

# Fenómenos eléctrico-mecánicos desarrollados en una chispa causada por un pulso: piezoeléctrico



**José Augusto de la Fuente León y Adrián Corona Cruz**  
*FCFM, BUAP, Apartado Postal 1152, 72001 Puebla, México.*

**E-mail:** acorona@fcfm.buap.mx

(Recibido el 20 de Agosto de 2009; aceptado el 21 de Septiembre de 2009)

## Resumen

Los procesos electromecánicos de una chispa eléctrica producida por una cerámica piezoeléctrica son presentados en ésta investigación. La meta general es identificar la relación entre los procesos generados por un método controlado y un transiente. Para voltajes controlados en magnitud y tiempo, las teorías que describen los procesos que se desarrollan en las chispas eléctricas, Townsend y Streamers mostraron consistencia con los resultados experimentales. La aplicación de un voltaje tipo pulso, no generado por una fuente, usado para crear la chispa, mostró que los procesos citados se manifestarán en una sola chispa. Los resultados muestran la localización en el tiempo de cada uno de los procesos: el fenómeno de ruptura de Townsend; el efecto resplandor corona en el cátodo; la nube ionizada frente del ánodo; los pulsos de Trichel y la duración del evento. En la dirección formativa, las tareas teórico-experimental implicadas en la solución del problema, es un ejemplo de las actividades que los estudiantes pueden desarrollar desde sus cursos básicos.

**Palabras clave:** Piezoeléctrico, chispa, Townsend, ionización, avalancha, pulso.

## Abstract

The processes of electromechanical electric sparks produced by a piezoelectric ceramic are presented in this research. The overall goal is to identify the relationship between processes generated by a controlled method and a transient one. To control voltages in magnitude and time, the theories that describe the processes that develops in electric sparks, Townsend and Streamers showed consistency with experimental results. The application a potential pulse, not generated by a source, used to create the spark, showed that the above processes will occur in a single spark. The results show the location in time of each process: the phenomenon of rupture of Townsend and the glow corona effect on the cathode and the anode facing ionized cloud, the Trichel pulses and the duration of the event. In the direction of training, theoretical and experimental work involved in solving the problem is an example of activities that students can develop from the basic courses.

**Key words:** Piezoelectric, spark, Townsend, ionization, avalanches, pulse.

**PACS:** 34.80 Gs, 52.80 Dy, 52.80.Mg

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

La electricidad y el magnetismo son generalmente los temas de la física más difíciles para los estudiantes [1, 2]. La investigación de fenómenos físicos que implican conocimientos básicos, permite que el estudiante se integre en forma efectiva en acciones de los procesos de investigación [3, 4]. El involucrar estudiantes desde su nivel básico en procesos de investigación, se ha identificado como un de los métodos más eficientes en el desarrollo de su metacognición [5].

En un esfuerzo por hacer más claro uno de los temas de la electrodinámica, consideramos la chispa (ruptura dieléctrica del aire) producida por el voltaje generado por un piezoeléctrico, tema que contiene una gran cantidad de conceptos de electromagnetismo, mecánica, y fotónica. El conjunto de fenómenos físicos involucrados en las descargas eléctricas, en particular las producidas con un piezoeléctrico, pone a prueba las ideas básicas de las

teorías desarrolladas para explicar los mecanismos [6, 7, 8, 9]. Los grandes valores de los voltajes implicados en la generación de chispas eléctricas, los nano-tiempos de su manifestación (duración es del orden de 50  $\mu$ s) [10, 11], y las pequeñas cantidades de carga transportada difíciles de cuantificar en los laboratorios básicos de física, presentan retos experimentales importantes para un estudiante.

En éste trabajo se reporta la investigación de los procesos de descarga eléctrica en aire, de chispas producidas por el campo eléctrico transciende de cristales piezoeléctricos. El voltaje que genera la descarga, varía en función del desarrollo del proceso. En lo general los experimentos relacionados, se realizan usando fuentes de poder, lo que permite controlar los procesos, en el espacio y en el tiempo.

Las chispas producidas en el aire, están formadas por un conjunto de electrones e iones positivos, que pueden ser átomos o moléculas, simples o múltiplemente cargados, y fotones de varias frecuencias. Es de conocimiento común

que arcos eléctricos emiten radiaciones electromagnéticas en la gama de frecuencias de la luz visible, ultravioleta y del extremo inferior de rayos x.

El efecto piezoeléctrico describe la relación entre la tensión mecánica aplicada a una cerámica y el campo eléctrico o carga producida. Es un fenómeno reversible: una tensión mecánica genera un voltaje y un voltaje aplicado produce un cambio en la forma del sólido (del orden de 4% del volumen). Las cerámicas piezoeléctricas pueden generar voltajes suficientes para producir una chispa de varios milímetros entre electrodos [12]. Resultados experimentales muestran que las cerámicas de titanato de bario, pueden generar pulsos del orden de 100 KW [13].

## II. MECANISMOS EN LA RUPTURA ELECTROMECÁNICA DEL AIRE

La ionización es un proceso de liberación de electrones de átomos o moléculas, producida por diferentes mecanismos: colisiones entre electrones; colisiones de electrones con iones positivos; radiación; procesos químicos y nucleares, etc. La ruptura eléctrica, se define como la transición del aire, de un medio aislante a un medio “conductor”. Se considera un arco eléctrico a una descarga continua de corriente alta, mientras que una chispa es una descarga momentánea con una caída del voltaje. En general, las descargas eléctricas dependen de la capacidad del aire para conducir electricidad; de la generación de electrones e iones y de la rapidez de su recombinación; así, como de la movilidad de las cargas y de su poder para adsorber radiación electromagnética.

Las moléculas de aire que circundan objetos metálicos que se encuentran eléctricamente cargados, experimentan una redistribución de sus cargas, haciendo que se impacten en ellos, provocando que pierdan o ganen electrones y en consecuencia sean expulsadas, acelerándose en la dirección del campo, así, pequeñas corrientes fluyen entre los electrodos y las propiedades eléctricas del aire se mantienen. A medida que el voltaje entre los electrodos aumenta, la corriente crece en forma exponencial [14], ocurriendo la ruptura eléctrica del aire, y en consecuencia una descarga eléctrica que se auto mantiene. La corriente durante la ruptura está compuesta de electrones e iones positivos creados de los átomos o moléculas del aire, obtenidos por medio de procesos de ionización por colisiones, y segundos procesos de ionización, es decir, la descarga eléctrica en los gases es un fenómeno relacionado con la capacidad conducción eléctrica y absorción de radiación electromagnética del aire [15]

Hay dos teorías principales sobre los mecanismos de ruptura: la teoría de Townsend que describe los procesos ocurridos desde el cátodo y la teoría de descargas llamadas streamer, relacionada con eventos de ionización del aire que principian en el ánodo [8]. La ionización por colisión, se da cuando electrones libres emanados del electrodo negativo, debido a la acción del campo, son aceleradas provocando más colisiones y nuevos iones que colisionan con moléculas del aire, produciendo una avalancha de

nuevos electrones libres e iones positivos, acompañados de luminosidad debida a fotones emitidos en los impactos. Éste tipo de proceso es conocido como una descarga Townsend. Los procesos de ionización secundarios, se dan por varios mecanismos, uno de ellos es la producción de electrones en la punta de la avalancha primaria; otro se da cuando los iones positivos impactan el cátodo, emitiendo electrones de la superficie del electrodo; uno más se da cuando se extraen electrones de la superficie del electrodo por la ionización debida a la acción de fotones con la suficiente energía para superar la barrera de potencial del metal. Cuando en el cátodo se acumulan iones positivos que reducen los valores del campo eléctrico, interrumpiendo el proceso de ionización, comienza a continuación otro proceso de ionización, producto de la colisión de los iones positivos con el cátodo. Los electrones liberados comienzan así un nuevo ciclo que corresponde al siguiente pulso de Trichel [16].

Se observa que cuando el campo eléctrico es no-uniforme aparecen *descargas corona* cerca de uno o de ambos electrodos, en el electrodo positivo regiones luminiscentes azuladas, y en el negativo puntos rojizos brillantes. Cuando las avalanchas se aproximan al ánodo, se producen descargas en el ánodo con formas de filamentos, llamadas “streamers” que se mueven hacia el cátodo. A mayores voltajes se cubre la punta con iones negativos, aumentando la corriente y la intensidad de luminosa y se producen descargas conocidas como breakdown streamers, acompañados con ruidos. Finalmente se producen arcos (sparks) similares a la “descarga Townsend” que cubren la longitud entre los electrodos, provocando la ruptura eléctrica del aire.

A manera de resumen, el desarrollo de los procesos en función del aumento del voltaje;

- a) a voltajes bajos se da una corriente estable de cargas libres,
- b) un incremento del voltaje, establece una situación estacionaria que se identifica como pulsos Trichel.
- c) a mayor voltaje, se desarrollan las avalanchas que sumadas se trasladan hacia ánodo (descarga Townsend)
- d) incrementando más, la suma de avalanchas y los streamers que parten del ánodo, establecen la chispa

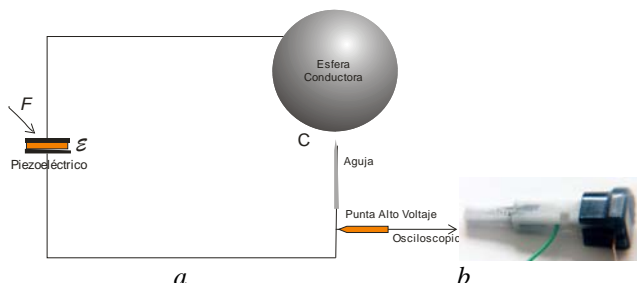
En nuestro caso, el voltaje, en décimas de pico segundos se establece un voltaje suficiente para producir la chispa, y ante la descarga, el voltaje cambia en función del desarrollo de la chispa.

Para identificar los efectos en los mecanismos de ionización de la estructura e intensidad del campo eléctrico, en el caso esfera-aguja, se estudian ambas polaridades.

## III. EXPERIMENTO

El método fundamental del estudio, se basa en el análisis de los cambios que el voltaje experimenta durante el desarrollo de la chispa. La configuración básica de los experimentos implementados consiste en un sistema formado por un par de agujas contra-lineadas y separadas

en un rango de  $1 < d < 6$  mm; una esfera conductora de 42 mm de diámetro y una aguja que apunta hacia su centro mostrada en el diagrama eléctrico de la figura 1 *a*, desde el mismo rango de distancias. El voltaje se obtuvo de un mecanismo de encendedor de parrillas, que genera un voltaje del orden de 30 Kv: la terminal que sale del disparador, como se muestra en la imagen de la figura 1 *b*, se conecta al electrodo que funcionará como cátodo. Las terminales del sistema de ignición, se conectaron directamente a cada electrodo. Las variaciones de voltaje se midieron por medio de una punta de alto voltaje, (atenuación X100, impedancia  $100\text{M}\Omega/1\text{pf}$ ) conectada a un osciloscopio Tektronix TDS 2012B.

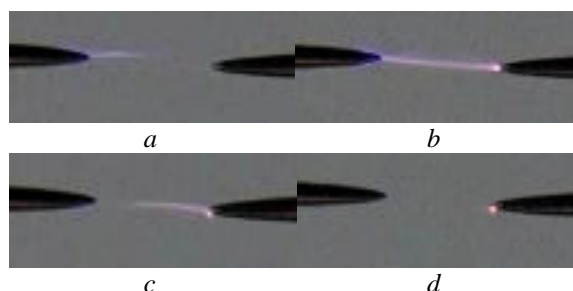


**FIGURA 1.** Arreglo eléctrico del sistema esfera-aguja, F representa el golpe en el cristal (*a*), y sistema mecánico para golpear en cristal piezoeléctrico (*b*), el cable verde es el cátodo.

Las fotografías que se muestran en las siguientes figuras se obtuvieron del video capturado de la chispa, con una cámara digital Casio EX-F1, a 1200 fps.

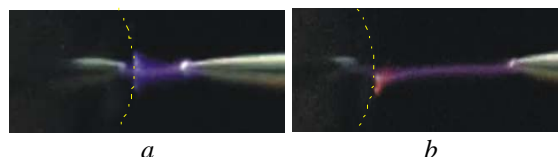
#### IV. LUZ EMITIDA EN EL DESARROLLO DE UNA CHISPA

La figura 2 muestra imágenes representativas de la descarga eléctrica entre las agujas. La aguja de la derecha está conectada al cátodo (cable verde en la fotografía 1). La imagen *a* muestra que la descarga inicia en el ánodo; en *b* la ionización se mantiene uniforme a lo largo de la separación entre los electrodos; en *c*, la ionización y su correspondiente luminiscencia se desvanece desde el ánodo, finalmente en *d*, se muestra que el proceso concluye, en forma de resplandor corona, en el cátodo. La secuencia es consistente con la reportada en la Ref. [8]



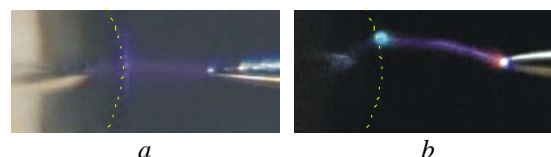
**FIGURA 2.** Secuencia de imágenes que muestra el desarrollo espacial de la chispa. La secuencia corresponde a diferentes eventos. La aguja de la derecha está conectada al cátodo.

En las imágenes siguientes se muestran las luminisidades en diferentes arreglos. En el caso aguja-esfera, figura 3 *a*, con la aguja se conecta al cátodo, a una distancia de 3 milímetros, se observa que la corona blanca se forma en la punta de la aguja, y en la esfera puntos luminosos pegados a la superficie. A una distancia de 5 milímetros, figura 3 *b*, en la aguja se forma una corona blanca y se cubre con luz azul. En ocasiones se forman puntos de mayor intensidad a un lado de la llegada de la chispa. En ambos electrodos se emite luz azul. En general las chispas son menos intensas que el caso inverso.



**FIGURA 3.** Chispa, entre aguja-esfera a dos distancias. La aguja está conectada al cátodo.

En el caso de conexión inversa, la esfera se conecta al cátodo, a una distancia de 3 milímetros, figura 4 *a*, se observa que la punta de la aguja se cubre de luz azulada, en la esfera la luz también es azul. A una distancia de 5 milímetros, figura 4 *b*, se ve un punto azul en la esfera y en este caso la luminosidad es más puntual, en la aguja se forma la corona blanca más intensa que el caso contrario.



**FIGURA 4.** Chispa, entre aguja-esfera a dos distancias. La esfera está conectada al cátodo.

En la figura 5, se muestra un caso anómalo, situación no considerada en la literatura referida. Su frecuencia de ocurrencia es del orden del 10%.

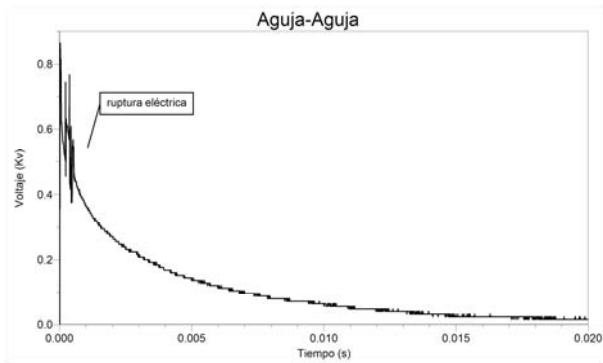


**FIGURA 5.** Avalancha que escapa del flujo principal de las avalanchas que configuran la chispa.

#### V. VARIACIONES DE VOLTAJE DURANTE LAS DESCARGAS

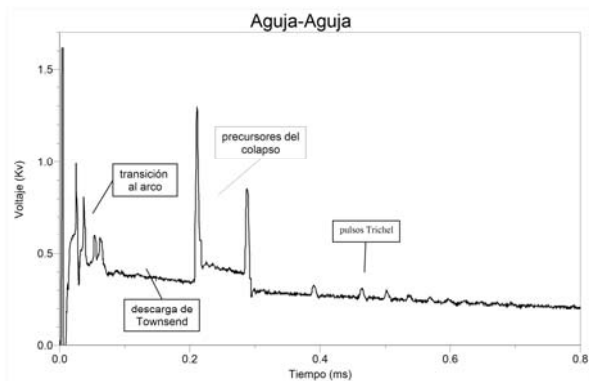
Los siguientes resultados son analizados con la suposición de que las variaciones del voltaje son proporcionales a las variaciones del flujo de iones durante la chispa.

En la figura 6, se muestra el comportamiento de las variaciones del voltaje de la descarga del “capacitor” formado por dos agujas. En los primeros 0.8 ms, se realizan todos las transiciones relacionadas con la chispa. En el tiempo restante sólo se descarga. En graficas correspondientes no mostradas, se observa la diferencia en la rapidez de descarga del capacitor esfera- aguja.

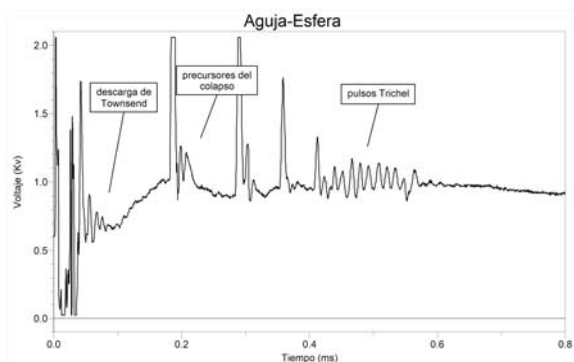


**FIGURA 6.** Descarga del capacitor formado por dos agujas. Los eventos relacionados con la chispa se desarrollan aproximadamente durante los primeros 0.8 ms.

En las graficas en las figuras 7-9, muestran las variaciones del voltaje durante la descarga y su correlación con los eventos que previamente se describieron. Lo trascendental de la chispa, ocurre durante los primeros 0.8 microsegundos. Debido a que el voltaje producido al golpe en el cristal crece de manera instantánea a su valor máximo, los procesos de ionización y sus efectos se desarrollan desde el máximo, haciendo que los procesos se manifiesten en forma inversa. Desde el inicio se forma la corona, seguida de la ruptura, hasta los procesos pulsantes de Trichel.



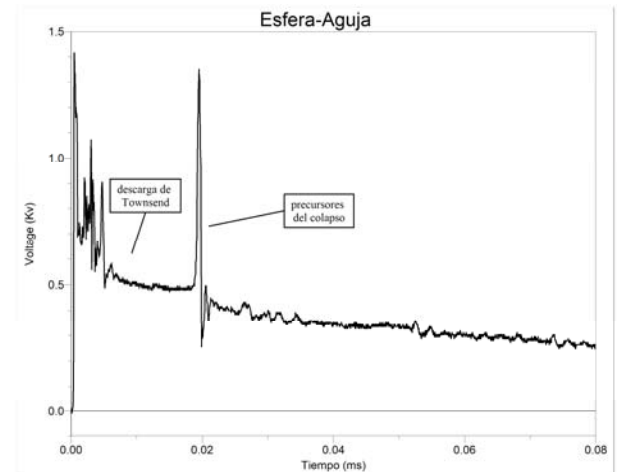
**FIGURA 7.** Características del voltaje-tiempo entre dos agujas, de la descarga eléctrica de la chispa, se observan al inicio cambios que se pueden relacionar con las avalanchas, y a menor voltaje, pulsos que se interpretan de Trichel. El tiempo corresponde a la duración aproximada de la luz emitida por la chispa.



**FIGURA 8.** Características del voltaje-tiempo de la descarga eléctrica, entre una esfera y una aguja conectada al cátodo. Se

observa una completa similitud con el caso aguja-aguja, esto comprueba que los procesos son más activos cuando el campo eléctrico es no uniforme.

A diferencia del caso anterior, cuando la esfera se conecta al cátodo, la aguja no participa en el proceso de ionización sino que actúa simplemente como acumulador de cargas. De esta forma, la ruptura se desarrolla en menor tiempo. En la figura 9, se muestra lo estable del proceso. El proceso corresponde al caso corona positiva, descrita en la Ref. [14]



**FIGURA 9.** Variaciones del voltaje correspondiente al desarrollo de la chispa entre una esfera y aguja. En éste caso la aguja actúa como ánodo. El comportamiento es estable, lo que implica la ausencia de resplandores anormales y pulsos Trichel.

Respecto al efecto de la separación entre electrodos, se sabe que en el rango  $1 < d < 6$  mm, la cantidad de carga transportada en la chispa, presenta un máximo [17].

Resumimos que las teorías desarrolladas (Townsend y streamer) sobre la producción de chispas, describen los procesos que involucra la formación de las descargas eléctricas producidas por un voltaje transiente.

En particular el fenómeno de ruptura de Townsend, el efecto resplandor corona en el cátodo, la nube ionizada enfrente del ánodo, las frecuencias pulsos de Trichel, la duración del evento, se reproducen durante la reducción del voltaje. Sin embargo queda por hacer determinaciones cuantitativas de los procesos.

Respecto a la frecuencia de los pulsos Trichel se obtuvo para el caso esfera-aguja  $f = 40$  KHz, valor 5 veces menor, respecto al caso plano-aguja, reportado, para un sistema similar, por Fieux & Bouteau (1970), citado en la Ref. [14], y para el caso aguja-aguja  $f = 200$  KHz, valor que coincide con lo citado. También se registró que la frecuencia no depende, en el rango experimentado, de la distancia entre los electrodos, y que las magnitudes de los pulsos dependen de la dimensión de las superficies de los electrodos, coincidiendo con lo expuesto en la Ref. [16].

## VI CONCLUSIONES

Se considera que por medio de los experimentos realizados se obtiene una mejor comprensión de los procesos

involucrados en la descarga. También, fue relevante identificar que los procesos fundamentales de las chispas corresponden a las producidas por medio de voltajes controlados o constantes.

El estudio de un sistema “simple”, como la descarga eléctrica en el aire, es en realidad complejo; para tener una idea acabada de los distintos procesos que en el desarrollan se requiere de varios experimentos. Por ejemplo, para obtener resultados cuantitativos, e identificar mejor parte del proceso se requiere contar con una cámara de al menos diez cuadros durante la realización de la chispa; para comprobar los resultados se proyecta, que en los siguientes cursos, los alumnos analicen los cambios en el tiempo de la luminiscencia de la descarga eléctrica [18].

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a los doctores Maya Mendieta Mario Alberto, Martí Panameño Erwin, José Armando y a Ramírez Romero Cupatitzio, por sus sugerencias y comentarios, asimismo a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP por su apoyo económico.

## REFERENCIAS

[1] Shipstone, D. M., *A study of children's understanding of electricity in simple DC circuits*, European journal of Science Education **6**, 185-198 (1984).  
[2] Shipstone, D., *Pupils' understanding of simple electrical circuits. Some implications for instruction*, Phys. Educ. **23**, 92-96 (1988).  
[3] Doty, D., Craggs, S., Jorgensen, M., Doty, M. L., Hodd, D., “*The lightning machine*”: A simple, interesting demonstration apparatus for introductory physics, Am. J. Phys. **68**, 579-581 (2000).  
[4] Jackman, H., Kashy, E. and Thoennesen, M., *Improving Conceptual Understanding of Physics with Technology*, (1999).  
<http://www.nsl.msu.edu/~thoennes/personal/theses/jackman.pdf>. Consultado el 13 de Marzo de 2009.  
[5] Smith, K. A., Sheppard, S. D., Johnson, D. W., Johnson, R. T., *Pedagogies of Engagement: Classroom-Based Practices*, Journal of Engineering Education, January 2005, 1-15 (2005).  
[6] Carboni, G., de Capua, S., Domenici, D., Messi, R., Natali, G., Santovetti, E., *Direct measurement of the avalanche charge in a Resistive Plate Chambers detector*,

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A 533**, 159-162 (2004).  
[7] Gómez, C., López, H. and Corona, F. R., *Impulse Current Produced By Hyperboloidal Tips In a Coaxial Cylindrical Setup*, XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August, 25-29 (2005).  
[8] Wagenaars, E., (Thesis) *Plasma Breakdown of Low-Pressure Gas Discharges*, Technische Universiteit Eindhoven, (2006).  
[9] Loeb, L. B., *Statistical factors in spark discharge mechanisms*, Reviews of Modern Physics **20**, 151-160, (1948).  
[10] Wagenaars, E., Bowden, M. D., Kroesen, G. M. W., *Optical imaging of breakdown in a low-pressure argon discharge*, American Physical Society, 57th Gaseous Electronics Conference, Shannon, Republic of Ireland, 26-29 (2004).  
[11] Cook, J. A., Gleeson, A. M., Roberts, R. M., Rogers, R. L., *A spark-generated bubble model with semi-empirical mass Transport*, J. Acoust. Soc. Am. **101**, 1908-1920 (1997).  
[12] Piezoelectricity,  
[http://www.americanpiezo.com/piezo\\_theory/piezo\\_theory.pdf](http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/piezo_theory.pdf). Consultado el 18 de Mayo de 2009.  
[13] Keawboonchuay, C., Engel, T. G., *Maximum power generation in a piezoelectric pulse generator*, Plasma Science, IEEE **1**, 327-330 (2003).  
[14] D'adamo, J., *Control de los coeficientes locales de transferencia de calor sobre una placa plana a partir de atenuadores EHD*, Tesis doctoral de Ingeniería (2001)  
<http://laboratorios.fi.uba.ar/lfd/tesis%20de%20ingenieria/TesisDadamo.pdf>. Consultado el 10 de Febrero de 2009.  
[15] High voltage insulation and electrical discharge,  
[http://www.geocities.com/afendi63/HV1\\_v2.pdf](http://www.geocities.com/afendi63/HV1_v2.pdf). Consultado el 18 de Abril de 2009.  
[16] Asinovski, É. I., Petrov, A. A. and Samoylov, I. S., *Frequency Response Characteristics of Trichel Pulses and the Behavior of the Cathode Spot in a Negative Corona Discharge*, Pis'ma v Zhurnal Éksperimental'no i Teoreticheskó Fíziki **86**, 354-355 (2007).  
[17] Villanueva, J. R., de la Fuente, J. A., y Corona, A., “*Carga eléctrica transportada en una chispa producida por piezoeléctricos*” Memorias de congresos LI Congreso Nacional de Física, (2008) pág. 60.  
[18] Muto, J., Nagahama, H., Miura, T. and Arakawa, I., *Electric Discharge Plasma from Frictional Natural Quartz: One Origin of Seismo-electromagnetic Radiation*.  
[http://www.meteoquake.org/website%2081\\_136-J.Muto.pdf](http://www.meteoquake.org/website%2081_136-J.Muto.pdf). Consultado el 28 de Julio de 2009.