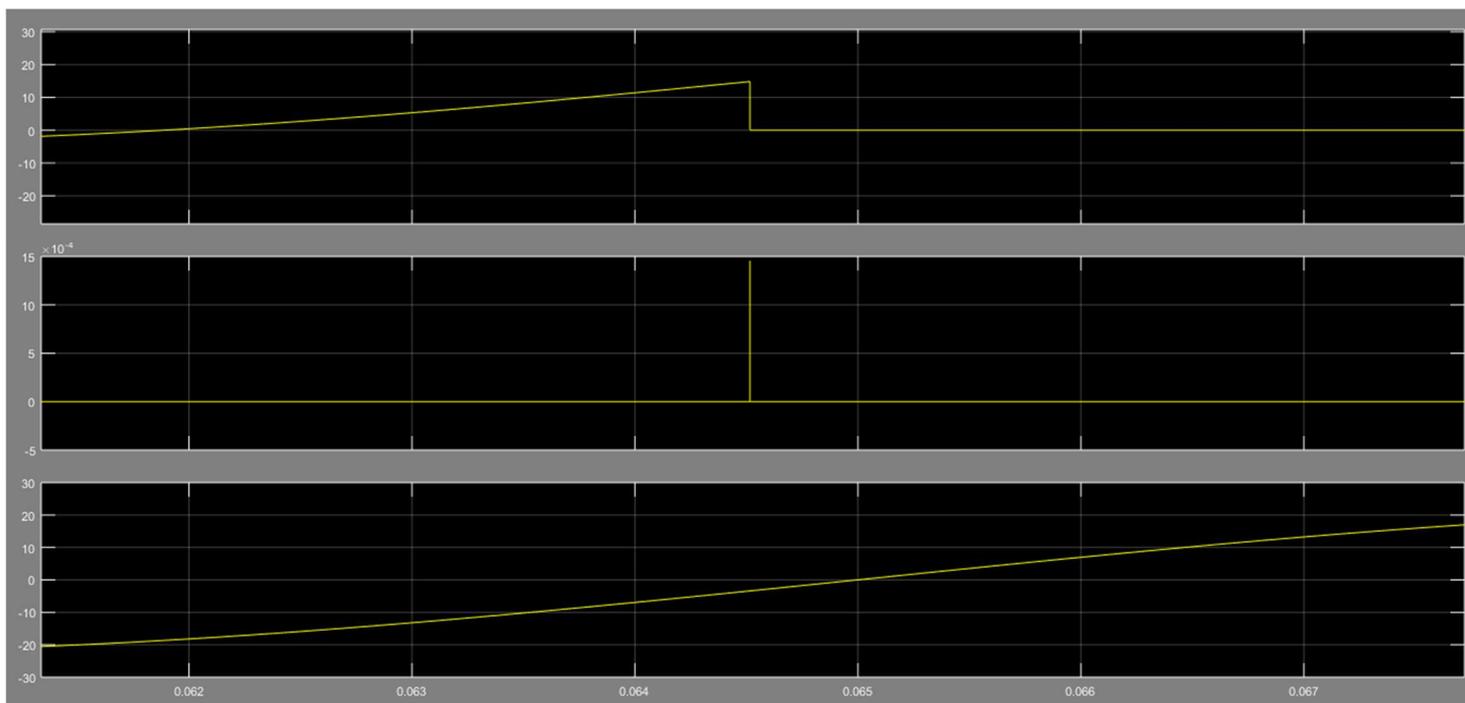


Imagen 14. Zoom de la segunda DP en 0,7s

A continuación, se aumenta considerablemente el tiempo de simulación a $t=1,5s$ y se aumenta la frecuencia. Vemos que en este caso tanto la sinusoide de la gráfica 1 como la de la gráfica 3 se presentan mucho más próximas entre sí que en el caso anterior. En esta ocasión se ha cerrado el Breaker o interruptor en un único punto en el tiempo y se puede observar como el pico esta vez es hacia abajo, a diferencia de en las gráficas anteriores que se trataba de un pico "positivo" (hacia arriba). Esto se debe a que el momento en el se ha producido el cierre del Breaker el valor de la tensión era negativo, y en consecuencia el pulso de corriente también lo es.

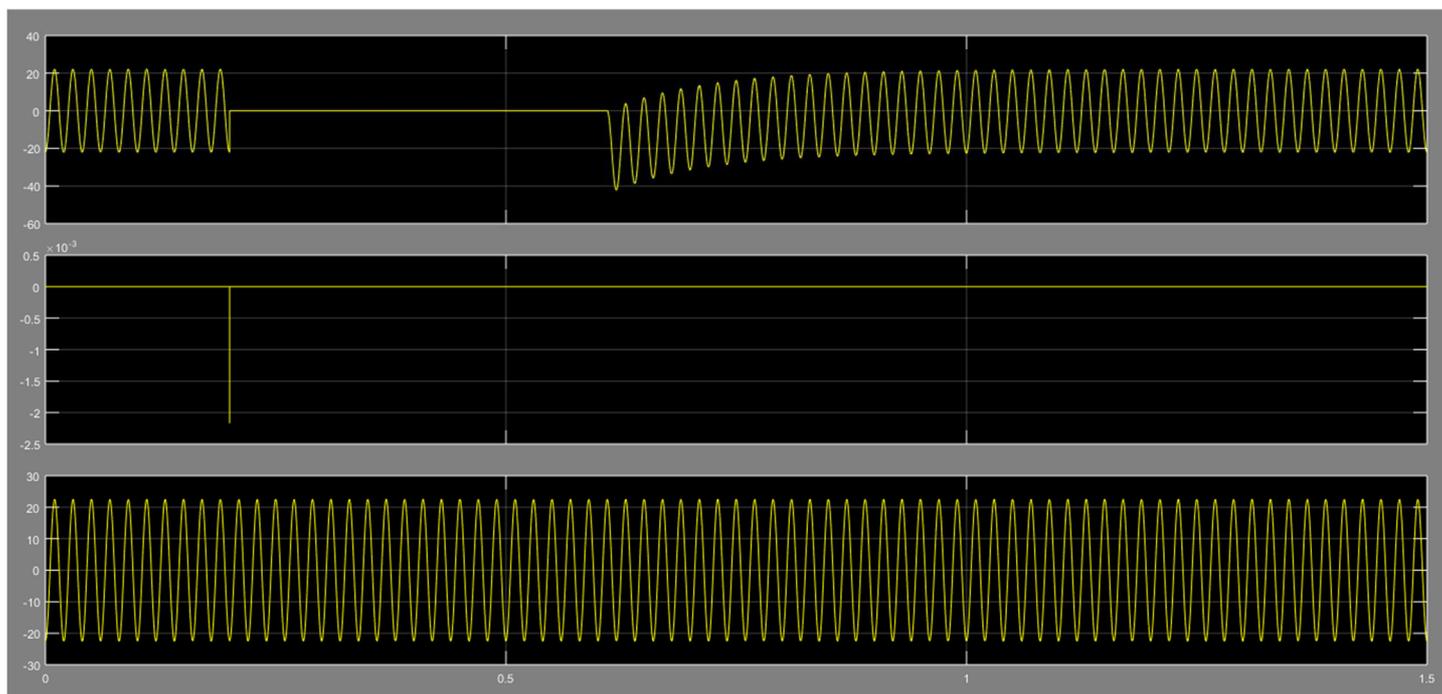


Imagen 15. Gráfica de una DP en un tiempo de 1,5s

En la gráfica que se observa a continuación, la única diferencia que se da con la anterior reside en el hecho de que se ha cerrado el Breaker en dos ocasiones, es decir, que se han producido dos descargas, dejando bastante espacio entre ambos pulsos de las descargas.

Como se puede ver, al haber dejado tiempo suficiente entre pulso y pulso, ambos dos poseen el mismo valor, dado que la tensión ha tenido espacio suficiente entre ambos para reestablecerse y en ambos casos coincide que a la hora de la descarga el valor de dicha tensión es negativo:

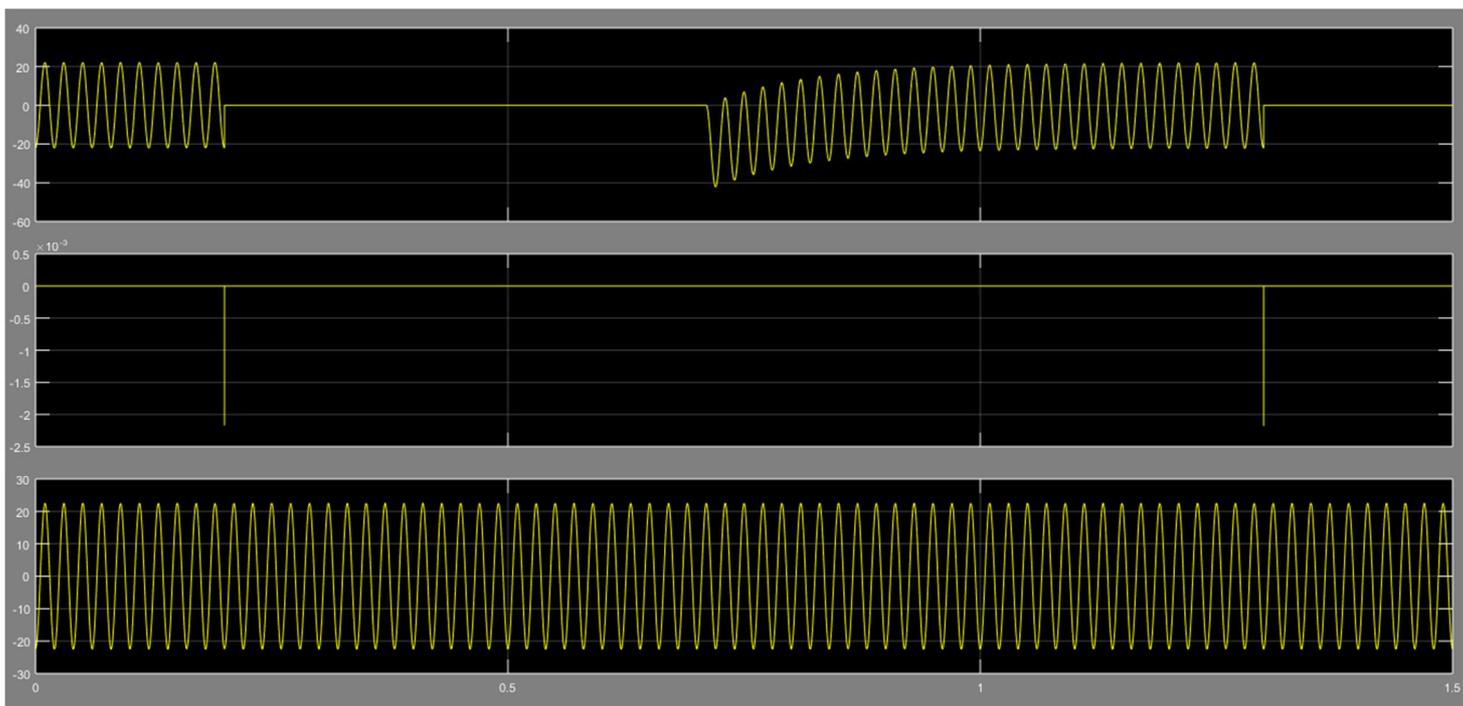


Imagen 16. Gráfica de dos DP en un tiempo de 1,5s

Si se aumenta aún más la frecuencia, como es el caso siguiente, en el que también se ha incrementado el tiempo de simulación a $t=2s$, se observa como las sinusoides cada vez son más próximas entre sí, haciendo más complicada la lectura de los valores de las tensiones.

En este caso se ha cerrado el Breaker o interruptor en una única ocasión, para la cual observamos el pulso negativo correspondiente a la corriente coincidente con el valor negativo de la tensión en ese instante.

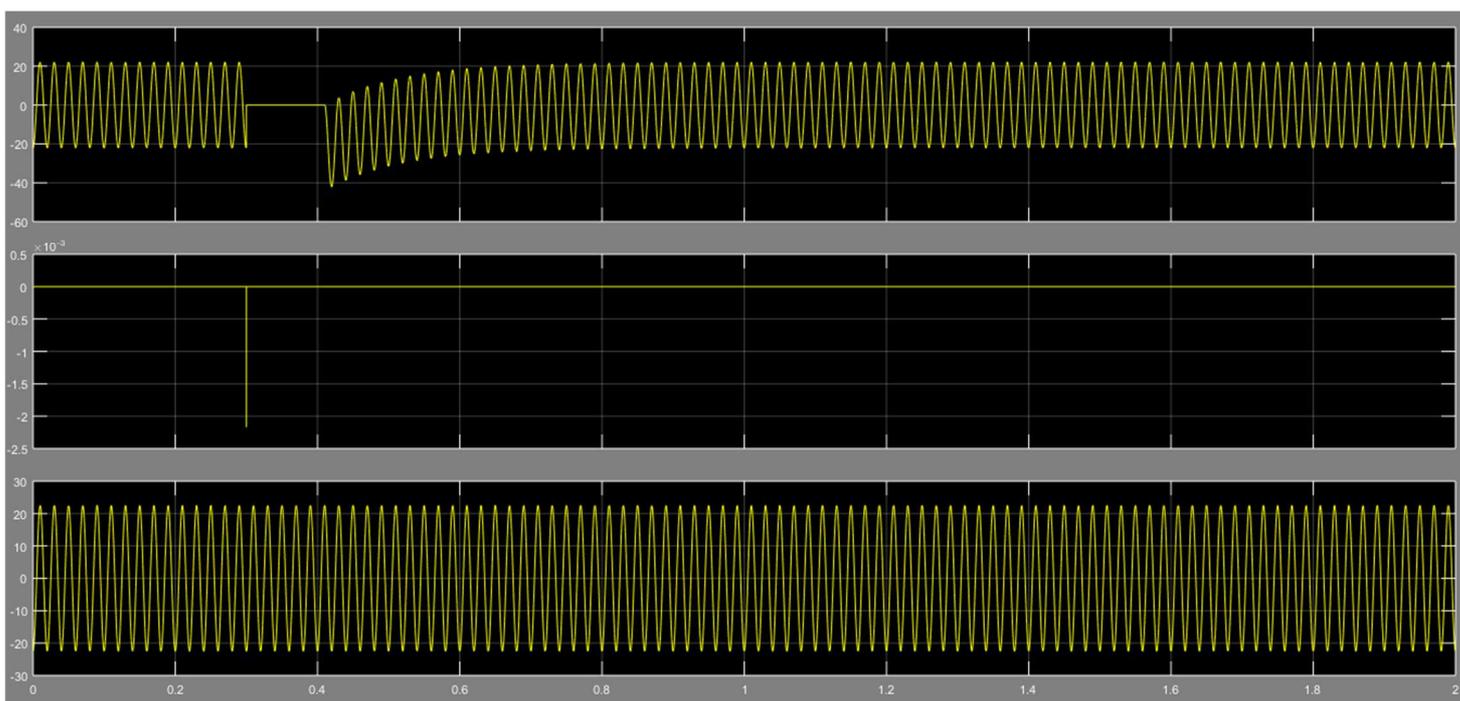


Imagen 17. Gráfica de una DP para un tiempo de 2s

Breve conclusión del método eléctrico

Con respecto a las medidas, para el adecuado control del estado de un aislamiento, es conveniente repetir la medida de las DP en intervalos de tiempo a fin de comparar los valores obtenidos con los de medidas anteriores, por ejemplo, la medición hecha en la fábrica al finalizar la construcción, y antes de la entrega.

Esto quiere decir que las posteriores medidas de DP se harán cuando aquel elemento o aparato esté instalado y en servicio. En muchas ocasiones se trataría de hacer una medida en el lugar de la instalación (medida «in situ»). Ahora bien, en la práctica, en muchos casos esta medida «in situ» es difícil o imposible de realizar.

En efecto, requiere que el objeto a probar (transformador de potencia o de medida, aparato de maniobra, cable, etc.) esté fuera de servicio y además desconectado del resto de la instalación. Esto es cada vez más difícil debido a la creciente exigencia respecto a la continuidad del servicio. La desconexión y posterior reconexión puede ser en ocasiones especialmente laboriosa.

En muchos casos se presentan problemas de espacio para colocar el equipo de medida en el lugar donde está instalado el objeto a probar, sea por las dimensiones del condensador de acoplamiento «Ck» y/o de la fuente de tensión o bien por las distancias eléctricas necesarias a las otras partes de la instalación, ya que se trata de un ensayo en alta tensión.

El ensayo en la fábrica o un laboratorio se puede hacer dentro de un recinto blindado, que permite obtener resultados más precisos.

En las medidas «in situ», las interferencias de diversas procedencias, disminuyen la precisión de la medida y pueden llegar a hacerla poco comparable con la hecha dentro de un recinto blindado.

Para solventar estas dificultades, se ha desarrollado el procedimiento de evaluación del nivel de DP llamado procedimiento no eléctrico, que la indicada norma UNE-21313 (CEI-270) contempla en los puntos 2.4 y 3.4.1..y que es la otra posibilidad que se da para desarrollar la simulación de este TFG.

9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS Y DIAGRAMA DE GANTT

En este apartado se describe el plan de trabajo que se ha seguido hasta la entrega del TFG, en agosto de 2017. Se ha trabajado de forma regular y continuada. Académicamente no se han tenido en cuenta los fines de semana como festivos y la única interrupción del proyecto ha sido la temporada de exámenes del segundo cuatrimestre, comprendida entre el 15 de mayo y el 3 de junio.

9.1 Definición de tareas

Equipo de trabajo: Deiene Artiagoitia Fernández y Felipe Uriondo Arrue

Fecha de inicio del TFG: 3 de abril de 2017

Fecha de finalización del TFG: 20 de agosto de 2017

Duración: 139 días

Definición de paquetes de trabajo y tareas:

Tarea 1: Investigación. Duración: 15 días

T 1.1: Búsqueda de fuentes de información

T 1.2: Análisis y estudio de la información encontrada

T 1.3: Selección de fuentes de información

Tarea 2: Simulación. Duración: 25 días

T 2.1: Análisis de alternativas de simulación

T 2.2: Selección del simulador y de herramienta de cálculo

T 2.3: Diseño del modelo de la red

T 2.4: Construcción del modelo

T 2.5: Ejecución de la simulación

Tarea 3: Resultados. Duración: 16 días

T 3.1: Análisis de los resultados obtenidos

T 3.2: Procesamiento de datos

T 3.3: Extracción de conclusiones

Tarea 5: Redacción de la memoria. Duración: 83 días

Hitos: Reunión de lanzamiento del proyecto. Se da comienzo al TFG. Seguimiento con reuniones periódicas cada dos semanas aproximadamente y con una reunión final de cierre del TFG.

La tarea 2 se considera crítica por ser la piedra angular del trabajo. Será esencial prestar gran atención para su correcto cumplimiento.

9.2 Diagrama de Gantt

Diagrama de Gantt: El diagrama de Gantt es una herramienta gráfica que permite exponer el tiempo de realización de las diferentes tareas del proyecto, ordenadas cronológicamente, a lo largo de un tiempo de realización determinado.

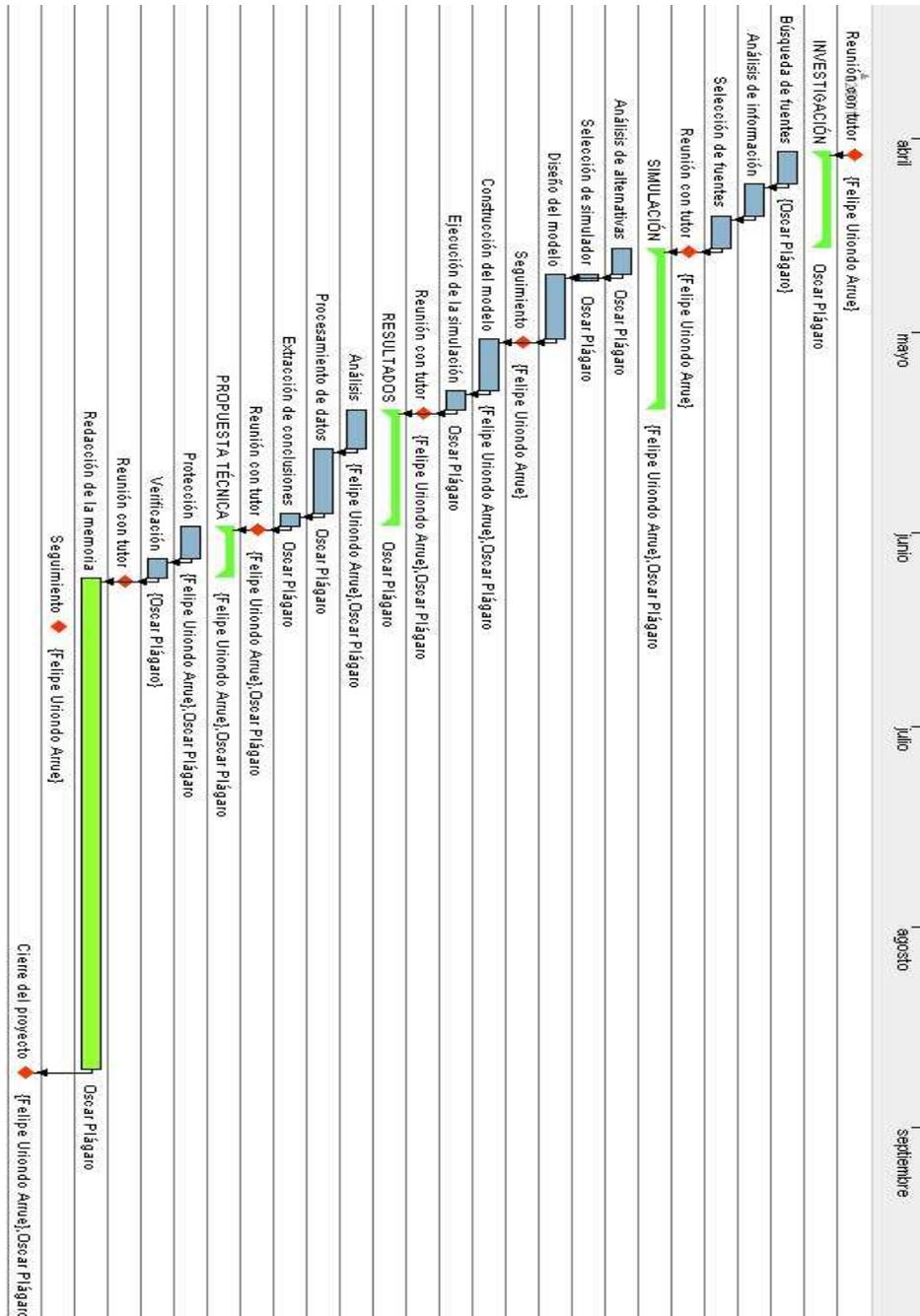


Imagen 18. Diagrama Gantt

10.Presupuesto

En este apartado se llevará a cabo el desglose de los diferentes apartados del presupuesto del trabajo realizado.

Para calcular el gasto total del trabajo hemos tenido en cuenta los siguientes subapartados: recursos humanos, amortizaciones de materiales y gastos.

Costes unitarios de recursos humanos

En la siguiente tabla se calculan los costes unitarios de cada miembro del proyecto, teniendo en cuenta los costes indirectos de cada uno.

Cargo	Coste unitario(€/h)
Director TFG	50
Ingeniero Junior	20

Tabla 1 .Costes unitarios de los recursos humanos

Costes previstos debido a amortizaciones

Son los costes realizados debido a material que constaba previamente antes del trabajo, y que debido a su uso en el proyecto se debe de realizar su respectiva amortización. En este apartado se incluye las herramientas de trabajo Matlab, Microsoft Office y el software asociado al dosímetro, los cuales, debido a sus usos anteriores, se consideran amortizados.

Descripción	Vida útil (sem)	Coste inicial (€)	Coste unitario (€/sem)
Ordenador portátil	330	480,00 €	1,45 €
Ordenador de sobremesa	330	850,00 €	2,58 €
Matlab 2014b	55	4.850,00 €	88,18 €
IEEE suscripción	55	5.000,00 €	90,91 €
GanttProject	400	- €	- €
Microsoft Office	220	100,00 €	0,45 €

Tabla 2 .Costes semanales debido a las amortizaciones

Gastos del trabajo

Son los gastos realizados en materiales que sirven en exclusividad para este trabajo, es decir, no podrán volver a ser utilizados.

Descripción	Coste(€)
Material de oficina	80,00 €
Conexión a Internet	50,00 €
Cd	35,00 €
Total Gastos	165,00 €

Tabla 3. Costes totales en materiales

Cálculo de costes finales

A continuación, se realiza el desglose de coste total final teniendo en cuenta el número de horas empleadas por los recursos humanos y las horas de utilización de los materiales amortizados.

Costes finales de recursos humanos

En la siguiente tabla se muestra el coste total de cada miembro del equipo teniendo en cuenta su participación en horas dentro del trabajo.

Cargo	Coste unitario (€/h)	Horas	Coste (€)
Director TFG	50,00 €	20	1.000,00 €
Ingeniero Junior	20,00 €	250	5.000,00 €
		Total h.int.	6.000,00 €

Tabla 4 .Costes desglosados de los recursos humanos

Costes finales de amortizaciones

Descripción	Utilización (sem)	Coste unitario (€/h)	Coste (€)
Ordenador portátil	8	1,45 €	11,64 €
Ordenador de sobremesa	6	2,58 €	15,45 €
Matlab 2014b	10	88,18 €	881,82 €
IEEE suscripción	6	90,91 €	545,45 €
GanttProject	2	0,00 €	0,00 €
Microsoft Office	8	0,45 €	3,64 €
		Total Amort.	1.458,00 €

Tabla 5. Costes desglosados de las amortizaciones

Resumen económico

Por último, en la tabla 28 se representa el gasto final del trabajo desglosado en las facetas más importantes dentro del presupuesto, a los que añadimos un 5 % en costes indirectos.

Concepto	Importe(€)
Recursos humanos	6.000,00 €
Recursos materiales	1.458,00 €
Gastos	165,00 €
Subtotal	7.623,00 €
Costes indirectos(5%)	381,15 €
Total	15.627,15 €

Tabla 6 .Costes desglosados y coste final del trabajo

Por lo tanto, el gasto final del trabajo asciende a **15.627,15 €**.

11.Análisis de riesgos

Adoptar una actitud proactiva en lo referente a los riesgos de todo proyecto es esencial para garantizar el éxito del mismo. Se deben barajar todos los posibles contratiempos a los que se verá expuesto durante el desarrollo del trabajo y evaluar los más relevantes o los de mayor impacto negativo.

Al tratarse de un TFG de simulación e investigación el mayor riesgo potencial al que se hace frente es el de la elección correcta de las herramientas y del modelo estudiado. Para hacer frente a estos riesgos, se llevó a cabo un análisis de alternativas donde se localizó la mejor opción y más segura. Por otro lado, se ha contado con la coordinación y dirección de un tutor, por lo que la verificación del modelo estudiado está garantizada por su amplia experiencia en el sector eléctrico.

12. Conclusiones

En este trabajo se ha descrito el fenómeno de las descargas parciales y se ha desarrollado un método para su simulación, con el fin de poder analizar dicho fenómeno.

Más concretamente se ha analizado el tipo de descarga parcial interna, que es aquella que resulta más difícil de detectar y con la cual hay que tener especial cuidado ya que es aquella que puede llegar a erosionar el material aislante que rodea, por ejemplo, a un conductor.

Para su simulación, se ha empleado y entendido cómo crear un circuito mediante el cual poder simular el fenómeno de la descarga parcial, y con dicho circuito, el propio usuario de Matlab ha podido provocar el número de pulsos de corriente que deseara mediante el cierre del Breaker o interruptor.

Como ya se ha mencionado anteriormente, este método de medición de descargas parciales no es el empleado en la vida cotidiana, debido a que los pulsos de corriente no resultan ser lo suficientemente notables como para poder detectar un fallo en el aislamiento, de manera que, en su lugar, se emplean picos de tensión o tensiones transitorias (TEV) para su detección.

En la práctica, la detección de descargas parciales resulta muy útil para determinar si el aislamiento de un equipo MV/HV está comenzando a degradarse. Por ejemplo, la Autoridad de Salud y Seguridad de Reino Unido ha publicado directrices aconsejando la comprobación regular de la actividad de descarga parcial en seccionadores mecánicos.

13.Referencias

- Web IEEE XPLORE:
<http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=PARTIAL%20DISCHARGES>
- Schneider Electric: Medición del nivel de Descargas Parciales
<http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/General/pt-069c.pdf>
- Omicron Energy:
<https://www.omicronenergy.com/es/aplicaciones/pruebas-y-monitoreo-de-transformadores-de-potencia/diagnostico-analisis-de-descargas-parciales-en-transformadores-de-potencia/#contact-menu-open>
- Amperis:
<https://www.omicronenergy.com/es/aplicaciones/pruebas-y-monitoreo-de-transformadores-de-potencia/diagnostico-analisis-de-descargas-parciales-en-transformadores-de-potencia/#contact-menu-open>