

7 | ANEXOS

Anexo A: propagación arborescencias en dieléctricos homogéneos y no-homogéneos

En este anexo se presenta un informe, no publicado aún, acerca de la simulación y análisis de propagación de arborescencias eléctricas en dieléctricos poliméricos sólidos homogéneos y no-homogéneos y con carga espacial. La información contenida en este anexo es complementaria a los resultados presentados y analizados en la publicación 4 del Capítulo 4 y la Sección 5.2.2 del Capítulo 5. La metodología implementada para la obtención de los resultados presentados en este anexo se describe en la Sección 3.1.2 del Capítulo 3 y el modelo usado para las simulaciones es el presentado en el artículo de revista O2-1.

Este anexo se organiza de la siguiente manera, los resultados de simulación para ocho casos de estudio se presentan y discuten en cuatro secciones, así:

- Caso de estudio 1: caso base, propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos homogéneos
- Casos de estudio 2, 3 y 4: propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos con barreras dieléctricas de diferentes parámetros y geometría
- Casos de estudio 5 y 6: propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos con no-homogeneidades en la carga espacial y la conductividad eléctrica
- Casos de estudio 7 y 8: propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos homogéneos de distinta conductividad eléctrica

Finalmente, se presentan una sección de conclusiones obtenidas a partir del análisis de los casos de estudio en este anexo y las referencias bibliográficas. Las definiciones de los términos, constantes y parámetros usados en este anexo corresponden a las dadas en la Sección 5.2.2 del Capítulo 5.

A.1 Caso de estudio 1, caso base

El caso de estudio 1 corresponde a la propagación de arborescencias eléctricas en un medio homogéneo cuyos resultados de simulación servirán de base comparativa para estudiar el efecto de no uniformidades y carga espacial en la propagación de arborescencias. El caso de estudio 1 es el mismo caso de estudio utilizado en la publicación 4 del Capítulo 4 para verificar la validez de los resultados del modelo de simulación propuesto y para analizar el efecto de la magnitud de la tensión aplicada en la propagación de arborescencias eléctricas en sólidos dieléctricos. Este caso ha sido medido experimentalmente por otros investigadores usando una tensión aplicada de $U = 15$ kV RMS y los resultados se reportan en (Champion et al., 1994). Para disminuir el tiempo de cómputo, la separación entre electrodos se redujo a $d = 1$ mm, así como el número de celdas en el reticulado, 57×55 . Se asumió que la punta del electrodo tiene una longitud de 5 celdas y radio de 1 celda, por lo que $L_b = 20$ μm . A partir de lo anterior, la magnitud de la tensión aplicada se redujo para tener la misma magnitud de la intensidad de campo eléctrico promedio aplicada que en el caso experimental, calculada como $E_{avg} = U / d$ ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$). Por otro lado, el valor del parámetro N_c , número crítico de ionizaciones, en la Tabla 1 del artículo O2-1, corresponde experimentalmente a una longitud máxima de propagación de 10 μm para cada nuevo canal formado, sin embargo, debido a la reducción del número de celdas de la retícula, la longitud de cada nuevo canal será mayor por lo que el valor del parámetro N_c deberá ajustarse proporcionalmente de manera que no se afecten los valores de tiempo calculados. La Tabla 20, resume los valores de los parámetros, medidos experimentalmente y los usados para la simulación del caso de estudio 1.

Tabla 20. Parámetros usados para las simulaciones del caso de estudio 1, tomados de (Champion et al., 1994; Quiña et al., 2010).

Caso	Tensión (kV RMS)	I (eV)	λ (nm)	L_b (μm)	N_c	E_c ($\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$)	ϵ_r	η
Experimental	15	8	60	10	1×10^{13}	14	4	1
Caso1	6,67	8	60	20	2×10^{13}	14	4	1

Además, se asumió que la conductividad relativa de los canales de la arborescencia durante la propagación es alta, $\sigma_{ch}=1$, y la conductividad del sólido dieléctrico es cero. El caso de estudio 1, se simuló 50 veces y resultados de simulación típicos de la estructura de la arborescencia, la curva de longitud de propagación versus tiempo, dimensión fractal y curvas equipotenciales justo antes de la ruptura se muestran en la Figura 20.

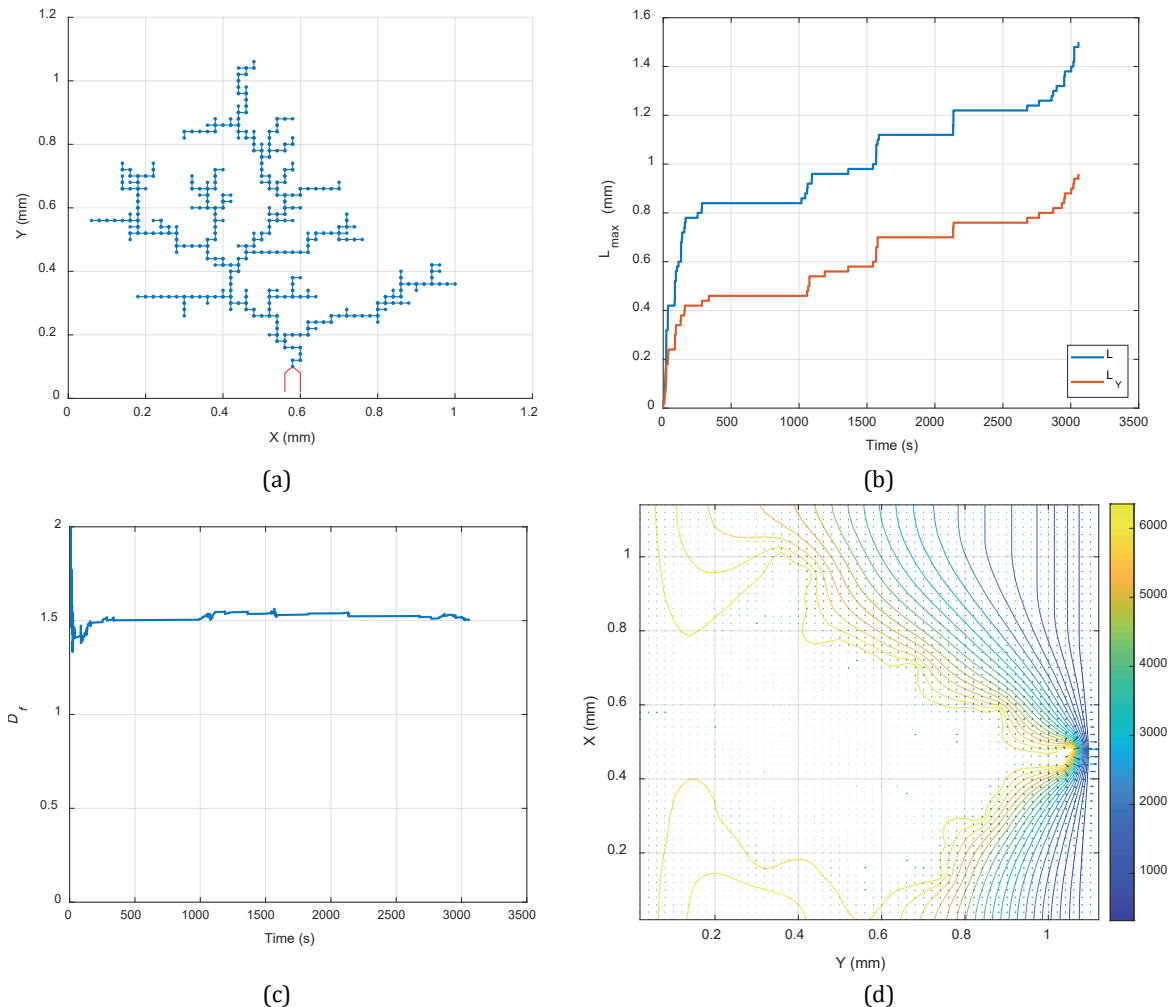


Figura 20. Resultados de simulación típicos caso de estudio 1. (a), estructura de la arborescencia; (b), característica en el tiempo de la longitud máxima (L) y la longitud máxima en el eje Y (L_Y); (c), dimensión fractal calculada y (d), curvas equipotenciales justo antes de la ruptura dieléctrica.

Al comparar los resultados de simulación presentados en la Figura 20 con los presentados en la Figura 3 y Tablas 3 y 4 de la publicación 4 del Capítulo 4, se puede observar que los valores calculados del tiempo hasta la ruptura y la dimensión fractal, son cercanos a los medidos experimentalmente, diferencias relativas de 3,90 % y 7,80 %, respectivamente. Esto permite validar nuevamente el desempeño del modelo propuesto y confirmar lo concluido experimentalmente en otros estudios de que el tipo de arborescencia, caracterizado principalmente por el valor de la dimensión fractal, depende principalmente de la tensión aplicada más que de las condiciones del medio material dieléctrico (Champion & Dodd, 2000).

A.2 Casos de estudio 2, 3 y 4, propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos con barreras dieléctricas

Las barreras dieléctricas se han analizado como una alternativa para incrementar la vida útil del aislamiento sólido usando materiales de distinta permitividad y resistencia a la propagación de arborescencias, son materiales que se caracterizan por tener un valor crítico de la magnitud de la intensidad de campo eléctrico para la propagación de arborescencias mayor al del dieléctrico base (Sweeney et al., 1992; Vogelsang et al., 2006). En los casos de estudio 2, 3 y 4 se analiza el efecto que barreras dieléctricas de distinta permitividad tienen en la propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos compuestos. Para los casos de estudio 2 a 4, los parámetros de los medios se asumen iguales a los presentados en la Tabla 20 para el caso de estudio 1, excepto los cambios mostrados en la Tabla 21 relacionados a los parámetros de los medios en las barreras dieléctricas:

Tabla 21. Parámetros usados para las simulaciones de los Casos 2 a 4, tomados de (Sweeney et al., 1992; Yang et al., 2014).

Caso	E_{cb} / E_c	$\epsilon_{rb} / \epsilon_r$	h_b (mm)
Caso 2	1,02	1,50	0,20
Caso 3	1,02	1,50	0,10
Caso 4	1,02	0,75	0,10

En la Tabla 21, E_{cb} ($V \cdot m^{-1}$) es el valor crítico de la magnitud de la intensidad de campo eléctrico para la propagación de arborescencias en la barrera, ϵ_{rb} es la permitividad relativa de la barrera dieléctrica y h_b (mm) es su espesor. Los parámetros de las barreras dieléctricas de los casos de estudio 2 y 3 corresponden a materiales compuestos epoxi/melinex (Sweeney et al., 1992) y para el caso de estudio 4, epoxi/tereftalato de polietileno (PETP) (Yang et al., 2014). Los espesores de las barreras se han tomado de (Vogelsang et al., 2006). Al igual que para el caso de estudio 1, los casos 2 a 4 se simularon 50 veces cada uno y los resultados de simulación típicos de la estructura de la arborescencia, la curva longitud de propagación versus tiempo y dimensión fractal, se muestran en la Figura 21. Para todos los casos se ha asumido que la barrera está a 0,60 mm de la punta del electrodo. Ver Figuras 21a a 21c, donde se muestran las ubicaciones de las barreras dieléctricas delimitadas por las líneas horizontales de color magenta.

Las distribuciones de los resultados de simulación del tiempo hasta la ruptura, se ajustaron a la función de Weibull, ver Sección 3.3 Capítulo 3, y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Parámetros de la distribución de Weibull para el tiempo hasta la ruptura, casos de estudio 1 a 4.

Caso	β	α_i (s)	t_{mean} (s)	Diff (%)
1	1,90<2,30<2,90	2859,60<3241,50<3674,50	2863	-
2	2,50<3,10<3,80	3205,30<3524,10<3874,70	3149,20	10 (8,70)
3	1,90<2,30<2,80	3525,60<3999,90<4538	3533,40	23,40 (23,40)
4	2,10<2,60<3,20	3124,60<3497,70<3915,30	3101,20	8,30 (7,90)

Para los parámetros α_i (s) y β , se muestran los límites del intervalo de confianza del 95 % usando los paréntesis angulados en la Tabla 22. Los valores de diferencia, *Diff* (%), presentados en la última columna de la Tabla 22, corresponden a la diferencia porcentual relativa entre los valores medios del tiempo de ruptura, t_{mean} (s), calculados con respecto al correspondiente para el caso de estudio 1, fila 1 en la Tabla 22. Los valores entre paréntesis en la última columna de la Tabla 22, corresponden a la diferencia porcentual de los valores de α_i con respecto al correspondiente valor para el caso de estudio 1.

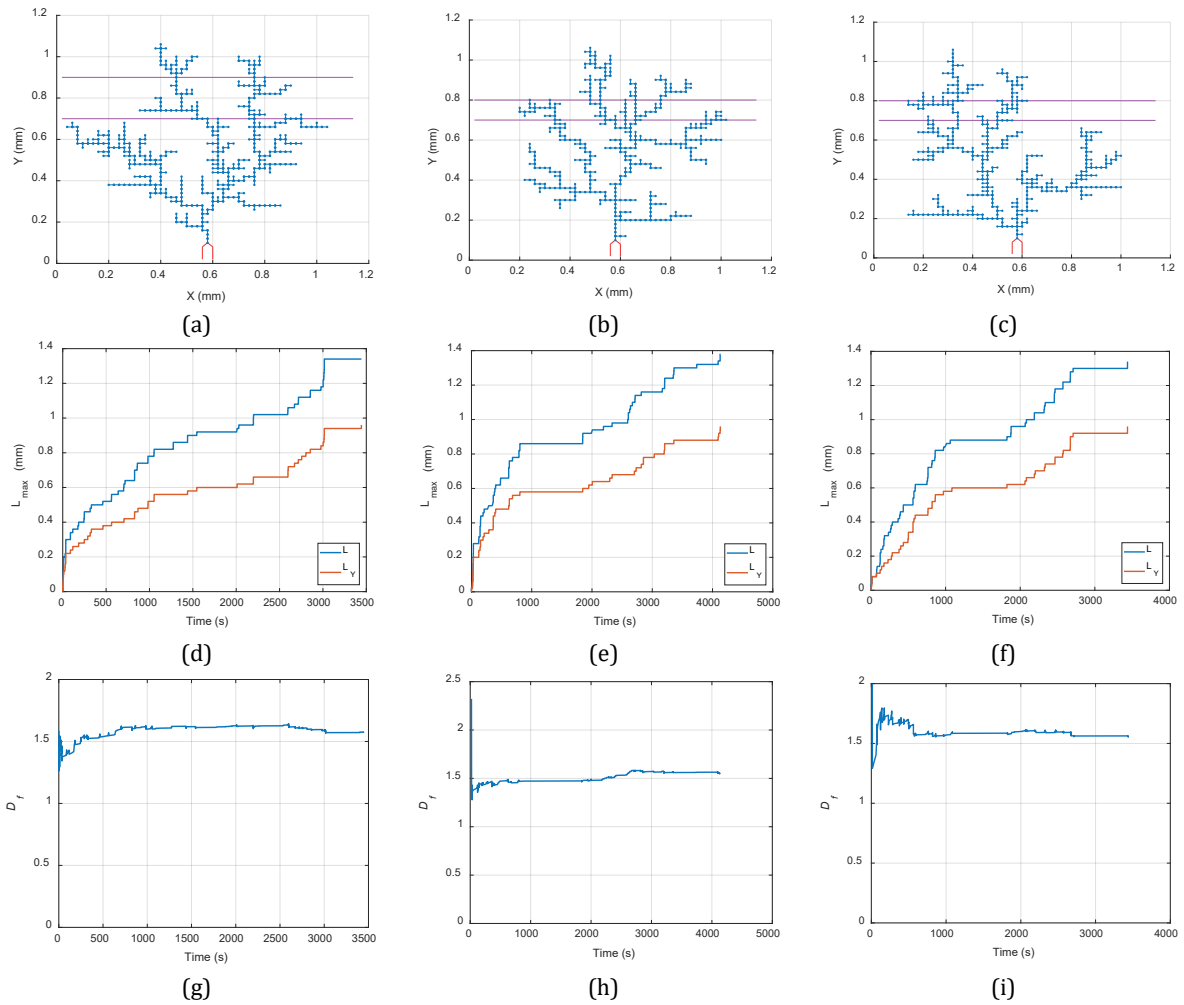


Figura 21. Resultados de simulación típicos para los casos de estudio 2, 3 y 4. De arriba hacia abajo: Estructura de la arborescencia en 2D, característica en el tiempo de la longitud máxima (L) y la longitud máxima en el eje Y (L_Y), dimensión fractal calculada. De izquierda a derecha, caso 2, caso 3 y caso 4.

El valor de α_i corresponde por definición al cuantil del 63 % de probabilidad. Se puede observar que al poner una barrera dieléctrica dicho cuantil aumenta, así como el valor medio del tiempo hasta la ruptura, t_{mean} . Al comparar los casos de estudio 3 y 4, se puede observar que el incremento en el valor del tiempo medio hasta la ruptura, y α_i , es mayor cuando se usa una barrera dieléctrica con una permitividad mayor a la del dieléctrico base, que cuando se usa una barrera con una permitividad menor a la del dieléctrico base. Esto fue comprobado experimentalmente en (Vogelsang et al., 2006) usando materiales compuestos de resina epóxica con barreras de PETP y mica. Allí se encontró que el incremento en α_i al usar una barrera de mica era de 2,40 veces mayor al incremento cuando se usaba una barrera de PETP del mismo espesor. Usando el modelo de propagación de arborescencias propuesto en la publicación 4 del Capítulo 4, se encuentra que la diferencia en el incremento, entre los casos de estudio 3 y 4 es de 2,90, lo que permite demostrar que los resultados del modelo son consistentes con los comportamientos medidos experimentalmente. La diferencia se debe a que en el caso de estudio 3 se considera melinex en lugar de mica. Por otro lado, al comparar los resultados para los casos de estudio 2 y 3 se podría concluir que cuando el espesor de la barrera incrementa, el tiempo hasta la ruptura disminuye lo cual es contradictorio a la lógica y las mediciones experimentales (Vogelsang et al., 2006), sin embargo, debe tenerse en cuenta lo siguiente. En las Figuras 21a y 21b se puede observar que la posición relativa de la barrera con respecto a los electrodos debe considerarse en la evaluación del espesor efectivo. Por otro lado, en las simulaciones realizadas se usan barreras que tienen un espesor que no es despreciable frente a la separación de electrodos, $h_b / d \geq 0,10$. Al usar barreras de mayor permitividad que el dieléctrico base, la magnitud de la intensidad de campo eléctrico en su interior será

menor por lo que la probabilidad de propagación será menor y el tiempo para la formación de un canal será mayor. Esto produce que la densidad de ramificaciones sea mayor por fuera de la barrera, como puede constatarse en el comportamiento de la dimensión fractal en las Figuras 21g y 21h, y específicamente en la región entre el borde inferior de la barrera y la punta del electrodo. En el caso de estudio 3, al ser la barrera más delgada, se tiene más volumen de dieléctrico base dónde la intensidad de campo eléctrico es mayor y como la barrera está cerca del electrodo plano, muchas ramificaciones serán generadas desde la barrera hacia el electrodo plano a través del dieléctrico base lo que hace que aumente nuevamente la dimensión fractal, ver Figura 21h, y la densidad de ramificaciones a ambos lados de la barrera. Esto explica que el tiempo hasta la ruptura sea mayor para el caso de la barrera más delgada. Esto en ningún modo contradice las conclusiones presentadas en (Vogelsang et al., 2006) donde se establece que el tiempo hasta la ruptura aumenta proporcionalmente con el espesor de las barreras dieléctricas en arreglos compuestos de resina epóxica y mica, sin embargo muestra que estas conclusiones son válidas cuando la inclusión de las barreras no modifica sustancialmente la distribución de campo eléctrico en el dieléctrico original. Pero además permite establecer la hipótesis de que el efecto de las barreras en la propagación de las arborescencias puede optimizarse si además se tiene en cuenta la ubicación relativa de la misma con respecto a los electrodos. Esto último se puede verificar a partir de las Figuras 21d y 21e donde se puede ver que la arborescencia tarda menos tiempo en alcanzar el borde inferior de la barrera cuando ésta es más delgada, sin embargo, esto es seguido por un largo periodo en el cual nuevos canales se van generando en la región comprendida entre la punta del electrodo y el borde inferior de la barrera. A medida que la arborescencia se propaga hasta el borde superior de la barrera, los canales que se forman dentro de esta tendrán una mayor probabilidad de propagarse hacia el exterior, dónde la intensidad de campo es mayor y así se incrementa la densidad de canales en la región comprendida entre el borde superior de la barrera y el electrodo plano. Como en la barrera delgada esta región es mayor, se tendrá un número mayor de canales y la dimensión fractal tenderá nuevamente a incrementar, como se ve en la Figura 21h. De lo anterior se puede concluir que, para este caso, los factores determinantes en el mayor tiempo hasta la ruptura con la barrera delgada, fueron su ubicación relativa y el efecto en la modificación de la distribución del campo, ya que la interfaz entre el borde superior de la barrera y el dieléctrico base produce un incremento en la uniformidad del campo que disminuye la probabilidad de propagación a lo largo del eje de simetría y aumenta la densidad de ramificaciones.

Este mismo efecto de la permitividad de la barrera se comprueba comparando los casos de estudio 3 y 4. Cuando se utiliza una barrera con una permitividad menor a la del dieléctrico base, la magnitud de la intensidad de campo eléctrico en su interior aumenta, lo cual aumenta la probabilidad de propagación en su interior a lo largo del eje de simetría, dónde la magnitud de la intensidad de campo es mayor, y reduce el tiempo requerido para formar los nuevos canales allí. Como la magnitud de la intensidad de campo eléctrico es mayor a lo largo del eje de simetría, el número de ramificaciones se reduce y se produce un fenómeno de seguimiento de la superficie en las interfaces entre el dieléctrico base y las barreras (Sweeney et al., 1992). Esto provoca que la dimensión fractal de la arborescencia disminuya cuando esta ingresa a la barrera y solo incrementa nuevamente cuando va a salir otra vez al dieléctrico base hacia el electrodo plano, cuando se presenta el fenómeno de seguimiento de la superficie de frontera, esto puede verse en las Figuras 21c y 21i.

A.3 Casos de estudio 5 y 6, propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos con no-homogeneidades en la carga espacial y la conductividad eléctrica

En (M. D. Noskov et al., 1995) se realizaron análisis cualitativos del efecto de regiones cargadas y conductoras en la propagación de arborescencias eléctricas en sólidos dieléctricos. De manera similar, en el presente estudio, utilizando como base el caso de estudio 1, se realizaron modificaciones a los parámetros de los medios en la región delimitada por la circunferencia de color magenta que se muestra en la Figura 22a.

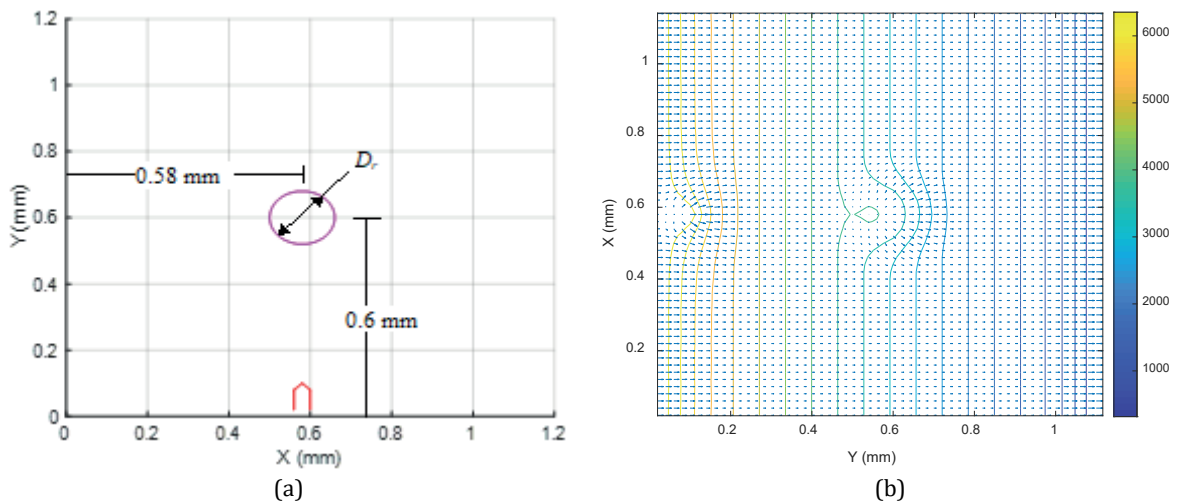


Figura 22. Modificación de los parámetros de los medios en región circular al frente de la punta del electrodo, (a), y líneas equipotenciales antes del inicio de la propagación (b), considerando una distribución uniforme de carga en la región circular.

El caso de estudio 5, corresponde a la inclusión de una región cargada uniformemente de geometría circular como se muestra en la Figura 22a, con diámetro $D_r = 0,16$ mm. Las líneas equipotenciales y la distribución de campo eléctrico antes del inicio del proceso de propagación se muestran en la Figura 22b. Por otro lado, el caso de estudio 6 corresponde a la presencia de una región circular, igual a la mostrada en la Figura 22a, donde la conductividad es mayor a la del dieléctrico base. La localización de la región modificada es mostrada en la Figura 22a y los valores de sus parámetros con respecto al dieléctrico base, que se asume igual al del caso de estudio 1, se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Parámetros usados para las simulaciones de los casos de estudio 5 y 6, tomados de (M. D. Noskov et al., 1995; Sweeney et al., 1992).

Caso	E_{cb} / E_c	$\varepsilon_{rb} / \varepsilon_r$	σ_b / σ	D_r (mm)	ρ_b (nC·m ⁻²)
Caso 5	1,02	1	1	0,16	3
Caso 6	1,02	1	200	0,16	-

En la Tabla 23, ρ_b (nC·m⁻²) es la densidad de carga existente en la región delimitada por la circunferencia de color magenta en la Figura 22a. De acuerdo a los análisis en (Seralathan et al., 2008) la magnitud de la carga eléctrica en la punta de las ramas de las arborescencias puede ser de hasta 1 nC·m⁻¹ cuando la carga espacial en el medio es de 2 nC·m⁻². Como se desea analizar el efecto que una región delimitada con carga espacial tiene en la propagación de la arborescencia, la carga espacial en esta región se ha tomado mayor, ver Tabla 23, a la carga espacial en (Seralathan et al., 2008) de manera que el campo eléctrico generado por dicha carga pueda, efectivamente, contrarrestar el campo eléctrico en la punta de las arborescencias. Por otro lado, σ_b / σ es el incremento relativo en la conductividad de la región circular, mostrada en la Figura 22a para el caso de estudio 6, con respecto al dieléctrico base que tiene una conductividad de $\sigma = 1 \times 10^{-14} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ (Champion & Dodd, 2001).

Los Casos 5 y 6 se simularon 50 veces cada uno y los resultados de simulación típicos de la estructura de la arborescencia, la curva de longitud de propagación versus tiempo y dimensión fractal se muestran en la Figura 23.

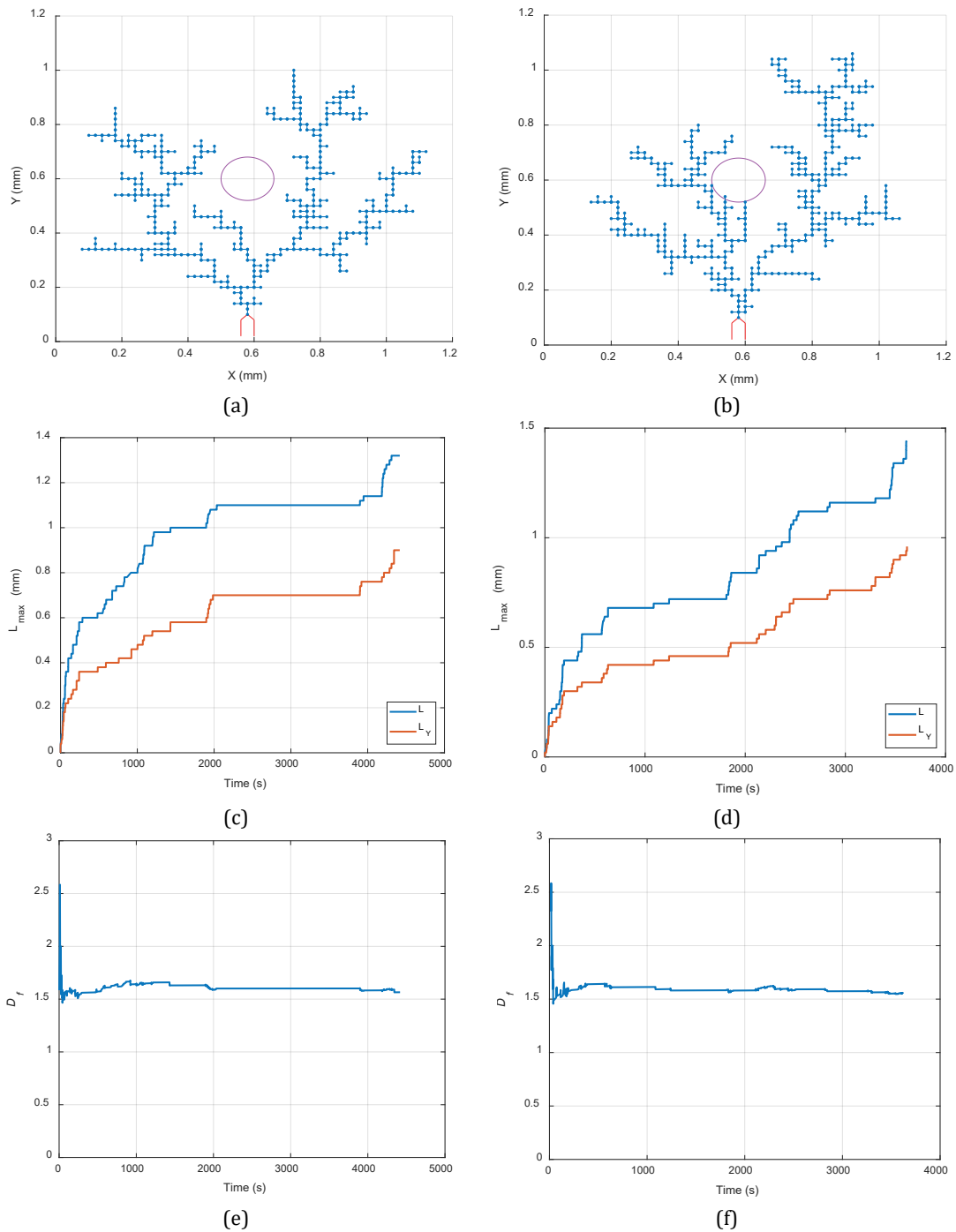


Figura 23. Resultados de simulación típicos para los casos de estudio 5 y 6. De arriba hacia abajo: Estructura de la arborescencia en 2D, característica en el tiempo de la longitud máxima (L) y la longitud máxima en el eje Y (L_Y), dimensión fractal calculada. De izquierda a derecha, Caso 5 y Caso 6.

Los resultados de simulación del tiempo hasta la ruptura se ajustaron a la distribución de Weibull y la Tabla 24, muestra los parámetros obtenidos, así como el valor medio del tiempo de ruptura.

Tabla 24. Parámetros de la distribución de Weibull para el tiempo de ruptura, casos de estudio 5 y 6.

Caso	β	α_i (s)	t_{mean} (s)	Diff (%)
5	2,20<2,70<3,30	3848,30<4295,70<4795,10	3815,50	33,30 (32,50)
6	2<2,50<3	3292,70<3710,70<4181,70	3289,30	14,90 (14,50)

Para el caso de estudio 5 se encontró que la inclusión de la región cargada aumenta el valor medio del tiempo hasta la ruptura en un 33,30 % y el valor de α_i en 32,50 % con respecto al caso del dieléctrico homogéneo, caso de estudio 1. La intensidad de campo eléctrico generado por la carga en la región

circular atenúa la propagación de la arborescencia ya que se opone directamente al campo eléctrico Laplaciano producido por la fuente de alta tensión aplicada, esto provoca que inicialmente la arborescencia se propague rápidamente a lo largo del eje de simetría dónde la magnitud de la intensidad de campo eléctrico producida por la fuente de alta tensión aplicada es mayor, hasta cierto punto dónde la magnitud de la intensidad de campo eléctrico producida por la región cargada es mayor a la magnitud de la intensidad de campo eléctrico de Laplace y se producen ramificaciones en la dirección radial desde la estructura existente. En la región comprendida entre la punta del electrodo y el borde inferior de la región circular, la magnitud de la intensidad de campo eléctrico es menor que en la región comprendida entre el borde superior de la región circular y el electrodo plano, ver Figura 22b, esto hace que en la primera región se tenga una mayor densidad de ramificaciones que incrementa a medida que la arborescencia se acerca a la región cargada. Por otro lado, en la segunda región, la intensidad de campo eléctrico producida por el electrodo y la fuente de alta tensión es intensificada por el campo eléctrico producido por la región cargada de manera que el tiempo requerido para formar los nuevos canales y el número de ramificaciones se reducen lo que explica el crecimiento acelerado de la arborescencia en esta región, Figura 23c, y la disminución de la dimensión fractal, Figura 23e.

Por otro lado, en la Tabla 24 se puede observar que, al incluir regiones de mayor conductividad, el tiempo hasta la ruptura se incrementa con respecto al caso del medio homogéneo. En relación al caso 6, de la Figura 23d se puede concluir que inicialmente la arborescencia se propaga rápidamente a lo largo del eje de simetría hasta que aquella alcanza la región de mayor conductividad. Cuando la arborescencia alcanza la región de mayor conductividad, en esta se depositan cargas eléctricas que se distribuyen simétricamente con respecto al eje de simetría como se puede ver en la Figura 24.

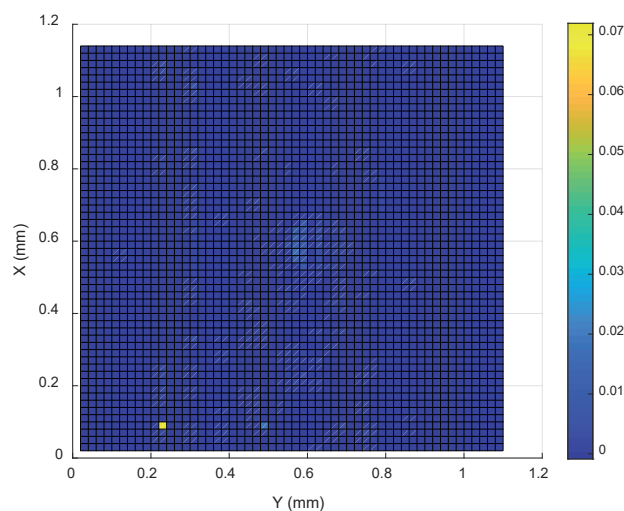


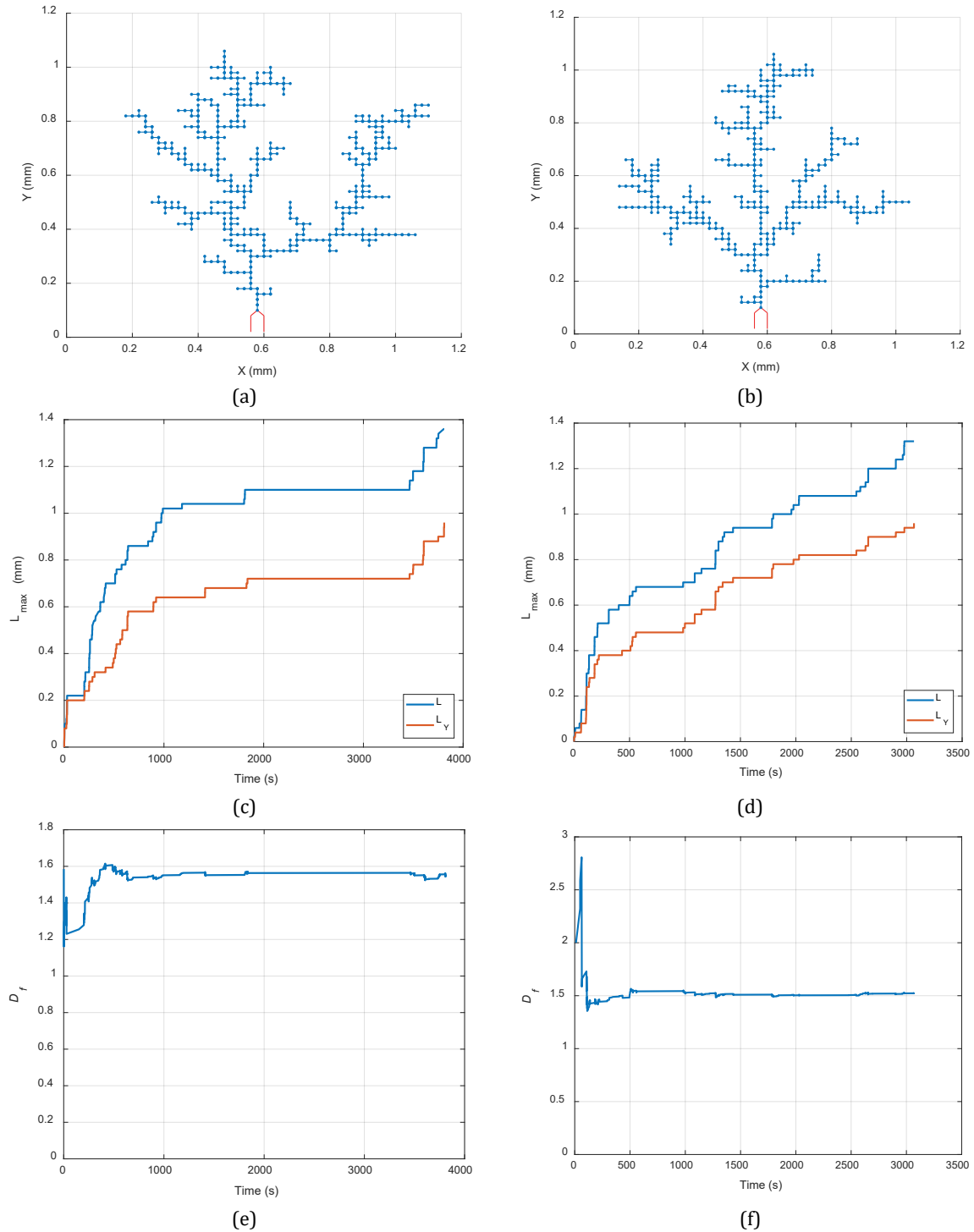
Figura 24. Densidad superficial de carga justo antes de la ruptura ($nc\cdot m^{-2}$) para el caso de estudio 6. Corresponde a la simulación típica mostrada en la Figura 23b.

Estas cargas eléctricas producen un campo eléctrico que se opone al campo de Laplace a lo largo del eje de simetría e incrementa la magnitud de la intensidad del campo eléctrico resultante en la dirección radial (Pitsa et al., 2010) lo que hace que aumente momentáneamente la dimensión fractal de la arborescencia cerca de la punta del electrodo. Posteriormente, y a medida que la arborescencia avanza hacia el electrodo plano, la carga eléctrica depositada en la región de mayor conductividad produce un efecto de intensificación del campo eléctrico aplicado ocasionando que los canales se propaguen rápidamente hacia el electrodo plano y se generen nuevos canales desde la región de mayor conductividad con pocas ramificaciones en la dirección radial.

A.4 Casos de estudio 7 y 8, propagación de arborescencias en dieléctricos sólidos homogéneos de distinta conductividad eléctrica

Los dos últimos casos de estudio corresponden a medios homogéneos con parámetros iguales a los mostrados en la Tabla 20 para el caso de estudio 1, pero de distinta conductividad. Para el caso de estudio 7 se asume que la conductividad es de $1 \times 10^{-11} \Omega^{-1}\cdot m^{-1}$, para simular la propagación de

arborescencias en resinas flexibles, mientras que para el caso de estudio 8, $1 \times 10^{-14} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$, para simular la propagación de arborescencias en resinas rígidas (Champion & Dodd, 2001). Ambos casos se simularon 50 veces y la Figura 25, muestra los resultados de simulación típicos de la estructura de la arborescencia, la curva longitud de propagación versus tiempo, dimensión fractal y densidad superficial de carga eléctrica antes de la ruptura. Se asume que antes del inicio de la propagación, el medio está descargado.



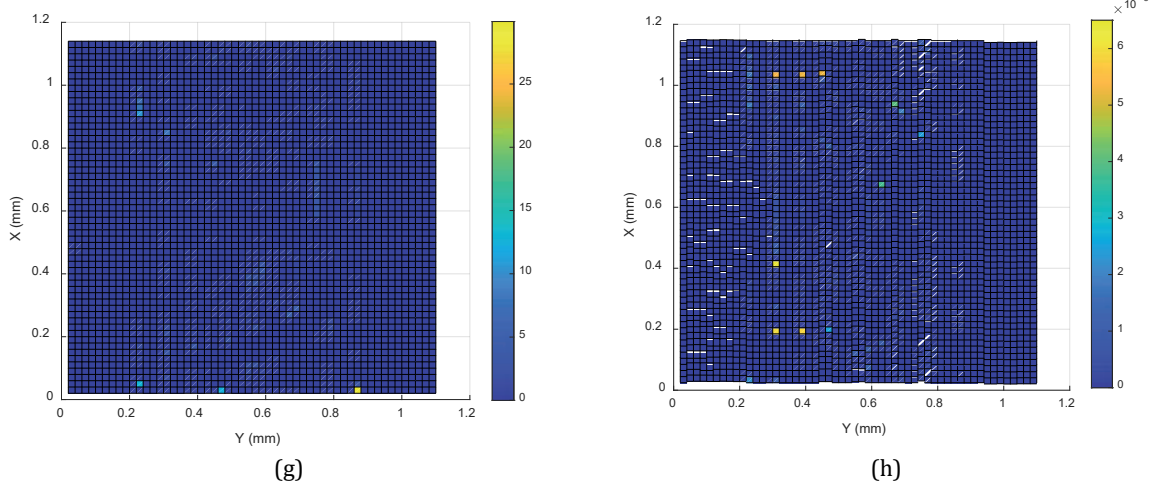


Figura 25. Resultados de simulación típicos para los casos de estudio 9 y 10. De arriba hacia abajo: Estructura de la arborescencia en 2D, característica en el tiempo de la longitud máxima (L) y la longitud máxima en el eje Y (LY), dimensión fractal calculada y densidad superficial de carga eléctrica justo antes de la ruptura ($nc\cdot m^{-2}$). De izquierda a derecha, caso 5 y caso 6.

Los resultados de simulación del tiempo de ruptura se ajustaron a la distribución de Weibull y la Tabla 25 muestra los parámetros calculados.

Tabla 25. Parámetros de la distribución de Weibull para el tiempo de ruptura, casos de estudio 7 y 8.

Caso	β	α_i (s)	t_{mean} (s)	Diff (%)
7	2,80<3,60<4,60	3807,80<4193,60<4618,40	3777,80	32 (29,40)
8	1,80<2,10<2,50	3349,10<3859<4446,60	3422,40	19,50 (19)

Se puede observar que ambos casos presentan resultados similares, y a pesar de que el tiempo medio hasta la ruptura es ligeramente mayor para el medio de mayor conductividad, diferencia de 9,40 %, no se puede concluir de manera definitiva que el tiempo hasta la ruptura incrementa a medida que la conductividad del medio aumenta ya que los intervalos de confianza para α_i en la Tabla 25, se traslapan. El valor de la dimensión fractal obtenida para ambos casos de estudio es aproximadamente igual, diferencia de 1,40 %. En las Figuras 25g y 25h se puede observar que la carga eléctrica se acumula en ciertas regiones del espacio lo que en cierta medida controla la propagación de la arborescencia en esas zonas. Esto puede verse con mayor detalle en la Figura 26, en la cual se muestra para el caso de estudio 7 la distribución espacial de carga eléctrica justo antes de iniciar la propagación, 26a y cuando la arborescencia se ha propagado hasta el 30 %, 60 % y 90 % de la longitud de separación entre electrodos, Figuras 26b a 26d, respectivamente.

Al comparar las distribuciones de carga en la Figura 26, con la estructura de la arborescencia, Figura 25a, se puede concluir que esta distribución de carga eléctrica determina, junto con la estructura previa y la tensión aplicada, la evolución de la arborescencia ya que el campo eléctrico creado por esta distribución de carga eléctrica se opone al campo eléctrico externo aplicado inhibiendo la propagación en ciertas zonas y provocando que el tiempo necesario para formar los nuevos canales sea mayor. Por otro lado, esta distribución espacial de carga eléctrica depende de la evolución de la arborescencia por lo que su distribución será estocástica también. Esto último permite explicar la alta dispersión que se obtiene en las mediciones experimentales y simulaciones del tiempo hasta la ruptura, y refuerza la conclusión de otros investigadores de que la propagación de arborescencias en sólidos dieléctricos es un fenómeno caótico (Dissado et al., 1995).

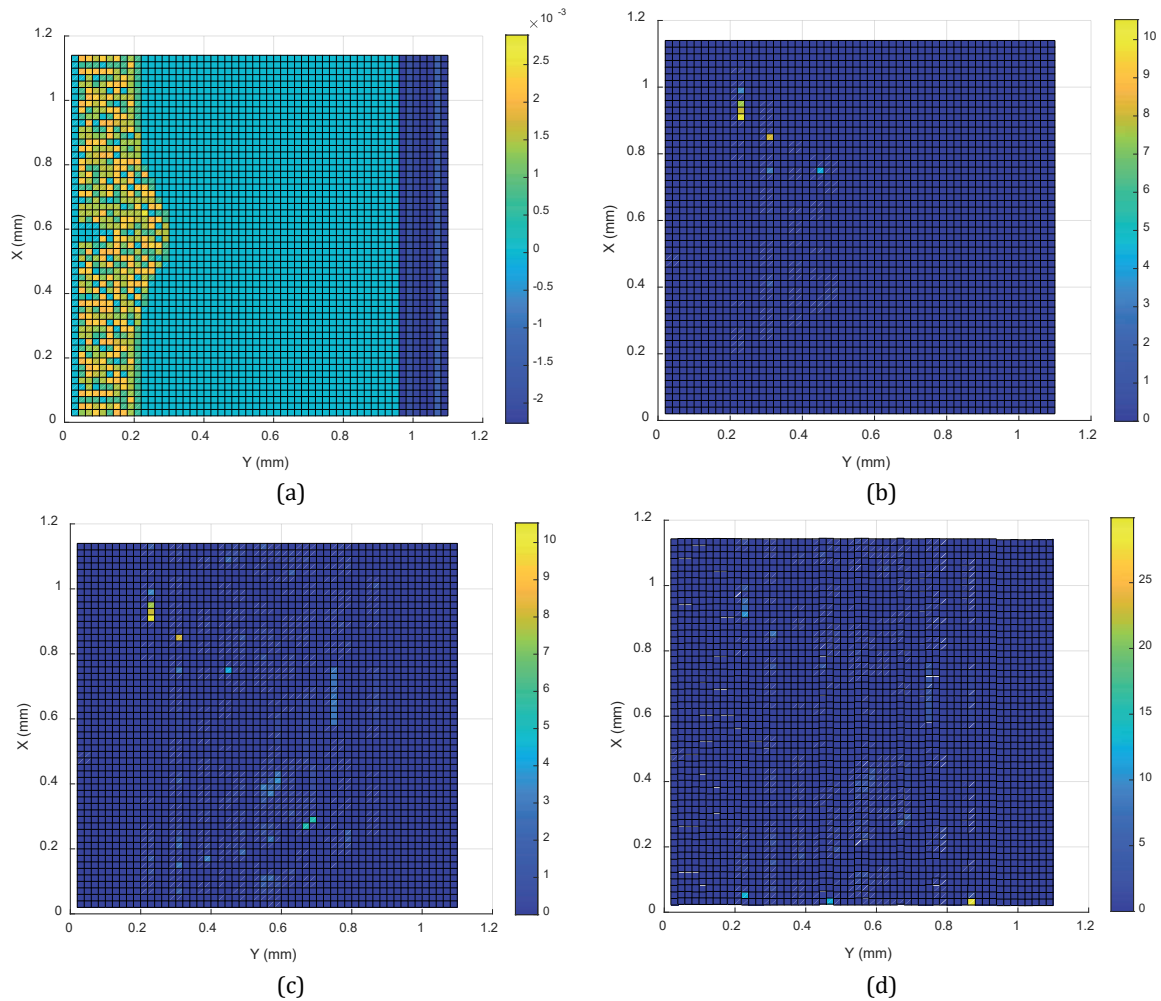


Figura 26. Distribución espacial de carga para diferentes instantes de tiempo durante la propagación ($nC \cdot m^{-2}$), caso de estudio 7. (a), 0%; (b), 30%; (c), 60%; (d), 90%.

La Tabla 26 resume los valores mínimo, máximo y medio de la dimensión fractal calculada para cada caso de estudio.

Tabla 26. Resumen de resultados de la dimensión fractal calculada para los casos de estudio 1 a 8.

Caso	$D_{f-\min}$	$D_{f-\max}$	$D_{f-\text{mean}}$
1	1,40	1,65	1,53
2	1,43	1,70	1,54
3	1,43	1,70	1,55
4	1,33	1,64	1,53
5	1,43	1,63	1,54
6	1,41	1,66	1,54
7	1,46	1,63	1,53
8	1,44	1,74	1,55

Como puede verse, los valores medios de la dimensión fractal calculada para cada caso de estudio son muy cercanos entre sí, diferencia máxima de 1,30 %, lo que implica que para todos los casos analizados la estructura de la arborescencia es del mismo tipo. Esto permite reafirmar la conclusión de que el tipo de arborescencia depende principalmente de la tensión aplicada (Champion & Dodd, 2000).

A.5 Conclusiones complementarias de los casos de estudio 1 a 8 en el Anexo A

Se mostró que el modelo propuesto permite la simulación de propagación de arborescencias en medios no homogéneos. Los resultados de simulación en estos medios se contrastaron con conclusiones y análisis cualitativos presentados por otros investigadores y se encontró una buena consistencia.

Además, algunos resultados de simulación se contrastaron con mediciones experimentales y aunque los materiales no son exactamente los mismos, se muestra que los resultados del modelo son consistentes con los comportamientos medidos experimentalmente.

Debe tenerse en cuenta que la localización y dimensiones de las inclusiones y regiones de distintos parámetros, así como las magnitudes de estos, se tomaron de estudios realizados por otros autores y que no necesariamente coinciden con configuraciones reales de aplicación práctica.

Usando este modelo también se pueden simular inclusiones metálicas y conductores, sin embargo, usando las dimensiones y localizaciones de los estudios usados como referencia (M. D. Noskov et al., 1995; Sweeney et al., 1992), los resultados de simulación presentan una dispersión muy alta, el parámetro de forma de la distribución de Weibull es 0,40 y los límites del intervalo de confianza del 95 % son 0,30 y 0,60, y por ello no se presentarán los resultados en este estudio. Sin embargo, sí se ha podido encontrar, y es coincidente con los análisis cualitativos en (Sweeney et al., 1992), que una vez la arborescencia alcanza la superficie del conductor la propagación cesa, sin embargo, nuevos canales son generados de manera simultánea desde la punta del electrodo rodeando la estructura existente hacia el electrodo plano. Esto, junto con la disminución de la intensidad de campo eléctrico por el incremento equivalente en la superficie del electrodo de alta tensión, debido a que el conductor se conecta con el electrodo a través de la estructura de la arborescencia, provoca que el tiempo hasta la ruptura incremente mucho. La Figura 27 muestra algunos resultados típicos de la estructura de la arborescencia y la curva longitud de propagación versus tiempo, cuando se considera que la región circular de la Figura 22a, con $D_r = 0,08$ mm, corresponde a un conductor ideal.

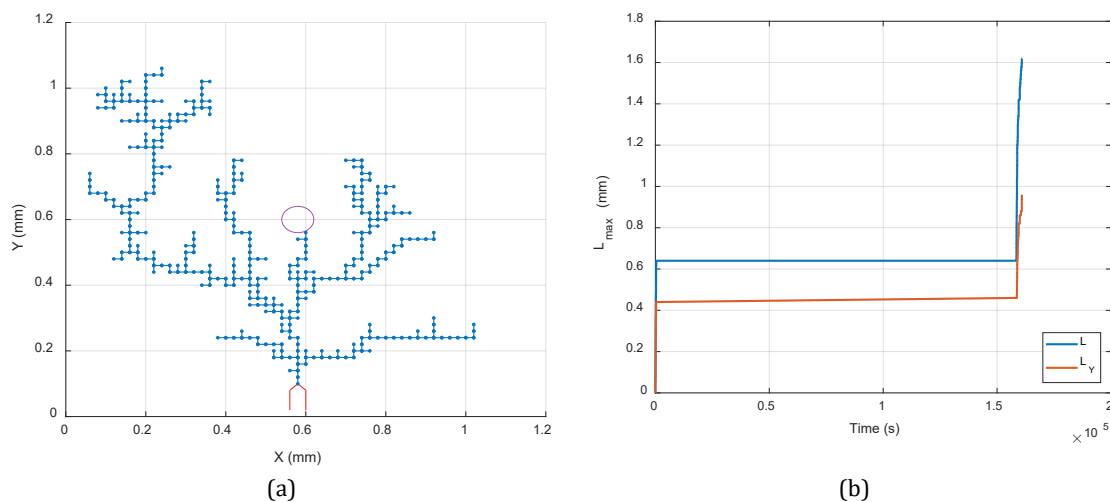


Figura 27. Resultados de simulación considerando una región conductora. (a), Estructura de la arborescencia y (b), característica de longitud versus tiempo.

Se considera que la alta dispersión en los resultados del tiempo hasta la ruptura se debe a que el tamaño de la región conductora es grande en comparación al diámetro del electrodo y que, además, su posición relativa permite que infinitas trayectorias de diferente longitud sean generadas después de que la arborescencia alcance la región conductora.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que el modelo propuesto considera la conducción como único mecanismo de transporte de carga, sin embargo, a escala microscópica, otros mecanismos de transporte y atrapamiento de cargas deben considerarse a fin de evaluar de manera efectiva el efecto de las inclusiones conductoras (Seralathan et al., 2008). Un trabajo futuro usando el modelo propuesto puede considerarse para el análisis de la inclusión de nanopartículas conductoras.

El modelo propuesto permite la obtención de análisis cuantitativos que pueden combinarse con mediciones experimentales para evaluar la vida útil de aislamiento eléctrico.

De los resultados de simulación se pudo concluir que las barreras dieléctricas con una permitividad mayor a la del dieléctrico base son más efectivas en la reducción de la propagación de las arborescencias en medios compuestos. Además, se planteó la hipótesis de que no solo el espesor de las barreras juega un rol definitivo en el tiempo hasta la ruptura sino también, su posición relativa con respecto a la punta del electrodo.

Por otro lado, se encontró que las no uniformidades en la distribución de carga y la conductividad modifican sustancialmente la propagación de las arborescencias debido básicamente al mismo fenómeno de oposición/intensificación de la intensidad de campo eléctrico en diferentes regiones del dieléctrico sólido. Se encontró que regiones con carga mayor a la que aparece en las puntas de la arborescencia, inhiben la propagación de las arborescencias a través de aquellas y produce un incremento de las ramificaciones en la dirección radial, y por ende de la dimensión fractal.

Se simuló la propagación de arborescencias en resinas flexibles y rígidas, mediante la modificación de la conductividad volumétrica, y se pudo corroborar que el tipo de arborescencia depende principalmente de la tensión aplicada.