

# Trabajo Fin de Grado

Cálculo del voltaje de ruptura en un aislador mediante el método de elementos finitos (M.E.F.) en tres dimensiones.

Measurement and evaluation of the inception voltage in glass suspension insulator using the three-dimensional finite element method (F.E.M.).

Autor

Gonzalo Ferrer Pérez

Director

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad de Zaragoza  
2018



**DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. \_\_\_\_\_,

con nº de DNI \_\_\_\_\_ en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, \_\_\_\_\_

Fdo: \_\_\_\_\_

## Objetivo

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) propone la ampliación de unas prácticas consistentes en los estudios de los fenómenos asociados a la ruptura dieléctrica. Las prácticas se realizan en el departamento de Ingeniería Eléctrica empleando el laboratorio de Alta Tensión. Las prácticas están dentro de las actividades docentes de 3 asignaturas, “Líneas eléctricas” en tercero del Grado de Ingeniería Eléctrica, “Simulación avanzada de sistemas eléctricos con fuentes renovables” del Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética y por último “Instalaciones eléctricas de alta y baja tensión” del Master Universitario en Ingeniería Industrial.

Las prácticas que se imparten en las asignaturas nombradas anteriormente se pueden dividir en dos fases, una primera fase de simulación en 2D mediante programas informáticos para el cálculo numérico de los modelos a estudiar y una segunda fase para llevar a cabo un experimento real en el laboratorio de Alta Tensión de lo estudiado y que posteriormente se comprueba por medio de la simulación.

En este trabajo se realizó la simulación en 3D de un aislador de suspensión de líneas eléctricas para el cual he tenido acceso a una licencia del programa OPERA 3D en su versión 13 (un programa de cálculo por medio de elementos finitos en 3D) que actualmente no se empleaba en ninguna actividad docente y por tanto estaba sin uso alguno y luego compruebo experimentalmente en el laboratorio los resultados numéricos.

Dicha simulación en 3D la comparo con lo que actualmente se hace en las prácticas descritas anteriormente, la simulación en 2D por medio del programa FEMM 4.2.

Los resultados obtenidos se usarán para ampliar los contenidos de las prácticas descritas anteriormente.

# Índice

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>5</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Antecedentes .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Fenómeno de ruptura dieléctrica en el aire.....</b>	<b>8</b>
<b>3. Método de elementos finitos.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1 FEMM 2D.....</b>	<b>12</b>
<b>3.2 OPERA 3D .....</b>	<b>13</b>
oPre-procesador .....	13
oTOSCA .....	13
oPost Procesador .....	13
<b>4. Modelización del aislador objeto de estudio.....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 AUTOCAD .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2 FEMM 2D.....</b>	<b>15</b>
<b>4.3 OPERA 3D MODELLER .....</b>	<b>16</b>
<b>5. Simulación numérica .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1 FEMM 2D.....</b>	<b>18</b>
<b>5.2 Opera 13.....</b>	<b>20</b>
MODELLER.....	20
POST-PROCESSOR.....	21
<b>6. Valores experimentales y comparativa .....</b>	<b>25</b>
<b>Configuración 1 .....</b>	<b>27</b>
<b>Configuración 2 .....</b>	<b>28</b>
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>30</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>32</b>
<b>Anexo I.....</b>	<b>33</b>
-Script Opera 3D .....	33
<b>Anexo II.....</b>	<b>36</b>
-Script FEMM 2D .....	36

## Lista de Figuras

Fig. 1 Criterio de generación streamer.....	9
Fig. 2 Campo eléctrico no uniforme punta-plano .....	10
Fig. 3 Corte transversal de un aislador.....	14
Fig. 4 Datos catálogo aislador U70BL.....	14
Fig. 5 Modelo exacto en 3D Autocad .....	15
Fig. 6 Modelo exacto en 2D Autocad .....	15
Fig. 7 Modelo Simplificado en Autocad.....	15
Fig. 8 Definición tipo problema FEMM 2D .....	16
Fig. 9 Superficie mallada FEMM 2D .....	18
Fig. 10 Potencial modelo FEMM 2D.....	19
Fig. 11 Superficies de análisis y aislador.....	21
Fig. 12 Datos de generación de la simulación en 3D.....	21
Fig. 13 Aislador 3D en el post-procesador .....	22
Fig. 14 Comprobación de voltaje alrededor del aislador .....	22
Fig. 15 Campo eléctrico alrededor del aislador .....	23
Fig. 16 Recorrido inicial del script original .....	23
Fig. 17 Recorrido del script modificado .....	24
Fig. 18 Transformador de alta tensión .....	25
Fig. 19 Sistema de Control del transformador .....	26
Fig. 20 Terminal de alta tensión aislado .....	26
Fig. 21 Aislador conductor y herrajes.....	27
Fig. 22 Montaje configuración 1 conductor coplanario.....	27
Fig. 23 Montaje configuración 1 conductor transversal .....	28
Fig. 24 Montaje configuración 2.....	28

## **Lista de Tablas**

Tabla 1 Valores de materiales FEMM 2D .....	16
Tabla 2 Valores Condiciones de contorno FEMM 2D .....	16
Tabla 3 Materiales en Opera3D .....	17
Tabla 4 Condiciones de contorno Opera 3D.....	17
Tabla 5 Formato fichero entrada para KevalInc .....	19
Tabla 6 Resultados simulación 2D .....	20
Tabla 7 Formato fichero 3D para KevalInc .....	24
Tabla 8 Resultados de la simulación 3D.....	24
Tabla 9 Resultados conductor coplanario .....	27
Tabla 10 Datos conductor transversal.....	28
Tabla 11 Resultados Aislador 1 .....	28
Tabla 12 Resultados Aislador 2 .....	28
Tabla 13 Resumen de resultados.....	29

## 1. Antecedentes

Durante los años 2008-2010 un equipo de profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza realizó un proyecto de investigación en colaboración con el fabricante de transformadores secos ABB (Proyecto EOLIA). Entre las actividades que se llevaron a cabo en el mismo se encontraba el análisis en 3D de los campos eléctricos asociados a un transformador seco así como el estudio de los fenómenos de ruptura eléctrica asociados a él.

Durante el proyecto de investigación se desarrolló un programa denominado KevalInc (denominado así por su autor, el profesor Miguel Samplón) cuyo objetivo era el cálculo numérico el voltaje de ruptura en estructuras electrostáticas cuyo aislante era el aire basándose en el criterio de Raether-Merck.[KEV 08]

Los valores numéricos necesarios de intensidad de campo eléctrico,  $\vec{E}$ , para realizar los cálculos de ruptura dieléctricas mediante KevalInc proceden de programas que resuelven las ecuaciones de Maxwell [REI 96] en 2 dimensiones (2D) o 3 dimensiones (3D) mediante el método de elementos finitos. [USO 07]

La aplicación de KevalInc junto con un programa de método de elementos finitos en 2D (FEMM 4.2) se incluyeron en los contenidos de una práctica sobre ruptura dieléctrica en aparamenta de alta tensión que comenzó a realizarse en el Master de Energías Renovables y Eficiencia Energética y que posteriormente se extendió al Grado de Ingeniería Eléctrica y al Master en Ingeniería Industrial de la Universidad de Zaragoza.

## 2. Fenómeno de ruptura dieléctrica en el aire

La ruptura dieléctrica es un fenómeno por el cual un material dieléctrico, material con muy alta resistividad, se convierte en conductor en condiciones excepcionales. Esto se debe a la polarización y posterior ionización de dichos materiales a causa de la existencia de campos eléctricos muy intensos. [TIP 06]

Los procesos de ruptura dieléctrica difieren considerablemente en función del estado de la materia (gas, líquido o sólido). La ruptura dieléctrica en un gas se produce básicamente debido al fenómeno de ionización conocido como multiplicación en avalancha. Este proceso comienza con el choque que experimenta un primer electrón libre, que se encuentra junto al cátodo y es acelerado por un campo eléctrico  $\bar{E}_{Bk}$  (campo eléctrico de *background*), con una molécula neutra. El choque provoca el arranque de uno o varios electrones generando un ion positivo, mucho más lento que el electrón y más pesado que este, que es atraído hacia el cátodo.

A lo largo del espacio entre los electrodos (en el que existe  $\bar{E}_{Bk}$ , y si este es mayor a 2,6 MV/m para el caso del aire), algunos electrones libres desaparecen por su recombinación con otras moléculas, pero otros pueden irse acumulando en la zona próxima al ánodo, generando una acumulación de electrones libres en forma de volumen esférico que da lugar a la aparición de un nuevo campo eléctrico  $\bar{E}_{AV}$  (campo creado por la distribución volumétrica de carga negativa). Este campo eléctrico puede llegar a ser de la misma magnitud que el campo original  $\bar{E}_{Bk}$ . [COO 03]

El criterio de Raether-Merck establece que cuando el nuevo campo creado,  $\bar{E}_{AV}$ , tiene la misma intensidad que el campo eléctrico  $\bar{E}_{Bk}$ , y el módulo de  $\bar{E}_{Bk}$  permanece igual o mayor que 0,5 MV/m, la avalancha de electrones puede alcanzar el ánodo.

Si esto ocurre, se producen la recombinación de los electrones del extremo de la avalancha, absorbidos por la superficie positiva de ánodo, y la aparición de un canal de plasma con carga positiva que regresa hacia el cátodo. Este canal se conoce como *streamer*. Cuando estas cargas positivas alcanzan el cátodo, dan lugar a un incremento rápido de conductividad por efecto térmico, que provoca el fenómeno de ruptura dieléctrica (cortocircuito entre cátodo y ánodo).

Para poder analizar matemáticamente este fenómeno debemos introducir el coeficiente de ionización  $\alpha$  y el coeficiente de recombinación  $\eta$ , que son propiedades del gas que dependen de la presión, la temperatura y de la intensidad del campo eléctrico aplicado. Estos coeficientes se determinan experimentalmente y son bien conocidos en el caso del aire. En particular se entiende que

$\alpha$  : es el coeficiente de ionización o de Townsend, y representa el número de choques ionizantes de un electrón por unidad de longitud recorrida. Tiene unidades de  $\text{m}^{-1}$ .

$\eta$ : es el coeficiente de recombinación, y representa el número de absorciones desionizantes de un electrón por unidad de longitud recorrida. Tiene unidades de  $\text{m}^{-1}$ .

Entonces, como los coeficientes de ionización y recombinación se definen como el número de partículas ionizadas o recombinadas por unidad de electrones que chocan y de distancia recorrida por ellos, el número de partículas ionizadas en una distancia diferencial  $dx$  es:

$$dn_x = n_x (\alpha - \beta) dx \quad [1]$$

donde  $n_x$  es el número de partículas ionizadas en un determinado punto. Integrando se obtiene el número de iones en función de la distancia recorrida por los electrones ionizantes:

$$n_x = e^{(\alpha - \beta)x} = e^{\bar{\alpha}x} \quad [2]$$

donde  $\bar{\alpha}$  se conoce como el coeficiente de ionización efectivo. Este valor es positivo en el aire a partir de un valor de campo eléctrico igual o superior a 2,6 MV/m.

Cuando  $n_x$  alcanza un cierto valor crítico, que Raether-Merck estimaron en  $10^8$ , la avalancha puede alcanzar el ánodo, generarse el canal de plasma y dar lugar al posterior cortocircuito. Este es precisamente el criterio de ruptura considerado para realizar los cálculos en el programa KevalInc. Es decir, *aquella diferencia de potencial o voltaje que cumpla que  $n_x = 10^8$  y  $E_{Bk} \geq 0,5 \text{ MV/m}$  en todos los puntos de una línea de campo entre ánodo y cátodo es la mínima para iniciar la ruptura entre los electrodos*. El cálculo de  $n_x$  se hace únicamente en las regiones en las que  $\vec{E} > 2,6 \text{ MV/m}$ , y por tanto en las que  $\bar{\alpha} > 0$ .

Así, si el campo eléctrico es aproximadamente constante en la región de cálculo (ej. en el interior de un condensador plano)  $\bar{\alpha}$  también lo será y  $n_x$  podrá calcularse directamente:

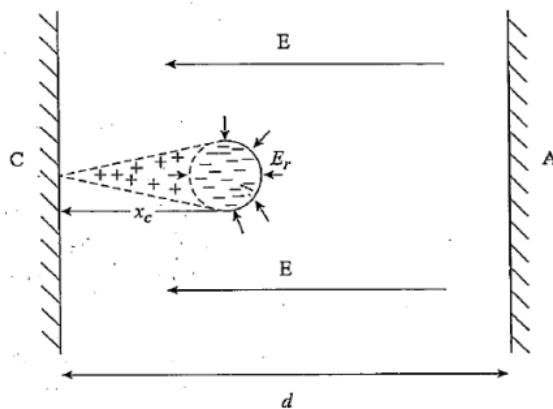


Fig. 1 Criterio de generación streamer

En la Fig.1  $\vec{E}$  es el campo de *background* y  $\vec{E}_r$  es el campo creado por la avalancha.

$$N_c = 10^8 = n_x = e^{\bar{\alpha} \cdot x_c} \quad [3]$$

$$\ln(10^8) = \ln(e^{\bar{\alpha} \cdot x_c}) \quad [4]$$

$$8 \cdot \ln(10) \simeq 18 = \bar{\alpha} \cdot x_c \quad [5]$$

Sin embargo si  $\vec{E}$  varía fuertemente en la región, la expresión anterior solo podrá calcularse así para tramos diferenciales, obteniéndose el  $n_x$  total por integración (integral de incepción) a lo largo de una línea de campo (de máximo gradiente de potencial). [COO 03]

$$\int_0^{x_c} \bar{\alpha}(x) dx \geq 18 \quad [6]$$

La integral se calcula en aquellos puntos de la línea de campo donde su módulo supera los 2,6 MV/m. Para que se produzca ruptura, además de cumplirse la condición de Raether-Merck, en el resto de la línea de campo en donde  $\bar{\alpha}$  es negativo el módulo del campo de background  $E_{Bk}$  debe ser superior a 0,5 MV/m. [USO 07]

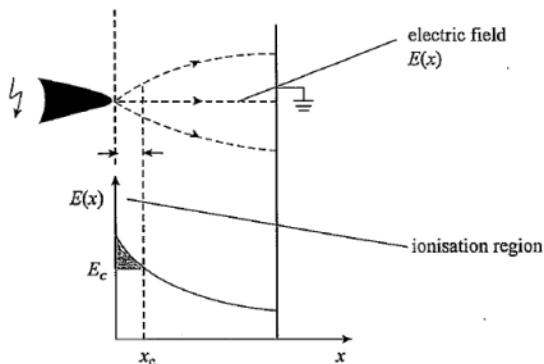


Fig. 2 Campo eléctrico no uniforme punta-plano

El programa KevalInc calcula la integral de incepción partiendo de los datos de las dos o tres componentes del vector  $\vec{E}$  procedentes del análisis mediante el MEF. A cada tramo de la línea de campo le asigna un valor de  $\bar{\alpha}$ , función del módulo de campo eléctrico en ese tramo, que multiplica por la longitud del tramo; la suma de todos los productos en los tramos en los que  $\bar{\alpha}$  es positivo los compara con 18. Si se alcanza ese valor dentro del espacio entre ánodo y cátodo, entonces da como posible la ruptura dieléctrica con la condición de que en el resto del espacio el valor del módulo de  $\vec{E}$  no descienda de 0,5 MV/m.

Al tratarse de sistemas lineales (el módulo del campo eléctrico es proporcional a la diferencia de potencial aplicada entre los terminales), KevalInc realiza los cálculos por unidad de diferencia de potencial. Podemos incluir en el programa los datos de  $\vec{E}$  a lo largo de una línea de campo eléctrico, obtenida cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 V entre ánodo y cátodo. KevalInc repite el proceso de cálculo de la integral [6] incrementando sucesivamente el valor de la diferencia de potencial (y, en consecuencia, los de  $\vec{E}$  en la misma proporción) hasta obtener un valor para la integral de 18. El resultado que se obtiene es entonces el número de veces que hay que multiplicar 1 V para que suceda la ruptura dieléctrica.

### 3. Método de elementos finitos

Para proceder al cálculo numérico del voltaje de ruptura, KevalInc necesita los valores del campo eléctrico, valores vectoriales, en el espacio a analizar.

En los últimos años se han desarrollado diferentes paquetes de software capaces de realizar estos cálculos mediante distintos procedimientos numérico-matemáticos (diferencias finitas, elementos finitos...). En concreto para la simulación en 2D he usado el programa FEMM 4.2 y para la simulación en 3D Opera 3D.

Un programa de simulación por medio del cálculo de elementos finitos consta de 3 módulos principales, el pre-procesador, el módulo de cálculo y el post-procesador. El pre-procesador que contiene el modelizador (*modeller*), es encargado de crear modelos geométricos desde cero, manipularlos y/o importarlos para que luego el módulo de cálculo pueda resolver el problema y generar los resultados necesarios para que finalmente el post-procesador (*post-processor* en Opera3D) pueda trabajar con ellos.

#### 3.1 FEMM 2D

Para realizar la simulación en 2D por medio de elementos finitos se ha usado el programa FEMM 4.2, siglas en inglés de Finite Element Method Magnetics desarrollado por David Meeker. Es un programa libre que puede ser descargado desde la página del autor. [FEM 18]

Este software FEMM es un conjunto de programas que sirven para la resolución de problemas electromagnéticos de baja frecuencia en 2D con simetría planar o axisimétricas. El programa es capaz de abordar problemas magnetostáticos lineales y no lineales, problemas magnéticos de armónicos lineales y no lineales, problemas electrostáticos lineales y problemas de flujo de calor en estado estacionario.

Sin embargo, en este caso el interés de este trabajo se ha centrado en los problemas electrostáticos lineales.

El programa FEMM está dividido en tres subprogramas:

- *El Programa principal* (femm.exe) que contiene al pre-procesador y post-procesador. Además contiene una interface de CAD para el diseño y/o importación de modelos en 2D en el cual se añaden las condiciones de contorno de cada región del modelo para poder resolver luego el problema.
- *Generador de superficies* (triangle.exe) es el responsable de generar el mallado de superficies generando triángulos para que posteriormente el módulo de cálculo pueda calcular la solución por el método de elementos finitos.
- Módulo de Cálculo encargado de realizar el cálculo numérico del problema electrostático. En este caso el módulo de cálculo empleado es ‘belasolv’. [FEM 15]

Una ventaja que ofrece FEMM es la integración en el núcleo del programa del lenguaje de programación LUA. El lenguaje de programación LUA es un lenguaje enfocado a una programación orientada a datos implementado como una biblioteca de lenguaje C. Lo potente de este lenguaje de programación es que no necesita de un programa principal (*main*) sino que funciona dentro de otro programa (como el caso de FEMM) o puede funcionar simplemente como anfitrión (*host*). [LUA 15]

### 3.2 OPERA 3D

Opera 3D es un conjunto de programas de pago, cuya licencia se renueva anualmente, desarrollado originalmente por la empresa británica Vector Fields Inc., actualmente propiedad de Cobham plc. [COB 18]

- Pre-procesador

El pre-procesador, que contiene *modeller*, se utiliza para crear, editar y/o exportar modelos tridimensionales en los que después de definir los materiales y las características de cada modelo se podrá resolver el problema magnético, electrostático, o del tipo que sea por medio del método de elementos finitos.

- TOSCA

En este proyecto para realizar estos cálculos he utilizado el módulo de cálculo TOSCA contenido dentro de Opera 3D, en su versión 13.

TOSCA es un módulo analítico dentro del programa Opera 13 que resuelve campos electrostáticos y magnetostáticos no lineales en problemas en 3D. [OPE 09\_I]

En los problemas electrostáticos TOSCA resuelve por el método de elementos finitos la primera ecuación de Maxwell [7] [REI 96]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho/\epsilon \quad [7]$$

junto con la ecuación

$$\vec{E} = -\nabla V \quad [8]$$

donde  $\rho$  es la densidad volumétrica de carga [ $C/m^3$ ] y  $\epsilon$  es la permitividad dieléctrica del medio [ $F/m$ ].

- Post Procesador

El Post-Procesador sirve para visualizar y realizar cálculos más allá de los resultados obtenidos en este caso por el módulo de cálculo de campo electromagnético TOSCA. Con el Post-Procesador se puede visualizar en 3D el modelo de elementos finitos generado desde la base de datos calculada por TOSCA. [OPE 09\_I].

## 4. Modelización del aislador objeto de estudio

Un aislador de suspensión es utilizado como medio aislante y soporte mecánico en el transporte de energía eléctrica por medio de líneas aéreas de transmisión. Tiene dos misiones principales: una mecánica, la de mantener y sujetar con seguridad el conductor y evitar su movimiento, y una eléctrica, la de aislar el conductor que está a un potencial respecto a la torre/soporte con potencial 0 unida a tierra.

Para este trabajo he escogido un aislador de suspensión rígido de vidrio, en concreto el modelo de tipo estándar U70BL.

La designación del aislador de esa forma atiende al criterio explicado a continuación:

- **U:** El aislador es válido para la formación de cadenas.
- **70:** Es la capacidad de soportar 70 kN de un esfuerzo mecánico sin sufrir rotura alguna.
- **BL:** La letra B indica que su acoplamiento es por medio de rótula y su alojamiento también es de rótula. La L indica que el paso es largo. [EDP 18]

Las dimensiones más representativas del modelo U70BL son el diámetro nominal D de 255 mm, el paso de 127 mm, la línea de fuga de 320 mm, la tensión soportada a frecuencia industrial en seco 70 kV y en mojado de 40 kV y la carga de rotura mecánica de 70 kN. A continuación se muestra un modelo del aislador con un corte transversal en la Fig. 3 [EDP 18] y la tabla de especificaciones más importantes del aislador U70BL resaltado con un cuadrado rojo en la Fig. 4. [SGD 18]

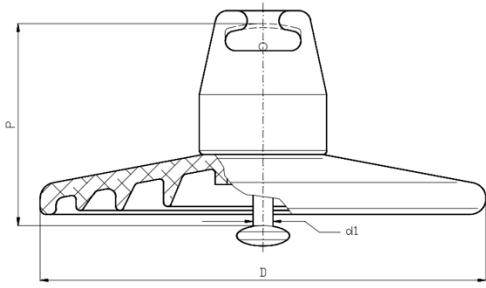


Fig. 3 Corte transversal de un aislador

Carga rotura mecánica (KN)	70	
Modelo catálogo	E-70-127	E-70-146
Clase IEC-305	U70BS	U70BL
<b>Datos Dimensionales</b>		
Paso (P) mm.	127	146
Diámetro (D) mm.	255	255
Línea de fuga mm.	320	320
Unión normalizada IEC 120	16A	16A
<b>Valores eléctricos</b>		
Tensión soportada a frecuencia industrial en seco (kV)	70	70
bajo lluvia (kV)	40	40
Tensión soportada a impulso de choque en seco (kV)	100	100
Tensión de perforación en aceite (kV)	130	130
<b>Información de embalaje</b>		
Peso neto aproximado por unidad (Kg.)	3,4	3,4
embalaje nº de un/caja madera	6	6

Fig. 4 Datos catálogo aislador U70BL

#### 4.1 AUTOCAD

Para la simulación en 3D he realizado un modelo tridimensional con las medidas reales del aislador U70BL mediante el programa de diseño Autocad 2017. Se puede comprobar en la Fig. 6 como las medidas más importantes corresponden a las del catálogo.

Para la simulación en 2D se ha cogido el mismo modelo diseñado en 3D y se ha generado un plano que corte al modelo para conseguir una proyección en 2D del modelo. Dicho modelo se guardó en la extensión .DXF para posteriormente exportarlo al *modeller* de FEMM 4.2 y en .SAT para exportarlo al *modeller* de Opera 3D.

A continuación se muestran ambos modelos, Fig. 5 en 3D y Fig. 6 en 2D.

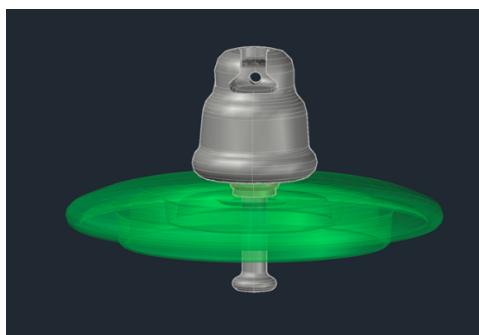


Fig. 5 Modelo exacto en 3D Autocad

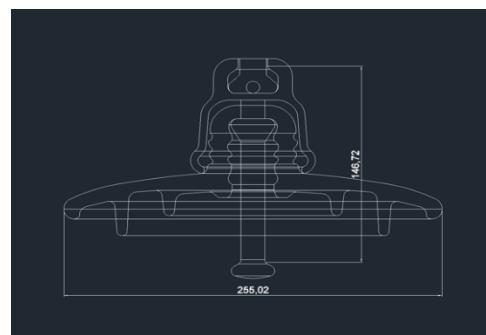


Fig. 6 Modelo exacto en 2D Autocad

#### 4.2 FEMM 2D

El primer paso es generar por medio del pre-procesador el modelo del aislador. En este caso se realizó una simplificación del primer modelo (Fig. 6) realizado ya que era demasiado complejo para poder generar la superficies de cálculo para el método de elementos finitos. Se realizó una simplificación por medio de AUTOCAD (Fig. 7) y se exportó en formato .DXF y se importó a FEMM.

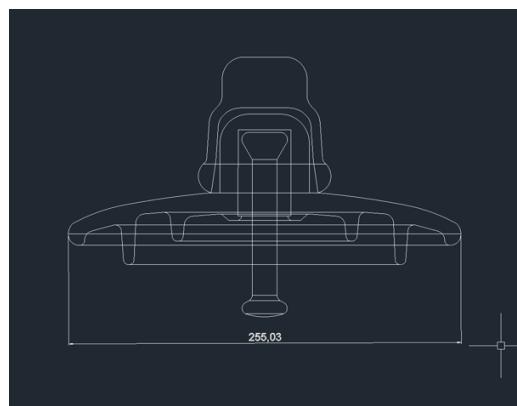


Fig. 7 Modelo Simplificado en Autocad

El primer intento para la importación no fue totalmente correcto por lo que tuve que revisar y arreglar errores en la importación de puntos y líneas del modelo.

Se crearon las diferentes características de cada material con sus permitividades absolutas y relativas y se impusieron las condiciones de contorno para la resolución del problema electrostático.

La simetría del modelo es simetría axisimétrica y las unidades de longitud son milímetros como se observa en la Fig. 8.

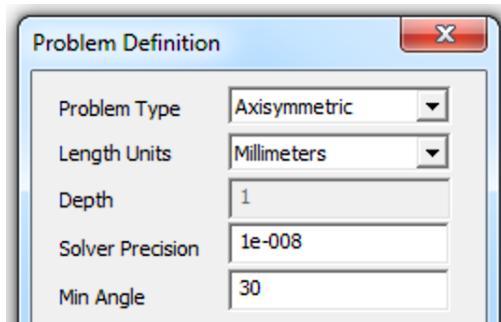


Fig. 8 Definición tipo problema FEMM 2D

A continuación, se presentan las Tablas 1 y 2 con los valores de los materiales y las condiciones de contorno respectivamente. En el caso del metal, como se puede observar en la Tabla 1, al tratarse de conductores ideales (volúmenes equipotenciales con campo en su interior igual a 0) no deben considerarse sus valores de permitividad.

Material	Permitividad relativa ( $r$ )	Permitividad relativa ( $z$ )
Metal	-	-
Vidrio	2,5	2,5
Aire	1	1

Tabla 1 Valores de materiales FEMM 2D

Condiciones de Contorno	Valor
Potencial 0	V0
Potencial 1	V1
Campo Tangencial	Etang

Tabla 2 Valores Condiciones de contorno FEMM 2D

#### 4.3 OPERA 3D MODELLER

El primer paso fue importar el modelo en 3D con extensión .SAT creado en Autocad en el *modeller* de Opera3D.

El primer obstáculo con el que me encontré a la hora de simular el primer modelo en 3D (Fig. 5) fue la generación de la superficie de mallado, la cual tenía muchos vértices y superficies irregulares. Esto se debió a las limitaciones en la licencia de estudiante del programa OPERA 3D, la cual solo permite trabajar como máximo con 50.000 nodos y, por tanto, no podía realizar el modelo con tanto detalle como imponía el modelo en CAD, que era muy preciso. La solución por la que opté finalmente fue rehacer el modelo en 3D

de una forma más simplificada adoptando soluciones viables que no afectaran a las dimensiones del modelo.

Así, procedí a eliminar la rosca que había en el interior del vástago con el aislamiento de cemento existente, el agujero del capuchón donde se aloja el pasador de seguridad, y también suavicé las curvas finales del capuchón.

Con todos estos cambios conseguí un modelo del aislador en 3D satisfactorio con el que finalmente trabajé, simulé y obtuve los resultados más adelante expuestos.

A continuación se adjuntan la Tabla 3 y 4 con los datos de los materiales y condiciones de contorno respectivamente. En el caso del metal, como se puede observar en la Tabla 3, al tratarse de conductores ideales (volúmenes equipotenciales con campo en su interior igual a 0) no deben considerarse sus valores de permitividad.

Material	Permitividad relativa	Conductividad [S/m]
Metal	-	-
Vidrio	2,5	0
Aire	1	0
Cemento	1,5	0
Aislador	2	0

Tabla 3 Materiales en Opera3D

Condiciones de Contorno	Voltaje
Metal 0	0
Metal 1	1

Tabla 4 Condiciones de contorno Opera 3D

## 5. Simulación numérica

Para la realización de este TFG la simulación numérica la he realizado por medio de programas de cálculo de elementos finitos debido a que todos los antecedentes se han realizado mediante este método.

### 5.1 FEMM 2D

Una vez que todo el modelo está definido con sus condiciones correctamente informadas en el pre-procesador se genera la superficie de mallado que en este caso creo 109.232 nodos, como se puede ver en la Fig. 9 con la diferencia de mallado en las 2 superficies esférica la interior con un detallado mayor que la exterior.

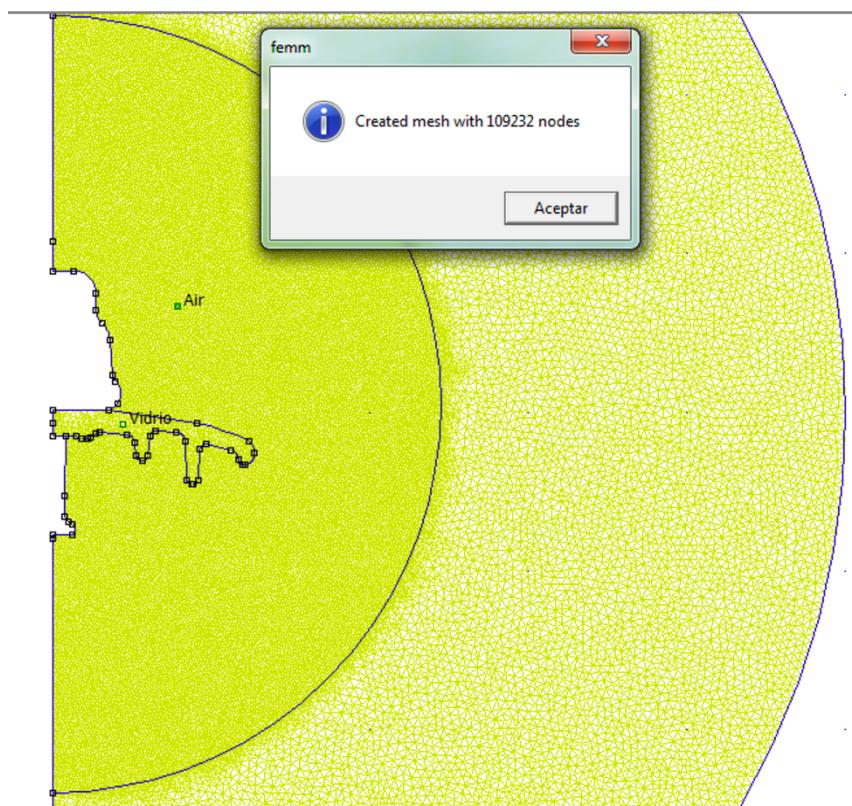


Fig. 9 Superficie mallada FEMM 2D

Una vez generada la superficie de mallado se resuelve el problema electrostático y ya con el problema resuelto se pueden visualizar los resultados en el post-procesador.

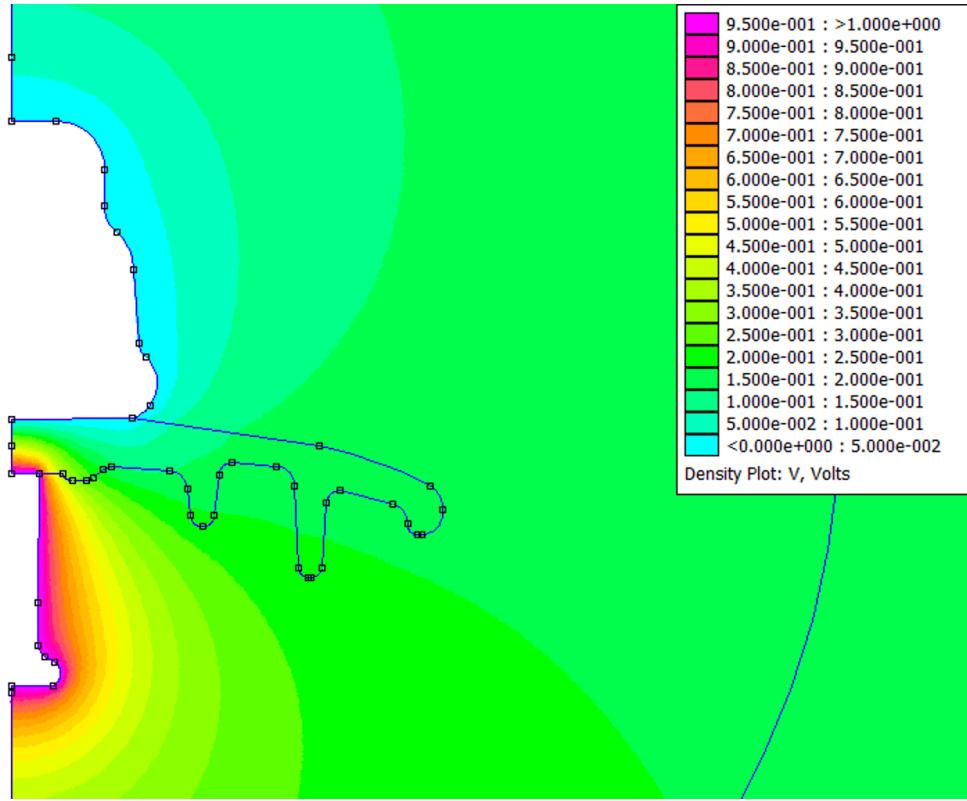


Fig. 10 Potencial modelo FEMM 2D

En la Fig. 10 se puede observar la distribución del potencial puntual existente en todo el modelo, especialmente resalta el potencial alrededor del perno con color violeta, que tiene las condiciones de contorno de potencial 1 y el capuchón que tiene las condiciones de potencial 0 con color azul claro.

Realicé una pequeña modificación al *script* original (cuya autora es la investigadora del CIRCE Mayte Villén) para solucionar unos problemas que daba a la hora de generar una línea de campo desde punto de partida con potencial (1 V) hacia el de potencial menor (0 V). Este *script* de LUA da como resultado un documento de texto con un formato como el que aparece en la Tabla 5 y que debe contener 6 columnas para que luego se pueda trabajar con el programa KevalInc:

$\theta$ [rad]	r [mm]	z [mm]	$E_\theta$ [V/m]	$E_r$ [V/m]	$E_z$ [V/m]
----------------	--------	--------	------------------	-------------	-------------

Tabla 5 Formato fichero entrada para KevalInc

Las tres primeras columnas del archivo que genera el *script* con los datos son las coordenadas en el espacio y las tres columnas siguientes el valor del campo eléctrico en cada componente; en este caso al ser 2D la primera columna,  $\theta$ , es cero y la cuarta correspondiente al valor del campo eléctrico  $E_\theta$  también será cero.

Esta tabla de valores obtenido con las componentes del campo eléctrico en cada punto de la línea de fuga que une el terminal de alta tensión con el de baja se introduce al programa KevalInc para que nos saque como resultado la tensión a la que se produciría la incepción.

El resultado obtenido por KevalInc del fichero de texto generado por el *script* de lua en FEMM 2D se adjunta en la Tabla 6 a continuación:

	Factor lineal para producir incepción	Tipo de Línea
Valor Pico	118,981 kV	Streamer
Valor Eficaz	84,13 kV	Streamer

Tabla 6 Resultados simulación 2D

## 5.2 Opera 13

### MODELLE

A la hora de generar superficies extras de control para tener datos del aire alrededor del aislador de la simulación la primera opción fue la de crear una superficie esférica con la condición de campo eléctrico tangencial y que contuviera todo el aislador con suficiente espacio extra para tener datos suficientes del campo eléctrico circundante. Pero esta superficie que sería la mejor opción no la pude llevar a cabo ya que la licencia con la que se trabajó en OPERA 13 tiene una limitación para generar como máximo 50.000 nodos (licencia de estudiantes).

Por lo tanto opté por generar 2 superficies cilíndricas que contuvieran el aislador completo. La opción de que fueran 2 superficies fue porque la parte superior, la que contiene el capuchón del aislador tiene un mallado menos preciso y por lo tanto se obtiene menos información en esa parte y la parte inferior tiene un mallado de tamaño menor y más preciso con el cual tenemos más datos y por lo tanto más información (Fig. 11) ya que lo más importante en este trabajo, calcular el voltaje de incepción, se produce en la parte inferior del aislador entre el plato y el perno, que es donde se genera la línea de corriente cuando existe la ruptura dieléctrica.

Para la superficie cilíndrica inferior, la que contiene la parte inferior del aislador he tomado como tamaño de elemento de mallado (a partir de ahora MES *Mesh Element Size*) de 25, ya que cuanto menor el MES más datos se obtendrá, ya que el mallado es más preciso y por lo tanto más información se generará a la hora de realizar la simulación y solución del problema electrostático.

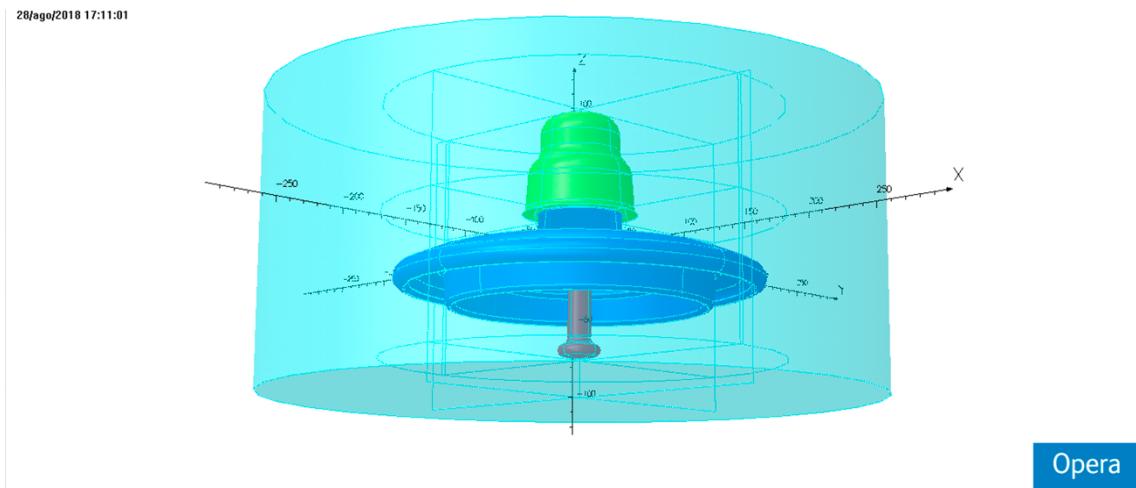


Fig. 11 Superficies de análisis y aislador

Otro gran problema que me encontré fue a la hora de probar diferentes MES en las diferentes partes que contienen el aislador (capuchón, aislador interno, plato de vidrio, cemento y perno). No solo tuve problemas a la hora de elegir el MES en las partes del aislador sino también en las superficies de control extra para conseguir una buena precisión sin llegar al límite de 50.000 nodos que tiene la licencia de estudiante y tener una información y precisión aceptable.

Para generar la superficie de mallado finalmente opté por un MES de 250 con el que se consiguió **49.894** nodos como se ve en la Fig. 12 al realizar la simulación del cálculo del modelo por medio del módulo TOSCA de análisis electrostático, menor al límite de nodos existente por el tipo de licencia utilizada.

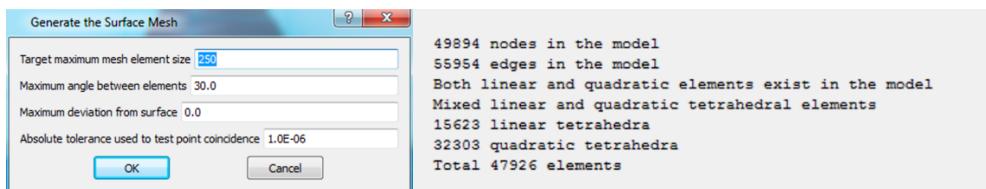


Fig. 12 Datos de generación de la simulación en 3D

## POST-PROCESSOR

Una vez que se ha realizado el cálculo de la simulación del modelo y se ha generado la base de datos de los análisis realizados por el módulo TOSCA del modelo procedente del *modeller*, el siguiente paso en cualquier programa de cálculo por medio de elementos finitos es ir al post-procesador.

Al igual que en 2D se puede trabajar de dos formas por medio de una interface gráfica visual o por medio de línea de comandos. En este caso he trabajo por medio de la interface gráfica visual para generar los planos necesarios de campo eléctrico y voltaje y gráficas

necesarias y por medio de línea de comandos en la modificación del *script* del profesor Miguel Samplón.

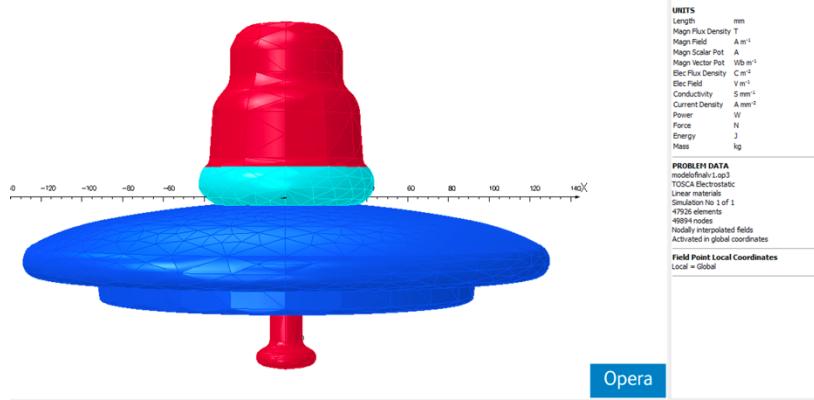


Fig. 13 Aislador 3D en el post-procesador

Una primera comprobación de que la simulación y cálculos realizados por el módulo TOSCA pueden ser correctos es generar un plano en el espacio en el que podemos visualizar el voltaje en cada punto de dicho plano y así poder realizar una línea desde la parte inferior del aislador, es decir desde el perno que tiene un potencial 1, hasta la parte del capuchón del aislador que tiene un potencial de 0 y visualizar si se cumple lo que debe suceder según la teoría.

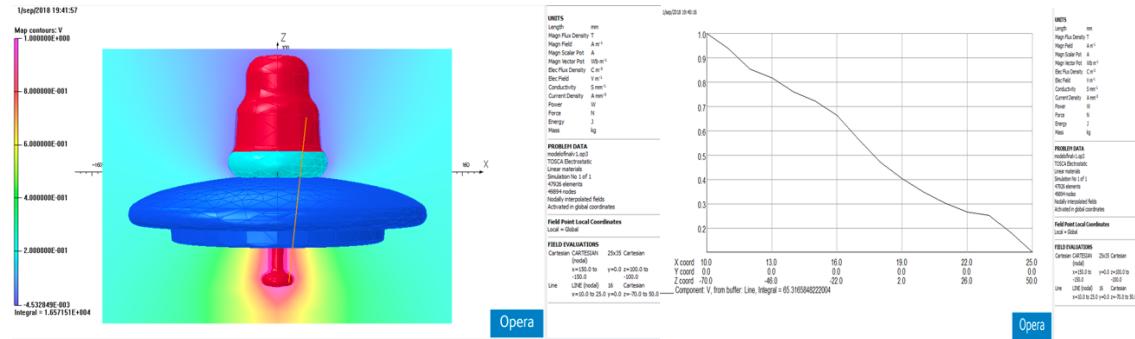


Fig. 14 Comprobación de voltaje alrededor del aislador

Compruebo con la gráfica y visualmente que el potencial va desde 1 hasta 0 por lo que a priori es lo esperado en la Fig. 14.

Lo siguiente que hago es sacar un plano que corte al aislador en el que represento el módulo del campo eléctrico y unos vectores dentro de ese plano cuyo tamaño es proporcional al módulo de  $\vec{E}$  (cuanto mayor sea el módulo de  $\vec{E}$  más grande será el vector) y se puede ver en la Fig. 15.

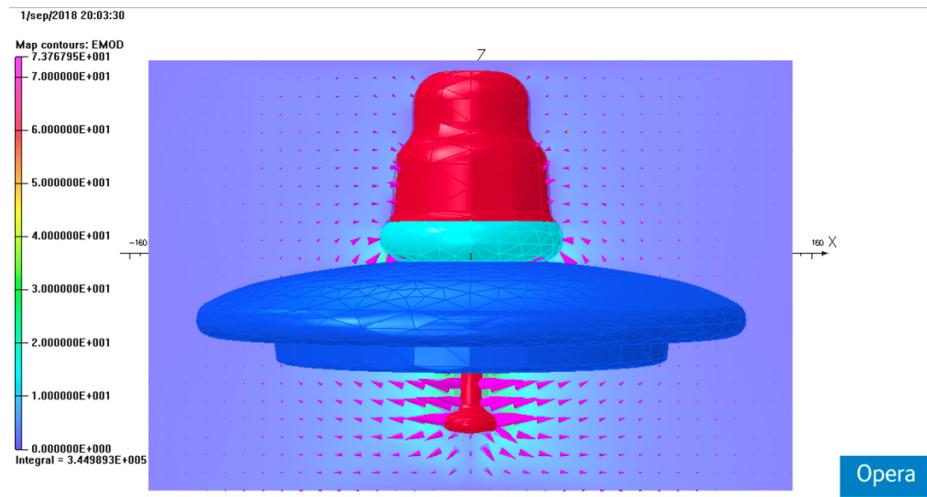


Fig. 15 Campo eléctrico alrededor del aislador

Se sabe que las líneas de campo de un campo eléctrico van desde los potenciales positivos hacia potenciales menores, si el post-procesador pudiera generar las líneas de campo podría ver realmente la dirección que tendría desde el perno hacia el capuchón.

Para calcular las líneas de campo eléctrico y así poder calcular el voltaje de incepción del aislador en el aire, me ayudo del *script* desarrollado por el profesor Miguel Samplón que consiste en analizar una línea de campo eléctrico y así calcular el voltaje de incepción [KEV 08] pero con una modificación sustancial ya que el *script* inicial desarrollado por el profesor Miguel Samplón sigue el recorrido de una línea de campo cualquiera sin importa si atraviesa o no algún material y a mi lo que me interesa es recorrer una línea que contornee lo más cerca posible el plato de vidrio del aislador desde el perno a potencial 1 hasta el capuchón que se encuentra a potencial 0 sin atravesar ningún material ya que por la literatura y experimentos reales sabemos el comportamiento que tendrá el streamer que se produzca la ruptura dieléctrica.

A continuación se muestran dos capturas de la línea de campo eléctrico generadas: la primera por el del *script* original del profesor Miguel Samplón y la segunda por el *script* que modifique para la realización de este TFG.

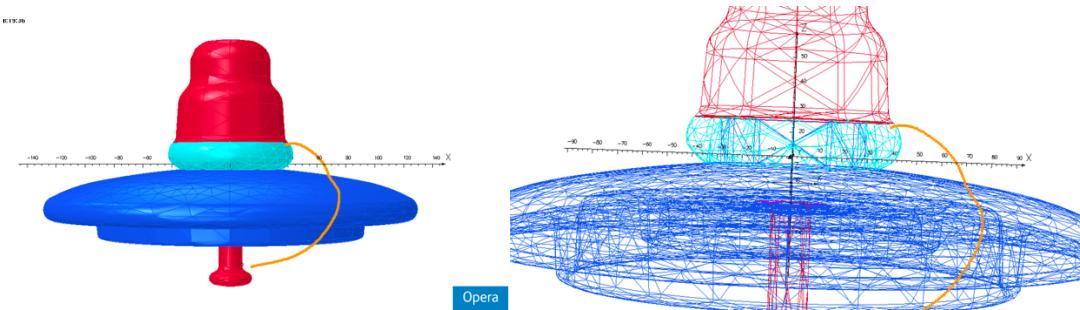


Fig. 16 Recorrido inicial del script original

Como se puede ver el recorrido de la línea de campo del *script* del profesor Miguel Samplón en la Fig. 16 atraviesa el plato del aislador algo que no ocurriría en la realidad.

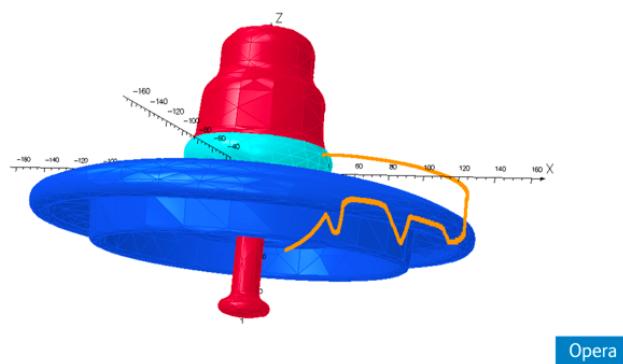


Fig. 17 Recorrido del script modificado

Con la modificación realizada se consigue un contorneo que se aproxima más al trayecto del *streamer* real como se ve en la Fig. 17. Los datos generados por este *script* serán los que se usarán para luego hallar la tensión a la que se produciría la incepción.

En este *script* en 3D el documento de texto que se crea es una tabla de seis columnas como la Tabla 7.

X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	$E_X$ [V/m]	$E_Y$ [V/m]	$E_Z$ [V/m]
--------	--------	--------	-------------	-------------	-------------

Tabla 7 Formato fichero 3D para KevalInc

El resultado obtenido por KevalInc del fichero de texto generado por el *script* modificado en Opera 3D se adjunta en la Tabla 8 a continuación:

Factor lineal para producir incepción	Tipo de Línea
Valor Pico	114,38 kV
Valor Eficaz	80,88 kV

Tabla 8 Resultados de la simulación 3D

## 6. Valores experimentales y comparativa

Como comenté anteriormente, pude conseguir un aislador del modelo U70. La única diferencia con el modelo simulado es que el modelo simulado es el aislador U70BL, es decir de paso largo, y el modelo real es el aislador U70BS, es decir de paso corto, la diferencia entre ellos es la distancia del paso lo que no afecta a los resultados finales de este TFG.

Cuando se produzca la ionización del aire cercano al aislador se generará el *streamer* que irá contorneando desde la parte más cercana del capuchón al plato hasta el perno, sin que la longitud del perno (conductor equipotencial) afecte a este fenómeno.

El experimento se realizó en el Laboratorio de Alta Tensión que se encuentra situado en la planta calle del departamento de Ingeniería Eléctrica en el edificio Torres Quevedo de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

El laboratorio consta de un transformador de alta tensión, con el correspondiente sistema de seguridad y control.

- Entre los dos terminales del transformador de alta tensión (Fig. 18) pueden llegarse a aplicar diferencias de tensión en corriente alterna de 50 Hz de 100 kV eficaces, lo que equivale a tensiones de pico del orden de 140 kV.



Fig. 18 Transformador de alta tensión

- Cuando se produce un caso de ruptura dieléctrica puede circular una corriente eléctrica grande por el lado de alta tensión; a unos 100 mA, el sistema de control desconecta automáticamente el transformador para evitar su destrucción (Fig. 19).



Fig. 19 Sistema de Control del transformador

- El terminal de alta tensión (Fig. 20) está aislado de la estructura del edificio mediante una cadena de aisladores, mientras que el terminal de baja tensión está conectado a la red de tierras del laboratorio.



Fig. 20 Terminal de alta tensión aislado

Para el montaje del aislador se optó por unos herrajes clásicos: Una grapa de suspensión tipo GS para sostener un conductor simulando una línea, una rotula de horquilla y un anillo bola como se puede ver en la Fig. 21 junto con el conductor.



*Fig. 21 Aislador conductor y herrajes*

Se realizaron 2 configuraciones distintas para realizar los experimentos:

1. Configuración 1: Aislador con pinza y cable conductor.

En la Configuración 1 se uso el aislador número 1.

2. Configuración 2: Aislador con solo pinza.

En la Configuración 2 se usaron el aislador número 1 y el aislador número 2

### Configuración 1

#### Con un cable conductor coplanario con el terminal de alta



*Fig. 22 Montaje configuración 1 conductor coplanario*

Medida	Tensión Ruptura (kV)
1	82,3
2	86,43
3	86,31
4	81,49
5	83,25
Valor Medio	83,96
Valor pico	118,73

*Tabla 9 Resultados conductor coplanario*

### Con un cable conductor transversal al terminal de alta



Fig. 23 Montaje configuración 1 conductor transversal

Medida	Tensión Ruptura (kV)
1	81,37
2	79,89
3	81,13
4	85,6
5	80,19
Valor Medio	81,64
Valor pico	115,45

Tabla 10 Datos conductor transversal

### Configuración 2

#### El aislador sin cable conductor



Fig. 24 Montaje configuración 2

Aislador 1	
Medida	Tensión Ruptura (kV)
1	81,14
2	84,55
3	89,89
4	75,14
5	77,36
Valor Medio	81,62
Valor pico	115,42

Tabla 11 Resultados Aislador 1

Aislador 2	
Medida	Tensión Ruptura (kV)
1	81,25
2	82,66
3	77,69
4	79,56
5	84,91
Valor Medio	81,21
Valor pico	114,85

Tabla 12 Resultados Aislador 2

A continuación en la Tabla 13 se presenta un resumen de los valores obtenidos por medio de las simulaciones en 2D y 3D y en el experimento en el laboratorio.

	FEMM 2D	OPERA 3D	Laboratorio	Catálogo
Valor Eficaz (kV)	84,13	80,88	83,96	70 (IEC) 80 (ANSI)

Tabla 13 Resumen de resultados

Si tomamos como referencia el valor del laboratorio, 83,96 kV, y a partir de ese valor calculo los errores relativos de cada simulación.

$$\epsilon = \left| \frac{\text{Valor a calcular} - \text{Valor de referencia}}{\text{Valor de referencia}} \right| \times 100 \quad [9]$$

- FEMM 2D vs Laboratorio  $\rightarrow \epsilon = \left| \frac{84,13 - 83,96}{83,96} \times 100 \right| = 0,20\%$
- OPERA 3D vs Laboratorio  $\rightarrow \epsilon = \left| \frac{80,88 - 83,96}{83,96} \times 100 \right| = 3,67\%$
- Catálogo (IEC) vs Laboratorio  $\rightarrow \epsilon = \left| \frac{70 - 83,96}{83,96} \times 100 \right| = 16,63\%$
- Catálogo (ANSI) vs Laboratorio  $\rightarrow \epsilon = \left| \frac{80 - 83,96}{83,96} \times 100 \right| = 4,71\%$

El error con FEMM 2D es inapreciable, del 0,20% y con Opera 3D del 3,67%. Podemos ver que consigo una muy buena aproximación a la realidad. El único resultado que varía más es el valor que nos da el catálogo. Los errores de medida cometidos por el transformador del laboratorio de alta tensión están en torno al  $\pm 2,5\%$  según la calibración realizada por el laboratorio de metrología eléctrica del CIRCE.

Por lo tanto, deduzco que el alto error observado respecto al ensayo IEC se debe a las distintas condiciones a la que he realizado mis medidas respecto a las exigidas por esa norma.

## 7. Conclusiones

He realizado en este TFG la descripción de los trabajos que permitirán la ampliación de una práctica que se realiza en el laboratorio de alta tensión relativa a fenómenos de ruptura dieléctrica en el aire.

He utilizado recursos que se encuentran en el departamento de Ingeniería Eléctrica tanto para la simulación numérica como para la obtención de datos experimentales.

Los resultados obtenidos y que he expuesto en este documento sobre la simulación en 3D se ajustan a los que ya se obtenían en 2D y estaban validados por las prácticas que se han venido realizando durante los últimos cursos.

Concluyo que la práctica podrá realizarse utilizando el MEF en 3D mediante TOSCA, siempre que se siga el mismo procedimiento docente empleado en 2D, que consiste en facilitar a los estudiantes unos tutoriales previos que deben conocer antes de asistir al laboratorio.

En mi opinión el único límite es que solo existen 24 licencias del programa que residen en un servidor del departamento por lo que no hay la misma libertad de acceso que se disfrutaba con FEMM 4.2.

Por eso propongo una línea futura de investigación que consiste en la posibilidad de conseguir que con un programa de elementos finitos en 3D de licencia libre como por ejemplo el programa ELMER se pueda replicar el trabajo realizado en este TFG y así incorporar a las prácticas de las asignaturas nombradas al inicio de este documento. El inconveniente de usar ELMER es que requiere de muchas horas de programación para adaptarlo a nuestro caso concreto.

## Bibliografía

- [COB 18] Cobham plc. Opera simulation software. <https://operafea.com/product/>. 2018
- [COO 03] Cooray, V. “The Lightning Flash”. (ed.)V. Cooray. Institutions of Electrical. 2003.
- [EDP 18] EDP hc energía. Especificación técnica de aisladores de cadena del tipo caperuza y vástago. <https://www.edphcenergia.es/recursosedp/doc/distribucion-luz/20130813/especificaciones-tecnicas/aisladores-de-cadena-del-tipo-caperuza-y-vastago.pdf>. 2018
- [FEM 15] Meeker, D. “Finite Element Method Magnetics User’s Manual”. V 4.2. 2015
- [FEM 18] Finite Elements Method Magnetics. [www.femm.info/wiki/download](http://www.femm.info/wiki/download). 2018.
- [IEE 06] Kontargyri, V.T, Gonos, I. F., Stathopoulos, I.A., Michaelides, A.M, “Simulation of the Electric Field on High Voltage Insulators using the Finite Element Method”, 2006 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation,
- [KEV 08] Samplón, M. “Notas de construcción y uso del programa KevallInc”. 2008
- [LUA 15] Lua Organization. Manual 5.1. [www.lua.org/manual/5.1/es/manual.html](http://www.lua.org/manual/5.1/es/manual.html), 2018.
- [MAD 12] MADE. Catalogo de herrajes.  
[www.invertarea.com/GRUPO/made/espanol/descargas/catalogos/Catalogo\\_Herrajes\\_2012\\_ED1.pdf](http://www.invertarea.com/GRUPO/made/espanol/descargas/catalogos/Catalogo_Herrajes_2012_ED1.pdf), 2018.
- [OPE 09\_I] Opera 3-d User Guide. Version 13. Vector Fields Limited. 2009.
- [OPE 09\_II] Opera 3-d Reference Manual. Version 13. Vector Fields Limited. 2009.
- [REI 96] Reitz, J.R., Milford, F.J., Christy, R.W. “Fundamentos de la teoría electromagnética” 4<sup>a</sup> Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. 1996.
- [SER 99] Serway, R.A. “Electricidad y magnetismo”. 4<sup>a</sup> Ed. McGraw-Hill. 1999.
- [SGD 18] SGD L Granja. Catálogo de aisladores de vidrio.  
<https://electricos.org/index.php/documentos/materiales-y-fabricantes-1/93-catalogo-de-aisladores-at-1/file>. 2018
- [TIP 06] Mosca, T. “Física para la ciencia y la tecnología”, Vol. 2. 5<sup>a</sup> Ed. Reverte. 2006.
- [USO 07] Usón, A. ”Aplicación del método de elementos finitos al perfeccionamiento de pinzas amperimétricas”. 2007.  
[https://zaguan.unizar.es/record/1912/files/TUZ\\_0026\\_uson\\_finitos.pdf](https://zaguan.unizar.es/record/1912/files/TUZ_0026_uson_finitos.pdf)

## ANEXOS

## Anexo I

### -Script Opera 3D

```
#####
/// SCRIPT DE GENERACION DE FICHERO DE VALORES DE E
/// A LO LARGO DE UNA LINEA
/// Miguel Samplón Chalmeta Octubre 2008 modificado por Gonzalo Ferrer Perez 2018
///
// Las unidades que se emplearan para la entrada/salida en este
// script son mm para longitudes y V/m para E
//
// Evitamos que se pare ante la presencia de un error (esencialmente irse fuera
// de la zona de malla).
$ERRORHANDLER NO
// Establecemos unidades
UNITS LENGTH=MM ELECTRIC=VM
//
// PARAMETROS DE ENTRADA
//
// Punto de inicio de la determinacion de la linea
$ CONSTANT #XP 10
$ CONSTANT #YP 0
$ CONSTANT #ZP -10
$ CONSTANT #VIDRIO 2.21354695393109E-11
// paso espacial para el cálculo del siguiente punto de la linea (mm)
$ CONSTANT #DELTA 5
// Potencial que determinará el final de la linea (V)
$ CONSTANT #POTFIN 0.0
// Nombre del fichero de salida
$ STRING FISAL 'LineaE.dat'
// diálogo de petición de parámetros
$ DIALOG START 'Determinación de una línea de campo E'
$ PROMPT FISAL '¿Fichero de salida?'
$ ASK #XP 'XP (mm)'
$ ASK #YP 'YP (mm)'
$ ASK #ZP 'ZP (mm)'
$ ASK #VIDRIO 'VIDRIO'
$ ASK #POTFIN 'Potencial de término de línea (V)'
$ ASK #DELTA '¿Paso entre puntos (mm) ?'
$ DIALOG STOP
//
// APERTURA DE FICHERO
//
// formatos a emplear en el fichero de salida
$ FORMAT 1 CHARACTER 12
$ FORMAT 2 EXPONENTIAL 12
$ FORMAT 3 STRING 1 STRING=' '
$ FORMAT 4 INTEGER 12
// apertura de fichero
$ OPEN 1 '&FISAL&' OVERWRITE
//
// BUCLE PRINCIPAL
```

```

// /////////////////////////////////
// un valor de 0 indica que el bucle debe continuar, 1 que debe acabar
$ CONSTANT #FIN_BUCLE 0
$ WHILE #FIN_BUCLE EQ 0
  POINT #XP #YP #ZP EMOD
  POINT #XP #YP #ZP DMOD
  $CONSTANT #COND (DMOD/EMOD)

$ IF ELEMENT EQ 0
  $ CONSTANT #FIN_BUCLE 1
$ ELIF V LE #POTFIN
  $ CONSTANT #FIN_BUCLE 1
$ELSE
  // GRABAMOS EL PUNTO ACTUAL
  $ ASSIGN 2 3 2 3 2 3 2 3 2
  $ WRITE 1 X Y Z EX EY EZ +OUTPUT
  // CALCULO DEL SIGUIENTE PUNTO
  $IF #COND EQ #VIDRIO
    $CONSTANT #XP #XP+#DELTA*(EZ/EMOD)
    $ CONSTANT #ZP #ZP-#DELTA*(EZ/EMOD)*2
    $ CONSTANT #YP #YP+#DELTA*(EY/EMOD)

$ELIF #ZP GE -5
  $ CONSTANT #XP #XP+#DELTA*(EX/EMOD)*2
  $ CONSTANT #ZP #ZP+#DELTA*(EZ/EMOD)/4
  $ CONSTANT #YP #YP+#DELTA*(EY/EMOD)
$ELIF #Xp GE 123
  $ CONSTANT #ZP #ZP+#DELTA*(EZ/EMOD)*2
$ELSE
  $ CONSTANT #XP #XP+#DELTA*(EX/EMOD)
  $ CONSTANT #YP #YP+#DELTA*(EY/EMOD)
  $ CONSTANT #ZP #ZP+#DELTA*(EZ/EMOD)
$END IF
$END IF
$END IF
$END WHILE
// ///////////////////////////////
// CIERRE DE FICHERO
// ///////////////////////////////
$ CLOSE 1

```

A continuación se muestra el fichero de datos generados por el *script* y luego introducidos en el programa KevalInc para hallar el factor lineal para producir incepción.

X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Ex [V/m]	Ey [V/m]	Ez [V/m]
10	0	-15	36.8242266	-19.064417	6.42230536
23.1637473	-6.8150562	-12.704185	11.5340549	-6.333751	8.29401893
34.2866471	-12.923028	-4.7058237	3.91890874	-2.1168299	8.79459475
47.6683181	-16.143952	-31.469166	3.85195456	-1.7381466	4.61783431
56.8987711	-20.309079	-20.403432	0.51824604	-0.2739837	3.23503585
59.2632335	-21.559111	-5.6438004	9.20E-03	0.05136172	1.62526061
74.2555091	-21.085323	-35.628352	1.69582048	-0.6756475	2.32958579
82.8503337	-24.509666	-23.821453	0.30210393	-0.1179141	1.53036427
97.5244733	-25.640304	-53.169732	1.00083943	-0.3545845	0.986432
107.883017	-29.310202	-42.960304	0.65361613	-0.2310043	0.91270158
116.437273	-32.333491	-31.015245	0.29895027	-0.0990445	0.90383612
121.12237	-33.885699	-16.850482	0.24610166	-0.0846254	0.52869618
127.38687	-36.039834	-3.3925571	0.01289183	-0.0138551	0.62021106
128.010166	-36.374768	0.35569824	-0.0303154	2.65E-04	0.6153934
126.534101	-36.368327	4.10115605	-0.0782252	0.01780668	0.63906006
122.890502	-35.953624	7.82195122	-0.1304291	0.04134793	0.68169627
117.262836	-35.061598	11.4986229	-0.2244369	0.07958298	0.76620423
108.871161	-33.573797	15.0796615	-0.3468285	0.13319758	0.88173753
97.9966787	-31.485655	18.5354182	-0.5384933	0.22119507	1.07720538
84.8031463	-28.775923	21.8344714	-0.9123928	0.40046701	1.29894761
68.0834781	-25.106629	24.8098857	-1.8086017	0.87463146	1.58069203
46.8581491	-19.974393	27.128715	-3.3628024	1.95457771	0.77407247
21.4199815	-12.581619	27.8606561	19.3717376	-16.324567	4.83697735

## Anexo II

### -Script FEMM 2D

```
-----
-----  
-- Programa principal ---  
-----  
-----  
-- Subrutina calculo número de puntos ---  
-----  
-----  
Numero_puntos=function(IncX,rini,zini)  
    -- Declaración de variables locales--  
        local Npuntos,N_iteracion,cont_intermedio,contador,rn,zn,Emod_n,uexn,ueyn  
    --Número de puntos a capturar--  
        Npuntos=5000  
        N_iteracion=10  
    --Inicializacion de la variable contador-  
        contador=0  
        cont_intermedio=0  
-----  
-- Cálculos para obtener el número de puntos de la línea de campo ---  
-----  
    rn=rini  
    zn=zini  
    for i=1,Npuntos do  
        for j=1,N_iteracion do  
            cont_intermedio=cont_intermedio+1  
            V,Dx,Dy,Ex_n,Ey_n,ex,ey,nrg=eo_getpointvalues(rn,zn)  
            if V==0 then break end  
            Emod_n=sqrt((Ex_n*Ex_n)+(Ey_n*Ey_n))  
-----  
        --Cálculo del campo en el siguiente punto de la línea de campo--  
            Uexn=Ex_n/Emod_n  
            Ueyn=Ey_n/Emod_n  
            rn=rn+IncX*Uexn  
            zn=zn+IncX*Ueyn  
            contador=contador+1  
        end  
        if V==0 then break end  
        if (V>0) then j=1 end  
    end  
    numeropuntos=contador  
    return numeropuntos  
end  
-----  
-----  
-- Fichero de obtención de puntos de campo a lo largo de la línea de descarga ---  
-----  
-----  
-- Datos ---  
    --Punto inicial--  
        Rcent=1+0.01
```

```

--ri=313.5-Rcent*cos(45)
--zi= 214+Rcent*sin(45)
ri=tonumber(prompt("Coord. r del punto de campo máximo [mm]"))
zi=tonumber(prompt("Coord. z del punto de campo máximo [mm]"))
--Paso entre puntos [mm]--
IncX=tonumber(prompt("Paso entre puntos [mm]"))
--Variables para llamar a la funcion--
rini=ri
zini=zi
--Número de puntos a capturar--
numeropuntos=Numero_puntos(IncX,rini,zini)
Np=numeropuntos
-----
-- Abre fichero para guardar datos del campo E---
-----
mydir="./"
writeto("Dat_Linea_Campo_DRT2D.txt")
-- Cálculos para obtener el campo eléctrico en una línea de campo y cargarlo en una
tabla--
yn=ri
zn=zi
for i=1,Np do
    V,Dx,Dy,Ex_n,Ey_n,ex,ey,nrg=eo_getpointvalues(yn,zn)
    -- Escribo los puntos de la línea de campo--
    eo_addcontour(yn,zn)
    -- Cálculo del módulo del campo--
    Emod_n=sqrt((Ex_n*Ex_n)+(Ey_n*Ey_n))
    --Cálculo del campo en el siguiente punto de la línea de campo--
    Uexn=Ex_n/Emod_n
    Ueyn=Ey_n/Emod_n
    yn=yn+IncX*Uexn
    zn=zn+IncX*Ueyn
    -- Escribir los datos de campo
    write(0," ",yn," ",zn," ",0," ",Ex_n," ",Ey_n,"\n")
end
print("Número de puntos a estudiar:",numeropuntos,"\n")
-- Cierra fichero de datos de linea de campo --
closefile(_OUTPUT)

```

A continuación se muestra el fichero de datos generados por el *script* y luego introducidos en el programa KevalInc para hallar el factor lineal para producir incepción.

<b>fi</b>	<b>r [mm]</b>	<b>Z [mm]</b>	<b>Efi [V/m]</b>	<b>Er[V/m]</b>	<b>Ez[V/m]</b>
0	20.9775527	-41.78930881	0	21.31722705	4.594485798
0	21.9512186	-41.56132931	0	20.24946342	4.741320886
0	22.9183338	-41.30699057	0	19.18047814	5.044216784
0	23.8796037	-41.03138192	0	18.00179566	5.161349969
0	24.8353502	-40.73719038	0	17.07066804	5.254579816
0	25.7831661	-40.41837221	0	16.22870637	5.458872846
0	26.7241139	-40.07982054	0	15.36656509	5.52886801
0	27.65688416	39.71934911	0	14.58639141	5.636947953
0	28.5799356	-39.33467251	0	13.80172998	5.7517951
0	29.4941581	-38.92945996	0	13.23093927	5.864373871
0	30.398595	-38.50285254	0	12.53495572	5.912524314
0	31.2901291	-38.04989903	0	11.93195607	6.062158674
0	32.1703433	-37.57532247	0	11.30626188	6.095887467
0	33.0390186	-37.07994044	0	10.71463396	6.110266549
0	33.8947249	-36.56247861	0	10.23483004	6.189195826
0	34.7358764	-36.0216791	0	9.703994257	6.238965568
0	35.5629594	-35.45959934	0	9.217816421	6.264362549
0	36.3744715	-34.87526367	0	8.773033782	6.317092251
0	37.1669388	-34.26534926	0	8.250148139	6.349642824
0	37.9377933	-33.62833808	0	7.738566087	6.394919739
0	38.6930726	-32.97293494	0	7.402233135	6.423381789
0	39.4319422	-32.29908658	0	7.045950599	6.425899519
0	40.1480471	-31.60109384	0	6.678902977	6.509976703
0	40.8446915	-30.88367722	0	6.212309418	6.397545395
0	41.5208594	-30.14692966	0	5.958714615	6.492571416
0	42.1725638	-29.38845659	0	5.609290677	6.528260389
0	42.80130114	-28.61083889	0	5.255860675	6.500409094
0	43.4070771	-27.8152036	0	4.932083574	6.477873377
0	43.983582	-26.99810995	0	4.595346446	6.51308953
0	44.5333818	-26.16281346	0	4.246058273	6.450925967
0	45.057184	-25.31097354	0	3.952246113	6.427390029
0	45.5507415	-24.44126035	0	3.61864414	6.376526927
0	46.0133313	-23.55468792	0	3.30944075	6.342679617
0	46.4405995	-22.65056301	0	2.970431682	6.285609708
0	46.8130401	-21.72250697	0	2.52715156	6.297214477
0	47.1370211	-20.7764434	0	2.146153213	6.267024893
0	47.4130646	-19.81529824	0	1.781645014	6.203441968
0	47.6263758	-18.83831395	0	1.353717553	6.200145232
0	47.7734096	-17.84918248	0	0.938840818	6.315808739
0	47.8585134	-16.85281038	0	0.537041816	6.287541506
0	47.8861703	-15.85319291	0	0.177754542	6.424657292
0	47.8574737	-14.85360474	0	-0.185126081	6.44849811
0	47.7461766	-13.85981756	0	-0.730572123	6.523378381
0	47.2522143	-12.99033426	0	-1.780557463	3.134176278
0	46.7998057	-12.09852346	0	-1.687091143	3.325680005

0	46.3623311	-11.1992927	0	-1.718089344	3.531539205
0	45.9303633	-10.2974037	0	-1.755841519	3.665953741
0	45.493512	-9.397869959	0	-1.84944827	3.808255001
0	45.0497223	-8.501738965	0	-1.974648886	3.987348795
0	44.5983335	-7.609411608	0	-2.146378867	4.243065829
0	44.1350163	-6.723219089	0	-2.357671535	4.509547489
0	43.6731581	-5.83626534	0	-2.558875379	4.914070703
0	43.1967952	-4.957016566	0	-2.836429079	5.2353508
0	42.6856124	-4.097544535	0	-3.230572553	5.431690785
0	42.1460145	-3.255621686	0	-3.619510272	5.6474428
0	41.5832877	-2.428978741	0	-4.008165008	5.887975089
0	40.9971492	-1.618767892	0	-4.418971323	6.108280393
0	40.3688825	-0.840769794	0	-5.182663148	6.417819876