

CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL EFECTO SUMOTO EN UN AISLANTE LÍQUIDO VEGETAL

ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF SUMOTO EFFECT IN A VEGETABLE LIQUID INSULATION

José L. Hernández-Avila ¹, Cesar S. López Montalvo ^{1,2}, Francisco Beltran Carbajal ¹, Marco Arjona ³, José A. Hernández Martínez ¹

joeluish@gmail.com / cslopezmo@conacyt.mx / fran_belt29@hotmail.com / marjona@ieee.org / adryan195@gmail.com

¹ CBI-Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana -Azcapotzalco -UAM-A

²Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - Conacyt

³ Instituto Tecnológico de la Laguna - ITL-SEP

Recibido: octubre 15, 2019 / Aceptado: marzo 7, 2020 / Publicado: noviembre 14, 2020

Resumen. En el presente trabajo se muestra los resultados de caracterización eléctrica del efecto Sumoto. Este fenómeno aparece en una interface entre un dieléctrico líquido y aire. Cuando se aplica una alta tensión a un electrodo sumergido en el líquido, se forma un cono ascendente de aceite sobre el conductor. Este cono de fluido posee una carga eléctrica asociada. Se presenta su caracterización en términos de los parámetros siguientes: Tensión positiva de corriente directa (C.D.), forma del electrodo de baja tensión, pureza del líquido, nivel de fluido en el contenedor.

Palabras clave: Efecto Sumoto, Dieléctricos Líquidos, Movimiento Electrohidrodinámico EHD, Descargas Parciales

Abstract. This paper shows the results of the electrical characterization of Sumoto effect. This phenomenon appears in an interface between a liquid dielectric and air. When a high voltage is applied to an electrode immersed in liquid, an ascending cone of oil is formed on the conductor. This fluid cone has an associated electric charge. Its characterization is presented in terms of the following parameters: C.D. positive voltage, low voltage electrode shape, liquid purity, fluid level in the container.

Key Words: Sumoto Effect, Liquids Dielectrics, EHD Electrohydrodynamic Movement, Partial Discharges

1. Introducción

Las descargas parciales (DP) son un mecanismo de pérdidas de energía que afectan notablemente la industria eléctrica y particularmente a la industria de los transformadores eléctricos de potencia [1, 2, 3]. Estos fenómenos causan pérdidas económicas millonarias. En [2] se reporta que las de pérdidas de transformadores de instrumento ascienden hasta un 24 % de la producción en esos equipos. Las descargas parciales se crean al interior de medios dieléctricos como consecuencia de impurezas, o contaminantes presentes en materiales empleados en la fabricación y montaje en equipos eléctricos [1, 2, 3]. En estos equipos es común encontrar descargas parciales cuando interactúan dos medios dieléctricos de diferente naturaleza en presencia de un campo eléctrico elevado.

La alteración de un líquido bajo efecto de un campo eléctrico ha sido un tema explorado por varios autores [3, 4, 5, 6], no solo para comprender la naturaleza de formación de las descargas parciales y poder atenuar sus efectos energéticos en equipos eléctricos, sino para comprender los mecanismos de deformación de la interface líquida por campos eléctricos. Lo que es de interés en

aplicaciones tecnológicas, dado que es posible, por ejemplo, deducir propiedades como la tensión superficial del líquido al igual que la tensión interfacial, con aplicaciones específicas en actuadores que permitan controlar el comportamiento de las superficies líquidas y suprimir las inestabilidades hidrodinámicas [6, 7, 8, 9, 10]. Otro tipo de inestabilidades presentes en la zona de interface entre dieléctricos están basados en efectos electroforéticos y dielectroforéticos [6-10], como el efecto Sumoto [12, 13, 14], las inestabilidades Rose-window de líquido [15], que son procesos con aplicación en el campo de la electrohidrodinámica (EHD) y que están vinculados con la deformación de la superficie líquida en presencia de un campo eléctrico intenso.

El efecto Sumoto fue reportado en 1956 [12], y consiste en la elevación de un líquido dieléctrico a lo largo de un par de electrodos sumergidos en un fluido cuando se aplica una alta tensión de C.D. En los trabajos hechos por Pickard [13, 14], se demostró que el aumento del líquido depende del tipo de fluido dieléctrico, la pureza del líquido, el tipo de material del electrodo, la temperatura, la frecuencia y la forma de onda de la tensión aplicada. Más recientemente, en un trabajo de K. Mori et al. [16], se definió el efecto Sumoto como un fenómeno inherente a un fluido dieléctrico, que presenta una elevación de líquido debido a una fuerza compuesta por una componente de fuerzas coulombianas, asociada a la polarización del fluido dieléctrico acompañada por una componente de fuerza dieléctrica, vinculada a fenómenos dielectroforéticos en el líquido. Es de nuestro interés investigar los mecanismos de descargas deslizantes entre aislantes de naturaleza diferente como papel-aceite al aplicarles un campo eléctrico divergente, es así que se encontró, durante estas experiencias, el fenómeno Sumoto; esto dio pauta a realizar una caracterización eléctrica con intención de deducir si existe o no, alguna relación entre ambos fenómenos.

2. Metodología

La figura 1 muestra el arreglo experimental conformado por un contenedor de vidrio conteniendo un nivel de aceite con altura H , en el cual se sumerge un arreglo de electrodos en configuración “punta-plano”. El electrodo activo es una aguja de acero inoxidable con diámetro de $200\ \mu\text{m}$, radio de curvatura de $90\ \mu\text{m}$ y longitud de $4.5\ \text{cm}$. Los electrodos de baja tensión (BT) son placas planas de distintas formas: una con forma de signo de interrogación y la segunda en forma de aro (anillo). A todos los electrodos de baja tensión se les cubre con un papel de transformador el cual está en contacto directo con el electrodo activo. La fuente de alta tensión (Bertan 225, 0- 30 kV CD. polaridad reversible) se conecta a la aguja, a la cual se aplican voltajes positivos desde $500\ \text{V}$ a $20\ \text{kV}$. Conectando una sonda atenuadora de tensión, se monitorea el valor de tensión aplicado al electrodo activo. La corriente circulando en el medio líquido es censada con ayuda de un electrómetro digital (Keithley, modelo 6517A) conectado en serie con el electrodo de baja tensión.

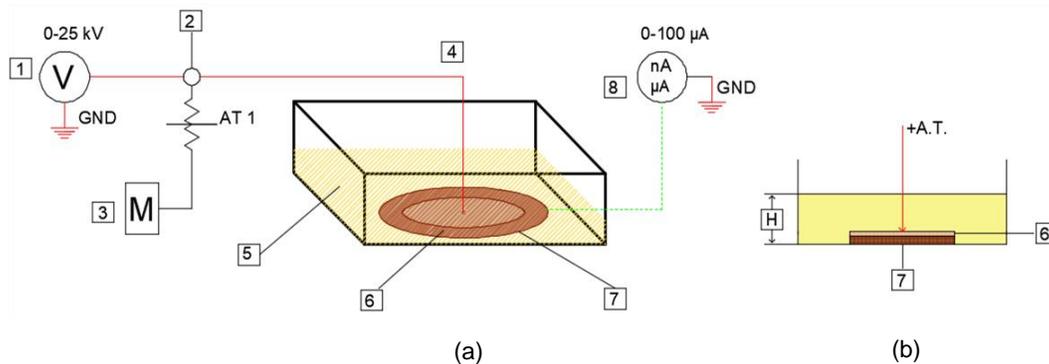


Figura 1. (a) Arreglo experimental del efecto Sumoto (b) Vista lateral del montaje

- | | |
|--|--|
| 1.- Fuente de alta tensión. | 5.- Aceite vegetal de altura H. |
| 2.- Sonda atenuadora de tensión. | 6.- Papel aislante. |
| 3.- Multímetro. | 7.- Forma de electrodo de baja tensión BT. |
| 4.- Electrodo de alta tensión en polaridad positiva. | 8.- Electrómetro digital. |

Para cada prueba con un arreglo de electrodos particular, el contenedor de vidrio es relleno con aceite vegetal (Canola, grado comestible) hasta una altura específica H (ver figura 1b). Se emplea aceite nuevo para las pruebas iniciales con un arreglo determinado y para comparación se deja el aceite, ya usado, a la intemperie del laboratorio por algunas horas o días; esto se hace con el fin de observar el efecto de la contaminación del dieléctrico en la corriente de descarga y del efecto Sumoto.

3. Resultados y Discusión

En la figura 2, se presenta una imagen fotográfica del efecto Sumoto, donde se aprecia un cono de líquido adherido al electrodo activo sumergido en el aceite y elevándose sobre la superficie del conductor. El fenómeno inicia a niveles de tensión del orden de 4 a 6 kV o más, dependiendo de la pureza del líquido (ver figura 3). En cierto instante el nivel del líquido colapsa para dar paso, en un intervalo de tiempo más largo y dependo de la tensión aplicada, a la formación de otro cono ascendente. Si se aumenta sistemáticamente la tensión aplicada, el fenómeno se repite con mayor frecuencia.

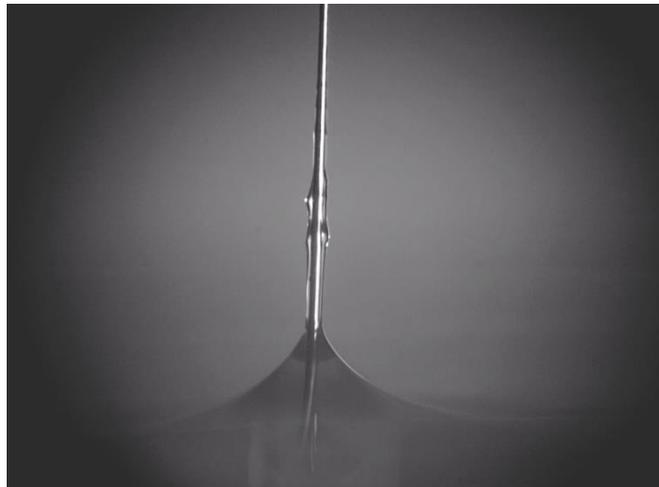


Figura 2. Aspecto visual del Efecto Sumoto. Nótese la formación del cono de líquido adherido al conductor

La figura 3 presenta las curvas típicas de caracterización eléctrica, Corriente -Voltaje (I-V), para dos diferentes arreglos de electrodos de baja tensión empleados en las pruebas con aceite nuevo y usado.

De forma general se observa que el nivel de la corriente de descarga, para el caso del electrodo en anillo, está un orden de magnitud por encima de las corrientes medidas con el electrodo con forma de signo de interrogación. En ambas pruebas y para valores de tensión aplicada entre 1 kV y 5 kV, se aprecia un desfase de corriente a niveles más elevados para un aceite usado que para un aceite nuevo (ver puntos negros para cada grafica de la figura 3). Por arriba de la tensión de aparición del fenómeno, las corrientes de descarga convergen a valores del orden del microampere (μA). Es

importante resaltar que el valor de tensión de inyección del efecto Sumoto posee magnitudes inferiores para un aceite usado comparado con el voltaje requerido en un aceite nuevo.

Por encima del valor de la tensión de inyección del efecto Sumoto se presenta una zona denominada “región de pulsaciones” o “región de ascenso-descenso”, que consiste en ascensos-descensos repetitivos del volumen de líquido adherido al electrodo activo. Esta región se caracteriza por aumentar en número de repeticiones del fenómeno, a medida que la tensión aplicada al electrodo activo es incrementada. La figura 4, mostrada más adelante, da cuenta de este resultado.

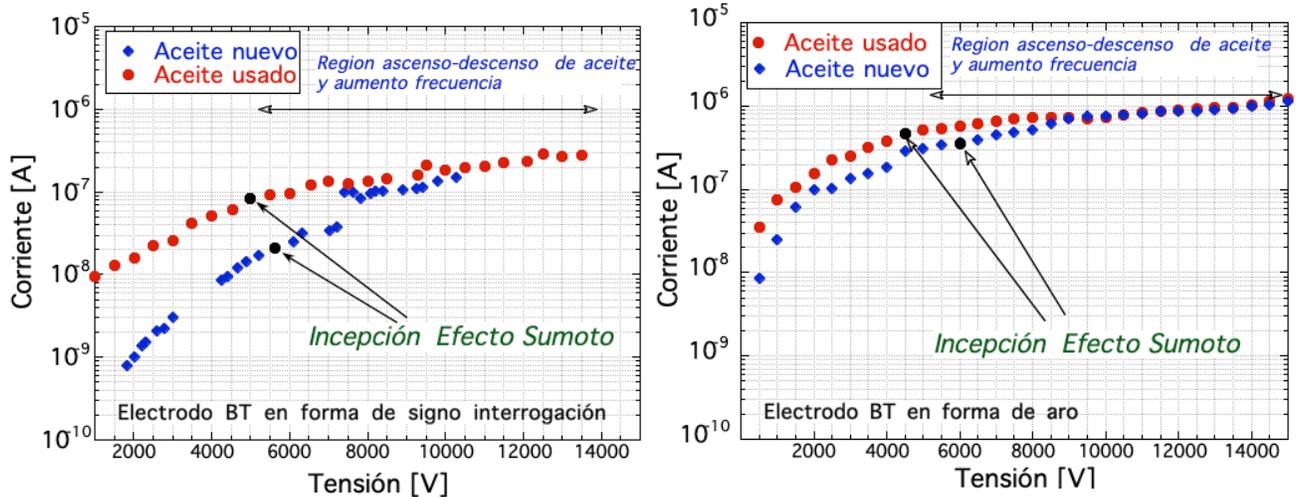


Figura 3. Curvas características I-V comparativa de aceite nuevo y usado para electrodos inactivos diferentes

El número de los pulsos contabilizados por minuto en función de la tensión aplicada, con un electrodo de baja tensión en forma de signo y para los casos con aceite nuevo (H=12 mm) y aceite usado (H=10 mm), se muestra en la figura 4. Con H= 12 mm, los pulsos aparecen a una tensión de 7 kV y se dejan de percibir hasta de 9.5 kV, donde el movimiento del fluido por efectos EHD ya es evidente. En el caso del aceite usado y H = 10, los pulsos aparecen a partir de 5 kV e incrementan su frecuencia a casi el doble, en comparación con el aceite nuevo: Este comportamiento se obtienen para tensiones cercanas a los 11 kV.

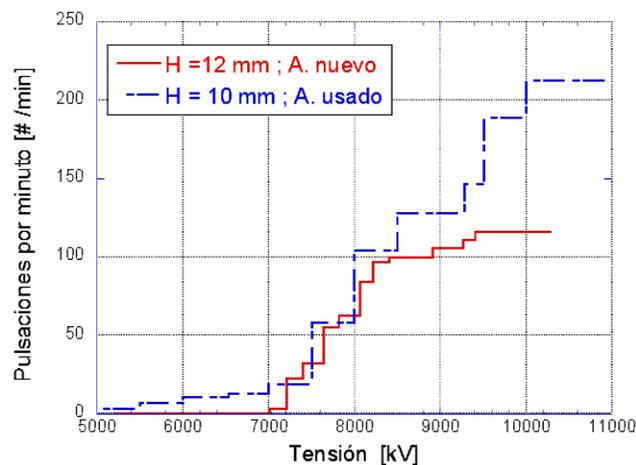


Figura 4. Región de pulsaciones (ascenso y descenso de fluido) y dependencia con la tensión aplicada

La figura 5 muestra 3 curvas I-V, comenzando con aceite limpio y H = 20 mm de alto: En las pruebas siguientes se reduce el nivel del fluido, a 15mm y 5 mm. A tensiones iniciales las corrientes son muy similares; no hay desfases amplios de corriente entre pruebas. Se observa que las corrientes de descarga son superiores para la altura más baja en el contenedor (H = 5mm). Esto se puede explicar por la mayor polarización del líquido bajo efecto del campo eléctrico intenso. Se ratifica que la pureza del aceite, tanto como la altura del fluido, inciden en la tensión de aparición de efecto Sumoto. Siendo la pureza el factor más importante para iniciar el mecanismo de ascenso de aceite sobre el electrodo. No descartamos que la altura también afecta al fenómeno, pero al momento no se tienen mayores datos para concluir que así sea.

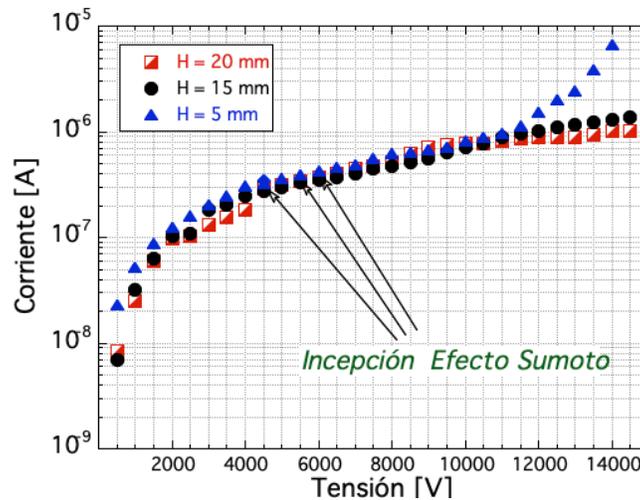


Figura 5. Curvas características I-V comparativa y efecto de altura H del líquido.

A fin de caracterizar el cono de aceite (ver figura 1) formado por el efecto Sumoto, se determinan los volúmenes de conos a partir de fotografías y se analizan los resultados en función del voltaje aplicado. Se comparan datos para aceite nuevo y usado, tomando tres alturas de fluido H: 20 mm, 15 mm y 5 mm (ver figura 6). En todos los casos para el aceite nuevo, se observó que los volúmenes incrementan paulatinamente conforme aumenta la tensión aplicada y son mayores respecto de los determinados en aceite usado. Se aprecia además que a menor altura H, mayor es el volumen de aceite en el cono de fenómeno Sumoto.

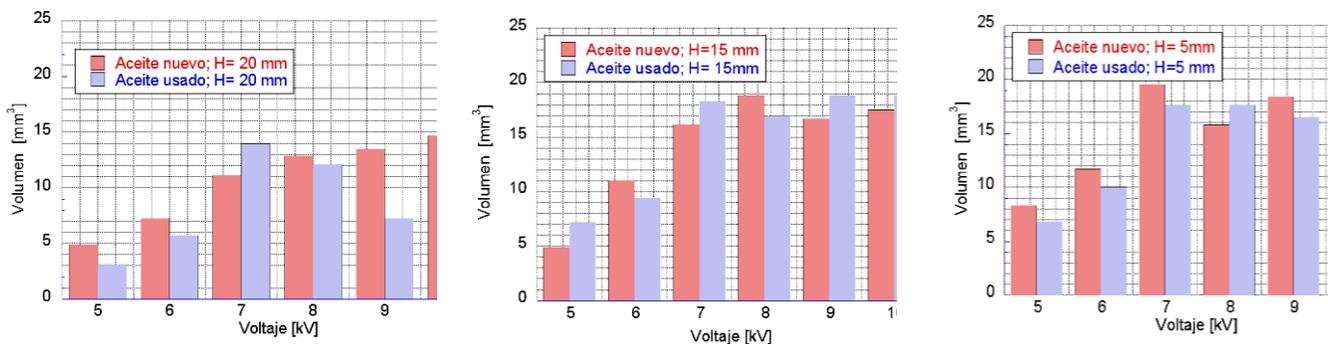


Figura 6.- Valores de caracterización del cono de aceite en el efecto Sumoto.

4. Conclusiones

El efecto Sumoto en un fenómeno multiparamétrico, inducido por fuerzas de Coulomb asociada a fuerzas dieléctricas. La fuerza de Coulomb ocurre por polarización de cargas del fluido alrededor de los electrodos y la fuerza dieléctrica aparece por el cambio de permitividad entre el fluido y el aire. Del análisis de resultados de caracterización eléctrica resalta lo siguiente:

Al emplear aceite usado, las corrientes de descargas son mayor en comparación con las pruebas que emplean aceite nuevo. Dependiendo del número de veces que se reutilice el aceite en las pruebas, la corriente mostrará un aumento en su magnitud, debido a cargas de polarización acumuladas en el líquido.

A menor altura de un aceite limpio, la inyección del efecto Sumoto aparece con menor tensión aplicada, comparado con el resto de las pruebas que tuvieron una altura superior. Esto indica que el aceite limpio, sin cargas de polarización inicial, deberá adquirir un valor mínimo de carga, que corresponderá a una tensión (campo) mayor, para provocar la aparición del Efecto Sumoto.

El incremento del volumen de líquido adherido al electrodo depende del número de veces que se emplea en un mismo aceite. Es decir, existe un efecto de la pureza del líquido.

5. Referencias

1. Bartnikas, R. (2002). Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. N/A. Art. #9(5), 763-808. doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663. Consultado en octubre de 2019.
2. Guastavino, F., Torello, E., Ratto, A., Dardano, A., Secci, M., Ferraro, F., & Pistone, D. (2012, September). Diagnosis of common defects inside cast Resin current transformers by digital partial discharges acquisition. In *2012 XXth International Conference on Electrical Machines* (pp. 1647-1652). IEEE. doi: 10.1109/ICEIMach.2012.6350101
3. Yadav, R., Kumar, S., Venkatasami, A., Lobo, A. M., & Wagle, A. M. (2008, April). Condition based maintenance of power transformer: A case study. In *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis* (pp. 502-504). IEEE. doi: 10.1109/CMD.2008.4580335
4. Korolev, A. (2018). Instability of Dielectric Liquid Surface under the Action of HV Corona Discharge Pulses. *Open Access Library Journal*, Vol. N/A. Art #5(01), 1. doi: 10.4236/oalib.1104269. Consultado en Octubre de 2019
5. Mahmoudi, S. R., Adamiak, K., & Castle, G. P. (2011). Spreading of a dielectric droplet through an interfacial electric pressure. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467(2135), 3257-3271. doi:10.1098/rspa.2011.0220
6. Tsuruta, T., Tsukahara, S., & Fujiwara, T. (2008). Microscopic measurements of deformation of liquid surfaces induced by localized direct current electric field. *J-STAGE Analytical Sciences [online]*, Vol. N/A. Art. # 24(1), 121-126. <https://doi.org/10.2116/analsci.24.121>. Consultado en octubre 2019.
7. Kochurin, E. A., & Zubarev, N. M. (2018). Gravity-capillary waves on the free surface of a liquid dielectric in a tangential electric field. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(5), 1723-1730. doi: 10.1109/TDEI.2018.007091
8. Gashkov, M. A., Zubarev, N. M., & Kochurin, E. A. (2015). Nonlinear waves on the free surface of a dielectric liquid in an oblique electric field. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. Vol. N/A. Art # 121(3), 553-558. doi: <https://doi.org/10.1134/S1063776115100064>. Consultado en octubre 2019.
9. Ten Have, E. S., & Vdovin, G. (2012). Novel method for measuring surface tension. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. N/A. Art. # 173(1), 90-96. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.10.021>. Consultado en octubre de 2019.

10. Sato, M., Kudo, N., & Saito, N. (1998). Surface tension reduction of liquid by applied electric field using vibrating jet method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. N/A. Art #34(2), 294-300. doi: 10.1109/IAS.1996.559306. Consultado en octubre de 2019.
11. Watanabe, A. (1973). Investigations of some electric force effects in dielectric liquid. *Japanese Journal of Applied Physics*, 12(4), 593.
12. Sumoto, I. (1956). Climbing of liquid dielectrics up along electrode. *Oyo Butsuri*, 25, 264-265.
13. Pickard, W. F. (1961). Experimental investigation of the Sumoto effect. *Journal of Applied Physics*, Vol. N/A. Art# 32(10), 1888-1893. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1728258>. Consultado en octubre de 2019.
14. Pickard, W. F. (1962). An explanation of the dc Sumoto effect. *Journal of Applied Physics*, Vol. N/A. Art #33(3), 941-942. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1777194>. Consultado en octubre 2019.
15. Pérez, A. T. (1997). Rose-window instability in low conducting liquids. *Journal of Electrostatics*, Vol. N/A. Art #40, 141-146. doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(97\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00028-4). Consultado en octubre de 2019.
16. Mori, K., Yamamoto, H., Takemura, K., Yokota, S., & Edamura, K. (2011). Dominant factors inducing electro-conjugate fluid flow. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. N/A. Art#167(1), 84-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.01.009>. Consultado en octubre de 2019.