



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Análisis del aislamiento en máquinas
eléctricas con software de elementos
finitos**

Autor:

Rodríguez Gutiérrez, Silvia

Tutor(es):

**Serrano Sanz, José Andrés
Ingeniería Eléctrica**

Valladolid, enero de 2022.





ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	13
1.1 Resumen	13
1.2 Abstract	13
1.3 Palabras clave	14
1.4. Keywords.....	14
1.5 Objetivos del Trabajo de Fin de Grado.....	14
1.6 Interés industrial del trabajo	14
1.7 Motivación a la realización del trabajo	15
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.	17
2.1. Introducción a las máquinas eléctricas	17
2.2. Localización del material aislante en las máquinas eléctricas.....	17
2.3. Fallos comunes en las máquinas eléctricas.....	22
2.4 Definición de las leyes electromagnéticas.	26
2.5 Definición de las condiciones de contorno.....	33
CAPÍTULO 3: AISLANTES EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS	35
3.1. Aislantes eléctricos.....	35
3.2 Definiciones generales.....	36
3.3 Normativa de los aislamientos eléctricos.....	39
3.4 Clases de aislamiento eléctrico.....	41
3.5 Evaluaciones y pruebas de medida en los sistemas de aislamiento	43
3.6 Factores de degradación del aislamiento eléctrico.	51
CAPÍTULO 4: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	55
4.1 Conceptos generales del método.....	55
4.2 Aplicación de los elementos finitos en máquinas eléctricas	57
CAPÍTULO 5: ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS EN 2D.....	59
5.1 Introducción	59
5.2 Presentación de FEMM	59



CAPÍTULO 6: EQUIPOS Y AISLAMIENTOS ANALIZADOS.....	77
6.1 Simulación del aislador U100BLP con geometría simplificada	77
6.2 Simulación del aislador U100BLP sin la primera capa de cemento	83
6.3 Simulación del aislador U100BLP sin la capa de porcelana	84
6.4. Simulación del aislador U100BLP.....	84
CAPÍTULO 7: RESULTADOS	87
7.1 Aislador U100BLP con geometría simplificada	87
7.2 Aislador U100BLP sin la primera capa de cemento	93
7.3 Aislador U100BLP sin la capa de porcelana	99
7.4 Aislador U100BLP	108
7.5. Aislador en La Palma.....	111
7.6 Repercusiones de seguridad de los ejemplos analizados	117
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES.....	119
CAPÍTULO 9: BIBLIOGRAFÍA	121

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Esquema representativo sobre las diferencias entre motor y generador</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2: Esquema de la máquina rotativa</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: Perspectiva y sección de un colector de delgas</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4: Esquema representativo de un transformador</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5: Tipos de transformador: a) Acorazado y b) De columnas</i>	<i>20</i>
<i>Figura 6: Devanados concéntricos y alternados</i>	<i>21</i>
<i>Figura 7: Esquema representativo del aislador pasante</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8: Porcentaje de fallas en las máquinas eléctricas por Walter Evaldo Kuchenbecker</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9: Representación del fallo de aislamiento. Colocación del neutro entre ambas fases</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10: Carga eléctrica contenida solamente dentro del volumen V que rodea la superficie S.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11: La densidad de campo magnético B que emana de una superficie cerrada siempre será cero</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12: Campo eléctrico (E) inducido por la variación de un campo magnético</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13: Densidad de campo magnético B inducido por la variación de un campo eléctrico E</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14: Fuerza del campo eléctrico sobre una carga de prueba positiva Q+.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15: Placa de características de un motor asíncrono trifásico. Clase térmica</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16: Medición de aislamiento en una máquina rotativa.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 17: Medición de aislamiento sobre un transformador</i>	<i>44</i>

<i>Figura 18: Tipos de corrientes resultantes de prueba DC en medición de resistencia de aislamiento.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19: Configuración básica de una prueba de Hi-Pot en corriente continua.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 20: Indicadores PI y DAR en un aislamiento en buen estado.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21: Medición de borna de alta tensión; a) sin terminal de guarda, b) con terminal de guarda.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22: Esquema de un terminal de guarda.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 23: Rotura de aislamiento causado por descargas parciales.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 24: Pérdida del aislamiento en las espiras.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 25: Esquema de las soluciones a los problemas de ingeniería</i>	<i>55</i>
<i>Figura 26: Elementos finitos típicos: (a) 1D, (b) 2D y (c) 3D</i>	<i>56</i>
<i>Figura 27: Cálculo del mallado por FEMM.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 28: Estudio del campo eléctrico en una losa rectangular</i>	<i>60</i>
<i>Figura 29: Pantalla principal del programa FEMM</i>	<i>61</i>
<i>Figura 30: Ventana: Crear nuevo proyecto en FEMM</i>	<i>61</i>
<i>Figura 31: Configuración de las características del problema en FEMM.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 32: Barra de herramienta para crear la geometría en FEMM.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 33: Geometría losa rectangular</i>	<i>64</i>
<i>Figura 34: Materiales de la librería de FEMM</i>	<i>64</i>
<i>Figura 35: Selección de materiales en FEMM.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 36: Características del aire</i>	<i>65</i>
<i>Figura 37: Definir un nuevo material en FEMM</i>	<i>66</i>
<i>Figura 38: Introducir un nuevo material en FEMM</i>	<i>66</i>
<i>Figura 39: Introducir etiqueta de material en FEMM.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 40: Ventana para adjudicar material en FEMM.....</i>	<i>68</i>

<i>Figura 41: Material adjudicado en la losa rectangular. FEMM</i>	<i>68</i>
<i>Figura 42: Ventana emergente para definir nuevos conductores en FEMM ..</i>	<i>69</i>
<i>Figura 43: Introducción de un nuevo conductor en FEMM</i>	<i>69</i>
<i>Figura 44: Losa rectangular. Cómo introducir el valor de un conductor</i>	<i>70</i>
<i>Figura 45: Ventana emergente para crear un nuevo conductor</i>	<i>70</i>
<i>Figura 46: Frontera de la losa rectangular mediante FEMM</i>	<i>71</i>
<i>Figura 47: Ventana emergente para la creación de una frontera Dirichlet en FEMM</i>	<i>72</i>
<i>Figura 48: Modelo de losa rectangular en FEMM finalizado</i>	<i>73</i>
<i>Figura 49: Barra de opciones de análisis en FEMM</i>	<i>73</i>
<i>Figura 50: Modelo mallado de la losa rectangular en FEMM</i>	<i>74</i>
<i>Figura 51: Análisis de los resultados en FEMM</i>	<i>75</i>
<i>Figura 52: Ventana emergente "Point Props"</i>	<i>75</i>
<i>Figura 53: Resultados del ejemplo losa rectangular con FEMM</i>	<i>76</i>
<i>Figura 54: Importar un archivo ".DXF" a FEMM</i>	<i>77</i>
<i>Figura 55: Fallo en la creación del mallado en FEMM</i>	<i>78</i>
<i>Figura 56: Fallo al simular el modelo el FEMM</i>	<i>78</i>
<i>Figura 57: Localización de zonas que producen un error en FEMM</i>	<i>79</i>
<i>Figura 58: Diagrama de flujo para la obtención de voltajes en FEMM</i>	<i>80</i>
<i>Figura 59: Aislador U100BLP</i>	<i>81</i>
<i>Figura 60: Capas que forman parte de un aislador</i>	<i>82</i>
<i>Figura 61: Modelo de aislador con geométrica simplificada</i>	<i>83</i>
<i>Figura 62: Aislador U100BLP sin la primera capa de cemento</i>	<i>83</i>
<i>Figura 63: Aislador U100BLP sin la capa de porcelana</i>	<i>84</i>
<i>Figura 64: Aislador U100BLP</i>	<i>85</i>

<i>Figura 65: Resultados de la distribución de voltaje en U100BLP con geometría simplificada</i>	<i>87</i>
<i>Figura 66: Análisis de las distintas capas del aislador con la geometría simplificada</i>	<i>88</i>
<i>Figura 67: Valor del voltaje en un punto de la segunda capa de cemento.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 68: Pestaña en FEMM para obtener el campo eléctrico.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 69: Ventana emergente para seleccionar el estudio del campo eléctrico en FEMM</i>	<i>89</i>
<i>Figura 70: Representación del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada</i>	<i>90</i>
<i>Figura 71: Zoom sobre la representación del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada</i>	<i>91</i>
<i>Figura 72: Zoom sobre la representación del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada</i>	<i>91</i>
<i>Figura 73: Distribución del campo eléctrico en la esquina inferior derecha, punto crítico, del aislador con la geometría simplificada</i>	<i>92</i>
<i>Figura 74: Esquema para el estudio de la distribución del campo eléctrico en el aislador con geometría simplificada</i>	<i>93</i>
<i>Figura 75: Gráfica de la distribución del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada</i>	<i>93</i>
<i>Figura 76: Simulación del aislador sin la primera capa de cemento en FEMM</i>	<i>94</i>
<i>Figura 77: Comparación de las simulaciones del aislador. a) Con la geometría simplificada, b) sin la primera capa de cemento</i>	<i>94</i>
<i>Figura 78: Comparación entre las capas aislantes de los aisladores: a) geometría simplificada, b) sin la primera capa de cemento</i>	<i>95</i>
<i>Figura 79: Distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de cemento.....</i>	<i>96</i>

<i>Figura 80: Zoom de la distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de cemento</i>	<i>97</i>
<i>Figura 81: Zoom a la esquina superior derecha para el estudio de la distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de cemento.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 82: Comparación de la distribución del campo eléctrico en la esquina superior: a) aislador con geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento</i>	<i>98</i>
<i>Figura 83: Gráfica de la distribución de campo eléctrico en el aislador suprimiendo la primera capa de aislante</i>	<i>99</i>
<i>Figura 84: Simulación de la distribución de tensiones aislador U100BLP sin la capa de porcelana</i>	<i>100</i>
<i>Figura 85: Comparación de las simulaciones de la distribución de tensiones: a) Geometría simplificada, b) sin la primera capa de cemento, c) sin la capa de porcelana.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 86: Distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de porcelana.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 87: Distribución del campo eléctrico en los puntos críticos del aislador sin la capa de porcelana: a) esquina superior derecha, b) esquina inferior izquierda.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 88: Comparación de la distribución del campo eléctrico en la esquina superior derecha: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana</i>	<i>104</i>
<i>Figura 89: Zoom de la distribución del campo eléctrico en la esquina superior derecha más crítica de cada ejemplo de aislador: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana</i>	<i>104</i>
<i>Figura 90: Comparación de la distribución del campo eléctrico en la esquina inferior más crítica: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana</i>	<i>106</i>

<i>Figura 91: Zoom de la distribución del campo eléctrico en la esquina inferior más crítica de cada ejemplo de aislador: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana</i>	<i>107</i>
<i>Figura 92: Gráfica de la distribución de campo eléctrico en el aislador sin la capa de porcelana</i>	<i>108</i>
<i>Figura 93: Distribución de tensiones en el aislador U100 BLP</i>	<i>108</i>
<i>Figura 94: Comparación de los resultados de la distribución de tensión: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador real</i>	<i>109</i>
<i>Figura 95: Distribución del campo eléctrico en el aislador U100BLP</i>	<i>110</i>
<i>Figura 96: Comparación de la distribución del campo eléctrico: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador real</i>	<i>111</i>
<i>Figura 97: Zoom de la zona crítica en la distribución del campo eléctrico en el aislador real</i>	<i>111</i>
<i>Figura 98: Distribución de tensiones en el aislador real con contaminación ambiental en zona húmeda</i>	<i>113</i>
<i>Figura 99: Distribución de tensiones en el aislador real con contaminación ambiental en zona lluviosa</i>	<i>113</i>
<i>Figura 100: Comparación de los resultados en la distribución de tensiones en el aislador U100BLP: a) aire puro, b) contaminación en zona húmeda, c) contaminación en zona de lluvia</i>	<i>114</i>
<i>Figura 101: Distribución del campo eléctrico en el aislador localizado en una zona húmeda con contaminación atmosférica</i>	<i>115</i>
<i>Figura 102: Distribución del campo eléctrico en el aislador localizado en una zona lluviosa con contaminación atmosférica</i>	<i>116</i>
<i>Figura 103: Comparación de los resultados en la distribución del campo eléctrico en el aislador U100BLP: a) aire puro, b) contaminación en zona húmeda, c) contaminación en zona de lluvia</i>	<i>117</i>



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial e integral y en función del tiempo.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2: Clase térmica de los sistemas de aislamiento eléctrico según las normas UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1. (Fuente: elaboración propia).....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 3: Las cuatro principales clases térmicas de aislamiento empleadas en la industria.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4: Valores mínimos de resistencia de aislamiento a 40 °C recomendados para distintos devanados.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 5: Valores mínimos recomendados de IR y DAR.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 6: Valores mínimos recomendados de DD</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 7: Datos del enunciado de la losa rectangular</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 8: Catálogo de los aisladores de 100 kV</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 9: Permitividades relativas de los materiales que definen al aislador..</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 10: Valores de la permitividad en ambientes contaminados.....</i>	<i>112</i>



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

El Trabajo Fin de Grado se inició con una petición de información a cinco empresas (contestaron solo dos) sobre el software utilizado en la industria eléctrica para el diseño de los aislamientos. Como consecuencia de la información recogida se optó por utilizar para el desarrollo del Trabajo el software libre de elementos finitos FEMM (Finite Element Method Magnetics).

A modo de introducción se prosigue con una recopilación de diversos conceptos relativos al electromagnetismo, a las máquinas eléctricas, al sistema aislante y al método de elementos finitos.

Para la presentación de dicho software se resuelve un caso sencillo, una placa rectangular. A continuación, se plantean varios ejemplos referidos a los materiales aislantes que constituyen un aislador, analizando en ellos la influencia del diseño de la geometría y las condiciones atmosféricas en el potencial eléctrico (distribución) y en el campo eléctrico.

Finalmente se presentan los resultados obtenidos en los diferentes análisis.

1.2 Abstract

The Final Degree Work began with a request for information from five companies (only two replied) on the software used in the electrical industry for the design of insulation. As a result of the information collected, it was decided to use FEMM (Finite Element Method Magnetics) finite element free software for the development of the Work.

By way of introduction, we continue with a compilation of various concepts related to electromagnetism, electrical machines, the insulating system and the finite element method.

For the presentation of this software, a simple case, a rectangular plate, is solved. Several examples of insulating materials constituting an insulator are given below, in which the influence of geometry design and atmospheric conditions on electrical potential (distribution) and on the electric field is analysed.

Finally, the results obtained in the different analyses are presented.



1.3 Palabras clave

Máquinas eléctricas, aislante eléctrico, elementos finitos, campo eléctrico.

1.4. Keywords

Electric machines, electrical insulation, finite elements, electric field.

1.5 Objetivos del Trabajo de Fin de Grado

Se pueden señalar como objetivos del presente Trabajo Fin de Grado los siguientes:

1. Conocimiento del software utilizado por alguna industria relevante para el diseño y análisis de los aislamientos.
2. Localización y presentación de un software libre capaz de realizar estudios que determinen las zonas críticas, es decir, aquellas zonas susceptibles de presentar un fallo de aislamiento.
3. Analizar la distribución de tensiones y del campo eléctrico en el interior de las piezas utilizando el software de elementos finitos libre.
4. Mostrar la importancia que tienen los aislamientos para el correcto funcionamiento de la maquinaria y del aparellaje eléctrico.

1.6 Interés industrial del trabajo

Una de las principales causas de fallo de las máquinas eléctricas es el deterioro en los aislamientos. Por este motivo, es importante realizar un estudio y diseño del sistema aislante correcto. También es importante el mantenimiento adecuado de los aislamientos.

Para conocer qué software utilizan las empresas para el análisis y diseño del aislamiento, uno de los objetivos de este trabajo, me puse en contacto con

varias empresas internacionales y nacionales, recibiendo respuesta de las empresas ABB¹ y Lancor².

ABB no emplea un software específico para el análisis del aislamiento, sino que su medición es directa, mediante un aparato de lectura. La única prueba extrapolable a un PC que realizan la denominan “prueba LEAP”, que consiste principalmente en el análisis de datos eléctricos (corriente y voltaje) para verificar de manera cualitativa el estado del aislamiento.

Respecto a Lancor, ellos sí emplean un software para el análisis de aislamiento en sus máquinas eléctricas, en concreto uno de ellos FEMM, programa que se desarrolla y estudia en el presente trabajo. Además de ANSYS y FLUX.

1.7 Motivación a la realización del trabajo

En primer lugar, debido a un interés personal (familia y amigos), quería hacer un TFG sobre algún tema relativo a la industria eléctrica.

También deseaba proyectar sobre el TFG los conocimientos adquiridos en las diversas asignaturas del grado de Tecnologías Industriales (Física, Matemáticas, Mecánica, Máquinas Eléctricas, Electrotecnia, Diseño Industrial, Dibujo Técnico,...) y profundizar en el conocimiento de alguna herramienta informática como podría ser un software de elementos finitos.

Estas fueron las razones, unidas obviamente, a la obligación de su presentación, para la obtención del título, por las que escogí el presente TFG.

¹ ABB es una compañía de ingeniería global líder que estimula la transformación de la sociedad y la industria para lograr un futuro más productivo y sostenible. Opera en más de 100 países con sede central en Suiza. En España posee 7 centros principales de producción e ingeniería.

² Lancor es una empresa con más de 75 años de vida. Especialistas en la fabricación de motores y máquinas eléctricas. Se localiza en Bizkaia.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.

2.1. Introducción a las máquinas eléctricas

Una máquina eléctrica es aquella que es capaz de convertir energía de una forma a otra, y al menos, una de ellas es eléctrica. En base a este punto de vista, estrictamente energético, es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales:

1. **Generador:** transforma la energía mecánica en eléctrica.
2. **Motor:** transforma la energía eléctrica en mecánica.
3. **Transformador:** transforma la energía eléctrica de entrada (de corriente alterna) en unas condiciones de tensión y corrientes determinadas en otra energía eléctrica de salida (de corriente alterna) en diferentes condiciones.

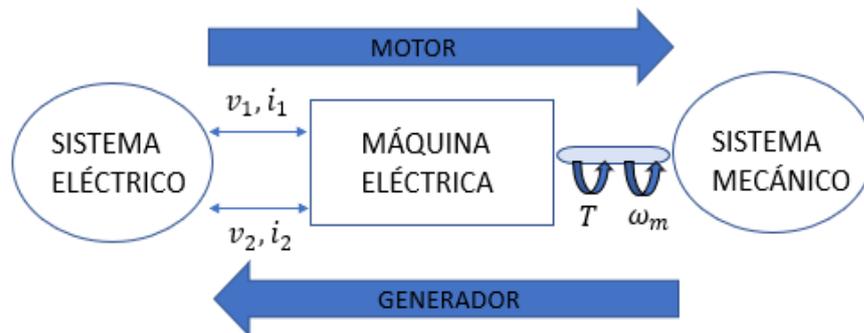


Figura 1: Esquema representativo sobre las diferencias entre motor y generador
(Fuente: Elaboración propia)

Una diferencia importante a destacar entre ellas es que los transformadores solo tienen accesos eléctricos y por ello son máquinas estáticas, no ocurre lo mismo en los generadores y motores que poseen al menos un acceso mecánico, es decir están dotadas de movimiento, por ello normalmente son máquinas rotativas. [1]

2.2. Localización del material aislante en las máquinas eléctricas

- Máquinas eléctricas rotativas

En primer lugar, es necesario conocer los elementos básicos de las máquinas eléctricas rotativas para poder identificar dónde se localizan los aislamientos en este tipo de máquinas (véase Figura 2).

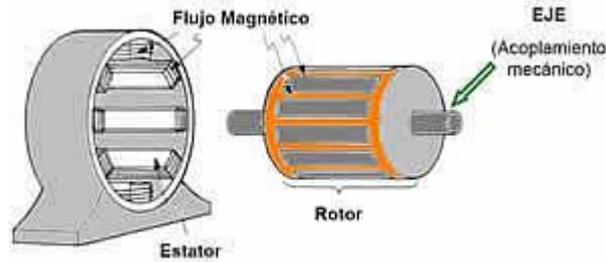


Figura 2: Esquema de la máquina rotativa
(Fuente: <https://ikastaroak.birt.eus>)

Las máquinas rotativas se componen de una parte fija (estátor) y una parte móvil (rotor) que se coloca dentro de la cavidad del estátor. Ambas partes llevan unos devanados denominados inductores e inducidos respectivamente. Ambos devanados se conectan a tensiones continuas, pero el devanado inducido recibe su tensión a través de un colector de delgas, por lo que la corriente que circula por él es alterna (aunque no sinusoidal).

Uno de los aislamientos que poseen las máquinas rotativas se encuentra en el colector de delgas. Las delgas se separan entre sí por aislamientos de mica y a su vez se aíslan del cilindro soporte por láminas del mismo material (véase Figura 3).

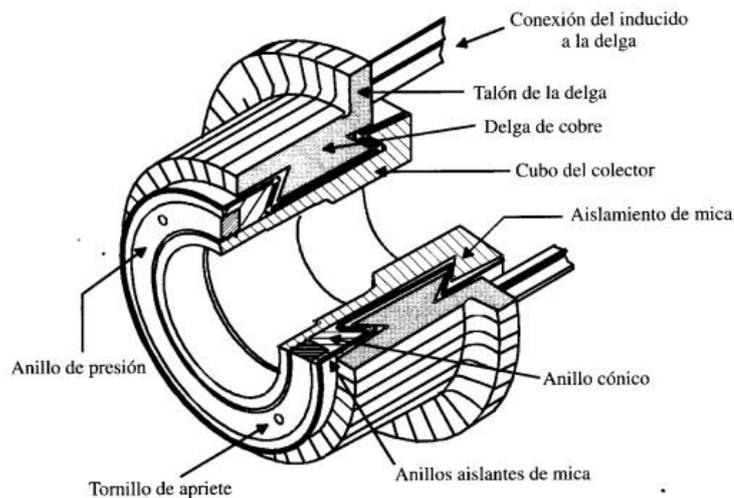


Figura 3: Perspectiva y sección de un colector de delgas
(Fuente: Fraile Mora, 2003)

Los devanados, es decir, los arrollamientos del inductor y del inducido, en las máquinas pequeñas suelen estar fabricados con cobre en forma de hilo esmaltado, es un alambre al que se le agregan varias capas de esmalte que funcionan como aislamiento y resistencia mecánica, siendo capaces de soportar hasta 400 ° C. En las máquinas de gran potencia el material utilizado

suele ser cobre en forma de pletinas esmaltadas, para aislarlas se recubren con cinta de algodón.

- Máquina eléctrica estática

Para conocer donde se localiza el material aislante en los transformadores, conviene en primer lugar, conocer las partes principales que lo forman: a) núcleo, b) devanado, c) sistema de refrigeración y d) aisladores pasantes de salida.

A continuación, se analiza el aislante existente en cada parte.

a) Núcleo

El núcleo del transformador está fabricado con chapas de acero al silicio, suelen tener forma de doble U y normalmente laminadas en frío. Para reducir las pérdidas en el hierro se las recubre con una capa aislante muy delgada, esto se consigue gracias a un tratamiento térmico especial, el carlite.

Los devanados se enrollan sobre las columnas de las chapas que forman el núcleo, dejando libre las secciones de unión entre columnas, denominadas culatas.

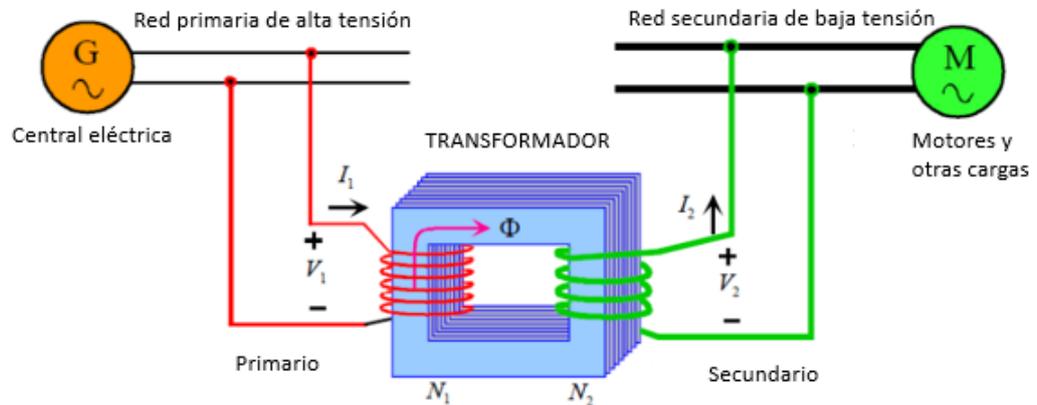


Figura 4: Esquema representativo de un transformador
(Fuente: Universidad Rey Juan Carlos)

Dependiendo de la posición relativa entre los devanados y el núcleo, se realiza una clasificación de los transformadores en dos grandes grupos (véase Figura 5):

- Acorazados, donde los devanados abrazan a la sección central del núcleo.
- De columnas, donde los arrollamientos se colocan en las partes exteriores del núcleo.

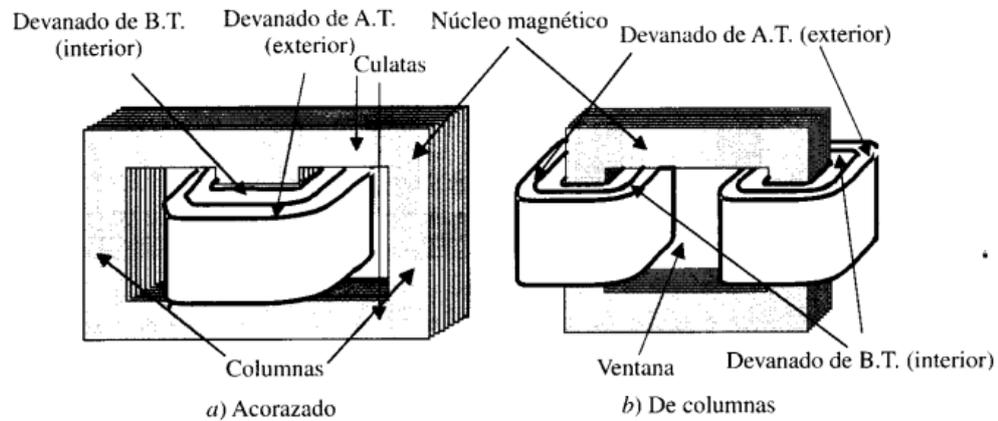


Figura 5: Tipos de transformador: a) Acorazado y b) De columnas
(Fuente: Fraile Mora, 2003)

El más utilizado en la práctica es el transformador de columnas, su construcción es más sencilla y es más reducida la superficie que debe de aislarse, motivo por el cual se adapta mejor a las altas tensiones [1].

b) Devanados

Son los que forman el circuito eléctrico del transformador. Están formados por hilos de cobre de sección circular para transformadores pequeños, y cuando se requiere secciones mayores los hilos son de sección rectangular, normalmente pletinas de cobre. Estos conductores están aislados, en el caso de los pequeños transformadores por una capa barniz y por una o varias capas de fibra de algodón o cinta de papel en el caso de transformadores de gran potencia.

Cabe resaltar que dependiendo de la disposición relativa entre los arrollamientos de A.T (alta tensión) y B.T (baja tensión), los devanados pueden ser concéntricos o alternados. En los devanados concéntricos los bobinados tienen forma de cilindros coaxiales (véase Figura 6).

El arrollamiento de B.T es más fácil de aislar que el devanado de A.T, por este motivo se coloca más cerca de la columna el de B.T. Para aislar ambos bobinados se utiliza un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado. En los devanados alternados los arrollamientos se dividen en secciones, es decir los arrollamientos de A.T y B.T se intercalan alternativamente a lo largo de la columna [1].

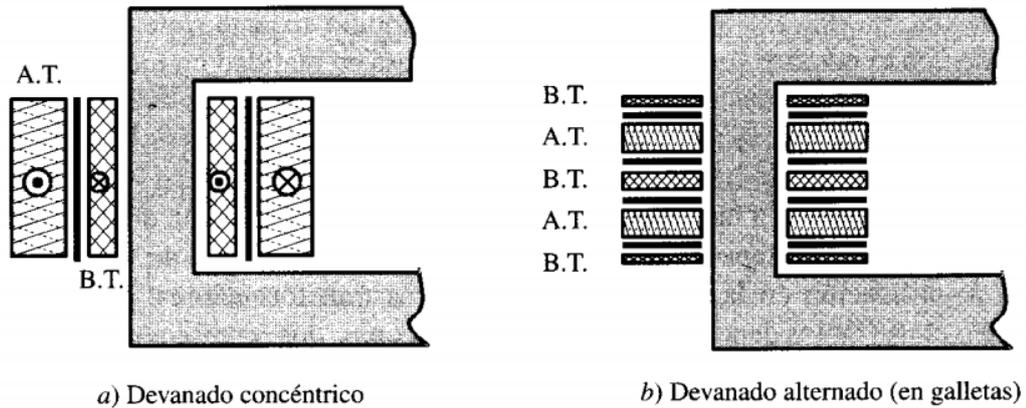


Figura 6: Devanados concéntricos y alternados
(Fuente: Fraile Mora, 2003)

c) Sistemas de refrigeración

Los aislamientos constituyen una de las partes más importantes en los transformadores, por ello se deben proteger correctamente. Para evitar que se alcancen altas temperaturas que puedan perjudicar la vida de los aislamientos es necesario instalar un sistema de refrigeración adecuado.

Dependiendo del refrigerante utilizado los transformadores se clasifican en:

- Transformadores refrigerados en seco: Cuando las potencias del transformador son pequeñas y la superficie externa es suficiente para evacuar todo el calor necesario. También como transformadores refrigerados por aire [1].
- Transformadores refrigerados por aceite: Cuando las potencias del transformador son elevadas, se utiliza como medio refrigerante el aceite. Es importante destacar la doble función del aceite, actúa tanto refrigerante como aislante, debido a que posee una capacidad térmica y una rigidez dieléctrica superior a la del aire. Estos transformadores se caracterizan porque su circuito magnético y los devanados están sumergidos en aceite [1].

d) Aisladores pasantes y otros elementos

Son accesorios que permiten el paso de los conductores del interior del transformador a su exterior sin entrar en contacto con la carcasa.

Normalmente se colocan en la parte superior del transformador y son de diferentes tipos en función de las tensiones/corrientes en juego y del tipo de conductor externo al que deben conectarse. Los aisladores típicamente están

formados por dos compartimentos, el inferior (insertado en el transformador) y el superior (anclado a la carcasa del transformador). Este último puede ser libre o estar insertado en el interior de envoltorios metálicos, por ejemplo, con SF₆ (hexafluoruro de azufre) [1]. (Véase Figura 7)

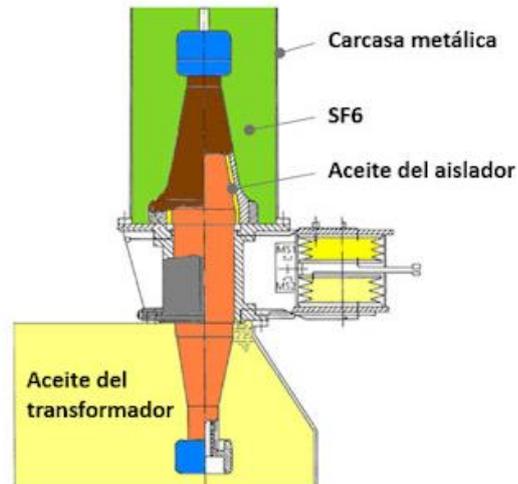


Figura 7: Esquema representativo del aislador pasante
(Fuente: WEB de Sea Marconi)

2.3. Fallos comunes en las máquinas eléctricas

Se analizan los fallos de las máquinas eléctricas rotativas y las máquinas eléctricas estáticas por separado, debido a las diferencias que existen entre ellas y que se han comentado en los puntos desarrollados anteriormente.

En este apartado se quiere analizar la importancia que tiene el buen mantenimiento de los aislamientos en este tipo de máquinas, ya que la mayoría de los fallos que ocurren en ellas son debido al fallo de los aislamientos. Un estudio realizado por Walter Evaldo Kuchenbecker, investigador colaborador del Programa de Posgraduación en Eneergía UFABC, del 2 de febrero de 2021 así lo demuestra (véase Figura 8) [2-4].

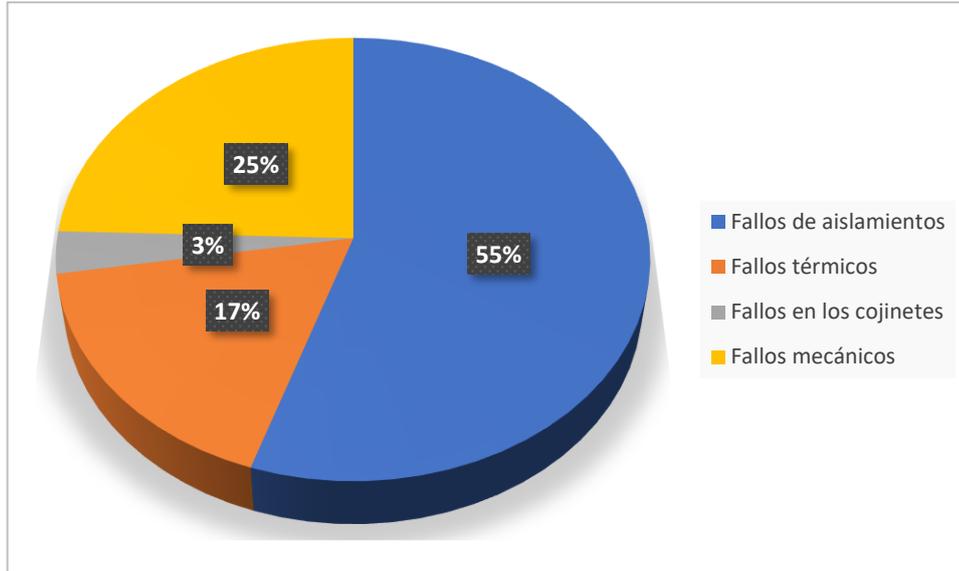


Figura 8: Porcentaje de fallos en las máquinas eléctricas por Walter Evaldo Kuchenbecker
(Fuente: Revista PQ)

Fallos en las máquinas eléctricas rotativas:

Los fallos más comunes en las máquinas eléctricas rotativas están relacionados con el aislamiento, ya que la vida útil de este se ve afectada por:

- Calor o frío excesivos.
- Humedad.
- Acumulación de polvo o suciedad.
- Ambiente corrosivo.
- Vibraciones excesivas.
- Envejecimiento.
- Sobrecarga.

Normalmente, las fallas que tienen lugar en las máquinas rotativas se clasifican en dos grandes grupos: a) eléctricas y b) mecánicas. A continuación, se explican ambas, sin entrar en detalle, ya que el objetivo de esta clasificación es observar cómo dependen estas fallas con el buen/mal estado de los aislamientos [2-4].

a) Fallas eléctricas

Están ocasionadas, por lo general, con el deterioro del sistema de aislamiento de los devanados, provocadas por sobrecargas prolongadas, polaridad incorrecta, voltajes de alimentación desbalanceados o excesivos.

b) Fallas mecánicas

La mayoría de las fallas mecánicas están originadas por fallos en el rotor, ya que se trata de la parte móvil de la máquina. Estos tipos de fallos se identifican como desequilibrios, desalineamientos, fallos en los cojinetes, fallos en los engranajes y excentricidades en todas sus variantes [2-4].

Fallos en las máquinas eléctricas estáticas:

Los fallos más difíciles de detectar en un transformador son los que tiene lugar en el interior del mismo, los más comunes son:

- **Fallas entre espiras:**

Los problemas entre espiras de bobinado de media tensión (MT) son el modo de fallo más frecuente, así como el más difícil de detectar.

Son consecuencia del deterioro localizado del aislamiento del conductor, debido a la sobrecarga térmica y dieléctrica. Como consecuencia de este fallo aumenta ligeramente la corriente primaria, debido a la modificación de la relación de transformación y a la aparición de un pequeño cortocircuito sobre el devanado en cuestión.

- **Fallas entre los devanados:**

Devanados de media tensión (MT):

No son muy comunes, pero pueden causar corrientes de falla altas, hasta la corriente de cortocircuito de la red en caso de fallo en los terminales, con efectos significativos.

Puede ser originado por una falla entre los devanados próximos a las conexiones de punto neutro de un acoplamiento en estrella, este tipo de falla se parece al comentado anteriormente, fallas entre espiras, ya que las tensiones entre los puntos que entran en contacto no son muy diferentes.

Devanados de baja tensión (BT):

Este tipo de falla se produce en casos excepcionales, ya que este tipo de devanado está situado más cerca del núcleo magnético y están rodeados por los devanados MT.

Pero sí existe la posibilidad de fallo en el caso de devanados múltiples de BT, como en el acoplamiento en zigzag. El inconveniente en este tipo de fallo es que la progresión puede ser rápida debido a la aparición de un arco de intensidad significativa, aunque la corriente de fallo es menor que la de un cortocircuito a través de los terminales secundarios.

Media tensión (MT)/Baja tensión (BT):

Se puede dar un mal contacto entre el primario y el secundario como consecuencia de un fallo entre los devanados.

Dependiendo de la colocación del neutro de ambas redes el riesgo será mayor o menor, tanto para el equipo como para las personas (véase Figura 9).

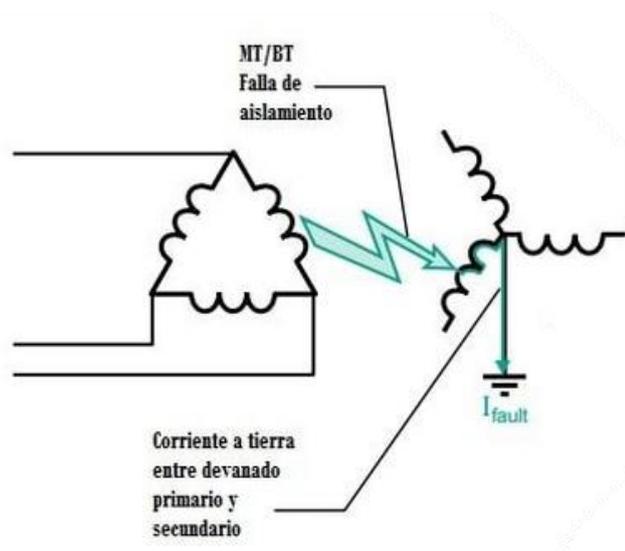


Figura 9: Representación del fallo de aislamiento. Colocación del neutro entre ambas fases
(Fuente: <https://www.electricaplicada.com>)

- Fallos a tierra y la influencia de la puesta a tierra del neutro:

Normalmente ocurren por una ruptura del aislamiento después de una sobretensión.

Las consecuencias de este fallo van a depender de la disposición de puesta a tierra de la red de alimentación y de la ubicación con respecto a la conexión del neutro en el transformador. Se obtienen así la siguiente clasificación:

- Neutro conectado a tierra mediante una impedancia: En este caso aparece una corriente a tierra que varía en función de la impedancia de neutro y la posición del fallo en el devanado.

- b) Puesta a tierra mediante Bobina de Petersen³ (red neutra sintonizada): Esta red se caracteriza porque un fallo de aislamiento produce una corriente de falla, la cual tiene un valor bajo, lo que permite que desaparezca espontáneamente y reaparezca progresivamente la tensión.
- c) Neutro conectado directamente a tierra: La aparición de una falla aumenta la corriente de neutro. Esta corriente será siempre significativa y requerirá una respuesta rápida, de no ser así puede acabar en una explosión. Para evitar esto existen los dispositivos de protección de la red, los cuales son los que tienen que ser capaces de actuar antes de que el fallo se agrave [2-6].

2.4 Definición de las leyes electromagnéticas.

El estudio de los métodos de diseño de un aislador eléctrico mediante elementos finitos requiere un pequeño análisis de las leyes electromagnéticas, así como del funcionamiento de los mismos. A continuación, se hará un pequeño resumen de las leyes electromagnéticas.

2.4.1 Las ecuaciones de Maxwell

Maxwell a través de unas sencillas ecuaciones matemáticas fue capaz de expresar el desarrollo de los campos eléctricos y magnéticos y cómo ambos se relacionan entre sí.

Se muestra una tabla con las cuatro ecuaciones de Maxwell en forma diferencial e integral y en función del tiempo.

³ Bobina de Petersen es una reactancia variable que se conecta entre el neutro del transformador de potencia de una subestación y la malla de puesta a tierra. Su característica más importante es que durante las fallas a tierra, la corriente inductiva de la reactancia cancela la corriente de falla capacitiva aportada por la red, de forma que la intensidad que circula por el punto de falla se reduce a una pequeña corriente resistiva

Tabla 1: Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial e integral y en función del tiempo

Forma diferencial	Unidades	Forma integral
$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E}) = \rho_v$	[C/m ³]	$\oint_S \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho_v dv$
$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	[T]	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	[V/m ²]	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$
$\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{J} + \frac{\partial (\epsilon_0 \mathbf{E})}{\partial t}$	[A/m ²]	$\oint_l \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \frac{d}{dt} \int_S \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$

Las cuatro ecuaciones de Maxwell se conocen en la literatura con otros nombres en honor a aquellos científicos que hicieron posible el entendimiento del fenómeno electromagnético. Por este motivo estas ecuaciones se estudian como:

- Ley de Gauss para campos eléctricos en espacio libre [7-11].
- Ley de Gauss para campos magnéticos [9-11].
- Ley de Faraday [7-11].
- Ley de Ampere circuital en espacio libre [7-11].

2.4.2 Ley de Gauss para campos eléctricos en espacio libre

La primera de las cuatro ecuaciones de Maxwell expresa cómo varía el campo eléctrico con la distancia como consecuencia de las cargas eléctricas. Esto se traduce a que el campo eléctrico es más débil cuanto más alejado está el punto de medición del mismo. También influye la densidad de carga, a mayor densidad de carga, más fuerte es el campo eléctrico.

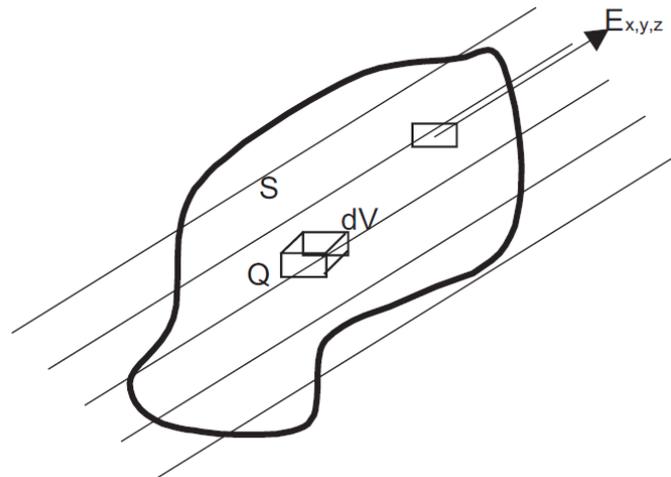


Figura 10: Carga eléctrica contenida solamente dentro del volumen V que rodea la superficie S.
(Fuente: Torres Sánchez, H. (2011))

La Ley de Gauss para el campo eléctrico define que el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada es igual al cociente entre la carga y la permeabilidad eléctrica del vacío.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

El vector de intensidad de campo eléctrico E tiene como unidades la fuerza por unidad de carga, es decir, newtons [N] por culombios [C].

La densidad de las cargas eléctricas viene expresada por ϵ medido en el S.I por faradio [F] por metro [m], lo que equivale a culombio cuadrado [C²] por newton [N] metro [m]. La densidad de carga eléctrica no es variable, sino que depende del medio en el que se mide el campo eléctrico E. La densidad de carga eléctrica en el vacío o permitividad del vacío:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m} = \frac{1}{36\pi \times 10^9} \frac{C^2}{N \cdot m}$$

2.4.3 Ley de Gauss para campos magnéticos

La segunda ecuación de Maxwell expresa que no se puede hacer una afirmación comparable a la anterior para magnetismo, porque las “cargas” magnéticas, que se suponían anteriormente, no existen. Por ejemplo, si se corta un imán por la mitad, no existirá un polo norte aislado y un polo sur aislado; cada parte de las cortadas tendrá sus polos norte y sur.

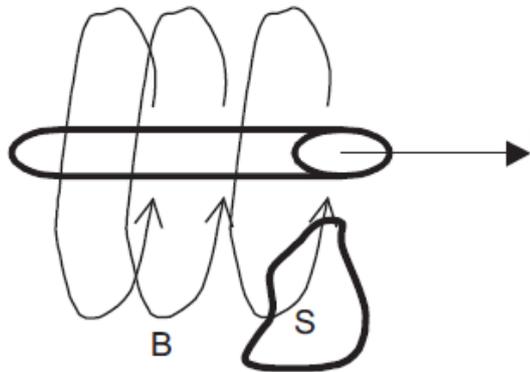


Figura 11: La densidad de campo magnético B que emana de una superficie cerrada siempre será cero
(Fuente: Torres Sánchez, H. (2011))

La Ley de Gauss para campos magnéticos especifica que la densidad de campo magnético neto (positivo o negativo) que emana de cualquier superficie cerrada S en el espacio siempre será cero. Es decir, ley de conservación de la energía: lo que entra igual a lo que sale.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

El vector de densidad de flujo magnético B tiene como unidad el weber [Wb] por metro cuadrado [m^2], lo que equivale a la definición de Tesla⁴ [T].

2.4.4 Ley de Faraday

La tercera ecuación de Maxwell describe cómo un campo magnético variable induce un campo eléctrico.

⁴ Tesla: Unidad de medida de la inducción magnética (o densidad de flujo magnético), del S.I, su símbolo es T. Un Tesla se define como la inducción de un campo magnético que ejerce una fuerza de 1 Newton sobre una carga de 1 coulomb que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de inducción magnética. También se define como una inducción magnética uniforme que, repartida normalmente sobre una superficie de un m^2 , produce a través de esta superficie un flujo magnético total de un weber

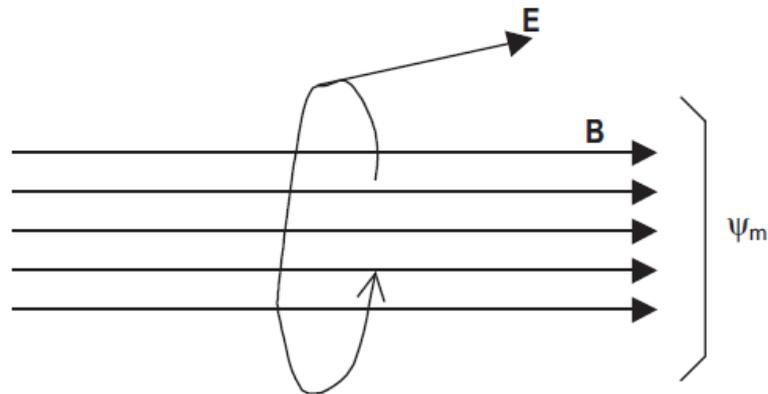


Figura 12: Campo eléctrico (E) inducido por la variación de un campo magnético
(Fuente: Torres Sánchez, H. (2011))

La Ley de Faraday o la Ley de la fuerza electromotriz inducida establece que el intervalo de tiempo de crecimiento del flujo magnético neto que atraviesa cualquier superficie arbitraria S es igual a la integral del campo E alrededor de la línea cerrada que rodea S. Esto es equivalente a decir que un campo E es generado por un flujo magnético variable con el tiempo. El campo E tiene que variar también con el tiempo para satisfacer la ecuación en cada instante.

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_{St} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

Para campos eléctricos estrictamente estáticos en el tiempo la Ley de Faraday será igual a cero [7].

2.4.5 Ley de Ampere circuital en espacio libre

La cuarta ecuación de Maxwell describe cómo un campo eléctrico variable con el tiempo (o una corriente eléctrica) induce un campo magnético.

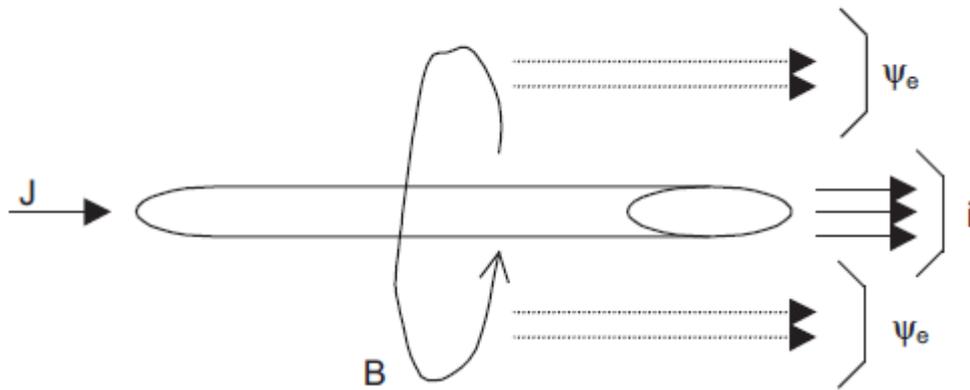


Figura 13: Densidad de campo magnético B inducido por la variación de un campo eléctrico E.
(Fuente: Torres Sánchez, H. (2011))

La Ley de Ampere establece que la integral de la línea del campo magnético B (modificado por la permeabilidad del medio) alrededor de cualquier camino arbitrario cerrado l tiene que, en cualquier tiempo t, ser igual a la suma de la corriente eléctrica meta i más el intervalo de tiempo de cambio de flujo eléctrico neto, que pasa a través de la superficie S limitada por l.

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_s (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$$

La intensidad de campo magnético (H) define la influencia que ejerce una corriente externa en la creación del campo magnético del material, independientemente de la respuesta magnética del material. La relación se expresa como:

$$H = B / \mu$$

2.4.6 Ley de Lorentz

Si en un punto P existen los campos eléctrico E y magnético B, su presencia se puede detectar por medio de una carga de prueba positiva Q+ colocada en dicho punto.

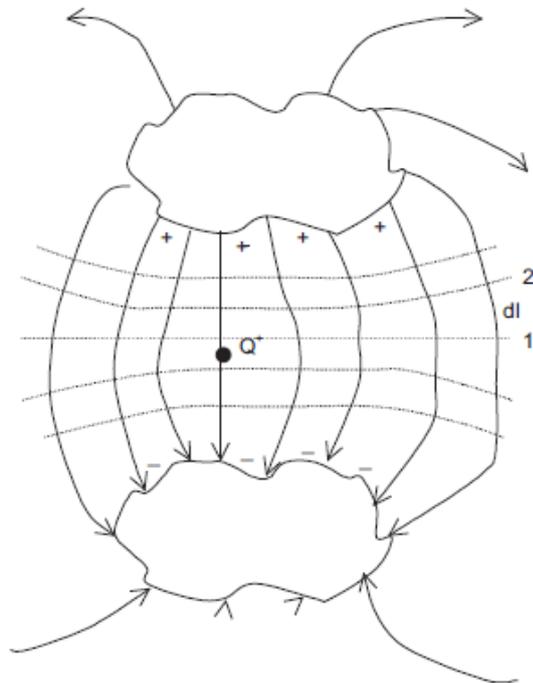


Figura 14: Fuerza del campo eléctrico sobre una carga de prueba positiva $Q+$.
(Fuente: Torres Sánchez, H. (2011))

La fuerza que actúa sobre la carga de prueba $Q+$ está dada por la Ley de Lorentz:

$$F = Q(E + v \times B)$$

$$F \cdot E = Q \cdot E$$

Donde:

- Q es la carga (en culombios) en el punto P.
- v es la velocidad (en metros por segundo) de la carga Q .
- E es la intensidad de campo eléctrico (en newtons por culombio) en el punto P.
- $F \cdot E = Q \cdot E$; representa la fuerza (en newtons) del campo eléctrico actuando sobre la carga Q .
- $F \cdot B = Qv \times B$; hace referencia a la fuerza (en newtons) del campo magnético actuando sobre la carga Q .

El campo eléctrico debe ser un vector para satisfacer la ecuación anterior, ya que la fuerza es un vector y la carga es un escalar.

Mediante la consideración de una carga de prueba positiva, queda determinada la dirección del vector de campo eléctrico E : de positivo a negativo. Por lo tanto, las direcciones de los vectores de intensidad de campo

eléctrico E quedan representadas por las tangentes de las líneas de flujo de campo eléctrico [7].

2.5 Definición de las condiciones de contorno

Es necesario definir las condiciones de contorno imprescindibles para obtener una correcta solución del problema a estudiar [10-13]. A continuación, se muestran las condiciones de contorno planteadas para problemas eléctricos.

- Dirichlet: En este tipo de condición de contorno, se fija un valor escalar del potencial en un punto. Normalmente en problemas electrostáticos se utiliza para fijar el voltaje de una superficie en el dominio del problema. Dando el valor del potencial en la superficie se garantiza que la solución es única. Si se impone como valor del potencial cero, se restringe el paso del flujo, estableciendo así una frontera finita.
- Neuman: Esta condición límite especifica que la primera derivada del potencial a lo largo de la condición impuesta a un límite. Normalmente se utiliza para definir que el flujo debe pasar a lo largo de dicho límite exactamente en un ángulo de 90° respecto de dicho límite.

En resumen, una condición de contorno Dirichlet se caracteriza por imponer valores sobre las funciones y Neuman cuando se imponen sobre las derivadas de las funciones [10].



CAPÍTULO 3: AISLANTES EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

3.1. Aislantes eléctricos

Según la norma UNE-EN 60085 un *sistema de aislamiento eléctrico* es “una estructura aislante que contiene uno o más materiales aislantes eléctricos junto con partes conductoras asociadas y que se utiliza en un dispositivo electrotécnico” [14].

Un aislante eléctrico, también conocido como dieléctrico, es un material en el que se puede despreñar la corriente, denominada corriente de fuga, que pasa por él, debido a que tiene una conductividad muy baja.

La función de los aislantes en las máquinas eléctricas es la de garantizar el aislamiento eléctrico entre los conductores y las piezas metálicas, los conductores y la carcasa, y entre los propios conductores. Debido a su sensibilidad a las sollicitaciones térmicas, mecánicas y dieléctricas, estos materiales suelen ser la parte más delicada de una máquina eléctrica.

El aislante está caracterizado por propiedades eléctricas, mecánicas y físico-químicas. Las más importantes son las eléctricas, pero no hay que dejar de lado el resto, ya que una de las características más importantes de los aislantes es la máxima temperatura que puede soportar sin que se vean afectadas sus propiedades eléctricas [15].

Los aislamientos son una parte bastante importante y esencial en una máquina eléctrica, ya que el funcionamiento y la duración de la misma dependerán fundamentalmente de ellos.

El fallo por aislamiento no es un fenómeno que se pueda controlar fácilmente, ya que se trata de un fenómeno que se da como consecuencia, por ejemplo, de las sollicitaciones centrífugas (en máquinas rotantes), vibraciones de las bobinas dentro de las ranuras, sollicitaciones electrodinámicas (corrientes de cortocircuito), sobretensiones (de frecuencia industrial, atmosféricas o de maniobra) y muy particularmente sollicitaciones de origen térmico. No ocurre esto para otro tipo de fallas, como pueden ser el desgaste de órganos de rozamiento, escobillas, colectores... ya que se trata de fenómenos relativamente previsibles y se pueden evitar con un adecuado programa de mantenimiento [16].

Es importante resaltar que el término de seguridad va muy ligado cuando se habla de aislantes eléctricos.

3.2 Definiciones generales

El objetivo de este epígrafe es mostrar cual es la mejor disposición de aislantes, y para ello es necesario definir conceptos como: la resistencia de aislamiento, la rigidez dieléctrica y la constante dieléctrica.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

La resistencia de aislamiento de un aislante es la resistencia que se opone al paso de la corriente eléctrica, medida en la dirección en que se tiene que asegurar el aislamiento.

Existen dos caminos paralelos por los que circula la corriente del aislante (la corriente de fuga), por el interior y por la superficie del material, como consecuencia de este efecto aparece la resistencia de aislamiento.

Cuando entre dos puntos de una superficie se aplica tensión, aparece una resistencia que se opone al paso de la corriente en dicha superficie, esta resistencia recibe el nombre de resistividad de aislamiento superficial. La unidad de medida es el mega ohmio [$M\Omega$]. Las piezas aislantes deben ser fabricadas con el mayor cuidado posible, dejándolas con acabados bien lisos y pulidos, ya que la resistividad de aislamiento depende en gran medida de la limpieza de la superficie.

El objetivo es conseguir una mayor resistencia de aislamiento. Por este motivo, se debe tener en cuenta que, a mayor limpieza, mayor resistividad de aislamiento superficial [7,15 y 16].

RIGIDEZ DIELECTRICA

Se denomina rigidez eléctrica de un aislante a la intensidad del campo eléctrico máxima que puede soportar el aislante sin que se produzca su perforación. Esto quiere decir que, cuando la intensidad de campo eléctrico en el interior del material aislante supera a su rigidez dieléctrica, el material deja de ser aislante y se convierte en conductor.

La rigidez dieléctrica se expresa como cociente entre la tensión de perforación del material y el espesor de la pieza aislante y se mide en kilovoltios entre milímetros [kV/mm].

Aunque normalmente para tensión alterna se emplea como valor de tensión el valor máximo, es importante tener en cuenta que en el caso de que la tensión

aplicada al aislante fuese alterna se debe especificar si el valor utilizado es el eficaz o el valor máximo (el de cresta).

Hasta ahora se ha hablado del concepto de rigidez dieléctrica referido al interior del material, pero cuando la tensión se aplica entre dos puntos de la superficie del material aislante, se habla de rigidez dieléctrica superficial, y se define como el cociente entre la tensión de perforación y la distancia entre los electrodos. Se mide también en kV/mm. Pero en este caso si se utiliza tensión alterna, el valor empleado es el valor eficaz.

Los materiales que están sumergidos en aire no tienen una buena rigidez dieléctrica, por este motivo los materiales aislantes se sumergen en aceite, consiguiendo de esta manera aumentar el valor de la rigidez dieléctrica [7,15 y 16].

CONSTANTE DIELELÉCTRICA ϵ_r

La constante dieléctrica o permitividad relativa ϵ_r de un aislante se define como el cociente de la capacidad de un condensador que tuviera como dieléctrico a este material entre la capacidad que tendría el mismo condensador si utilizara el vacío como dieléctrico.

Es un parámetro físico que proporciona información sobre cómo afecta el campo eléctrico en los materiales.

Para calcular la capacidad de un condensador en el que se utiliza como dieléctrico el vacío, se toma la siguiente ecuación:

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{\tau}$$

Donde:

- C_0 es la capacidad de dicho condensador
- S la sección de las placas del condensador
- τ distancia entre las placas del condensador
- ϵ_0 permitividad absoluta del vacío

Si ahora lo que se quiere es calcular la capacidad de un condensador que utiliza un material de permitividad absoluta ϵ como dieléctrico, se procede de la misma forma que anteriormente, es decir:

$$C = \varepsilon \frac{S}{\tau} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{\tau}$$
$$(\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0)$$

Donde:

- C es la capacidad del condensador
- S la sección de las placas del condensador
- τ distancia entre las placas del condensador
- ε permitividad absoluta del material
- ε_r constante dieléctrica o permitividad relativa

Con lo expuesto anteriormente, se puede definir el valor de la constante dieléctrica de un material como:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

Donde:

- C es la capacidad del condensador que utiliza como dieléctrico a un material con constante dieléctrica ε_r
- C_0 es la capacidad del condensador si se utilizara el vacío como dieléctrico

Para definir las ecuaciones anteriores se ha tenido en cuenta una capa de material aislante, pero en la realidad las máquinas eléctricas, los dispositivos eléctricos, poseen varias capas de material aislante. Por eso, es importante destacar algunos aspectos a tener en cuenta:

- Interesa que el material aislante predominante en el dispositivo es el que posea una constante dieléctrica ε_r pequeña, y además este caracterizado con una rigidez dieléctrica más alta que la del resto de aislante, ya que de no cumplir esto último, este aislante será el que se perfora en primer lugar.
- Se puede llegar a la conclusión de que una solución para evitar la perforación del aislante predominante es aumentar el espesor del mismo con el fin de aumentar la rigidez dieléctrica, y de este modo lograr la perforación de otra capa aislante, pero lo que se consigue con esto es que toda la tensión que se ha aplicado recaiga en el primer aislante, es decir, el que acabará perforando será este.

Por lo expuesto anteriormente, la conclusión final es que la mejor disposición para colocar los aislantes se consigue cuando se utilizan materiales que tengan un valor muy parecido o igual del producto de su constante dieléctrica por su rigidez dieléctrica.

Un fallo principal en la fabricación de los aislantes que puede causar que, por ejemplo, un condensador no se pueda utilizar, son las burbujas de aire que puedan quedar en el interior del aislante, en el interior de ellas la intensidad del campo eléctrico es muy alta, provocando descargas. Esto se traduce en un fallo generalizado en todo el aislamiento.

Para evitar esto se rellenan todos los huecos posibles en el interior del aislante mediante procedimientos de impregnación. En el caso de las bobinas, es necesario eliminar toda la humedad que puedan tener, para ello se calientan antes del procedimiento de impregnación.

El procedimiento de impregnación se puede realizar por varios métodos como: método por goteo, se utiliza principalmente para los bobinados; método de inmersión, empleado en máquinas pequeñas y medianas de baja tensión y el método de impregnación en autoclave para máquinas de alta tensión.

Normalmente para motores de tracción, motores de alta tensión y generadores se utiliza la impregnación por vacío y presión.

Una vez acabado el proceso de impregnación, y con finalidad de eliminar el barniz que ha quedado en exceso se realiza el proceso de secado.

Dependiendo del barniz que se ha utilizado el secado se hará al aire o al horno [7,15 y 16].

3.3 Normativa de los aislamientos eléctricos

El objetivo de este epígrafe es dar una visión general sobre la normativa vigente aplicada en España sobre los sistemas de aislamiento eléctricos. Por lo tanto, no se indica toda la normativa actual vigente hasta este momento en España, ya que es bastante extensa, sino que a continuación se muestra la normativa que ha resultado de ayuda para la elaboración de este trabajo.

- **UNE-EN IEC 60664-1: 2021.** Coordinación de aislamiento de los equipos en los sistemas (redes) de baja tensión. Parte 1: Principio, requisitos y ensayos [17].



- **UNE-EN 62068: 2013.** Materiales y sistemas de aislamiento eléctrico. Método general de evaluación de la endurance eléctrica producido por impulsos de tensión repetitivos [18].
- **UNE-EN IEC 60071-2: 2018.** Coordinación de aislamiento. Parte 2: Guía de aplicación [19].
- **UNE-EN 60664-3: 2018.** Coordinación de aislamiento de los equipos en los sistemas (redes) de baja tensión. Parte 3: Uso de revestimiento, encapsulado o moldeado para la protección contra la contaminación [20].
- **UNE-EN 60505:2011/AC:2017-03.** Evaluación y clasificación de los sistemas de aislamiento eléctrico [21].
- **UNE-EN 60085:2008.** Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica [22].
- **UNE-EN 60034-18-1:2010.** Máquinas eléctricas rotativas. Parte 18-1: Evaluación funcional de los sistemas de aislamiento. Principios directores generales [23].
- **UNE-EN 60034-18-42:2017/A1:2020.** Máquinas eléctricas rotativas. Parte 18-42: Sistemas de aislamiento eléctrico a las descargas parciales (Tipo II) usados en máquinas eléctricas rotativas alimentadas por convertidores de tensión. Ensayos de calificación [24].
- **UNE-EN IEC 60034_27-4:2018.** Máquinas eléctricas rotativas. Parte 27-4: Medida de la resistencia de aislamiento y del índice de polarización del aislamiento del devanado de las máquinas eléctricas rotativas [25].
- **UNE-EN 60076-3:2014/A1:2018.** Transformadores de potencia. Parte 3: Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancias de aislamiento en el aire [26].
- **UNE-EN 60137:2018.** Aisladores pasantes para tensiones alternas superiores a 1000 V [27].

3.4 Clases de aislamiento eléctrico

Los materiales aislantes son muy sensibles a la temperatura, por ello normalmente son los que limitan la potencia de la máquina. Debido a que cuanto mayor es la potencia suministrada por la máquina, mayor será el calor que desprenda, es decir mayor será la temperatura que genere. Lo que se relaciona directamente con la temperatura que pueden soportar los aislamientos de la máquina sin peligro de acortar su vida útil, a esta temperatura se la denomina *endurancia térmica*⁵.

Es importante conocer la clasificación térmica de los materiales aislantes porque muchas de las aplicaciones de los materiales aislantes quedan definidas por esta temperatura máxima que soportan.

Tabla 2: Clase térmica de los sistemas de aislamiento eléctrico según las normas UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1. (Fuente: elaboración propia)

CLASE TÉRMICA (°C)	ANTIGUA DESIGNACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	CALENTAMIENTO MÁXIMO (°C)
90	Y	90	50
105	A	105	65
120	E	120	80
130	B	130	90
155	F	155	115
180	H	180	140
200	N	200	160
220	R	220	180
250	-	250	210

La *clase térmica*⁶ de un sistema de aislamiento se designa mediante el valor numérico de la temperatura de utilización continua máxima recomendada medida en grados centígrados. En la Tabla 2 se recogen las designaciones de las clases térmicas.

En la Tabla 2, en la segunda columna aparece la antigua designación, donde la clase térmica se designaba con una letra. En la tercera columna se indica la temperatura a la que se puede someter el aislamiento para que este no reduzca su vida útil, la denominada temperatura máxima en °C. En la cuarta columna se indica el calentamiento⁷ máximo en el supuesto de que el fluido

⁵ Según las normas UNE-EN 62114 y 60085.

⁶ Por las normas UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1

⁷ Se denomina calentamiento a la diferencia entre la temperatura del sistema de aislamiento y la del fluido de refrigeración. Norma UNE 60034-1

refrigerante sea aire ambiente a una altitud inferior a 100 metros sobre el nivel del mar.

Para calcular los valores de la columna 4 de la Tabla 2, es decir el calentamiento máximo, se resta 40 °C a los valores de la columna 3. Según la norma UNE 60034-1 para altitudes por debajo de 1000 metros sobre el nivel del mar, se debe considerar la temperatura del aire ambiente es 40 °C en España [4 y 14].

De la tabla mostrada anteriormente (véase Tabla 2), las cuatro principales clases térmicas de aislamiento son la A (105 °C), la B (130 °C), la F (155 °C) y la H (180 °C). En la Tabla 3 se muestran estas clases de aislamiento junto con los materiales aislantes empleados, el impregnante o barniz, así como las aplicaciones más comunes en las máquinas eléctricas [28].

Tabla 3: Las cuatro principales clases térmicas de aislamiento empleadas en la industria

CLASE TÉRMICA °C	MATERIAL AISLANTE	IMPREGNANTE O BARNIZ	APLICACIONES
A (105 °C)	Algodón, seda, rayón. Poliamida, acetato de celulosa.	Barnices naturales y sintéticos.	Recubrimiento conductores y ranuras. Tubos flexibles.
	Esmaltes de resinas de poliéster		Recubrimiento de conductores.
B (130 °C)	Tejidos fibra de vidrio y amianto. Mica, sola o con soporte de papel.	Barnices y resinas a base de: Epóxicos, melamina, poliéster reticulado.	Aislamiento de ranuras y bobinas. Separadores de delgas de colectores.
	Esmaltes a base de: Poliuretano y polivinilos. Caucho etileno-propileno. Cintas fibra de vidrio y mica.		Recubrimiento de conductores e impregnación de bobinados.
F (155 °C)	Tejidos fibra de vidrio barnizados. Papeles de mica y amianto. Compuesto a base de poliamida.	Barnices y resinas a base de: Poliéster, poliuretano, epóxicas.	Recubrimiento de conductores y ranuras. Tubos flexibles. Sujeción de armaduras.
	Esmaltes y barnices a base de: Poliéster modificado, polietileno, poliuretano, poliamida. Resinas Epoxi.		Recubrimiento de conductores e impregnación de bobinados.
H (180 °C)	Tejidos de fibra de vidrio, amianto, mica, impregnados con silicona.	Resinas de silicona.	Recubrimiento de conductores y ranuras. Tubos flexibles.
	Fibras de vidrio y caucho silicona. Esmaltes de silicona, poliéster, poliuretano y poliestermeda.		Recubrimiento de conductores e impregnación de bobinados.

La clase térmica de cualquier máquina eléctrica se debe indicar en la placa de características. A continuación, se muestra la placa de características de un motor asíncrono trifásico 7,5 kW, donde se muestra la clase térmica del mismo, correspondiente a la letra F, es decir 155 °C.

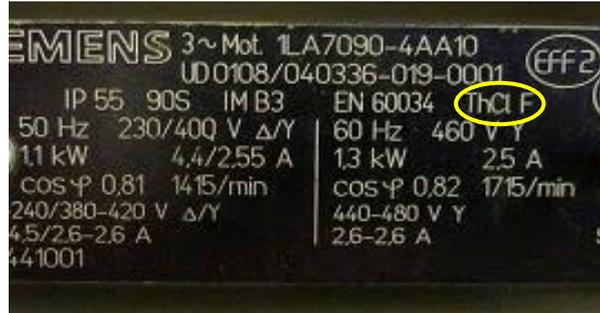


Figura 15: Placa de características de un motor síncrono trifásico. Clase térmica.
(Fuente: ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com.es)

3.5 Evaluaciones y pruebas de medida en los sistemas de aislamiento

Las máquinas eléctricas, como se ha indicado al inicio de este trabajo, se dividen en dos grandes grupos: máquinas eléctricas rotativas, donde se incluían los generadores y motores, y las máquinas eléctricas estáticas, al que pertenecen los transformadores. Es importante destacar de nuevo esto, porque las evaluaciones y pruebas que se realizan en ambas máquinas para el estudio del estado del aislamiento son las mismas, pero la forma de medición del aislamiento es distinta (véase las Figura 16 y Figura 17).

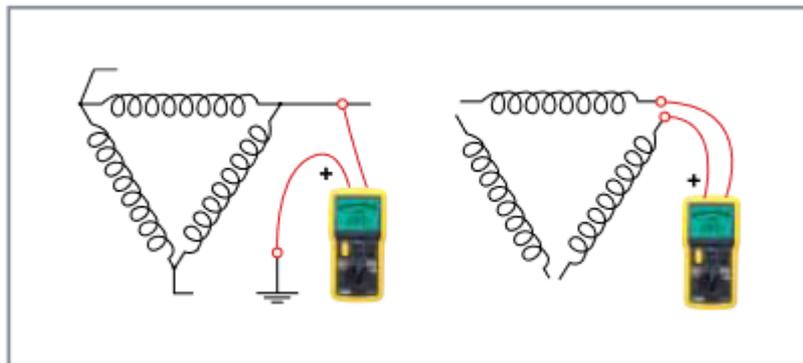


Figura 16: Medición de aislamiento en una máquina rotativa.
(Fuente: https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_aislamiento.pdf)

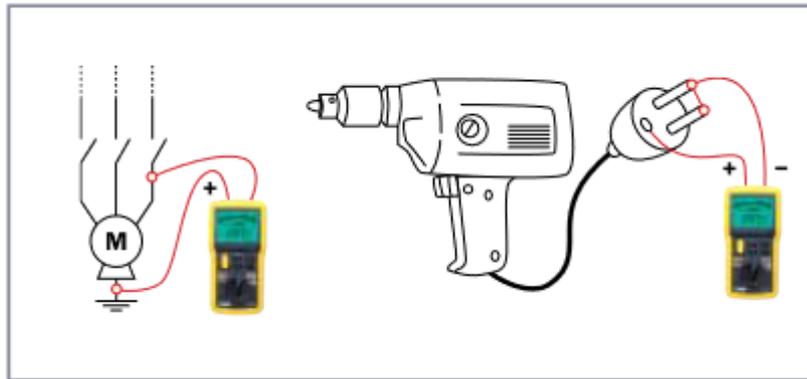


Figura 17: Medición de aislamiento sobre un transformador

(Fuente: https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_aislamiento.pdf)

Los aislamientos en los devanados de las máquinas eléctricas son los componentes más sensibles a disminuir su vida útil debido al estrés eléctrico, térmico y mecánico al que está sometida la máquina. Normalmente la fiabilidad de funcionamiento de la máquina eléctrica es definida por la vida útil de los aislantes. La vida útil de una máquina de buena calidad, trabajando en los parámetros recomendados es de 25 años aproximadamente.

El objetivo de estas pruebas es determinar el estado del aislamiento, teniendo en cuenta los efectos de humedad, contaminantes e imperfecciones en el mismo.

En la norma IEE 43-2013 establece que al aplicar un voltaje DC en polarización inversa⁸ se crean 4 tipos de corrientes: corriente capacitiva, conductiva, de fuga y de absorción (véase Figura 18) [30].

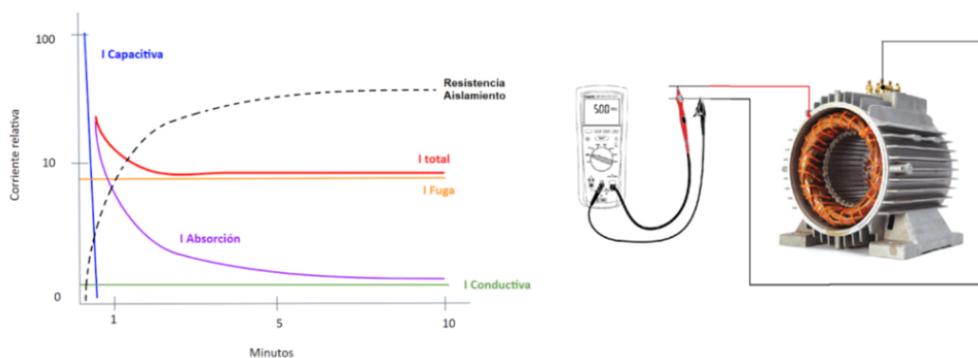


Figura 18: Tipos de corrientes resultantes de prueba DC en medición de resistencia de aislamiento.

(Fuente: <https://www.vyphidroasesores.com>)

⁸ Polarización inversa: conexión de polo positivo del instrumento a la carcasa del motor y el polo negativo a la bobina en prueba, por efecto de electroendosmosis (en un material poroso, el movimiento de partículas debido a un campo eléctrico)

La figura mostrada anteriormente (Figura 18) hace referencia a un aislante en buen estado, en ella se puede observar como la corriente conductiva (representada por el color verde) es casi cero, esta corriente es la formada debido a las imperfecciones del aislante, siendo de este modo cero para aislantes que están en buen estado.

La corriente representada en color naranja corresponde a la corriente de fuga, la cual está relacionada con los contaminantes del aislante, cabe destacar que la corriente de fuga es esencialmente estable a través y sobre el aislamiento.

La tercera corriente formada es la corriente capacitiva (en color azul) corresponde a la carga de la capacidad del aislamiento probado. De forma similar a la carga de una capacidad, esta corriente posee un valor alto al principio, pero disminuye exponencialmente hacia cero aproximadamente.

La última corriente formada es la corriente de absorción, está relacionada con la manera de ordenación de las moléculas en el material aislante y la energía necesaria para ello, esta corriente decrece mucho más lentamente que la corriente de carga y requiere de más minutos para alcanzar un valor próximo a cero.

Por último, la corriente representada en color rojo hace referencia a la suma de todos los efectos descritos anteriormente, es decir, la corriente total [28-30].

Los ensayos más utilizados para el análisis de los aislamientos en las máquinas eléctricas son: el hi-pot (ensayo de tensión aplicada), resistencia de aislamiento, índice de polarización y absorción y prueba de descarga dieléctrica (DD).

- **Hi-pot (ensayo de tensión aplicada).**

Se utiliza para evaluar la fuerza dieléctrica mínima del sistema de aislamiento y para probar la condición a tierra del aislamiento de grandes máquinas rotativas. No es una prueba destructiva. Las máquinas que no pasan esta prueba, indican que el aislamiento es deficiente, lo cual se comprueba en ensayos posteriores. Un aislamiento en buen estado soportará entre 2 y 3 veces la tensión aplicada en Hi-Pot DC.

Cuando a un estátor de una máquina rotativa se le aplica una tensión entre el bobinado y la carcasa (tierra) (véase Figura 19), se pone a prueba el aislamiento. Como consecuencia de esto aparece una corriente I , que es producida por 2 fenómenos:

1. Las cargas que pasan por el aislamiento producen dos corrientes: la corriente de conducción (I) y la corriente de fuga, ambas constantes en el tiempo.
2. Fenómeno de Polarización, relacionado con la orientación de las partículas dipolares del material aislante, genera la corriente de absorción, la cual decrece con el tiempo.

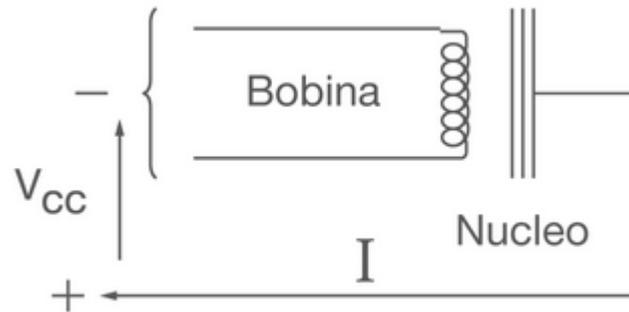


Figura 19: Configuración básica de una prueba de Hi-Pot en corriente continua
(Fuente: <https://electromotores.com/engineering-articles>)

La tensión que se aplica a la máquina debe ser gradual, evitando así que se exceda la tensión máxima de prueba. La duración de la prueba varía entre uno y diez minutos. Una vez que la prueba ha finalizado, la fuente se reduce a cero y el bobinado debe ser descargado a tierra.

- Prueba de medición puntual de resistencia de aislamiento (IR).

La prueba de resistencia de aislamiento (IR) consiste en inyectar un voltaje entre la carcasa de la máquina rotativa y cualquiera de sus fases o entre diferentes fases con corriente directa y polarización inversa. El resultado que se obtiene en esta prueba es la resistencia que posee el aislamiento. A continuación, se muestra una tabla (Tabla 4) con los valores mínimos de resistencia de aislamiento a 40°C recomendados para distintos devanados.

Tabla 4: Valores mínimos de resistencia de aislamiento a 40 ° C recomendados para distintos devanados

Mínimo valor de resistencia (MΩ)	Tipo de motor
<u>IR1</u> min = kV + 1	Para la mayoría de los bobinados fabricados antes de 1970, todos los bobinados de campo y otros no descritos.
<u>IR1</u> min = 100	Para la mayoría de los bobinados AC fabricados después de 1970 (bobinados de pletina, no aplica a alambre redondo)
<u>IR1</u> min = 5	Para la mayoría de los motores AC y CC con estatores bobinados con alambre redondo y en pletina con tensiones nominales menor a 1000 V

La primera columna hace referencia al valor mínimo de resistencia en MΩ, donde para los bobinados fabricados antes de 1970 la resistencia de aislamiento se calcula como el voltaje aplicado en la prueba IR más uno. Para los bobinados fabricados después de 1970 (bobinados de pletina, pero no aplicable para bobinados con alambre en redondo) el valor mínimo de resistencia de aislamiento es fijo y corresponde a 100 MΩ, y finalmente para la mayoría de los motores AC y CC con estatores bobinados con alambre redondo y en pletina con tensiones nominales menores que 1000 V, el valor mínimo de la resistencia de aislamiento también posee un valor fijo, que en este caso se corresponde con 5 MΩ, siendo este valor el correspondiente al mínimo, pero en la práctica se recomienda que esté por debajo de los 100 MΩ.

Cabe destacar que los valores de la tabla anterior se han obtenido a una temperatura de 40°C, si la temperatura de operación fuese distinta habría que hacer una corrección, la cual se calcularía mediante la siguiente ecuación:

$$R_c = K_T * R_T, (M\Omega)$$

$$K_T = 0.5^{(40-T)/10}$$

Donde:

- R_c resistencia al aislamiento corregida (MΩ).
- K_T factor de corrección por temperatura
- R_T resistencia de aislamiento medido a la temperatura T. (MΩ)

➤ T temperatura de ejecución de la prueba ($^{\circ}\text{C}$)

- **Medida del índice de polarización (IP) e índice de absorción dieléctrica (DAR)**

Ambas pruebas, al igual que la prueba de resistencia de aislamiento, se realizan en polarización inversa aplicando un voltaje en corriente directa (DC). Permiten hacer comparaciones sobre el estado del aislamiento de las máquinas.

El IP se define como la relación entre la resistencia de aislamiento obtenida durante 10 minutos entre la medida en 1 minuto al aplicar una tensión continua durante ambos intervalos de tiempo. Es importante destacar que el nivel de tensión aplicado en ambos casos debe ser estable.

Este valor da información del estado de humedad y limpieza de la máquina.

El DAR (Dielectric Absorption Ratio) se define como la relación que existe entre la resistencia de aislamiento medida en 1 minuto de prueba respecto a la medida en 30 segundos.

Esta prueba indica el grado de contaminación interna de los bobinados.

Ambos valores, tanto el IP y el DAR, son adimensionales.

A continuación, se muestran una tabla con los valores mínimos recomendados de los IP y DAR.

Tabla 5: Valores mínimos recomendados de IR y DAR

Índice de Polarización	IP: <1	Peligro
	IP: >1 , <1.5	Regular
	IP: >1.5 , <2.0	Precaución
	IP: >2 , <4	Bueno

Índice de Absorción	DA: <1.1	Peligro
	DA: >1.1 , <1.25	Regular
	DA: >1.25 , <1.4	Precaución
	DA: >1.4 , <1.6	Bueno

Se presenta un ejemplo de un aislamiento en buen estado (véase Figura 20), donde la resistencia de aislamiento incrementa a lo largo del intervalo, mientras que la corriente total de la máquina decrece exponencialmente hasta volverse asintótico, lo que indica que el aislamiento es bueno.

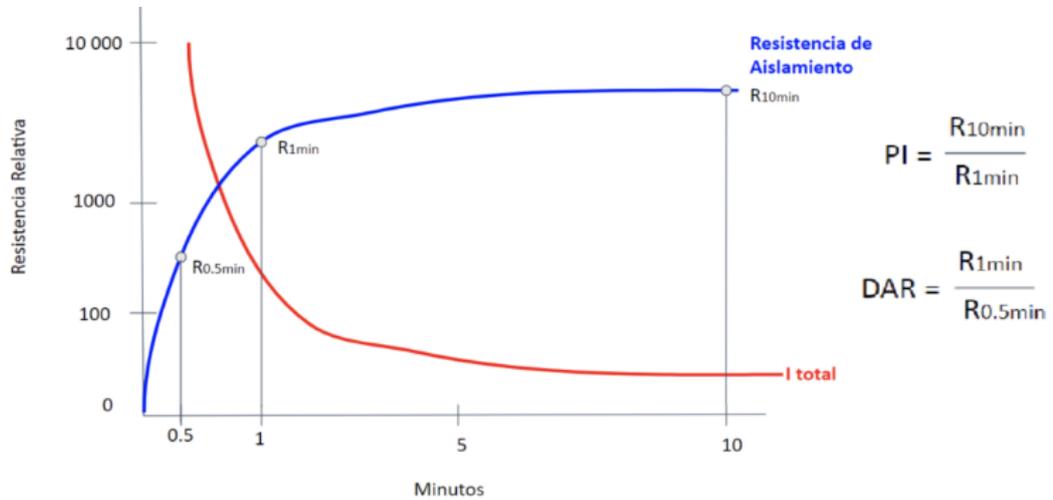


Figura 20: Indicadores PI y DAR en un aislamiento en buen estado
(Fuente: <https://www.vyphidroasesores.com>)

- Prueba de descarga dieléctrica (DD)

El objetivo de esta prueba es determinar en un aislante multicapas los excesos de corriente de descarga, los cuales están provocados por la rotura o la contaminación de dichas capas, caracterizadas por corrientes de absorción altas.

Este efecto no es detectable en las pruebas IP y DAR.

El método de realización es el siguiente: Se carga al dispositivo el tiempo necesario hasta que alcance un estado estable, alcanzando así una única corriente, la corriente de fuga. Una vez alcanzado este estado se descarga la máquina y se mide la corriente que circula por ella tras un tiempo estándar que se establece en 1 min. En este tiempo el dispositivo alcanza una capacidad.

Se calcula entonces la DD como:

$$DD = C_{\text{corriente a 1 minuto}} / (T_{\text{ensayo}} \times C_{\text{capacidad}})$$

El valor de descarga dieléctrica se calcula como la relación que existe entre la corriente total (la de descarga capacitiva y de reabsorción) entre la tensión a la que se realiza la prueba por la capacidad global.

La siguiente tabla indica la calidad del aislamiento en función del valor de DD que se ha obtenido en la prueba.

Tabla 6: Valores mínimos recomendados de DD

Descarga Dieléctrica	DD: > 7	Peligro
	DD: 4 a 7	Regular
	DD: 2 a 4	Precaución
	DD: < 2	Buena

Mediciones de grandes aislamientos.

A continuación, se analiza brevemente cómo se realiza la medida de los grandes aislamientos⁹.

Debido a la humedad y los contaminantes superficiales existentes en las máquinas, se crean corrientes de fuga a través de la superficie del material aislante, las cuales pueden falsear las medidas del mismo. En este tipo de aislamiento es necesario eliminar esta corriente de fuga, y para ello los megaóhmetros incorporan un tercer terminal de conexión llamado de guarda, corresponde a un terminal de protección, una tercera conexión cuya función es proporcionar una ruta de retorno de la corriente de fuga superficial [29,30]. (Véase Figura 21).

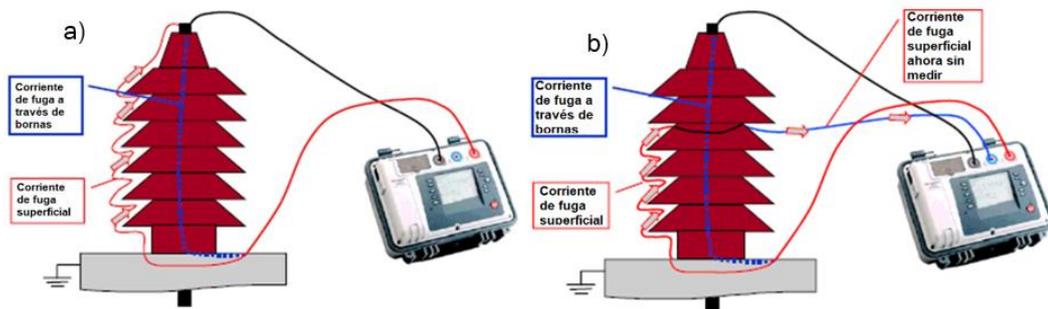


Figura 21: Medición de borna de alta tensión; a) sin terminal de guarda, b) con terminal de guarda.

(Fuente: <https://www.ceica.com>)

⁹ Se consideran grandes aislamientos según normas UNE a los superiores a 1 GΩ.

Cuando se emplea un terminal de guarda para realizar la medición del aislamiento la corriente de fuga superficial se detecta antes de que atraviese toda la borna e influya en el resultado de la medida, el megaóhmetro de esta manera mide el valor de la corriente real del aislamiento. En caso contrario el valor que proporciona el dispositivo es inferior al real.

Como conclusión final, el terminal de guarda es útil para medir valores de resistencia muy altos, por eso para medidas de aislamientos pequeños no es necesaria su utilización [15,16,28,29 y 30].

Para finalizar se muestra un esquema de un terminal de guarda (véase Figura 22), donde se aprecia que este terminal debe estar conectado a una superficie que sea susceptible de hacer circular las corrientes de superficie [5].

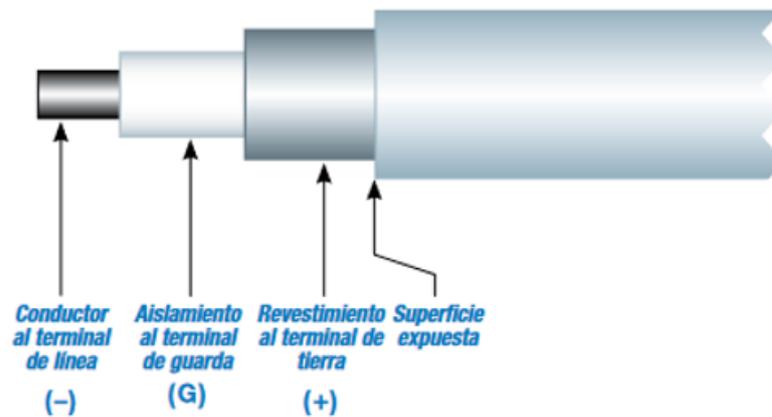


Figura 22: Esquema de un terminal de guarda.

(Fuente: https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_aislamiento.pdf)

3.6 Factores de degradación del aislamiento eléctrico.

Existen numerosos factores que pueden causar la degradación del material aislantes, así como que solo uno de ellos pueda causar diversos efectos en el aislamiento. Por este motivo se analizarán los factores de degradación del aislamiento eléctrico más comunes, estos factores son [5,30]:

- Mecánicos.
- Eléctricos.
- Químicos.
- Térmicos.
- Ambientales.

Factores de origen mecánico.

Están relacionados con los esfuerzos presentes en el arranque, en la parada, con una sincronización inapropiada con el generador, durante los cortocircuitos, los golpes directos contra los cables,... Este efecto se agrava si todos ellos se repiten de manera frecuente en el tiempo.

Como consecuencia de estos factores se originan fisuras en el aislamiento a tierra y una abrasión en el aislamiento de los conductores.

Factores de origen eléctrico.

Están originados principalmente con las causas generadas por los efectos de las descargas parciales¹⁰ (DP). También se relaciona con los fenómenos de sobretensión y caídas de tensión.



Figura 23: Rotura de aislamiento causado por descargas parciales
(Fuente: eatechnology.com)

Factores de origen químico.

Surgen como consecuencia de trabajar con agentes químicos, tales como aceites, vapores corrosivos, a los que se encuentran expuestos las máquinas.

¹⁰ Descarga parcial, definida por la norma UNE 21-313-85 como una descarga eléctrica cuyo trayecto puntea solo parcialmente el aislamiento entre conductores.

Factores de origen térmico.

Uno de los principales factores que deterioran el aislamiento es el envejecimiento térmico, ocasionado por las altas temperaturas a las que es sometido el aislante. En la fotografía que se muestra a continuación puede observarse la pérdida del aislamiento en las espiras provocado por un calentamiento del mismo.



Figura 24: Pérdida del aislamiento en las espiras.
(Fuente: Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad del Valle, Colombia)

Factores de origen ambientales.

Son los considerados factores impredecibles, ya que en su mayor parte son factores que son difícilmente controlables.

Están causados por la:

- Absorción de agua, lo que causa una delaminación del aislamiento.
- Exposición al polvo en ambientes contaminados, provoca un choque abrasivo en el material aislante.



CAPÍTULO 4: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

4.1 Conceptos generales del método

Para poder resolver un problema de ingeniería existen dos soluciones dependiendo del tipo de problema a estudiar [31]:

- La solución analítica, la cual proporciona una solución real del sistema a estudiar.
- La solución numérica, aproxima la solución solo en puntos discretos, denominados nodos. Existen dos métodos numéricos: el método de elementos finitos y el método de diferencias finitas.

El Método de Elementos Finitos (MEF) asume una función continua aproximada para representar las soluciones para cada elemento. La solución completa se genera conectando las soluciones individuales. A diferencia que el método de diferencias finitas, el MEF no presenta problemas para la resolución de problemas con geometrías complejas o materiales con propiedades no isotrópicos¹¹. Es decir, el MEF aproxima mediante ecuaciones algebraicas con un número finito de incógnitas las ecuaciones diferenciales que representaban al sistema inicial de estudio [31].

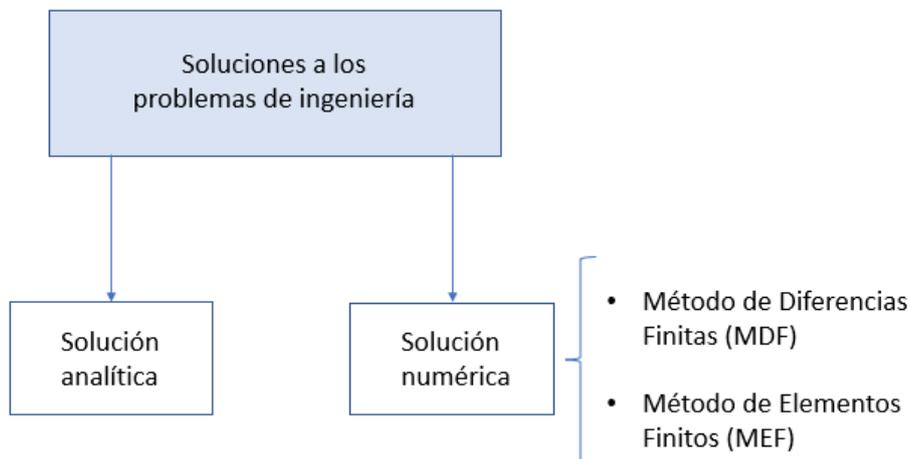


Figura 25: Esquema de las soluciones a los problemas de ingeniería
(Fuente: Elaboración propia)

¹¹ Material no isotrópico: sus propiedades mecánicas y térmicas no son las mismas en todas las direcciones

El método de resolución por elementos finitos consta de 5 etapas:

1. Discretización de la región solución en un número finito de subregiones o elementos, es decir, transformar el cuerpo de estudio de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado.
2. Selección de una interpolación apropiada o modelo de desplazamiento.
3. Derivación de las ecuaciones gobernantes para un elemento típico.
4. Agrupación de todos los elementos en la región solución.
5. Resolución de las ecuaciones representantes del sistema.

En el proceso de discretización es donde se obtienen los elementos finitos, corresponden a los subdominios que se originan al dividir la región a estudiar. Dependiendo de las dimensiones del problema a estudiar existen elementos finitos típicos (véase Figura 26)

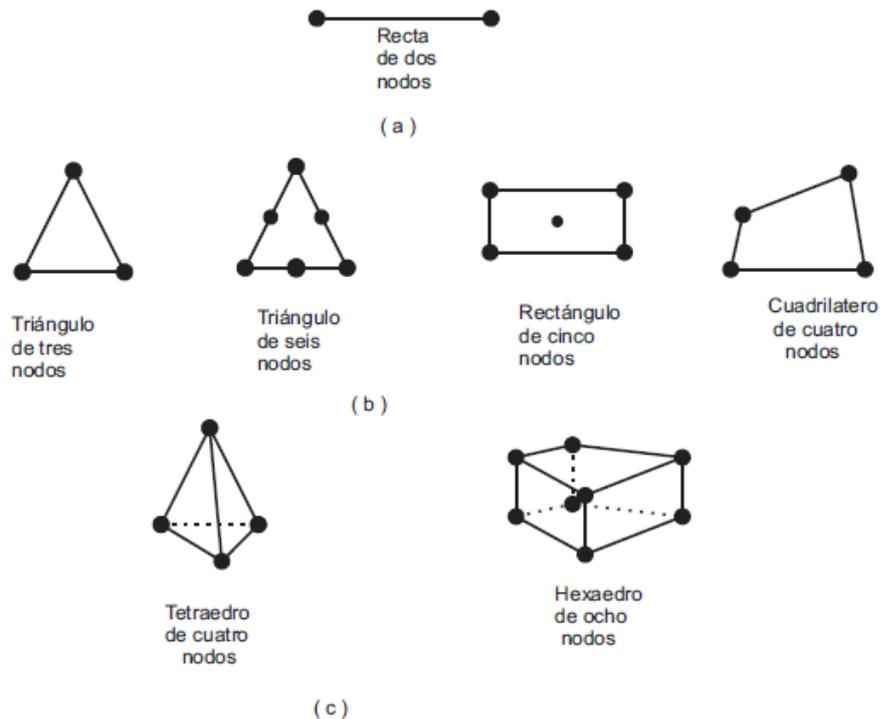


Figura 26: Elementos finitos típicos: (a) 1D, (b) 2D y (c) 3D
(Fuente: Manual FEMM)

Cabe destacar que se puede utilizar combinaciones de estos elementos para resolver un conjunto.

En la Figura 27 se presenta el cálculo del mallado, de una geometría simple, un cuadrado, mediante el software FEMM.

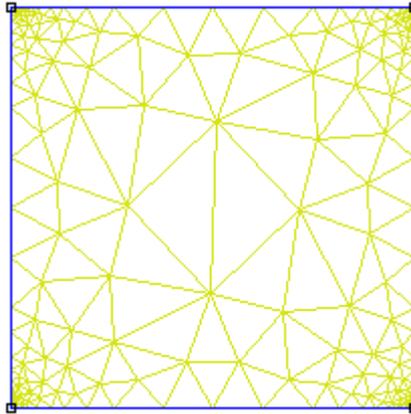


Figura 27: Cálculo del mallado por FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

Es necesario indicar cuales son las ventajas y limitaciones que presenta el MEF.

Ventajas del MEF:

- Es capaz de resolver problemas con geometrías complejas.
- Puede trabajar tanto con solicitudes de carga puntual, uniformemente distribuidas como dinámicas.
- Da soluciones a problemas no lineales.
- Carácter multidisciplinar a la hora de resolver problemas, es decir resuelve problemas de transferencia de calor, de campos magnéticos, campos eléctricos, de fluidos...

Limitaciones del MEF:

- Al ser un método numérico la solución que proporcionan es una aproximación. Lo que implica que cuanto más detalle y cuidado se ponga a la realización de la maya, mejor resultado obtendrá el método.
- Puede existir una acumulación de errores en las soluciones del método inherentes a la computación.

4.2 Aplicación de los elementos finitos en máquinas eléctricas

Las aplicaciones del método de elementos finitos en máquinas eléctricas son muy amplias, algunos ejemplos a destacar son:

- Estudio del flujo axial de las m.e [32].
- Análisis transitorio de un motor de inducción [33].



- Diseño y análisis paramétrico de Máquinas Síncronas de Excitación Híbrida [34].
- Determinación de las pérdidas eléctricas en motores de inducción [35].
- Simulación de una máquina asíncrona línea de flujo transversal [36].
- Modelación de Transformadores Trifásicos de Potencia [37].
- Estudio del calentamiento de las máquinas eléctricas rotativas [38].
- Estudio al perfeccionamiento de pinzas amperimétricas [39].
- Simulación de un motor síncrono de imanes permanentes sin escobillas [40].
- Estudio del campo magnético en aisladores, aplicación que se desarrollara posteriormente en este trabajo, con la ayuda del software FEMM.

CAPÍTULO 5: ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS EN 2D

5.1 Introducción

FEMM (*“Finite Elements Method Magnetics”*) es un software de licencia libre basado en el cálculo de elementos finitos cuyo objetivo es resolver problemas electromagnéticos de baja frecuencia en 2D.

En el presente trabajo FEMM se utiliza para resolver problemas electrostáticos lineales en coordenadas planas. Cabe destacar que también permite la resolución de problemas en coordenadas axisimétricas¹².

Es importante resaltar, aunque no entra dentro de las aplicaciones de este trabajo, que FEMM también permite resolver problemas magnéticos lineales y no lineales, problemas magnéticos bajo excitación armónica, lineales y no lineales, electrostáticos lineales y de flujo de calor en régimen permanente.

Para cada tipo de problema FEMM se comunica con el usuario a través de dos herramientas: el preprocesador y el postprocesador.

- El preprocesador es el que permite definir el problema, es decir mediante el cual el usuario comunica al programa las características del modelo a resolver, como la geometría del problema, los materiales que lo componen, condiciones eléctricas que lo definen....
- El postprocesador se encarga de proporcionar la solución al modelo planteado, para ello realiza los cálculos necesarios, muestra los gráficos y las imágenes.

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado como principal herramienta el software FEMM en su versión 4.2 [31].

5.2 Presentación de FEMM

A continuación, para ayudar a una mejor comprensión de FEMM se presenta un ejemplo sencillo, cuyo objetivo es ayudar y dar visibilidad a las herramientas que proporciona este software.

¹² Axisimetría: Es la simetría que se muestra en torno a un eje. La diferencia con la simetría central es que ésta se da respecto a un punto.

5.2.1 Definición del problema a resolver con FEMM

El ejemplo a resolver se ha tomado del libro “Complex Variables and Applications” de R.V. Churchill, et al. Capítulo 9 [41].

El enunciado del problema es el siguiente: se quiere obtener el campo eléctrico de una losa (placa) rectangular, cuyos bordes están caracterizados por un voltaje, el cual es dato del problema (véase Figura 28).

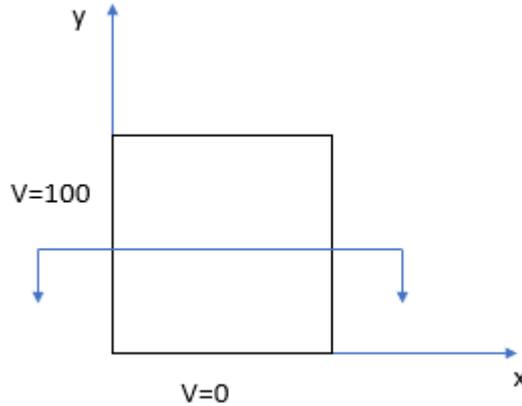


Figura 28: Estudio del campo eléctrico en una losa rectangular
(Fuente: Churchill, R.V. (1976))

Datos del problema:

- Alto = ancho = 4 m.
- Voltaje del borde izquierdo 100 V. El resto de bordes 0 V.
- Permitividad (constante dieléctrica) = $1E-7$ F/m.

Para comprobar los resultados, el libro da como solución el voltaje obtenido por métodos teóricos del centro de la placa correspondiente a un valor de 25 V. La resolución por métodos numéricos de este problema el autor de este libro lo realiza con el software COSMOS/M, comprobando que la solución es la misma, 25 V.

Tabla 7: Datos del enunciado de la losa rectangular

	Voltaje (V)
Teóricos	25.0
COSMOS/M	25.0

5.2.2 Introducir el tipo de problema en FEMM

Una vez que se entra en el software FEMM, aparece una ventana. Arriba a la izquierda aparecen los desplegables: *File*, *Edit*, *View* y *Help*, debajo de ellos se visualizan dos iconos: un folio en blanco y una carpeta. Es importante localizarlos para poder crear el proyecto.

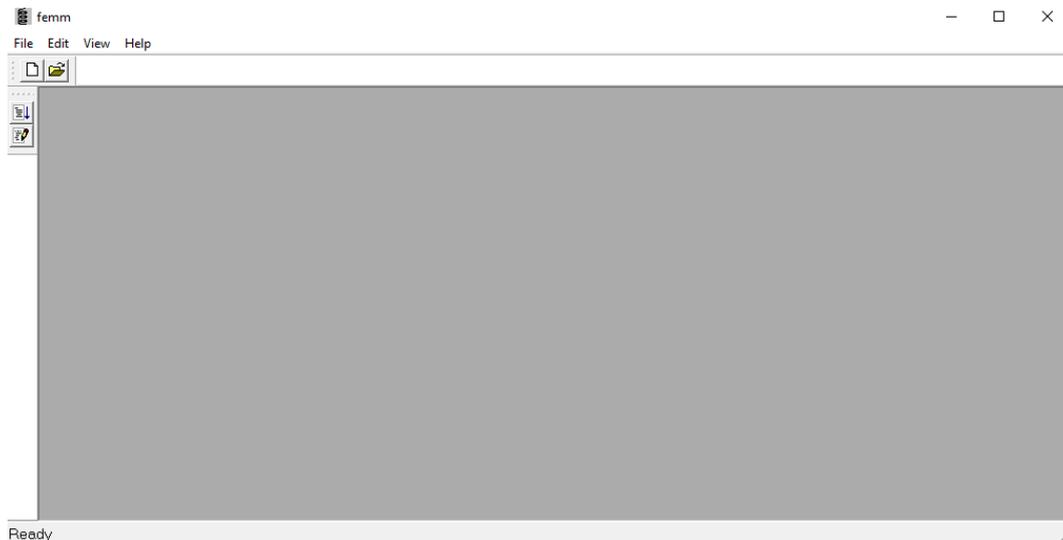


Figura 29: Pantalla principal del programa FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Para crear un nuevo proyecto hay tres opciones:

1. Pulsar Ctrl + N
2. Pestaña *File* → *New*
3. Pinchar (una vez) sobre el icono de la hoja en blanco.

Una vez creado el proyecto, con cualquiera de las opciones anteriores, aparece una nueva ventana *Create a new problem*, en ella se abre un desplegable que contiene una lista con los tipos de problemas que resuelve FEMM. Para resolver el problema que se ha planteado anteriormente se selecciona *Electrostatic Problem* clicando sobre esta opción. Para confirmarlo pinchamos sobre la opción *OK* o mediante el botón intro del teclado (ambas opciones son válidas).

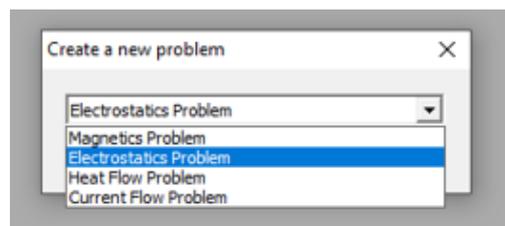


Figura 30: Ventana: Crear nuevo proyecto en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Es importante definir las coordenadas y las unidades en las que se va a trabajar. Para ello, se accede a la pestaña *Problem*. A continuación, aparece una nueva ventana donde se pueden configurar todos estos valores. En el problema de estudio, las coordenadas son planas, es un problema en 2D y las unidades de medidas son metros, los valores de ancho y alto de la placa son ambos de 4 m (dato del problema).

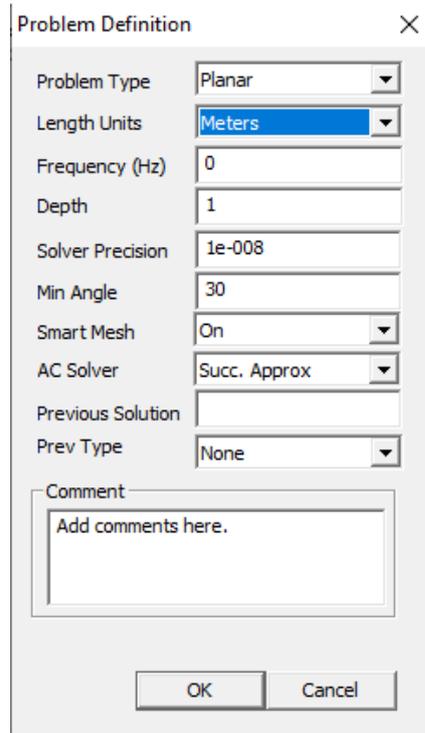


Figura 31: Configuración de las características del problema en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

El resto de valores de definición es recomendable mantenerlos en su valor por defecto.

5.2.3 Definición de la geometría

En el caso de que la geometría fuese más complicada se recomienda importar dicha geometría (véase Figura 54).

Para geometrías sencillas como la del ejemplo, se puede utilizar la barra de herramientas para definir geometrías que presenta FEMM (véase Figura 32).



Figura 32: Barra de herramienta para crear la geometría en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Las funciones correspondientes a los iconos mostrados en la Figura 32 de izquierda a derecha son:

- Punto/Nudo. Para insertarlos se puede realizar de dos formas:
 1. Haciendo clic con el botón izquierdo del ratón en el espacio de trabajo.
 2. Mediante la tecla tabulador del teclado; esta forma se recomienda cuando se quiere introducir los puntos teniendo en cuenta sus coordenadas.
- Línea recta. Para crearlas, una vez que se ha seleccionado su icono correspondiente, se hace clic con el botón izquierdo del ratón sobre el punto/nudo de origen de esta línea y posteriormente sobre el punto/nudo de destino. Es decir, para poder crear una línea recta previamente se han tenido que dibujar los puntos/nudos de origen y destino.
- Línea curva. Se crean de igual forma que las líneas rectas. Es importante tener en cuenta que FEMM no realiza circunferencias; éstas las crea mediante arcos. Por ello, al clicar esta opción aparece una nueva ventana donde se debe especificar los grados del arco abarcado.
- Etiqueta. Se utiliza para definir los materiales del modelo. Cabe destacar que todos los contornos cerrados deben tener una etiqueta para que FEMM pueda ejecutar correctamente la simulación.
- Grupo. Sirve para seleccionar todos los elementos que han sido definidos en un grupo.

Si se desea seleccionar, por ejemplo, una línea, la cual ya ha sido dibujada en el plano, es importante saber que hay que tener seleccionado el icono del elemento a seleccionar, en este caso el de línea recta, una vez seleccionado el icono, con el botón derecho del ratón se clicca sobre dicho elemento. Si se ha seleccionado correctamente pasará a tener un color rojo.

Con todo lo detallado anteriormente, se procede a definir la geometría del problema (véase Figura 33).

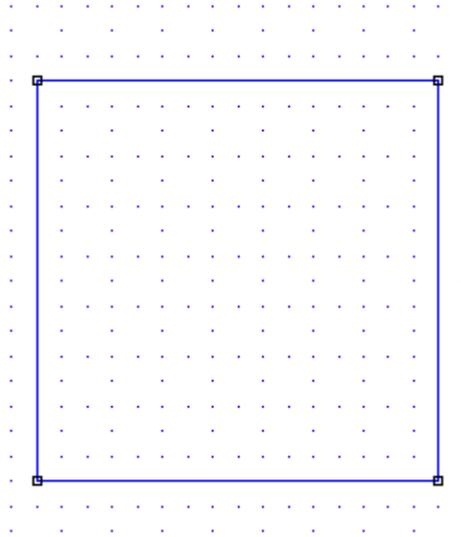


Figura 33: Geometría losa rectangular
(Fuente: Elaboración propia)

5.2.3 Definición de los materiales

Se selecciona la pestaña “*Properties*” → “*Materials library*”. Inmediatamente después se abre una nueva ventana, en ella se muestran los materiales que posee FEMM.

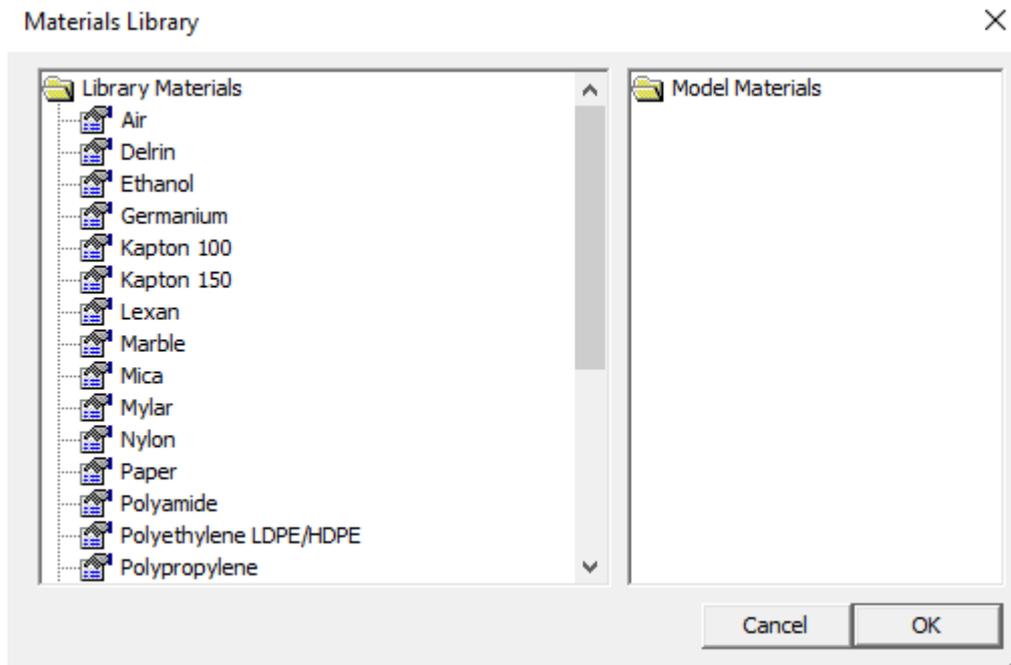


Figura 34: Materiales de la librería de FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Para poder añadir uno de los materiales que presenta FEMM a nuestro modelo de estudio hay que arrastrar dicho material de la columna de la izquierda hacia la columna de la derecha “*Model Materials*” que aparece en la Figura 34. Para ello se clicca con el botón izquierdo del ratón en el material deseado y sin dejar de clicar se arrastra hasta esa columna (véase Figura 35).

El material deseado aparece ahora en la columna “*Model Materials*”

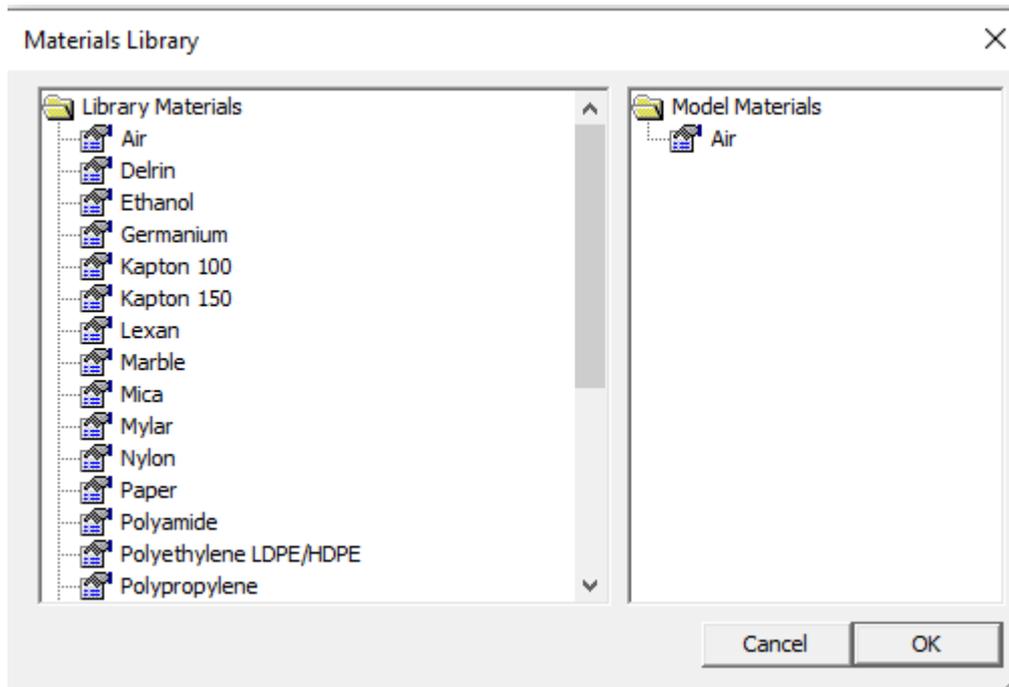


Figura 35: Selección de materiales en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Para ver las características de un material hay que hacer doble clic con el botón izquierdo del ratón sobre ese material. Aparece una nueva ventana con sus características, donde uno de los datos mostrados es la constante dieléctrica, valor importante a la hora de definir los materiales aislantes.

En la Figura 36 se muestran las características del aire que proporciona FEMM.

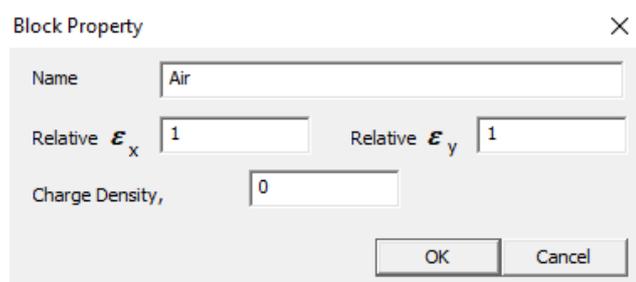


Figura 36: Características del aire
(Fuente: Software FEMM)

Se desconoce el material del que está hecho la placa, pero como dato nos dan la permitividad de ese material que corresponde a un valor de $1E-7$ F/m. Para añadir entonces este material en FEMM se procede de la siguiente manera:

Clic en la pestaña “Properties” → “Materials” y en la ventana emergente que aparece, “Add Property”

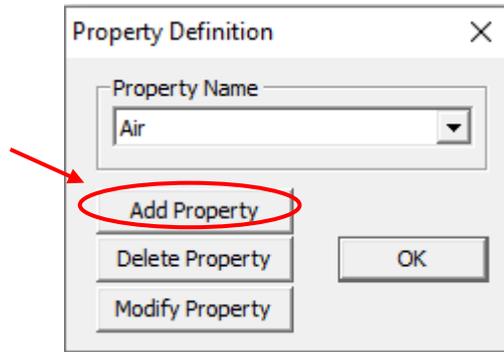


Figura 37: Definir un nuevo material en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

A continuación, se abre una nueva ventana donde se introduce el valor de la permitividad que nos indica el enunciado del problema.

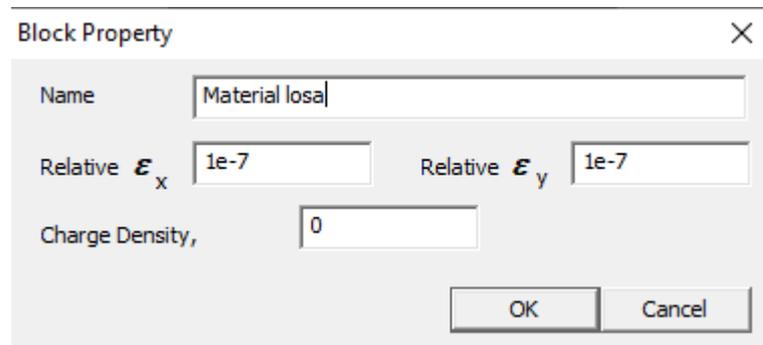


Figura 38: Introducir un nuevo material en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Es importante introducir el valor de esta permitividad en ambas casillas, de esta manera se hace referencia a que el modelo es en 2D y por ello la permitividad está definida tanto para el eje x como para el eje y.

Con todo lo anterior, se han definido los materiales que se utilizan en el modelo, pero ahora hay que adjudicarlos al propio modelo.

Para ello, seleccionamos el icono “Etiquetas” . Clicamos en la superficie o superficies que se han definido en los pasos anteriores. Aparece una etiqueta “<None>”

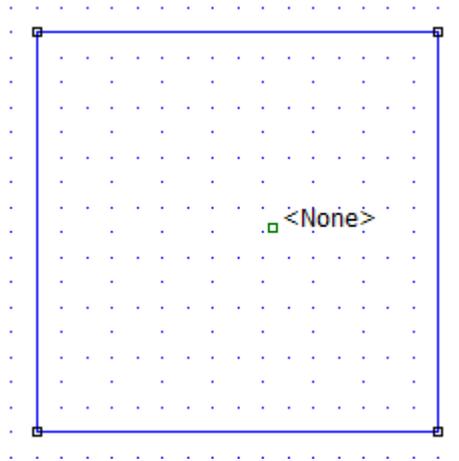


Figura 39: Introducir etiqueta de material en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

Para añadir el material del que está fabricada la losa, se clica con el botón derecho del ratón sobre la etiqueta “<None>”. El rectángulo que acompaña a la etiqueta pasa a ser rojo, esto indica que se ha seleccionado correctamente.

A continuación, para adjudicar el material se puede realizar de dos formas:

1. Mediante la barra espaciadora del teclado.
2. Pulsando el icono .

Inmediatamente después de realizar una de las formas anteriores (la que hayamos elegido por comodidad, ya que ambas son válidas) aparece una ventana denominada “*Properties for selected block*” con los materiales que hemos definido anteriormente.

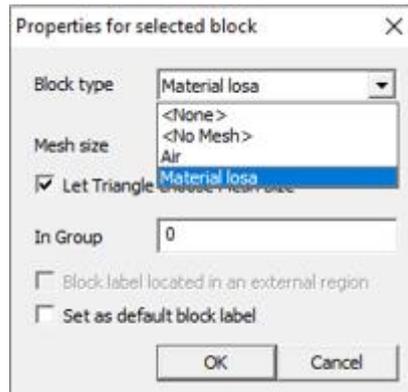


Figura 40: Ventana para adjudicar material en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

En el desplegable de “*Block type*” seleccionamos el material que deseamos, para ello clicamos con el botón izquierdo del ratón sobre dicho material. A continuación, se verifica esa elección mediante el botón OK o con el botón Enter del teclado.

Si la adjudicación del material se ha realizado correctamente, este material aparecerá ahora en nuestro modelo.

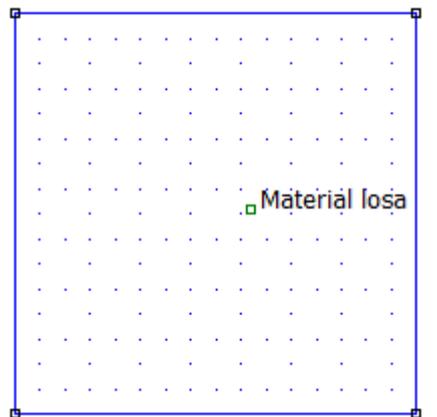


Figura 41: Material adjudicado en la losa rectangular. FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

5.2.4 Definición de los conductores

Al igual que se ha hecho para la definición de nuevos materiales, que no estaban incluidos en la librería de FEMM, la definición de los conductores se realiza de la misma manera.

Es decir: pestaña de “*Properties*” → “*Conductors*” → “Add Property”. Y aparece una nueva ventana emergente (véase Figura 42).

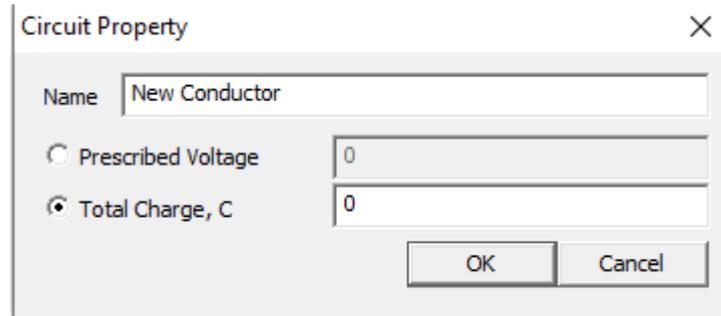


Figura 42: Ventana emergente para definir nuevos conductores en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Por defecto aparece la ventana emergente de la Figura 42, en el que el dato solicitado es la carga eléctrica total, en C, del conductor que se quiere crear. El dato que proporciona el enunciado del problema a resolver es que el conductor de la izquierda posee un voltaje de 100 V, por ello, el dato que se comunicará a FEMM es un voltaje. Para cambiar a esta opción hay que clicar sobre “*Prescribed Voltage*” como se muestra en la Figura 43 e introducir el valor de ese voltaje, en este caso 100 V.

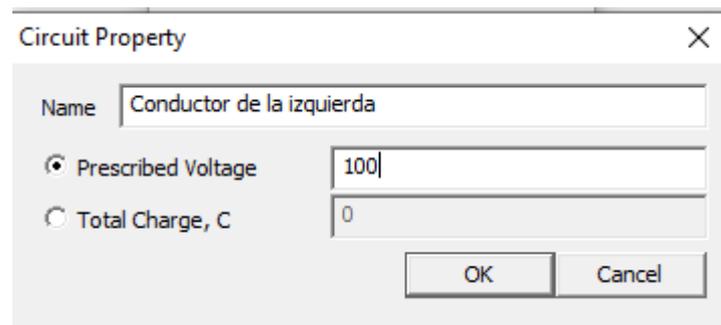


Figura 43: Introducción de un nuevo conductor en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

El siguiente paso es comunicar a FEMM que el conductor de la izquierda es el que posee un voltaje de 100 V. Para ello:

1. Hay que seleccionar al conductor. Teniendo seleccionado el icono de línea , se clicca sobre dicho conductor con el botón derecho del ratón, el conductor seleccionado pasará a color rojo.

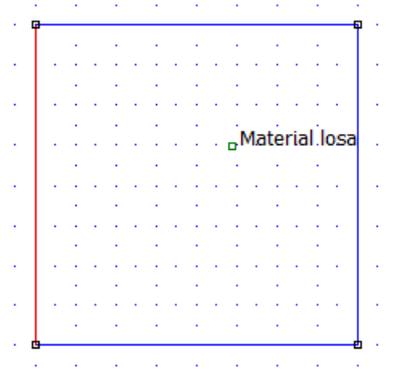


Figura 44: Losa rectangular. Cómo introducir el valor de un conductor
(Fuente: Elaboración propia)

2. Se pulsa la tecla “Espacio” del teclado del ordenador, aparece una nueva ventana emergente (véase Figura 45).

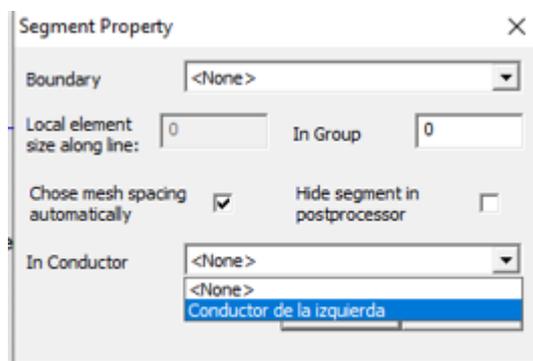


Figura 45: Ventana emergente para crear un nuevo conductor
(Fuente: Software FEMM)

El primer desplegable hace referencia a la frontera, este apartado se explica más adelante. El que interesa en este momento es el de “*In Conductor*”, en su desplegable aparecerán todos los conductores que se han creado, en este caso solo aparece “conductor de la izquierda” el único que se ha creado. Clicamos sobre él para seleccionarlo y verificamos su selección pinchando en “OK”.

3. El conductor ya tiene asignado el valor de 100 V.

El resto de conductores del ejemplo tienen valor 0 V, es decir hay que crear otro conductor con este valor y posteriormente adjudicárselo al resto de conductores.

5.2.5 Definición de las condiciones de contorno

Para la resolución del problema es necesario definir un límite exterior. Es suficiente con dibujar una circunferencia que contenga al modelo, y definir el material de la región entre el borde exterior y la losa rectangular, en este caso aire.

En primer lugar, se dibujará la circunferencia exterior. Esta circunferencia puede ser de las dimensiones que nosotros consideremos adecuadas, es decir que la circunferencia no se encuentre muy junta a la losa, pero tampoco muy alejada (véase Figura 46).

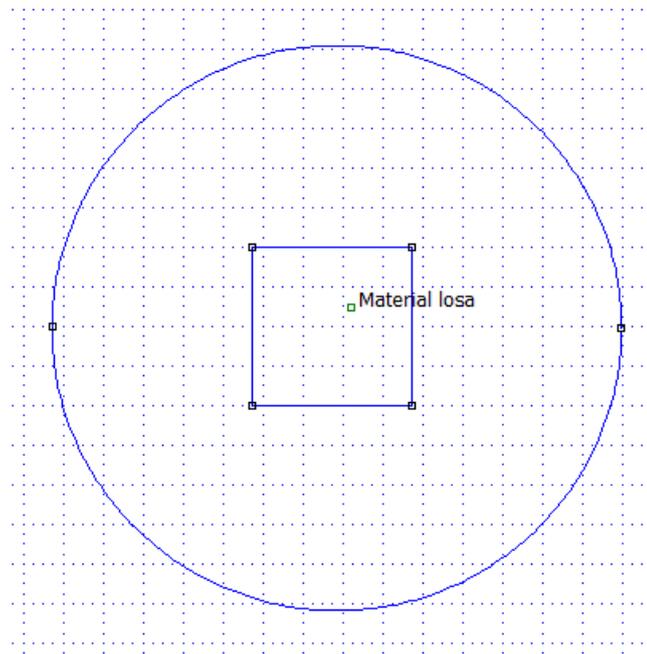


Figura 46: Frontera de la losa rectangular mediante FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

Se debe comunicar a FEMM que en nuestro modelo se va a introducir una frontera, es decir *“Properties”* → *“Boundary”* → *“Add Property”*. Y aparece una nueva ventana emergente. En este caso se elige una condición de frontera Dirichlet para definir los límites del problema y evitar las dispersiones de flujo fuera del modelo. Para ello se fija un valor de voltaje en la superficie del dominio del problema igual a cero (véase Figura 47).

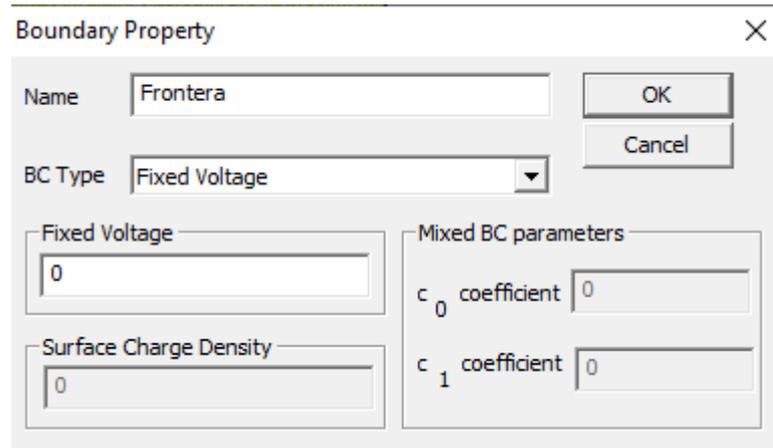


Figura 47: Ventana emergente para la creación de una frontera Dirichlet en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

A continuación, se procede de igual forma que se hizo para asignar los conductores.

1. Se selecciona los dos arcos de circunferencia mediante el botón derecho del ratón. Es importante recordar que para seleccionar un elemento hay que tener seleccionado dicho elemento en la barra de herramientas de la geometría. En este caso se tendrá seleccionado el icono de arco de circunferencia.
2. Mediante el teclado se pulsa “Espacio” y ahora si se tiene en cuenta el primer desplegable que hace referencia a la frontera “Boundary”. En él se selecciona la frontera que se quiera adjudicar.
3. La condición de frontera ya está adjudicada.

Por último, se debe adjudicar un material a la región que se acaba de definir, en este caso el material que rodea a la losa es aire.

5.2.6 Cálculo del mallado

Una vez terminada la definición del modelo, el problema queda como se puede observar en la Figura 48.

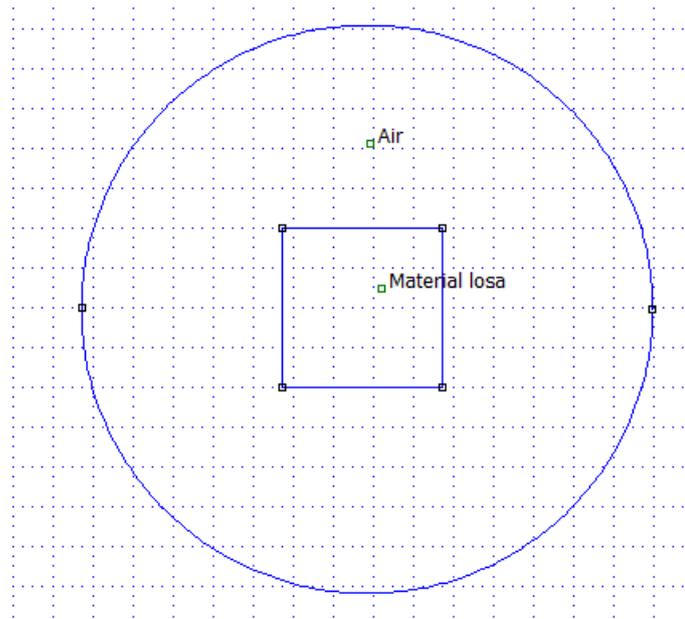


Figura 48: Modelo de losa rectangular en FEMM finalizado
(Fuente: Elaboración propia)

Mediante la barra de opciones indicada en la Figura 49 se puede realizar tanto el mallado del modelo, el análisis, como la visualización del resultado.



Figura 49: Barra de opciones de análisis en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Clicando sobre el primer icono de esta barra de herramienta, el icono amarillo, FEMM crea el mallado del modelo (véase Figura 50).

NOTA: Antes de crear el mallado el modelo debe estar guardado, sino FEMM no podrá crearlo. Para guardar el archivo se debe utilizar la extensión .fee.

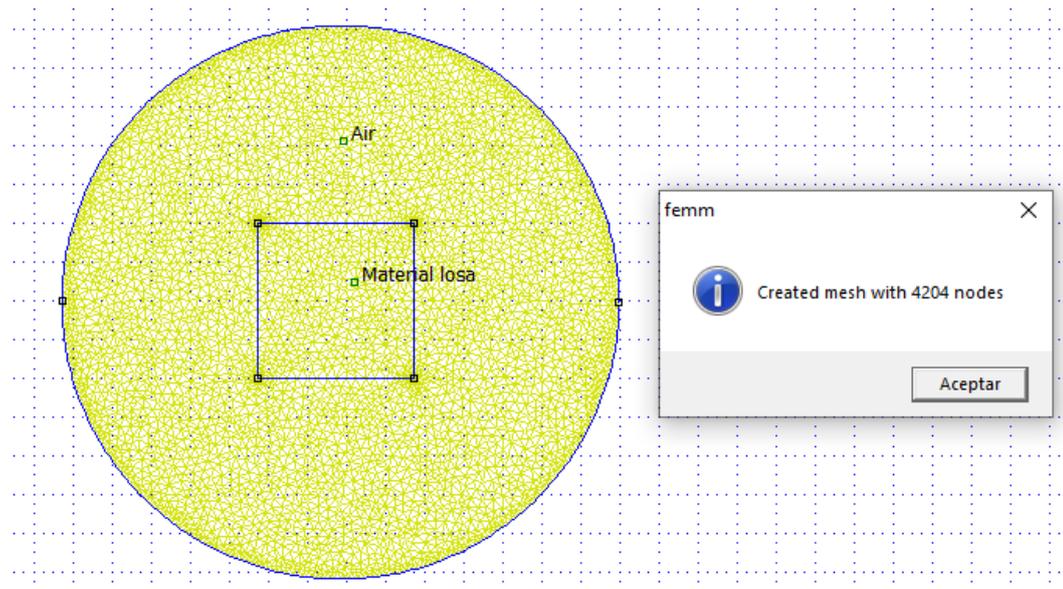


Figura 50: Modelo mallado de la losa rectangular en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

FEMM da información sobre los nodos que ha utilizado para la creación del mallado.

5.2.7 Análisis del modelo y visualización de los resultados

El siguiente paso es la realización del análisis, para ello clicamos sobre el segundo icono  de la barra de herramientas de análisis (véase Figura 49). En este paso FEMM puede tardar unos segundos o varios minutos dependiendo de la complejidad del modelo.

El tercer icono de la barra de herramientas de análisis  sirve para visualizar los resultados obtenidos. Pinchando sobre este icono aparece la siguiente ventana (véase Figura 51).

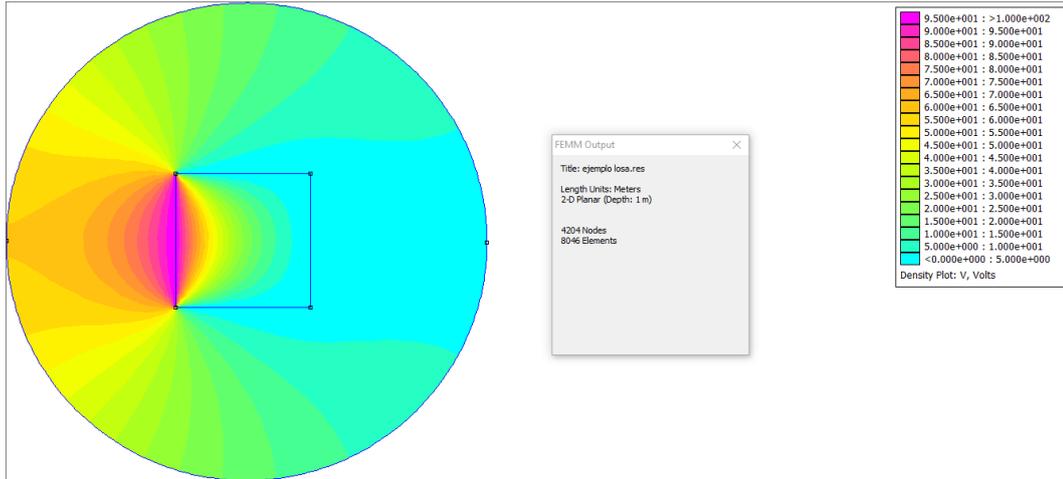


Figura 51: Análisis de los resultados en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

Para resolver este ejercicio se necesita conocer cuánto vale la tensión en el centro de la placa. Es importante fijarse si aparece la ventana emergente “*FEMM Output*”, en ella se visualizan los valores de los puntos que se deseen conocer. Si esta ventana no aparece, se puede sacar en la pestaña “View” y a continuación → “*Point Props*”.

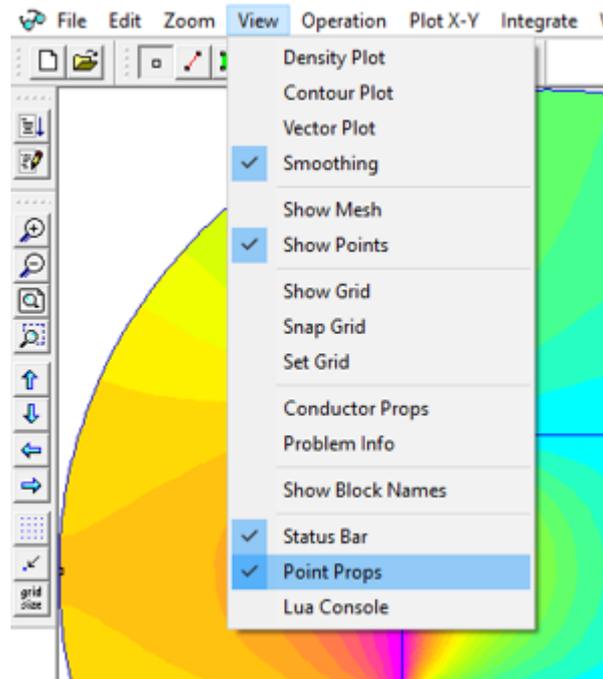


Figura 52: Ventana emergente "Point Props"
(Fuente: Software FEMM)

Para conocer la tensión en un punto concreto de la placa se realiza mediante la tecla “tabulador” del teclado. Una vez que clicamos sobre el tabulador aparece una ventana emergente donde se solicita el valor del punto donde se desea conocer dicha tensión. En este ejemplo el punto (2,2), justo en el centro de la losa.

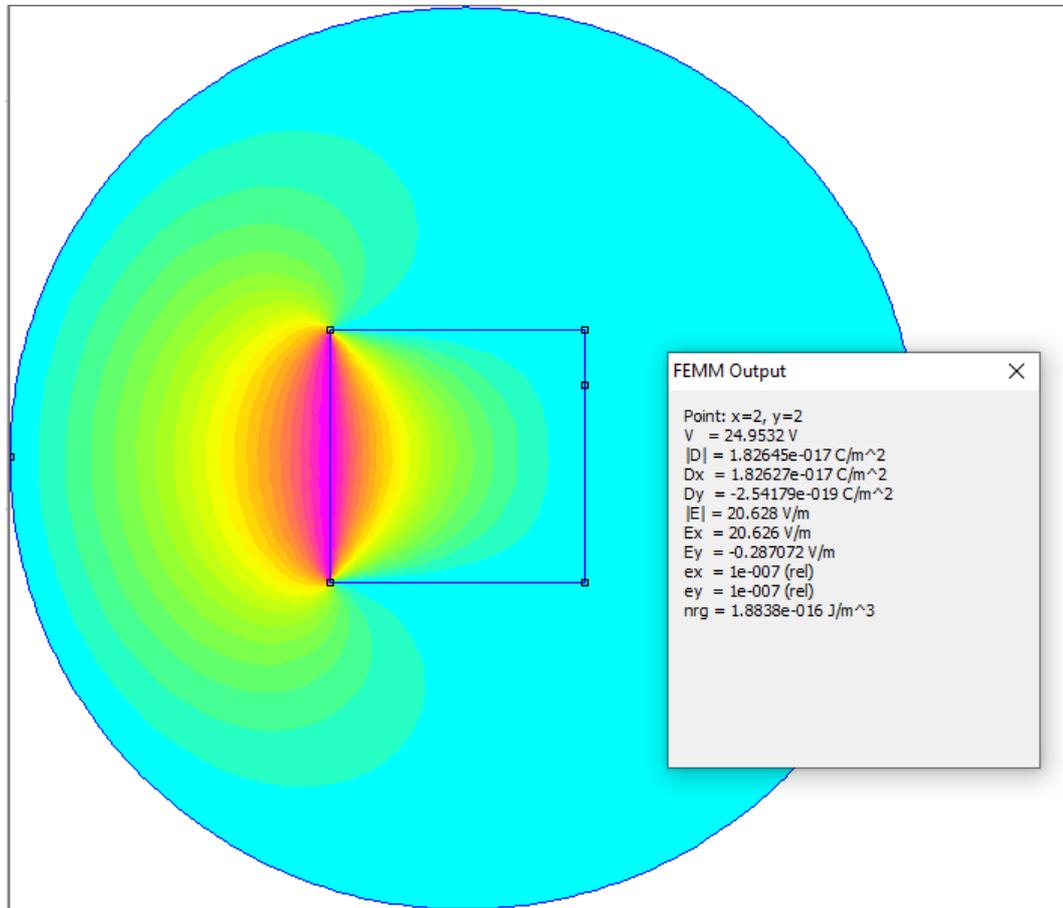


Figura 53: Resultados del ejemplo losa rectangular con FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

Como se puede comprobar (véase Figura 53) FEMM aproxima el resultado de la tensión a 4 decimales, dando un valor de tensión de 24,9532 V. Resultado que comparado con el valor de la solución que proporcionaba el ejercicio es correcto.

CAPÍTULO 6: EQUIPOS Y AISLAMIENTOS ANALIZADOS

6.1 Simulación del aislador U100BLP con geometría simplificada

En este caso la geometría del ejemplo a resolver es bastante compleja y representar dicha geometría en FEMM es muy laborioso, por este motivo es preferible crear el modelo en un programa de dibujo CAD e importarlo a FEMM en formato “.DXF”.

El programa que se ha utilizado para modelar el aislador es CATIA V5. Para guardar el archivo creado se utiliza la extensión “.DXF”.

Para importar el modelo en formato “.DXF” en FEMM:

1. Se crea un nuevo proyecto, con una de las tres formas que se enumeran a continuación:
 1. Pulsar **Ctrl + N**.
 2. Pestaña **File** → **New**.
 3. Pinchar (una vez) sobre el icono de la hoja en blanco.

En la ventana emergente que aparece se elige la opción de problema electrostático. Es el tipo de problema a estudiar en este trabajo.

2. Pestaña **“File”** → **“Import DXF”**. A continuación, se abre una ventana emergente para buscar dicho archivo.

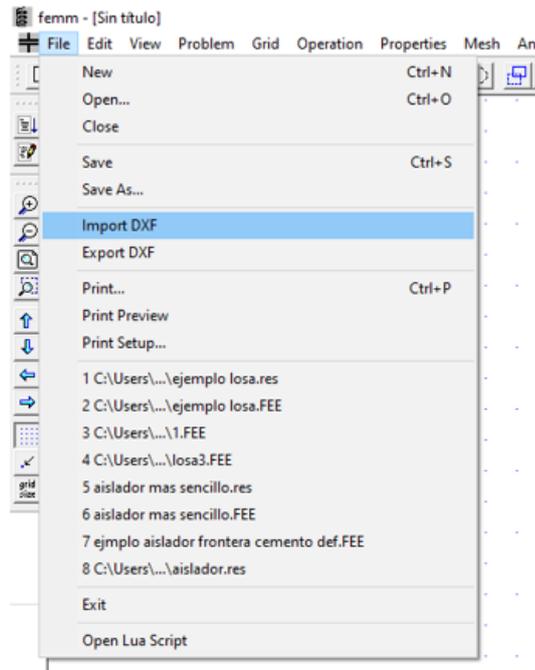


Figura 54: Importar un archivo ".DXF" a FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Al seleccionar el archivo se abre una ventana emergente para elegir la tolerancia, con la finalidad de reconocer todos los puntos del modelo elaborado en el CAD. Se recomienda dejar la tolerancia que aparece por defecto.

Normalmente FEMM reconoce elementos que propiamente no han sido dibujados en el programa de CAD y esto produce un fallo en la creación del mallado.

En mi caso, al crear el mallado del aislador me apareció el siguiente fallo.

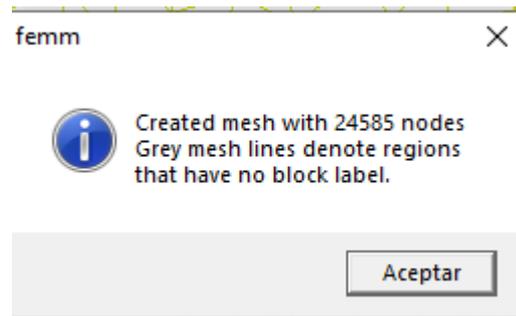


Figura 55: Fallo en la creación del mallado en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Al querer simular el modelo, FEMM vuelve a presentar otra ventana emergente con el mismo error, como consecuencia de este error FEMM no ejecuta la simulación.

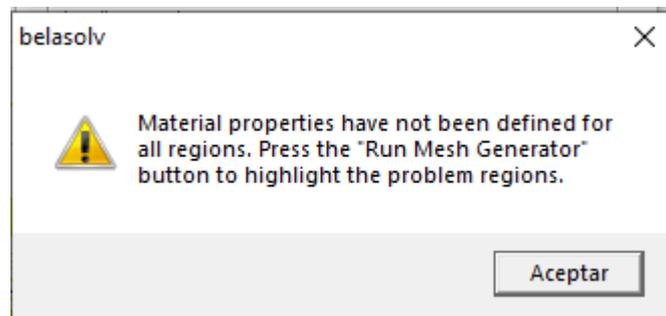


Figura 56: Fallo al simular el modelo el FEMM
(Fuente: Software FEMM)

Es decir, FEMM está detectando zonas en el modelo que no están definidas, para ello y para facilitar la búsqueda de esas zonas, FEMM crea su mallado en gris en vez del color amarillo, color que emplea para las zonas correctamente definidas.

Para detectar las zonas que producen fallo, hay que hacer zoom en el modelo hasta localizarlas.

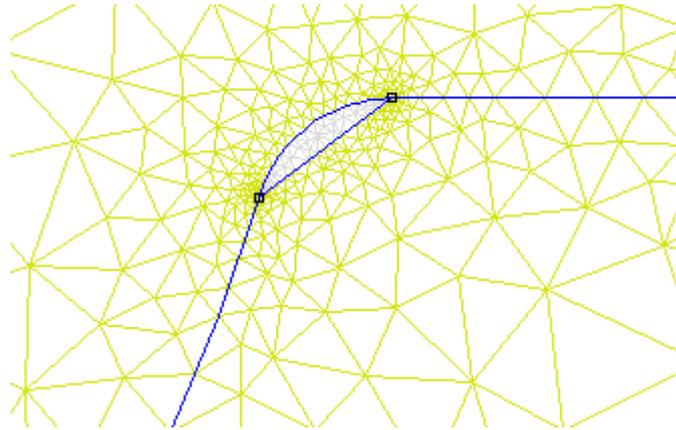


Figura 57: Localización de zonas que producen un error en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 58 se muestra un diagrama de flujo, del proceso que se ha explicado anteriormente, en él se detallan los pasos que se deben seguir para obtener los voltajes con FEMM [43].

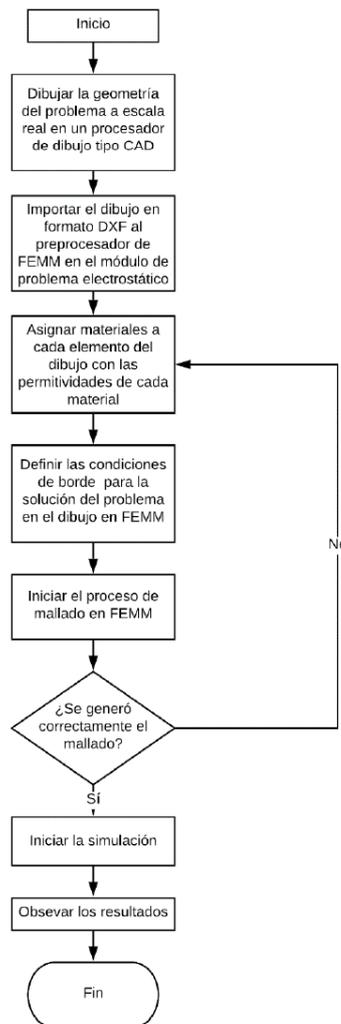


Figura 58: Diagrama de flujo para la obtención de voltajes en FEMM
(Fuente: <https://www.redalyc.org/journal/5722/572263177001/html/>)

Una vez aclarado como se importa y los fallos que ello puede producir en la simulación del modelo en FEMM, se procede a presentar el ejemplo del aislador que se desea analizar.

Se comienza el estudio con la simulación de la simplificación de la geometría del aislador, con el fin de analizar cómo se distribuye la tensión y el campo eléctrico a través del él.

El aislador analizado es el U100BLP [42]. Se corresponde con un aislador de perfil anticontaminación o antiniebla, se recomienda para zonas de media y alta contaminación. Su mayor línea de fuga, que excede los requerimientos de la norma del comité electrotécnico internacional IEC 60305 se consigue gracias a unos nervios más profundos que permiten reducir los efectos de la contaminación sin aumentar la longitud de la cadena.

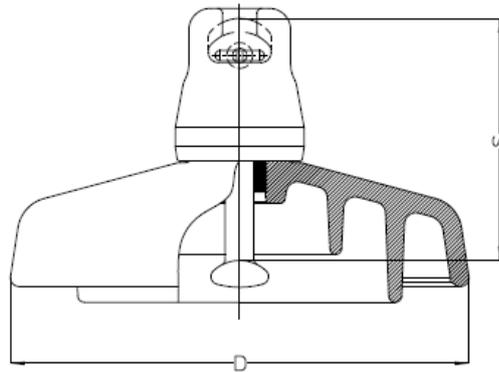


Figura 59: Aislador U100BLP
(Fuente: <https://www.verescenceinsulators.com/>)

El aislador tiene un diámetro “D” de 280 mm, un espaciamiento “H” de 146 mm, una distancia de fuga de 445 mm. El voltaje de perforación del aislamiento es de 130 kV. El nivel de aislamiento de frecuencia industrial en seco es de 85 kV. El nivel de aislamiento de frecuencia industrial en mojado es de 50 kV y el nivel de aislamiento ante impulso CFD positivo y negativo es de 130 kV [42].

Tabla 8: Catálogo de los aisladores de 100 kV

Perfil Profile	Estándar Standard		Anticontaminación Anti-pollution			Aerodinámico Aerodynamic	Esférico Spherical		
Modelo LGI LGI model	E-100-127	E-100-146	E-100P-127	E-100P-146	E-100PP-146	E-100D-127 E-100DP-127	E-100R-146		
Clase IEC-60305 Class IEC-60305	U 100 BS	U 100 BL	-	-	U 100 BLP	-	-		
Carga mínima de rotura mecánica (kN) Minimum mechanical failing load (kN)	100	100	100	100	100	100	100		
Datos dimensionales Dimensional data	Paso (S) mm Spacing (S) mm	127	146	127	146	146	127	146	
	Diámetro (D) mm Diameter (D) mm	255	255	255	255	280	380	255	
	Línea de fuga (mm) Creepage Distance (mm)	320	320	390	390	445	350 / 365	300	
	Unión normalizada IEC-60120 Standard coupling IEC-60120	16A	16A	16A	16A	16A	16A	16A	
Valores eléctricos Electrical ratings	Tensión soportada a frecuencia industrial Power frequency withstand voltage								
	En seco (kV) Dry (kV)	70	70	80	80	85	60	60	
	Bajo lluvia (kV) Wet (kV)	40	40	45	45	50	50	45	
	Tensión soportada a impulso tipo rayo en seco (kV) Dry lightning impulse withstand voltage (kV)		100	100	110	110	125	90	95
	Tensión de perforación en aceite (kV) Puncture voltage in oil (kV)		130	130	130	130	130	130	130
Información de embalaje Packing information	Peso neto aproximado (kg) Approx. unit net weight (kg)		3,8	3,8	4,7	4,7	5,6	5,6	4,5
	Nº de aisladores en embalaje de caja de madera No. of insulators wooden crate		6	6	6	6	6	6	6

Para realizar la simulación en FEMM es necesario conocer los materiales que componen las diferentes capas del aislador. A continuación, se muestra un ejemplo de aislador donde se pueden distinguir las distintas capas que lo componen.

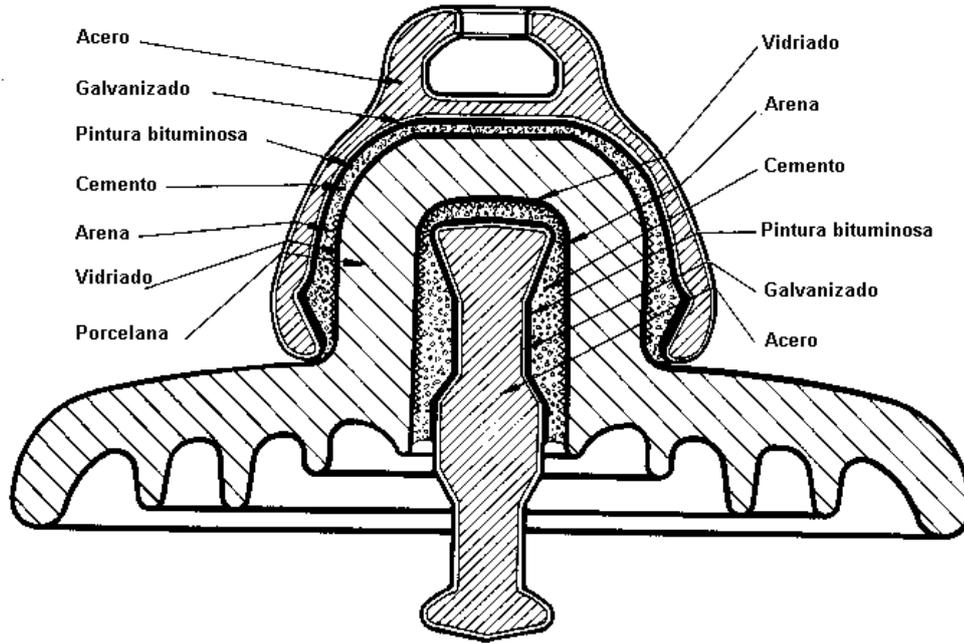


Figura 60: Capas que forman parte de un aislador
(Fuente: <http://www.untels.edu.pe/>)

Una vez que se han localizado los materiales que forman las capas del aislador, se realiza una búsqueda de las permitividades relativas de cada material, dato necesario para la definición de los materiales en FEMM.

A continuación, se muestra una tabla que contiene todas las permitividades de los materiales empleados para la definición del aislador [43].

Tabla 9: Permitividades relativas de los materiales que definen al aislador

Material	Permitividad relativa
Acero galvanizado	500.000
Cemento	18
Porcelana	5,9
Aluminio	50.000

Con todo ello, se define el modelo del aislador en FEMM (véase Figura 61). Para este primer ejemplo, la geometría con la que se crea el modelo se ha simplificado bastante. Las capas son representadas por diferentes rectángulos acoplados.

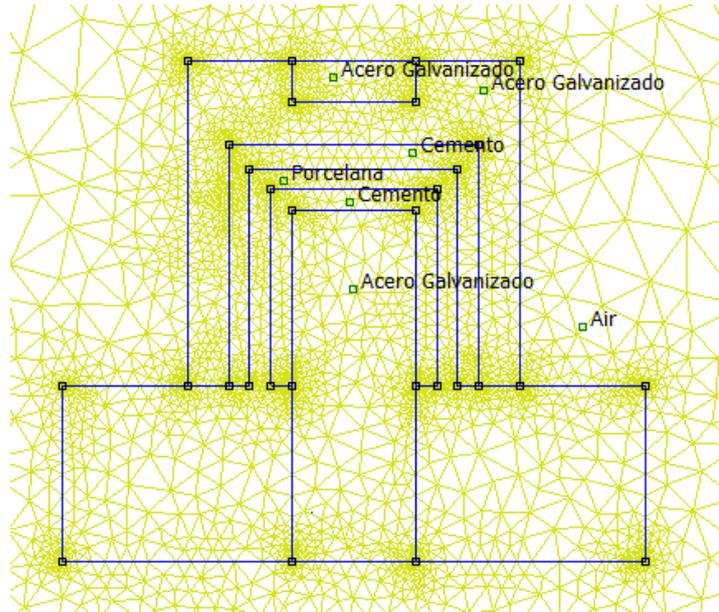


Figura 61: Modelo de aislador con geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

6.2 Simulación del aislador U100BLP sin la primera capa de cemento

Lo que se quiere plantear ahora es qué pasaría si al aislador estudiado anteriormente le quitamos la primera capa de cemento. Cómo influiría la distribución de tensiones y el campo eléctrico en este caso.

La geometría en FEMM se visualiza en este caso como en la Figura 62.

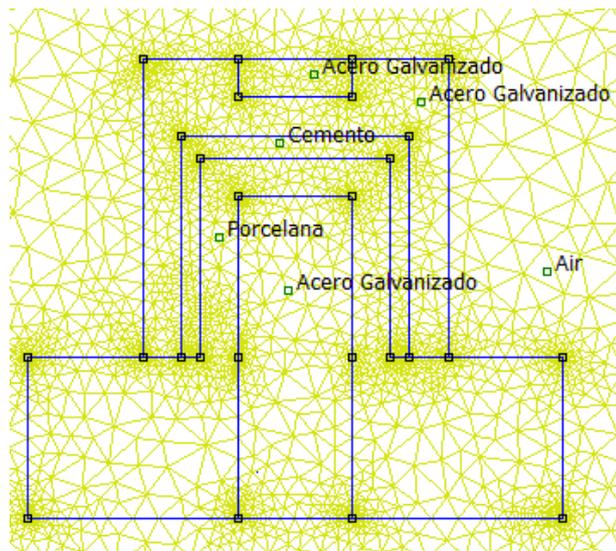


Figura 62: Aislador U100BLP sin la primera capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

6.3 Simulación del aislador U100BLP sin la capa de porcelana

El mejor material aislante que posee este aislador es la porcelana, ya que es el material caracterizado con la menor permitividad relativa ϵ_r . Se estudia en este caso que pasaría si se elimina la capa de porcelana en el aislador. El aislador ahora solo posee cemento como capa aislante (véase Figura 63).

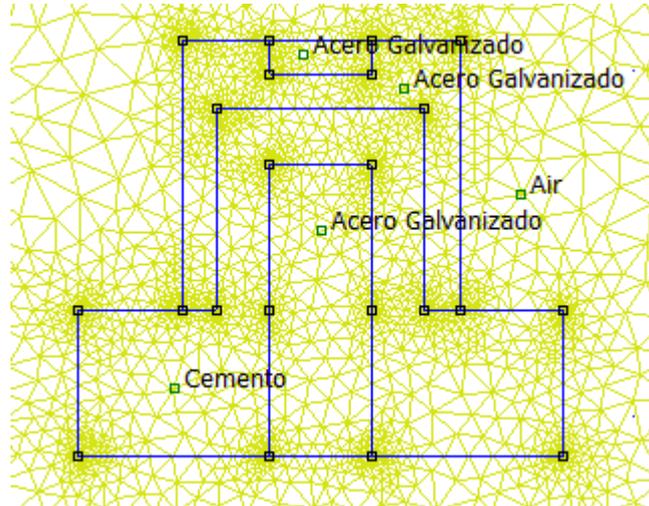


Figura 63: Aislador U100BLP sin la capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

6.4. Simulación del aislador U100BLP

Una vez estudiado el aislador U100BLP con la geometría simplificada y realizando varios ejemplos sobre la modificación de sus capas, se procede a estudiar el aislador con la geometría real.

Como se puede observar en la Figura 59 las líneas predominantes en la definición de la geometría son las curvas. Es importante resaltar esto, porque dichas líneas son las encargadas de proteger al aislador, por ejemplo, de factores atmosféricos como la lluvia.

El aislador U100BLP tiene forma de campana, además de poseer varios salientes, formando así una defensa contra agentes atmosféricos. Gracias a esta geometría el aislador impide que la lluvia facilite un camino continuo a la descarga eléctrica.

La geometría realizada en FEMM se muestra en la Figura 64.

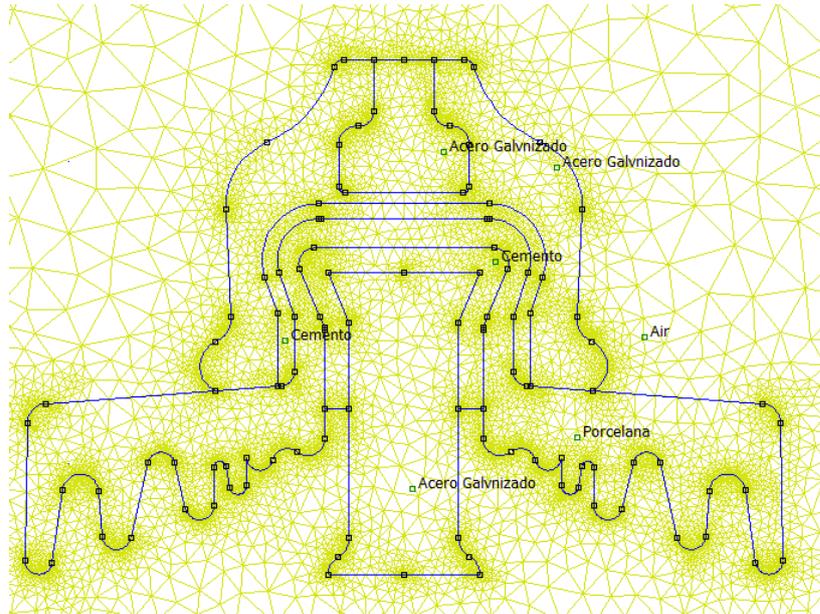


Figura 64: Aislador U100BLP
(Fuente: Elaboración propia)



CAPÍTULO 7: RESULTADOS

7.1 Aislador U100BLP con geometría simplificada

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES

Para realizar la simulación se toma el valor de 85 kV, ya que se trata del máximo voltaje de frecuencia industrial que puede soportar este aislador especificado por la norma. La simulación de la distribución de tensión obtenida es la que se muestra en la Figura 65.

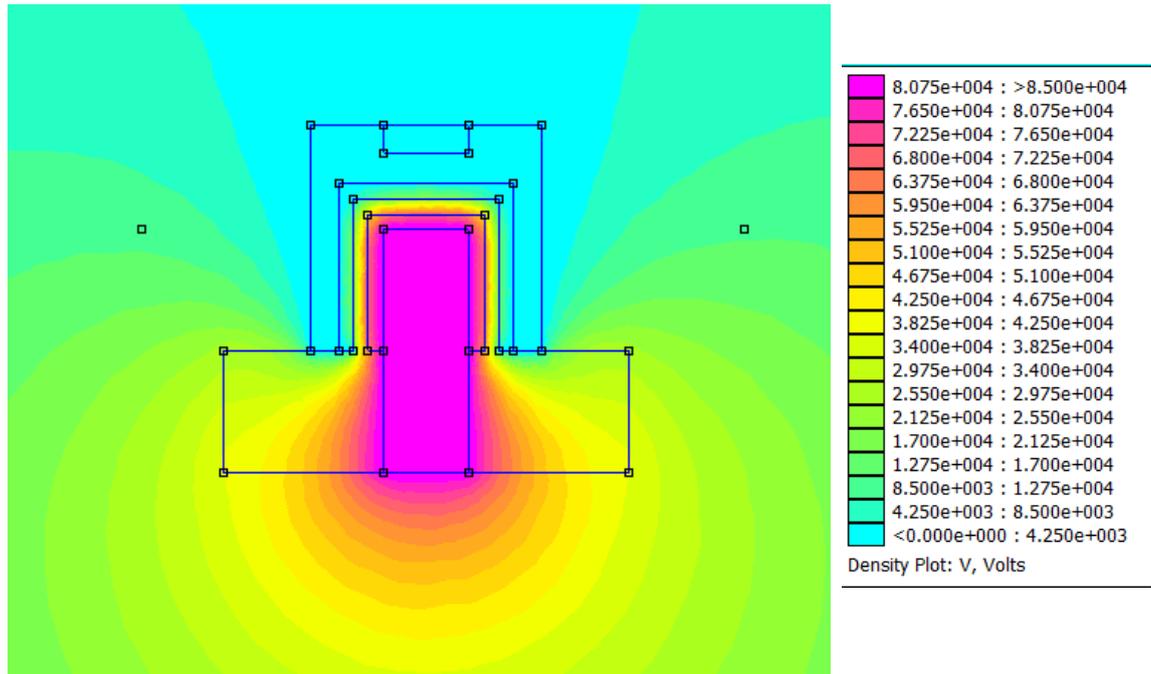


Figura 65: Resultados de la distribución de voltaje en U100BLP con geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 65 se representa un mapa de densidades donde se puede observar la distribución del voltaje.

El color rosa representa los 85 kV de tensión máxima, los cuales se propagan por las diferentes capas del aislador, hasta conseguir reducir su valor considerablemente, caracterizado por las zonas en color verde y azul.

Haciendo zoom a la parte central del aislador, con el objetivo de ver mejor la distribución del voltaje, se observa que la capa que actúa como aislante principal es la porcelana (véase Figura 66).



Figura 66: Análisis de las distintas capas del aislador con la geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

Si se clicca sobre la segunda capa de cemento (el punto a estudiar se ha representado en la Figura 67 por una cruz roja), en dicha capa se aprecia que el valor del voltaje ha disminuido con respecto al valor de carga inicial, gracias al efecto aislante de la porcelana. Se puede conocer el valor de la tensión en ese punto, un voltaje de 4,6 kV, a simple vista es un valor bastante alto aún, pero comparándolo con los 85 kV que poseía el aislador en su núcleo, se nota una clara reducción del voltaje.

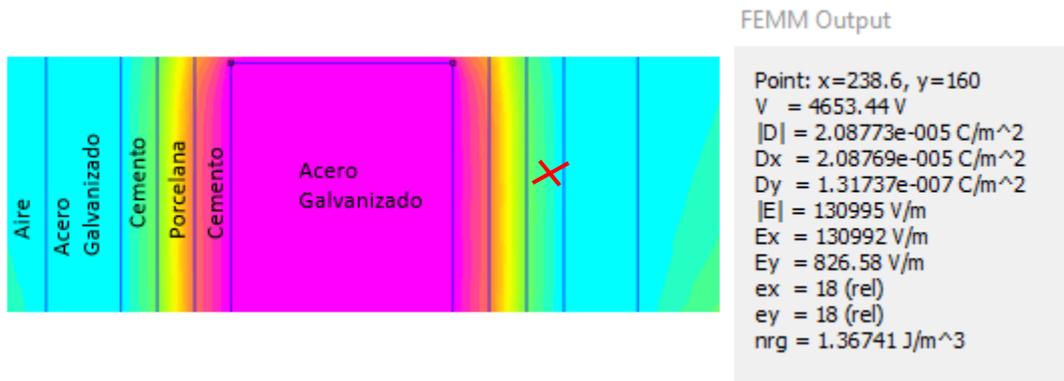


Figura 67: Valor del voltaje en un punto de la segunda capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

Por defecto, el parámetro que estudia FEMM al iniciar la simulación es el voltaje, ya que es el valor que se ha asignado a la hora de definir los conductores y las fronteras en el modelo de estudio.

Pero otro parámetro importante a estudiar es el campo eléctrico y como este se distribuye a lo largo del aislador.

Para visualizar en FEMM este valor:

1. Hay que permanecer en la pantalla de simulación.
2. Si se quiere obtener los valores numéricos del campo eléctrico. Se clicca sobre: View → “Density Plot”

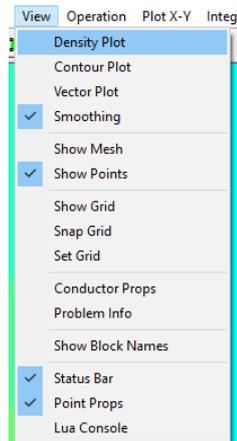


Figura 68: Pestaña en FEMM para obtener el campo eléctrico
(Fuente: Software FEMM)

A continuación, aparece una ventana emergente, donde se selecciona el parámetro que se desea visualizar, en este caso se selecciona el campo eléctrico.

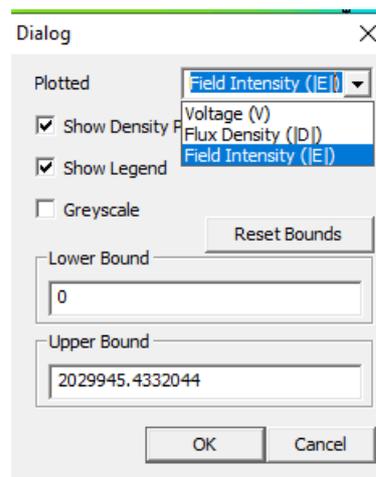


Figura 69: Ventana emergente para seleccionar el estudio del campo eléctrico en FEMM
(Fuente: Software FEMM)

3. Si lo que se desea es obtener de forma gráfica las líneas de campo eléctrico: “View” → “Vector Plot”. A continuación, aparece una ventana emergente con un desplegable donde se elegirá, igual que en el caso anterior, la opción de campo eléctrico.

Además, en esta ventana emergente, aparece una opción donde se puede ajustar la escala, con el objetivo de mejorar la visualización de las líneas de campo.

4. Otra opción que proporciona FEMM, es la de realizar gráficas. Para ello hay que dibujar una línea a través del aislador. Para dibujar dicha línea se emplea el icono  que aparece en la parte superior a la izquierda.

Para poder ejecutar esta opción, previamente se han tenido que dibujar en la ventana de dibujo dos puntos/nudos, para la posterior creación de la línea, mencionada en el párrafo anterior.

Una vez dibujada la línea, se clicca sobre la pestaña “Plot X-Y”, aparece inmediatamente después una ventana emergente con las opciones que proporciona FEMM para realizar la gráfica. Se selecciona la que se desee estudiar.

Una vez explicado esto se procede a estudiar el campo eléctrico en el aislador propuesto.

CAMPO ELÉCTRICO

En la Figura 70 se representa el campo eléctrico en el modelo del aislador a estudiar.

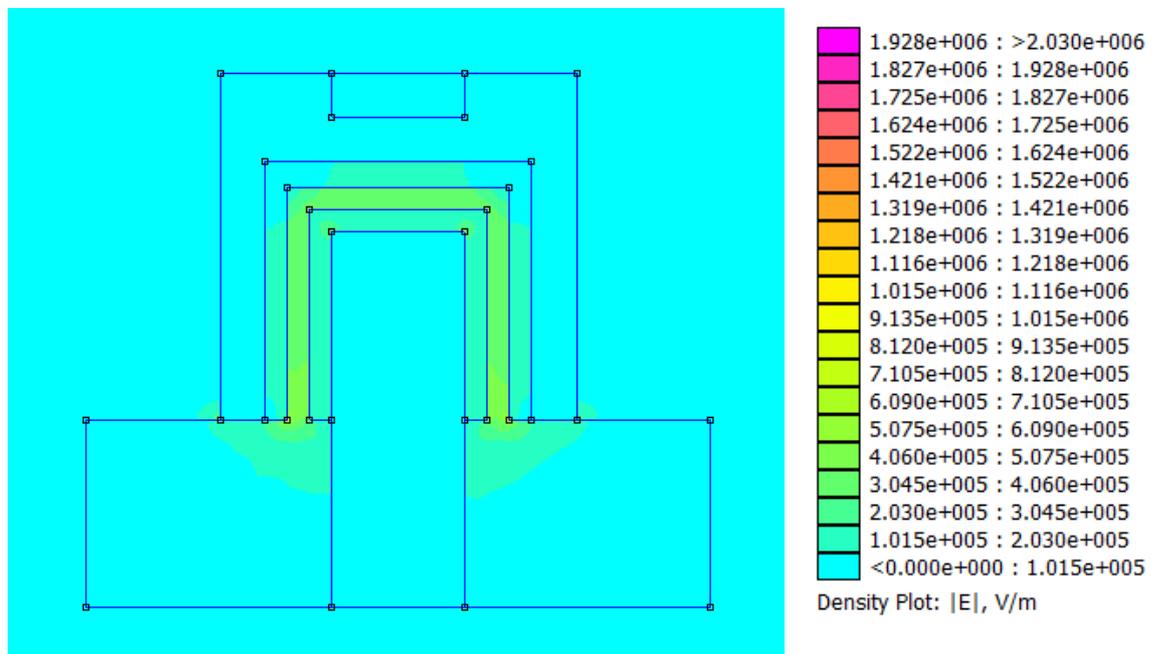


Figura 70: Representación del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

Haciendo zoom sobre la representación anterior, se observa que los puntos más críticos son las esquinas. Sobre todo, las esquinas inferiores que

pertenecen a la frontera entre la capa de porcelana y la segunda capa de cemento.

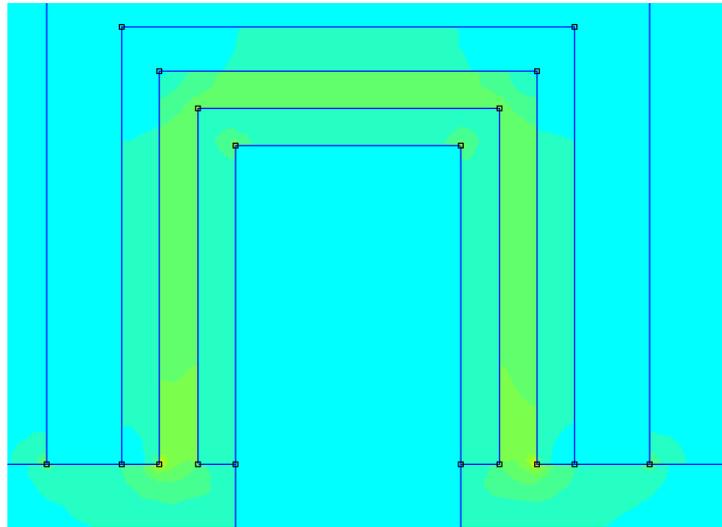


Figura 71: Zoom sobre la representación del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

Para una mejor visualización, en la siguiente figura se representa la mitad del aislador, haciendo zoom en la parte que interesa estudiar, es decir, los puntos críticos, marcados con un círculo rojo en la Figura 72.

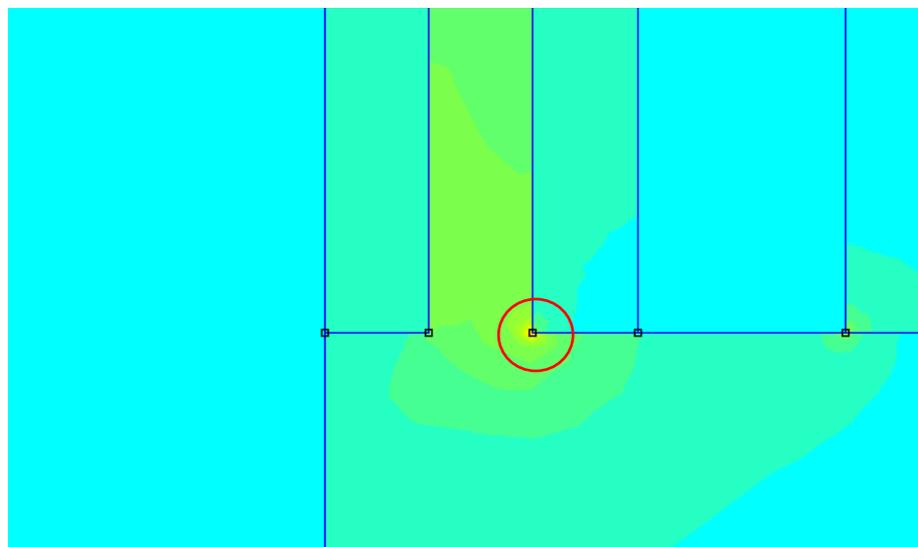


Figura 72: Zoom sobre la representación del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

Si se continúa aumentando la imagen, hasta conseguir ver solo el punto más crítico de dicho aislador, se obtiene la siguiente distribución del campo eléctrico.

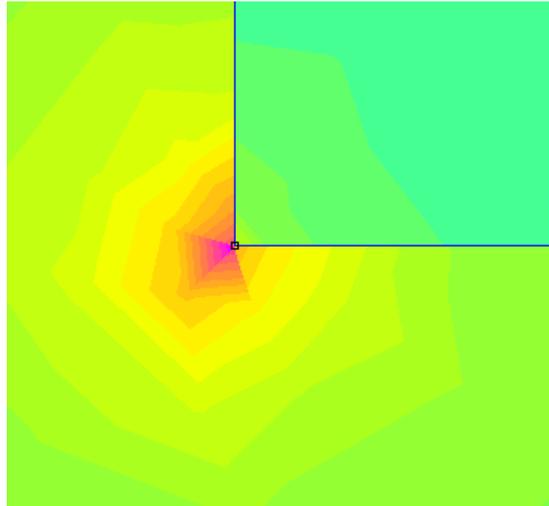


Figura 73: Distribución del campo eléctrico en la esquina inferior derecha, punto crítico, del aislador con la geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

El campo eléctrico en el punto más crítico tiene un valor de $2,0128 \times 10^6$ V/m. En el caso de que este valor, el del campo eléctrico, superase a la rigidez dieléctrica, este aislador tendría un fallo de diseño, cuya solución, por ejemplo, podría ser redondear las esquinas, evitando de esta forma que el valor del campo eléctrico supere al de la rigidez dieléctrica. Ya que de darse esto, y en casos extremos, podría ocasionar la perforación del aislante, originando que el cemento pierda su propiedad aislante, volviéndose de esta forma conductor.

GRÁFICA DEL CAMPO ELÉCTRICO

Con el objetivo de ver la distribución del campo eléctrico de una manera más clara, se representa en la Figura 75 una gráfica del mismo. Para estudiarlo se elige la parte central del aislador, tal y como se muestra en la Figura 74. El valor más alto de campo eléctrico se sitúa en la segunda capa de porcelana. Es curioso observar en esta gráfica el pequeño escalón formado a la altura de $1,5 \times 10^6$ V/m, consecuencia de la existencia de las capas de cemento, cuyo objetivo es proteger a la capa aislante principal, la porcelana.

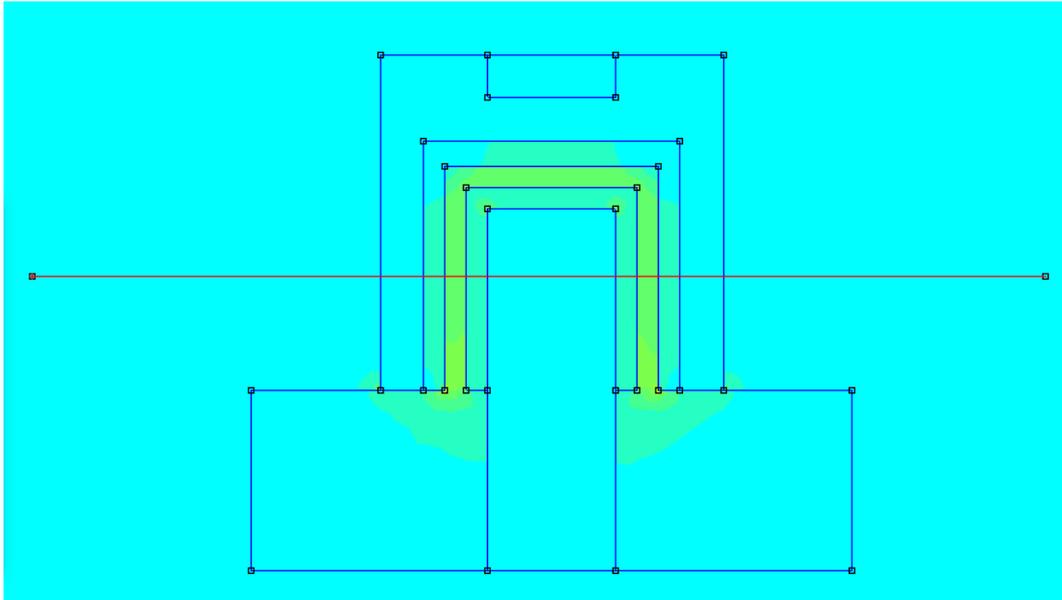


Figura 74: Esquema para el estudio de la distribución del campo eléctrico en el aislador con geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

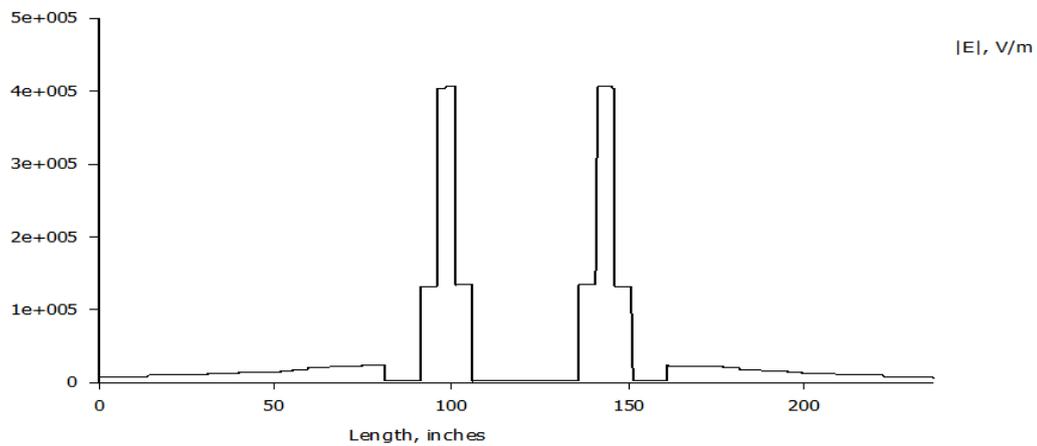


Figura 75: Gráfica de la distribución del campo eléctrico en el aislador de geometría simplificada
(Fuente: Elaboración propia)

7.2 Aislador U100BLP sin la primera capa de cemento

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES

Al igual que en el caso anterior, la tensión en el núcleo del aislador es de 85 kV.

La simulación de la distribución de tensión en el caso de eliminar la primera capa de cemento en el aislador es la siguiente:

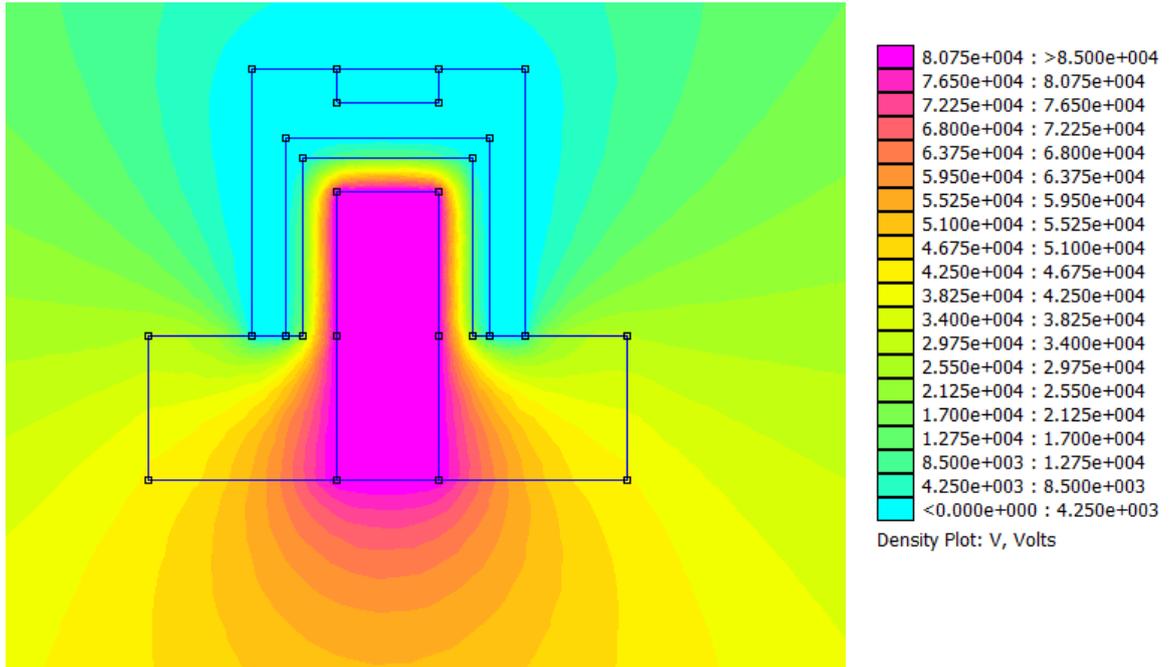


Figura 76: Simulación del aislador sin la primera capa de cemento en FEMM
(Fuente: Elaboración propia)

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para visualizar mejor las diferencias obtenidas entre el ejemplo anterior, donde se estudiaba al aislador U100BLP con la geometría simplificada, y el ejemplo actual, en el que se ha suprimido la primera capa de cemento, se representa en la Figura 77 la distribución de tensión de ambas simulaciones.

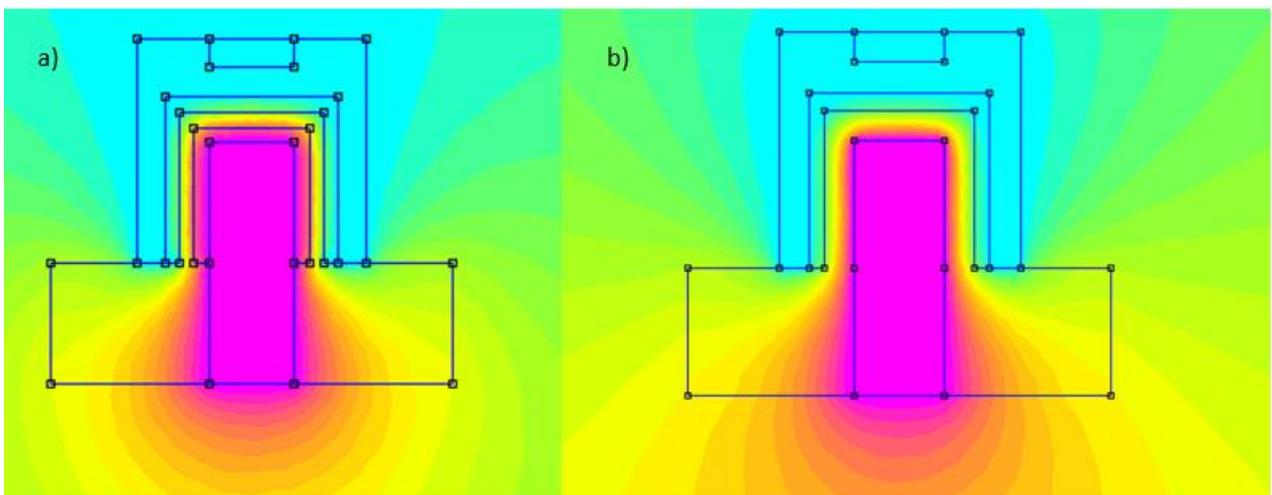


Figura 77: Comparación de las simulaciones del aislador. a) Con la geometría simplificada, b) sin la primera capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

La primera diferencia que se observa a simple vista, es la distribución de la tensión en la parte inferior del aislador. En la Figura 77 b) donde se ha suprimido la capa de cemento, la distribución de tensiones en la base del aislador no se consigue reducir de la misma manera que en el caso a) donde el aislador posee todas las capas de aislante. Los valores de la distribución de tensiones al quitar la primera capa de cemento son mayores que en el caso del aislador que posee todas las capas de aislante.

Es decir, la capa de cemento influye en la distribución de tensiones, al quitar dicha capa se ha comprobado que las tensiones en la parte inferior son mucho mayores, aunque la capa que trabaja como aislante principal sigue siendo la de porcelana.

Para ver de manera más clara la distribución de tensiones en ambos aisladores, se hace zoom de la parte central de ambos (véase Figura 78). Se comprueba que en el aislador que posee todas las capas de aislante (caso a)) la distribución de tensiones se realiza de manera más progresiva, sin embargo, al eliminar la primera capa de cemento y al aumentar el grosor de la capa de porcelana (caso b)), la cual actúa como aislante principal, se consigue reducir de manera más rápida la tensión aplicada en el núcleo del aislador, como consecuencia, las tensiones que llegan a la segunda capa de cemento son mucho menores que en el caso a).



Figura 78: Comparación entre las capas aislantes de los aisladores: a) geometría simplificada, b) sin la primera capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

Ambos aisladores poseen la capa de porcelana, que es la que consigue en gran medida el efecto aislante. Por ello, en el siguiente ejemplo se estudiará la distribución de tensiones sin la capa de porcelana.

CAMPO ELÉCTRICO

Al igual que se ha hecho en el ejemplo anterior, se procede a estudiar la distribución del campo eléctrico en este aislador. En la Figura 79 se puede observar dicha distribución.

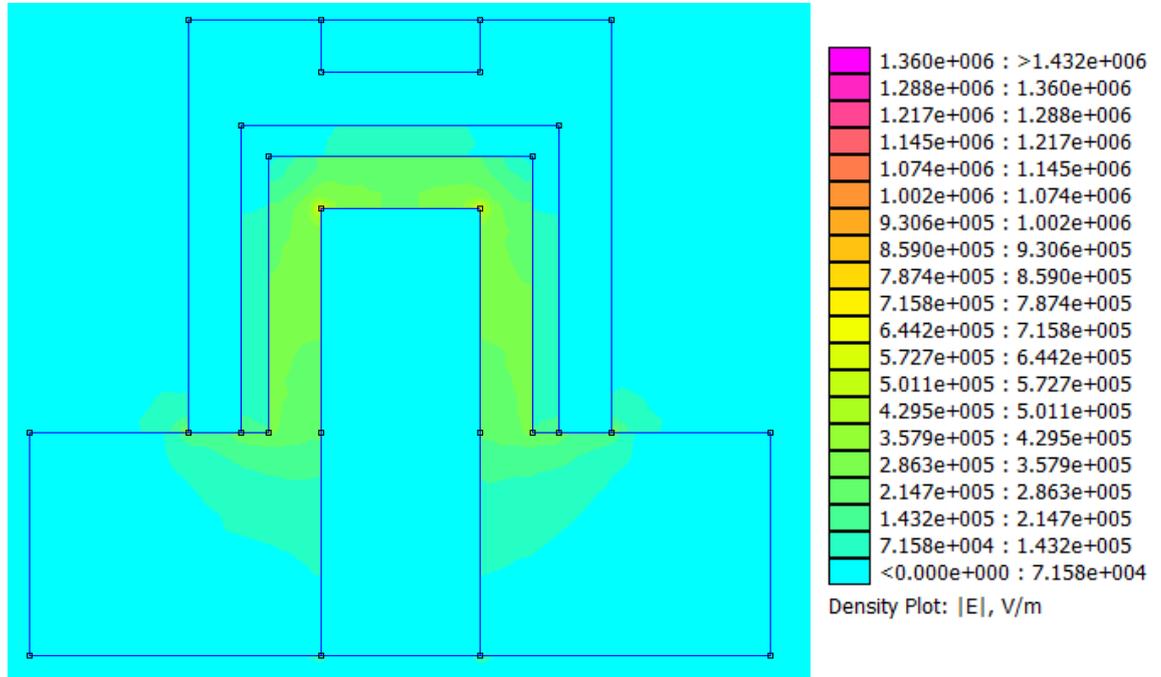


Figura 79: Distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

En este caso, el valor más alto del campo eléctrico se da en las esquinas superiores de la capa de porcelana. Dicho efecto se puede ver de forma más clara en la siguiente figura.

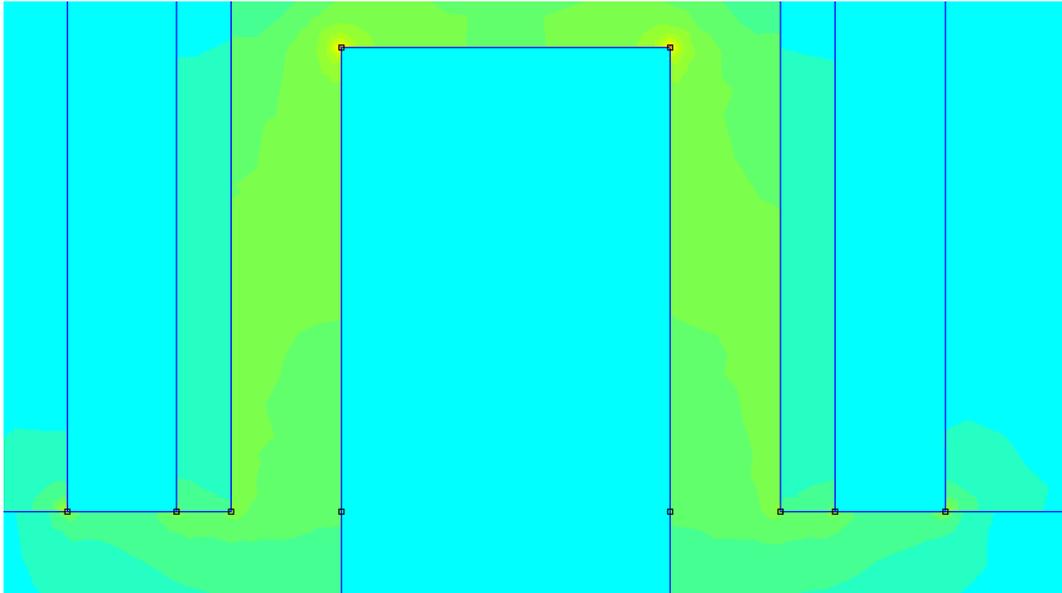


Figura 80: Zoom de la distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

La imagen aún no es del todo clara, pero sí se comprueba que los puntos más críticos son las esquinas superiores, estas poseen un color amarillo más fuerte que el resto de zonas del aislador.

Si se hace un zoom que abarque solo la zona de interés de estudio, es decir, una de las esquinas superiores, por ejemplo, la esquina superior derecha, se observa lo siguiente:

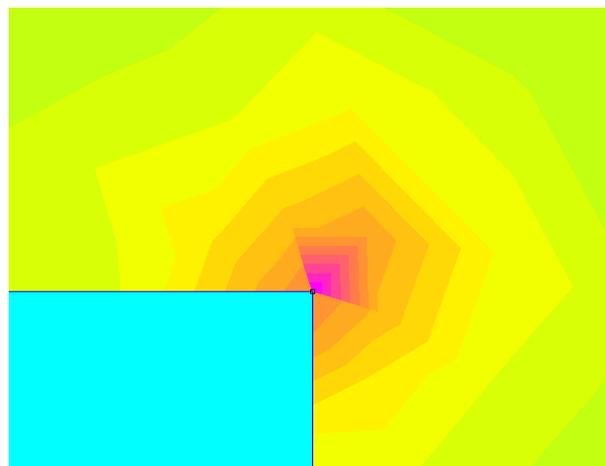


Figura 81: Zoom a la esquina superior derecha para el estudio de la distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

En el caso de suprimir la primera capa de cemento el valor pico que se alcanza de campo eléctrico es de $1,432 \text{ e}6 \text{ V/m}$, un valor inferior al obtenido en el caso anterior, cuyo valor pico se alcanzaba en $2,0128 \text{ e}6 \text{ V/m}$.

COMPARACIÓN DE REUSLTADOS

Con el objetivo de ver las diferencias que se producen en la distribución del campo eléctrico al suprimir la primera capa de cemento del aislador, se representa en la Figura 82 la distribución de tensión obtenida en la esquina superior en ambos casos, en el caso a) representa la simulación obtenida en el aislador de geometría simplificada y en el caso b) la obtenida al suprimir la primera capa de cemento.

La diferencia que más llama la atención es que al suprimir la primera capa de cemento la esquina superior se vuelve zona crítica, pasando de tener un valor de 781978 V/m en el caso de que el aislador posea todas las capas de aislante hasta un valor (caso b) en la Figura 82) de $1,432 \text{ e}6 \text{ V/m}$.

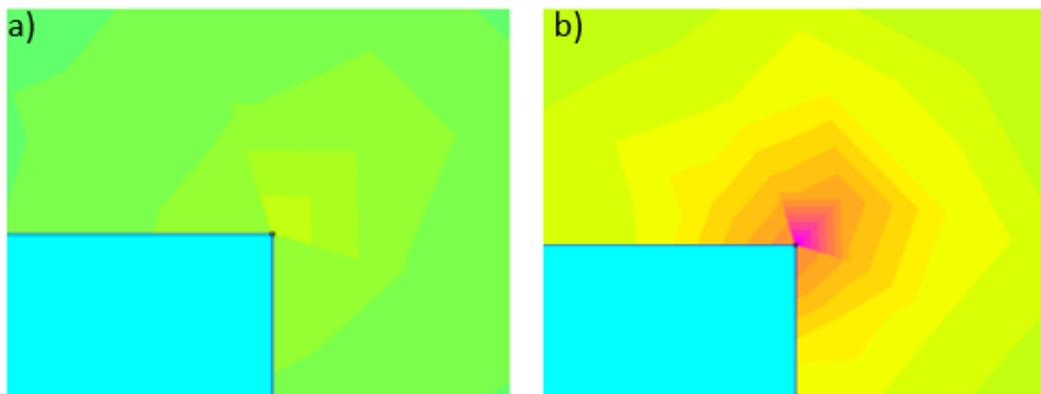


Figura 82: Comparación de la distribución del campo eléctrico en la esquina superior: a) aislador con geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento
(Fuente: Elaboración propia)

Para que los resultados vayan siendo coherentes, la gráfica de la distribución del campo eléctrico se analiza en la misma zona que se estudió en el primer ejemplo, en la zona central del aislador.

GRÁFICA DEL CAMPO ELÉCTRICO

En este caso la gráfica obtenida se muestra en la Figura 83. Se observa, respecto de la gráfica obtenida anteriormente (véase Figura 75), que los valores del campo eléctrico en la capa de porcelana han disminuido un poco, pero el valor del campo eléctrico en la capa de cemento ha incrementado, valor

señalado con un círculo rojo en la Figura 83, haciendo que el valor del campo eléctrico a lo largo del aislador no se consiga reducir de manera tan eficaz como se conseguía en el aislador con la geometría simplificada, el cual poseía todas las capas de aislante.

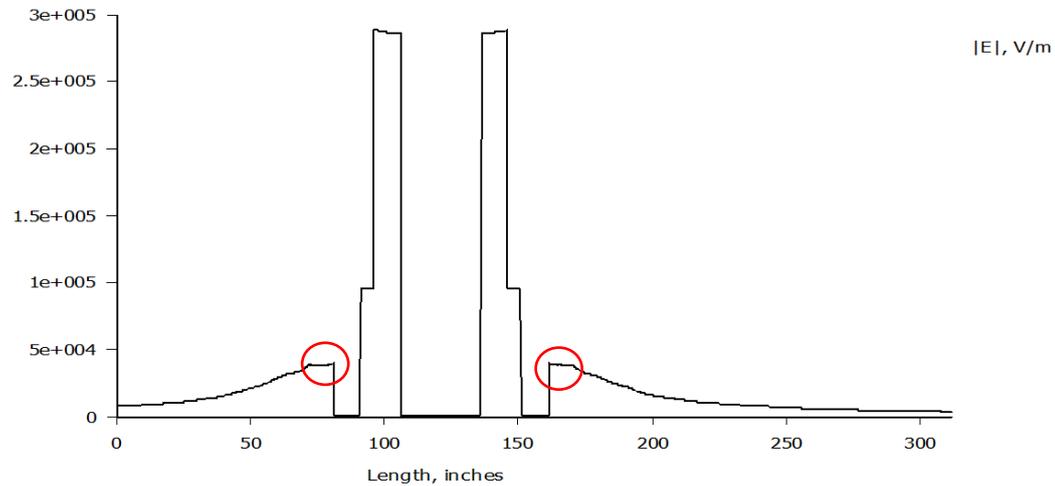


Figura 83: Gráfica de la distribución de campo eléctrico en el aislador suprimiendo la primera capa de aislante

(Fuente: Elaboración propia)

7.3 Aislador U100BLP sin la capa de porcelana

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES

La simulación de tensiones que se consigue al suprimir la capa de porcelana se muestra en la Figura 84. Como consecuencia el grosor de la capa de cemento aumenta considerablemente, consiguiendo al final reducir considerablemente el valor de la tensión.

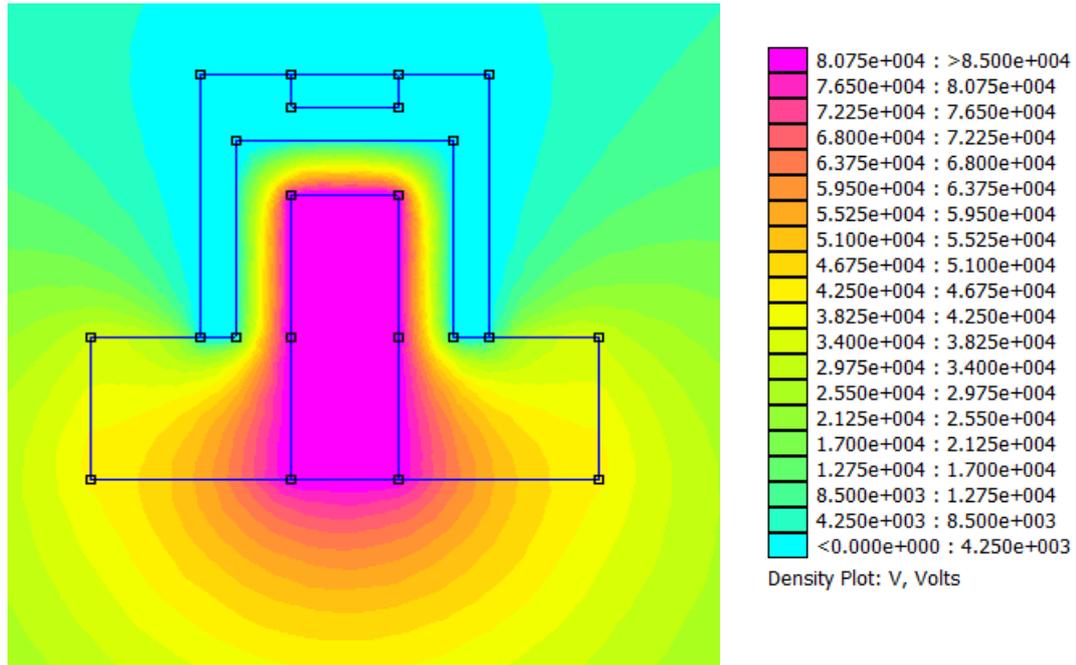


Figura 84: Simulación de la distribución de tensiones aislador U100BLP sin la capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de mejorar la visualización de las diferencias entre las simulaciones que se han obtenido hasta ahora, se representan todas ellas en la Figura 85.

La principal diferencia que existe entre ellas es la forma en la que se distribuye la tensión en la parte inferior del aislador. Cuando el aislador posee todas las capas de aislante (cemento, porcelana, cemento) el efecto aislante que se consigue es el más óptimo, caso a), ya que como se puede observar, la distribución de la tensión se realiza de forma más progresiva, siendo además la zona abarcada por valores críticos de tensión mucho menor.

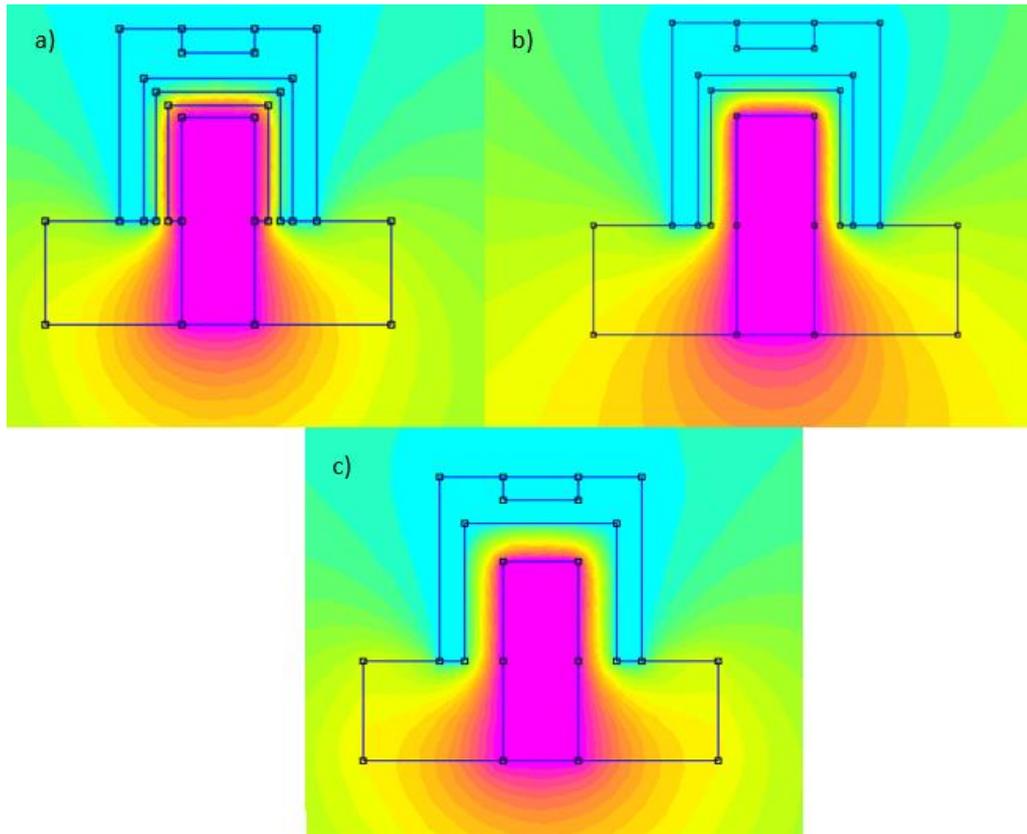


Figura 85: Comparación de las simulaciones de la distribución de tensiones: a) Geometría simplificada, b) sin la primera capa de cemento, c) sin la capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

CAMPO ELÉCTRICO

A continuación, se analiza la distribución del campo eléctrico cuando se suprime la capa de porcelana. La simulación obtenida se muestra en la Figura 86.

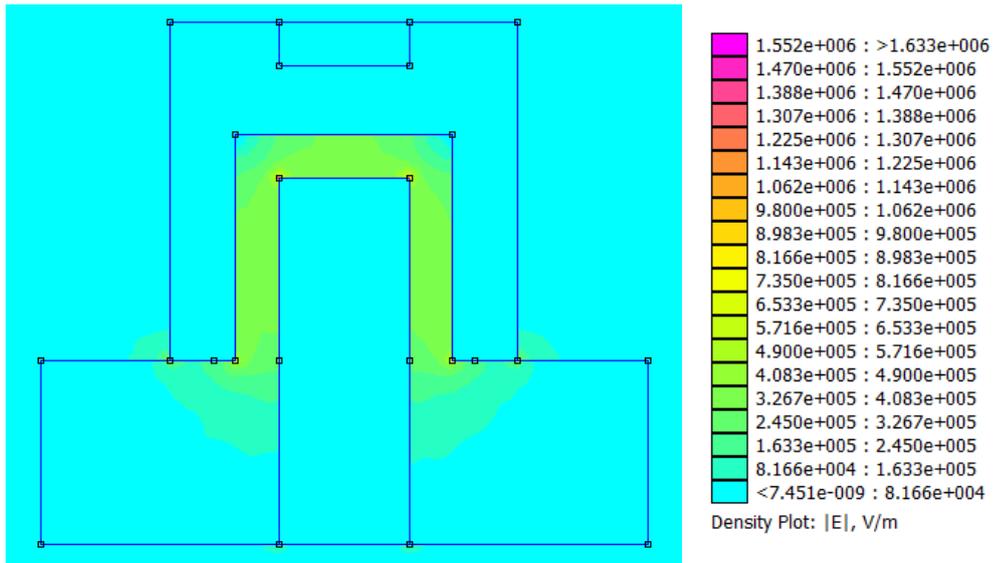


Figura 86: Distribución del campo eléctrico en el aislador sin la primera capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

En este caso, existen cuatro puntos críticos correspondientes a las dos esquinas superiores y a las dos esquinas inferiores pertenecientes ambas a la capa de cemento, única capa aislante que posee ahora el aislador.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para observar mejor dichas zonas críticas, se procede a realizar zoom en las partes de interés. En la Figura 87 caso a) se muestra la esquina superior derecha y en el caso b) la esquina inferior izquierda.

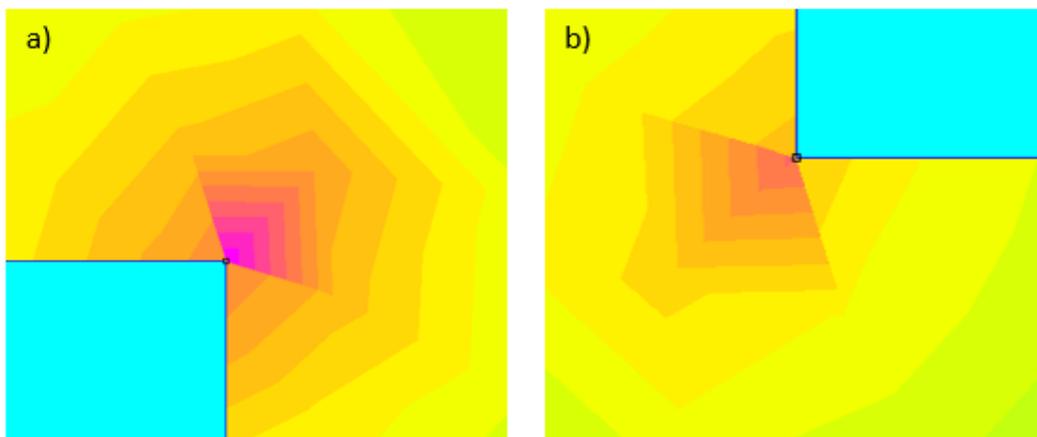


Figura 87: Distribución del campo eléctrico en los puntos críticos del aislador sin la capa de porcelana:
a) esquina superior derecha, b) esquina inferior izquierda.
(Fuente: Elaboración propia)

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para realizar un mejor análisis de las principales diferencias existentes entre todos los ejemplos estudiados se analiza por separado las zonas superior e inferior del aislador.

ZONA SUPERIOR

Se representa en la Figura 88 un zoom de la zona superior derecha correspondiente a todos los aisladores analizados hasta el momento, señalando en cada simulación la zona más crítica mediante un círculo rojo.

La Figura 88 a) representa al aislador con todas las capas de aislante, de todas las zonas de la parte superior, la zona más crítica es la perteneciente a la esquina de la frontera entre la capa de acero galvanizado y la primera de cemento. Comparando la misma zona con la distribución de campo eléctrico obtenida en los otros ejemplos, se observa que esta zona se vuelve más crítica al eliminar diferentes capas de aislante, siendo la simulación muy parecida en el caso de suprimir la capa de cemento y la de porcelana, sus valores críticos son muy similares, en el caso b) sin la capa de cemento $1,432 \text{ e}6 \text{ V/m}$ y en el caso c) sin la capa de porcelana $1,633 \text{ e}6 \text{ V/m}$.

En la Figura 89 se representa un zoom de dichas zonas críticas con el fin de mejorar la visualización de los resultados.

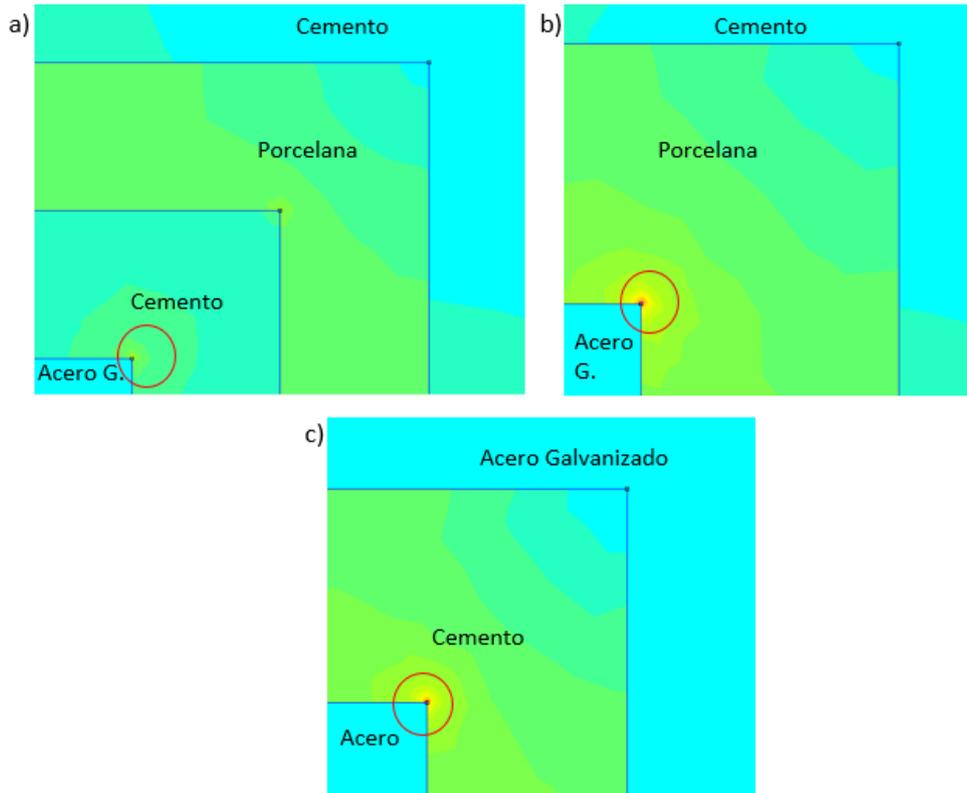


Figura 88: Comparación de la distribución del campo eléctrico en la esquina superior derecha: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

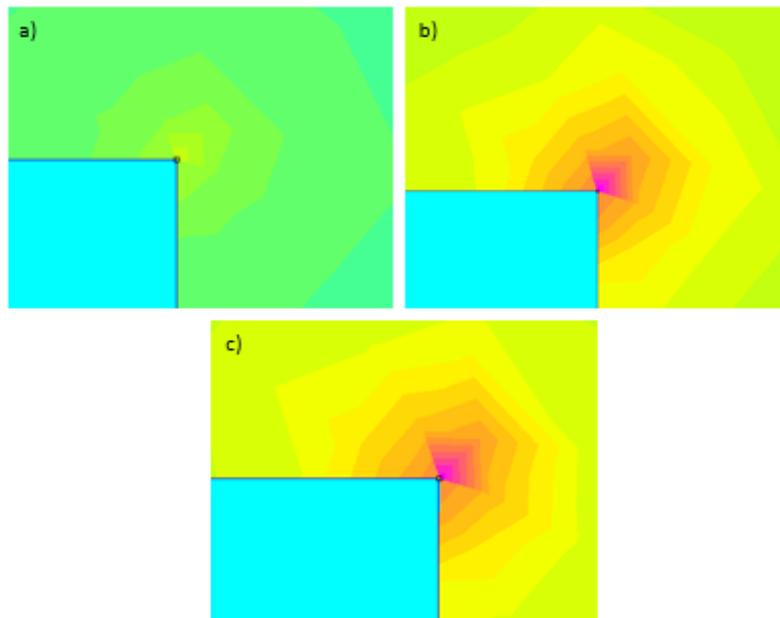


Figura 89: Zoom de la distribución del campo eléctrico en la esquina superior derecha más crítica de cada ejemplo de aislador: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

ZONA INFERIOR

El aislador cumple las leyes de simetría y por ello la parte derecha es igual a la parte izquierda, por ello en la Figura 90 se ha representado la zona inferior derecha del aislador.

Aquí ocurre algo curioso, que no ocurriría en la zona superior, y es que las zonas críticas varían entre las diferentes fronteras entre las diferentes capas aislantes del aislador.

En la parte superior la zona crítica siempre cumplía que su localización se situaba en la primera capa aislante, en el caso a) y c) de la Figura 89 correspondía al cemento y en el caso b) a la porcelana. Pero en la parte inferior no ocurre esto.

En la parte inferior la zona crítica no cumple ninguna similitud entre los diferentes aisladores analizados.

En el caso de que el aislador posea todas las capas de aislante (caso a) de la Figura 90) la zona crítica se localiza en la esquina que separa la capa de porcelana y la segunda capa de cemento. El valor más elevado es $2,030 \text{ e}6 \text{ V/m}$.

Si se elimina la primera capa de cemento (caso b) de la Figura 90) la distribución del campo eléctrico es muy diferente a la del caso a), además la localización de la zona también cambia, ahora dicha zona se sitúa en el contorno exterior del aislante, es decir en la esquina del acero galvanizado que está en contacto con el aire. El valor más crítico es $1,048 \text{ e}6 \text{ V/m}$.

Si la capa que se suprime es la de porcelana (caso c) en la Figura 90) la distribución del campo eléctrico es similar a la que se producía en el caso a), situándose la zona crítica en la esquina de la frontera que separa la capa de cemento y de la del acero galvanizado. En este supuesto el valor más alto de la tensión alcanzado corresponde a $1,329 \text{ e}6 \text{ V/m}$.

En la Figura 91 se muestra un zoom de las zonas analizadas anteriormente, donde se visualizan mejor los resultados obtenidos.

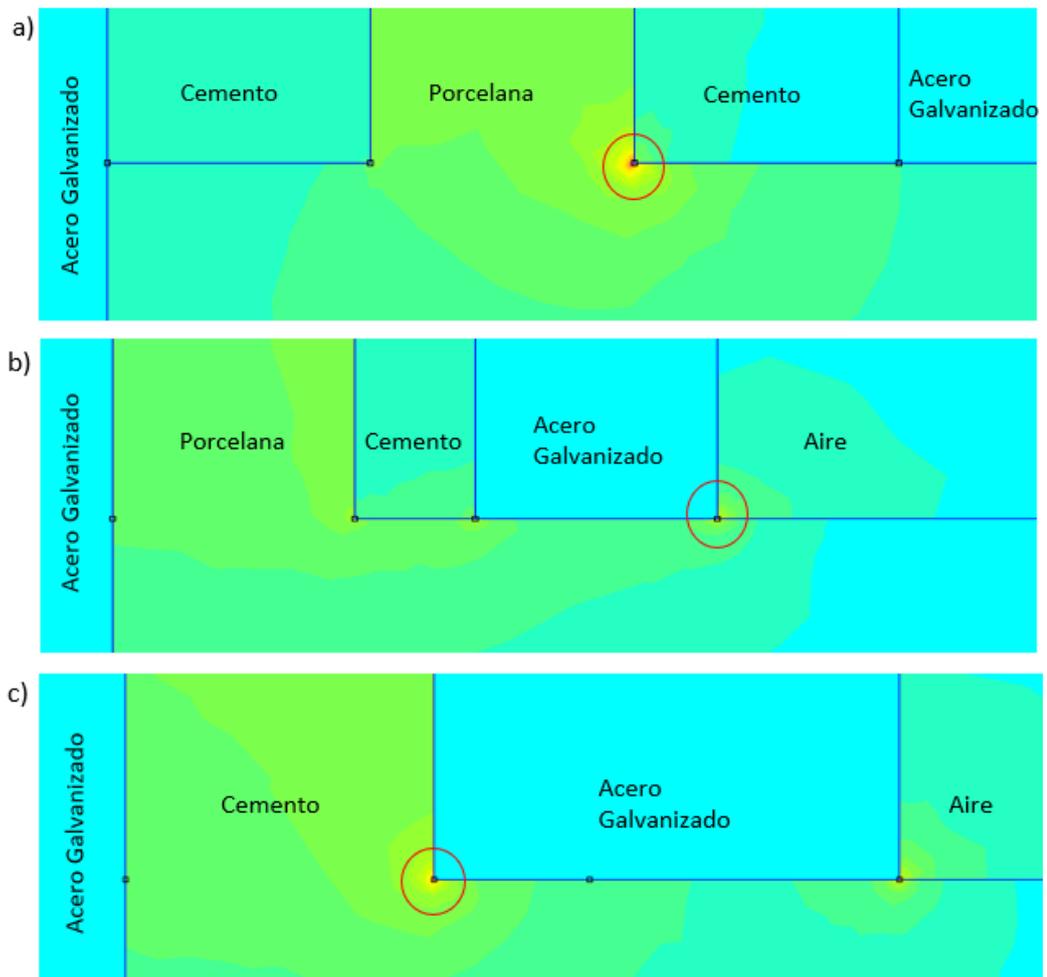


Figura 90: Comparación de la distribución del campo eléctrico en la esquina inferior más crítica: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

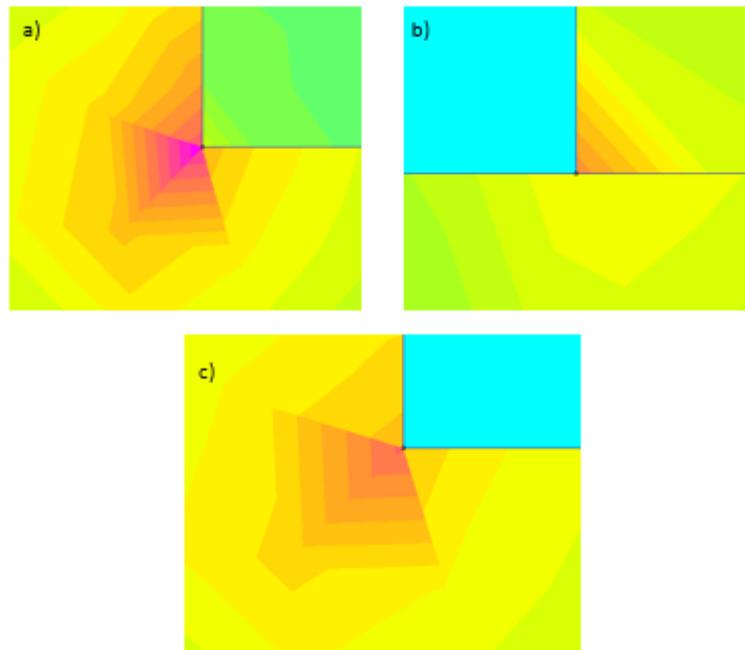


Figura 91: Zoom de la distribución del campo eléctrico en la esquina inferior más crítica de cada ejemplo de aislador: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador sin la primera capa de cemento, c) aislador sin la capa de porcelana
(Fuente: Elaboración propia)

GRÁFICA DEL CAMPO ELÉCTRICO

Igual que se ha mostrado en el análisis de los ejemplos anteriores, en la Figura 92 se representa la gráfica de la distribución del campo eléctrico en la parte central del aislador. Se observa que en la zona central dicha distribución es más uniforme que en los casos anteriores, no presenta ningún escalón, esto es debido a que el campo eléctrico no tiene que atravesar diferentes capas de material aislante, lo que ocurría en el resto de ejemplos.

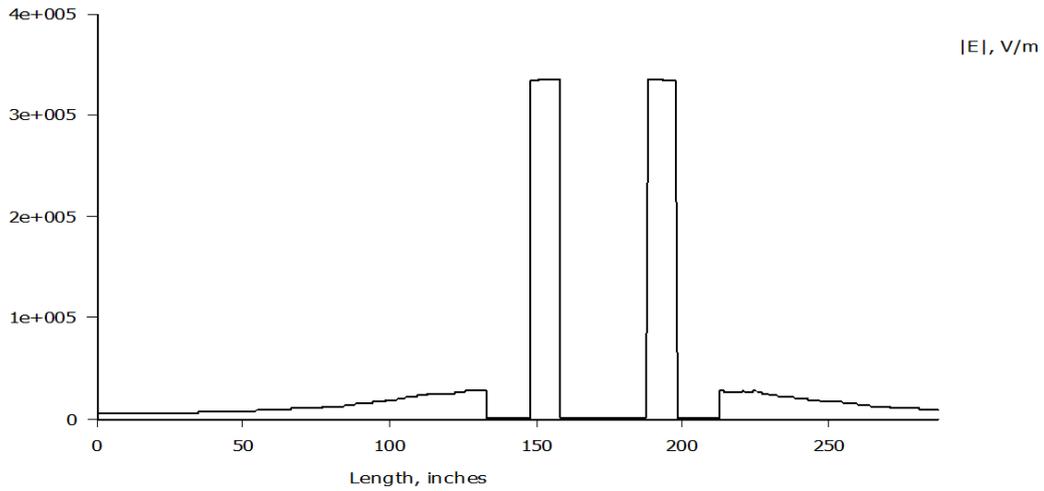


Figura 92: Gráfica de la distribución de campo eléctrico en el aislador sin la capa de porcelana (Fuente: Elaboración propia)

7.4 Aislador U100BLP

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES

Para finalizar se analiza el aislador U100BLP con la geometría real. Este aislador posee una geometría más elaborada, en la que se destacan las esquinas redondeadas y las formas curvas de la parte inferior. También es importante resaltar las líneas inclinadas de los contornos exteriores.

En la Figura 93 se muestra la distribución de tensiones en dicho aislador.

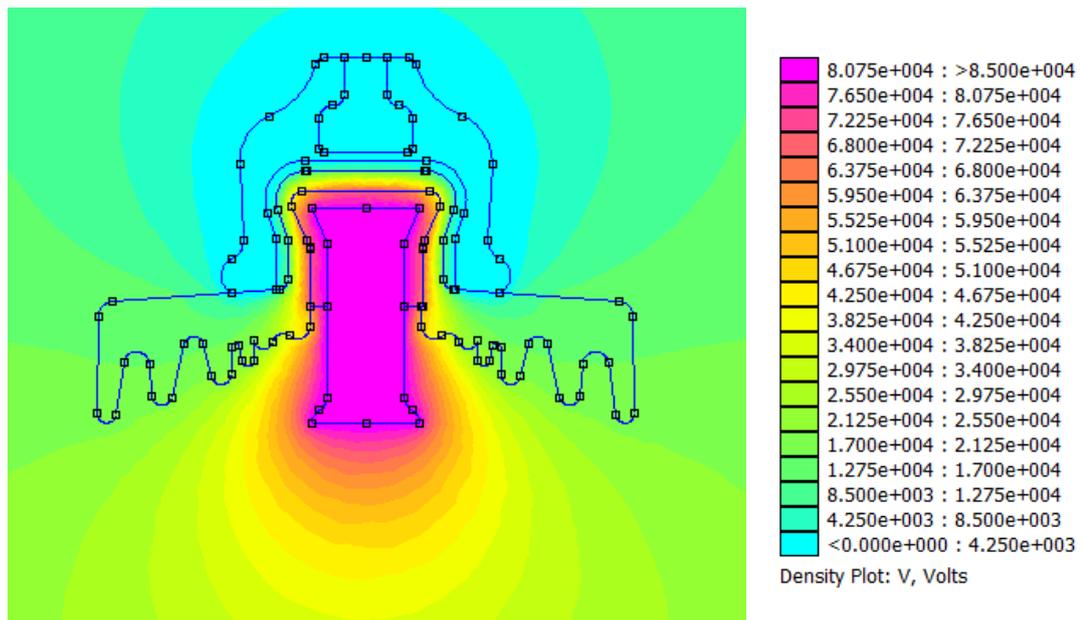


Figura 93: Distribución de tensiones en el aislador U100 BLP (Fuente: Elaboración propia)

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para analizar de manera más óptima la distribución de tensiones obtenida, se comparan, a continuación, los resultados obtenidos en el aislador real con los producidos en el caso del modelo con geometría simplificada, de simplificar la geometría, el cual carecía de curvas y líneas inclinadas.

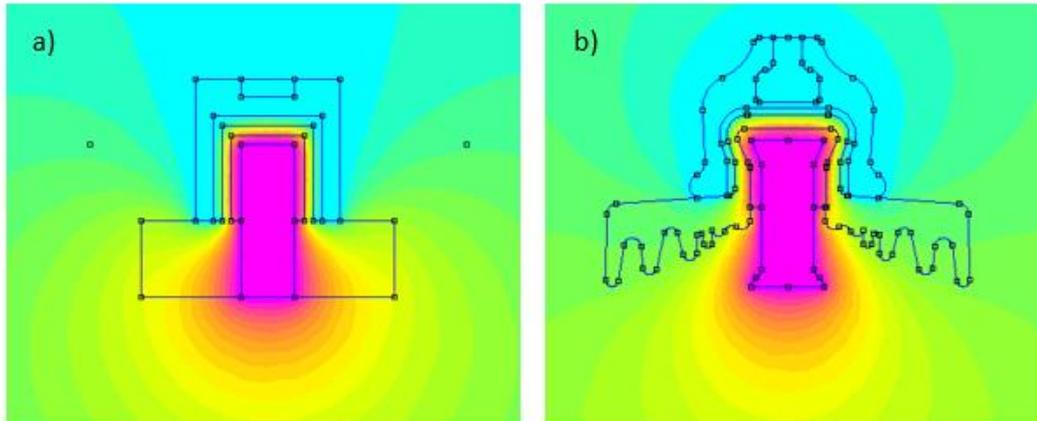


Figura 94: Comparación de los resultados de la distribución de tensión: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador real
(Fuente: Elaboración propia)

En el caso a) donde se ha simplificado bastante la geometría, se ha supuesto que el material aislante está en contacto con el material conductor, originando que dicho material, la porcelana, llegue a alcanzar valores de tensión bastante elevados. En el aislador real, caso b), se observa como esta suposición es totalmente errónea, ya que, de no ser así, el material aislante en esta zona sufriría bastante, llegando incluso a pasar de aislante a material conductor. Por este motivo los aisladores se diseñan evitando que la superficie conductora esté en contacto en su totalidad por un material aislante (véase Figura 60).

CAMPO ELÉCTRICO

Si se analiza cómo se distribuye el campo eléctrico en el aislador real, la simulación obtenida es la siguiente:

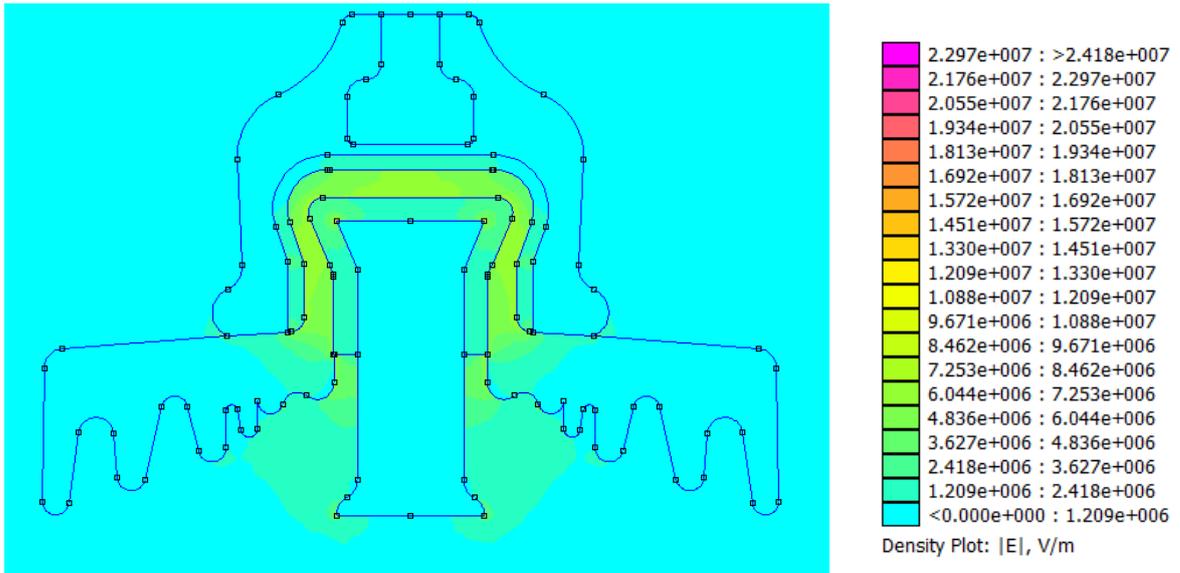


Figura 95: Distribución del campo eléctrico en el aislador U100BLP
(Fuente: Elaboración propia)

Al realizar el diseño y fabricación del aislador con la geometría curva se han conseguido disminuir las zonas críticas.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Cabe destacar que el valor más alto del campo eléctrico, con respecto al modelo del aislador de geometría simplificada, ha aumentado. En la leyenda mostrada en la Figura 95 se observa que el valor más alto está en $2,418 \text{ e}07 \text{ V/m}$, mientras que el valor más alto alcanzado en el aislador con geometría simplificada es de $2,030 \text{ e}06 \text{ V/m}$ (puede verse en la leyenda de la Figura 70). Esto es debido al diseño del material conductor, éste posee un pico en la parte superior, lo que origina una esquina bastante pronunciada, la cual forma una zona bastante crítica en el aislador real, aumentando de esta forma el valor del campo eléctrico en esta zona.

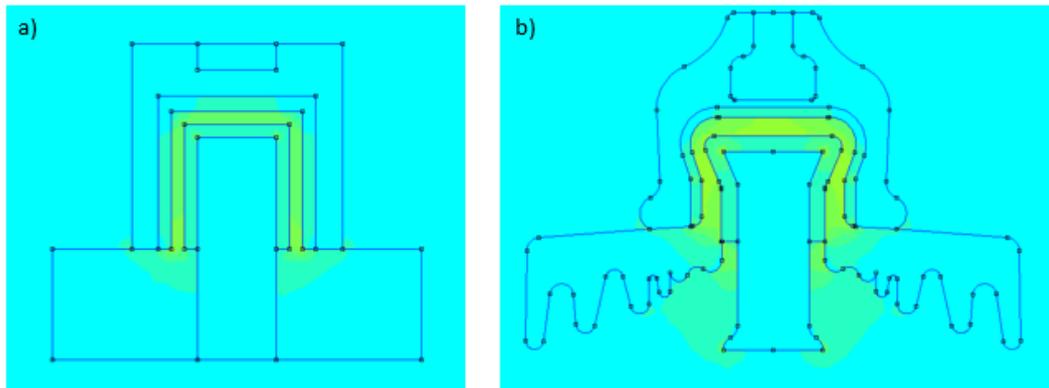


Figura 96: Comparación de la distribución del campo eléctrico: a) aislador con la geometría simplificada, b) aislador real
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 97 se puede observar cómo se distribuye el campo eléctrico en la zona de la esquina superior del aislador real, observando cómo en dicha zona el campo eléctrico posee valores bastante elevados.



Figura 97: Zoom de la zona crítica en la distribución del campo eléctrico en el aislador real
(Fuente: Elaboración propia)

7.5. Aislador en La Palma

Hasta ahora se ha estudiado la influencia que presentan los factores de diseño (eliminando diferentes capas de aislante) en la distribución de la tensión y del campo eléctrico, pero otro de los factores importantes a tener en cuenta en el estudio de los aislantes, son los atmosféricos, los cuales son más difíciles de predecir.

Como consecuencia de que el pasado día 19 de septiembre de 2021 se inició, en la isla de la Palma (Canarias), una erupción volcánica [45], la cual ha seguido activa hasta el día 13 de diciembre, se pretende analizar la influencia

de la contaminación ambiental en los aisladores en zonas de erupción volcánica.

Este acontecimiento está tendiendo consecuencias peligrosas para los aisladores eléctricos debido a la emisión de ceniza.

La ceniza volcánica es un contaminante natural compuesto de partículas no solubles y sales solubles.

Cuando la ceniza está seca no es un buen conductor eléctrico, pero en presencia de humedad sus sales son disueltas, formando un compuesto conductivo que al depositarse sobre los aisladores puede afectar su calidad como dieléctrico.

Por este motivo, en este epígrafe se pretende determinar el impacto que tiene la ceniza del volcán de la Palma sobre el aislamiento eléctrico de los aisladores, más en concreto, sobre el aislador de estudio de este trabajo, el U100BLP, de manera que los resultados obtenidos hasta ahora se puedan comparar con los que se obtendrán en este estudio.

El objetivo del presente trabajo es el análisis de la distribución de la tensión y del campo eléctrico cuando se modifican las condiciones atmosféricas.

Debido a que el ambiente en La Palma se caracteriza, en la zona de la erupción, por ser un clima húmedo, y que la condición que más preocupaba a los meteorólogos de la zona durante este periodo de erupción son las precipitaciones en forma de lluvia, se ha realizado una búsqueda de las permeabilidades en estas dos condiciones. Ambos valores se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10: Valores de la permitividad en ambientes contaminados

MATERIAL	PERMITIVIDAD
Contaminación ambiental (zonas húmedas)	10
Contaminación ambiental (zonas lluviosas)	50

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES

En la Figura 98 y en la Figura 99 se muestran las distribuciones de tensiones teniendo en cuenta que el aislador se localiza en una zona con contaminación ambiental lluviosa, es decir el valor de la permitividad es de 10 y en una zona húmeda, con valor de la constante dieléctrica de 50, respectivamente.

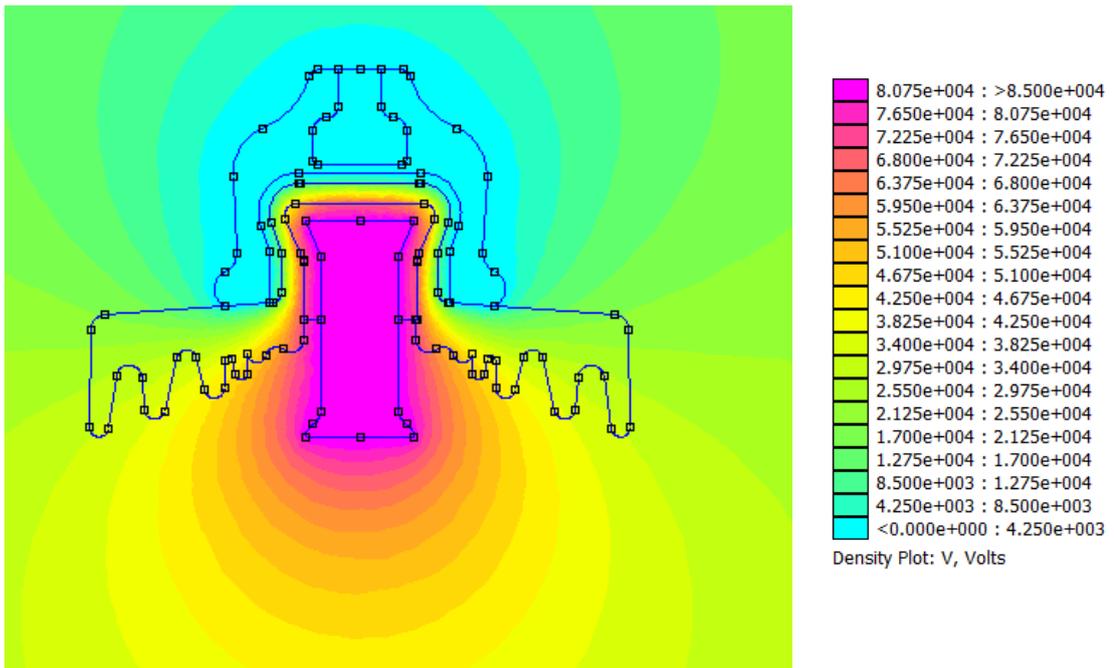


Figura 98: Distribución de tensiones en el aislador real con contaminación ambiental en zona húmeda
(Fuente: Elaboración propia)

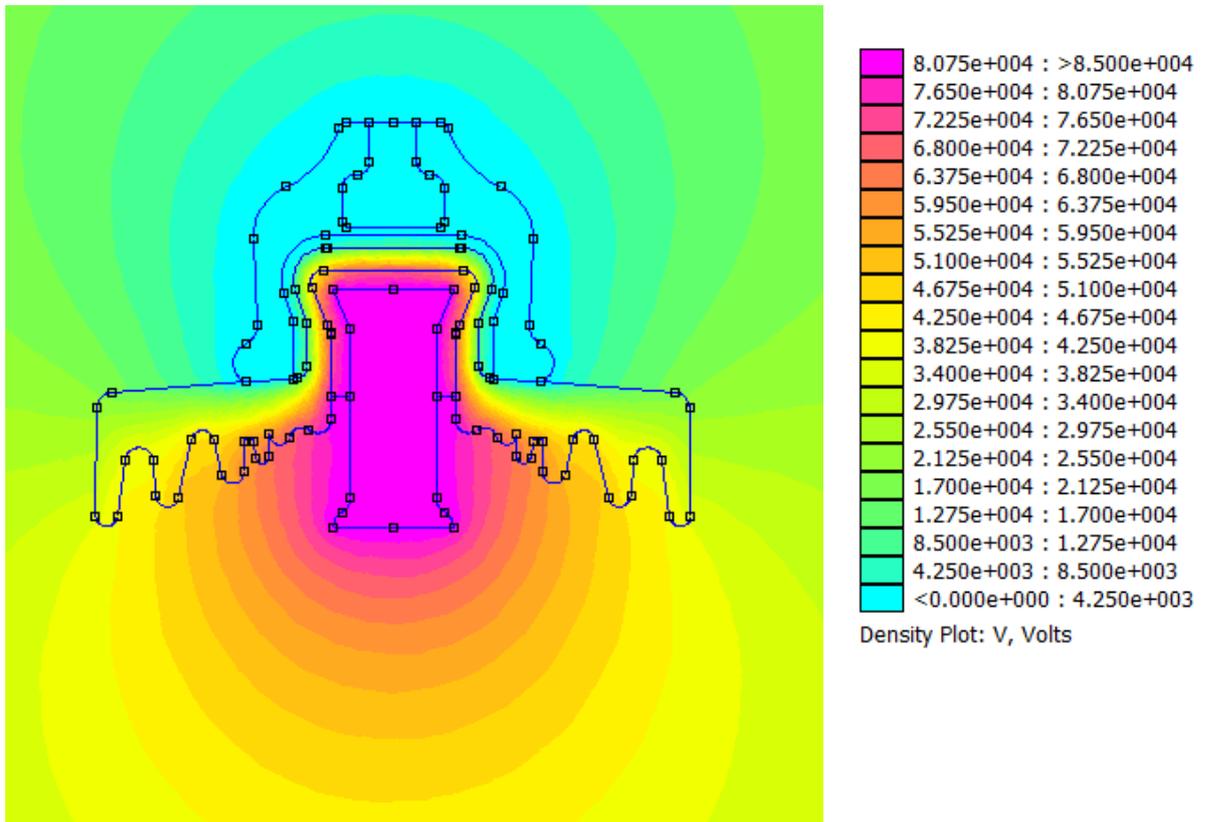


Figura 99: Distribución de tensiones en el aislador real con contaminación ambiental en zona lluviosa
(Fuente: Elaboración propia)

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 100 se muestra una comparación de los resultados que se han obtenido hasta el momento, en el caso a) se muestra al aislador U100BLP en condiciones ambientales normales, cuyo valor de la permitividad es de 10. En el caso b) las condiciones ambientales se han modificado, ahora el aislador se localiza en una zona húmeda que presenta contaminación ambiental y en el caso c) se representa al aislador U100BLP situado en una zona lluviosa con contaminación ambiental.

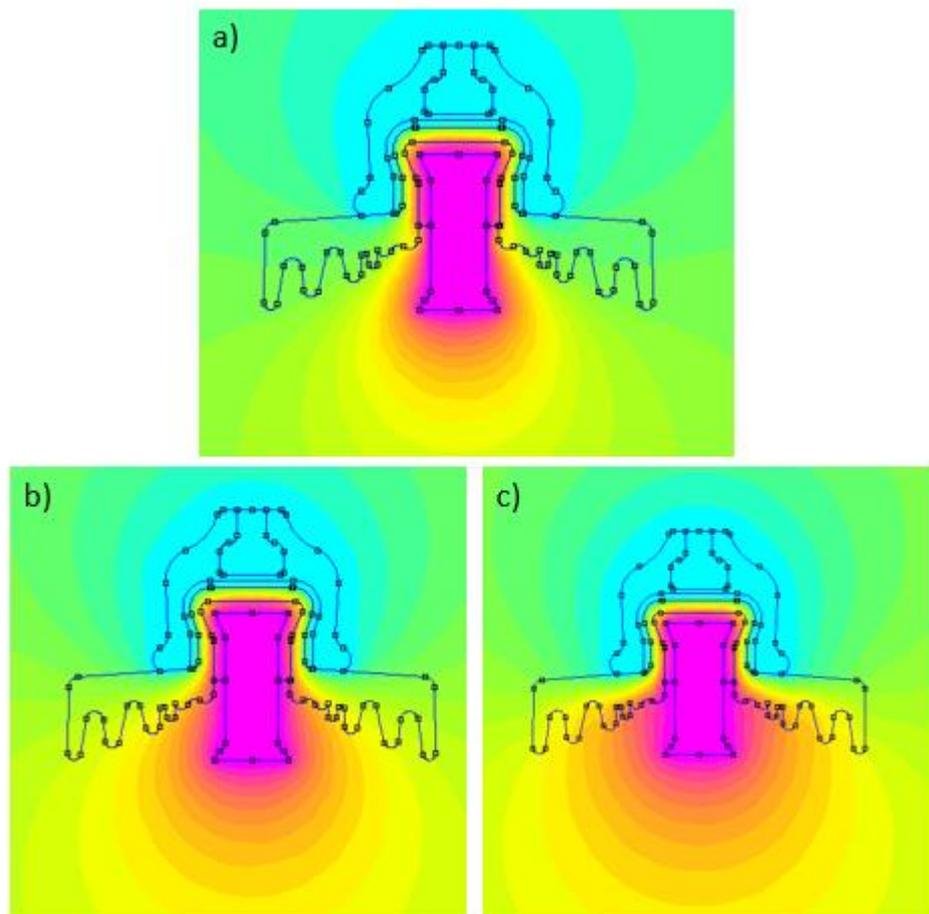


Figura 100: Comparación de los resultados en la distribución de tensiones en el aislador U100BLP: a) aire puro, b) contaminación en zona húmeda, c) contaminación en zona de lluvia
(Fuente: Elaboración propia)

Las diferencias entre ambos casos son bastante claras. Que el aislador se localice en una zona atmosférica contaminada, como puede ser el caso actual en La Palma, hace que se produzca una perturbación en la distribución de tensión generada por el efecto del contaminante. Se puede observar cómo en el caso de que en la zona de estudio existan lluvias, esta perturbación tenga aún un mayor alcance, produciendo que se disminuya el efecto aislante. Esto

es debido a que las lluvias junto con la contaminación forman una cadena conductora. Cabe destacar que el efecto solamente de las lluvias, en la mayoría de los casos, actúa como agente de limpieza del aislante.

CAMPO ELÉCTRICO

Como se ha ido realizando a lo largo del trabajo, el siguiente parámetro de análisis es el campo eléctrico y su correspondiente distribución.

En la Figura 101 se representa la simulación obtenida de la distribución del campo eléctrico en el aislador U100BLP, el cual se encuentra en una zona húmeda con contaminación atmosférica.

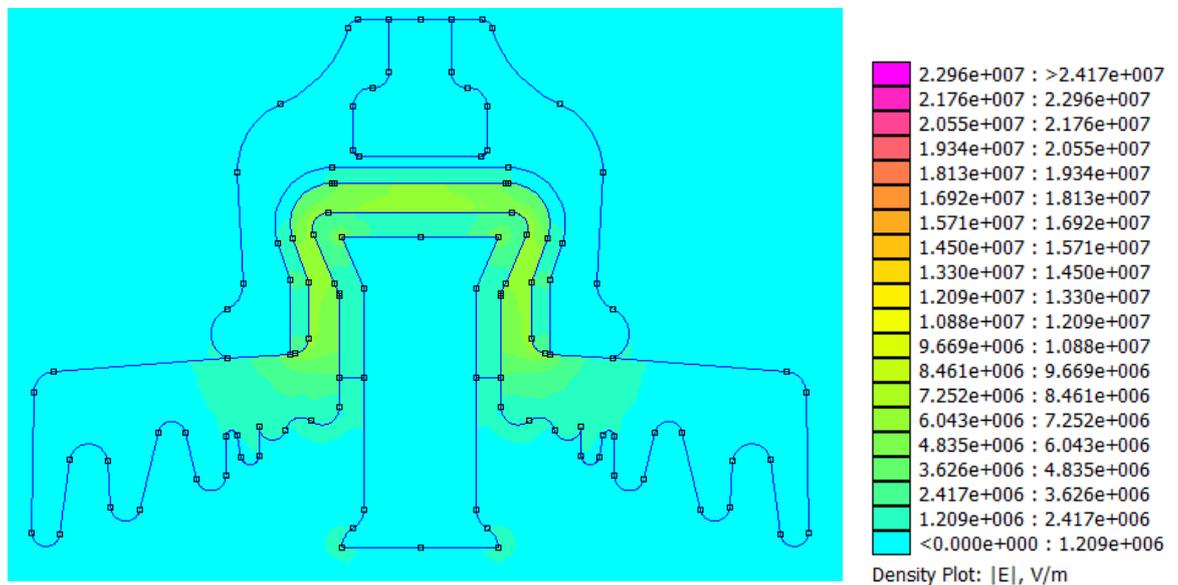


Figura 101: Distribución del campo eléctrico en el aislador localizado en una zona húmeda con contaminación atmosférica
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 102 se muestra la distribución del campo eléctrico en el aislador U100BLP, ahora se ha supuesto que este aislador se localiza en una zona lluviosa con contaminación atmosférica.

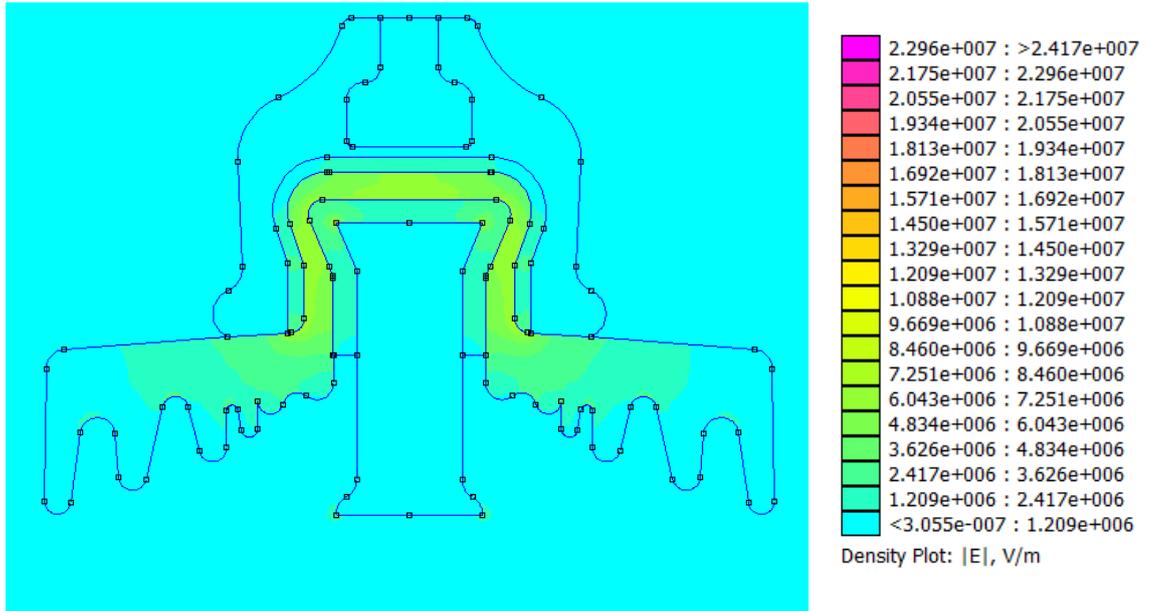


Figura 102: Distribución del campo eléctrico en el aislador localizado en una zona lluviosa con contaminación atmosférica
(Fuente: Elaboración propia)

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para visualizar de manera más clara todas las hipótesis que se han planteado, y así realizar un mejor análisis de los resultados, en la Figura 103 se representan todas ellas.

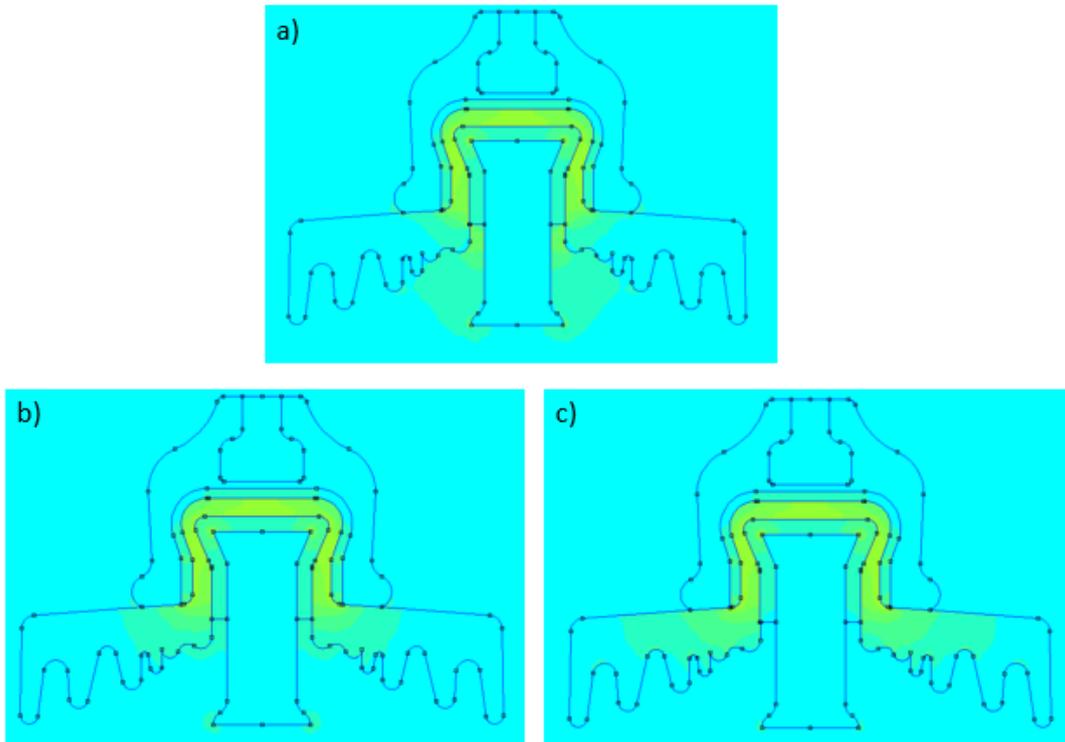


Figura 103: Comparación de los resultados en la distribución del campo eléctrico en el aislador U100BLP: a) aire puro, b) contaminación en zona húmeda, c) contaminación en zona de lluvia
(Fuente: Elaboración propia)

Los puntos críticos del campo eléctrico no han cambiado, debido a que dichos puntos eran consecuencia del diseño del aislador, es decir, no dependen de factores externos.

En cuanto a la forma que toma la distribución del campo eléctrico sí presenta diferencias, el efecto de que el aislador se sitúe en una zona contaminada hace que el campo eléctrico se distribuya sobre la capa aislante exterior de manera proporcional al nivel de contaminación, haciendo que la capa aislante exterior quede más expuesta a posibles fallos, y disminución de su vida útil como material aislante.

7.6 Repercusiones de seguridad de los ejemplos analizados

Una vez realizado el análisis y comparando los resultados obtenidos en cada ejemplo estudiado, se concluye dicho estudio destacando que:



- Si se desea una mayor seguridad, y por lo tanto una mayor eficiencia del aislador, es necesario realizar un buen diseño de la geometría y de la disposición de las capas de material aislante.
- Es importante, sobre todo en zonas de altos niveles de contaminación, realizar un mantenimiento periódico de los materiales aislantes, asegurando de esta manera que se cumplen con los requerimientos de seguridad establecidos.
- Cabe destacar que un fallo de seguridad detectado en los aislantes que constituyen a un aislador puede ocasionar graves problemas de seguridad, debido a las altas tensiones a las que son sometidos.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

- El material aislante que más esfuerzo dieléctrico soporta es el que posee la menor permitividad relativa ϵ_r (en el caso de este estudio, la porcelana). Si, además, dicho material posee una rigidez dieléctrica más baja que el resto de materiales aislantes utilizados en el dispositivo eléctrico, este material tiene mayor probabilidad de perforarse primero.
- Es importante a la hora de realizar un estudio sobre los materiales aislantes, tener en cuenta, no solo las propiedades físicas (dieléctricas, químicas, mecánicas...), sino también la forma, es decir el diseño, del material aislante.
- Las condiciones atmosféricas influyen, en gran medida, en la capacidad aislante. La distribución de las tensiones en condiciones atmosféricas perjudiciales (lluvia, niebla, polución...) es más desfavorable que en condiciones atmosféricas normales, lo que podría producir una falla en el aislador de estudio.
- El software FEMM, para el estudio realizado, ha cumplido con los requerimientos que se buscaban. Se trata de un programa fácil de entender y de utilizar, gracias a que posee unas barras de herramientas muy visuales. Otra de las ventajas de FEMM es que, aunque no tiene herramientas de dibujo potentes, permite importar la geometría de un programa de CAD, y así permitir el análisis de geometrías complejas.
- Los resultados obtenidos en este trabajo se pueden utilizar para entender el efecto de las tensiones y del campo eléctrico sobre los aislamientos eléctricos, y determinar el diseño óptimo de su geometría.
- Este trabajo puede servir de ayuda para introducir el estudio de los aislamientos eléctricos en asignaturas de ingeniería tales como Máquinas Eléctricas y Física.





CAPÍTULO 9: BIBLIOGRAFÍA

[1] Fraile Mora, J. (2003). *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.

[2] Carrión Jaura, R.D. (2016). *Comprobación del estado del aislamiento en máquinas eléctricas rotativas mediante la aplicación de ensayos offline*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/415356250/CARRION-COMPROBACION-DEL-ESTADO-DEL-AISLAMIENTO-EN-MAQUINAS-ELECTRICAS-ROTATIVAS-MEDIANTE-LA-AP-pdf>

[3] Evaldo Kuchenbecker, W. (2021). Criterios para la evaluar el aislamiento en máquinas eléctricas rotativas. *Revista PQ*, 1254, 72-73. Recuperado de: <https://www.revistapq.com/file/download/15304>

[4] Rosmelbys, A.; Pérez, J. y Bastidas, E (s.d.). *Máquinas eléctricas rotativas y estáticas*. Recuperado de:

<https://es.scribd.com/document/304028279/Tipos-de-Fallas-Comunes-en-Maquinas-Electricas-Rotativas-y-Estaticas>

[5] Guía de la medición de aislamiento (Ed. 01). (2010). *Chauvin Arnpux Group*. Recuperado de:

https://www.chauvinarnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_aislamiento.pdf

[6] *¿Por qué y dónde ocurren las fallas más comunes de los transformadores?* (s.d). [consulta: 2 de noviembre]. Recuperado del sitio web: <https://www.electricaplicada.com/porque-y-donde-ocurren-las-fallas-mas-comunes-de-los-transformadores/>

[7] Torres Sánchez, H. (2011). *Aislamientos eléctricos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

[8] Murillo Nisperuza, D. (2012). *Estudio valorativo del estado de aislamiento en los motores eléctricos e implementación del programa de mantenimiento preventivo en la empresa Vopak*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de la Costa. Recuperado

de: <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/1307/ESTUDIO%20VALORATIVO%20DEL%20ESTADO%20DE%20AISLAMIENTO%20EN%20LOS%20MOTORES%20EL%20ELECTRICOS%20E%20IMPLEMENTACION%20DEL%20PROGRAMA%20DE%20MANTENIMIENTO%20PREVENTIVO%20EN%20LA%20EMPRESA%20VOPAK.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [9] Macarro García, P. (2013-2014). *Modelado y simulación del circuito magnético de máquinas síncronas de imanes permanentes*. Trabajo de Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla. Recuperado de: <https://docplayer.es/31943336-Modelado-y-simulacion-del-circuito-magnetico-de-maquinas-sincronas-de-iman-permanentes.html>
- [10] García Lameiras, A. (2016-2017). *Aplicación del método de los elementos finitos en 3D al diseño del circuito magnético de un transformador de potencia y comparación con el diseño basado en herramientas en 2D*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76710/78941515_TFM_14_817166024692806506309180839988.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [11] Villanueva Hernández, H.D. (2007). *Obtención de parámetros en transformadores mediante elementos finitos usando ANSYS*. Tesis Doctoral. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Recuperado de: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_U_MICH/3409/FIE-M-2007-0028.pdf?sequence=1
- [12] Nápoles Padrón, E.; González Carbonell, R. y Olivares Díaz, E (s.d). *Una introducción al análisis por elementos finitos: aplicaciones y ejemplos*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Raide-Gonzalez-Carbonell/publication/283151622_Una_introduccion_al_Analisis_por_Elementos_Finitos_aplicaciones_y_ejemplos/links/595a83e145851511773d2b04/Una-introduccion-al-Analisis-por-Elementos-Finitos-aplicaciones-y-ejemplos.pdf
- [13] Torán Zorrilla, F. (2015). *Cálculo de máquinas eléctricas por elementos finitos*. Proyecto Final de Grado. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj-8ebv1pP1AhUPxBQKHQ0TA9UQFnoECAYQAQ&url=https%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fbitstream%2Fhandle%2F2117%2F88721%2Ffermin.toran_105600.pdf&usg=AOvVaw2ffXycUu0lo2iAFulsbTkH
- [14] Asociación Española de Normalización: UNE [consulta: 25 de noviembre de 2021]. Recuperado del sitio web de la UNE: <https://www.une.org/Buscador>
- [15] Rodríguez Pozueta, M.A. (2015). *Aislantes y conductores utilizados en las máquinas eléctricas*. Universidad de Cantabria.
- [16] *Aislamientos de las máquinas eléctricas* [consulta: 11 de octubre de 2021] Recuperado de: <https://www.inducor.com.ar/academicos/calculo-de-maquinas-electricas/maquinas-electricas-apendice4.html>.

[17] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN IEC 60664-1:2021. *Coordinación de aislamiento de los equipos en los sistemas (redes) de baja tensión. Parte 1: Principios, requisitos y ensayos*. Madrid: AENOR, 2021. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0065347>

[18] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 62068:2013. *Materiales y sistemas de aislamiento eléctrico. Método general de evaluación de la endurance eléctrica producido por impulsos de tensión repetitivos*. (Ratificada por AENOR en noviembre de 2013). Madrid: AENOR, 2013. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0051940>

[19] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN IEC 60071-2:2018. *Coordinación de aislamiento. Parte 2: Guía de aplicación*. Madrid: AENOR, 2018. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060703>

[20] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN IEC 60664-3:2018. *Coordinación de aislamiento de los equipos en los sistemas (redes) de baja tensión. Parte 3: Uso de revestimiento, encapsulado o modelado para la protección contra la contaminación*. Madrid: AENOR, 2018. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059744>

[21] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN IEC 60505:2011/AC:2017-03 (Ratificada). *Evaluación y calificación de los sistemas de aislamiento eléctrico*. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en mayo de 2017). Madrid: AENOR, 2017. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058135>

[22] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 60085:2008. *Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica*. Madrid: AENOR, 2008. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0041242>

[23] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 60034-18-1:2010 (Ratificada). *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 18-1: Evaluación funcional de los sistemas de aislamiento. Principios directores generales*. (Ratificada por AENOR en octubre de 2011). Madrid: AENOR, 2010. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0047926>

- [24] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 60034-18-42:2017/A1:2020 (Ratificada). *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 18-42: Sistemas de aislamiento eléctrico resistentes a las descargas parciales (Tipo II) usados en máquinas eléctricas rotativas alimentadas por convertidores de tensión. Ensayos de calificación.* (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en noviembre de 2020). Madrid: AENOR, 2020. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0064762>
- [25] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 60034-27-4:2018 (Ratificada). *Máquinas eléctricas rotativas. Parte 27-4: Medida de la resistencia de aislamiento del devanado de las máquinas eléctricas rotativas.* (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en noviembre de 2018). Madrid: AENOR, 2018. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060390>
- [26] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 60076-3:2014/A1:2018. *Transformadores de potencia. Parte 3: Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancias de aislamiento en el aire.* Madrid: AENOR, 2018. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060590>
- [27] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE-EN 60137:2018. *Aisladores pasantes para tensiones alternas superiores a 1000 V.* Madrid: AENOR, 2018. Recuperado de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060434>
- [28] *Clases de Aislamiento – Materiales Aislantes* (2013). Recuperado de: <https://hackm365.com/x/manuales/El-aislamiento-utilizado-deberia-ser-F-o-H.pdf>
- [29] Ríos Gutiérrez, A. (2021) *Prueba de índice de polarización en transformadores eléctricos.* [consulta: 2 de diciembre de 2021]. Recuperado de: <https://transequipos.com/prueba-de-indice-de-polarizacion-en-trasformadores-electricos/>
- [30] Garita Gómez, J. (2021). *Medición de resistencia de aislamiento en motores eléctricos, aplicación a las bombas centrífugas.* [consulta el 3 de diciembre de 2021]. Recuperado de: <https://www.vyphidroasesores.com/medicion-de-resistencia-de-aislamiento-en-motores-electricos-aplicacion-a-las-bombas-centrifugas/>
- [31] Finite Element Method Magnetics (2015). Versión 4.2. Recuperado de: <https://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>

- [32] Fías Valero, E. (2004). *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93606/01Efv01de23.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [33] Palma García, M.T. (2019). *Análisis del motor de inducción utilizando elementos finitos*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/18138>
- [34] Criollo Caiza, D.E y Polo Soria, K.E. (2017). *Diseño y análisis paramétrico de Máquinas Síncronas de Excitación Híbrida mediante el Método de Elementos Finitos en dos dimensiones*. Trabajo de Fin de Grado. Escuela politécnica Nacional. Recuperado de: http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/VirtualDirectories/80/JIEE/historial/XXVII/Contenido/MEMORIAS_XXVII-173-180.pdf
- [35] Cortés, C.A.; Deprez, W.; Driesen, J. y Pére, J.J. (2008). Determinación de pérdidas eléctricas en motores de inducción modelados electromagnéticamente con el método de los elementos finitos. *Ingeniería e Investigación*. Vol. 28. Número 3, 64-74. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v28n3/v28n3a09.pdf>
- [36] Oslinger, J.L y Almonacid, O.A. (s.d). *Simulación mediante el método de los elementos finitos de una máquina asíncrona lineal de flujo transversal*. Grupo de Investigación en Conversión de Energía CONVERGÍA. Universidad del Valle. Recuperado de: <https://docplayer.es/42319791-Simulacion-mediante-el-metodo-de-los-elementos-finitos-de-una-maquina-asincrona-lineal-de-flujo-transversal.html>
- [37] Gómez Lázaro, E. (2000). *Modelización mediante el método de los elementos finitos de transformadores trifásicos de potencia*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=8954>
- [38] Roger Folch, J. (1992) *Contribución al estudio del calentamiento de las máquinas eléctricas rotativas mediante el método de los elementos finitos. Aplicación a la máquina de inducción*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=234175>
- [39] Usón Sardaña, A. (2007). *Aplicación del método de elementos finitos (M.E.F) al perfeccionamiento de pinzas amperimétricas*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Recuperado de: <https://zagan.unizar.es/record/1912?ln=es>



- [40] Acosta Santos, A. (2017). *Estudio y simulación mediante software de elementos finitos (FEMM) de un motor síncrono de imanes permanentes sin escobillas*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de Sevilla. Recuperado de: <https://idus.us.es/handle/11441/75104>
- [41] Churchill, R.V et al. (1976). *Complex Variables and Applications*. McGraw-Hill Book Company.
- [42] LaGranjaInsulators. *Catálogo de Aisladores*. Segovia. [consulta:14 de diciembre]. Recuperado de: <https://cigre.es/wp-content/uploads/2020/11/04-Full-Catalogue-LaGranjaInsulators-ES-EN-2019-low.pdf>
- [43] Corrales Martín, J. (1975). *Calculo Industrial de Máquinas Eléctricas. Tomo I*. Barcelona: Alfonso XII.
- [44] Ramírez, J.; Cabezas, K.; Jiménez, P.; Canelos, R. y Escobar, B. (2020). Cálculo de la distribución de voltajes en las cadenas de aisladores de una línea de transmisión de 500 kV utilizando el método de los elementos finitos. *Enfoque UTE*, vol. 11, núm 3, pp. 1-14. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/5722/572263177001/html/>
- [45] Instituto Geográfico Nacional (IGN). *Erupción en la isla de La Palma*. Recuperado de: <https://www.ign.es/web/vlc-serie-palma>