

**Herrera, Luis A. ; Salvatierra, Lucas M. ; Dammig Quiña, Pablo L. ; Kovalevski, Laura I. ; Irurzun, Isabel M. ; Razzitte, Adrián C. ; Mola, Eduardo E.**

*Enfoque de los Modelos de Ruptura Dieléctrica desde la Termodinámica Estadística*

Energeia, Año 8, N° 8, 2010

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central "San Benito Abad". Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Herrera, L. A. et al. Enfoque de los Modelos de Ruptura Dieléctrica desde la Termodinámica Estadística [en línea]. *Energeia*, 8(8), 2010.

Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/modelos-ruptura-dielectrica.pdf> [Fecha de consulta: .....]

## Enfoque de los Modelos de Ruptura Dieléctrica desde la Termodinámica Estadística

Luis A. Herrera<sup>1,2</sup>, Lucas M. Salvatierra<sup>1,2</sup>, Pablo L. Dammig Quiña<sup>2</sup>, Laura I. Kovalevski<sup>1</sup>, Isabel M. Irurzun<sup>2</sup>, Adrian C. Razzitte<sup>3</sup> y Eduardo E. Mola\*<sup>1,2</sup>.

(1) Facultad de Química e Ingeniería “Fray Rogelio Bacon”, Campus Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina.

(2) Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA – CCT LA PLATA-CONICET), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.

(3) Departamento de Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

(\*) Autor Correspondiente [eemola@inifta.unlp.edu.ar](mailto:eemola@inifta.unlp.edu.ar)

### RESUMEN

El modelado del proceso de ruptura dieléctrica de aislantes sometidos a un campo eléctrico intenso es importante para el desarrollo de nuevos materiales en las industrias eléctrica y electrónica. Información experimental generada en el laboratorio muestra que el proceso de ruptura dieléctrica involucra la transferencia de energía con la consecuente acumulación progresiva de carga y daño en el material. Ésta, produce finalmente la ruptura macroscópica, creando un camino conductor que inutiliza al material aislante. A partir de experimentos de simulación se han calculado los parámetros característicos (dos y tres parámetros) de la función de distribución de fallas (distribución de Weibull), para distintas familias de árboles. También se ha estudiado la relación intrínseca entre las distintas familias de árboles, mediante una distribución generalizada de Weibull con un índice entrópico  $q$ . Este índice  $q$  es representativo de la estructura fractal de los distintos árboles.

**PALABRAS CLAVE:** Ruptura Dieléctrica, Entropía de Tsallis, Distribución de Fallas, modelos computacionales.

### 1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado diversos modelos para simular el proceso de ruptura dieléctrica, como el DLA (Agregación Limitada por Difusión) o el DBM (Modelo de Ruptura Dieléctrica). Si bien estos modelos son capaces de predecir la naturaleza fractal de los árboles de ruptura, no pueden reproducir la dinámica del proceso. Además no es posible relacionar los parámetros de los modelos con las características físicas del material. Tampoco tienen en cuenta la transferencia de energía que produce el daño del material [1].

Un modelo posterior, el modelo de Ruptura de Capacidades Distribuidas, es capaz de representar adecuadamente la geometría de los árboles fractales considerando explícitamente las características del material, así como su distribución espacial. Es posible simular procesos de envejecimiento y ensayos en

los que el material está sometido a rampas de potencial. Este modelo reproduce cualitativamente la dinámica del proceso de ruptura (acumulación de daño progresivo).

Los modelos de Ruptura por avalancha son modelos detallistas, de primeros principios del proceso de ruptura dieléctrica. Tienen en cuenta explícitamente el proceso de transferencia de energía del campo eléctrico al material con la consiguiente acumulación del daño eléctrico. Estos modelos son capaces de predecir la geometría de los árboles eléctricos y también la naturaleza caótica del proceso dinámico de ruptura, si consideramos la evolución entrópica del sistema. Un enfoque desde la Termodinámica Estadística de los Modelos de Ruptura de Capacidades Distribuidas y de Ruptura por Avalancha, nos permite comprender los procesos de transferencia de energía y acumulación de daño, que existen en el material aislante al someterlo a un campo eléctrico intenso y además explicar la naturaleza caótica del proceso dinámico de ruptura [2, 5].

A partir de experimentos de simulación numérica se han calculado los parámetros característicos (dos y tres parámetros) de la función de distribución de fallas (distribución de Weibull), para cada familia de árboles. También hemos estudiado la relación intrínseca entre las distintas familias de árboles generados por los protocolos de ruptura, mediante una distribución generalizada de Weibull con un índice entrópico  $q$ . Este índice  $q$  es representativo de la estructura fractal de los distintos árboles eléctricos generados bajo condiciones distintas. En este trabajo presentamos un enfoque estadístico de la ruptura dieléctrica en sólidos aislantes de interés industrial y mostramos cómo pueden aplicarse métodos mecano – estadísticos [6] para describir la función de distribución de probabilidad del crecimiento de los denominados “árboles eléctricos” en el fenómeno de ruptura dieléctrica del material.

## 2.- DESARROLLO Y DISCUSIÓN

En trabajos anteriores [2, 3, 5], se han desarrollado modelos realistas que describen el fenómeno de ruptura dieléctrica y esto nos ha permitido entender la información experimental que se genera a partir de ensayos eléctricos de materiales. A través de la Simulación Computacional y bajo condiciones de ruptura idénticas se han generado una familia de árboles con tiempos de falla que siguen una función de distribución de Weibull caracterizada por los parámetros llamados alfa y beta. Ahora bien, al variar las condiciones de ruptura se generan otras familias de árboles con otros tiempos característicos. En síntesis, desarrollamos distintos protocolos que generan familias de árboles, con distintos parámetros característicos como los siguientes:

|      | Protocolo 1                   | Protocolo 2     |
|------|-------------------------------|-----------------|
| Alfa | $(1,28 \pm 0,13) \times 10^3$ | $56,2 \pm 4,00$ |
| Beta | $3,45 \pm 0,02$               | $8,38 \pm 0,07$ |

**Tabla (1) Parámetros Weibull para distintos protocolos**

Consideramos muestras sometidas a un potencial alterno donde la amplitud del potencial se aumenta paso a paso. Cuando la tensión es incrementada muy lentamente, la ruptura se trata como fenómeno lineal. En la referencia [11] hemos visto que el denominado protocolo (1) favorece el desarrollo de estructuras ramificadas mediante la selección aleatoria del capacitor que va a cortocircuitar del conjunto de capacitores que está en condiciones de ruptura. Esta selección representa una contribución entrópica al proceso de crecimiento del árbol eléctrico. En cambio, el denominado protocolo (2), favorece el desarrollo de estructuras “runaway”, (explosivas), la selección en este protocolo está basada en argumentos energéticos, favorece un comportamiento de rápido crecimiento de la estructura del árbol eléctrico, que cruza rápidamente el material dieléctrico. También en [2, 3, 5], se ha trabajado sobre una combinación lineal de ambos protocolos con el objeto de poder representar más adecuadamente el proceso de crecimiento del árbol eléctrico y se llegó a la conclusión de que esta combinación lineal

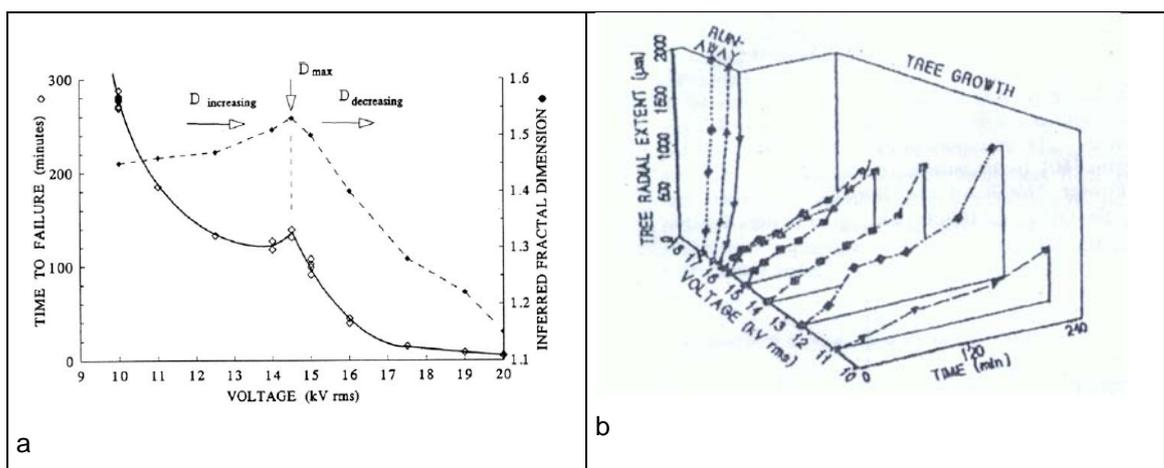
representa una energía libre termodinámica a temperatura constante, gobernando el crecimiento del árbol eléctrico. Esta energía libre es la suma de un término entrópico representado por el protocolo (1) y una energía interna dada por el protocolo (2).

Estos resultados están de acuerdo con las observaciones experimentales de patrones de ruptura y con la evidencia experimental que indica que a velocidades bajas de incremento de potencial, la contribución entrópica debido a las fluctuaciones de campo eléctrico es dominante y determina las características geométricas de los patrones de ruptura. También se ha observado que la dimensión fractal de los árboles eléctricos, aumenta hasta llegar a un cierto valor de potencial a partir del cual comienza a disminuir. Esta competencia tiene una profunda relación con la termodinámica subyacente que gobierna el crecimiento del árbol [6].

Se ha podido observar experimentalmente [4] que el proceso de ruptura es de naturaleza caótica, además existe una contribución entrópica que está asociada a los efectos de las fluctuaciones del campo eléctrico debido a la presencia de cargas espaciales y a la acumulación del daño ocasionado. Esta contribución tiene características de cascada, en el sentido de que el daño eléctrico no se produce gradualmente sino abruptamente en un solo paso de potencial. En la medida que el daño sea más gradual, el crecimiento competitivo generará distribuciones diferentes de la simple suma algebraica de las distribuciones individuales.

Estas situaciones evidencian la necesidad de contar con un formalismo no lineal, que en nuestro caso es la Termoestadística No Extensiva (NET) introducida por Tsallis [9]. El formalismo NET se basa en la definición de una q-entropía del sistema estudiado y ha sido ampliamente utilizado en sistemas con interacciones a largo alcance, sistemas con memoria de largo alcance y estructuras fractales espacio tiempo.

Cada una de las familias de 200 árboles fueron caracterizadas con una dimensión fractal promedio  $D$ . Hemos registrado la variación de la dimensión fractal para distintos patrones de ruptura, algunos conjuntos fractales no pueden ser caracterizados por una única dimensión fractal, sino con una función de distribución que nos dice como varía la dimensión para árboles más densos. Este tipo de conjuntos son llamados MULTIFRACTALES, como se ve en la figura (1), esta función tiene las características de la función de distribución de Levy.



**Figura (1) Función de Levy subyacente para distintos escenarios de ruptura dieléctrica. (a) tiempo de falla y dimensión fractal en función de la tensión aplicada [3]. (b) extensión radial de los árboles eléctricos en función del tiempo y la tensión aplicada [4].**

Se ha determinado la dependencia de la dimensión fractal con la tensión aplicada y se ha observado una dependencia no monótona [2, 6], cuestión que nos indica la multifractalidad del fenómeno. Para lograr una mejor caracterización de las familias de árboles generados, debemos considerar un conjunto de "historias" de crecimiento de estos árboles eléctricos y esto es objeto de estudio de la mecánica estadística. Ahora bien, si consideramos las propiedades termodinámicas de estas historias de crecimiento y establecemos una medida (entropía del sistema), podemos encontrar la condición más probable de crecimiento de los árboles eléctricos.

Esta condición está relacionada con cualquier historia que maximice la distribución de historias de probabilidades ocurridas y es llamada "historia característica" del árbol eléctrico. Dos formalismos de mecánica estadística son aplicados para la determinación de esta historia característica, uno corresponde a la Termodinámica estadística de Boltzmann - Gibbs (B-G) y el otro a la Termodinámica Estadística No Extensiva de Tsallis. En lo que respecta al fenómeno de Ruptura Dieléctrica, recordemos que la Distribución acumulada de Weibull viene dada por la siguiente expresión:

$$F(t_b) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t_b}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

Donde  $F(t_b)$  representa la probabilidad de falla,  $t_b$  es el tiempo de ruptura y los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  son los denominados parámetros de Weibull. Para calcularlos hemos recurrido a la aproximación de Bernard, la cual fue reorganizada de la siguiente forma para obtener una relación lineal:

$$\ln \left[ \ln \left[ \frac{1}{1 - F(t_b)} \right] \right] = \beta \ln(t_b) - \beta \ln(\alpha) \quad (2)$$

Para la Función de Densidad de Distribución acumulada que representa a una distribución generalizada de Weibull o q-Weibull tenemos la siguiente expresión:

$$F_q(t_b) = 1 - \exp_q \left[ - \left( \frac{t_b}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

Donde además tenemos la relación:

$$\ln_q(x) = \frac{x^{1-q} - 1}{1 - q} \quad (4)$$

También, para estimar los parámetros de esta distribución (q-Weibull) podemos recurrir a la expresión de Bernard y reorganizando los términos de la ecuación podemos establecer la siguiente relación:

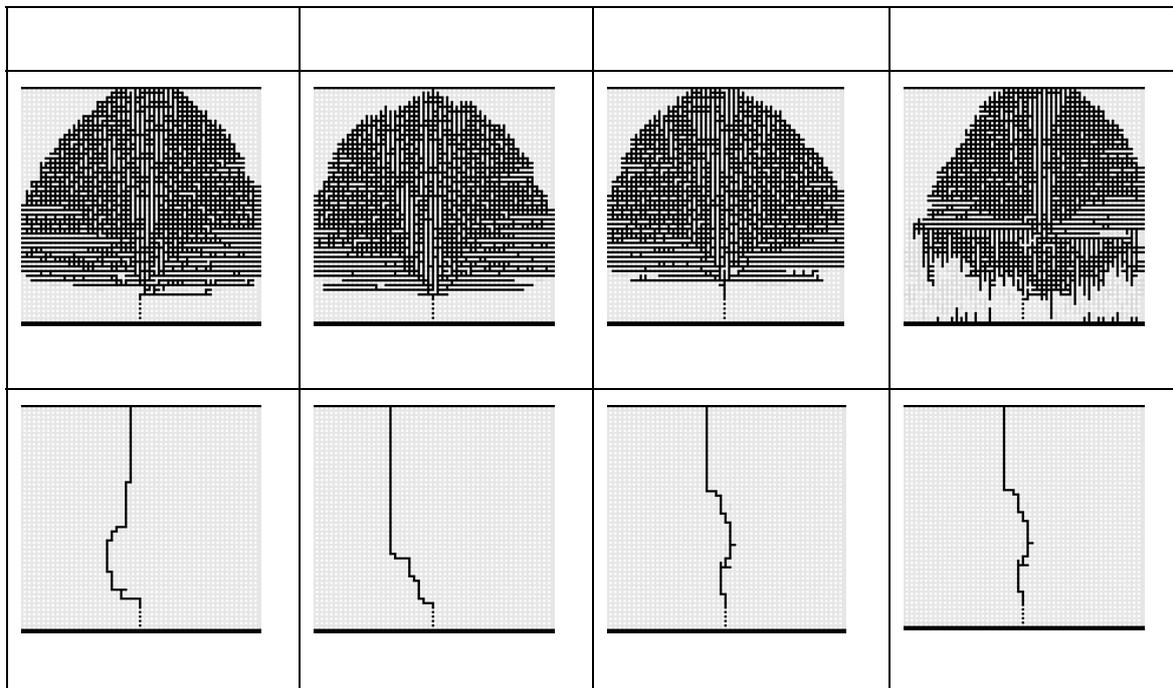
$$\ln \left[ \ln_q \left[ 1 - F(t_b) \right] \right] = \beta \ln(t_b) - \beta \ln(\alpha) \quad (5)$$

Se puede establecer una relación de correspondencia entre el índice entrópico  $q$  y la multifractalidad manifiesta de los patrones de ruptura dieléctrica. Esta relación enunciada en [9] nos dice que la inversa de la diferencia del índice  $q$  con respecto a la unidad es igual a la inversa de la diferencia entre los extremos del espectro multifractal del fenómeno en cuestión, donde  $\alpha_{\min}$  y  $\alpha_{\max}$  son respectivamente los extremos del espectro multifractal como se puede ver en la figura (3), estos extremos, así como el espectro multifractal, se puede obtener a partir del procesamiento digital de las imágenes de distintos árboles eléctricos. Está disponible en forma libre el software que permite realizar este procesamiento (Fraclab).

La geometría fractal ha ganado una rápida aceptación para el abordaje de los sistemas complejos debido a su flexibilidad para describir las formas irregulares que se encuentran en la naturaleza, ahora bien, el simple conocimiento de la dimensión fractal de un objeto es insuficiente para caracterizar su geometría, así como también cualquier propiedad física inherente a dicho objeto. La dimensión fractal no nos ofrece información sobre las bajas o altas distribuciones irregulares dentro del sistema. Con la finalidad de obtener información de este tipo, recurrimos entonces al análisis multifractal.

El concepto de "multifractal" contempla un número infinito de dimensiones fractales y por lo tanto puede resultar más apropiado para la descripción de propiedades físicas. Un proceso multifractal se caracteriza por eventos extremos ( $\alpha_{\min}$  y  $\alpha_{\max}$ ) y más o menos aislados, asociados a una medida que representa la "materia" contenida en cada píxel de la imagen.

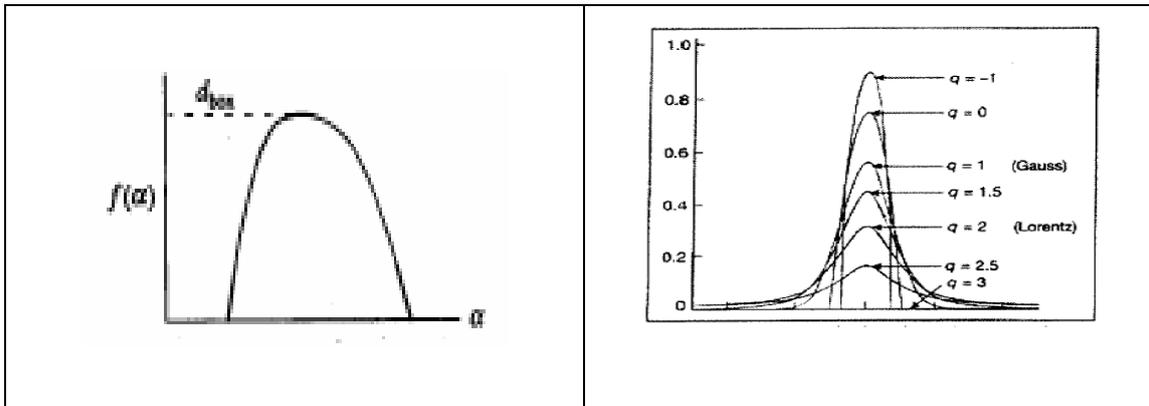
La función es una función continua de que en la generalidad de los casos tiene una forma parabólica, tal como puede verse en la figura (3) y los valores de  $q$  son interpretados como una dimensión fractal generalizada denominada espectro multifractal. La clasificación de espectro multifractal aplicada al análisis de imágenes fue introducida por Levy-Vehel y Berroir [10] así como el software asociado para el procesamiento digital de imágenes (Fraclab). En nuestro caso a partir de las familias de los árboles generados por los distintos protocolos (200 árboles para cada familia que representa distintos escenarios de ruptura dieléctrica, tal como puede observarse en la figura (2)).



**Figura (2): Simulaciones de los dos Protocolos utilizadas para el análisis multifractal**

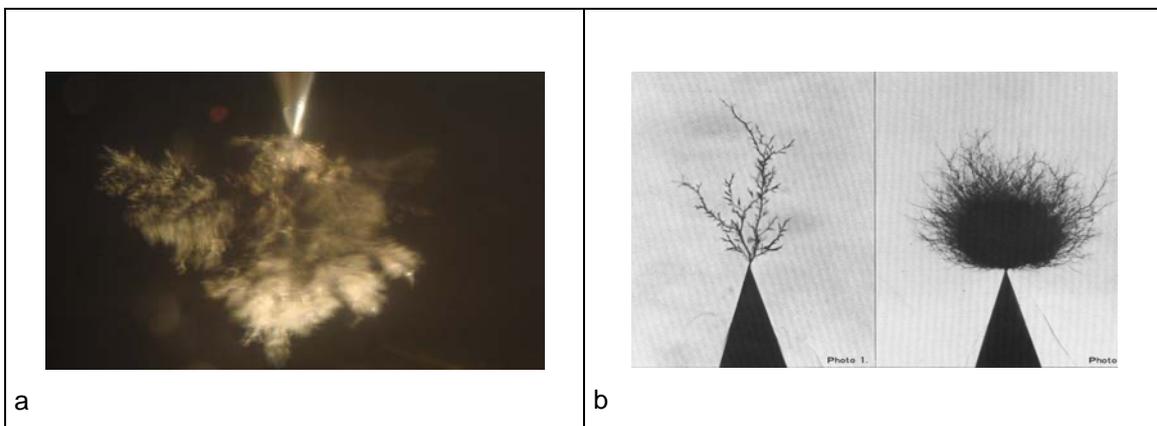
Podemos hallar los  $\alpha_{\min}$  y  $\alpha_{\max}$ , cuestión que nos permitirá a partir de la relación establecida por Tsallis, encontrar el índice entrópico asociado a las distintas familias de árboles eléctricos. Llegamos así a determinar un valor de  $q \cong 1.786815$ , a partir de la determinación de este índice entrópico  $q$ ,

podremos hallar una distribución generalizada de Weibull (q-Weibull) para representar los distintos patrones de ruptura dieléctrica. Para hallar los parámetros asociados a la distribución q-Weibull, actualmente se está utilizando el procedimiento de Bernard modificado y desarrollado en las ecuaciones (3) a (5) de los párrafos anteriores.



**Figura (3) Espectro Multifractal de las imágenes – Distribuciones típicas para distintos valores de q [9].**

A pesar de las ventajas conceptuales y de una mayor flexibilidad en el análisis, la técnica multifractal, todavía no ha sido aplicada intensivamente para el procesamiento digital de imágenes debido a la complejidad matemática que ella representa y de algunas limitaciones computacionales, en nuestro caso empezamos trabajando con imágenes generadas por simulación, dada la clara diferenciación que existe en estas imágenes entre los caminos de ruptura y el espacio que rodea a el árbol eléctrico, no ocurre lo mismo con las imágenes reales de ruptura dieléctrica, tal como se puede ver en la figura (4) en estos casos se requiere de un tratamiento digital de imagen previo al procesamiento, en este tratamiento se busca lograr un realce de los caminos de ruptura dieléctrica y discriminar lo más posible las escalas de grises.



**Figura (4) Imágenes del fenómeno de ruptura dieléctrica generadas experimentalmente. (a) árbol generado por los autores. (b) árboles ref. [4].**

## 2.1.- INTERPRETACIÓN SEGÚN LA TERMODINAMICA ESTADÍSTICA DEL ÍNDICE ENTRÓPICO q

La Termoestadística de B-G constituye una herramienta poderosa para predicciones en sistemas usuales (interacciones microscópicas de corto alcance y/o memoria del sistema de corta duración o prácticamente inexistente), pero este formalismo presenta falencias en sistemas de fuerzas de largo alcance o efectos de memoria del sistema de larga duración. También cuando nos encontramos con estructuras fractales, puede resultar que el formalismo B-G no resulte adecuado. Ahora bien, un camino

teórico, para ampliar el límite de validez de la Termodinámica de B-G ha sido desarrollado por el Profesor Constantino Tsallis, en donde se define una entropía- $q$  que no se rige por el principio de aditividad que está presente en el formalismo B-G. En la Termodinámica de B-G, la entropía está dada por la expresión:

$$S = -k \sum_{i=1}^W p_i \ln p_i \quad (6)$$

Donde  $p_i$  es la probabilidad de encontrar al sistema en el microestado  $i$ ,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $W$  es el número total de microestados. En este sentido, la estadística de Boltzmann-Gibbs parece "funcionar" extremadamente bien en una enorme cantidad de casos, principalmente cuando la interacción microscópica efectiva y la memoria microscópica son de corto alcance.

Los procesos como el fenómeno de ruptura dieléctrica conlleva a correlaciones de largo alcance entre todas las partes del objeto que se fragmenta. Estos últimos sistemas, para los cuales la estadística de BG parece no resultar adecuada, son considerados sistemas anómalos. La ruptura (fraccionamiento) puede ser considerado como un paradigma de la no extensividad, ya que el objeto que se fracciona, después de la división, tienen una entropía mayor que cuando se encontraban unidas. Si denotamos por  $A_i$  las partes o fragmentos en los cuales se ha dividido el objeto, su entropía  $S$  cumple  $S(\cup A_i) < \sum_i S(A_i)$ , lo cual define una "superextensividad" en este sistema. Esto sugiere que será necesario utilizar una estadística no extensiva, en lugar de la de BG. Esta teoría fue propuesta por C. Tsallis, quien postuló una forma generalizada para la entropía dada por:

$$S_q = k \frac{1 - \int_0^{\infty} p^q(x) dx}{q-1} \quad (7)$$

La integral comprende todos los valores admisibles de  $x$  y  $p(x)dx$  es la probabilidad de que el sistema esté en un estado entre  $x$  y  $x+dx$ . Esta entropía puede incluso expresarse en la forma:

$$S_q = \int p^q(x) l_q p(x) dx \quad (8)$$

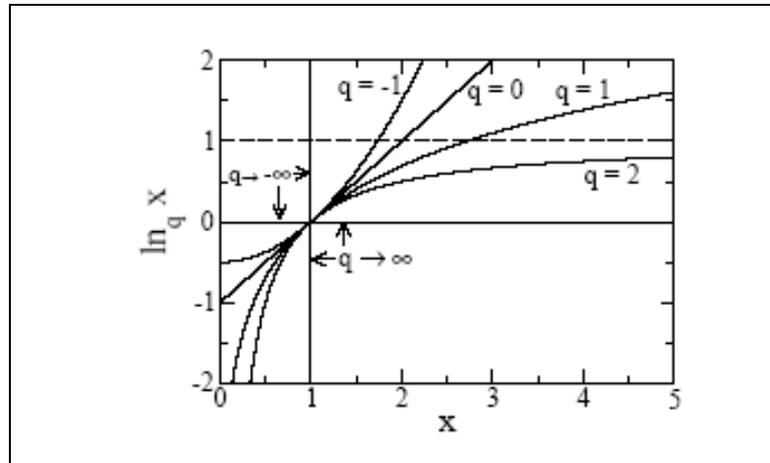
donde  $l_q(p)$  es el logaritmo generalizado que se define por:

$$l_q(p) = \frac{p^{1-q} - 1}{1-q} \quad (9)$$

donde  $q$  es un número real. Si  $q \rightarrow 1$  tenemos  $S_1 = S_{BG}$  y si los estados son equiprobables.

$$S_q = \frac{W^{1-q} - 1}{q-1} = l_q(W) \quad (10)$$

por lo que la entropía de Tsallis es una generalización de SBG.



**Figura (5) Evolución de las funciones de distribución para distintos valores de q según referencia [9].**

### 3.- CONCLUSIONES

A partir de experimentos de simulación numérica se han calculado los parámetros característicos de la función de distribución de fallas (distribución de Weibull), para cada familia de árboles. También se estudió la relación intrínseca entre las distintas familias de árboles generados por los protocolos de ruptura. Para establecer una correspondencia entre estas familias hemos recurrido a un formalismo de la Mecánica Estadística introducido por Tsallis, a partir de este formalismo definimos una distribución generalizada de Weibull con un índice entrópico q. Este índice q es representativo de la estructura fractal de los distintos árboles eléctricos generados bajo condiciones distintas, de allí la conveniencia de recurrir a una distribución generalizada de Weibull para la descripción de los distintos tiempos de falla generados por los tres protocolos y situaciones intermedias [6].

Recientemente en [3] se utilizó una distribución de Weibull de tres parámetros debido a que el modelo simulado no tiene en cuenta las fallas instantáneas o tempranas lo que puede producir curvatura en el gráfico de Weibull de 2 parámetros, tal como se representa a continuación:

$$f(x, \alpha, \beta, \gamma) = \beta \gamma (x - \alpha)^{\beta-1} \exp[-\gamma(x - \alpha)^\beta] \quad (11)$$

Ahora bien, de este trabajo y para distintos voltajes aplicados se puede construir la siguiente tabla ilustrativa:

| Voltaje aplicado a la muestra | Resultado de Tests de Hipótesis  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 4,25 kilovoltios              | Distribución de Weibull adecuada |

|                |                                     |
|----------------|-------------------------------------|
| 10 kilovoltios | Distribución de Weibull No adecuada |
|----------------|-------------------------------------|

**Tabla (2) Distribución de Weibull para distintas condiciones**

De la tabla podemos inferir que para voltajes que están comprendidos en un rango que va de 2 a 9 KV tenemos una distribución de tiempos de ruptura muy bien descritos por una distribución de Weibull, mientras que para un voltaje de 10 kV la distribución de Weibull no resulta la más adecuada, de allí la necesidad de incorporar un tercer parámetro que permita ajustar los datos generados por las simulaciones con una Distribución de Weibull de una manera más adecuada.

Este trabajo afianza aún más la importancia de trabajar con una distribución generalizada de Weibull (q-Weibull) con el fin de tener una distribución representativa del fenómeno completo sin necesidad de recurrir a un tercer parámetro. También este índice entrópico q presenta la ventaja adicional de poseer una interpretación física. Se tiene pensado seguir profundizando estos trabajos para lo cual se está rescribiendo el software de cálculo utilizando el entorno de programación R (software libre orientado a la Estadística Científica) y tomado como base el código de distribución libre que se puede obtener de [10]. Como trabajo futuro nos queda demostrar, en forma más general, la bondad de ajuste de la distribución q-Weibull para las tres familias de árboles eléctricos generados por los tres protocolos de simulación. Además, se incorporará información obtenida en forma experimental a fin de validar las distribuciones estadísticas de fallas utilizadas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es desarrollado entre la Facultad de Química e Ingeniería “Fray Roger Bacon” en el marco del Convenio CONICET – UCA, en cooperación con el Grupo de Sistemas Complejo del Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata. Este proyecto es financiado por la Pontificia Universidad Católica Argentina, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, el CONICET, y la Universidad Nacional de La Plata.

## REFERENCIAS

- 1) Bergero P., Peruani F., Solovey G., Irurzun I. M., Vicente J. and Mola E. E., Dielectric Breakdown model for conductor-loaded and insulator-loaded composite materials. Phys. Rev. E. 69, 2004, pp 16123-1- 16123-6.
- 2) Dammig Quiña P., Herrera L. A., Irurzun I. M., Mola E. E., “A Capacitive Model for Dielectric Breakdown in Polymer Materials”, Computational Materials Science, Ed. Elsevier, 2008.
- 3) Dammig Quiña P., “Ruptura Dieléctrica en Sólidos”, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, 2010.
- 4) Fothergil J. C. and Dissado L. A., “Electrical Degradation and Breakdown in Polymers”, Peregrinus Press for IEEE, 1992.
- 5) Herrera L. A., “Desarrollo de Modelos Computacionales aplicados a la Simulación del Envejecimiento y la Ruptura de Materiales No Homogéneos (Polímeros)”, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 2006.
- 6) Herrera L., Irurzun I., Razzitte A., Mola E. “Descripción de distintos escenarios de ruptura dieléctrica en materiales poliméricos mediante la Distribución de Weibull y la Distribución de Weibull Generalizada”, XVI Congreso Argentino de Físicoquímica y Química Inorgánica, 2009.
- 7) Pastor. V, Altamirano N, Herrera L. A., Irurzun I. M, Razzitte A., Mola E. E. “Modelado de la ruptura dieléctrica de materiales poliméricos sometidos a rampas de potencial”, Jornadas SAM/ CONAMET, 2005.

- 8) Razzitte A. C., "Características Fractales de la Ruptura Dieléctrica y Respuesta en frecuencia de Sólidos Aisladores", Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, 1997. *Thermodynamic Approach to Electrical Tree Formation* J L Vicente, A C Razzitte, M C Cordero and E E Mola. *Physical Review E* **57** (1998) R1.
- 9) Tsallis C. "Nonextensive Statistical Mechanics and Its Applications" Lecture Notes in Physics. Springer, Heidelberg, 2001.
- 10) <http://www.cscs.umich.edu/~crshalizi/research/tsallis-MLE/>
- 11) ENERGEIA, Cuaderno de Investigación, Publicación Anual del Departamento de Investigación Institucional, Año 7, N° 7, noviembre 2009.