



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**Estudio y detección de defectos en piezas de silicona
para su uso como aislamiento en alta tensión**

Autor:

Mateos Fernández, Alberto

Tutor:

**Serrano Sanz, José Andrés
Dpto. de Ingeniería Eléctrica**

Valladolid, mayo 2022.



AGRADECIMIENTOS

A mis padres por apoyarme y brindarme la educación para llegar hasta aquí.

A mi familia y amigos por estar siempre ahí.

Y a Vulcanizados Industriales Álvarez S.L. por ofrecerme esta oportunidad,
confiar en mí y ayudarme en mi incorporación al mundo laboral.

A todos, muchas gracias.



RESUMEN

La silicona ha alcanzado un puesto de relevancia como material para aislamientos eléctricos. Esta permite crear piezas complejas con las que lograr un control efectivo de los elevados campos eléctricos generados por la alta tensión.

Durante el proceso de fabricación de estas piezas, es posible que se produzcan defectos que pueden o no afectar a su desempeño como aislante. Estas imperfecciones pueden ir desde un leve problema visual hasta una perforación inmediata del aislante al verse sometido a tensión. Es por ello que conocer cómo se comportan estos defectos y cómo se pueden detectar es fundamental.

La gravedad del defecto viene en gran medida caracterizada por la interacción de este con el campo eléctrico. El cálculo de esta magnitud física es complejo de realizar analíticamente cuando la geometría del problema deja de ser simple. Por ello, un software de simulación de elementos finitos es una herramienta ventajosa para el estudio.

PALABRAS CLAVE

- Aislamiento
- Silicona
- Defecto
- Campo eléctrico
- Descargas parciales



ABSTRACT

Silicone has reached a relevant place as an electrical insulation material. It allows the conformation of complex pieces with which an effective control of the high electrical fields generated by high voltage can be achieved.

During the manufacturing process of these pieces, defects which may or may not affect to their performance as insulator might take place. These flaws can go from a mild visual imperfection to an immediate rupturing of the insulation when brought under voltage. This is why acknowledging how they behave and how can they be detected is key.

The severity of the defect is mostly characterised by its interaction with the electric field. The analitical calculation of this magnitude becomes a complex task when the geometry of the problem ceases to be simple. Consequently, a finite element simulation software is an advantageous tool for its study.

KEYWORDS

- Insulation
- Silicone
- Defect
- Electric field
- Partial discharges



ÍNDICE

Agradecimientos	A
Resumen.....	C
Palabras Clave	C
Abstract.....	E
Keywords.....	E
Índice de figuras	I
1 Introducción y objetivos.....	1
2 La silicona como aislante eléctrico	3
2.1 Estructura de las siliconas.....	3
2.2 Tipos de siliconas	4
2.3 Propiedades de la silicona como aislante eléctrico.....	5
2.3.1 Propiedades térmicas.....	5
2.3.2 Propiedades mecánicas	5
2.3.3 Propiedades químicas	6
2.3.4 Propiedades eléctricas	6
2.4 Los aislamientos de silicona en el mercado	8
3 Descargas parciales	9
3.1 Tipos de descargas parciales	10
3.1.1 Descargas de corona	10
3.1.2 Descargas superficiales.....	11
3.1.3 Descargas internas	11
3.2 Deterioro producido por descargas parciales	11
3.2.1 Deterioro por descargas de corona	11
3.2.2 Deterioro por descargas superficiales.....	12
3.2.3 Deterioro por descargas internas	13
3.3 Detección de descargas parciales	13
3.3.1 Modelo de descargas parciales	14
3.3.2 Medida de descargas parciales	16
3.3.3 Identificación de descargas parciales	22
4 Introducción a femm 4.2	25
4.1 Ejemplo de campo electrostático.....	26
4.1.1 Creación de un nuevo problema.....	27
4.1.2 Definición del problema.....	27



4.1.3	Creación de la geometría	28
4.1.4	Introducción de materiales	29
4.1.5	Condiciones de contorno	30
4.1.6	Mallado.....	33
4.1.7	Simulación	34
5	Campo eléctrico en dieléctricos	39
5.1	Comportamiento respecto a la permitividad	39
5.2	Comportamiento respecto a la geometría	43
6	Descripción de la pieza estudiada.....	49
6.1	Celdas aisladas en SF ₆	49
6.2	Acoplamiento entre celdas - Pasatapas.....	50
6.2.1	Pasatapas 1.....	50
6.2.2	Pasatapas 2	52
6.2.3	Pasatapas 3	54
6.2.4	Pasatapas 4.....	58
7	Posibles defectos y consecuencias	61
7.1	Proceso de fabricación	61
7.2	Ensayo eléctrico	62
7.3	Defectos leves.....	63
7.3.1	Pequeñas muescas o marcas en el aislante.....	63
7.3.2	Pequeñas marcas o muescas en el anillo exterior	65
7.4	Defectos moderados	67
7.4.1	Defectos de pintura	67
7.4.2	Defectos por suciedad	70
7.5	Defectos graves	71
7.5.1	Burbujas de aire	71
7.5.2	Deformaciones en el interior del anillo semiconductor.....	82
7.5.3	Partículas conductoras.....	85
8	Conclusiones.....	91
	Bibliografía.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Monómero de siloxano. Fuente: Wikimedia Commons	3
Fig. 2. Estructura del polidimetilsiloxano. Fuente: wikipedia.org	3
Fig. 3. Ilustración de la distribución de bandas en un aislante según la teoría de bandas.	6
Fig. 4. Descarga de corona. [30]	10
Fig. 5. Descargas de corona en una cuchara sometida a alta tensión con una bobina de Tesla. [27]	10
Fig. 6. Descarga superficial. [30]	11
Fig. 7. Descarga interna. [30]	11
Fig. 8. Aislador polimérico deteriorado por descargas de corona. [26]	12
Fig. 9. Degradación en aislamiento de un cable subterráneo. [29]	12
Fig. 10. Arborescencias provocadas por la degradación del aislamiento en una sección de cable aislado con papel en aceite. [28]	13
Fig. 11. Modelo abc de una descarga parcial interna.	14
Fig. 12. Tensión en el interior del defecto. [33]	16
Fig. 13. a) Pulso de corriente $i_1(t)$ generado en una DP. [31] b) Circuito abc en el momento de una descarga	17
Fig. 14. Relación entre C_2 y C_1 en función del tamaño del defecto.	19
Fig. 15. Circuito de ensayo con condensador de acoplamiento.	19
Fig. 16. Comparación de tamaño de q_m respecto q con respecto la relación entre C_k y C_D	20
Fig. 17. Circuito de ensayo con detector de descargas en serie con el condensador de acoplamiento	21
Fig. 18. Patrón PRPD unipolar de un cable aislado de media tensión. Ensayo realizado en el laboratorio de alta tensión de Vulcanizados Álvarez.	22
Fig. 19. Esquema de descargas internas en PRPD	23
Fig. 20. Esquema de descargas superficiales en PRPD.	23
Fig. 21. Esquema de descargas de corona en PRPD	23
Fig. 22. Ruido provocado por una máquina de producción en funcionamiento detectado en el laboratorio de alta tensión de Vulcanizados Álvarez.	24
Fig. 23. Ejemplo de una sección-mitad de silicona sometida a tensión con dos electrodos. ...	26
Fig. 24. Menú de tipo de problema	27
Fig. 25. Menú de definición del problema	27
Fig. 26. Cuadro de diálogo para introducir coordenadas de un punto en modo Axyisymmetric (izquierda) y Planar (derecha).	28
Fig. 27. Cuadro de diálogo para modular la rejilla.	28
Fig. 28. Cuadro de diálogo para caracterizar un arco de circunferencia	29
Fig. 29. Cuadro de diálogo para introducir materiales.	29



Fig. 30. Cuadro de diálogo para introducir conductores..... 30

Fig. 31. Cuadro de diálogo de propiedades de un segmento..... 30

Fig. 32. Indicadas en rojo las zonas caracterizadas como conductor. 31

Fig. 33. Condición de contorno cerrada con un rectángulo..... 31

Fig. 34. Cuadro de diálogo para introducir condiciones de contorno abiertas..... 32

Fig. 35. Condición de contorno de Dirichlet..... 32

Fig. 36. Cuadro de propiedades de una etiqueta..... 33

Fig. 37. Mallado del problema con 11306 nodos..... 34

Fig. 38. Simulación del potencial eléctrico para condición de contorno abierta (izquierda) y cerrada (derecha). 35

Fig. 39. Cuadro de diálogo para obtener líneas equipotenciales y resultado. 35

Fig. 40. Ventana de manipulación del mapa de densidades. 36

Fig. 41. Simulación del campo eléctrico en ambos problemas..... 36

Fig. 42. Cuadro de diálogo para representación de campos vectoriales..... 36

Fig. 43. Vectores de campo eléctrico. 37

Fig. 44. Cuadro de datos de Point Props. A la izquierda el cuadro por defecto y a la derecha el cuadro de propiedades de un punto en concreto. [15,10] en este caso. 37

Fig. 45. Ejemplo de campo eléctrico uniforme. 40

Fig. 46. Propiedades del punto central del ejemplo anterior. 40

Fig. 47. Ejemplo de dos medios sometidos a un campo uniforme. a) Campo eléctrico y líneas equipotenciales. b) Desplazamiento eléctrico y líneas equipotenciales..... 41

Fig. 48. Ejemplo de campo eléctrico oblicuo a interfaz entre dos materiales..... 42

Fig. 49. Simulación de una esfera en tensión en el vacío. a) Gradiente de potenciales. b) Campo eléctrico..... 44

Fig. 50. Gráfica de potencial de una esfera en tensión en el vacío. 44

Fig. 51. Gráfica de campo eléctrico de una esfera en tensión en el vacío. 45

Fig. 52. Esfera a potencial cero en el interior de un cilindro a 1000 V. 46

Fig. 53. Celdas de media tensión aisladas en SF₆. Fuente: <https://www.inael.com/producto/celdas-m-t/> 49

Fig. 54. Imagen 3D del pasatapas 1. Realizado con SketchUp. 50

Fig. 55. Simulación de potencial eléctrico del pasatapas 1..... 51

Fig. 56. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 1. Límite superior mostrado de 10⁷ V/m (10 kV/mm). 51

Fig. 57. Imagen 3D del pasatapas 2. Realizada con SketchUp. 52

Fig. 58. Simulación del potencial eléctrico del pasatapas 2. 52

Fig. 59. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2. Límite superior mostrado de 10⁷ V/m (10 kV/mm). 52

Fig. 60. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2 con las paredes de la celda más alejadas. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm)	53
Fig. 61. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2 con orificio redondeado. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm).	53
Fig. 62. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2 con a) paredes de la celda en contacto y b) separadas con el exterior del pasatapas. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm)	53
Fig. 63. Simulación del pasatapas 2 con cara al aire puesta a tierra con pintura semiconductor. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico y leyenda de colores.	54
Fig. 64. Puesta a tierra del anillo exterior del pasatapas con resortes.	55
Fig. 65. Imagen 3D del pasatapas 3. Realizado con SketchUp.	55
Fig. 66. Simulación del pasatapas 3. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico y leyenda de colores.	56
Fig. 67. Campo eléctrico en los extremos del anillo exterior del pasatapas 3. (Máx. E mostrado: 20 kV/mm)	56
Fig. 68. Simulación del pasatapas 3 con anillo exterior modificado. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico (Máx. E mostrado: 20 kV/mm). c) Campo eléctrico (Máx. E mostrado: 3 kV/mm).	57
Fig. 69. Imagen 3D del pasatapas 4. Realizado con SketchUp.	58
Fig. 70. Simulación del pasatapas 4. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico y leyenda de colores.	59
Fig. 71. Campo eléctrico del pasatapas 4. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm)	59
Fig. 72. a) Campo eléctrico del pasatapas 4 con dibujo completo (Máx. E mostrado: 3 kV/mm). b) Función de cálculo integral para la energía acumulada en el área coloreada en verde.	60
Fig. 73. Máquina de inyección de silicona líquida LSR. Fuente: https://www.elmet.com/EN/lsr-turnkey-solutions	61
Fig. 74. Representación 3D de una muesca en el pasatapas. Realizado con SketchUp	64
Fig. 75. Simulación del campo eléctrico del pasatapas con defecto de muesca relleno de aire. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm)	64
Fig. 76. Muesca en el pasatapas próxima al anillo exterior rellena de aire tras la instalación.	65
Fig. 77. Campo eléctrico en el pasatapas. a) Muesca en el rebaje del anillo semiconductor exterior. b) Muesca rellena de aire entre el anillo semiconductor y la cazoleta de epoxi. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm).....	66
Fig. 78. Varias burbujas de 1 mm rellenas de un aditivo con permitividad $\epsilon_r=10$. (Máx E mostrado = 20 kV/mm)	66
Fig. 79. Campo eléctrico y líneas equipotenciales del pasatapas con el conductor interior separado 5 mm.	67
Fig. 80. Corte del pasatapas con conexión. Diseñado por Schneider. [20]	68
Fig. 81. Representación 3D del pasatapas con un defecto de pintura en una de las bases. Realizado con SketchUp.	68



Fig. 82. Comparación campo eléctrico en el final del pasatapas con conductor a 5 mm y 0.5 mm. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm)..... 68

Fig. 83. Tramo sin pintura semiconductora cerca del anillo exterior. Conductor a 2 mm de la pared del pasatapas. 69

Fig. 84. Campo eléctrico en el pasatapas con gráfica de campo eléctrico tangencial. 70

Fig. 85. Burbuja de aire atrapada en un aislamiento de silicona. 71

Fig. 86. Ejemplo de burbuja esférica en un gradiente de potencial uniforme. Mostrado campo eléctrico con vectores y líneas equipotenciales. 72

Fig. 87. . Ejemplo de burbuja esférica materiales invertidos. Mostrado campo eléctrico con vectores y líneas equipotenciales. 72

Fig. 88. Datos de los puntos [0,50] (E_0) y [0,0] (E_1) con comprobación de resultados. 73

Fig. 89. Datos de los puntos [0,50] (E_0) y [0,5] (E_2) con comprobación de resultados. 74

Fig. 90. Datos de los puntos [0,50] (E_0) y [0,0] (E_1) y comprobación de resultados con $\epsilon_{r2}=10^{18}$ 74

Fig. 91. Simulación del campo eléctrico con elipsoides y $\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}=\infty$. Excentricidad indicada en cada caso..... 75

Fig. 92. Valores de campo eléctrico para esferoide con excentricidad $e=0.745$ 75

Fig. 93. Valores de campo eléctrico para esferoide con excentricidad $e=0.968$ 76

Fig. 94. Valores de campo eléctrico para esferoide con excentricidad $e=0.866$ 76

Fig. 95. Simulación del campo eléctrico con elipsoides cambiados de orientación 90° y $\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}=\infty$. Excentricidad indicada en cada caso y relación entre E_1 y E_0 77

Fig. 96. Campo eléctrico de burbuja simulada como toroide junto con datos de los puntos [25,50] (E_0) y [25,0] (E_1). 78

Fig. 97. Campo eléctrico de toroide entre cilindros coaxiales con valores de los puntos [20,0] (E_0) y [25,0] (E_1) junto con relación entre los campos. $\epsilon_{r2}=3$ 79

Fig. 98. Valores de los puntos [25,20] (E_0^*) y [25,0] (E_1) con relación entre campos según Ec. XXXIX..... 80

Fig. 99. Simulación de campo eléctrico en el pasatapas con 5 burbujas de aire de 1mm separadas 10 mm cada una. a) Máx. E: 9.389 kV/mm. b) Máx. E: 3 kV/mm 81

Fig. 100. Simulación campo eléctrico de dos elipsoides (1x0.5 mm, $e=0.866$) con distinta orientación situados en el punto [24.5,40] (burbuja 5). 82

Fig. 101. Campo eléctrico en muescas interiores rellenas de silicona en el anillo exterior. Tensión de 106 kV. a) Punta superior del anillo. b) Codo interior del anillo. c) Cara interior del anillo. (Máx. E mostrado: 20 kV/mm) 83

Fig. 102. Campo eléctrico en muescas interiores rellenas de silicona en el anillo exterior. a) Punta superior del anillo. b) Codo interior del anillo. c) Cara interior del anillo. (Máx. E mostrado: 20 kV/mm)..... 83

Fig. 103. Campo eléctrico en muescas interiores rellenas de aire en el anillo exterior. a) Punta superior del anillo. b) Codo interior del anillo. c) Cara interior del anillo. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm) 84



Fig. 104. Simulación de burbuja esférica conductora en campo uniforme desde 1000 V a 0 V. Mostrados gradiente de potencial y campo eléctrico. 85

Fig. 105. Valores en el punto [0,50] (E_0) y [0,5] (E_2) y relación entre ellos. 86

Fig. 106. Campo eléctrico con líneas equipotenciales entre 1000 y -1000 V. Valores en el punto [0,50] (E_0) y [0,5] (E_2) y relación entre ellos. 87

Fig. 107. Vectores de campo eléctrico en ambos ejemplos, de 1 a 0 kV y de 1 a -1 kV. 87

Fig. 108. Campo eléctrico con elipsoides conductores. Indicada relación entre el valor de E máximo en el problema y E_0 . $E_{m\acute{a}x}$ se da en el punto de la superficie con menor radio del elipsoide. 88

Fig. 109. Burbuja conductora de 1 mm en las coordenadas [24.5,40] del pasatapas a 50.9 kV. 89

Fig. 110. Aislante perforado por burbujas con partículas semiconductoras. 89



1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En el presente trabajo se va a llevar a cabo un estudio de los defectos que pueden presentarse en piezas de silicona para celdas de aislamiento en alta tensión.

Con apoyo de simulaciones en el programa de elementos finitos FEMM y una base teórica y experimental se analizará el comportamiento y las consecuencias de dichos defectos.

El objetivo primario es lograr un mayor conocimiento del producto fabricado, permitiendo una mejor detección de piezas defectuosas, aumentando la calidad del producto final y pudiendo mejorar aspectos de su fabricación. A mayores, el conocimiento extraído de aquí se puede extrapolar a modelos de piezas similares que puedan ser fabricadas en un futuro.

Sabiendo cuales pueden ser los defectos de un producto, una empresa puede reaccionar adecuadamente a modificaciones en el proceso productivo, optimizar métodos de fabricación y volverse más eficiente y rentable económicamente, aumentando su competitividad.

En cuanto a la estructura del trabajo, primeramente, se hablará de la silicona como material para aislamiento eléctrico, se desarrollará el fenómeno de las descargas parciales, puesto que es un aspecto fundamental en lo relativo a defectos en aislamiento.

Se explicará el funcionamiento del software FEMM 4.2. Se hablará del comportamiento del campo eléctrico en determinadas situaciones para comprender mejor los resultados obtenidos de las simulaciones. Se describirá el funcionamiento de una pieza de silicona que puede emplearse en celdas aisladas en alta tensión, desde un diseño simplista hasta uno más sofisticado que será el que se tome de referencia para realizar el estudio. Finalmente, se concluirá con el análisis de los defectos, su funcionamiento y consecuencias.

Para la bibliografía utilizada, el catálogo online ALMENA de la biblioteca de la Universidad de Valladolid ha sido de especial utilidad en la adquisición de conocimiento. En particular sobre descargas parciales y campo eléctrico que, complementado con artículos académicos de dominio público, ha servido para cimentar la base teórica presentada en este trabajo.



2 LA SILICONA COMO AISLANTE ELÉCTRICO

La silicona es un material excelente para su uso como aislamiento eléctrico de alta tensión por diversas razones. Factores como sus buenas propiedades eléctricas, su versatilidad y la proliferación de instalaciones eléctricas en múltiples campos, han llevado a la silicona a ser un material pujante en el sector eléctrico.

En este apartado se va a desarrollar cuáles son las principales características de este material haciendo especial hincapié a su utilidad como aislante eléctrico.

2.1 ESTRUCTURA DE LAS SILICONAS

El término silicona se refiere a las sustancias poliméricas cuya columna vertebral es el enlace Si-O. Concretamente, se usa de manera habitual para referirse a los polímeros de organosilicio, es decir, aquellos cuyo monómero es de la forma $[-Si(R_2)-O-]_n$, denominado siloxano, donde R son dos grupos funcionales orgánicos iguales o distintos. Puesto que este monómero se asemeja a los compuestos cetónicos $(C(R_2)-O)$, de silicio-cetona se deriva el término silicona [1, p. 325].

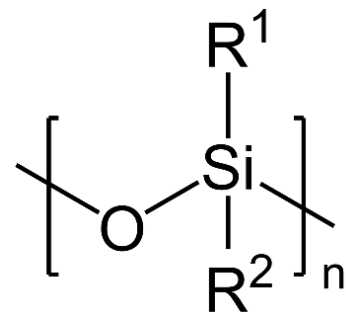


Fig. 1. Monómero de siloxano.
Fuente: Wikimedia Commons

El ejemplo más sencillo y extendido es en el que ambos radicales son un grupo metilo $[-CH_3]$, lo cual daría lugar al polidimetilsiloxano o PDMS [2].

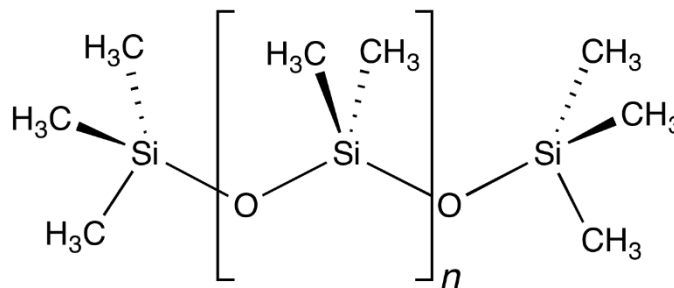


Fig. 2. Estructura del polidimetilsiloxano. Fuente: wikipedia.org

Las siliconas son todas artificiales, no se encuentran en la naturaleza de manera normal y han de ser sintetizadas en procesos industriales [3]. Existe un gran número de posibilidades en cuanto a tipos de siliconas, ya que permite una gran variabilidad en su estructura, cambiando los componentes que la forman, la longitud de las cadenas poliméricas y la introducción de aditivos que modifican sus propiedades. Debido a esta variabilidad, diversas empresas ofrecen una gran gama de siliconas para múltiples y diferentes funciones.



2.2 TIPOS DE SILICONAS

El factor determinante en las propiedades de las siliconas es el entrelazado de sus moléculas a través del proceso de vulcanización. Según se lleve a cabo este proceso, la silicona se divide en dos grandes grupos:

- **Silicona vulcanizable a temperatura ambiente (RTV):** la principal característica de este tipo de siliconas es, como su nombre indica, que su proceso de curado tiene lugar a temperatura ambiente. Generalmente, dan como resultado siliconas blandas que principalmente se usan como adhesivos y sellantes o bien se emplean para su uso como moldes. Existen a su vez otros dos subtipos de esta silicona [4] [5]:
 - **RTV-1:** silicona monocomponente cuyo proceso de vulcanizado se logra a través de una reacción por condensación al contacto con la humedad [6] [7, p. 8].
 - **RTV-2:** silicona bicomponente, base-catalizador, que al mezclarlos desencadena el proceso de curado a temperatura ambiente por hidrosililación [6] [7, p. 8]. Antes de la invención de la LSR actual, esta era conocida como tal.
- **Silicona vulcanizable a alta temperatura (HTV):** son siliconas cuyo curado se realiza a temperaturas elevadas, a lo cual le suele seguir un horneado de varias horas para eliminar volátiles. Se pueden añadir aditivos para modificar sus propiedades o para abaratar costes [7, p. 8] [8]. Hay dos tipos:
 - **Silicona de alta consistencia (HCR):** también llamada silicona sólida, habitualmente es conocida en sí como HTV debido a haber sido la única de este tipo antes de la aparición de la LSR. Posee grandes cadenas poliméricas de alto peso molecular, que le confieren unas buenas propiedades mecánicas. Suele presentarse en forma de una masilla sólida deformable antes del curado, lo cual permite extruirla en moldes para adquirir diferentes formas. El curado puede desencadenarse a través de peróxidos orgánicos o por catálisis con platino [8] [9].
 - **Silicona líquida (LSR):** apareció a finales del siglo pasado y sustituyó a la silicona RTV-2, que antes era conocida como LSR, tanto en nombre como en varios procesos de fabricación. Esto es debido fundamentalmente a que presenta mejores propiedades mecánicas y eléctricas. La LSR al igual que la RTV-2, es líquida a temperatura ambiente, facilitando su inyección en moldes, adquiriendo múltiples formas, siendo más versátil en este aspecto que la HCR. Su proceso de vulcanizado a alta temperatura es muy rápido lo que obliga a utilizar siempre una mezcla de dos componentes A-B, donde uno de ellos

contiene platino que se usa como catalizador para acelerar el proceso de curado [7, p. 8] [9]. Al curarse presenta propiedades muy similares a la HCR, siendo ambas sólidas, con rangos de durezas similares. Sin embargo, el hecho de que sea líquida a temperatura ambiente, y de que su proceso de curado sea más rápido, hace de esta silicona un material ideal para la producción en serie de piezas de múltiples tamaños y diversas formas.

2.3 PROPIEDADES DE LA SILICONA COMO AISLANTE ELÉCTRICO

Este apartado pretende explicar por qué se utiliza la silicona como aislante eléctrico en alta tensión a partir de sus propiedades.

2.3.1 PROPIEDADES TÉRMICAS

La silicona puede aguantar rangos de temperatura de entre -50 a 250 °C [8]. Esto le hace apta para entornos hostiles, donde la resistencia térmica sea una condición necesaria. Los aislamientos eléctricos pueden soportar perfectamente el calentamiento de los conductores por efecto del paso de corriente y resistir las sobrecorrientes ocasionales.

2.3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS

En cuanto a sus propiedades mecánicas, las piezas de silicona llegan a tener durezas entre los 10 y los 80 Shore A [9]. Esto proporciona una gran versatilidad al material para su uso en diversos campos. Para aislamientos eléctricos se desean valores medio-altos, que otorguen una elasticidad apropiada para resistir los esfuerzos a los que se puedan ver sometidas las piezas aislantes. Esto es especialmente útil durante la instalación de las mismas, ya que se suelen embutir en cavidades muy ajustadas o en partes que deforman permanentemente la pieza durante el servicio.

La silicona es totalmente incompresible, esto hace adecuado su uso en instalaciones eléctricas de celdas blindadas, donde los elementos están distribuidos de forma muy compacta y a presión. Así, los aislamientos de silicona garantizan las especificaciones de su aislamiento eléctrico al no verse modificado su espesor.

Como añadido, el peso de las piezas aislantes en silicona es menor que aquellas piezas destinadas al mismo propósito fabricadas en otros materiales aislantes como vidrio o cerámica.

2.3.3 PROPIEDADES QUÍMICAS

Otra gran ventaja de la que dispone la silicona son sus excelentes propiedades químicas. Es hidrófoba, lo que proporciona un mejor comportamiento en instalaciones eléctricas a la intemperie o con una humedad elevada. Otros materiales poliméricos como el EPDM, también son hidrófobos, pero pueden perder esta propiedad al exponerse a contaminantes o descargas, mientras que la silicona siempre se recupera y vuelve a repeler el agua [7, pp. 8-9].

Por otra parte, también es reacia a degradarse con el ozono. Esto es fundamental en las instalaciones de alta tensión donde son muy habituales las descargas de corona de entre las cuales, uno de sus productos suele resultar esta molécula [7, p. 23].

2.3.4 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

2.3.4.1 CONDUCTIVIDAD

Las siliconas son empleadas como aislamiento eléctrico ya que poseen una muy baja conductividad, con valores que oscilan entre los 10^{-13} y 10^{-11} S/m [1, p. 326]. Esta característica tiene su explicación en la teoría de bandas. Los elastómeros poseen una banda conductora que se encuentra a altos niveles de energía, separada de la banda de valencia por una amplia banda o zona prohibida. Para que pueda producirse una descarga es necesaria la existencia de partículas cargadas con libertad de movimiento que, debido a su tamaño, suelen ser electrones. En sólidos dieléctricos, como la silicona, la presencia de electrones libres es poco probable debido a la amplitud de esta banda prohibida, ya que se requiere de mucha energía para que estos salten desde la banda de valencia a la conductora. Esto supone que al ser sometidas a un campo eléctrico, no se producirán corrientes o, de producirse, serán pequeñas, recorriendo muy cortas distancias por la dificultad para que los electrones puedan circular entre moléculas.



Fig. 3. Ilustración de la distribución de bandas en un aislante según la teoría de bandas.

Por supuesto, ningún material es un aislante perfecto y con las siliconas no es distinto. Aplicando suficiente tensión, se pueden volver conductoras. A medida que se aumenta la energía incidente, es más probable el salto de electrones a la banda conductora. Una vez sucede esto, los electrones colisionan con otras moléculas, ionizándolas, provocando avalanchas de electrones que acaban por crear una corriente a través del aislamiento. En general, la energía necesaria para que esto se produzca es elevada, pero factores como el aumento de la temperatura o la presencia de irregularidades en el medio aislante, disminuyen la energía necesaria para permitir el movimiento de cargas.

2.3.4.2 RIGIDEZ DIELECTRICA

Las siliconas acostumbran a tener una rigidez dieléctrica superior a los 20 kV/mm. Es importante entender que el valor de la rigidez dieléctrica no es constante con el espesor. Cuanto más grande es el volumen de dieléctrico, más probable es que existan defectos que favorezcan el salto de electrones a la banda conductora. Adicionalmente, es más factible que las cargas dispongan de caminos por los que pueda circular la corriente. Es, por tanto, que cuando se habla de rigidez dieléctrica, se habla de un valor empírico, obtenido bajo unas condiciones determinadas y que sirve de orientación a la hora de diseñar los aislamientos [1, pp. 241-242].

2.3.4.3 PERMITIVIDAD

Otro parámetro a tener en cuenta es la permitividad absoluta, ϵ . Más adelante se hablará en profundidad de esta característica propia de cada material. El vacío tiene una permitividad absoluta de $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m. Este valor es el mínimo posible y, por tanto, se acostumbra a hablar de permitividad relativa ϵ_r , siendo este valor un cociente entre la permitividad absoluta del material y la del vacío..

Los gases por ejemplo, tienen una permitividad relativa muy próxima a 1, esto se debe a dos factores. Por una parte, las moléculas que conforman un gas, debido a su estabilidad, tienden a ser reticentes a formar dipolos. Esta es una de las razones por las que se encuentran en estado gaseoso, al haber poca interacción intermolecular, no pueden formar medios líquidos o sólidos. Por otro lado, si las moléculas del gas fueran más propensas a polarizarse, al tener libertad de movimiento, no pueden mantener una orientación constante y uniforme. Consecuentemente, cuando se someten un campo eléctrico, el gas tiene poca interacción con él. De esta manera, el campo lo atraviesa sin apenas modificarse.



Las siliconas suelen tener valores de entre 2 y 3 veces la permitividad del vacío, aunque con ayuda de aditivos se pueden llegar a rangos de entre 15 y 20 [1, p. 326]. La permitividad es una cualidad esencial en medios aislantes puesto que condiciona la interacción de estos con el campo eléctrico incidente.

2.3.4.4 SILICONAS SEMICONDUCTORAS

Por otra parte, si se añaden los aditivos adecuados, se pueden conseguir siliconas semiconductoras y, lo que es más interesante, obtener piezas con partes de silicona semiconductoras y aislante a voluntad. Lo cual es algo de especial interés en alta tensión, donde controlar la distribución del campo eléctrico es necesario para minimizar o evitar el fenómeno de descargas parciales que acaban por deteriorar los aislantes.

Este tipo de siliconas se logra con aditivos que suelen ser alguna forma de carbono o partículas metálicas. El negro de carbono, también conocido como negro de humo, es un aditivo habitual en elastómeros, el cual proporciona una mejoría en las propiedades mecánicas, pero también se puede utilizar para aumentar la conductividad de la silicona. Este material, resultado de la combustión incompleta de combustibles fósiles, está formado por carbono puro y posee una estructura amorfa, con una relación superficie-volumen muy elevada, guardando cierta similitud con el grafito [10, p. 552].

2.4 LOS AISLAMIENTOS DE SILICONA EN EL MERCADO

La suma de todas las buenas propiedades de la silicona, han hecho de ella un importante recurso a la hora de diseñar aislamientos eléctricos. Su gran versatilidad para crear diversas formas, añadido a la competitividad de su precio permiten la incorporación de este material al mercado como uno de los principales a tener en cuenta.

Particularmente, gana más protagonismo en las instalaciones eléctricas de alta tensión compactas, donde la economía del espacio ha cobrado mayor relevancia con la proliferación de densos puntos de consumo eléctrico (ciudades, grandes polígonos industriales, megafactorías...) o el incremento en la tensión necesaria para la incipiente electrificación de los medios de transporte (aeronaves, buques marítimos, ferrocarriles...), todo ello aumenta las oportunidades para el uso de este material como aislamiento.

3 DESCARGAS PARCIALES

Una de las principales consecuencias provenientes de la existencia de defectos en los aislamientos de alta tensión son las descargas parciales (de ahora en adelante, DP). Puesto que la relevancia de este fenómeno es notoria, este capítulo pretende explicar en qué consiste, las causas que lo provocan, sus consecuencias y cómo se pueden detectar.

Las DP son conocidas desde finales del siglo XVIII, y ya desde principios del siglo XX se las asocia a un posterior fallo eléctrico. El estándar de referencia en lo que respecta a la detección de DP, el IEC 60270, propone la siguiente definición [11, p. 170] [12]:

«Las descargas parciales son descargas eléctricas localizadas que solo puentean parcialmente el aislamiento entre conductores y que pueden o no ocurrir adyacentes a un conductor.

Las descargas parciales son en general una consecuencia de concentraciones de esfuerzos eléctricos locales en el aislamiento o en la superficie del aislamiento. Generalmente dichas descargas aparecen como pulsos con duraciones muy inferiores al 1 μ s.»

Las DP tienen lugar como consecuencia de la ionización de partículas con libertad de movimiento, típicamente gases, sometidas a campos eléctricos intensos. Generalmente, suelen involucrar la presencia de aire visto que es el medio gaseoso más abundante del que disponemos. Un caso común de DP, como se explicará posteriormente, son las conocidas descargas de corona que acostumbran a darse en los conductores desnudos de las líneas aéreas de alta tensión.

Paralelamente, la presencia de partículas gaseosas en un medio aislante líquido o sólido también desemboca en DP. En fluidos dieléctricos, por ejemplo, en transformadores en aceite, pueden darse momentáneamente burbujas de aire o incluso vapor de agua. En los sólidos, el caso que nos atañe, durante el conformado de la pieza aislante, puede quedar gas atrapado dentro de esta, dando lugar a imperfecciones. Estos defectos concurren además en un cambio de medio dentro del aislamiento, provocando una anisotropía que, junto con la forma del defecto, puede agravar la distribución de campo eléctrico, favoreciendo así la DP.

Las DP, como se expresa en la propia IEC 60270, se acostumbran a medir en pC. Es decir, se trabaja con magnitudes muy pequeñas, por lo que se trata de un fenómeno con una muy baja densidad energética. A pesar de ello, estas descargas, en especial en aislamientos sólidos, con el tiempo acaban deteriorando el material y, finalmente, perforándolo.

Dependiendo del defecto y la tensión a la que vaya a verse sometida la pieza, el fallo de la misma ocasionado por las DP, debido a la magnitud de estas, puede prologarse mucho tiempo, llegando a pasar meses o incluso años. Sin embargo, las piezas para aislamiento en alta tensión suelen estar pensadas para trabajar durante algunas décadas, de forma que un fallo como este reduciría considerablemente su vida útil.

3.1 TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES

3.1.1 DESCARGAS DE CORONA

Estas descargas se producen en el medio aislante formado por partículas con libertad de movimiento alrededor de conductores donde el campo eléctrico es muy intenso. Esto sucede cuando estos toman formas con curvaturas muy acusadas, como puntas, aristas o cables muy finos [13, p. 233].

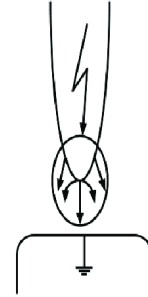


Fig. 4. Descarga de corona. [30]

Reciben el nombre de corona porque pueden apreciarse como un brillo púrpura o azulado que está contenido en torno al conductor, sin producirse un arco eléctrico.

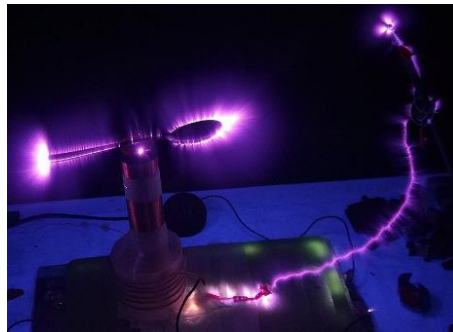


Fig. 5. Descargas de corona en una cuchara sometida a alta tensión con una bobina de Tesla. [27]

Si el campo eléctrico se vuelve más intenso o si la distribución en el espacio del conductor permite la interacción con otro a diferente tensión, las coronas pueden llegar a desarrollarse en arcos eléctricos. Esto sucede porque, cuando el campo supera la rigidez del aire, este se perfora y se vuelve conductor.

Como consecuencia, se produce un fenómeno del que ya se ha hablado en el apartado 2.3.4. Esta perforación del aislante desemboca en la aceleración de partículas cargadas que chocan con otras neutras, ionizándolas y acelerándolas, provocando así una cascada. Esto se conoce como descarga de Townsend, en honor a J. S. Townsend que estudió el fenómeno en 1897.

3.1.2 DESCARGAS SUPERFICIALES

Este tipo de descargas se presenta en la superficie de los aislamientos. Las transiciones de medio (p. ej. silicona-aire) favorecen la concentración de campo eléctrico en la zona donde se produce el cambio, debido al cambio entre permitividades, lo que puede traducirse en la aparición de DP si el campo es suficientemente intenso. Una de las principales causas de este tipo de descargas es la suciedad acumulada en la superficie.

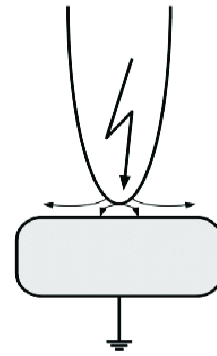


Fig. 6. Descarga superficial. [30]

3.1.3 DESCARGAS INTERNAS

Este último tipo de DP es el que más interesa al objeto del estudio de este trabajo. Las descargas internas se producen por la presencia de vacíos en el sólido aislante. Quizá este sea uno de los tipos de DP más estudiados debido a su relevancia, ya que con el tiempo deterioran gravemente el aislamiento desde su interior.

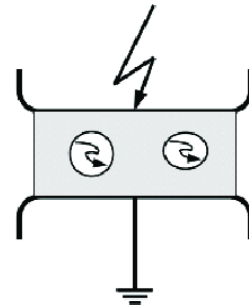


Fig. 7. Descarga interna. [30]

Estos vacíos acostumbran a estar llenos de aire, lo que favorece que se produzcan las DP. El medio aislante utilizado en la pieza está pensado para aguantar intensidades de campo eléctrico mayores que las que puede soportar el aire ya que, por ejemplo, mientras que la rigidez dieléctrica de la silicona para aislamiento puede ser superior a los 20 kV/mm, la del aire a presión atmosférica se encuentra cerca de los 3 kV/mm (Paschen, 1889). Esto, sumado al hecho de que la permitividad del aire es inferior a la de la silicona, lo que intensifica el campo en el defecto, provoca que casi con total seguridad haya DP. Si una pieza de aislamiento presenta DP internas, ello induce a una alta probabilidad de fallo de la misma en un futuro, por tanto, es crucial su detección.

3.2 DETERIORO PRODUCIDO POR DESCARGAS PARCIALES

3.2.1 DETERIORO POR DESCARGAS DE CORONA

Las descargas de corona tienen múltiples problemas asociados. En líneas eléctricas de alta tensión, debido a sus dimensiones, pueden llegar a provocar pérdidas energéticas sensibles, además de generar ruido, que puede ser molesto si la línea pasa por poblaciones.

En cuestión de aislamientos, el gran problema que causan es la generación de ozono en su ionización del aire. El ozono es una molécula corrosiva que desgasta y deteriora los aislamientos, especialmente los poliméricos como el EPDM. La silicona, por su parte, es resistente a los efectos del ozono, pero no invulnerable, de forma que la presencia de coronas prolongada en el tiempo puede acabar provocando daños irreparables.



Fig. 8. Aislador polimérico deteriorado por descargas de corona. [26]

Las descargas de corona se pueden evitar minimizando el campo eléctrico que rodea a la pieza aislante, ya sea a través del suavizado de formas con radios pequeños o añadiendo anillos anti-corona. Por otra parte, también se puede directamente evitar el contacto de la pieza con el aire, introduciéndola en moldes de resina epoxi o sumergiéndola en fluidos de gran poder dieléctrico como el SF₆ o fluidos orgánicos sintéticos.

3.2.2 DETERIORO POR DESCARGAS SUPERFICIALES

Como cabría esperar, los defectos ocasionados por estas descargas aparecen en la superficie del aislamiento. La presencia de suciedad, como polvo, arena, gotitas de agua o subproductos de la ionización del medio aislante resultado de las descargas de corona, suelen ser los principales causantes de estas descargas.



Fig. 9. Degradación en aislamiento de un cable subterráneo. [29]

La descarga continuada acaba provocando marcas con forma habitualmente arborescente, que parten de algún punto en contacto con un conductor en tensión o puesto a tierra. Se pueden evitar de manera similar a las descargas de corona. A mayores atestiguan la importancia de evitar la suciedad en los componentes eléctricos lo que, para aquellos que están expuestos a entornos con mucha acumulación de partículas, como zonas desérticas o con mucha contaminación, obliga a un mantenimiento más frecuente.

3.2.3 DETERIORO POR DESCARGAS INTERNAS

Las DP internas desgastan el material poco a poco desde su interior. Un defecto que puede comenzar como una pequeña burbuja de medio milímetro puede acabar en una perforación completa del espesor del aislante. El deterioro del material deja marcas que se asemejan a la forma de una descarga de Townsend, es decir, se generan ramificaciones que se abren a medida que se alejan del electrodo de origen (electrodo de alta tensión) y se acercan al opuesto (pared del defecto) o viceversa.



Fig. 10. Arborescencias provocadas por la degradación del aislamiento en una sección de cable aislado con papel en aceite. [28]

Además, según se agrava la descarga y aparecen nuevas ramificaciones, hay más huecos o vacíos, lo que permite que aumente el número de DP, consecuentemente, el proceso se acelera y no cabe esperar que cese hasta que se produzca un fallo en el aislamiento.

3.3 DETECCIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

Para el desarrollo de este apartado, se ha atendido fundamentalmente a las explicaciones teóricas de cuatro libros mencionados en la bibliografía (Hauschild y Lemke en Capítulo 4 [11], Schon en Capítulo 12 [14], Kuffel-Zaengl-Kuffel en Capítulo 7 [15] y Küchler en Capítulos 3 y 6 [1]), accesibles desde el catálogo ALMENA de la Universidad de Valladolid.

La detección de DP en piezas de aislamiento está generalmente orientada a encontrar DP internas. Mientras que las descargas de corona y las superficiales vienen generalmente dadas por el mal diseño de los aislamientos o factores externos a estos, las descargas internas se acostumbran a originar como defectos procedentes del proceso productivo del aislamiento. Esto hace que estas descargas no se puedan evitar tan fácilmente porque, durante la fabricación, un porcentaje de las piezas acostumbra a tener alguna clase de defecto.

De esta forma, en varios procesos productivos de piezas de aislamiento en alta tensión, se añaden los ensayos en descargas parciales como una parte más de la cadena de fabricación. Este es el caso para los dos modelos de piezas que se tratan en este trabajo.

En este tipo de ensayos, los aislamientos se someten tanto a las tensiones máximas para las que están pensadas trabajar como a tensiones superiores, del orden de 2,5 veces la tensión nominal U_0 .

El objetivo de estos ensayos es, por una parte, comprobar que carecen de defectos que puedan provocar una rotura inmediata ante una sobretensión y por otra observar la presencia de DP que, en caso de tenerlas, estas han de cumplir dos requisitos. Uno es no superar un determinado umbral de magnitud de descarga y otro tener una tensión de extinción de esta superior a las tensiones nominales de trabajo, para así garantizar que ante una sobretensión las DP acaben desapareciendo.

3.3.1 MODELO DE DESCARGAS PARCIALES

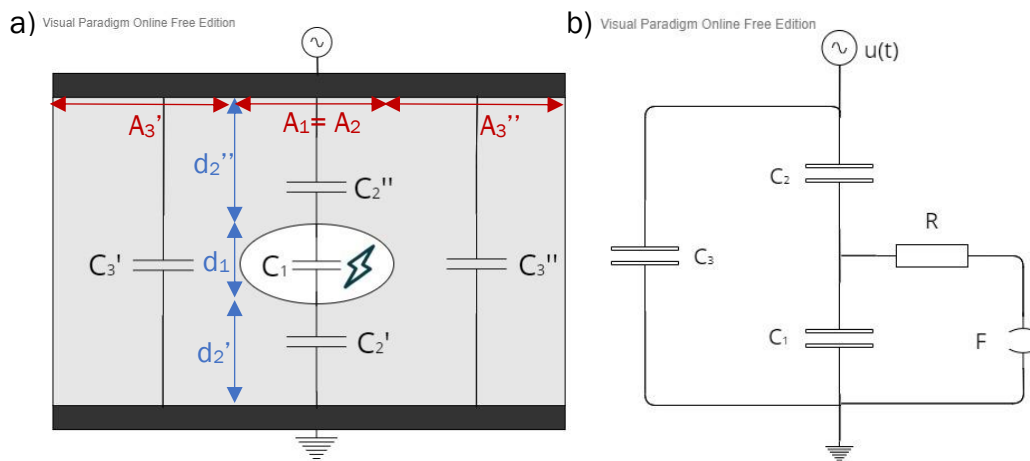


Fig. 11. Modelo abc de una descarga parcial interna.

Un defecto interno, no deja de ser un condensador, con dos paredes que se ven sometidas a un campo eléctrico y entre medias presenta un dieléctrico.

Consecuentemente, puede suponerse un defecto con una forma cualquiera en el interior de un aislante, y considerarlo como un condensador, C_1 . Los espacios que quedan entre las paredes del defecto y los electrodos de alta tensión y tierra, de la misma forma, pueden tomarse como condensadores C_2' y C_2'' de los que deriva C_2 . El resto del aislante entre los electrodos es a su vez otro condensador ($C_3' || C_3'' = C_3$). Así, podemos obtener el circuito equivalente que puede apreciarse en la Fig. 11b. A este circuito, además, se le añade un interruptor F que se considera cerrado cuando se desencadena una descarga y una resistencia R del arco eléctrico que se produciría.

Esta interpretación se conoce como modelo *abc*, llamado así puesto que en su planteamiento a los condensadores se les suele denominar C_a , C_b y C_c . Fue inicialmente propuesto por W. Burstyn en 1928 y posteriormente estudiado por Gemant y Philippoff en 1932 [11, p. 180].

Este es el modelo principal al que se atiende para describir y estudiar una DP interna. Sin embargo, cabe mencionar que hay otros autores que difieren de su uso por las limitaciones que comprende, defendiendo un modelo más complejo de analizar basado en dipolos [16].

De la Fig. 11a, se pueden extraer las siguientes relaciones entre las capacidades, teniendo en cuenta que el defecto es habitualmente muy pequeño:

$$Ec. I \quad C_1 = \varepsilon_1 \frac{A_1}{d_1}; \quad C_2 = \varepsilon_2 \frac{A_2}{d_2}; \quad C_3 = \varepsilon_3 \frac{A_3}{d_3}$$

$$Ec. II \quad A_1 = A_2 \Leftrightarrow d_2 \gg d_1 \Rightarrow C_1 \gg C_2$$

$$Ec. III \quad A_3 \gg A_2 \Leftrightarrow d_3 \approx d_2 \Rightarrow C_3 \gg C_2$$

3.3.2 MEDIDA DE DESCARGAS PARCIALES

El siguiente paso es comprender cómo se produce una descarga al verse el defecto sometido a una tensión y cómo puede lograrse su medición.

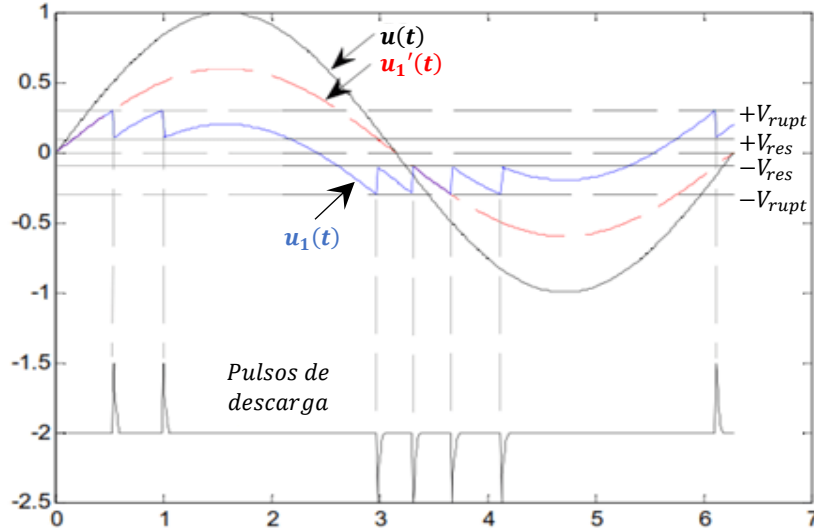


Fig. 12. Tensión en el interior del defecto. [33]

En la imagen arriba mostrada, aparece una descripción de la variación de la tensión $u_1(t)$ del defecto sobre la tensión $u_1'(t)$ que existiría en él si no se produjese descarga alguna y con respecto a la tensión suministrada $u(t)$.

La tensión en el defecto aumenta hasta que llega al punto en el que el campo eléctrico (V_{rupt}) supera la rigidez dieléctrica del medio que contiene, provocando la ionización de parte de las moléculas que luego se desplazan hasta las paredes de la cavidad, aceleradas por el campo en función de su carga, resultando un campo eléctrico residual, contrario al incidente y reduciéndose así el potencial neto en el interior del defecto (V_{res}). Mientras que la tensión siga aumentando en una polaridad y otra, se seguirán produciendo descargas.

Esta es una explicación idealizada y muy simplificada de aquello que pueda acontecer en la realidad, pero muy visual e intuitiva. Múltiples factores añaden más complejidad al fenómeno. Entre ellos se encuentran la forma del defecto, el tamaño, los materiales que lo componen, la descarga natural del campo asociado a $u_1(t)$, la proximidad o el contacto de las paredes del defecto con alguno de los electrodos, entre otros tantos. Por otra parte, no siempre existe la presencia de electrones libres dentro del defecto que permitan iniciar la descarga, lo que supone que la tensión a la que se produce esta pueda ser mayor.

Toda esta variabilidad que afecta a la manera de producirse la descarga, hace de las DP un fenómeno estocástico. Es tremendamente complejo predecir cuándo y cómo se va a producir una descarga provocada por un defecto. Esto dificulta mucho su estudio y, sobre todo, el trazado de márgenes admisibles. Es decir, si una pieza presenta descargas, cuánto es admisible para darla por buena sin que ello pueda suponer la rotura por degradación de la misma en un futuro. Este resulta ser uno de los sins más relevantes en el estudio de las DP, la predicción del fallo de un aislamiento.

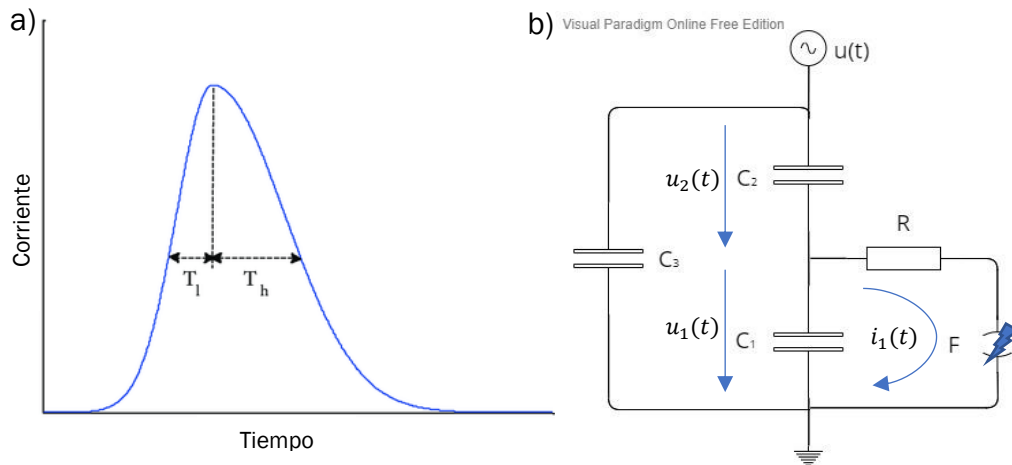


Fig. 13. a) Pulso de corriente $i_1(t)$ generado en una DP. [31] b) Circuito abc en el momento de una descarga.

Cada descarga produce un pulso de corriente que habitualmente dura menos de $1 \mu\text{s}$. Este pulso de corriente $i_1(t)$ es imposible de medir puesto que queda acotado en el subcircuito C_1 - R - F (Fig. 13b). La carga es proporcionada por C_1 :

$$\text{Ec. IV} \quad i_1(t) = C_1 \cdot \frac{du_1(t)}{dt} \Rightarrow \int_0^T i_1(t) dt = C_1 \cdot \int_{u_{10}}^{u_1} du_1(t) \Rightarrow q_1 = C_1 \cdot \Delta u_1$$

Al ser la carga final en C_1 menor, esta variación es negativa, lo que provoca una caída de tensión en los terminales del sistema que viene dada por el divisor capacitivo:

$$\text{Ec. V} \quad \Delta u = \frac{C_2}{C_3 + C_2} \Delta u_1$$

De la Ec. V no se obtiene ningún valor directo de la carga intercambiada en el defecto. Adicionalmente, Δu es un valor muy pequeño debido a la relación existente entre C_2 y C_3 (Ec. III), tanto es así, que su medición es dificultosa, por lo que ha de buscarse otra solución para poder medir la descarga.



En lugar de medir la tensión, se acude a la carga que ha de suministrarse al objeto de ensayo para compensar la descarga en el defecto. Para esto hay que tener en cuenta la capacidad del objeto de ensayo C_D :

$$Ec. VI \quad C_D = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \stackrel{Ec.II}{\Rightarrow} C_D \approx C_2 + C_3$$

$$Ec. VII \quad i(t) = C_D \cdot \frac{du(t)}{dt} \Rightarrow \int_0^T i(t) dt = C_D \cdot \int_{u_0}^u du(t) \Rightarrow q = C_D \cdot \Delta u$$

$$Ec. VIII \quad q = (C_2 + C_3) \cdot \Delta u \stackrel{Ec.V}{\Rightarrow} \mathbf{q = C_2 \cdot \Delta u_1}$$

A esta carga q se le llama *carga aparente*, este término viene contemplado en la IEC 60270 de la siguiente forma:

«La carga aparente q de un pulso de DP es una carga que, si inyectada en un corto lapso de tiempo entre los terminales del objeto de ensayo en un circuito de ensayo específico, daría la misma lectura en el instrumento de medida que el pulso de la DP en sí. La carga aparente es expresada habitualmente en pC.»

Como también se expresa en dicha norma, esta carga no es la carga real intercambiada en el defecto, de hecho, es mucho menor:

$$Ec. IX \quad \left. \begin{array}{l} \stackrel{Ec.IV}{\Rightarrow} q_1 = C_1 \cdot \Delta u_1 \\ \stackrel{Ec.VIII}{\Rightarrow} q = C_2 \cdot \Delta u_1 \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{q = \frac{C_2}{C_1} q_1} \quad \left(\stackrel{Ec.II}{\Rightarrow} C_1 \gg C_2 \right)$$

Además, la relación entre q y q_1 es desconocida, puesto que se desconoce la forma y tamaño del defecto. A pesar de este hecho, la carga aparente ha sido utilizada en la detección de DP, y se ha probado eficaz en esta labor y en mostrar la relación entre la magnitud de la descarga y la gravedad del defecto.

Al fin y al cabo, la relación entre C_2 y C_1 viene dada por:

$$Ec. X \quad \Rightarrow \frac{C_2}{C_1} = \frac{\varepsilon_2 \frac{A}{d_2}}{\varepsilon_1 \frac{A}{d_1}} \xrightarrow{d_2=e-d_1} \frac{C_2}{C_1} = \mathbf{k \frac{d_1}{e-d_1}}$$

Esta relación en función del tamaño del defecto no es lineal, sin embargo, para proporciones pequeñas de d_1 respecto del espesor e , como es el caso para los defectos intersticiales que se desean detectar en los ensayos, esa relación es prácticamente lineal y directamente proporcional (Fig. 14).

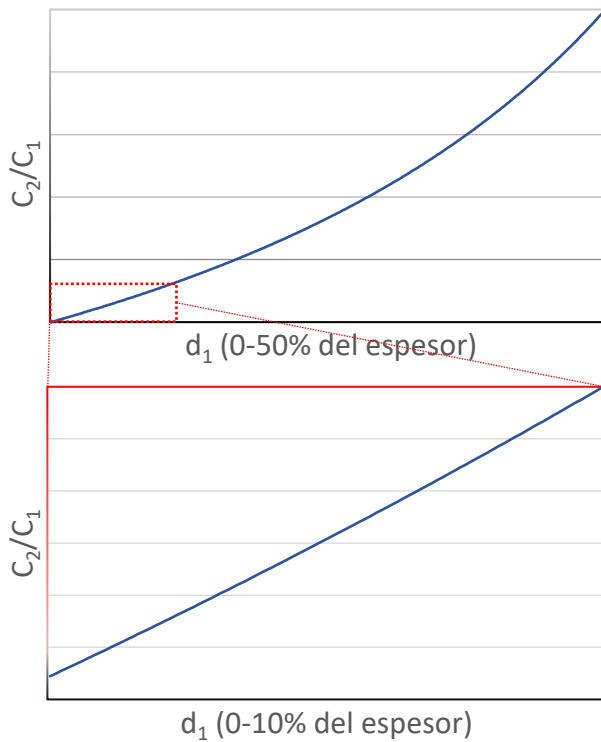


Fig. 14. Relación entre C_2 y C_1 en función del tamaño del defecto.

De modo que la carga aparente no es un valor real de la descarga, pero sí es útil para cuantificarla.

Los pulsos producidos en la descarga son muy pequeños y de elevada frecuencia. Esto supone que su medición directa sea poco factible. La solución es separar el dispositivo de medición a través de un condensador que lo proteja de la alta tensión y además haga las veces de filtro paso-alto. A continuación, se muestra el que es la base de los circuitos de medición de DP.

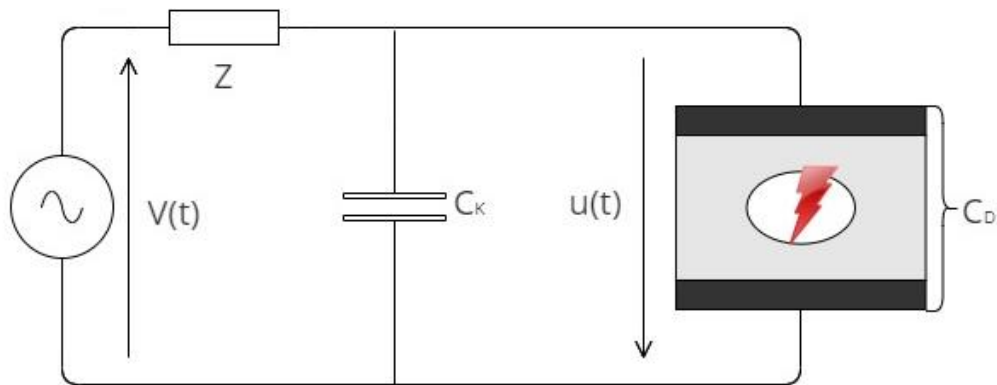


Fig. 15. Circuito de ensayo con condensador de acoplamiento.

Para este circuito se añade un condensador de acoplamiento C_k con el que poder medir la carga proporcionada por este elemento al objeto de ensayo en el instante de producirse la DP. Este condensador ha de ser de tamaño suficiente ($C_k \gg C_D$) para poder compensar prácticamente la totalidad de la caída de tensión Δu por sí mismo durante lapso de tiempo en que se produce la medición.

No obstante, esta condición $C_k \gg C_D$ no suele cumplirse en la realidad. Normalmente, la capacidad C_D suele ser considerable, de manera que adquirir un condensador de acoplamiento lo suficientemente grande en relación a su coste deje de resultar económico.

Por tanto, ha de tenerse en cuenta la caída de tensión que sufrirá C_K . Esta caída $\Delta u'$ tiene que servir para suministrar la carga aparente (Ec. VIII) luego:

$$Ec. XI \quad \xRightarrow{Ec.VIII} q = (C_2 + C_3) \cdot \Delta u = (C_K + C_2 + C_3) \cdot \Delta u'$$

$$Ec. XII \quad \Delta u' = \frac{q}{(C_K + C_2 + C_3)}$$

En función de esta caída de tensión vendrá dada la carga que se medirá:

$$Ec. XIII \quad q_m = C_K \cdot \Delta u'$$

$$Ec. XIV \quad q_m = C_K \cdot \Delta u' \xRightarrow{Ec.XII} q_m = \frac{C_K}{(C_K + C_2 + C_3)} q \xRightarrow{Ec.III} q_m \approx \frac{C_K}{(C_K + C_3)} q$$

$$Ec. XV \quad \frac{q_m}{q} = \frac{C_K}{(C_K + C_3)} \approx \frac{C_K}{(C_K + C_D)}$$

Consecuentemente, lo que se observa es que cuanto mayor sea la capacidad de nuestro condensador de acoplamiento con respecto a la del objeto de ensayo, se obtendrán lecturas de carga más similares a las de la carga aparente.

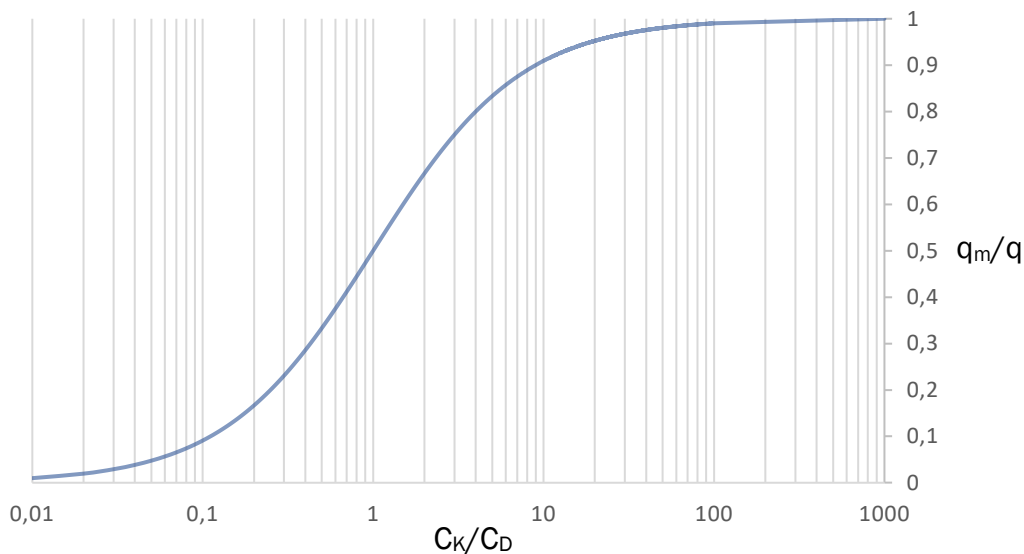
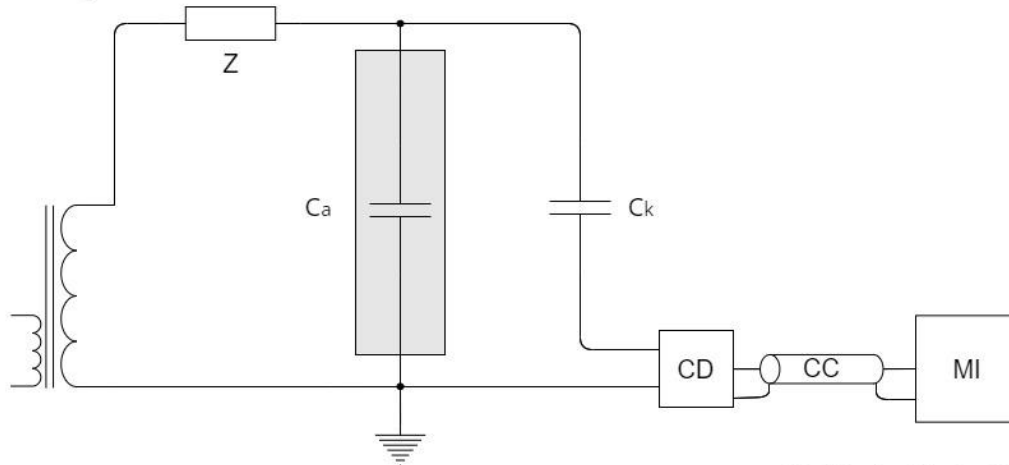


Fig. 16. Comparación de tamaño de q_m respecto q con respecto la relación entre C_K y C_D .

Disponer de condensadores, libres de DP, diez o cien veces superiores a la capacidad del objeto de ensayo es poco económico. Para solucionar esta particularidad, se recurre a la calibración del equipo antes del ensayo. Con la fuente de tensión apagada, se introduce una carga conocida, proporcionada por un calibrador, entre los terminales del objeto de ensayo. Con esto se puede dilucidar la diferencia entre la carga aparente y la medida en el condensador de acoplamiento, tras lo cual se puede realizar un ajuste de parámetros.

A partir de lo mostrado en el anterior apartado, la IEC 60270 recomienda una serie de circuitos para la realización de ensayos de DP en diversos ámbitos.

Visual Paradigm Online Free Edition



Visual Paradigm Online Free Edition

Fig. 17. Circuito de ensayo con detector de descargas en serie con el condensador de acoplamiento.

El esquema más habitual y también el que se emplea en el ensayo de las piezas que atañen a este trabajo, consiste en el uso de un equipo de acoplamiento (*CD - Coupling Device*) que transforma las señales de corriente medidas en su entrada en pulsos de tensión que son transmitidos a un instrumento de medida (*MI - Measuring Instrument*) a través de un cable de conexión (*CC*), de esta forma se puede digitalizar la señal. Todos los elementos partícipes han de estar libres de DP o, en su defecto, tener un nivel muy bajo o sencillo de discriminar, con el fin de poder obtener resultados adecuados.

En este proceso de manipulación de las mediciones, los pulsos de corriente pasan por un proceso de cuasi-integración. Como ya se ha comentado, los pulsos producidos por las DP son fenómenos de elevada frecuencia. A consecuencia, la cuasi-integración utiliza una limitación por ancho de banda, el cual puede ser amplio o estrecho.

En la cuasi-integración se aprovecha el hecho de que, en esa transformación de los pulsos de corriente a pulsos de tensión, el valor máximo de estos últimos es proporcional a la carga aparente contenida en los primeros. Una vez digitalizada la señal esta se modifica para conservar y mostrar la mayor cantidad de información posible acerca de la descarga.

Si se utiliza un ancho de banda amplio, según la IEC 60270, este ha de tener los siguientes rangos de frecuencias de limitación: $30 \text{ kHz} < f_1 < 100 \text{ kHz}$, $f_2 < 1 \text{ MHz}$ (500 kHz antes de 2015) y $f_2 - f_1 = \Delta f < 900 \text{ kHz}$ (400 kHz antes de 2015). La ventaja de este ancho de banda, es que puede lograr una información bastante completa de la DP pudiendo discriminar señales que no interesan al objeto del ensayo, como puedan ser las ondas de radio.

Ha de tenerse en cuenta que un ancho de banda muy amplio además puede provocar el solapamiento de pulsos en la medición, lo que daría lugar a un error en la integración. Para ello ha de tener en cuenta el tiempo de resolución de pulso T_r , que según la norma se define como:

« Intervalo de tiempo más corto entre dos pulsos entrantes consecutivos de corta duración, misma forma, polaridad y magnitud de carga para el cual el valor de pico de la respuesta resultante cambiará por no más del 10% del de un único pulso.

El tiempo de resolución de pulso es en general inversamente proporcional al ancho de banda Δf del sistema de medida. Es una indicación de la capacidad del sistema de medida para resolver eventos de DP sucesivos.»

Existe también la posibilidad de acudir a un ancho de banda estrecho, también contemplado en la norma IEC 60270, con los siguientes valores: $9 \text{ kHz} < \Delta f < 30 \text{ kHz}$ y $50 \text{ kHz} < \frac{f_1+f_2}{2} < 1 \text{ MHz}$. Con un ancho de banda estrecho se puede lograr eliminar buena parte de las señales externas, como aquellas producidas por inversores, además de reducir considerablemente el problema del solapamiento de pulsos. Sin embargo, a cambio se pierde bastante información de la descarga, como la polaridad, la cual puede resultar muy útil para identificar el tipo de señal.

3.3.3 IDENTIFICACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

Cinco parámetros son fundamentales para la identificación de DP: la magnitud de carga aparente, la posición de la descarga con respecto a la fase de onda de excitación, el número de pulsos y las tensiones de aparición y extinción de la descarga. Estos datos una vez procesados de la señal, se muestran en lo que se conoce como patrón ϕ - q - n o PRPD de sus siglas en inglés para *Descargas Parciales Resueltas en Fase*.

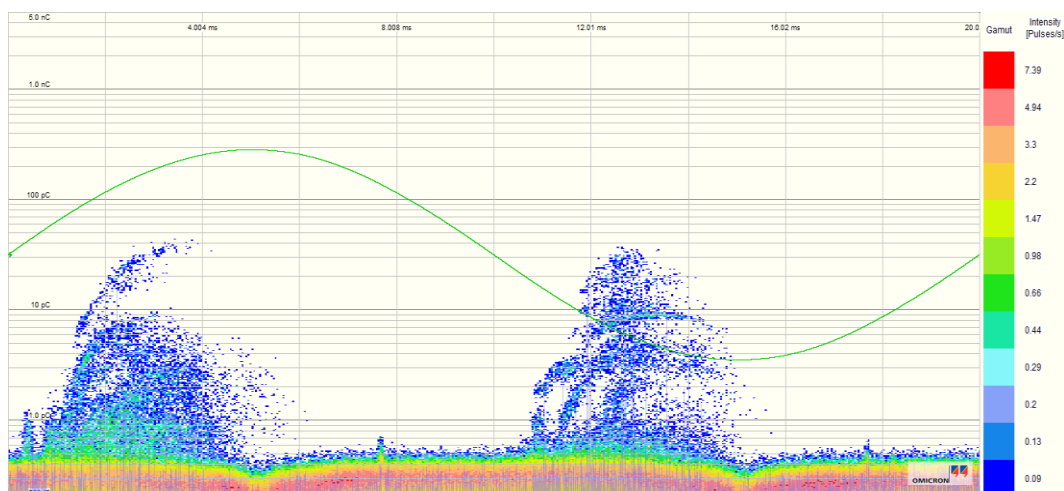


Fig. 18. Patrón PRPD unipolar de un cable aislado de media tensión. Ensayo realizado en el laboratorio de alta tensión de Vulcanizados Álvarez.

La forma y distribución de una DP es una herramienta que puede resultar de utilidad para ubicar el origen de esta, pudiendo en ocasiones diferenciar entre coronas, descargas superficiales, descargas internas o incluso potenciales flotantes o malas conexiones. Esto es de especial interés para diferenciar entre descargas originadas del propio objeto de ensayo o del equipo. En última instancia, para catalogar un objeto ensayado como defectuoso, se acude a la magnitud de las descargas observadas, la cantidad de estas y a la tensión a la que aparecen y desaparecen.

DESCARGAS INTERNAS

Acostumbran a presentarse como descargas simétricas, siguiendo la forma de la onda. Suelen empezar antes de los ceros y concluir antes de $90^\circ/270^\circ$ de fase, aunque pueden prolongarse algo más. La magnitud de la descarga aumenta con la tensión.

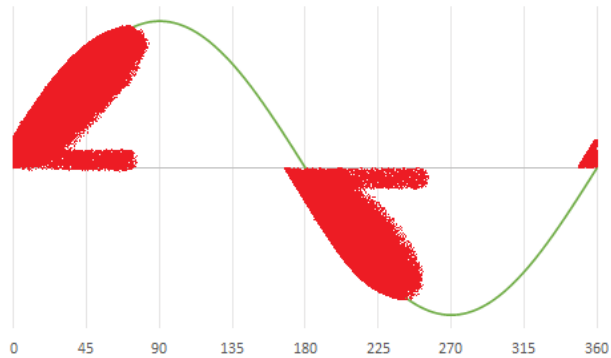


Fig. 19. Esquema de descargas internas en PRPD.

DESCARGAS SUPERFICIALES

Paralelamente a las descargas internas, también acostumbran a guardar cierta simetría, aunque de forma menos habitual. Suelen presentar mayor dispersión y comenzar tras los ceros de onda. La descarga también aumenta con la tensión.

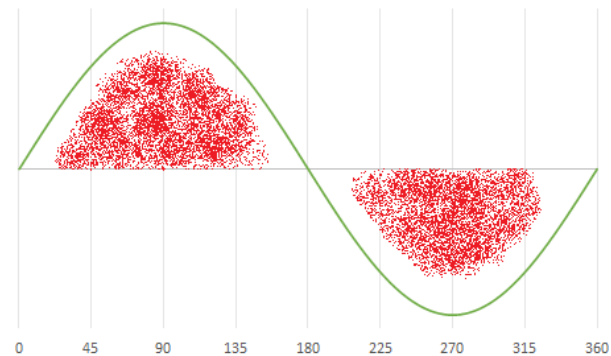


Fig. 20. Esquema de descargas superficiales en PRPD.

DESCARGAS DE CORONA

Son fuertemente asimétricas y muy concentradas. Habitualmente se sitúan en torno a los 90° y 270° . Una vez aparecen, suelen ser constantes, apenas variando la magnitud de descarga con el incremento de tensión.

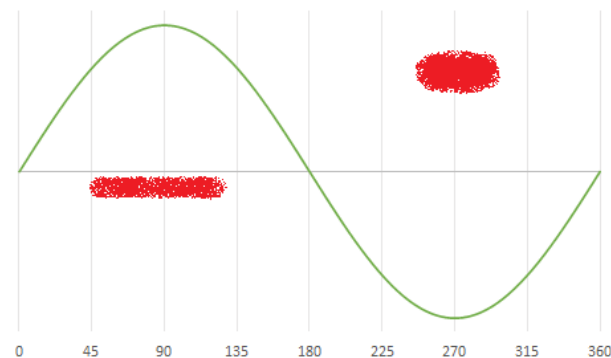


Fig. 21. Esquema de descargas de corona en PRPD.

Estas indicaciones pueden ser de mucha utilidad. Pero debido a la variabilidad de los factores que afectan a las descargas, no es extraño que la forma que presenten sea diversa y confusa.

Por otra parte, la identificación de ruidos externos provocados por aparatos electrónicos o máquinas suele ser más simple, puesto que aparecen en forma de descargas muy particulares que, en ocasiones, se desplazan horizontalmente por el diagrama. Además, es sencillo aislarlos ya que, al no depender de la fuente de tensión que se controla durante el ensayo, son visibles aun con esta apagada. Para evitarlos ha de tenerse un buen apantallamiento de los equipos implicados en los ensayos, haciendo uso de jaulas de Faraday y teniendo un aislamiento efectivo de las tierras empleadas.

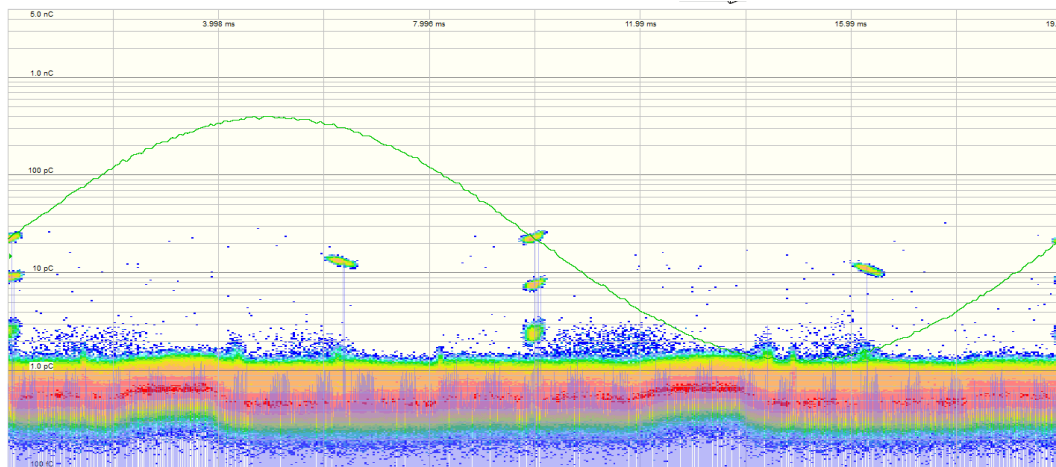


Fig. 22. Ruido provocado por una máquina de producción en funcionamiento detectado en el laboratorio de alta tensión de Vulcanizados Álvarez.

Aún con todo, puede llegar a ser muy complejo el discernir entre descargas relevantes y descargas secundarias cuando se ensayan piezas en serie. Debido a la naturaleza de los ruidos y los factores que pueden afectar en que según qué descarga se produzca, hacen que muchas piezas que presenten descargas de algún tipo se tachen de defectuosas, preventivamente, para evitar que lleguen a su destinatario final. Como en la mayoría de ámbitos, la experiencia es un factor clave de manera que, una vez se dispone de una base estadística de ensayos suficientemente amplia, es más sencillo encontrar el origen de las descargas, permitiendo optimizar tanto el proceso productivo como el de ensayo.

4 INTRODUCCIÓN A FEMM 4.2

Conocer la distribución del campo eléctrico es un factor fundamental para predecir el comportamiento de un aislamiento al verse sometido a alta tensión. Esto se utiliza tanto de cara al diseño de la pieza como al estudio de los defectos que pueda tener. Este apartado pretende realizar una introducción al software de elementos finitos FEMM 4.2, el cual se ha empleado para realizar simulaciones del campo eléctrico de las piezas estudiadas.

FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), es un software libre desarrollado por David Meeker [17], que utiliza el método numérico de elementos finitos para realizar simulaciones en dos dimensiones de problemas magnéticos, térmicos, de flujo de corriente y electrostáticos.

El método de elementos finitos (MEF) permite dar solución a problemas con geometrías complejas, cuya base son ecuaciones diferenciales. Esto se consigue a partir de la discretización y división del problema en elementos más pequeños con geometrías simples, generalmente triángulos, para los cuales resolver las ecuaciones diferenciales asociadas a ellos es más sencillo. De esta manera, cuando se ponen todos los elementos y sus soluciones en conjunto, se logra obtener un resultado aproximado, que será más preciso cuanto mayor sea el número de elementos participantes. Esto por supuesto, requiere de un ordenador que habrá de ser más potente a medida que aumente el tamaño del problema y las subdivisiones que se hagan de este.

Para el objeto de este trabajo, interesa únicamente las simulaciones de campo electrostático que permite realizar FEMM. La base teórica que utiliza el programa viene especificada en su manual de usuario [17].

En problemas de electrostática, el programa considera al campo eléctrico E [V/m] y la densidad de flujo eléctrico o desplazamiento eléctrico D [C/m²]. Ambos parámetros están relacionados por la siguiente ecuación:

$$\text{Ec. XVI} \quad D = \varepsilon E$$

Aquí aparece la constante ε , la permitividad absoluta, característica propia de cada material y que se expresa en C²/Nm² o en F/m. A su vez, D y E se ven condicionadas por las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\text{Ec. XVII} \quad \nabla \cdot E = \frac{q}{\varepsilon_0} \xrightarrow{\text{Medio material}} \nabla \cdot D = \rho$$

$$\text{Ec. XVIII} \quad \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \xrightarrow{\Delta B=0} \nabla \times E = 0$$

La Ec. XVII se refiere a la forma diferencial de la primera ecuación de Maxwell o Ley de Gauss, que establece que el flujo neto a través de una superficie cerrada cualquiera es igual a la carga puntual que genera el campo, dividida entre la permitividad en el vacío ϵ_0 . Esto aplicado en un medio material, con una carga de forma y volumen cualquiera acaba reduciéndose a esta ecuación XVII, donde ρ corresponde a la densidad de carga del medio.

Por otra parte, la Ec. XVIII se refiere a la tercera ley de Maxwell o Ley de Maxwell-Faraday. En esta ecuación se realiza una simplificación ya que el programa solo considera campo electrostático, por tanto, no existe variación del campo magnético. Finalmente, de Ec. XVI y Ec. XVII se obtiene la ecuación de Poisson, denominada ecuación de cuando $\rho = 0$:

$$\text{Ec. XIX} \quad E = -\nabla V \xrightarrow{\text{Ec. XVI}} D = -\epsilon \nabla V \xrightarrow{\text{Ec. XVII}} \nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

De esta forma, FEMM resuelve el problema para V a partir de unos parámetros y condiciones de contorno introducidas para una geometría. Los problemas resueltos en este trabajo, como se verá más tarde, se han logrado únicamente introduciendo como parámetros la permitividad de cada material y las tensiones del electrodo de alta y de tierra.

4.1 EJEMPLO DE CAMPO ELECTROSTÁTICO

En este apartado se realizará un breve ejemplo que servirá de base para mostrar cómo se han realizado las simulaciones que se mostrarán de aquí en adelante.

En este ejemplo, se va a simular una placa de silicona de 20 mm de espesor, puesta en tensión a 10000 V, a través de dos electrodos:

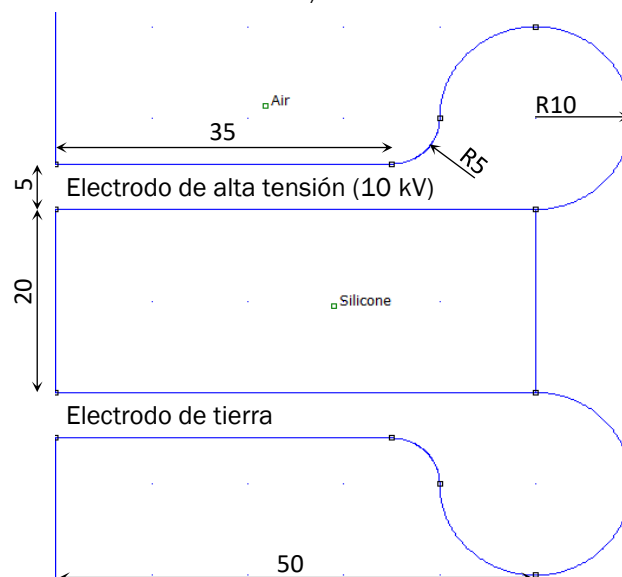



Fig. 23. Ejemplo de una sección-mitad de silicona sometida a tensión con dos electrodos.

4.1.1 CREACIÓN DE UN NUEVO PROBLEMA

Para crear este problema, se crea un archivo nuevo en FEMM. En la barra de herramientas, se selecciona el icono . Inmediatamente, este despliega el siguiente menú con las distintas opciones de tipos de problema que permite simular el programa, del cual se escogerá el tipo *Electrostatics Problem* el cuál es el que interesa al objeto de estudio:

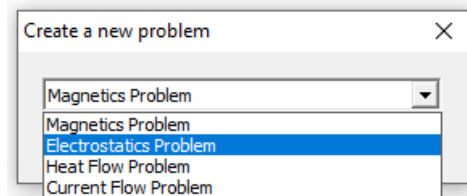


Fig. 24. Menú de tipo de problema.

4.1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El siguiente paso es definir las características del problema. En la barra de opciones, se selecciona el campo *Problem*, que despliega otro menú:

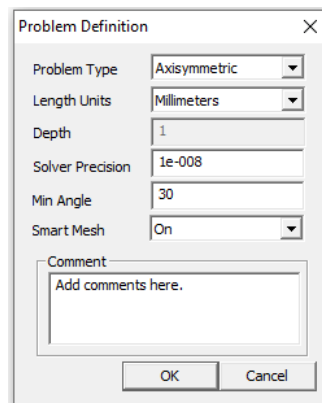


Fig. 25. Menú de definición del problema.

En *Problem Type* aparecen dos opciones, *Planar* y *Axisymmetric*. En el tipo de problema *Planar*, FEMM interpreta que la geometría dibujada es la misma para una profundidad infinita en la dirección perpendicular al plano de trabajo. De tal forma, que si se dibujase un círculo, la simulación correspondería a la sección de un cilindro de longitud infinita. La otra opción, *Axisymmetric*, toma el dibujo como un plano de revolución, que rotará en torno al eje $[0,z]$. Así, un semicírculo cuyo diámetro pase por este eje, será interpretado como un esfera en la simulación.

En la opción *Length Units*, se seleccionan las unidades del programa correspondientes a las coordenadas de dibujo. Si se tomásen milímetros, por ejemplo, las coordenadas $[15,10]$, corresponderían a un punto situado a 15 mm y 10 mm del origen en las direcciones horizontal y vertical respectivamente.




El valor *Depth*, solo disponible en el modo *Planar*, establece el valor de profundidad, en las unidades del problema seleccionadas, para el cálculo de valores de integración posteriores a la obtención del resultado de la simulación.

Solver Precision caracteriza la precisión de los resultados obtenidos. El valor introducido corresponde a la diferencia entre los valores de la última y penúltima iteración realizada.

Min Angle corresponde al ángulo mínimo que pueda poseer cualquiera de los triángulos que formen el mallado. El máximo ángulo que puede introducirse es de 33.8°. En principio, este valor es recomendable no manipularlo.

Por último, *Smart Mesh* afecta al modo de generación del mallado. De igual forma que el anterior, es recomendable dejar este valor en *On*, como viene definido por defecto.

4.1.3 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA

La geometría se crea a través de puntos , segmentos  y arcos . Solo los puntos tienen libertad de posicionamiento, siendo estos la base de creación de dibujo. Estos pueden posicionarse bien clicando simplemente sobre el plano de dibujo con el ratón o a través de la introducción de coordenadas pulsando la tecla *Tab*. Esta última forma es la más precisa, al hacerlo se desplegará un menú que pedirá la introducción de los valores de coordenadas [x,y] en modo *Planar* y [r,z] en *Axysymmetric*.

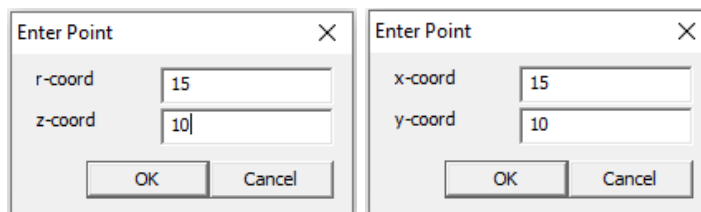




Fig. 26. Cuadro de diálogo para introducir coordenadas de un punto en modo *Axysymmetric* (izquierda) y *Planar* (derecha).

Puede crearse puntos con el ratón con cierta precisión activando el botón , que posiciona los puntos en los nodos de la rejilla, cuyo tamaño puede regularse con el botón , situado debajo de este.

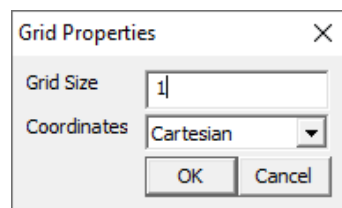


Fig. 27. Cuadro de diálogo para modular la rejilla.

Los segmentos de recta por su parte simplemente han de crearse entre dos puntos ya existentes clicando sobre ellos con el botón izquierdo del ratón. Los arcos de circunferencia, de la misma forma, también se crean entre dos puntos, pero además, tras seleccionar los puntos deseados, se abrirá una pestaña pidiendo el ángulo a introducir deseado. Este ángulo de 1 a 180°, corresponde a la porción de circunferencia que pasa por los dos puntos. De esta forma si se escoge un valor de 180°, el segmento que une los dos puntos sería el diámetro completo de la circunferencia completa que contiene el arco creado.

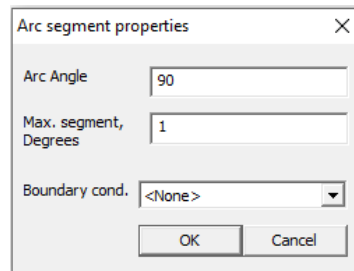


Fig. 28. Cuadro de diálogo para caracterizar un arco de circunferencia.

Cabe añadir que también es posible importar planos de otros programas como AutoCAD en formato DXF.

4.1.4 INTRODUCCIÓN DE MATERIALES

En cuanto a los materiales, cada área cerrada ha de tener una etiqueta que especifique el material que la compone. En electrostática de FEMM, de cada material solo se puede definir la permitividad relativa para los ejes x e y, y la densidad de carga si se desea. Pinchando en *Properties > Materials* se despliega el siguiente menú:

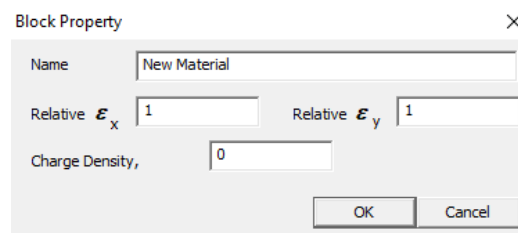



Fig. 29. Cuadro de diálogo para introducir materiales.

Para este ejemplo, se han definido dos materiales: aire y silicona. La permitividad relativa del aire es aproximadamente 1, para la silicona se ha tomado un valor de 3. Las partes metálicas quedan fuera de la definición de materiales, puesto que no se habla de permitividad en metales. La carga se acumulará en su superficie y el campo en su interior será nulo. A mayores, FEMM posee una pequeña librería de materiales en *Properties > Materials Library*. Al clicar, se abrirá un cuadro de diálogo donde en la parte izquierda estarán los materiales de la librería y en la derecha los del problema. Pueden añadirse materiales arrastrándolos desde la lista de la izquierda a la derecha.

Para agregar los materiales al dibujo hay que agregar una etiqueta . Al clicar en este botón, puede posicionarse la etiqueta donde se desee con el botón izquierdo del ratón, del mismo modo que un punto. En el punto 3.1.6 se explica cómo asociar un área a un material.

4.1.5 CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno suponen el último paso antes de poder simular. FEMM, al igual que cualquier problema que use el MEF, necesita tener unos límites entre los que realizar el cálculo diferencial. En el caso de electrostática, estos límites los establece una tensión o un valor de carga. Preferiblemente se trabaja con tensiones, puesto que es un valor más sencillo de conocer en la práctica. En FEMM, hay dos forma de establecer estos límites. Una es pulsando en *Properties > Conductors*. Al hacerlo aparece el siguiente cuadro:

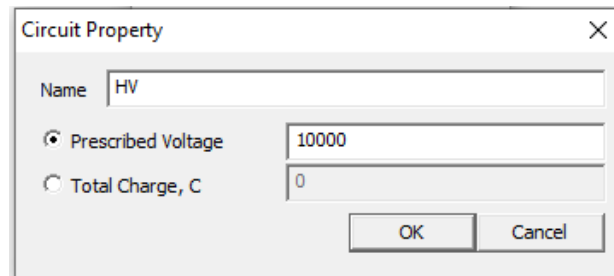


Fig. 30. Cuadro de diálogo para introducir conductores.

Los conductores son una propiedad de los segmentos, arcos y puntos del dibujo. Esta se introduce seleccionándolos con el botón derecho del ratón, tras lo cuál se tornarán en rojo. Después se pulsa la barra espaciadora apareciendo el siguiente cuadro donde puede seleccionarse la propiedad de conductor que se desee:

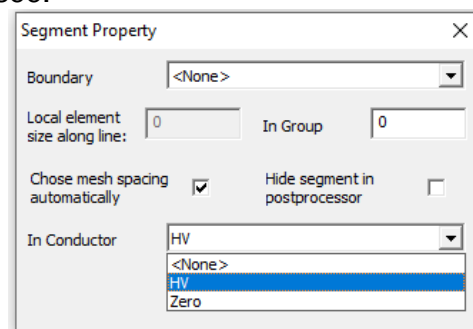


Fig. 31. Cuadro de diálogo de propiedades de un segmento.

No suele ser necesario caracterizar los puntos de un electrodo con un valor de tensión, con hacerlo para las rectas y curvas que lo formen es suficiente. En el caso del ejemplo, los conductores creados son: *HV* con una tensión de 10000 V y *Zero* a 0 V.

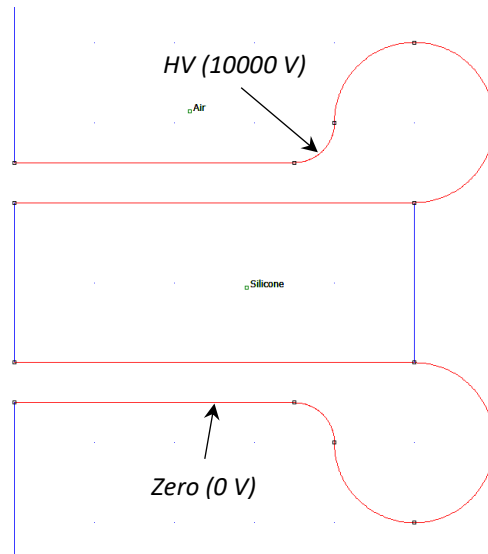


Fig. 32. Indicadas en rojo las zonas caracterizadas como conductor.

Tras esto, solo falta acotar el resto del dibujo bajo una condición. Aquí hay dos opciones, escoger una condición abierta o una cerrada. Una cerrada sería tan sencillo como encerrar el dibujo bajo una geometría, por ejemplo un rectángulo, y poner este adecuadamente a una tensión, habitualmente a 0 V.

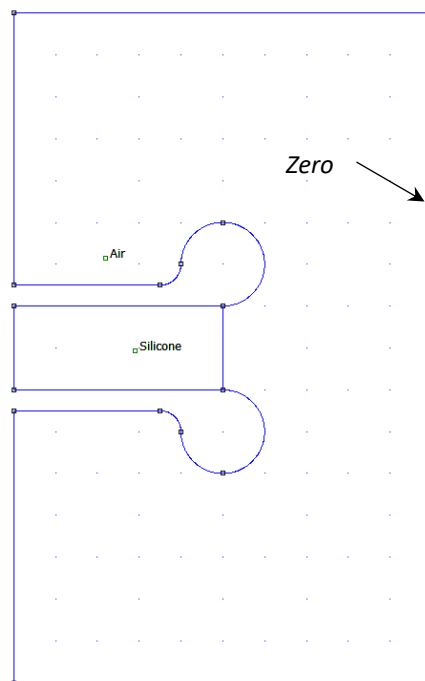



Fig. 33. Condición de contorno cerrada con un rectángulo.

Lo que se obtendría de la Fig. 33, es que los electrodos estarían encerrados en el interior de un cilindro de altura infinita, puesto a tierra. Si la cara superior e inferior también estuviésemos a tierra, el cilindro tendría la longitud acotada por las dimensiones de la geometría del problema.

Si se quieren escoger unas condiciones de contorno abierta, FEMM ofrece la posibilidad de hacerlo pulsando el botón , que despliega el siguiente cuadro:

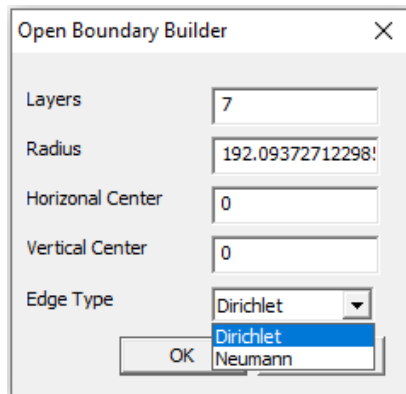


Fig. 34. Cuadro de diálogo para introducir condiciones de contorno abiertas.

Esta opción generará una serie de semicircunferencias (circunferencias completas en el modo *Planar*). El número de estas se controla con el campo *Layers*. Los tres campos siguientes permiten controlar la posición y el tamaño de la más pequeña, siendo el resto proporcionales y concéntricas. Por último se ofrecen dos opciones. La primera (*Dirichlet*) establece una condición de contorno donde se cumple $V=0$. La segunda (*Neumann*) define $\partial V/\partial n=0$. Los resultados son muy similares entre ambos modelos, por lo que a priori, para el caso que atañe a este trabajo, es indiferente cuál se escoja. La condición de contorno de Dirichlet será pues la elegida.

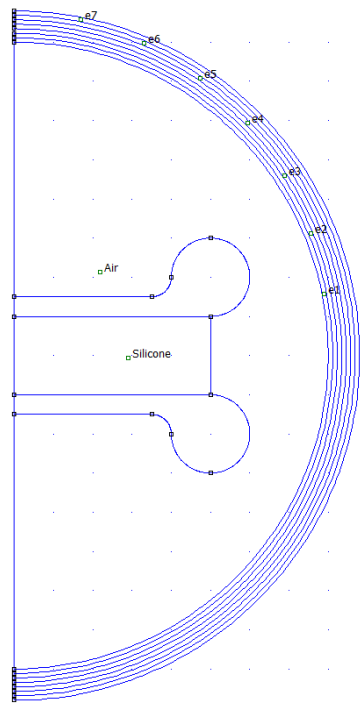


Fig. 35. Condición de contorno de Dirichlet

Por defecto el programa dibuja 7 circunferencias concéntricas con un radio y centro que intente englobar el problema entero. En este caso se escoge que el centro sea el (0,0) para poder atravesar una recta con la que partir las circunferencias a la mitad, puesto que la solución vendrá condicionada por la simetría del problema. El resultado de esta condición sería suponer que los electrodos se encuentran en el vacío, de tal forma que dentro del dibujo los resultados serían considerados teniendo en cuenta que la tensión es 0 en el infinito.

4.1.6 MALLADO

Por último, se llega al mallado. Este último paso es la base del MEF. La malla solo se genera en las áreas cerradas caracterizadas por un material. Al hacer clic derecho sobre una etiqueta del problema y después pulsar la barra espaciadora aparece el siguiente menú:

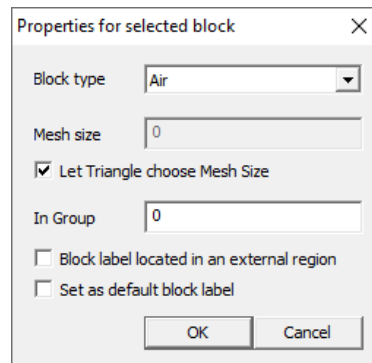



Fig. 36. Cuadro de propiedades de una etiqueta.

Aquí, en *Block type*, se selecciona el material asociado a un área cerrada. En *Mesh size*, desactivando el tick inmediatamente debajo, puede seleccionarse el tamaño de los triángulos del mallado. Cuánto más grandes, se obtienen resultados con menor precisión pero se requieren de menos recursos de computación. Siendo más pequeños el efecto es el opuesto. No obstante, ha de tenerse precaución, por debajo de 0.5 el tiempo de simulación aumenta considerablemente.

Para visualizar el mallado, ha de pulsarse el botón . Esto solo es necesario si se quiere ver algún aspecto de la malla. Esto puede ser útil para asegurarse de que todas las partes del problema que lo requieran han sido etiquetadas con un material o que el mallado es adecuado. Al activar esta opción, aparecerá lo mostrado en la siguiente imagen junto con un cuadro del número de nodos generados.

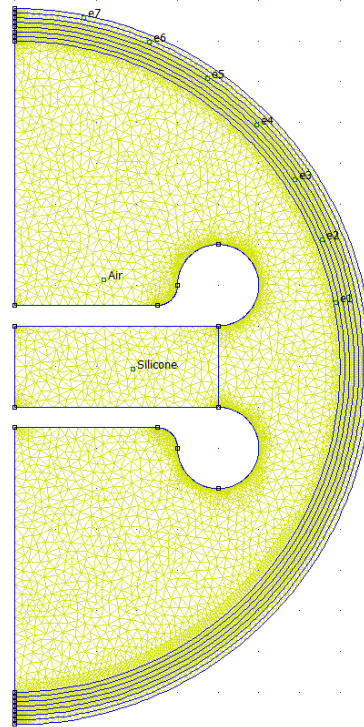


Fig. 37. Mallado del problema con 11306 nodos.

Se puede apreciar que las zonas con curvaturas más pronunciadas son donde mayor densidad de nodos hay. Esto es para mejorar la precisión de los resultados, ya que en esas zonas es donde el campo será más intenso. El mallado no se crea en el interior de los electrodos puesto que, como ya se ha comentado, no es necesario saber la solución en su interior por ser conductores. Si una zona no estuviese etiquetada por un material, aparecería en color gris.

Un problema muy habitual cuando se importan planos complejos en DXF, es la creación de dobles arcos de circunferencia en la misma cara. Entre ellos queda un área sin etiquetar y a simple vista no pueden verse, únicamente aumentando el zoom considerablemente. Otro problema habitual es la creación de puntos o rectas huérfanas, que no engloban ningún área. Ambos fallos impiden resolver el problema hasta que no se eliminen.

4.1.7 SIMULACIÓN

Para obtener los resultados, primeramente hay que pulsar el botón . En caso de que el mallado no estuviese generado, este se creará automáticamente al pulsar el botón. Aparecerá un cuadro con una barra de carga y una vez desaparezca se habrá calculado la solución. Para poder verla hay que pulsar el botón , tras lo cual se podrá observar lo mostrado en la siguiente imagen.

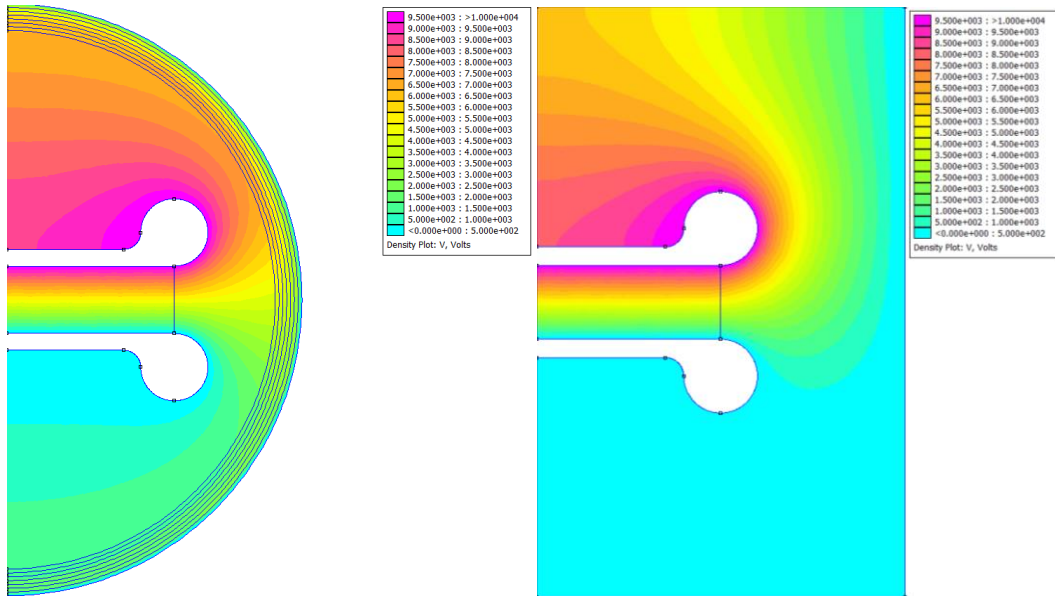





Fig. 38. Simulación del potencial eléctrico para condición de contorno abierta (izquierda) y cerrada (derecha).

El primer resultado ofrecido en pantalla es la distribución de potencial. Siempre va asociada una leyenda de colores. En la ventana de visualización de resultados, la barra de herramientas es diferente. Las tres funciones de más relevancia son las de los botones   .

 muestra las líneas equipotenciales. Al pulsarse aparece este cuadro:

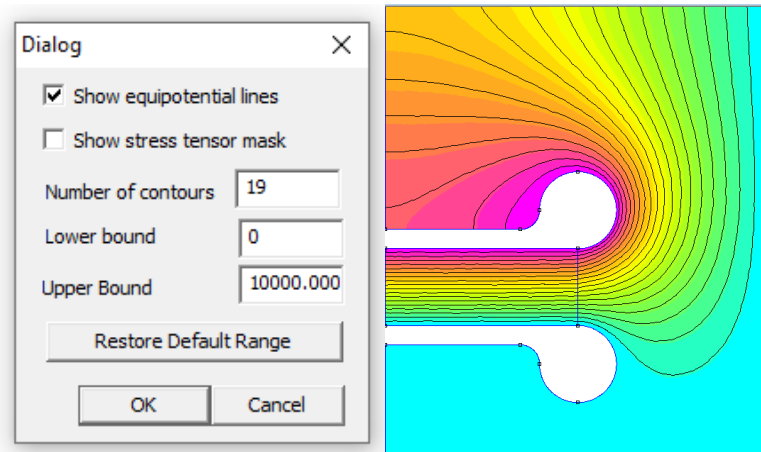



Fig. 39. Cuadro de diálogo para obtener líneas equipotenciales y resultado.

Al marcar el primer campo con un tick, tras pulsar OK aparecerán las líneas equipotenciales. En el cuadro pueden escogerse el número de estas y el rango de tensión deseados.

 corresponde a la manipulación del mapa de densidades mostrado. Esta función es una de las más interesantes de los programas de MEF, puesto que permiten visualizar fácilmente las zonas con campo eléctricos elevados o tensiones irregulares. Al pulsarlo aparece una ventana de diálogo similar a la anterior:

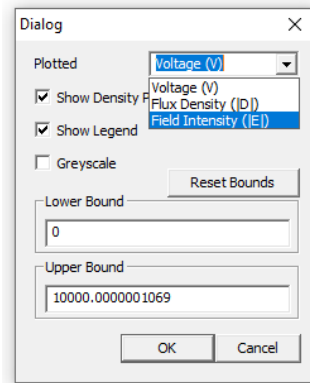


Fig. 40. Ventana de manipulación del mapa de densidades.

Se ofrecen tres mapas. Uno ya se ha mostrado, el de tensiones. Las otras opciones son para el campo eléctrico (E) y para el desplazamiento eléctrico (D). En la parte inferior del cuadro se puede regular el rango de valores para los colores menos y más intenso. El mapa de campo eléctrico es el más útil para observar de un vistazo las zonas que puedan dar o no descargas.

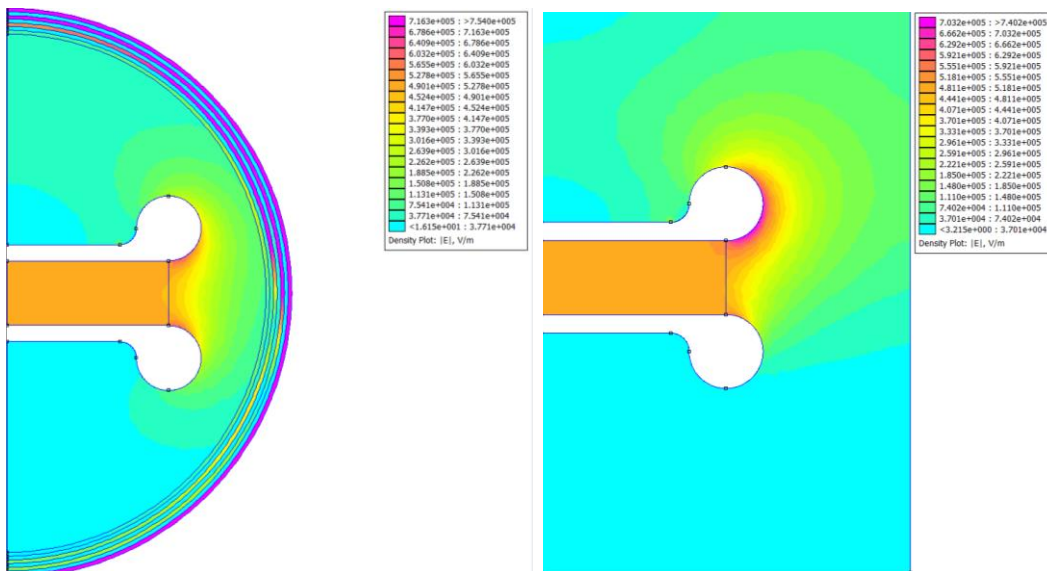



Fig. 41. Simulación del campo eléctrico en ambos problemas.

La última función , se utiliza para representar el campo vectorial tanto de campo eléctrico como de desplazamiento eléctrico. Una vez más, al pulsar aparece un cuadro de diálogo:

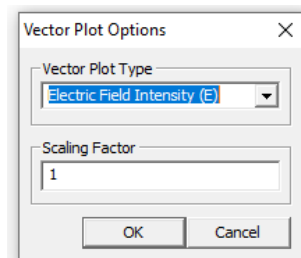


Fig. 42. Cuadro de diálogo para representación de campos vectoriales.

En ese cuadro se ofrece la posibilidad de escoger el campo vectorial deseado entre las dos opciones ya mencionadas. El segundo parámetro establece el factor de escala de los vectores para poder variar su tamaño.

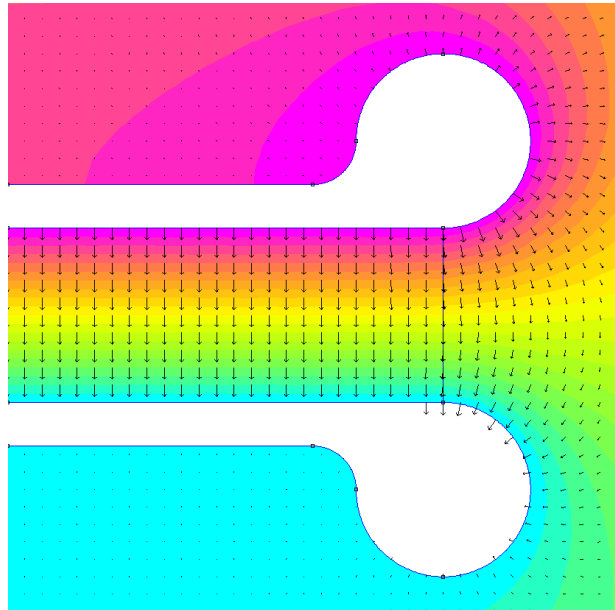



Fig. 43. Vectores de campo eléctrico.

El resultado es el mostrado en la imagen de arriba. Se genera un vector por cada punto de la rejilla. Es decir, que hay que recurrir nuevamente al botón  para manipular el número de vectores que aparecen en pantalla. Estos tendrán la dirección del campo en el punto de la rejilla en el que estén y su tamaño dependerá de la magnitud del parámetro representado.

La última herramienta de utilidad que se va a comentar es *Point Props*. Por defecto, una vez se visualiza el resultado de la simulación aparece un cuadro indicando el número de nodos y elementos. Al clicar en el dibujo, aparecerán los datos del punto donde se ha pinchado. Pulsado la tecla *Tab* también pueden escogerse las coordenadas del punto del que se deseen saber sus propiedades.

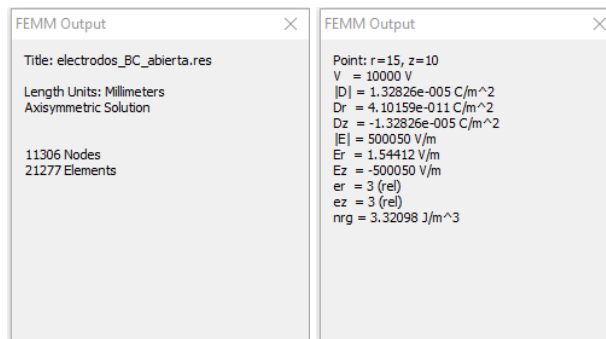


Fig. 44. Cuadro de datos de *Point Props*. A la izquierda el cuadro por defecto y a la derecha el cuadro de propiedades de un punto en concreto. [15,10] en este caso.



En caso de que no aparezca este cuadro de información porque se haya cerrado intencionalmente o sin querer, puede volver a mostrarse en *View > Point Props*, pulsando sobre este campo tras lo cual aparecerá un tick a su izquierda.

Con esto concluye el ejemplo. Se ha mostrado cuál es el funcionamiento básico de FEMM 4.2 para problemas de campo electrostático, desde la definición del problema, pasando por el dibujo de la geometría hasta llegar a la simulación acotada por unas condiciones de contorno. El resto de simulaciones que aparecen en este trabajo han sido creadas y dibujadas en FEMM. De lo contrario será indicado.

5 CAMPO ELÉCTRICO EN DIELECTRICOS

Este apartado tiene por intención explicar conceptos básicos y fundamentales para comprender cómo se comporta el campo eléctrico cuando interacciona con diferentes medios dieléctricos.

Primeramente, es necesario explicar qué es un dieléctrico. El término procede del griego, el prefijo *dia-* se refiere habitualmente a “a través de”, por tanto, un material dieléctrico es aquel que permite que el campo eléctrico lo atraviese. Son materiales con permeabilidad eléctrica. Suele utilizarse para denominar materiales aislantes. Un conductor, no puede ser atravesado por un campo eléctrico puesto que al permitir la libertad de movimiento de cargas, estas se ven alteradas por cualquier campo incidente, creando un campo eléctrico resultante nulo en el interior del conductor. No obstante, el término aislante suele emplearse más en el sentido de la capacidad de un material para soportar campos eléctricos intensos, no siendo estrictamente equivalente con la dielectricidad [10].

5.1 COMPORTAMIENTO RESPECTO A LA PERMITIVIDAD

La característica fundamental de un dieléctrico es la permitividad. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, es un valor propio de cada material. Expresa la tendencia de las moléculas que lo conforman a polarizarse ante la presencia de un campo incidente. A mayor permitividad, mayor polarización. Consecuentemente, estas moléculas forman un campo en el material contrario al incidente. Es decir, se almacena energía en forma de campo eléctrico. Aquellas sustancias compuestas por elementos fuertemente apolares tendrán permitividades más pequeñas, como los gases. Otras sustancias más polares, como el agua, tiene permitividades elevadas.

La permitividad es un valor que no es constante para cualquier situación ya que depende de la temperatura y de la frecuencia del campo eléctrico incidente. El estudio que se va a realizar en este trabajo está orientado a aislantes que van a trabajar en condiciones constantes. Por lo que con objetivo de simplificar el marco teórico, la permitividad se tomará como una constante durante todos los desarrollos y simulaciones.

Puesto que se dispone de un software de simulación, el uso de ejemplos es la mejor forma de visualizar el comportamiento del campo con medios dieléctricos. Para ello se va a comenzar con un problema muy simple. Este consiste en un cuadrado de 100 mm de lado relleno de un material con $\epsilon_r=1$. El lado izquierdo se encuentra a 1000 V y el derecho a cero. Haciéndose en modo *Planar*, FEMM considerará que el dibujo es el corte transversal de un prisma de longitud infinita.

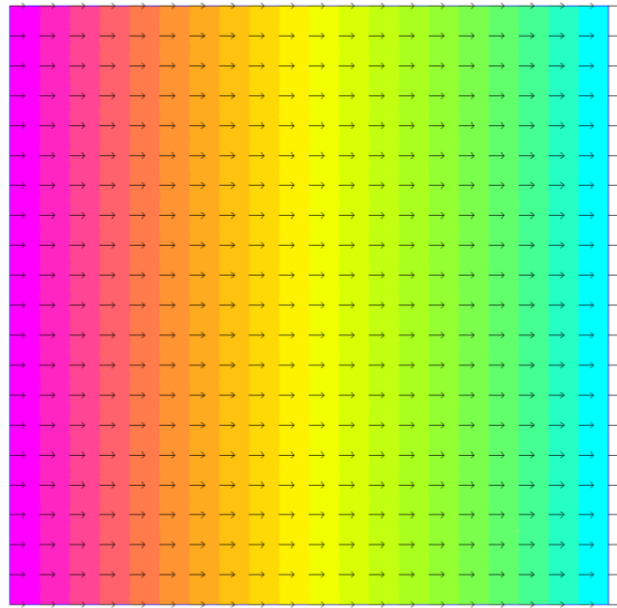


Fig. 45. Ejemplo de campo eléctrico uniforme.

Como resultado, se obtiene un gradiente de potencial uniforme que consecuentemente generará un campo eléctrico uniforme. Este campo tendrá un valor igual a:

$$Ec. XX \quad E = \frac{V}{d} = \frac{1000}{0.1} = 10000 \text{ V/m}$$

Con la función *Point Props* puede comprobarse que esto es así. Seleccionando cualquier punto pueden conocerse sus propiedades, entre las cuales el módulo de E y la componente del eje x tienen un valor de 10000 V/m:

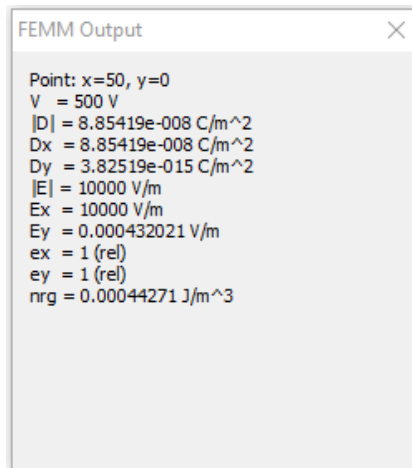


Fig. 46. Propiedades del punto central del ejemplo anterior.

Por tanto, queda comprobado que el campo eléctrico es proporcional a la diferencia de potencial entre dos puntos e inversamente proporcional a la distancia que los separa. Además es independiente en este caso de la permitividad del medio.

Qué pasa si el campo eléctrico atraviesa dos medios con distinta permitividad. La siguiente imagen muestra el mismo caso, pero ahora la primera mitad del cuadrado esta formada por un material con una permitividad del doble de la del material de la segunda mitad.

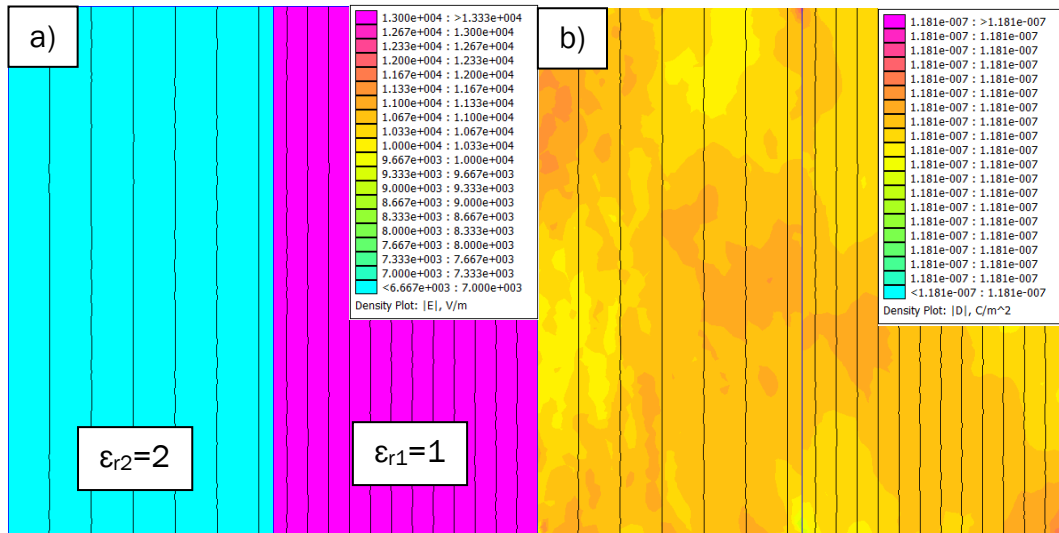


Fig. 47. Ejemplo de dos medios sometidos a un campo uniforme. a) Campo eléctrico y líneas equipotenciales. b) Desplazamiento eléctrico y líneas equipotenciales.

El campo eléctrico en el material con permitividad $\epsilon_{r1}=1$ es exactamente el doble que el campo en el material con $\epsilon_{r2}=2$ (Fig. 47a). En la Fig. 47b, se muestra el desplazamiento eléctrico, que es constante para ambos medios. La diferencia de colores se debe a pequeñas variaciones producidas por la precisión del cálculo, si se atiende al rango mostrado en la leyenda, este es menor a 10^{-10} C/m^2 , por lo que en esencia, el valor es constante.

De forma rápida, la explicación puede darse por la definición misma de la permitividad. Con una mayor permitividad, el campo eléctrico generado por la polarización de las moléculas en oposición al incidente es más intenso, por tanto el campo neto resultante es más pequeño. Analíticamente, la explicación es ligeramente más sofisticada. Ha de acudirse a la ecuación de continuidad derivada de la cuarta ley de Maxwell, también conocida como ley de Maxwell-Ampère, tal y como se explica en la referencia [1, p. 18]:

$$\text{Ec. XXI} \quad \oiint (J + \frac{\partial D}{\partial t}) dA = 0$$

Esta ecuación expresa cómo en una superficie cerrada toda la densidad de corriente que penetre en ella también ha de salir de la misma. Sin que se genere o se pierda corriente. Esta está compuesta de dos términos: uno es la densidad de desplazamiento de corriente ($\frac{\partial D}{\partial t}$) y otro la densidad de conducción de corriente (J).

J viene dada por una de las formas de la ley de Ohm:

Ec. XXII $J = \sigma \cdot E$

Donde σ es la conductividad del medio y E el campo eléctrico. Puesto que se está tratando con dieléctricos, la conductividad de estos es muy baja, por tanto, J es un valor muy pequeño:

Ec. XXIII $\Downarrow \sigma \Rightarrow \Downarrow J$

Por lo que se puede despreciar, quedando Ec. XXI como:

Ec. XXIV $\oiint \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) dA = 0 \Rightarrow \oiint \frac{\partial D}{\partial t} dA = 0$

De manera que el desplazamiento eléctrico que atraviesa una superficie cerrada habrá de ser constante. Razón por la que en la Fig. 47b el desplazamiento eléctrico permanece invariable. Este parámetro se relaciona con el campo eléctrico a través de la permitividad como ya se mostró en la Ec. XVI, entonces, junto a la Ec. XXIV, ambas pueden asociarse con el ejemplo que se está tratando de forma que:

Ec. XXV $\frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_1 \frac{\partial E_1}{\partial t} = \epsilon_2 \frac{\partial E_2}{\partial t}$

De la integral de tiempo se obtendrá el valor eficaz de E con el siguiente último resultado:

Ec. XXVI $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2 \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \Leftrightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \xrightarrow{\epsilon_{r2}=2\epsilon_{r1}} E_1 = 2E_2$

Por tanto, la relación entre el valor del campo eléctrico en los diferentes medios viene dada por la relación entre sus permitividades, al menos para este caso particular. De hecho, yendo un poco más allá, puede analizarse qué pasaría si el campo eléctrico incidente fuese oblicuo a la superficie interfases en lugar de ser perpendicular, tal y como se muestra en la Fig. 48. Este ejemplo está basado en la explicación de la referencia [1, p. 82].

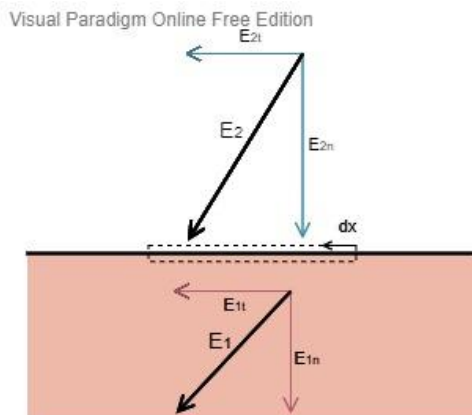


Fig. 48. Ejemplo de campo eléctrico oblicuo a interfaz entre dos materiales.

Primeramente, se atiende a la forma integral de la tercera ley de Maxwell-Faraday mostrada en el apartado 5 (Ec. XVIII). Al solucionar dicha ecuación para una línea cerrada que encierre un tramo de la superficie interfases como se muestra en la figura, lo que se obtiene es:

Ec. XXVII $\oint E dx = E_{2t} \cdot x - E_{1t} \cdot x = 0$

Ec. XXVIII $E_{1t} = E_{2t}$

De aquí puede extraerse que, para cualquier geometría, el campo eléctrico tangencial ha de ser idéntico en ambas caras de la interfase. Este primer resultado es trivial para el ejemplo anterior, puesto que el valor del campo tangencial era nulo para todo el problema.

Por otra parte, si se aplica la Ec. XXI a una superficie cerrada generada por el contorno de la línea analizada en la Fig. 48, se entiende que toda la densidad de corriente que entra por un lado de la interfase tiene que salir por el otro. Por lo que si se toman los valores normales de la densidad de corriente, nuevamente despreciando J por tratarse de dieléctricos, se tiene que:

$$\text{Ec. XXIX} \quad \frac{\partial D_{1n}}{\partial t} = \frac{\partial D_{2n}}{\partial t} \Rightarrow D_{1n} = D_{2n} \Rightarrow \varepsilon_1 \cdot E_{1n} = \varepsilon_2 \cdot E_{2n} \Rightarrow \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Así, lo que se obtuvo en el ejemplo anterior, es válido para cualquier interfase de dos medios tomándose las componentes perpendiculares a esta. La geometría variará el valor de la relación y la distribución exacta entre los campos eléctricos de los diferentes medios, pero siempre se mantiene la proporcionalidad. Es decir, en ningún caso el campo eléctrico será superior en el medio con mayor permitividad.

De estos dos ejemplos se desprende una conclusión clave para entender el siguiente tramo de este trabajo. El campo eléctrico varía con la permitividad al atravesar diferentes medios. Aquel cuya permitividad sea inferior tenderá a potenciar el campo en su interior. Y de forma opuesta, si la permitividad es mayor, el campo será menor. Esto se conoce como desplazamiento de campo y es un factor fundamental en el diseño de aislamientos y en el estudio de defectos [1, p. 82].

5.2 COMPORTAMIENTO RESPECTO A LA GEOMETRÍA

En este segundo apartado se analizará el efecto de la geometría en el campo eléctrico. El aspecto más relevante y por el cuál se puede explicar el resto de casos desde una simplificación a este, es el estudio de la curvatura de las geometrías participantes en un problema. Nuevamente, un ejemplo simple será la forma de explicar este principio.

En este caso se dispone de una esfera radio $R=10$ mm en el vacío ($\varepsilon_r=1$). Para poder llevar a cabo la simulación, se dibuja un semicírculo y se establece una condición de frontera abierta (Dirichlet) en modo *Axissymmetric*. La revolución del plano dibujado en torno al eje $[0,y]$ dará como resultado la esfera buscada. La superficie de esta estará a tensión $U=1000$ V. El desarrollo teórico extraído de este ejemplo se ha obtenido de la referencia [1, p. 30]

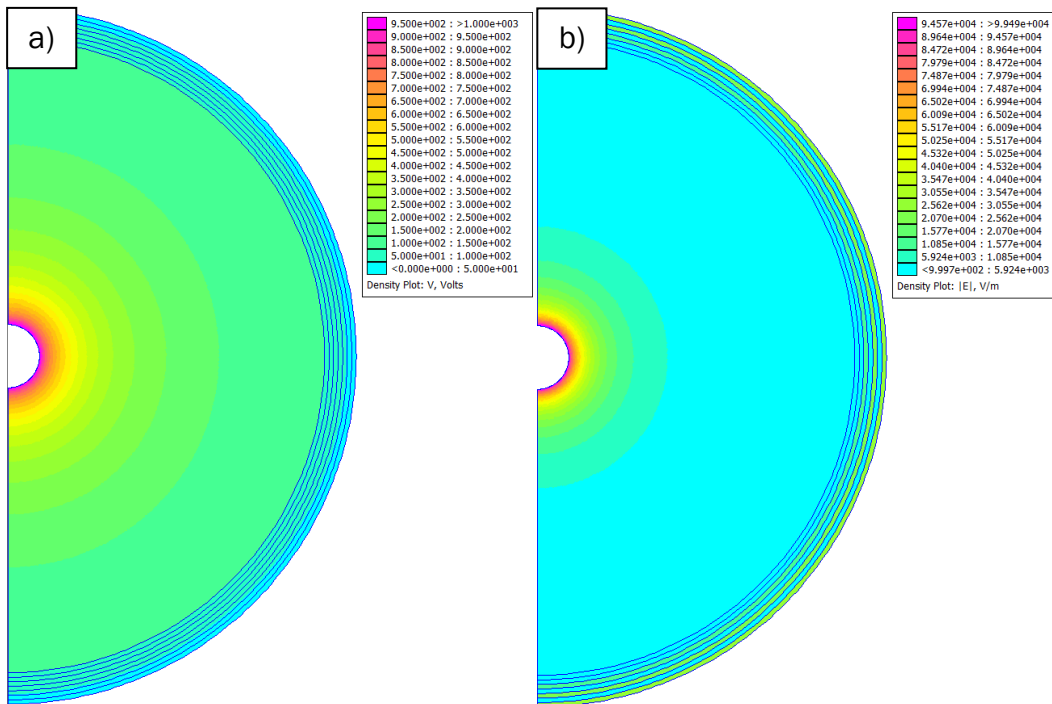


Fig. 49. Simulación de una esfera en tensión en el vacío. a) Gradiente de potenciales. b) Campo eléctrico.

Puede observarse que el gradiente de potencial generado no es uniforme como lo era en los ejemplos anteriores, si no que decrece a medida que se aleja del foco de tensión. El campo eléctrico, del mismo modo, es muy intenso en la superficie de la esfera y va disminuyendo rápidamente cuanto más cerca de la condición de frontera está.

Con la función en la vista de solución del problema en FEMM, pueden obtenerse gráficas de determinados parámetros a lo largo de cualquier segmento, arco o combinación de estos. En este caso se mostrará como varían el potencial (Fig. 50) y el campo eléctrico (Fig. 51).

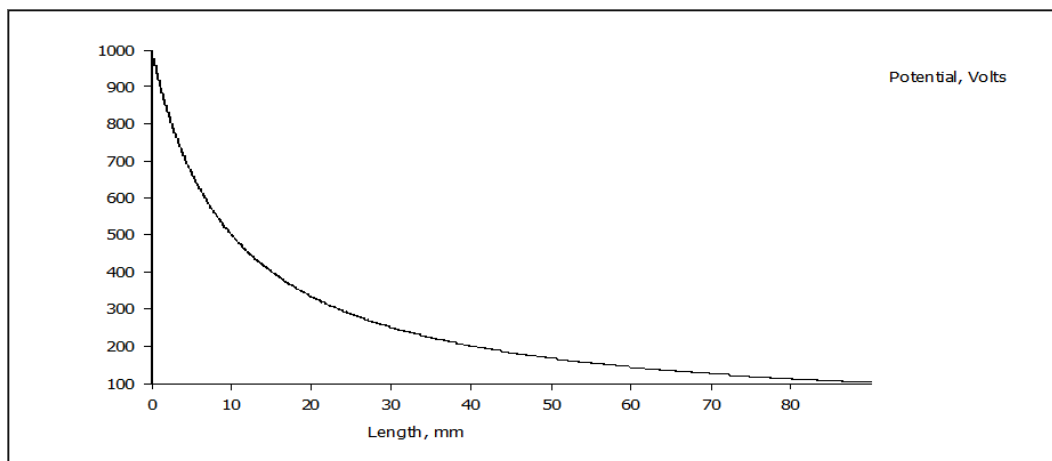


Fig. 50. Gráfica de potencial de una esfera en tensión en el vacío.

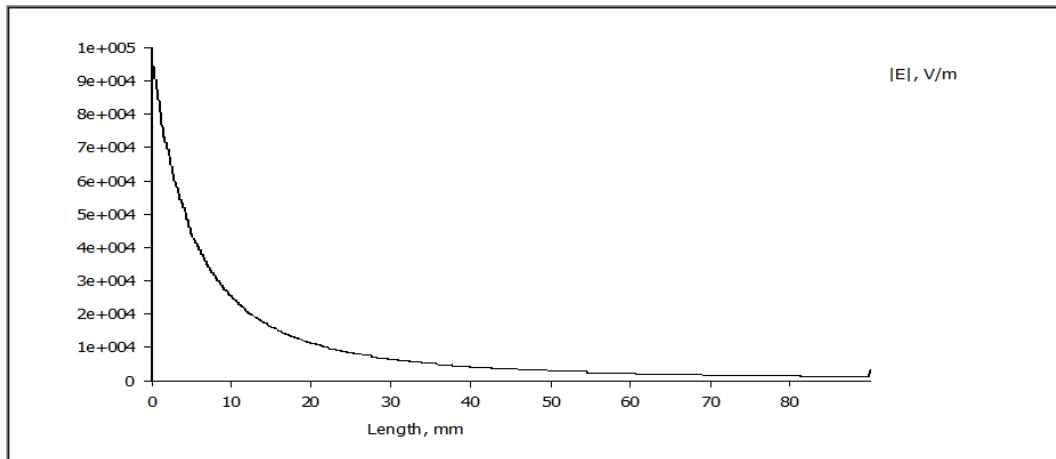


Fig. 51. Gráfica de campo eléctrico de una esfera en tensión en el vacío.

Con las gráficas proporcionadas puede claramente comprobarse cómo la variación de ambas propiedades no es lineal. La explicación, una vez más se puede obtener a partir de la ecuación de continuidad empleada antes (Ec. XXI). Separando ambos términos entre la igualdad de la ecuación se tiene que:

$$\text{Ec. XXX} \quad \oint \frac{\partial D}{\partial t} dA = - \oint J dA$$

El segundo término, corresponde a la corriente eléctrica $i(t)$, comunmente conocida y expresada en culombios por segundo o, más habitualmente, amperios. Integrando ahora a ambos lados de la igualdad con respecto del tiempo se obtiene:

$$\text{Ec. XXXI} \quad \oint \left(\frac{\partial D}{\partial t} dA \right) dt = \int i(t) dt \Rightarrow \oint D dA = Q$$

Esta última ecuación no es otra que la Ley de Gauss mencionada en el apartado 5 (Ec. XVII) en su forma diferencial. Para el ejemplo ahora tratado, puede considerarse Q como una carga puntual equivalente a toda la carga de la esfera y situada en su centro. Los vectores asociados a D y dA son paralelos en este caso particular para todo el problema. Por tanto, su producto es igual al producto de su valor en módulo. De tal forma que la Ley de Gauss en este caso puede solucionarse simplemente como el producto del desplazamiento eléctrico por la superficie esférica que atraviesa y que aumenta con la distancia al centro de la esfera:

$$\text{Ec. XXXII} \quad \oint D dA = Q \Rightarrow D \cdot 4\pi r^2 = Q \Rightarrow D(r) = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

De esta ecuación se obtiene sencillamente el campo eléctrico como:

$$\text{Ec. XXXIII} \quad E(r) = \frac{D(r)}{\epsilon} \Rightarrow \mathbf{E}(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$$

De esta forma, la variación del campo eléctrico observada en la Fig. 51 tiene una relación inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

El potencial puede obtenerse a partir de la integral del campo eléctrico con respecto del valor r , que caracteriza la distancia de un punto cualquiera desde la superficie de la esfera, hasta el infinito, donde ha de ser cero:

$$Ec. XXXIV \quad V = U - U_{\infty} = \int_R^{\infty} E(r) dr = \int_R^{\infty} \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} dr \Rightarrow V = \left. \frac{Q}{4\pi\epsilon r} \right|_R^{\infty} \Rightarrow V = \frac{Q}{4\pi\epsilon R}$$

Así, la variación del potencial observada en la Fig. 50, es inversamente proporcional a r . Estándo el valor máximo de V en la superficie de la esfera (donde $r=R$) y dependiendo del radio de esta y de la carga Q en su interior. Aunque en este caso el valor de la tensión estaba prefijado, al igual que el radio, por tanto lo que cambiaría es la carga.

Si se juntan ambas ecuaciones Ec. XXXIII y Ec. XXXIV, dividiéndolas, se consigue la siguiente relación entre el campo eléctrico y el potencial:

$$Ec. XXXV \quad \frac{E(r)}{V} = \frac{\frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}}{\frac{Q}{4\pi\epsilon R}} \Rightarrow E(r) = \frac{V \cdot R}{r^2} \quad r=R \Rightarrow E_{m\acute{a}x} = \frac{V}{R}$$

Con esta última ecuación se obtiene que el campo máximo creado por la esfera pequeña es directamente proporcional a la tensión de este y, lo que es más interesante, es también inversamente proporcional al radio de la misma.

Este principio establece una base donde sostener ciertas deducciones que se pueden extraer de un problema a simple vista. En alta tensión el campo eléctrico va a ser elevado siempre, por los valores de potencial con los que se trabaja. Por tanto, el otro elemento en que fijarse es la curvatura tanto de los elementos activos como de los pasivos.

En el ejemplo de la Fig. 52, se muestra un caso inverso donde la esfera ahora se encuentra a tensión cero dentro de un cilindro a 1000 V. Puede verse cómo el campo eléctrico se intensifica de igual forma en la superficie esférica, de una forma muy similar al ejemplo anterior. Comprobándose que la proporcionalidad obtenida en la Ec. XXXV es válida también para electrodos pasivos.

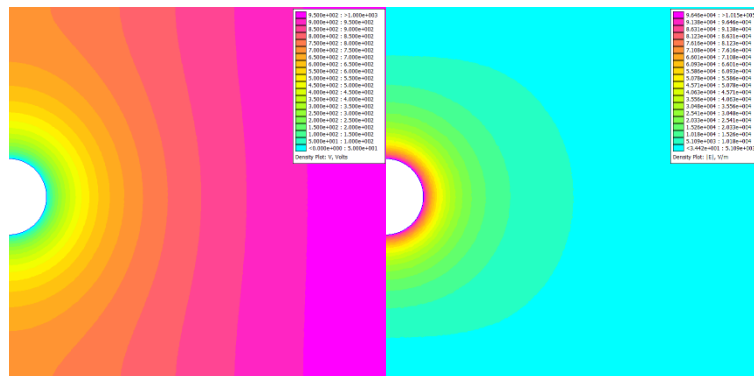


Fig. 52. Esfera a potencial cero en el interior de un cilindro a 1000 V.



Aquí concluye este apartado. Se han explicado y analizado dos principios de gran relevancia para entender el comportamiento del campo eléctrico. Con esto se tiene una base más sólida para entender los siguientes apartados. En especial para conocer mejor los resultados que se obtendrán en las siguientes simulaciones.

Además también se ha logrado una mayor familiaridad con algunas de las ecuaciones de Maxwell que son tan fundamentales para este campo de estudio.



6 DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA ESTUDIADA

Este apartado pretende describir el tipo de pieza estudiada, atendiendo a su funcionalidad y al diseño que pueda tener en relación a este aspecto.

6.1 CELDAS AISLADAS EN SF₆

Los centros de transformación (CdT) son el último tramo de alta tensión en una red eléctrica. Aquí la tensión de la red de distribución, que ronda valores entre los 12 y los 30 kV, se transforma a baja tensión 230/400 V.

Dos factores hacen que los CdT tengan que estar muy próximos al consumidor. Por una parte, los puntos de consumo suelen tener una densidad de demanda energética elevada. Y por otra, se desea limitar las pérdidas de energía, que en baja tensión son mayores.



Fig. 53. Celdas de media tensión aisladas en SF₆.

Fuente:

<https://www.inael.com/producto/celdas-m-t/>

De esta forma, se necesita que los CdT sean más compactos. Este hecho, en el lado de baja tensión es poco relevante, sin embargo, no sucede lo mismo para el lado de alta. Al reducir las distancias disponibles entre conductores, el aire deja de ser un medio aislante válido, por lo que hay que recurrir a las celdas aisladas en otros medios como el SF₆.

El SF₆ es un gas que posee una rigidez dieléctrica del orden de tres veces superior a la del aire y, aumentando la presión, se pueden llegar a valores diez veces superiores [1, p. 302]. Esto permite obtener elementos compactos, como son las celdas aisladas en este gas.

Estas celdas son modulares, permitiendo que cada una de ellas albergue un elemento con una funcionalidad en particular (interruptores, seccionadores, fusibles, transformadores de corriente...). Esta modularidad simplifica las instalaciones y facilita el redimensionamiento de los CdT, haciéndolas más adaptables a los cambios en la demanda a años vista. Es en el acoplamiento de celdas donde aparecen el tipo de piezas objeto de este estudio.

6.2 ACOPLAMIENTO ENTRE CELDAS – PASATAPAS

Las celdas tienen una carcasa metálica, entre otras razones, para poder contener el gas en su interior de forma segura. La carcasa se conecta a tierra, lográndose un apantallamiento con el que poder contener el gradiente de tensión dentro de la celda. Esto, por otra parte, supone un reto adicional a la hora de realizar la interconexión.

Habitualmente esta conexión consta de varios elementos, de los cuales, la mayor parte de la función aislante recae sobre una pieza de silicona. La razón del uso de este material reside en que la silicona permite obtener un aislamiento estanco entre celdas, con un espesor aceptable.

A continuación, se realizarán una serie de simulaciones sobre diseños de pasatapas con medidas inventadas para una línea de 30 kV, basados en algunas patentes publicadas [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24]. Se empezará con un sistema muy simple al que se le irán añadiendo modificaciones hasta llegar a un diseño final con el que poder trabajar en el siguiente apartado.

6.2.1 PASATAPAS 1

El primer diseño consiste simplemente en un pasatapas de silicona cilíndrico, de 15 mm de espesor, 40 mm de diámetro interior y 100 mm de longitud.

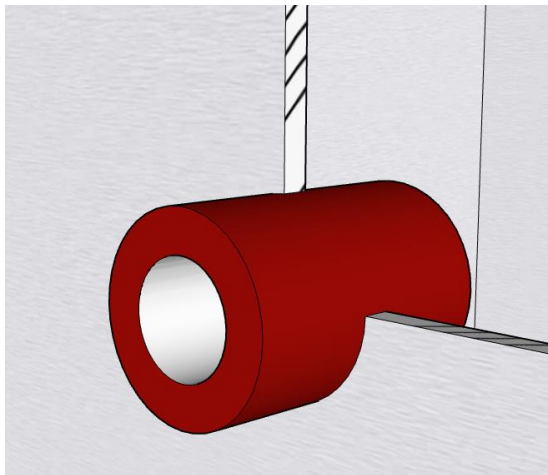


Fig. 54. Imagen 3D del pasatapas 1. Realizado con SketchUp.

En el interior del pasatapas se realizará un empalme entre los conductores de cada celda. Esta conexión se puede realizar de múltiples maneras, sin embargo no conciernen al objeto del estudio. El cilindro interior irá recubierto de pintura semiconductra para conseguir una distribución uniforme del campo eléctrico. Consecuentemente, en el interior del pasatapas el campo será nulo, evitando cualquier tipo de descarga indeseada.

En cualquier caso, la cara interior del pasatapas estará toda ella a la tensión de la línea, de esta forma, en el interior del cilindro el campo eléctrico es nulo por estar dentro de una superficie equipotencial. Así se consigue que no se produzcan descargas debidas a la conexión de los conductores.

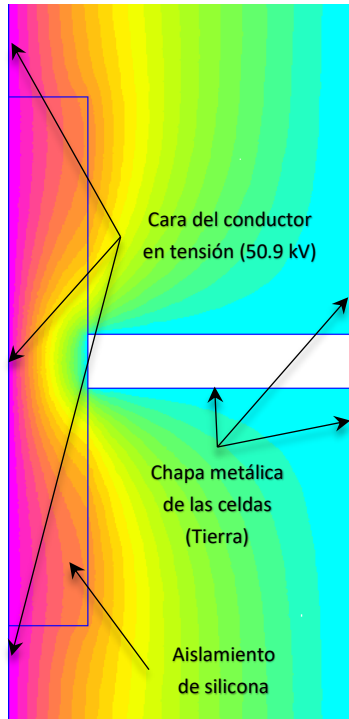


Fig. 55. Simulación de potencial eléctrico del pasatapas 1.

Para realizar la simulación de esta pieza, se va a tomar un corte por su eje longitudinal. Puesto que este es un eje de revolución y existe simetría total en torno a él, únicamente se tendrá en cuenta una mitad de la sección. Ya que se ha tomado un diámetro interior de 40 mm, la geometría está dibujada a partir de las coordenadas [20, Y] para así lograr el radio interno adecuado, siendo el eje de revolución que toma FEMM el [0,Y] en el modo *Axysymmetric*.

Se interpreta también un conductor cilíndrico muy largo, de forma que para la simulación, el lado izquierdo mostrado en la Fig. 55 esta a la misma tensión que el interior del pasatapas. Esta tensión escogida será de $36 \cdot \sqrt{2}$ kV, representando la tensión de pico máxima que puede darse de forma nominal en una línea de 30 kV de valor eficaz. Nuevamente, las paredes de la celda están puestas a tierra (lado derecho Fig. 55).

Para los materiales escogidos, se ha tomado una silicona con permitividad relativa de $\epsilon_r=3$ para el pasatapas y un medio aislante de SF₆ que, puesto que es un gas, tendrá una permitividad relativa de 1.

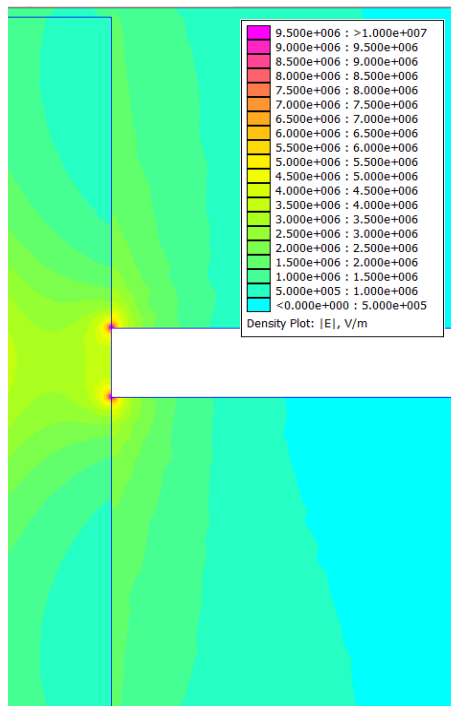


Fig. 56. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 1. Límite superior mostrado de 10^7 V/m (10 kV/mm).

Puede intuirse que el campo eléctrico será más intenso en la zona donde el pasatapas está en contacto directo con la celda, debido a las aristas vivas (curvatura muy pequeña) de la celda.

La simulación de este ejemplo, aunque simple, permite atisbar cuál será la zona de mayor conflicto. Según la simulación, se producirían descargas entre el pasatapas y la celda, suponiéndose una rigidez del SF₆ de 10 kV/mm (algo más de tres veces la del aire). De hecho, el campo en esas zonas supera los 20 kV/mm, un valor muy próximo a la rigidez dieléctrica de algunas siliconas.

El siguiente paso es añadir algo más de complejidad a la forma. Teniendo en cuenta el anclaje de la pieza.

6.2.2 PASATAPAS 2

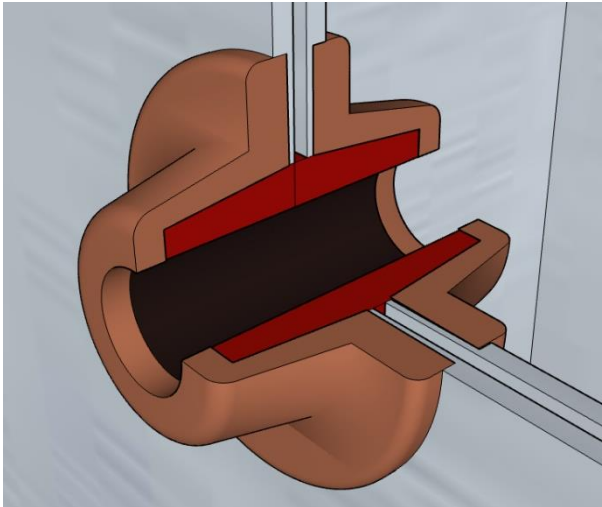


Fig. 57. Imagen 3D del pasatapas 2. Realizada con SketchUp.

Los pasatapas habitualmente se insertan en unas cazoletas creadas con piezas de resina epoxi que están ancladas a la celda. Además de que la epoxi posee una rigidez dieléctrica superior a la del SF₆, permitiendo un mejor aislamiento en la conexión, este material es mecanizable, pudiéndose así atornillar la pieza a la celda.

Para la simulación, únicamente hay que modificar la geometría del corte, añadiendo la epoxi como material con una permitividad relativa de $\epsilon_r=3.6$. El pasatapas tendrá que tener ahora una forma troncocónica, para facilitar la instalación y el sellado, para lo cual, se toma un espesor mínimo de 10 mm y uno máximo de 15 mm. Se añade el aire como material pero, a efectos prácticos, no sería necesario puesto que, pudiéndose establecerse como parámetro nada más que ϵ_r , el aire y el SF₆, poseen prácticamente el mismo valor.

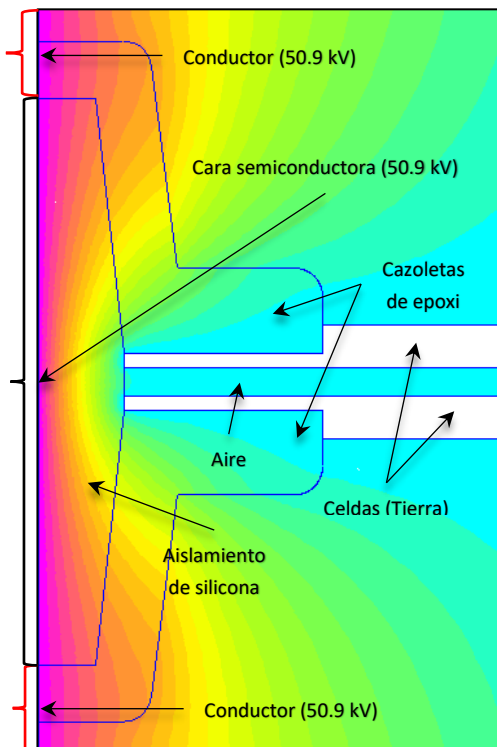


Fig. 58. Simulación del potencial eléctrico del pasatapas 2.

El perfil de tensiones (Fig. 58) es similar al del pasatapas 1, aunque anteriormente no se había tenido en cuenta la separación física entre las celdas. El campo eléctrico sigue siendo conflictivo en el punto de contacto de la silicona con la celda (Fig. 59).

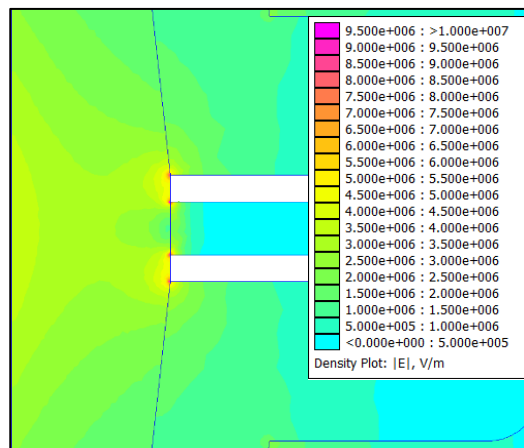
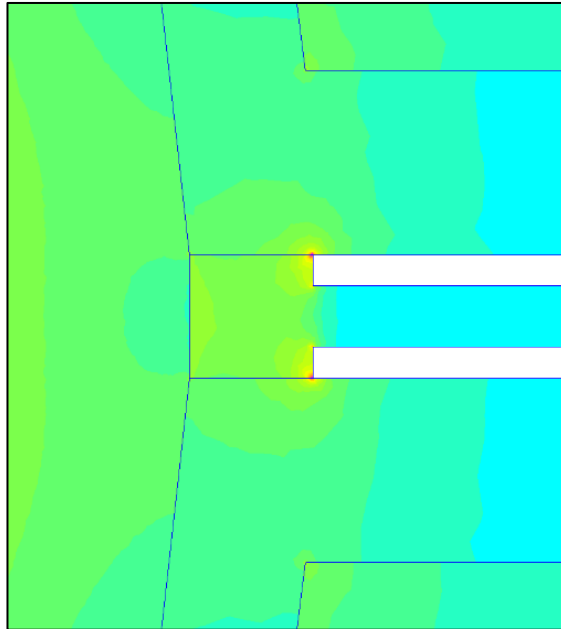


Fig. 59. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2. Límite superior mostrado de 10^7 V/m (10 kV/mm).

A priori, un razonamiento rápido sería que para solucionar esa zona conflictiva, se podrían alejar las paredes de la celda del pasatapas haciendo el orificio más grande como se muestra en la Fig. 60.



Puede observarse que el problema ha quedado lejos de solucionarse. Sabiendo que las curvaturas reducidas son zonas de concentración de campo, podría sugerirse redondear más el orificio de las celdas (Fig. 61).

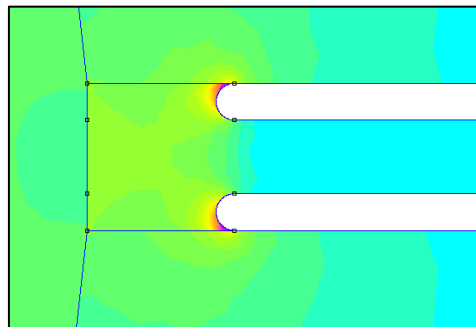


Fig. 60. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2 con las paredes de la celda más alejadas. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm)

Fig. 61. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2 con orificio redondeado. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm).

Puesto que el espesor de la celda en ese punto es reducido, la curvatura sigue siendo muy pronunciada, provocando un efecto punta igualmente. Luego modificar el orificio en sí no se perfila como la mejor solución, ya que ese perfilado es un coste a mayores para la celda.

Adicionalmente, existe un problema más grave aún, y es que la intensidad de campo supera la rigidez del aire (3 kV/mm) en el espacio entre celdas, como puede verse en la Fig. 62, tenga el tamaño que tenga el orificio de celda.

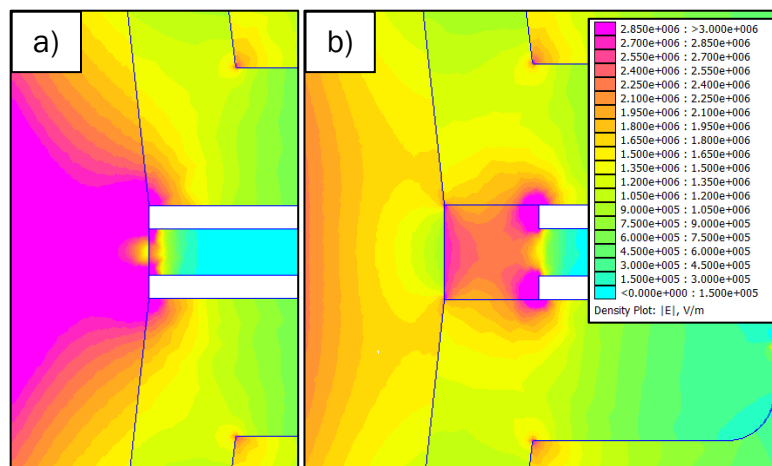


Fig. 62. Simulación del campo eléctrico del pasatapas 2 con a) paredes de la celda en contacto y b) separadas con el exterior del pasatapas. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm)

Y lo que es más, puede observarse que, al alejar las paredes de la celda del pasatapas, la mayor parte del campo se concentra fuera de este, lo cual supone un desaprovechamiento del espesor del aislamiento. Esto sucede porque el aire tiene una menor permitividad que la silicona, efecto que ya se ha comentado en el apartado 5. Por tanto, es necesario encontrar una solución que evite la aparición de descargas fuera de la conexión y que además permita lograr un buen aprovechamiento del aislante.

6.2.3 PASATAPAS 3

La manera de solucionar los problemas antes comentados es recurriendo a lo que se conoce como control de campo. Esto consiste en contener el campo eléctrico de mayor intensidad en el espesor del aislante, donde la rigidez dieléctrica es mayor.

Para lograrlo, es necesario establecer una geometría que esté puesta a potencial cero en el aislamiento. La forma de esta tendrá que adecuarse además para minimizar el campo en la medida de lo posible.

Volviendo al pasatapas 2, primeramente se podría intentar conseguir un control de campo poniendo a tierra la cara expuesta del pasatapas. Esto podría hacerse de diversas forma, bien con un anillo metálico, bien con una parte de silicona semiconductor o bien con un recubrimiento de pintura semiconductor. Supóngase el último método, de tal forma que esta parte queda recubierta de pintura semiconductor puesta a tierra de una forma cualquiera. El resultado se muestra en la siguiente imagen.

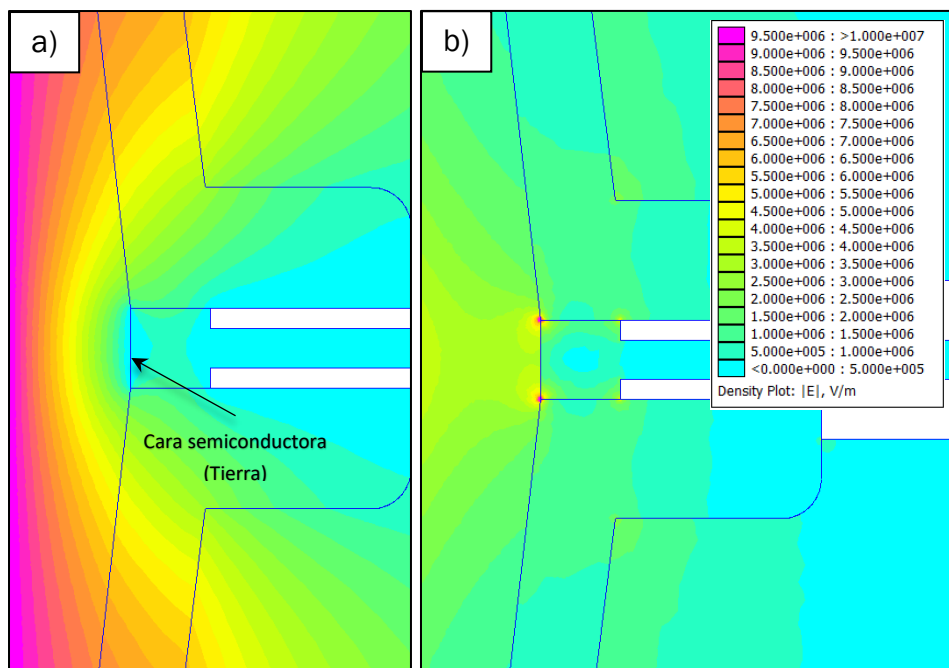


Fig. 63. Simulación del pasatapas 2 con cara al aire puesta a tierra con pintura semiconductor. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico y leyenda de colores.

En la Fig. 63b puede observarse que el campo ahora se concentra más en el aislante y no fuera de este, además, hay menos intensidad de campo en las paredes de la celda.

Sin embargo, se sigue teniendo el mismo problema que antes en las partes donde termina la pintura, pues actúan como puntas. La solución pasa por reducir la curvatura de los extremos del control de campo. En el apartado anterior también se recurrió a esto y, puesto que las dimensiones son pequeñas, a pesar de aumentar la curvatura, esta sigue siendo muy pronunciada, por lo que el campo será más intenso ahí de todas formas. Sabiendo esto, hay que tomar dos medidas. La primera es que esta curvatura tiene que ser lo más amplia posible. Y la segunda es conseguir que estas puntas queden dentro del aislamiento. De esta forma se tiene que poder lograr un control de campo donde la magnitud de este sea menor y esté concentrada dentro del aislamiento.

El diseño de la siguiente modificación del pasatapas está basado concretamente en una patente de Schneider Electric [20].

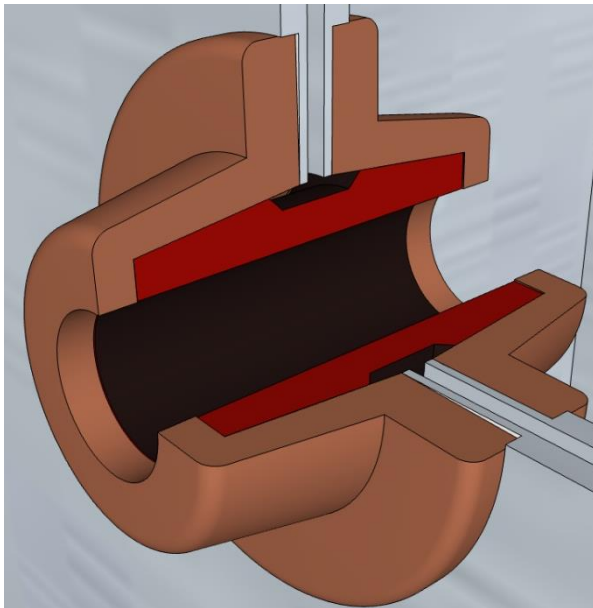


Fig. 64. Imagen 3D del pasatapas 3. Realizado con SketchUp.

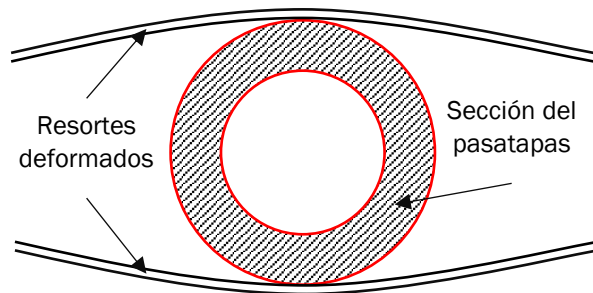


Fig. 65. Puesta a tierra del anillo exterior del pasatapas con resortes.

Para esta variación, se crea un anillo conductor en el exterior de la pieza. Este anillo de pintura semiconductor se pondrá a potencial cero para crear el control de campo. Una manera habitual de realizar esta puesta a tierra es a través de unos resortes, los cuales quedan deformados al instalarse el pasatapas entre ellos, presionando la pieza para garantizar el contacto (Fig. 65).

El siguiente paso es observar qué efecto tiene esto en la distribución del campo eléctrico. Los resortes no serán simulados ya que su efecto es mínimo debido a que, al estar detrás del anillo, este hace de apantallamiento de forma que la interacción de los resortes con el campo es nula.

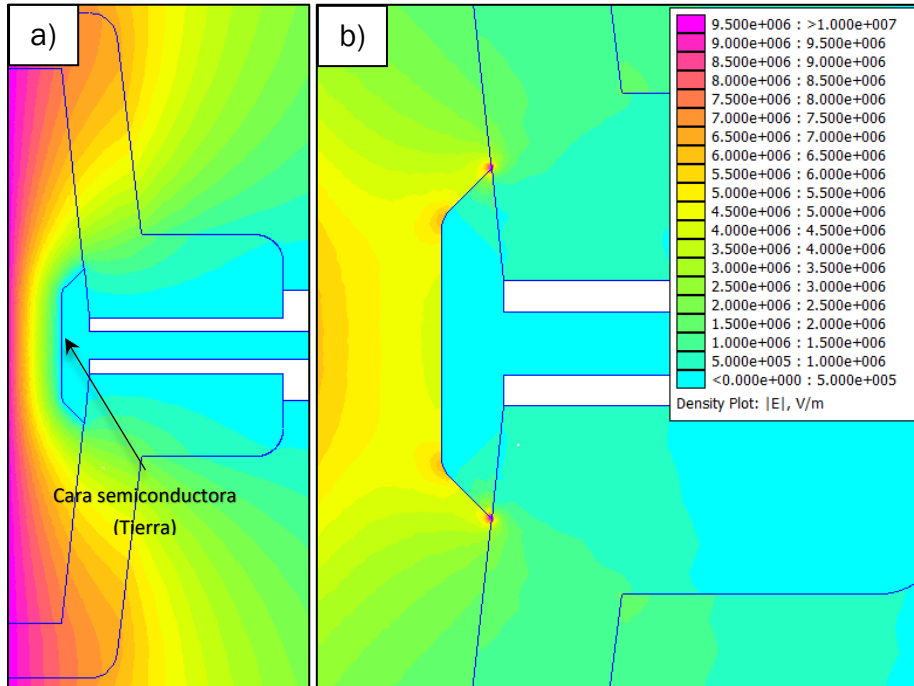


Fig. 66. Simulación del pasatapas 3. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico y leyenda de colores.

El anillo exterior proporciona un apantallamiento efectivo para todo lo que hay tras él, solucionando así los problemas de campo con las paredes de la celda. Sin embargo, en la Fig. 66b puede observarse una elevada intensidad de campo en los extremos del anillo, donde termina la pintura semiconductor.

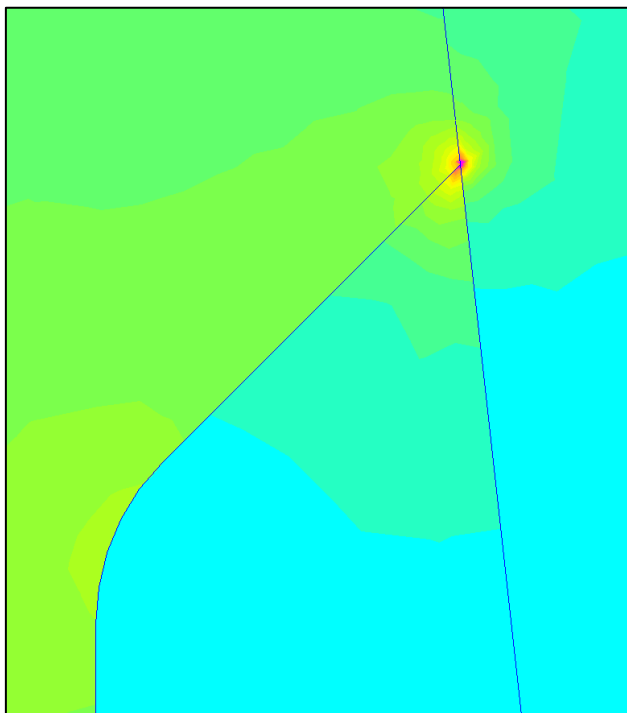


Fig. 67. Campo eléctrico en los extremos del anillo exterior del pasatapas 3. (Máx. E mostrado: 20 kV/mm)

Ampliando la imagen y aumentando la escala de valores hasta los 20 kV/mm, se observa que el campo en esta zona llega a superar esta cifra. Entrando en conflicto con la rigidez dieléctrica de los aislamientos. Teniendo en cuenta que la tensión establecida es el valor de pico de la tensión nominal máxima que se ha escogido para la pieza, esto es inadmisibles. Ninguna parte del aislamiento puede estar sometida a un estrés eléctrico tan elevado durante su funcionamiento normal.

Este es uno de los inconvenientes de la pintura semiconductora. Los controles de campo es necesario que terminen en formas redondeadas para poder minimizar el efecto punto. Se podría intentar conseguir limitar más el campo en la zona donde termina la pintura, tratando de ocultar esta parte tras el codo interior del anillo como se muestra en la Fig. 68.

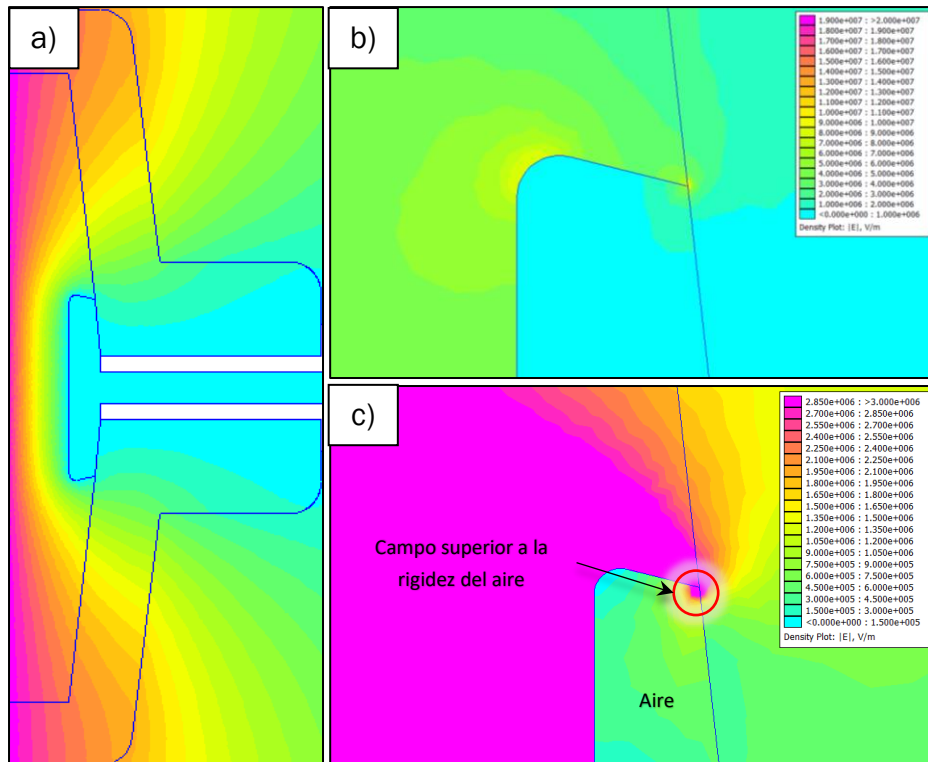


Fig. 68. Simulación del pasatapas 3 con anillo exterior modificado. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico (Máx. E mostrado: 20 kV/mm). c) Campo eléctrico (Máx. E mostrado: 3 kV/mm).

De esta forma el campo es inferior a 20 kV/mm en la zona deseada (Fig. 68b).

No obstante, esta modificación supondría un problema tanto para la fabricación en sí de la pieza como para el pintado del anillo. Y es que este reborde es conflictivo con el manufacturado del pasatapas ya que, por un lado la inyección de la silicona sería más compleja y por otro el pintado de la parte cóncava acabaría dando problemas e irregularidades en el producto final. Este último aspecto es crucial puesto que la distribución de la pintura tiene que tener un espesor mínimo y lo más uniforme posible.

Además, el campo sigue siendo superior a 3 kV/mm en los extremos (Fig. 68c), lo que implicaría que esa parte seguiría sin poder exponerse al aire teniendo que modificarse la conexión de todas formas.

6.2.4 PASATAPAS 4

Para poder solventar los inconvenientes de la pintura es posible recurrir a una silicona semiconductor. El siguiente modelo de pasatapas está basado en una patente de Ormazábal [24] en combinación con el anterior diseño.

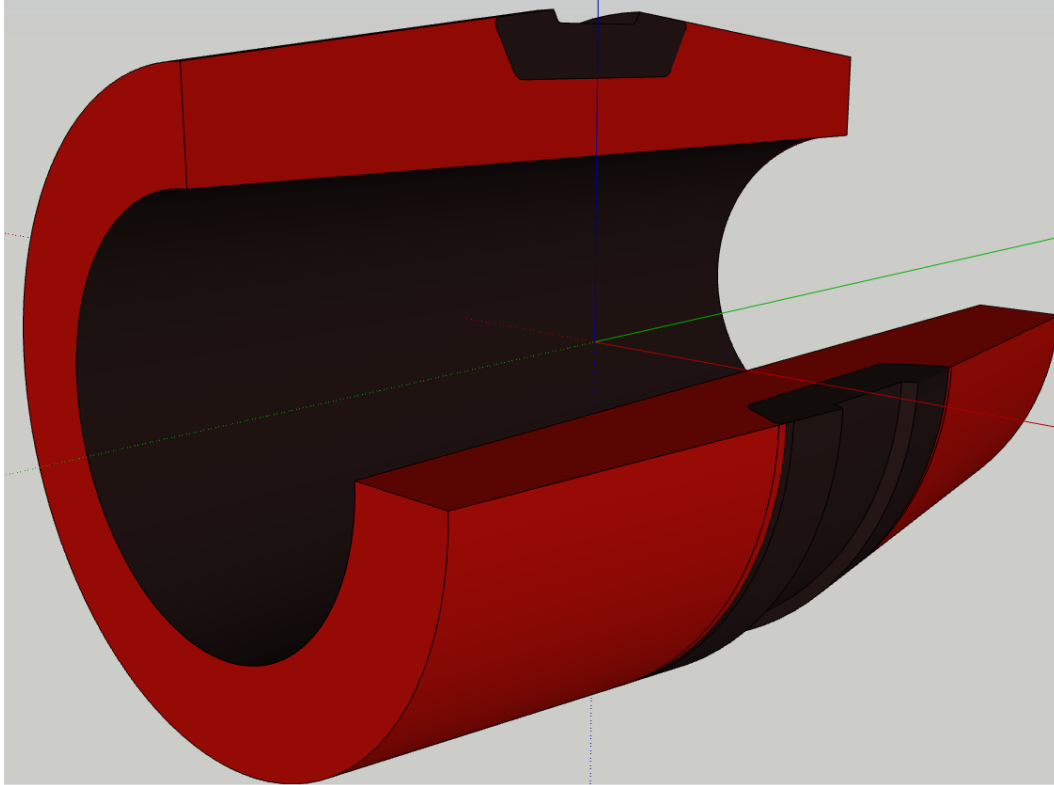


Fig. 69. Imagen 3D del pasatapas 4. Realizado con SketchUp.

En este último diseño se dispone de un anillo exterior conductor. Este se incorpora a la pieza la cual ahora pasa a estar conformada por dos siliconas distintas, una aislante y otra semiconductor. El anillo interior sigue siendo de un recubrimiento de pintura semiconductor.

Para la simulación, se añade la nueva geometría y se incorpora la silicona semiconductor. Realmente, para esta simulación no es pertinente añadir esta silicona como material ya que, al ser conductora, el campo en su interior será nulo por la distribución de carga en su superficie. La razón de añadirla reside en que FEMM exige que cualquier área que quede dentro del problema esté etiquetada como un material a pesar de que, como es el caso, esta vaya a quedar fuera del cálculo real, puesto que está acotada por unas condiciones de contorno de tensión cero. Consecuentemente se crea este material con una permitividad relativa cualquiera.

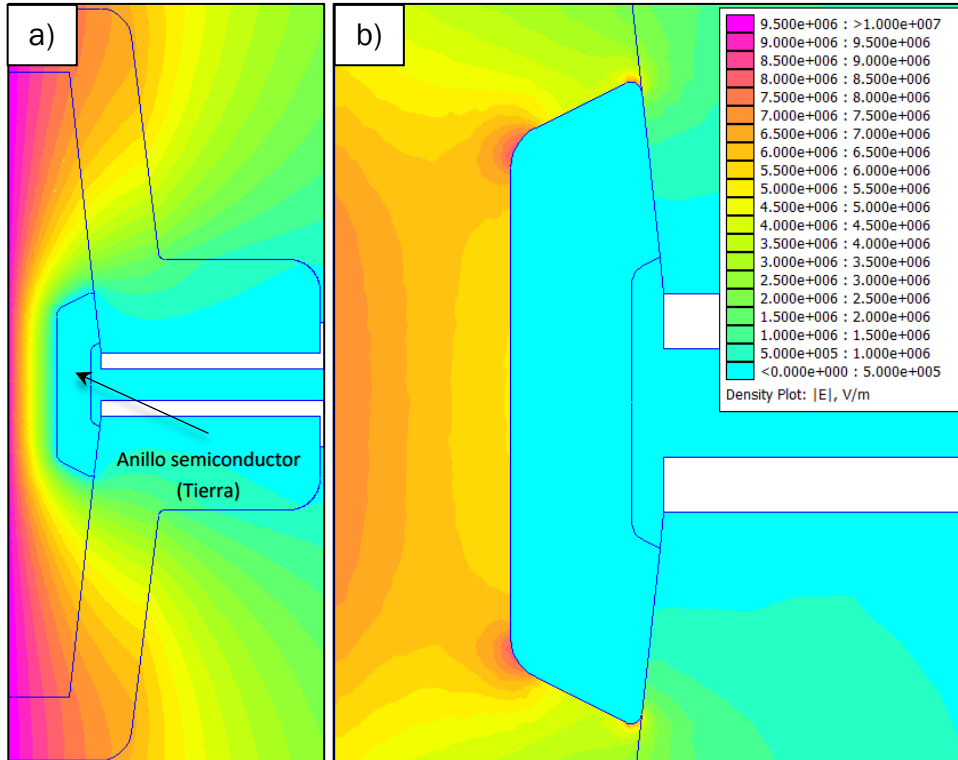


Fig. 70. Simulación del pasatapas 4. a) Potencial eléctrico. b) Campo eléctrico y leyenda de colores.

Si la Fig. 70b se compara con la Fig. 66b del pasatapas 3, se puede observar cómo el campo es más intenso en los codos interiores de este último modelo. Esto se debe a que el radio de curvatura de estos es menor que en los del pasatapas 3 y además están algo más cerca del cilindro interior en tensión.

Por otra parte, las puntas que antes correspondían al final de la cobertura de pintura ahora poseen un campo menor, gracias en parte a que estas ahora tienen un acabado con una cierta curvatura y a que se acumula una mayor parte del campo en los codos interiores.

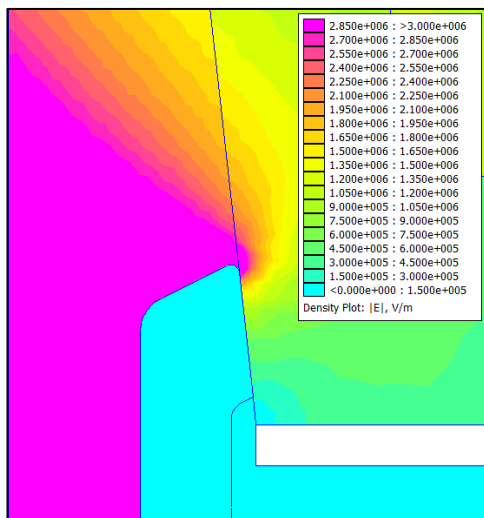


Fig. 71. Campo eléctrico del pasatapas 4. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm)

En cuanto a los problemas con el aire circundante, con este diseño desaparecen. En la Fig. 71 puede verse que aquellas zonas donde el campo eléctrico es superior a la rigidez dieléctrica del aire quedan condensadas principalmente en el aislamiento de silicona y una pequeña parte en las cazoletas de epoxi. A mayores, los extremos de las paredes de la celda, mientras que antes daban problemas en este aspecto ahora quedan protegidas por el control de campo.

Concluyendo con este apartado, se ha llegado al modelo final de pieza con el que se va a trabajar en este trabajo. Partiendo desde el diseño más simple hasta llegar a uno más realista que corrige todos los problemas asociados a las versiones anteriores.

Como se ha podido ver, aparte de evitar descargas, una de las principales ventajas de este pasatapas es que aprovecha eficientemente el espesor del aislante, concentrando la mayor parte del campo eléctrico en su interior.

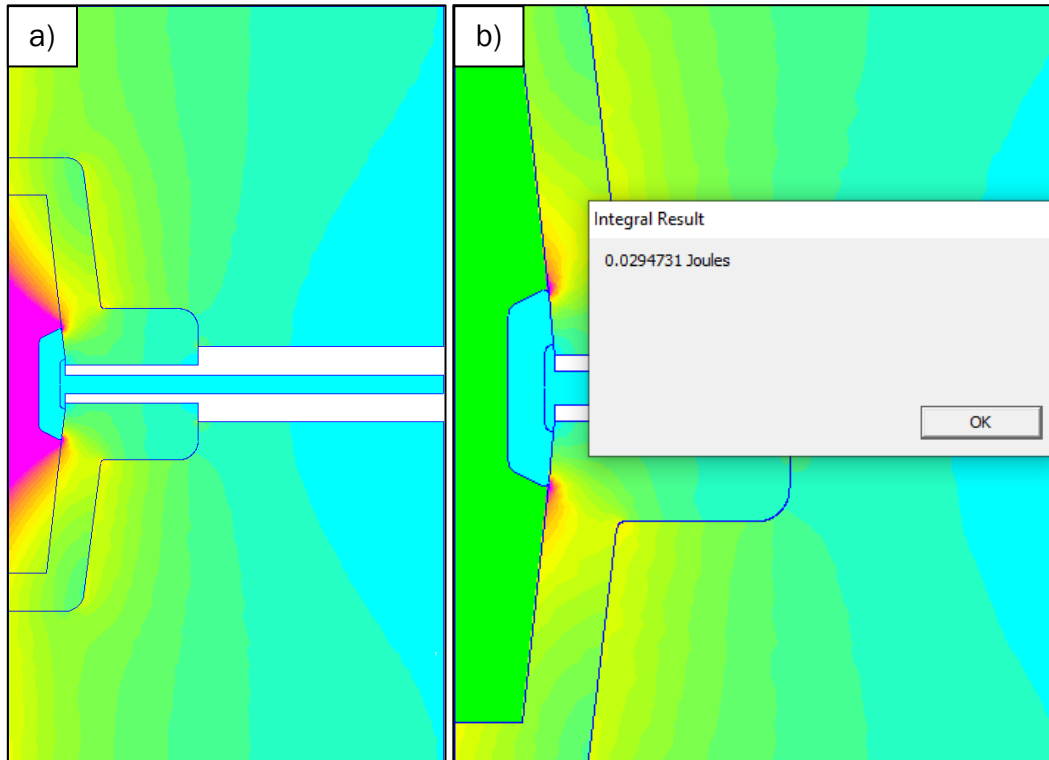


Fig. 72. a) Campo eléctrico del pasatapas 4 con dibujo completo (Máx. E mostrado: 3 kV/mm). b) Función de cálculo integral para la energía acumulada en el área coloreada en verde.

Esto es algo que, además de verse directamente en la Fig. 72a, puede comprobarse numéricamente ya que FEMM incorpora una función que permite calcular la energía acumulada en una o varias superficies escogidas. La superficie en verde que se observa en la Fig. 72b es sobre la que se ha realizado el cálculo y obtenido el resultado que se muestra en el cajetín.

La energía almacenada está relacionada con la cantidad de campo eléctrico acumulado. De esta forma, al realizar el cálculo para todas las superficies se observa que el 73% de la energía se concentra en el pasatapas, mientras que las cazoletas y el espacio de la celda lleno con SF₆ acumulan el 12.8% y el 14.25% respectivamente. Lo que prueba que esta pieza aprovecha correctamente su aislamiento.

7 POSIBLES DEFECTOS Y CONSECUENCIAS

Ya se ha obtenido un diseño final de pasatapas para celdas aisladas de alta tensión. Ahora, este apartado tiene por objetivo estudiar los posibles defectos que pudiera tener esta pieza durante el proceso de fabricación, además de cómo detectarlos. Partiendo desde los defectos menos problemáticos hasta llegar a los más graves. Todo ello apoyándose con simulaciones para fundamentar su comportamiento.

7.1 PROCESO DE FABRICACIÓN

El método de fabricación de la pieza dependerá en buena medida del material del que esté hecha. Partiendo de las dimensiones que se han escogido, esta pieza se podría considerar de pequeño tamaño y, al tener una geometría que combina dos siliconas, es necesario recurrir a un proceso de inyección en molde. Para ello, la silicona del tipo LSR es la más recomendable, ya que permite obtener adecuadamente la forma deseada y combinar la parte aislante y semiconductor. A esto le seguirá un proceso aparte de recubrimiento con pintura semiconductor para el cilindro interior del pasatapas. De esta forma se puede lograr un proceso productivo en serie, llegando a alcanzar grandes volúmenes de fabricación.

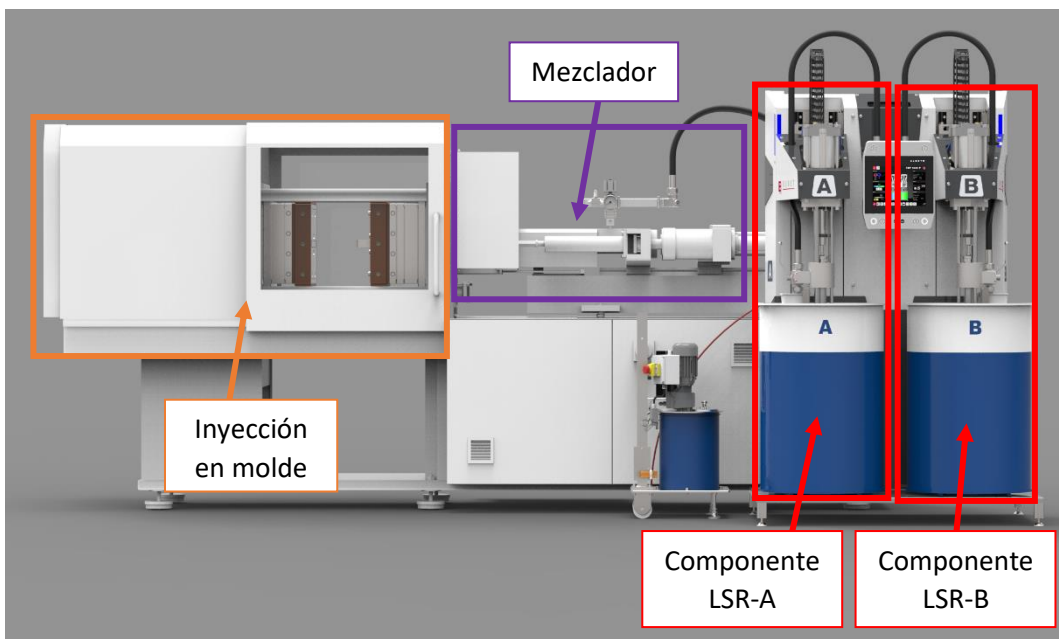


Fig. 73. Máquina de inyección de silicona líquida LSR. Fuente: <https://www.elmet.com/EN/lsr-turnkey-solutions>



7.2 ENSAYO ELÉCTRICO

Como se ha comentado más atrás en el apartado 3.3, las piezas destinadas a aislamiento eléctrico, dependiendo de su función, necesitan de un ensayo eléctrico que certifique que son adecuadas.

Según requerimientos de la pieza, del cliente o de ambos, puede ser necesario que todas las piezas pasen correctamente un ensayo eléctrico, que solo lo pase una porción de la producción a modo de muestra estadística o que directamente no sea necesario para ninguna.

Este pasatapas tiene una importancia considerable puesto que representa un eslabón clave en una línea de distribución. Si esta pieza falla, puede suponer un corte de suministro de una zona de consumo importante y su sustitución no es tan trivial como la de un fusible. A mayores, posee un control de campo, que es una zona conflictiva en cuando a producción de DP.

Consecuentemente, teniendo en cuenta el gran volumen de piezas que se pueden llegar a producir, lo que incrementa las probabilidades de que presenten alguna clase de defecto, sería pertinente que todas las piezas pasaran por un ensayo eléctrico.

Por tanto, la cadena de producción estará formada por tres fases fundamentales, una de inyección, otra de pintura y otra de ensayo eléctrico. Esta última, se puede llevar a cabo en un laboratorio de alta tensión aunque, para una gran cantidad de ensayos, es más óptimo disponer de una estación de ensayos especialmente diseñada para el pasatapas.

Esta estación o útil de ensayos puede perfilarse de dos maneras. Por un lado, se puede recurrir a un útil que replique tanto física como eléctricamente las condiciones que el pasatapas tendrá en funcionamiento. Por otro, se puede recurrir a uno que únicamente emule las condiciones eléctricas. La ventaja del primero es clara: los resultados obtenidos de los ensayos serán fácilmente extrapolables a los que se obtendrían en las condiciones de trabajo reales de la pieza. Sin embargo, el empleo de este tipo de útil puede suponer una complicación en la realización de múltiples ensayos en serie. La razón se encuentra en que los pasatapas, para garantizar una estanqueidad total, van introducidos a presión en las cazoletas de cada celda, para lo cual se emplean grasas que favorezcan la instalación. Esto puede suponer un inconveniente para realizar múltiples ensayos en serie.

Con la segunda opción no tiene por qué pasar lo mismo, ya que replicar solo las condiciones eléctricas puede ser más afín con un diseño favorable a ensayos en serie. Sin embargo, esto puede tener sus propios inconvenientes y, mal ejecutado, desemboca en resultados no válidos.

En cualquier caso, ambas opciones pueden ser válidas si son llevadas a cabo de la manera adecuada. Puesto que se dispone de un software de simulación, los defectos se tendrán en cuenta para condiciones reales aunque en determinado momento se pueda acudir al ensayo eléctrico.

Este pasatapas tendrá que pasar por un ensayo eléctrico en una de sus fases de producción que consistirá de dos partes. La primera será someter la pieza momentáneamente a una tensión de unas 2.5 veces su tensión nominal. A esta primera parte se la conoce como ensayo a frecuencia industrial y tiene por objetivo comprobar que el aislamiento de la pieza es adecuado. Tras esta parte, la tensión se disminuirá con intención de cerciorarse de que la pieza no presente descargas parciales a una tensión inferior al máximo valor nominal para el que está pensado funcionar. Por lo que si, por ejemplo, este pasatapas fuese a trabajar en una línea de 30 kV, tendría que aguantar durante un corto lapso de tiempo una sobretensión de 75 kV sin romper, y no presentar descargas parciales por debajo de 36 kV, máximo valor de tensión para este tipo de líneas.

7.3 DEFECTOS LEVES

Se consideran defectos leves todas aquellas imperfecciones en el resultado final de la pieza que no afecten a su correcto desempeño en funcionamiento. Es decir, que no provocan descargas parciales o perforación en el aislamiento durante el ensayo eléctrico y, por tanto, es eléctricamente apta para su uso.

Este tipo de defectos son visuales. No obstante, que no perjudiquen al funcionamiento como aislante de la pieza, no significa que puedan pasarse por alto. En este aspecto entra en juego también el concepto de calidad asociado a la apariencia. Y es que una pieza aislante no solo ha de ser eléctricamente buena, además, ha de parecerlo dentro de unos márgenes.

7.3.1 PEQUEÑAS MUESCAS O MARCAS EN EL AISLANTE

Son principalmente producto de una mala inyección de la silicona en el molde, provocada por un mal vaciado del aire en el interior de este, dejando bolsas de aire que impidieren el correcto llenado.

Generalmente, estas marcas son visibles como una especie de araño en el material, formando una suerte de chaflán en el exterior de una de las bases del pasatapas (Fig. 74), ya que las esquinas del molde son los puntos más complejos de rellenar correctamente.

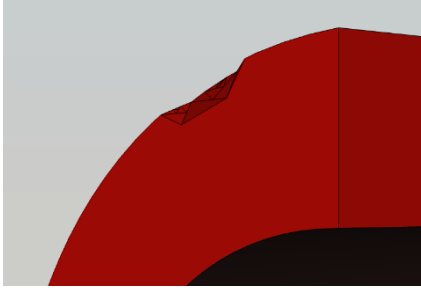


Fig. 74. Representación 3D de una muesca en el pasatapas. Realizado con SketchUp



Fig. 75. Simulación del campo eléctrico del pasatapas con defecto de muesca relleno de aire. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm)

También, dentro de esta categoría entrarían todas las marcas en el aislante que se encuentren en el exterior del pasatapas y próximas a las bases de este, que hayan podido generarse por cualquier otro proceso en la cadena de fabricación.

En funcionamiento, la muesca provocaría que quedase un hueco entre el pasatapas y la cazoleta de epoxi. Este espacio probablemente quedaría relleno con la grasa empleada en la instalación que, al ser de silicona, tiene propiedades parecidas a las de la pieza en cuestión de interacción con el campo eléctrico (permitividades similares) y una elevada rigidez dieléctrica. Por lo que el caso más desfavorable sería que este hueco quedase relleno de aire, el cuál tiene una permitividad y una rigidez dieléctrica menor, tendiendo a potenciar el campo eléctrico circundante.

En la Fig. 75, puede verse la simulación del campo eléctrico en el pasatapas pero esta vez se ha generado el defecto en cuestión como un chaflán en la esquina superior de la pieza.

El hueco se ha supuesto relleno de aire. La intensidad de campo mostrada es de 3 kV/mm, con lo que puede verse que este valor no se supera en el chaflán. La razón está en que la zona donde se encuentra la muesca, está en un gradiente de potencial muy suave, donde el campo eléctrico es poco intenso. Consecuentemente, la mayoría de defectos que se encuentren en zonas donde la magnitud del campo eléctrico es reducida, no afectan sensiblemente al funcionamiento eléctrico de la pieza y pueden ser considerados leves.

Si la muesca se encontrase más próxima al anillo, donde el campo eléctrico se torna más intenso, La gravedad de este defecto podría ser más elevada (Fig. 76).

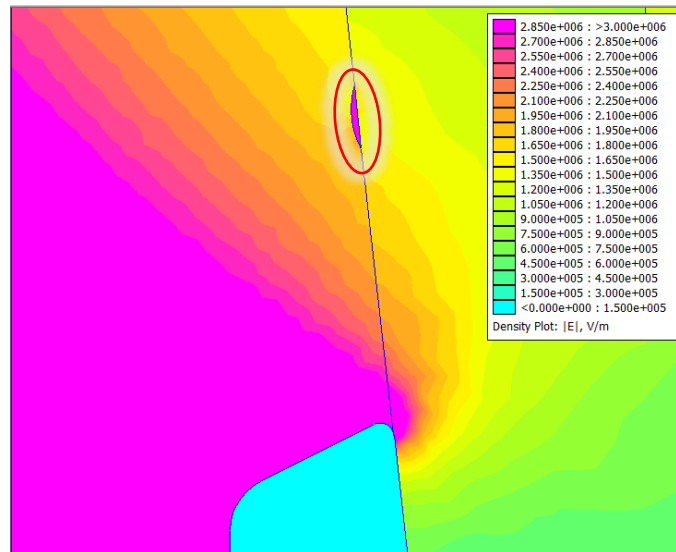


Fig. 76. Muesca en el pasatapas próxima al anillo exterior rellena de aire tras la instalación.

Puede verse cómo, si el defecto quedase relleno de aire durante la instalación, el campo eléctrico superaría los 3 kV/mm con creces, resultando en descargas que con el tiempo dañarían el aislamiento. Aunque lo más probable es que este espacio lo ocupase grasa aislante, que no daría ningún problema.

Estando tan abajo, es menos probable que la marca tuviese su origen en el proceso de inyección, pero en otro momento de la línea de producción la pieza pudo resultar dañada involuntariamente. Este es un defecto poco común.

Por tanto, siempre y cuando el defecto se encuentre cercano a las bases del pasatapas (más probable) y el tamaño de este no sea descarado, es decir, pueda visualmente pasarse por alto, la pieza puede llegar a darse por buena. El rango de tamaños aceptables habrá de pactarse con el cliente.

7.3.2 PEQUEÑAS MARCAS O MUESCAS EN EL ANILLO EXTERIOR

De la misma forma que cualquier muesca en el aislante de las bases del pasatapas no provoca graves consecuencias por la baja intensidad del campo eléctrico, cualquier marca en el rebaje exterior del anillo semiconductor, tampoco dará problemas por la misma razón.

La Fig. 77a demuestra que el rebaje del anillo exterior está completamente apantallado por la cara interna de este de forma que, eléctricamente, no daría ningún problema.

Si la muesca se encontrase algo más arriba (Fig. 77b), el campo eléctrico seguiría siendo muy bajo aún quedando el espacio entre el anillo y la cazoleta de epoxi relleno de aire.

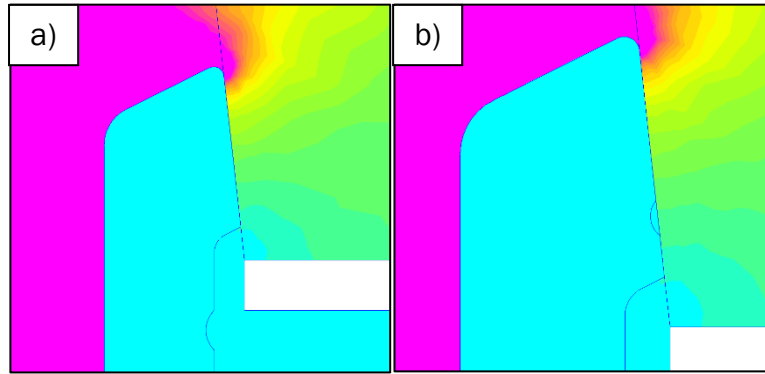


Fig. 77. Campo eléctrico en el pasatapas. a) Muesca en el rebaje del anillo semiconductor exterior. b) Muesca rellena de aire entre el anillo semiconductor y la cazoleta de epoxy. (Máx. E mostrado: 3 kV/mm)

Así, cualquier muesca que esté única y específicamente en el exterior del anillo semiconductor no provocará ningún problema más allá del aspecto visual. Y, de la misma forma que las muescas en las bases del aislante, una pieza con este defecto solo se desechará si el tamaño de este sale fuera de las especificaciones pactadas con el cliente.

En el apartado de defectos graves se estudiará el efecto de una muesca presente en el interior del anillo semiconductor.

7.3.2.1 BURBUJAS INERTES

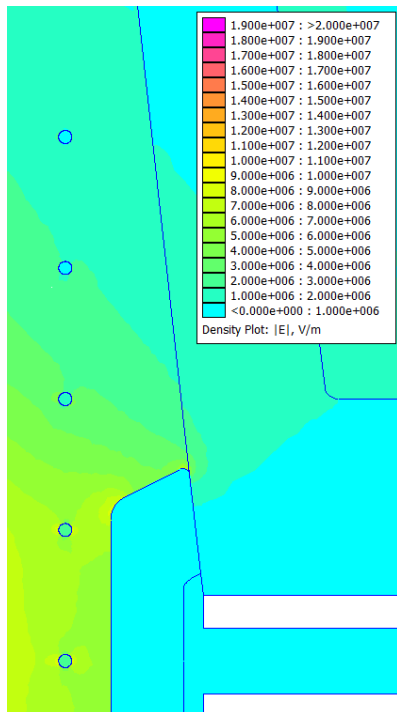


Fig. 78. Varias burbujas de 1 mm rellenas de un aditivo con permitividad $\epsilon_r=10$. (Máx E mostrado = 20 kV/mm)

Existe la posibilidad de que los aditivos de la silicona no estén bien mezclados, formando burbujas internas rellenas de un material con una permitividad no muy alejada de la silicona y, en todo caso, algo mayor, lo que haría que el campo eléctrico dentro de esta burbuja fuese menor (Fig. 78). La detección de estas burbujas, puesto que no provocan descargas, será visual y dependerá del grado de transparencia del material. La silicona sola, habitualmente es transparente, pero es posible obtener otros tipos de silicona con colorantes añadidos o aditivos que las hagan opacas. Evidentemente, si la silicona es opaca, estos defectos no son detectables visualmente.

En el apartado de defectos graves relativos a burbujas internas, se profundizará más en el aspecto del comportamiento eléctrico y las razones por las cuales un defecto de estas características es menos problemático.

7.4 DEFECTOS MODERADOS

Dentro de esta categoría entrarían todos aquellos defectos que pueden provocar o no un mal funcionamiento de la misma. De tal forma que si se pasasen por alto podrían incurrir en un fallo durante el funcionamiento o, por el contrario, la pieza podría trabajar perfectamente durante el resto de su vida útil.

7.4.1 DEFECTOS DE PINTURA

Este tipo de defectos incluyen los fallos provocados por un pintado incompleto del cilindro interno.

En el interior del pasatapas habrá una conexión entre conductores que estarán a la tensión nominal de la línea. Como ya se ha comentado, la función del recubrimiento con pintura semiconductor es la de conseguir una zona donde el campo eléctrico sea nulo y poder lograr una distribución del campo eléctrico uniforme.

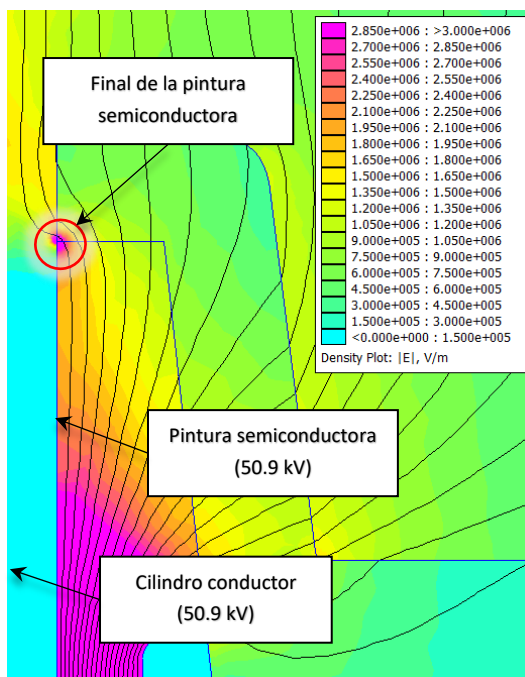


Fig. 79. Campo eléctrico y líneas equipotenciales del pasatapas con el conductor interior separado 5 mm.

En aquellas zonas donde haya una falta de pintura semiconductor se producirá una irregularidad que puede conducir a campos eléctricos intensos. La gravedad del defecto dependerá en gran medida de cómo sea la conexión. En las simulaciones anteriores se han tomado el foco de tensión como un cilindro uniforme de radio 20 mm y longitud infinita ya que, con el supuesto de la pintura semiconductor, el resultado a efectos de la simulación era válido. Si este cilindro conductor se alejase 5 mm y la pintura siguiere estando a la misma tensión, podrá comprobarse como el punto donde acaba la pintura actúa como una punta (Fig. 79).

El tramo final de la pintura ha de estar en contacto directo con un conductor como un casquillo cilíndrico de conexión como sucede en la patente de Schneider (Fig. 80). Así, las bases del pasatapas no quedan expuestas permitiendo evitar descargas en el medio aislante. En lo que al estudio de defectos se refiere, añadir este detalle al diseño del pasatapas permite hacer un matiz acerca de la gravedad de un pintado incompleto.

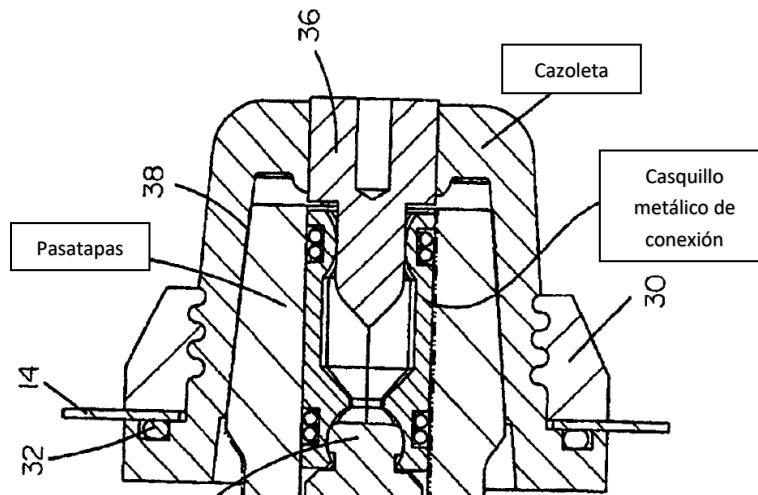


Fig. 80. Corte del pasatapas con conexión. Diseño por Schneider. [20]



Fig. 81. Representación 3D del pasatapas con un defecto de pintura en una de las bases. Realizado con SketchUp.

Si este defecto se encuentra en las bases, como puede verse en la Fig. 81, al tener que estar esta zona en contacto directo con un conector, la gravedad del defecto sería mínima debido a dos razones.

La primera es la proximidad entre puntos a la misma tensión. Al no haber suficiente gradiente, el campo eléctrico que puede generarse es mucho más pequeño. En la Fig. 82 puede verse una comparación entre el ejemplo anterior y uno con el conductor a 0.5 mm del interior del pasatapas.

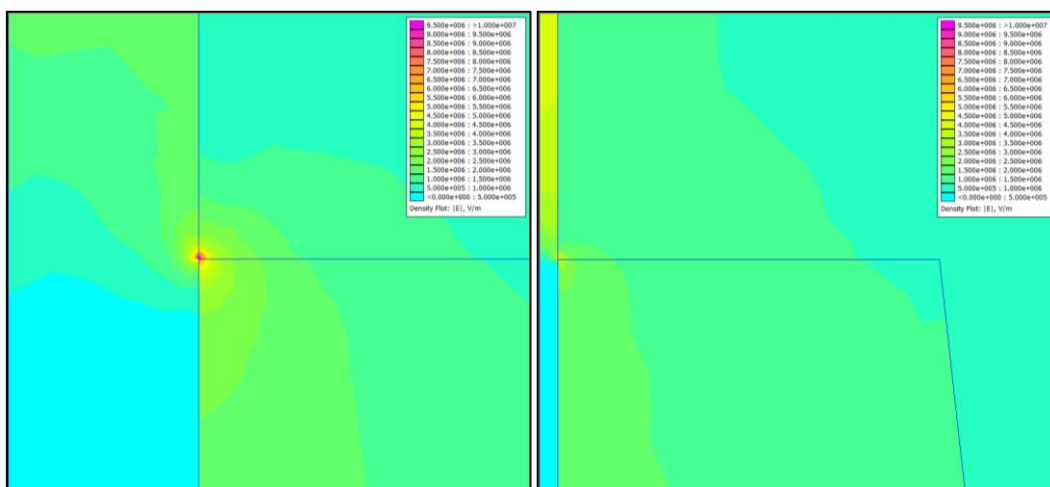


Fig. 82. Comparación campo eléctrico en el final del pasatapas con conductor a 5 mm y 0.5 mm. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm)

La intensidad del vórtice en el final de la pintura disminuye. Si estuviésemos directamente en contacto, como es el caso por lo comentado antes, el vórtice tenderá a desaparecer. Por tanto, si el recubrimiento de la pintura no es perfecto como en la Fig. 81, eléctricamente no causaría graves problemas porque toda esa zona estará en contacto con un conductor. De tal forma que, este defecto en concreto incurriría en un fallo visual que, nuevamente, podrá pasarse por alto siempre y cuando entre dentro de unas especificaciones pactadas con el cliente.

Una vez más, la posición del defecto modifica su gravedad. Volviendo a la conexión empleada en el modelo de Schneider, pueden existir tramos de la pintura semiconductora que no están en contacto directo con ningún elemento de la conexión y que además se encuentren en la mitad del pasatapas, donde el campo eléctrico es más intenso. De haber una parte sin pintar en esta zona, como se muestra en la simulación de la , este defecto sí podría provocar descargas y un funcionamiento indebido de la pieza.

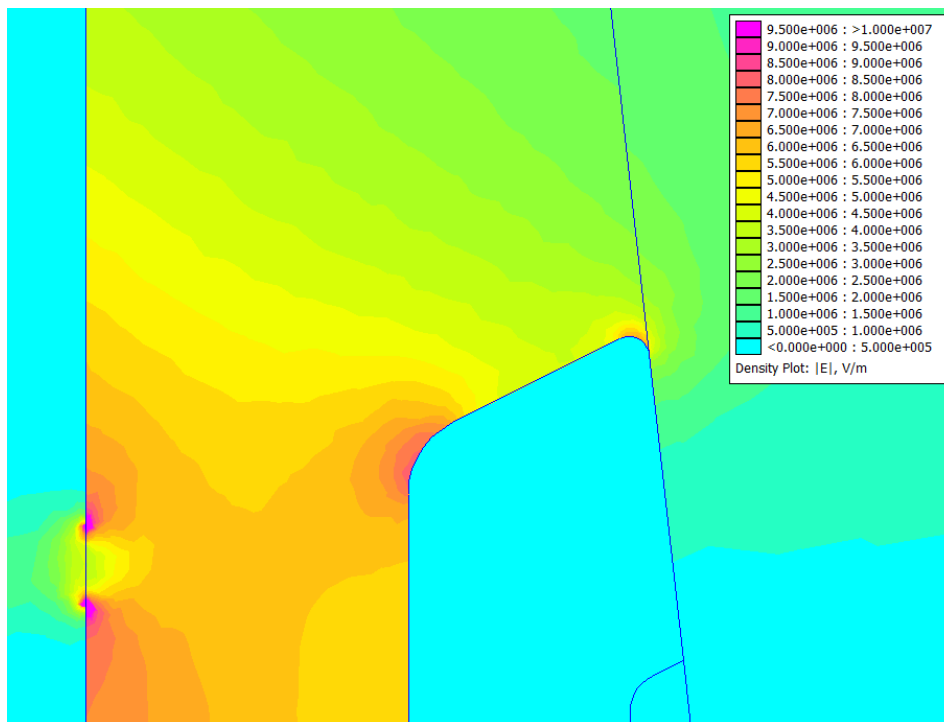


Fig. 83. Tramo sin pintura semiconductora cerca del anillo exterior. Conductor a 2 mm de la pared del pasatapas.

Se concluye por tanto de este apartado, que un pintado incompleto del interior del pasatapas puede considerarse como un defecto leve, siempre y cuando solo suceda en los extremos de este. Cualquier otro defecto de pintado más hacia el interior de la pieza, puede incurrir en defecto grave dependiendo de su posicionamiento con respecto a la distribución del campo eléctrico y la forma de la conexión en el interior.

7.4.2 DEFECTOS POR SUCIEDAD

La suciedad es uno de los grandes enemigos de los aislamientos eléctricos. Su presencia tanto en superficies como medios aislantes puede provocar descargas indeseadas. Es en el caso particular de la acumulación de partículas en superficies donde más habitualmente provocan problemas.

Los aislamientos se diseñan con un espesor determinado que impida una descarga directa entre los electrodos. No obstante, el camino directo más sencillo de recorrer por una corriente entre dos puntos a distinto potencial no tiene por qué ser una línea recta a través del aislante. El contorno es otro de los problemas a subsanar de una instalación eléctrica.

En la siguiente figura, se muestra una gráfica del campo eléctrico tangencial a la superficie indicada en rojo en la imagen izquierda.

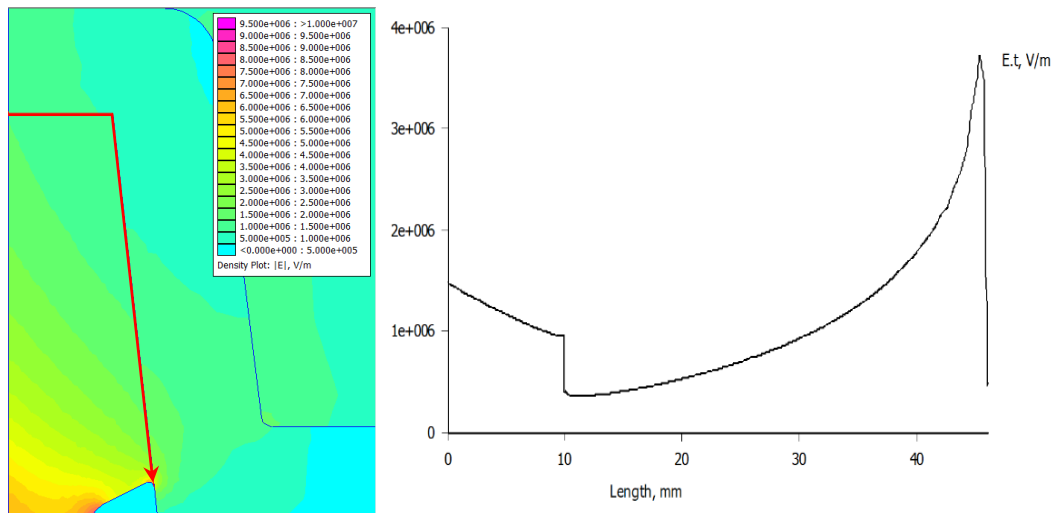


Fig. 84. Campo eléctrico en el pasatapas con gráfica de campo eléctrico tangencial.

Debido a la distancia, al contacto entre el pasatapas y la cazoleta y a que el poco espacio que quedase entre estos estará relleno con grasa de silicona, el camino dibujado con la flecha roja en la imagen no es apto para una descarga directa por contorno. Sin embargo, si la pieza estuviese sensiblemente sucia, el campo eléctrico tangencial a lo largo de la superficie puede, bien incrementarse o bien reducirse la magnitud necesaria de este para que al menos pudiesen producirse descargas parciales superficiales.

La suciedad es complicada de eliminar de la silicona puesto que tiene tendencia a quedarse pegada a esta. Si una pieza llega sucia al cliente, puede ser por responsabilidad del fabricante, por lo que hay que tener especial cuidado en evitar que se adhieran partículas a los pasatapas durante el proceso de fabricación y transporte. Es imposible que las piezas no tengan algo de suciedad. Por lo que hay que mantener el nivel de esta en el mínimo posible.

7.5 DEFECTOS GRAVES

En esta última categoría entrarán todos los defectos que provocan un estrés eléctrico adicional que derivará en el fallo del pasatapas. El paso por alto de estos fallos es una falta grave para con el cliente, por tanto, es necesario hacer énfasis en la detección y prevención de estos, y evitar a toda costa que lleguen al producto final.

7.5.1 BURBUJAS DE AIRE

Anteriormente ya se ha mencionado que pueden darse burbujas que no agraven la distribución de campo eléctrico y que, por tanto, no afectan gravemente al comportamiento de la pieza.

Por el contrario, si estas burbujas quedan rellenas de un material conflictivo, como el aire, sí que provocan graves problemas a la pieza. En el apartado 3, se ha comentado en profundidad el concepto de descargas parciales. Es concretamente en esta sección donde el conocimiento antes expuesto entra en juego primordialmente.

Durante el proceso de inyección, el molde está lógicamente lleno de aire, el cuál es desplazado por la silicona cuando se inyecta, siendo expulsado de la cavidad. En algún momento de este proceso se puede dar la posibilidad de que una o varias burbujas de aire queden atrapadas en el aislamiento.



Fig. 85. Burbuja de aire atrapada en un aislamiento de silicona.

Este es un problema que se intenta controlar estableciendo parámetros adecuados de presión y temperatura durante la inyección y el vulcanizado. Aún así, en un gran volumen de producción es posible que aparezcan estas burbujas, en particular durante los arranques de producción o si el proceso es todavía algo inmaduro. A medida que se vaya ganando experiencia durante la fabricación de un determinado diseño de pieza, estos fallos serán menos frecuentes.

Las burbujas no tienen por qué ser muy grandes para dar problemas. Tanto es así, que aún disponiendo de un material transparente, el control visual no es suficiente para detectarlas. Es por ello que el ensayo eléctrico tiene tanta relevancia en la producción de este tipo de piezas.

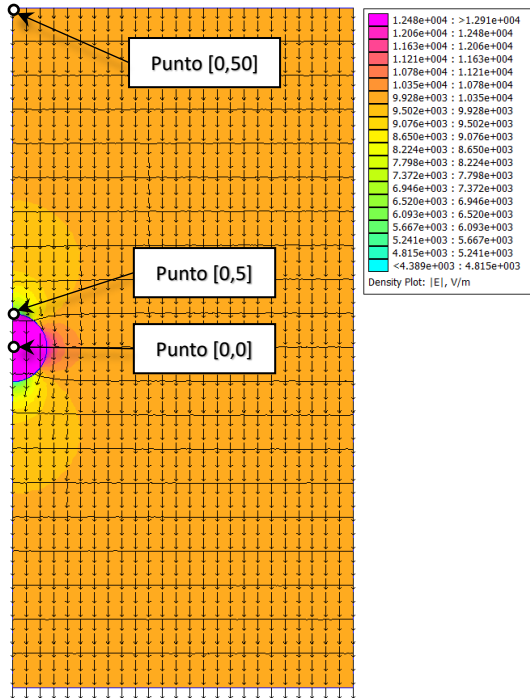


Fig. 86. Ejemplo de burbuja esférica en un gradiente de potencial uniforme. Mostrado campo eléctrico con vectores y líneas equipotenciales.

No todas las burbujas son igual de problemáticas, su posición y magnitud de descarga son factores determinantes.

Para desarrollar más el funcionamiento de las burbujas en un medio aislante, se va a realizar un ejemplo muy simple (Fig. 86).

Este consiste en una burbuja esférica de 10 mm de diámetro y rellena de un material con $\epsilon_{r1}=1$ sometida a un campo eléctrico uniforme generado por dos electrodos separados 100 mm en un medio con $\epsilon_{r2}=3$. Para conseguirlo se posiciona un semicírculo atravesado por el eje [0,y] que en modo *Axysymmetric* será el eje de revolución para resolver el problema.

Al simular el campo eléctrico, puede verse que en la burbuja este se intensifica considerablemente además de ser uniforme dentro de ella.

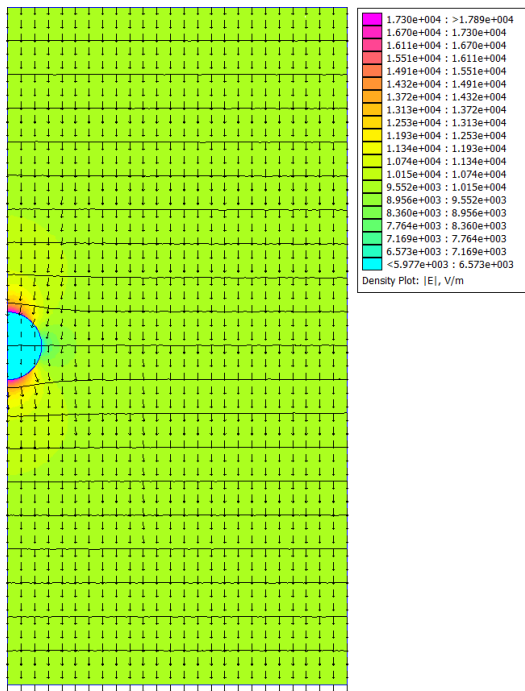


Fig. 87. Ejemplo de burbuja esférica materiales invertidos. Mostrado campo eléctrico con vectores y líneas equipotenciales.

Si por el contrario, invirtiésemos los materiales, se obtendría lo que se observa en la Fig. 87. Aquí el campo es menos intenso en el interior de la burbuja.

Este resultado ya se ha visto en el apartado 5.1. El efecto de desplazamiento de campo provoca que los materiales con menor permitividad que el medio que los rodea intensifiquen el campo eléctrico circundante y viceversa.

En este caso, la relación entre el campo eléctrico E_1 dentro de la burbuja y el campo uniforme incidente E_0 no es el cociente de la permitividades pero si que depende de ellas.

La solución analítica es más compleja que la que se obtuvo en su momento para dos medios con distinta permitividad. Esto se debe a que el factor de la geometría complica más la resolución. Como ya se ha mencionado, FEMM soluciona los problemas propuestos con la ecuación de Poisson (Ec. XIX, ecuación de Laplace en este caso ya que la densidad de carga ρ es igual a cero). La solución de esta ecuación para el campo eléctrico dentro de la burbuja esférica es la siguiente [1, p. 97]:

$$\text{Ec. XXXVI} \quad E_1 = E_0 \frac{3 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2 \varepsilon_2} \Leftrightarrow E_1 = E_0 \frac{3 \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} + 2 \varepsilon_{r2}}$$

De forma similar a la ecuación obtenida en el ejemplo del apartado 5.1 (Ec. XXVI), la relación entre el campo eléctrico fuera y dentro de la burbuja es un cociente donde participan únicamente las permitividades de los medios. Esta solución es válida para el campo eléctrico en cualquier punto dentro de la burbuja puesto que aquí el campo es uniforme. En la Fig. 88 se comprueba que esta relación es la que existe en el resultado de la simulación.

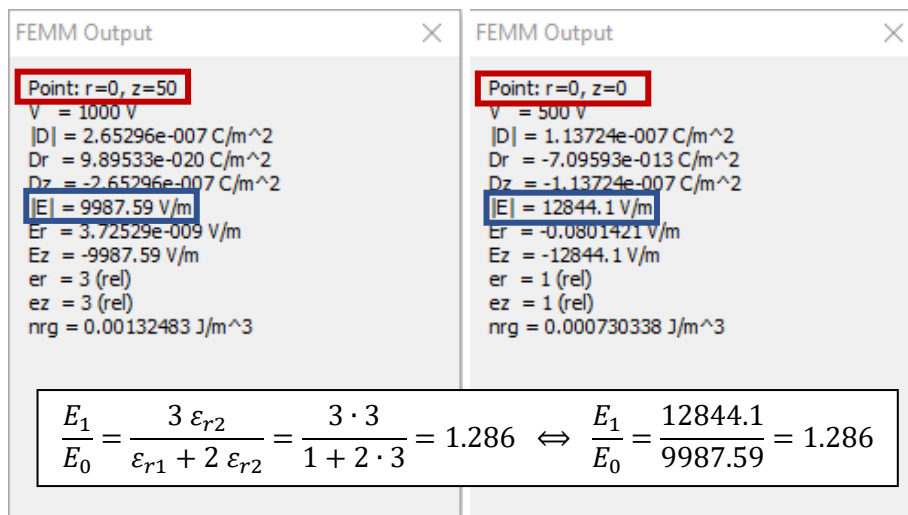


Fig. 88. Datos de los puntos [0,50] (E_0) y [0,0] (E_1) con comprobación de resultados.

También se puede obtener el campo eléctrico justo en la superficie de la burbuja, donde es perpendicular a la superficie de esta, lo que en Fig. 86 corresponde al punto [0,5]:

$$\text{Ec. XXXVII} \quad E_2 = E_0 \frac{3 \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + 2 \varepsilon_2} \Leftrightarrow E_2 = E_0 \frac{3 \varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r1} + 2 \varepsilon_{r2}}$$

Puede verse cómo ambas ecuaciones cumplen la Ec. XXVI:

$$\frac{E_1 = E_0 \frac{3 \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} + 2 \varepsilon_{r2}}}{E_2 = E_0 \frac{3 \varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r1} + 2 \varepsilon_{r2}}} \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}$$

Esto se debe a lo que también se pudo ver en el apartado 4.1, en la Ec. XXIX. El campo eléctrico perpendicular a la superficie siempre cumple esta relación.

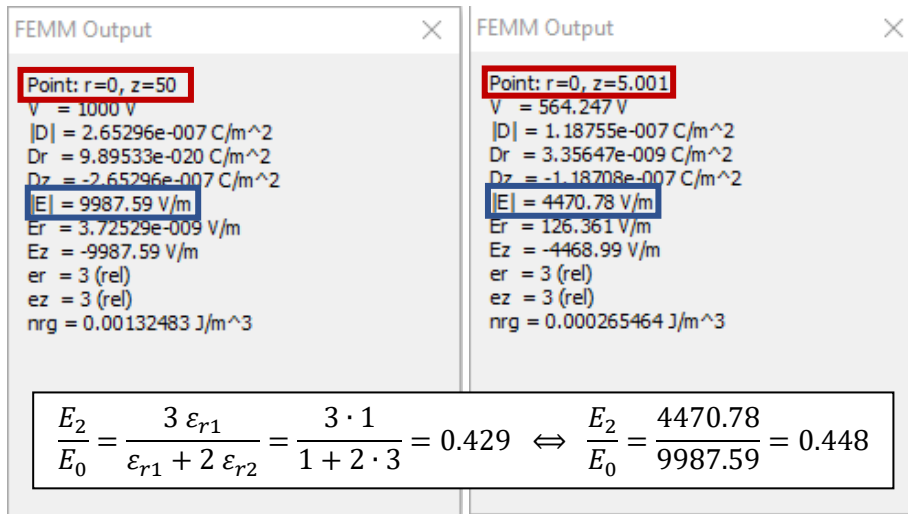


Fig. 89. Datos de los puntos [0,50] (E_0) y [0,5] (E_2) con comprobación de resultados.

Una de las consecuencias más interesantes del resultado obtenido en la Ec. XXXVI es que el campo eléctrico en el interior de la burbuja tiene un valor máximo posible:

Ec. XXXVIII
$$\varepsilon_2 \gg \varepsilon_1 \xrightarrow{Ec.XXXVI} E_{1\text{máx}} = \lim_{\varepsilon_2/\varepsilon_1 \rightarrow \infty} E_0 \frac{3 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2 \varepsilon_2} = \frac{3}{2} E_0 \Rightarrow E_{1\text{máx}} = 1.5 E_0$$

De esta forma, por muy grande que sea la diferencia entre las permitividades del defecto y la del aislante, el máximo incremento de campo eléctrico que puede alcanzarse en el interior de la burbuja es del 50%. En la Fig. 90 puede comprobarse como esto es cierto. Puesto que no se puede introducir un valor infinito de permitividad se establece $\varepsilon_{r2}=10^{18}$.

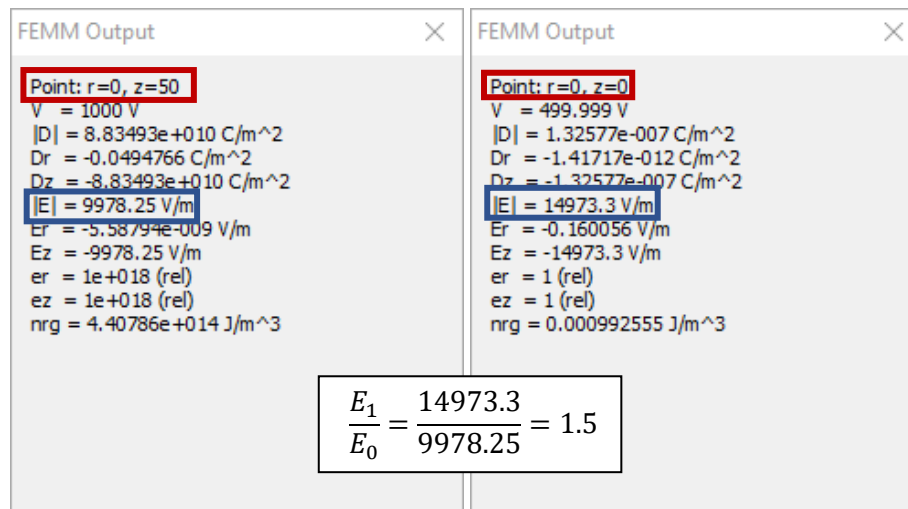


Fig. 90. Datos de los puntos [0,50] (E_0) y [0,0] (E_1) y comprobación de resultados con $\varepsilon_{r2}=10^{18}$.

La Ec. XXXVI solo es aplicable para una esfera. El siguiente ejemplo (Fig. 91) parte como una modificación sustituyendo la esfera por elipsoides con distinta excentricidades. Puesto que el dibujo de una elipse en FEMM es algo complicado, se opta por trazar una elipse con AutoCAD y luego importarla en formato DXF a FEMM. Para sacar más datos en claro, se mantiene la relación entre permitividades ($\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}=\infty$) con objetivo de ver si hay también convergencia.

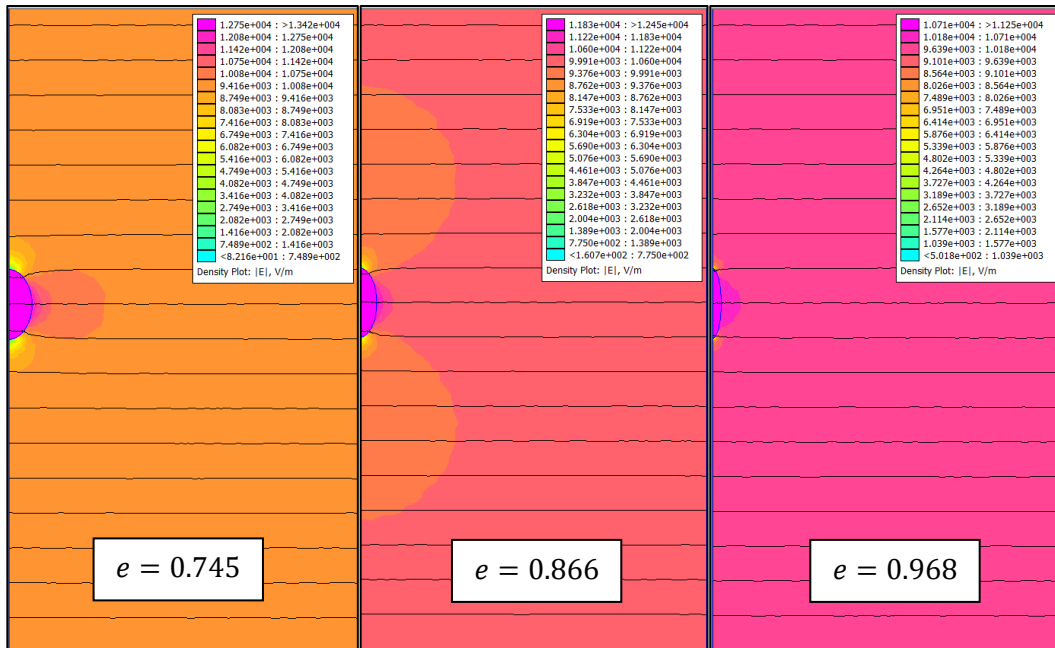


Fig. 91. Simulación del campo eléctrico con elipsoides y $\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}=\infty$. Excentricidad indicada en cada caso.

De la leyenda de colores, puede intuirse que la diferencia entre el campo eléctrico en el interior y el incidente es menor a medida que aumenta la excentricidad por lo que sí se comprueba que hay convergencia. Las siguientes imágenes muestran los resultados y relación es del campo eléctrico E_1 y E_0 .

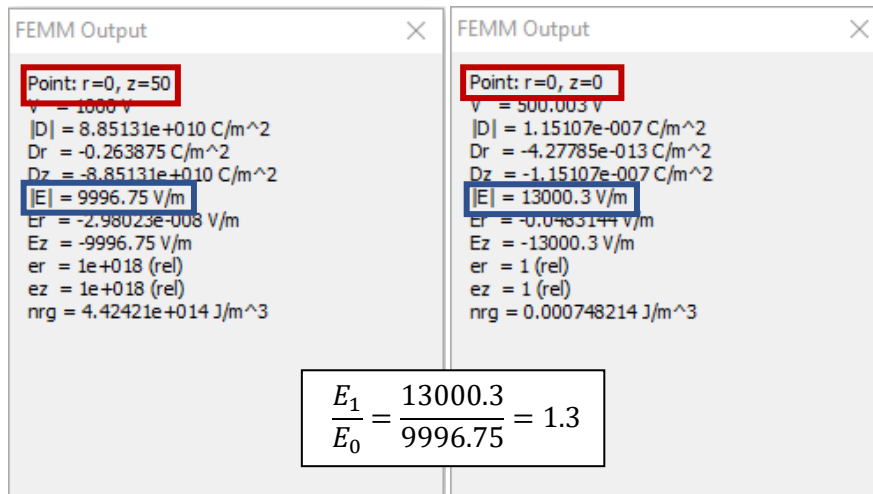


Fig. 92. Valores de campo eléctrico para esferoide con excentricidad $e=0.745$.

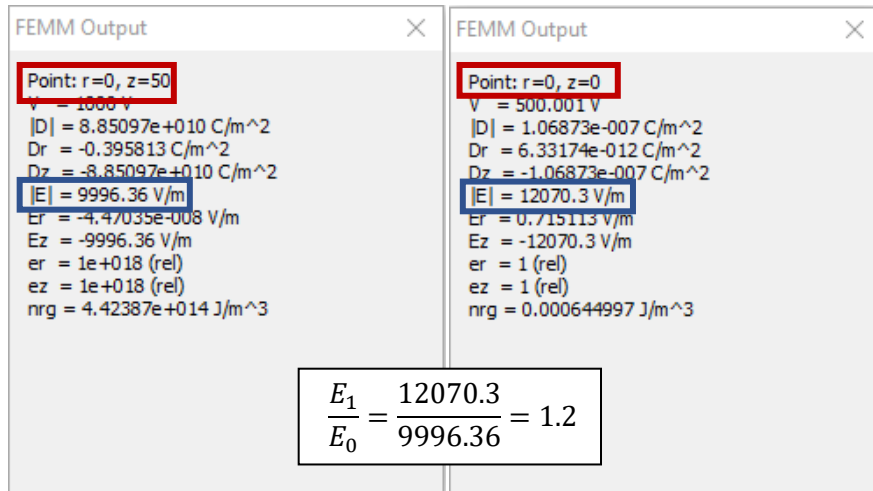


Fig. 94. Valores de campo eléctrico para esferoide con excentricidad $e=0.866$.

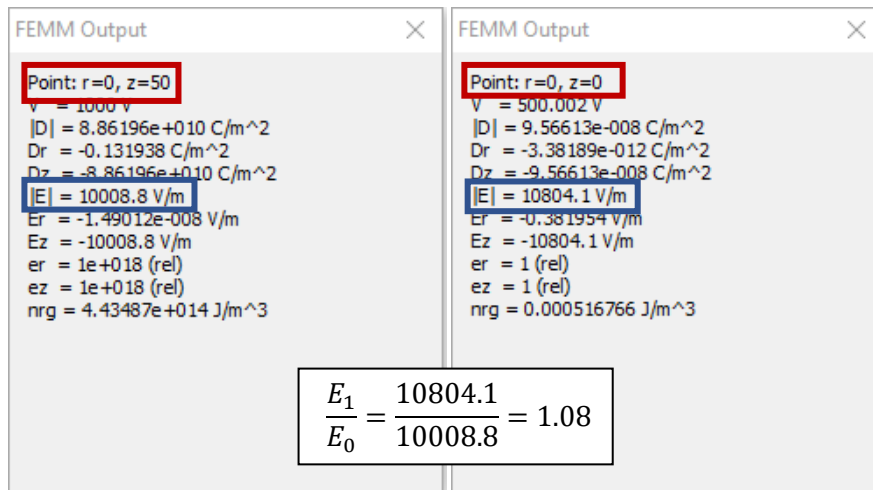


Fig. 93. Valores de campo eléctrico para esferoide con excentricidad $e=0.968$.

De los resultados mostrados, se observa que con el aumento de la excentricidad la relación entre los campos eléctricos tiende a 1. La explicación se puede dar con uno de los principios comentados en el apartado 4. En la Ec. XXVIII, se obtenía como resultado que el campo eléctrico tangencial en la superficie de la interfase había de ser igual en ambos lados de esta. Al estrecharse la burbuja en la dirección del campo eléctrico incidente, el campo absoluto en el interior es cada vez más próximo al valor de campo eléctrico tangencial y, como este tiene que ser igual tanto fuera como dentro de la superficie, la única manera de seguir cumpliendo este principio es ir igualando E_1 a E_0 .

Llegado a este punto, puede intuirse qué es lo que pasará si se cambia la orientación de los elipsoides pasando de ser paralelos a E_0 a ser perpendiculares a este. Esto es lo que muestran las simulaciones de la siguiente imágenes.

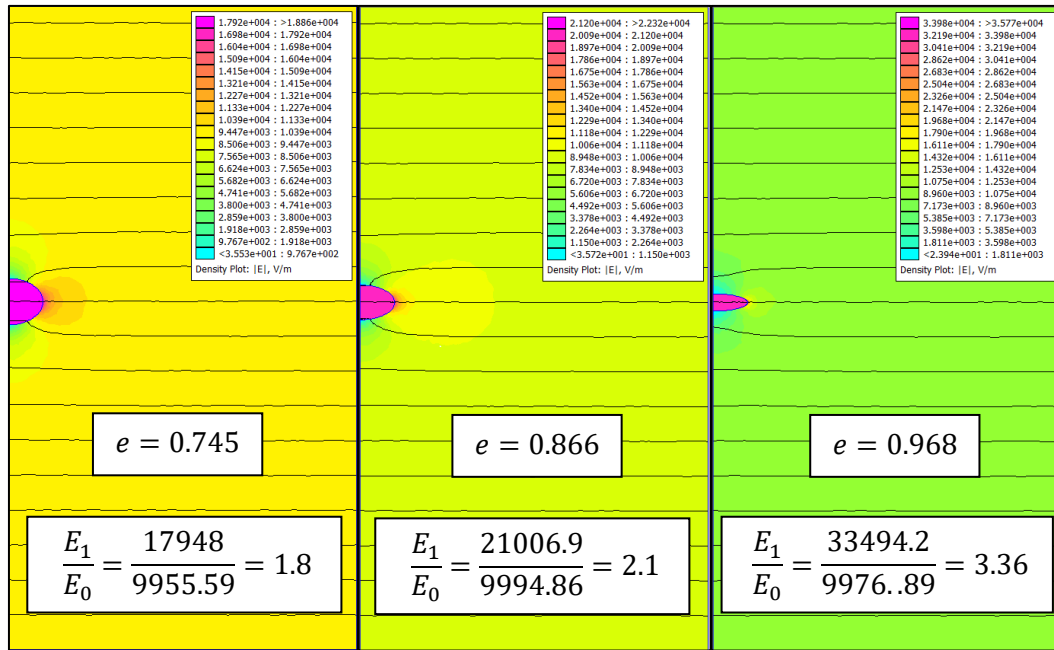


Fig. 95. Simulación del campo eléctrico con elipsoides cambiados de orientación 90° y $\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}=\infty$. Excentricidad indicada en cada caso y relación entre E_1 y E_0 .

De un solo vistazo se observa cómo el efecto ahora con la excentricidad es el opuesto al caso anterior. A mayor excentricidad más grande es E_1 con respecto a E_0 . La razón se obtiene del otro principio del apartado 5 y ya mencionado antes en esta sección. La Ec. XXIX dice que el campo eléctrico normal a la superficie sigue la relación directa entre las permitividades. Al achatarse la burbuja con respecto al campo incidente, el valor normal de E_1 es más cercano a su valor absoluto. Por tanto, la manera de seguir cumpliendo es principio es con una tendencia de E_1/E_0 hacia $\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}$ a medida que aumenta la excentricidad. Para este caso en particular simulado esta tendencia es hacia infinito, pero en el caso de la Fig. 86 sería hacia $E_1/E_0=3$.

Hasta ahora se ha desarrollado el caso para burbujas donde su permitividad es inferior a la del medio circundante. Para el caso opuesto ($\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$), el proceso deductivo para preveer los resultados es muy similar. Aunque ya se ha mostrado un anticipo de este concepto en la Fig. 87, se desarrollará más en profundidad en el apartado 7.5.3.

Puesto que la permitividad relativa del aire es 1, cualquier aislante sólido en el que se encuentre una burbuja de aire tendrá mayor permitividad que esta. Por tanto, de los razonamiento desarrollados se obtienen una serie de nociones acerca de la presencia de estos defectos en dieléctricos.

La primera noción es que sea como sea la burbuja, el campo eléctrico en su interior será superior al circundante. Esto es un problema puesto que el aire tiene una menor rigidez dieléctrica que los aislantes sólidos, por lo que son mucho más propensas a presentar descargas parciales.

La segunda es que da igual la permitividad del aislante, el incremento de aire en la burbuja tiene un límite. Este límite dependerá de la forma de la burbuja y la orientación de esta con respecto al campo eléctrico.

Lo cuál lleva a la tercera y última noción. Una burbuja alargada puede ser más peligrosa o menos que una esférica. Si el largo del defecto es paralelo al campo incidente, el incremento de campo será menor, y si es perpendicular, mayor.

Por último, antes de analizar la presencia de burbujas en el pasatapas, cabe mencionar un detalle. Las simulaciones antes mostradas plantean esferas. Pero, debido al posicionamiento de un círculo con respecto al eje de rotación en el dibujo de FEMM, en el modo *Axysymmetric*, la burbuja pasará a ser un toroide.

La Fig. 96 muestra el caso planteado. Se ha partido del ejemplo realizado hasta ahora, desplazando la burbuja del eje hacia el centro del dibujo. Para observar la convergencia se ha mantenido la relación $\epsilon_{r2}/\epsilon_{r1}=\infty$.

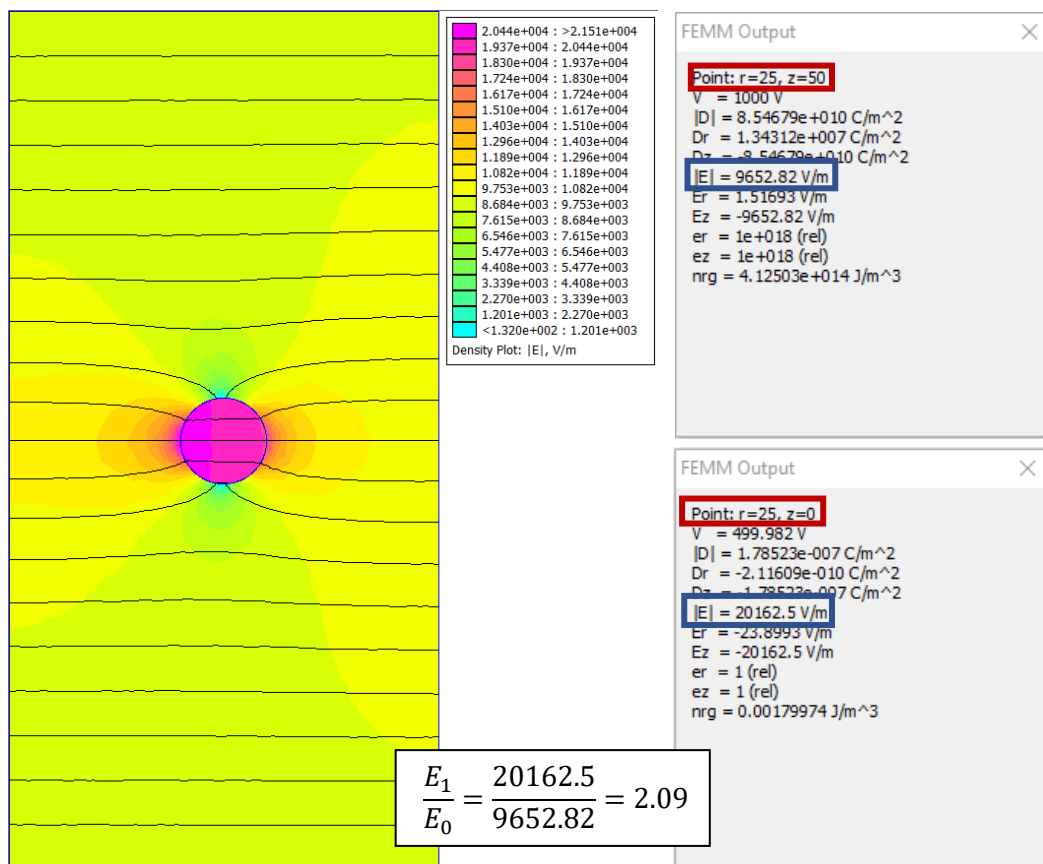


Fig. 96. Campo eléctrico de burbuja simulada como toroide junto con datos de los puntos [25,50] (E_0) y [25,0] (E_1).

Al hacer la simulación así, el resultado es distinto al de una burbuja esférica. El campo eléctrico en el interior del defecto no es tan uniforme y la convergencia, que tendría que ser a $1.5E_0$, lo hace a $2E_0$. Esto se debe a que la Ec. XXXVI ya no es válida. El resultado puede en cambio aproximarse para la ecuación de un cilindro de longitud infinita orientado transversalmente a un campo eléctrico uniforme, quedando las nuevas ecuaciones para E_1 y E_2 así [25]:

$$\text{Ec. XXXIX} \quad E_1 = E_0 \frac{2 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \Leftrightarrow E_1 = E_0 \frac{2 \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}}$$

$$\text{Ec. XL} \quad E_2 = E_0 \frac{2 \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \Leftrightarrow E_2 = E_0 \frac{2 \varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}}$$

No obstante, esta simulación este ejemplo es muy distinto a la simulación que se va a hacer con el pasatapas. Aquí se está generando un campo uniforme entre dos placas, mientras que en el pasatapas la tensión es generada por un cilindro y el electrodo de baja es un anillo exterior concéntrico. En la siguiente imagen la “burbuja” de aire es ahora de 1 mm de diámetro y se encuentra en el medio de un campo eléctrico generado por dos cilindros coaxiales. El pequeño de radio 20 mm está a 1000 V y el mayor, separado de este 10 mm está a tensión cero. Para la permitividad del medio se toma $\varepsilon_{r2}=3$.

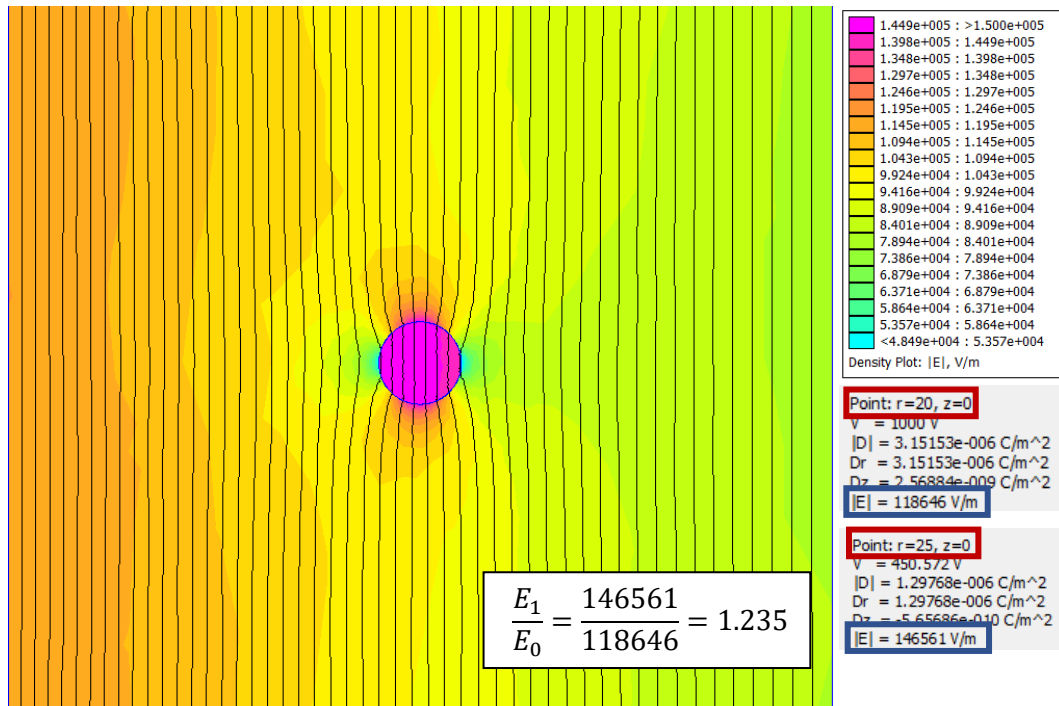


Fig. 97. Campo eléctrico de toroide entre cilindros coaxiales con valores de los puntos [20,0] (E_0) y [25,0] (E_1) junto con relación entre los campos. $\varepsilon_{r2}=3$.

Con esta simulación se obtiene que la relación entre los campos eléctricos es más parecida a la que se obtiene con la Ec. XXXVI visto en la Fig. 88. No hay que perder tampoco de vista que en este caso el campo eléctrico no es constante en el medio circundante, si no que va disminuyendo. De hecho, si compara con el campo eléctrico que debería haber en el punto [25,0] si no estudié la burbuja, lo cuál puede hacerse viendo el valor de campo un punto alejado más arriba, por ejemplo el [25,20] puede verse que la relación es:

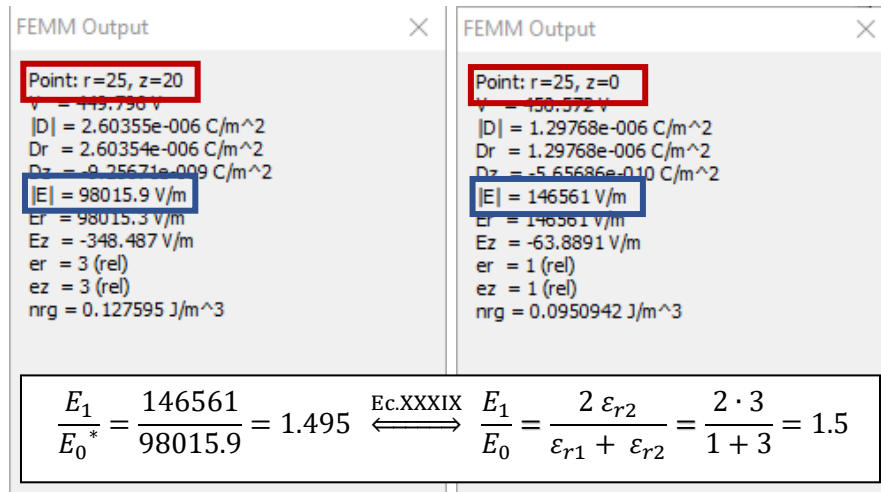


Fig. 98. Valores de los puntos [25,20] (E_0^*) y [25,0] (E_1) con relación entre campos según Ec. XXXIX.

Por tanto, aunque inicialmente de la Fig. 97 pueda pensarse que la simulación del defecto se aproxima mejor al resultado de una esfera con el planteamiento del pasatapas, en realidad, se sigue aproximando mejor por un cilindro.

De cualquier forma, aunque no es la ecuación real, es lo suficientemente parecida a la ecuación correcta como para poder realizar el estudio de burbujas en el pasatapas, siempre y cuando se tenga en cuenta este matiz. Únicamente ha de tenerse en cuenta que la convergencia de la Ec. XXXIX es hacia un valor mayor, por tanto los resultados estarán más sobredimensionados.

Habiendo realizado este desarrollo, puede continuarse con el efecto de las burbujas de aire en el pasatapas realizando una simulación. Esta consistirá en cinco burbujas de aire ($\epsilon_r=1$) de 1 mm de diámetro separadas cada una a 10 mm para observar la diferencia entre ellas según el lugar donde se encuentren. La tensión de simulación seguirá siendo $36 \cdot \sqrt{2}$ kV.

En la Fig. 99 puede verse cómo cuánto más alejada esté la burbuja del anillo menos intenso es el campo. Lo cuál es lógico puesto que este defecto solo intensifica el campo incidente sobre ella.

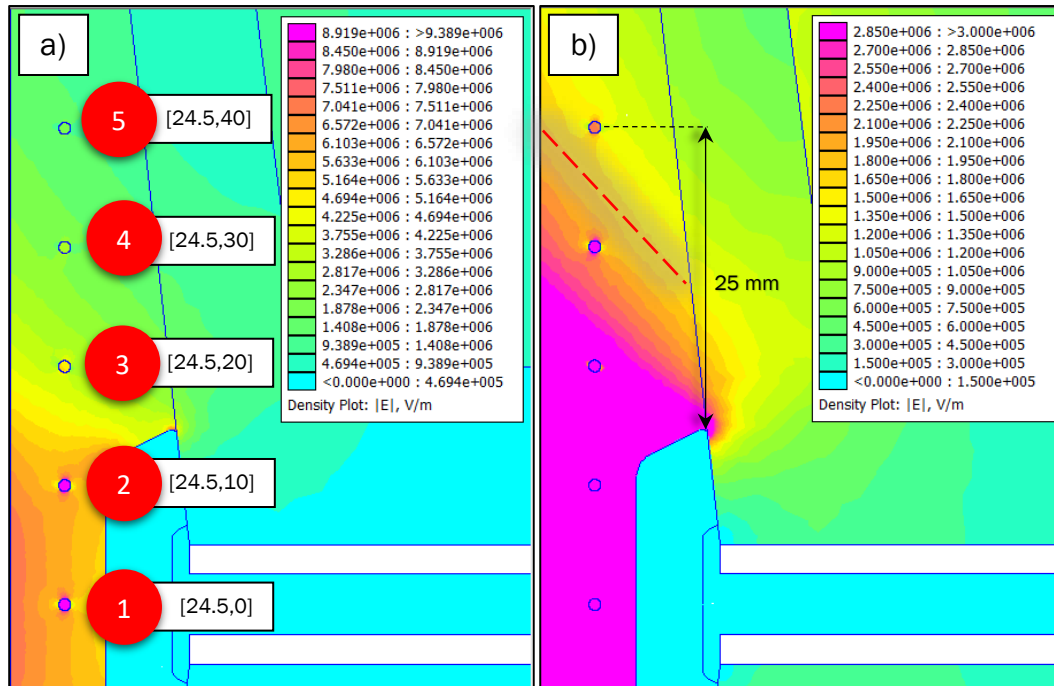


Fig. 99. Simulación de campo eléctrico en el pasatapas con 5 burbujas de aire de 1mm separadas 10 mm cada una. a) Máx. E: 9.389 kV/mm. b) Máx. E: 3 kV/mm

En la Fig. 99b el color más intenso representa la zona donde el campo es superior a 3 kV/mm, la rigidez dieléctrica del aire. Se aprecia cómo cualquier burbuja por debajo de la línea discontinua dará descargas parciales con total seguridad a 36 kV de valor eficaz.

La burbuja 5, a unos 25 mm del punto más arriba del anillo exterior (Fig. 99b), presenta un campo inferior a 3 kV/mm. Puede ser precipitado asegurar que no presentará descargas puesto que tiene un valor de 2.21 kV/mm y la rigidez del aire es una característica que depende de varios factores como la presión, la temperatura o la humedad, por lo que podría darse el caso de haber DP. Aunque hay que tener en cuenta que la simulación aumenta el factor de incremento del campo eléctrico por la sustitución de la esfera por un toroide. Aún así, aquí la intensificación del campo es mucho menor hasta el punto de que existe la posibilidad de que no causase problemas. Por tanto, habría una zona, la parte más próxima a las bases del pasatapas, para la cuál la burbuja de aire consistiría en un defecto visual, dónde entraría en juego principalmente el tamaño del defecto, más que la gravedad que pueda causar.

Sin embargo, no se puede olvidar el hecho de que la forma del defecto puede incrementar su gravedad, como ya se ha visto antes. Cualquier burbuja alargada en la dirección longitudinal del pasatapas podría incrementar notoriamente el campo eléctrico. En la Fig. 100 pueden verse dos burbujas elipsoidales situadas en la misma posición que la burbuja 5. La orientación de estas incrementa o disminuye el campo en su interior hasta el punto de asegurar la presencia o ausencia de DP.

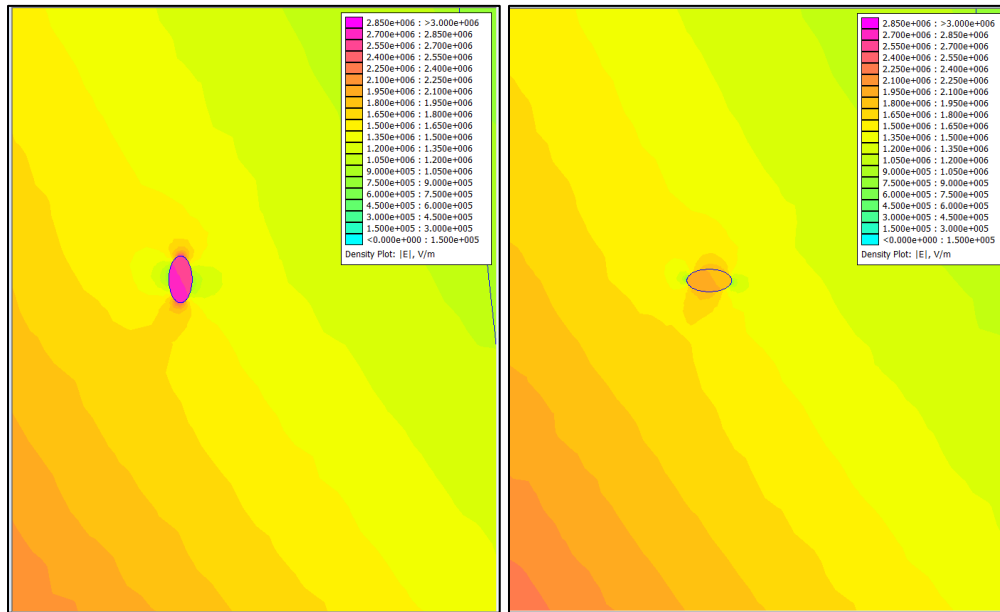


Fig. 100. Simulación campo eléctrico de dos elipsoides (1x0.5 mm, $\epsilon=0.866$) con distinta orientación situados en el punto [24.5,40] (burbuja 5).

Por tanto, de este estudio se extrae que la presencia de burbujas de aire en el aislamiento del pasatapas es un defecto grave y en la mayoría de casos provocarán descargas parciales. Cuanto más alejadas estén del anillo, menos probable es que incurran en estas descargas. Pero debido al efecto que tiene la forma del defecto en cómo sea el campo en su interior, lo que visualmente puede parecer un defecto leve en base a este razonamiento, en un ensayo eléctrico puede demostrarse que no.

Así pues, este tipo de defectos solo puede certificarse su gravedad y, consecuentemente la categorización de la pieza como buena o mala, a través de un ensayo eléctrico. En el cuál el cliente habrá de especificar por debajo de qué valor de descarga puede una pieza considerarse como buena.

7.5.2 DEFORMACIONES EN EL INTERIOR DEL ANILLO SEMICONDUCTOR

Las muescas en la lado exterior del anillo, son poco problemáticas por el apantallamiento que proporciona visto en el apartado 7.3.2. Si la muesca se encuentra en el interior, la gravedad del defecto puede elevarse en función de si el hueco que queda es rellanado por silicona o por aire durante la inyección. Además que la forma de este pueda tornarse en una punta con su consecuente incremento en el campo eléctrico en torno a ella.

En las siguientes imágenes se analizará la gravedad del defecto según la zona del anillo en que se produzca el defecto y si la muesca queda rellena de aire o de silicona.

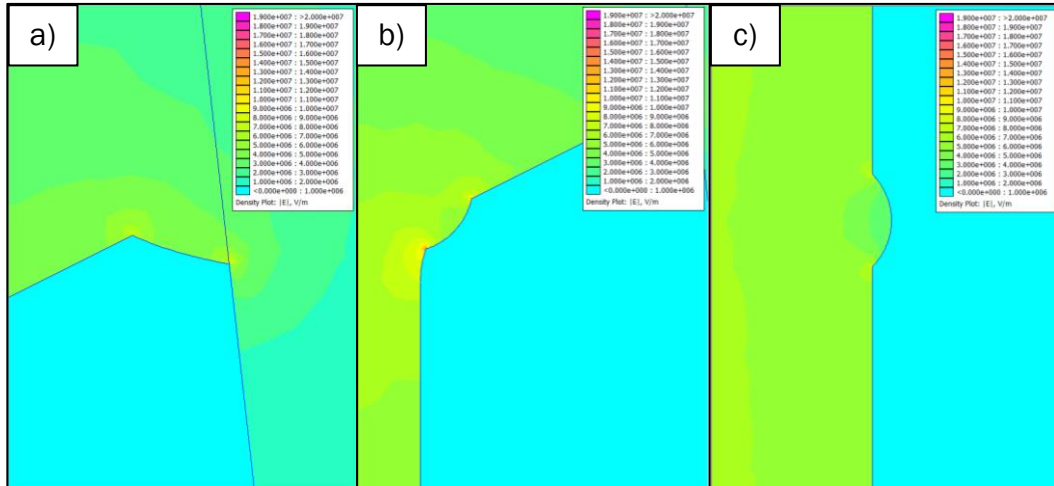


Fig. 102. Campo eléctrico en muescas interiores rellenas de silicona en el anillo exterior. a) Punta superior del anillo. b) Codo interior del anillo. c) Cara interior del anillo. (Máx. E mostrado: 20 kV/mm)

Puede verse que una muesca en el anillo semiconductor, a priori, al quedar rellena de silicona no parece que pueda crear graves problemas, puesto que en ningún momento supera los 20 kV/mm que pueden superar la rigidez dieléctrica de la silicona. Sin embargo, esta simulación, al igual que el resto, está realizada para $36 \cdot \sqrt{2}$ kV. Previamente si ha indicado que los pasatapas han de pasar un ensayo a frecuencia industrial con una tensión de 2.5 veces la tensión nominal de trabajo. Eso suponen 75 kV de valor eficaz, que en FEMM habrían de introducirse como $75 \cdot \sqrt{2}$ kV en su valor de pico. Es decir, la pieza ha de soportar valores de pico de 106 kV durante al menos un minuto. Al introducir este valor en la simulación, el resultado obtenido en la imagen anterior cambia por el siguiente:

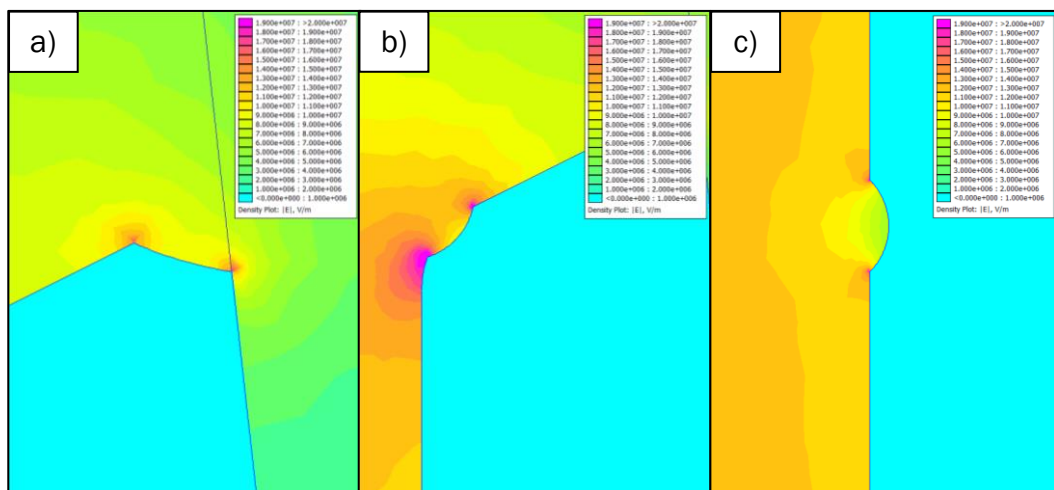


Fig. 101. Campo eléctrico en muescas interiores rellenas de silicona en el anillo exterior. Tensión de 106 kV. a) Punta superior del anillo. b) Codo interior del anillo. c) Cara interior del anillo. (Máx. E mostrado: 20 kV/mm)

Inmediatamente puede apreciarse el aumento de campo en las puntas de las muescas. Especialmente en la Fig. 101b, que se encuentra en la zona de mayor concentración de campo natural de la pieza.

Aún con todo, no tiene por qué producirse una perforación del aislamiento. Esto se debe a que la concentración del campo es contenida, y solo sucederá durante un minuto. Puede no resultar en un fallo inmediato durante el ensayo a frecuencia industrial, pero la pieza puede quedar algo dañada y acortar su vida útil ligeramente.

Durante el periodo de trabajo normal del pasatapas, no experimentará este nivel de tensión habitualmente puesto que las líneas eléctricas se diseñan y protegen para evitar sobretensiones, aún con la caída de un rayo. Por lo que la pieza podría funcionar de manera normal. Si la forma de la muesca es más grande o crea puntas más agresivas, quizá la concentración de campo se hiciese más potente y sí podría resultar en una rotura de la pieza. Pero esto sucederá durante el ensayo eléctrico por lo que la pieza defectuosa no llegará al cliente.

La mayor gravedad que puede acarrear este tipo de defecto es que este quede relleno de aire durante la inyección. Esto puede fácilmente suceder al formarse una bolsa de aire que mantenga la presión suficiente como para no desplazarse al entrar la silicona en el molde. Las siguientes imágenes modifican las muescas antes presentadas con el hueco relleno de aire. La tensión de simulación volverá a ser $36 \cdot \sqrt{2}$ kV puesto que con el aire lo que interesa ver es si producirá descargas parciales durante la tensión de trabajo. De la simulación de la Fig. 99b puede adelantarse cuál será el resultado de las siguientes.

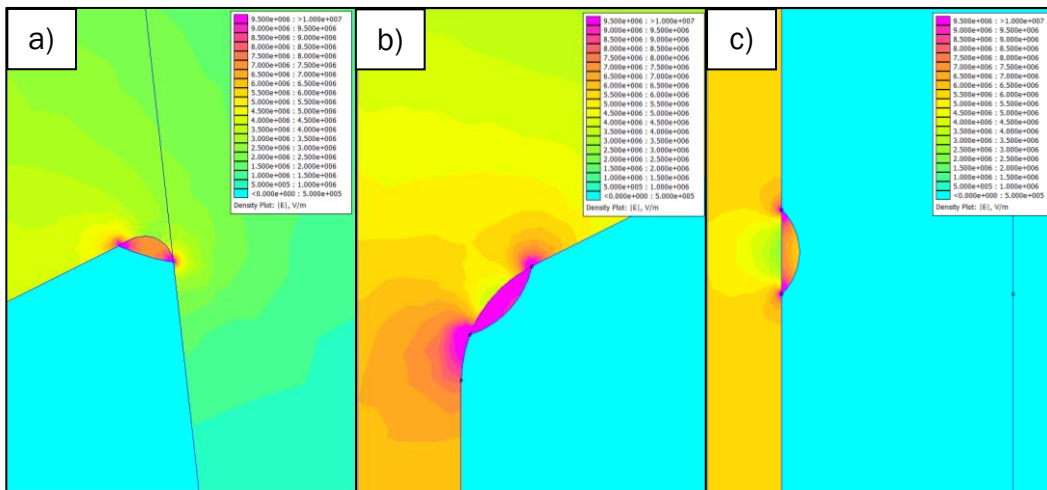


Fig. 103. Campo eléctrico en muescas interiores rellenas de aire en el anillo exterior. a) Punta superior del anillo. b) Codo interior del anillo. c) Cara interior del anillo. (Máx. E mostrado: 10 kV/mm)

El campo eléctrico mostrado se ha limitado a 10 kV/mm para poder visualizar mejor el defecto. Puede verse que el campo eléctrico dentro de la muesca supera ampliamente los 3 kV/mm, como era de preveer debido a su posición. Por tanto, que la muesca quede rellena de aire desembocará con total seguridad en DP.

Se concluye con esto que las muescas en el interior del anillo pueden ser problemáticas si quedan rellenas de silicona, pero la presencia de aire en ellas es más probable, por lo que incurrirán en un defecto grave. El método visual para detectar estos defectos queda prácticamente descartado, dejando al ensayo eléctrico como único recurso para detectarlos.

7.5.3 PARTÍCULAS CONDUCTORAS

La presencia de partículas conductoras en el aislante es el último defecto de los que se va a analizar y es quizá el más grave de todos ellos.

Estas partículas pueden ser pequeños trozos metálicos, procedentes de la suciedad del ambiente, que queden atrapados en el molde de inyección. Aunque más probablemente, puede tratarse de restos de silicona semiconductora que se hayan podido desprender de una pieza anterior o por un proceso de inyección incorrecto.

Su análisis parte de la base presentada en el apartado 7.5.1. Tomando una esfera conductora sometida a un campo eléctrico uniforme. Sin embargo, no es posible introducir una zona conductora como tal en FEMM. La manera de simularlo es marcando el área deseada con una permitividad relativa infinita. Para ello, se recurre a algo que ya resulta familiar, como es introducir una permitividad relativa de $\epsilon_r=10^{18}$. Por lo que el siguiente ejemplo parte de los realizados en las Fig. 86 y Fig. 87:

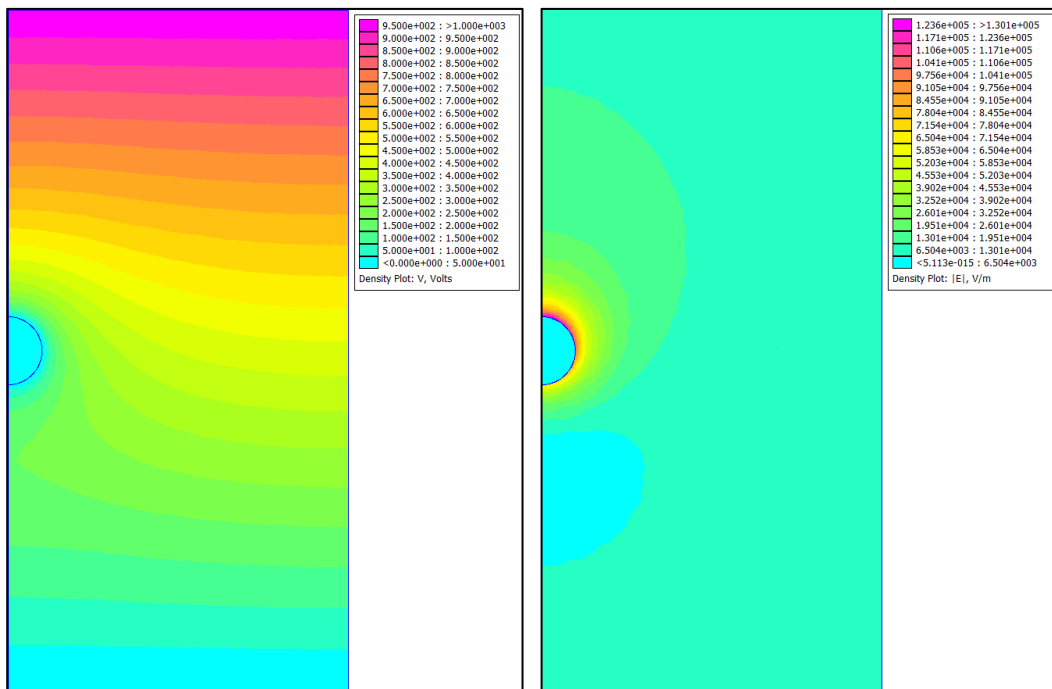


Fig. 104. Simulación de burbuja esférica conductora en campo uniforme desde 1000 V a 0 V. Mostrados gradiente de potencial y campo eléctrico.

La esfera conductora produce una intensa deformación del potencial, acumulando una gran intensidad de campo en su superficie, especialmente en aquella que está próxima a la cara en tensión. Como se ha partido del ejemplo del apartado 7.5.1., en principio podrían utilizarse las ecuaciones obtenidas en él:

En este caso, se puede estudiar la convergencia de la Ec. XXXVI con el cociente entre permitividades como se hizo anteriormente:

$$Ec. XLI \quad \varepsilon_1 \gg \varepsilon_2 \xrightarrow{Ec. XXXVI} E_{1min} = \lim_{\varepsilon_2/\varepsilon_1 \rightarrow \frac{1}{\infty}} E_0 \frac{3 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + 2 \varepsilon_2} = 0 \Rightarrow E_{1min} = 0$$

Y también se puede hacer lo mismo con la Ec. XXXVII:

$$Ec. XLII \quad \varepsilon_1 \gg \varepsilon_2 \xrightarrow{Ec. XXXVII} E_{2max} = \lim_{\varepsilon_2/\varepsilon_1 \rightarrow \frac{1}{\infty}} E_0 \frac{3 \varepsilon_1}{\varepsilon_1 + 2 \varepsilon_2} = 3 E_0 \Rightarrow E_{2max} = 3 E_0$$

De tal forma que, aproximando la burbuja por un defecto con permitividad infinita, se obtiene que el campo en el interior es nulo. Esto es lógico porque si no no podría suponerse como una partícula conductora. Además la intensificación del campo eléctrico justo en la superficie perpendicular al campo (punto [0,5]) tiene un máximo de tres veces el campo incidente. Ahora bien, si se mide el valor de campo en este punto podrá verse lo siguiente:

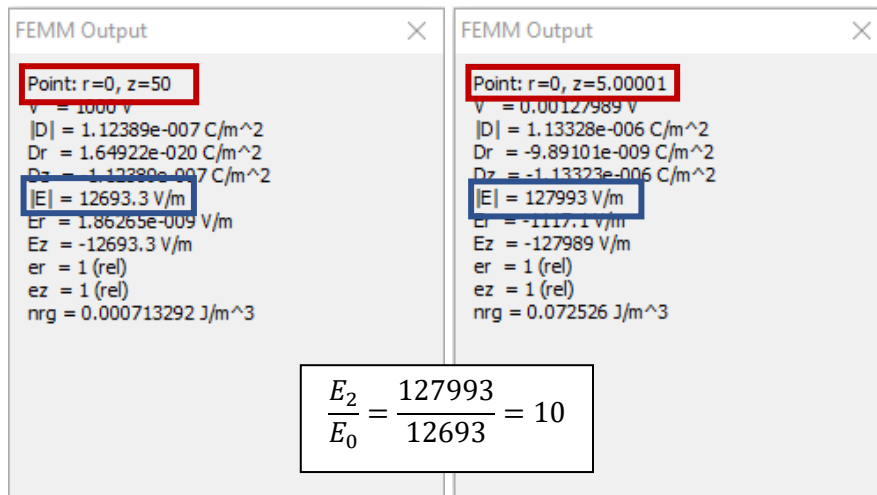


Fig. 105. Valores en el punto [0,50] (E_0) y [0,5] (E_2) y relación entre ellos.

La relación entre E_0 y E_2 es mucho mayor que lo que plantea la ecuación Ec. XLII. Esto se debe a que la deformación que genera la partícula en el campo consigue que este de poder considerarse uniforme. Para que la Ec. XXXVII pudiese emplearse habría que establecer la cara con potencial cero a -1000 V. De esta forma se obtendrían los siguientes resultados.

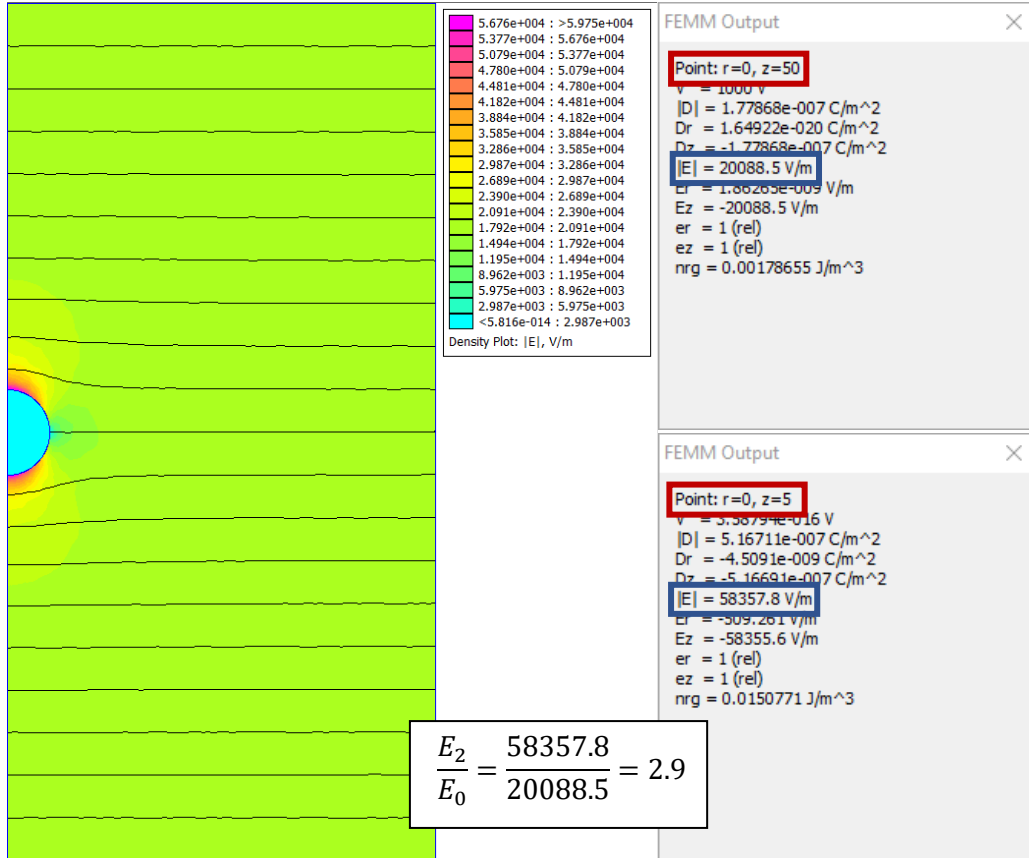


Fig. 106. Campo eléctrico con líneas equipotenciales entre 1000 y -1000 V. Valores en el punto [0,50] (E_0) y [0,5] (E_2) y relación entre ellos.

En este caso la relación sí que es aproximable al resultado obtenido en la Ec. XLII. No obstante, en la simulación no se tiene un gradiente de potencial entre electrodos a tensiones opuestas, pero sí entre 50.9 kV y cero. Ambas soluciones en la simulación son válidas, la diferencia entre ellas es el comportamiento de la carga de la partícula conductora.

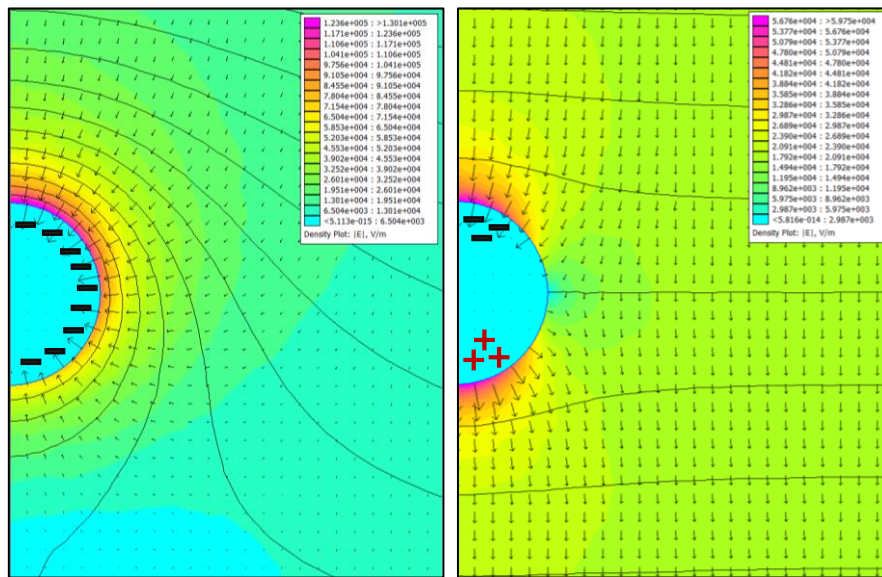


Fig. 107. Vectores de campo eléctrico en ambos ejemplos, de 1 a 0 kV y de 1 a -1 kV.

En el primer caso toda la carga acumulada en la superficie de la partícula es de signo negativo. Lo cuál puede comprobarse con trazado de los vectores de campo eléctrico que son perpendiculares a la esfera y sentido hacia su centro. Mientras que en el segundo caso, la carga negativa se acumula en la superficie próxima al electrodo positivo y la carga positiva orientada hacia el negativo.

Ambos casos cumplen que el campo en el interior de la esfera sea nulo, y ambos generan un incremento de la intensidad del campo eléctrico en la superficie. Sin embargo, en el primer ejemplo este aumento del campo es más de tres veces superior hasta llegar a incrementar en diez veces la magnitud del campo incidente como se veía en la Fig. 105.

Se concluye que el efecto que tiene una partícula conductora sobre un campo eléctrico resulta en un incremento de este en los alrededores de la partícula. Especialmente, si además se considera la forma de esta como ya se ha hecho en otros casos. En la Fig. 108 se muestra dos elipsoides conductores variando su orientación con respecto al campo incidente.

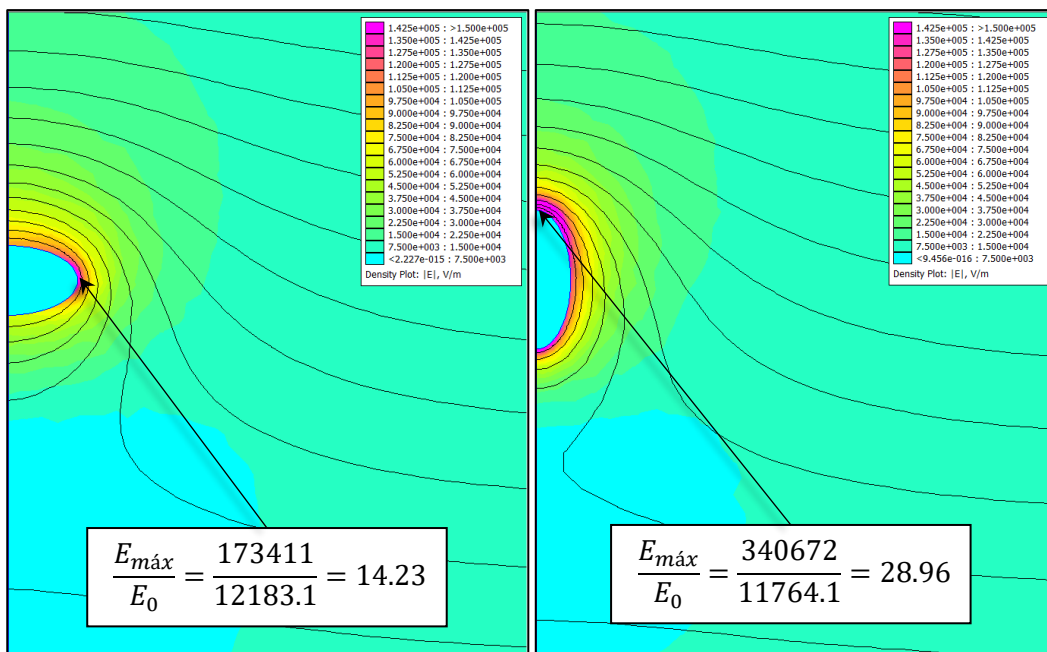


Fig. 108. Campo eléctrico con elipsoides conductores. Indicada relación entre el valor de E máximo en el problema y E₀. E_{máx} se da en el punto de la superficie con menor radio del elipsoide.

Al estirar la esfera en un elipsoide, el valor de campo máximo se da en en las puntas del defecto. Esto se debe al efecto que se explicó en el apartado 4.2, donde se explica como los radios más pequeños acumulan un mayor campo eléctrico para un determinado potencial. De tal forma, que el incremento de campo producido por una partícula conductora puede ser desorbitado.

En la siguiente figura se mostrará el efecto de una de estas partículas en el pasatapas. Puesto que la gravedad de estos defectos ya se puede adelantar por lo ahora visto, se simulará una esfera conductora de 1 mm, en lo que antes era la posición de la burbuja 5. En las coordenadas [24.5,40], un punto alejado de las magnitudes de campo más intensas.

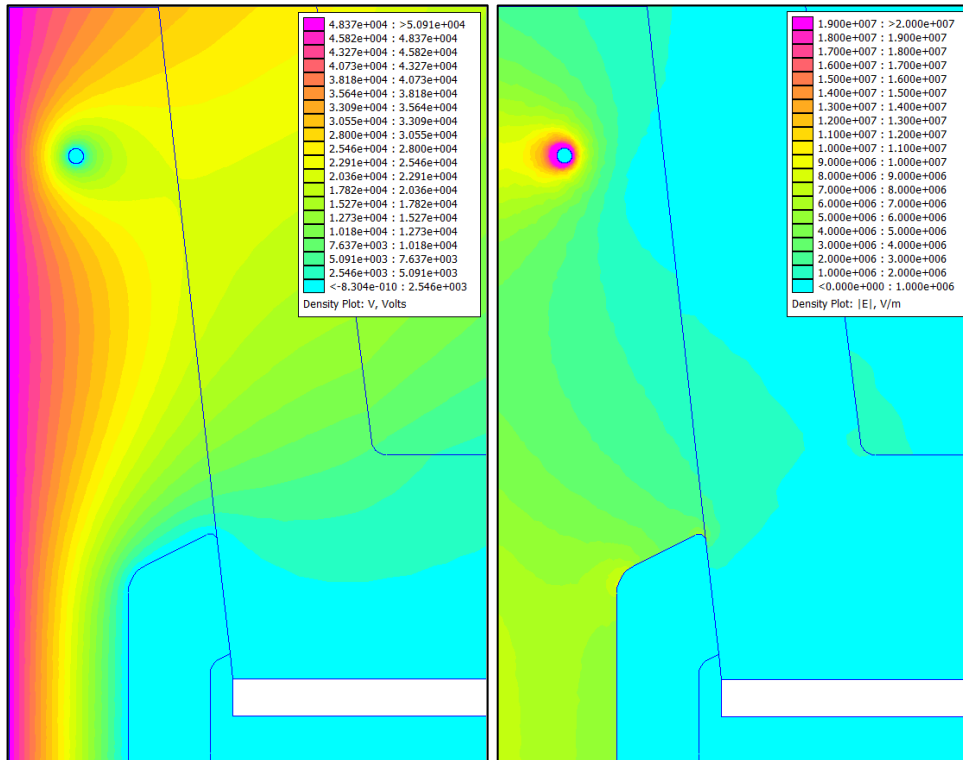


Fig. 109. Burbuja conductora de 1 mm en las coordenadas [24.5,40] del pasatapas a 50.9 kV.

Inmediatamente puede verse que el efecto es crítico. El campo eléctrico alrededor de la partícula supera con creces los 20 kV/mm. Y ha de tenerse en cuenta que se encuentra en un punto donde el campo eléctrico natural es más bajo que en otras zonas más próximas al anillo. A mayores, la tensión de simulación corresponde al valor de pico de los 36 kV que tiene que aguantar la pieza nominalmente, ha de recordarse que este pasatapas tiene que soportar hasta 106 kV en valor de pico para poder pasar el ensayo a frecuencia industrial. Y todo esto para la geometría menos dañina, sin forma puntiagudas.



Fig. 110. Aislante perforado por burbujas con partículas semiconductoras.

En la Fig. 110 puede verse un caso de un aislante perforado entre sus electrodos por la presencia de burbujas que además albergan partículas conductoras. Juntando los dos ejemplos de defecto más graves en un solo fallo. Puede comprobarse como los caminos formados por la descarga tienden hacia las puntas del defecto, donde se acumuló la mayor parte de las partículas conductoras.



Consecuentemente, la presencia de cualquier defecto conductor es totalmente inviable. Afortunadamente, es muy complicado que una pieza así llegue al cliente puesto que al pasar el ensayo eléctrico, esta se romperá antes de poder clasificarse como buena. El mayor inconveniente lo tiene el fabricante, puesto que su rotura puede dañar el equipo de ensayo. Por tanto, ha de evitarse que se genere este tipo de defectos a toda costa con mantenimiento y limpieza habitual en la producción. Y si es posible, realizar controles visuales cuidadosos para conseguir separar este tipo de piezas antes de que llegue al ensayo eléctrico.

8 CONCLUSIONES

En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un estudio del efecto de los posibles defectos en piezas de silicona, habiendo tomado como ejemplo un pasatapas para celdas de alta tensión.

Un software que emplea el método de elementos finitos, FEMM 4.2 en este caso, se ha perfilado como una herramienta muy interesante para conseguir una perspectiva más visual de la interacción de estos defectos con el campo eléctrico, además de para comprender mejor esta magnitud física.

Se ha observado cómo existen defectos con distintos grados de gravedad, desde algunos leves cuyo paso por alto no afectaría sensiblemente al funcionamiento de la pieza, hasta los más graves que derivan en un fallo eléctrico a largo plazo o de forma inmediata.

En cuanto a tipo de defectos, el concepto más relevante que puede extraerse de los desarrollos llevados a cabo, es el comportamiento de las burbujas de aire y de las partículas conductoras en el aislante. Se ha visto que existe la posibilidad de que una burbuja de aire no suponga un defecto grave, pero que, por otra parte, una partícula conductora es garantía de una perforación del aislante.

De los dos controles de calidad planteados, el visual y el ensayo eléctrico, el último es el único que garantiza la efectividad de la pieza como aislante eléctrico. Siendo el primero una manera de detectar fallos que afectan fundamentalmente a la estética del producto final.

Con este estudio, también se pretendía mostrar que existe una simbiosis entre el conocimiento de una pieza y cómo afectan los defectos que pueden producirse durante su fabricación. De forma que puedan saberse cuáles son los puntos fuertes y débiles del producto y qué parte sale más perjudicada, si el fabricante o el cliente, según exista un tipo de defecto u otro.

Como corolario, un defecto es algo a evitar, no obstante, lograr esto es muy complejo debido a todas las variables que entran en juego durante un proceso de fabricación. Por tanto, ha de aprenderse a lidiar con ellos, estudiándolos, detectándolos y minimizando su aparición. Todo ello, entendiendo que nos encontramos bajo un marco de producción comercial, donde es necesario que del resultado final se obtenga un beneficio económico.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Küchler, High Voltage Engineering, Heidelberg: Springer International Publishing, 2018.
- [2] «POLYSILOXANES (SILICONES),» Polymer Properties Database, [En línea].
Disponible en:
<https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Silicone%20type.html>.
[Último acceso: 10 enero 2021].
- [3] «What is silicone made of?,» Shin-Etsu Silicone, [En línea].
Disponible en:
<https://www.shinetsusilicone-global.com/info/begin1.shtml>.
[Último acceso: 10 enero 2021].
- [4] «What are RTV-1 Silicones?,» Elkem, [En línea].
Disponible en:
<https://www.elkem.com/silicones/technologies/elastomers/rtv-1/>.
[Último acceso: 10 enero 2021].
- [5] «What are RTV-2 Silicones?,» Elkem, [En línea].
Disponible en:
<https://www.elkem.com/silicones/technologies/elastomers/rtv-2/> .
[Último acceso: 10 enero 2021].
- [6] «RTV vs. HCR vs. LSR Injection Molding: Which is Right for Your Project?,» HM ROYAL, [En línea].
Disponible en:
<https://hmroyal.com/blog/rtv-vs-hcr-vs-lsr-injection-molding/>.
[Último acceso: 3 marzo 2022].
- [7] B. Ma, «Effects of Corona and Ozone Exposure on Properties of Polymeric Materials for High Voltage Outdoor Applications,» Tesis doctoral, Dept. of Materials and Manufacturing Technology. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Göteborg, Suecia 2011. [En línea].
Disponible en:
<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/146977.pdf>.
- [8] «Silicone Rubber: Complete Guide on Highly Durable Elastomer,» Omnexus, [En línea].
Disponible en:
<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/silicone-rubber-elastomer>.
[Último acceso: 10 enero 2021].
- [9] «Liquid Silicone Rubber Injection Molding vs High Consistency Rubber: Which Is Right for You?,» SIMTEC Silicone Parts, [En línea].



Disponible en:

<https://www.simtec-silicone.com/blogs/liquid-silicone-rubber-injection-molding-vs-high-consistency-rubber-which-is-right-for-you/>.

[Último acceso: 10 enero 2021].

- [10] M. Jafar Mazumde, H. Sheardown y A. Al-Ahmed, *Functional Polymers*, Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [11] W. Hauschild y E. Lemke, *High-Voltage Test and Measuring Techniques*, Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [12] Comisión Internacional Electrotécnica, «Técnicas de ensayo en alta tensión - Medida de las descargas parciales». IEC 60270, 2015.
- [13] A. Fridman, *Plasma Chemistry*, Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [14] K. Schon, *High Voltage Measurement Techniques*, Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [15] E. Kuffel, W. Zaengl y J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [16] E. Lemke, «A critical review of partial-discharge models,» *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, nº 6, pp. 11-16, 2012.
DOI: 10.1109/MEI.2012.6340519, [En línea].
Disponible en:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6340519>.
- [17] D. Meeker, «FEMM User's Manual,» 16 mayo 2020. [En línea].
Disponible en:
<https://www.femm.info/wiki/Documentation/>.
- [18] J. Ormazabal Ocerin, «Sistema de acoplamiento entre módulos de aparata eléctrica para centros de transformación y similares.». España Patente ES 2 037 590, 16 junio 1993.
- [19] F. J. Ormazabal Ocerin, «Conjunto de unión entre celdas de aparata eléctrica.». España Patente ES 2 379 241, 24 abril 2012.
- [20] G. Balsarin, N. Puget y J. Marzocca, «Dispositivo de empalme eléctrico entre dos celdas de alta tensión, y con aislamiento por gas.». España Patente ES 2 259 200, 16 septiembre 2006.
- [21] G. Bäuerle, P. F. Deister y E. Wendt, «Dispositivo para la conexión eléctrica de dos paneles de conexiones preferentemente llenos con gas aislante, particularmente un acoplamiento de barras ómnibus.». España Patente ES 2 374 813, 22 febrero 2012.

- [22] R. Dirks, M. Kurrat y H. Heister, «Instalación de distribución eléctrica.». España Patente ES 2 262 790, 1 diciembre 2006.
- [23] B. Vercelli y P. Coquaz, «Sistema de conexión eléctrica de celdas de alta tensión». España Patente ES 2 449 228, 18 marzo 2014.
- [24] N. Sainz de la Maza Escobal, «Conection system between high-voltage electrical devices». España Patente EP 1 653 582 B1, 3 mayo 2006.
- [25] J. F. Cochran y B. Heinrich, «Soluble Problems,» Simon Fraser University, 21 junio 2021. [En línea].
Disponible en:
<https://phys.libretexts.org/@go/page/22805>.
[Último acceso: 26 abril 2022].
- [26] «Corona: Deadly Enemy for Polymeric Insulation,» INMR, 2 enero 2021. [En línea].
Disponible en:
<https://www.inmr.com/coronas-threat-to-polymeric-insulation/>.
[Último acceso: 27 enero 2022].
- [27] «Corona Discharge,» Wikiwand, [En línea].
Disponible en:
https://www.wikiwand.com/en/Corona_discharge.
[Último acceso: 27 enero 2022].
- [28] M. Batalović, K. Sokolija, M. Hadžialić y N. Batalović, «Partial discharges and IEC standards 60840 and 62067: Simulation support to encourage changes,» *Tehnički vjesnik*, vol. 23, nº 2, pp. 589-598, 2016.
DOI: 10.17559/TV-20141118124625, [En línea].
Disponible en:
<https://hrcak.srce.hr/file/231196>.
- [29] A. Madi, Y. He, L. Jiang y B. R. Yan, «Surface Tracking on Polymeric Insulators Used in Electrical Transmission Lines,» *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 3, pp. 639-645, 2016.
DOI: 10.11591/IJEECS.V3.I3.PP639-645, [En línea].
Disponible en:
<http://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJEECS/article/view/4123>.
- [30] M. Singla, J. Gupta, P. Bask, S. Jain y A. Paramane, «Simulation and Experimental PD Study of Laboratory Setup,» de *GUCON*, Galgotias University, Greater Noida, UP, India, 2018. DOI: 10.1109/GUCON.2018.8675030, [En línea].
Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/332430473_Simulation_and_Experimental_PD_Study_of_Laboratory_Test_Setup.



- [31] Y. Zhang, P. Lazaridis, R. Abd-Alhameed y I. Glover, «A compact wideband printed antenna for free-space radiometric detection of partial discharge,» *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 25, pp. 1291-1299, 2017. DOI: 10.3906/elk-1510-100, [En línea].
Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/316052097_A_compact_wideband_printed_antenna_for_free-space_radiometricdetection_of_partial_discharge.
- [32] Comisión Internacional Electrotécnica, «Electric strenght of insulating materials - Tests methods - Part 1: Test at power frequencies». IEC 60243-1, 2013.
- [33] «Types of partial discharges,» Amperis, [En línea].
Disponible en:
<https://amperis.com/en/resources/articles/types-partial-discharges/>.
[Último acceso: 9 febrero 2022].