

Revista Electrónica Nova Scientia

Contribución de la humedad a la formación y transporte de carga de espacio en LDPE mediante la técnica del Pulso Electroacústico Humidity contribution to formation and transport of space charge in LDPE using the Electroacoustic Pulse technique

**Idalberto Tamayo Ávila¹, José Manuel Nieto Jalil², Jorge
Viteri Moya¹, Gloria Maria Eloisa Roldan Reascos¹ y Ana
Violeta Argüello Mejía¹**

¹ Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Tecnológica Equinoccial,
Campus Occidental Quito

² Departamento de Mecatrónica, Instituto Tecnológico y de Estudios Superior de
Monterrey, Campus Sonora Norte

México- Ecuador

José Manuel Nieto Jalil. Dirección postal. E-mail: jnietoj@itesm.mx

Resumen

En este trabajo se obtuvieron resultados que evidencian la formación de carga de espacio en polietileno de baja densidad, LDPE, causados por la absorción de humedad. Se demostró que mientras mayor es el tiempo de exposición de las muestras a la atmósfera húmeda de vapor de agua, crece la carga acumulada en las interfaces y en el volumen del polietileno. También se pudo observar que la humedad facilita el proceso de conducción de paquetes de carga a través de los films de polietileno, empleando menos tiempo en muestras humedecidas que en las que no se humedecieron. La humedad absorbida por el LDPE contribuye a que existan mayor cantidad de centros de atrapamiento para la carga inyectada desde los electrodos y al aporte de carga volumétrica por ionización debido al efecto de campos eléctricos elevados.

Palabras clave: Carga de espacio, humedad, polietileno de baja densidad pulso electroacústico.

Recepción: 31-10-2014

Aceptación: 22-05-2015

Abstract

In this work results that demonstrate the formation of space charge in low density polyethylene, LDPE, caused by humidity absorption are obtained. It was shown that at higher exposure times of the samples to humidity, increases the charge accumulated at the interfaces and volume of polyethylene. It was also observed that humidity facilitates the process of conduction charge packets through the polyethylene films, spending less time in wet samples in which no watered. The humidity absorbed by the LDPE helps to exist as many trapping centers for charge injected from the electrodes and the contribution of bulk charge due to ionization effect of high electric fields.

Keywords: Space charge, humidity, Low density polyethylene, Electroacoustic pulsed

Introducción

El Polietileno de baja densidad (PEBD) o LDPE (por sus siglas en inglés, *Low Density Polyethylene*), es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno. Es de la familia de los polímeros olefínicos. Su densidad está comprendida entre $0.910 - 0.925 \text{ g / cm}^3$, es incoloro, inodoro y no tóxico. Entre sus propiedades más importantes podemos señalar su alta resistencia al impacto; se puede procesar por los métodos de conformado empleados para los termoplásticos, tales como extrusión e inyección y es de bajo coste; es más flexible que el polietileno de alta densidad, impermeable, inerte (al contenido), tenaz (incluso a temperaturas bajas); con poca estabilidad dimensional, es excelente aislante eléctrico, débil resistencia a las temperaturas; alta resistencia química pero propenso al agrietamiento bajo carga ambiental, baja resistencia a los rayos ultravioleta (UV); etc. Todos los objetos fabricados con LDPE, se identifican, en el sistema de identificación SPI (Society of the Plastics Industry) con el símbolo siguiente (figura 1):



Figura 1: Sistema de identificación SPI (Society of the Plastics Industry)

Actualmente hacemos uso cotidiano de sistemas eléctricos de forma directa (electrodomésticos, herramientas, etc), o de forma indirecta (transformadores de potencia, generadores, líneas eléctricas de transporte o distribución. La seguridad de los mismos depende de forma importante de los sistemas de aislamiento y su tiempo de servicio depende en buena medida de la vida útil de sus aislamientos.

Los aislamientos eléctricos tienen la función de impedir el transporte de corriente eléctrica entre elementos sometidos a grandes diferencias de potencial. Es por ello que actualmente existe un gran interés por estudiar las causas que provocan la formación de carga de espacio en materiales aislantes puesto que su reducción contribuye a frenar el proceso de ruptura dieléctrica de estos materiales y así lograr que se obtengan materiales con altos potenciales de ruptura, largos tiempos de vida útil y con mejores prestaciones en sus aplicaciones tanto en la electricidad como en la electrónica.

Una de las aplicaciones donde se necesita reducir la presencia de la carga de espacio es el caso del aislamiento de polietileno reticulado XLPE que se usa en los cables de media tensión (*figura 2*). El polietileno de baja densidad LDPE es utilizado como polietileno base para obtener el XLPE en estos cables; que están expuestos a la humedad tanto durante el proceso de extrusión del aislamiento como durante su funcionamiento.

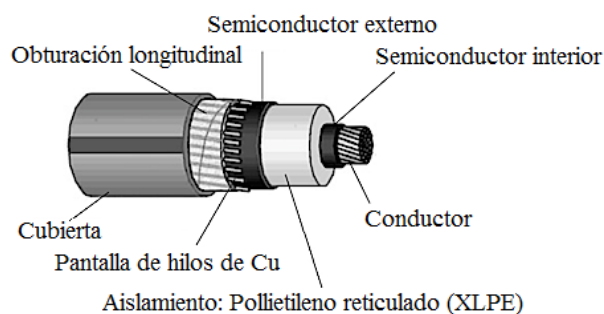


Figura 2. Elementos que componen los cables de media tensión

Es conocido que en el polietileno sometido a altos campos eléctricos se propagan paquetes de carga de espacio a través del volumen del material (Dissado, 2010), y que el campo eléctrico umbral para su aparición ha sido ubicado alrededor de unos $55kV/mm$ en muestras de LDPE sin tratamiento alguno (Matsui et al, 2003). Por otra parte, existen modelos que explican cómo se propagan estos paquetes en polímeros (Daomin et al, 2013) (Chouikhi et al, 2013). Para disminuir los paquetes de carga de espacio a través del volumen del material se han añadido nanopartículas dieléctricas al polietileno (Ohki, et al, 2009). Otros trabajos han tenido en cuenta las condiciones de preparación de las muestras ya que también la morfología influye sobre la formación de estos paquetes (Yuanxiang, et al, 2009). En otro orden de cosas; el envejecimiento térmico y la penetración de humedad como subproducto contaminante en un aislante favorecen la aparición prematura de la carga espacial sometido a cierto nivel de tensión (Aragoneses. et al, 2013); en ese trabajo se extrajo parte de la humedad propia de las muestras de LDPE haciendo vacío en una campana a presiones negativas; las muestras fueron medidas mediante la técnica del pulso electroacústico y efectivamente se reducía la carga de espacio en el volumen del aislante. Por todo lo anterior, nos propusimos verificar si la humedad absorbida contribuye a la formación de carga de espacio y si afectaba el campo umbral de aparición de los paquetes de carga.

La técnica del Pulso Electroacústico

Mediante el uso de técnicas de medida ópticas, acústicas y térmicas que han sido desarrolladas en las últimas décadas; se pueden llevar a cabo medidas que representen la evolución de la carga espacial, el campo eléctrico y la distribución de potencial en materiales aislantes. Entre las técnicas que se usan actualmente para medir la carga de espacio se encuentra la técnica del Pulso Electroacústico (PEA) que permite detectar la cantidad de carga y su distribución espacial en el material estudiado. La técnica PEA nace en la década de los ochenta, cuando los doctores Takada, Maeno (Japón) y Cooke (E.E.U.U.) investigan para desarrollar una técnica que permita describir el campo eléctrico en la interfaz entre un electrodo y un dieléctrico utilizando técnicas electroacústicas (Maeno, et al). En nuestro trabajo utilizamos una instalación experimental PEA en el laboratorio DILAB de la Universidad Politécnica de Catalunya (*figura 3*). Con esta instalación se puede medir carga en muestras planas de hasta $0.5mm$ de espesor y en muestras cilíndricas de cables de hasta $50mm$ de diámetro.

El equipo PEA de *TechImp Systems* consiste en aplicar a una muestra de ensayo una alta tensión con un generador que provoca un campo eléctrico en la muestra y permite polarizarla. Una serie de pulsos de baja tensión (hasta $500V$) de muy corta duración ($40ns$) son superpuestos sobre la alta tensión; cada pulso produce una fuerza eléctrica que provoca desplazamientos de las cargas y se generan ondas de presión acústicas en correspondencia con el nivel de carga de cada estrato del espesor de la muestra. La señal de presión resultante es detectada por un transductor piezoeléctrico, de tal manera que la distribución de carga en la muestra bajo prueba puede ser obtenida a través de la señal de salida del transductor. Esta señal de salida es enviada a un osciloscopio que configurado adecuadamente monitoriza periódicamente en pantalla la imagen del perfil de carga detectado.



Figura 3. Técnica PEA. (1) Fuentes de alimentación de alto voltaje modulares Spellman SL80PN10/10001 $0 - 80kV$ DC para polarización de las muestras; (2) Fuentes de alimentación de alto voltaje modulares Spellman SL6PN600/10007 $0 - 5kV$ DC para el generador de pulsos; (3) Osciloscopio digital Tektronix TDS 5032; (4) Célula de medidas para muestras planas; (5) Célula de medidas para cables.

Modelo de inyección de carga

En el tipo de experimentos que planeamos en este trabajo es muy común encontrarse con la inyección de carga eléctrica desde los electrodos por efecto del campo eléctrico y la temperatura conocida como inyección termoiónica tipo Schottky (Daomin, et al 2010). La corriente depende de la cantidad de carga atrapada que se libera y contribuye a la conducción. El mecanismo viene dado por las ecuaciones:

$$j_{Se(0,t)} = Q_s(t) v_{ATE} e^{\left(\frac{E_{ST}}{K_B T}\right)} \quad (1)$$

$$j_{in(L,t)} = AT^2 e^{\left(\frac{E_{in} - \sqrt{\frac{q_e F(L,t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}}{K_B T}\right)} \quad (2)$$

Aquí; $j_{Se(0,t)}$, es la densidad superficial de electrones inyectados al volumen del aislante en Am^{-2} ; $Q_s(t)$ es la densidad superficial de carga en Cm^{-2} , v_{ATE} es la frecuencia de escape en s^{-1} ; E_{ST} es la energía de atrapamiento en la superficie en eV ; K_B , es la constante de Boltzmann y T la temperatura absoluta. La frecuencia de escape esta dada por la siguiente ecuación donde h_p es la constante de Planck:

$$v_{ATE} = \frac{K_B T}{h_p}$$

Por otra parte $j_{in(L,t)}$ es la densidad de corriente termoiónica tipo Schottky en Am^{-2} ; A es la constante de Richardson; E_{in} es la barrera de potencial de contacto entre el electrodo y el aislante; q_e es la carga eléctrica elemental en C ; $F(L,t)$ es el campo eléctrico; ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío y ϵ_r es la permitividad relativa del aislante, $\epsilon_r = 2,3$ en el LDPE.

Modelos de transporte de carga

Las cargas en el material dieléctrico se rigen por un conjunto de ecuaciones consistentes:

Ecuaciones de avección–reacción de carga

$$\frac{\partial q_{free}(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial j_c(x,t)}{\partial x} = S_{free}(x,t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_{trap}(x,t)}{\partial t} = S_{trap}(x,t) \quad (4)$$

Ecuación de conducción

$$j_c(x,t) = q_{free}(x,t) \mu F(x,t) \quad (5)$$

Ecuación de Poisson

$$\frac{\partial^2 \phi(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{q_{free}(x,t) + q_{trap}(x,t)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (6)$$

Integración espacial del campo eléctrico

$$\phi_s(x,t) = \int_0^L F(x,t) dx \quad (7)$$

Donde $q_{free}(x,t)$ y $q_{trap}(x,t)$ son las densidades volumétricas de carga libre y atrapada en el dieléctrico respectivamente en $C m^{-3}$, j_c es la densidad de corriente de conducción en el material en Am^{-2} , μ es la movilidad de los portadores de carga transportada en $m^2 V^{-1} s^{-1}$, F es

el campo eléctrico en el material en Vm^{-1} , ϕ es el potencial en el material en V y $\phi_s(x, t)$ es el potencial de la carga superficial en el material.

Estas ecuaciones pueden resolverse por distintos métodos numéricos para obtener los parámetros correspondientes. Los valores de estos parámetros dependen de las condiciones del experimento que se realice y de las propiedades del material dieléctrico empleado. Se puede simular los procesos conductivos en materiales dieléctricos; no obstante a lo anterior, cuando se modelan estos procesos por diferentes métodos se obtienen distintos resultados (Daomin, et al 2010). En realidad es un proceso muy complejo que para modelarlo se necesitan de experimentos bien controlados para obtener efectos aislados y luego de la influencia combinada de los de factores que contribuyen a la conducción en el aislamiento.

En el trabajo que nos ocupa nos limitaremos a hacer un estudio fundamentalmente cualitativo que pueda contribuir a otros estudios más detallados. Resulta útil aclarar que mediante el uso de la técnica del pulso electroacústico sólo se pueden determinar: la distribución de carga de espacio en el volumen del material y en las interfaces, la densidad de carga volumétrica, la superficial y la distribución del campo eléctrico tanto en el volumen como en las interfaces. Se necesitarían experimentos en los que se determine la corriente de conducción para correlacionar los resultados y poder establecer un modelo específico.

Experimental

Para el estudio del efecto de la humedad fueron utilizadas películas de LDPE de $150\mu m$ de espesor tal como se muestra en la *figura 4*; las mismas fueron expuestas durante un tiempo de hasta 12 horas a una atmósfera de vapor de agua en una campana de vacío.

Cada muestra se midió en la célula de medidas PEA durante un tiempo de 1 hora; registrándose el perfil de carga acumulada cada 5s para un campo eléctrico fijo de $60kV/mm$; en total se obtuvieron 720 perfiles en cada una de las muestras. Utilizamos pulsos de $450V$ de amplitud y período de $40ns$; la calidad de las medidas fue muy buena, el ruido es prácticamente nulo y son reproducibles; debido a ello graficamos el último perfil correspondiente al registro número 720 al cabo de una hora.



Figura 4. Muestras de Polietileno de baja densidad LDPE.

Con el objetivo de comprobar si la absorción de humedad afecta la aparición del campo umbral para la formación de los paquetes de carga y su propagación a través de las muestras de $150\mu m$ de espesor; se efectuaron medidas de distribución de carga en muestras sin humedecer y humedecidas durante 12 horas. Se usaron diferentes campos polarizadores de: 65; 70; 75 y $80 kV/mm$ respectivamente. Debido a que estos campos eléctricos están por encima del umbral y, a que se propagan los paquetes de carga; los tiempos de adquisición total fueron menores, de unos 800s como máximo, obteniéndose 160 perfiles uno cada 5s, pero graficamos el perfil obtenido cada 50s para visualizar mejor la propagación de los paquetes.

El humedecimiento de las muestras se hizo exponiéndolas a una atmósfera de vapor de agua en una campana de vacío a presión y temperatura controlada de manera que las muestras no se afectaran por el efecto de la temperatura del vapor. No medimos el porcentaje de humedad absorbido, sino que expresamos los resultados en función del tiempo de exposición de las muestras.

El trabajo se previó de manera que no se pretendía hacer estudios teóricos profundos si no más bien en el orden cualitativo de manera que pueda ser punto de partida para trabajos más detallados y precisos sobre la modelación de procesos de conducción en LDPE.

Resultados experimentales

Medidas PEA a $60 \frac{kV}{mm}$ en muestras humedecidas desde 2 hasta 12 horas en vapor de agua.

En la *figura 5* en tres dimensiones se muestran los perfiles de carga para seis muestras que previamente fueron humedecidas en vapor de agua; los tiempos de humedecimiento fueron de: 2, 4, 6, 8, 10 y 12 horas. El eje *X* se corresponde con el tiempo de humedecimiento; el eje *Y* con el espesor de las muestras y el eje *Z* con la densidad volumétrica de carga de espacio. Con la letras *K* y *A* denotamos el cátodo y ánodo respectivamente; correspondientes a los electrodos con polaridad negativa y positiva durante la aplicación del campo eléctrico; mientras que *P1* y *P2* son los perfiles de carga formados en el volumen del LDPE. Puede observarse, claramente, que mientras mayor es el tiempo de exposición a la humedad crece la carga acumulada siendo más notable cerca del cátodo *K* y en el perfil *P1*; también hay una tendencia al crecimiento de carga dentro del material en el perfil *P2* y en el ánodo *A*. Los valores máximos de las densidades de carga se resumen en la *tabla 1*. No se detectó la propagación de paquetes de carga de espacio por efecto de la humedad a 60 kV/mm .

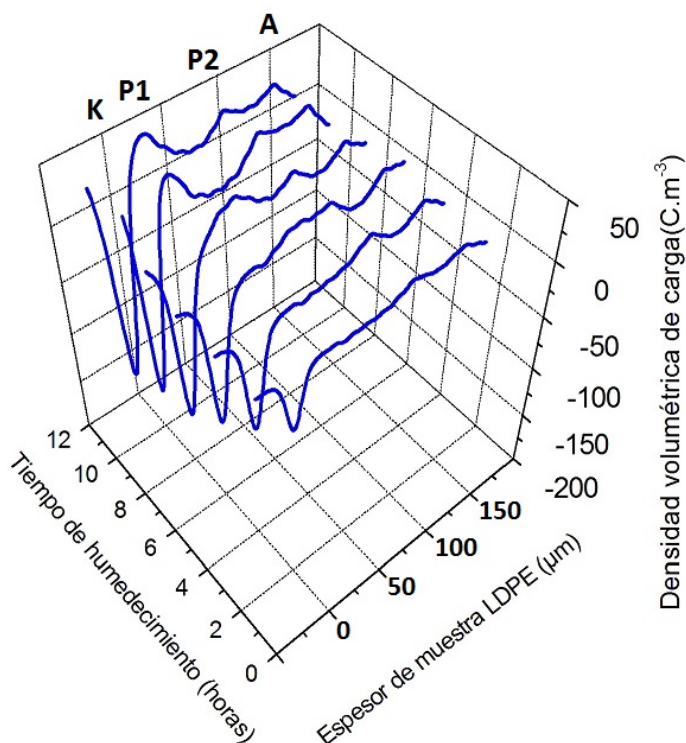


Figura 5. PEA a $60 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ en muestras humedecidas hasta 10 horas en vapor de agua

Tiempo de humedecimiento (horas)	Densidad de carga cátodo K (C/m ³)	Densidad de Carga P1 (C/m ³)	Densidad de Carga P2 (C/m ³)	Densidad de Carga ánodo A (C/m ³)
2	-49.72	1.56	11.57	11.57
4	-87.60	3.79	19.97	19.97
6	-119.27	16.49	18.60	18.60
8	-149.44	24.57	17.39	17.39
10	-160.29	29.65	24.16	24.16
12	-177.93	33.50	19.43	19.43

Tabla 1. Densidades volumétricas de carga de los perfiles A, P1, P2 y K

El aumento de la carga negativa en el cátodo con el tiempo de humedecimiento ha sido ajustado a una dependencia exponencial (*figura 6*) con coeficiente de correlación $R = 0.99683$ y del tipo:

$$\rho(t) = \rho_0 + C e^{-\left(\frac{t}{k}\right)}$$

Se determinaron los parámetros del ajuste así como los errores, los mismos se muestran en la *tabla 2*. A continuación damos una interpretación sobre el significado de dichos parámetros.

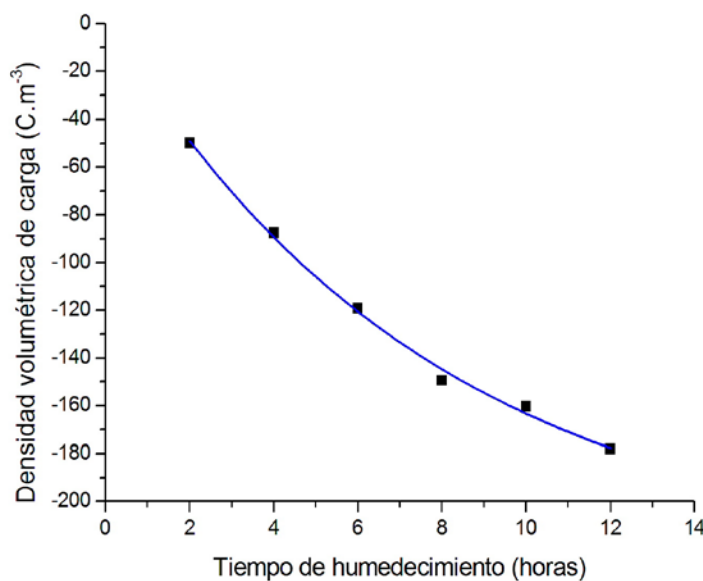


Figura 6. Ajuste de la densidad de carga en el cátodo con el tiempo de humedecimiento.

Parámetro	Valor (C.m ⁻³)	Error (C.m ⁻³)
ρ_0	-226	18
C	230	13
k	7.7	1.4

Tabla 2. Parámetros del ajuste densidad de carga en el cátodo vs tiempo de humedad

El valor de $\rho_0 = -226 \pm 18 \text{ Cm}^{-3}$ puede interpretarse como la máxima carga negativa que se acumularía en el cátodo en condiciones de saturación para un tiempo de humedecimiento grande. Los errores en la determinación de los parámetros son relativamente elevados como para interpretar con precisión los parámetros C y k que tienen unidades de densidad volumétrica de carga y tiempo respectivamente.

El aumento de carga positiva en el perfil PI se ha podido ajustar también a una función exponencial a partir de un tiempo de 4 horas (*figura 7*), el coeficiente de correlación es $R = 0.8662$. En este caso también se puede determinar la máxima densidad de carga acumulada para un tiempo de humedecimiento grande $\rho_0 = 33.5 \text{ Cm}^{-3}$; el error calculado mediante el método de ajuste da un valor cero lo cual no tiene sentido físicamente, pero nótese el comportamiento asintótico al que tiende la curva (*figura 7*), el último punto graficado está muy por encima de la curva de ajuste, su valor puede interpretarse como la máxima densidad de carga acumulada en condiciones de saturación por efecto de la absorción de la humedad; entonces el error en la predicción de que este valor sería el máximo el programa de ajuste lo ha interpretado como que es cero (*tabla 3*).

El error en la determinación del parámetro C es bastante grande de un 13 Cm^{-3} lo cual imposibilita que la interpretación de otros parámetros no pueda hacerse con precisión.

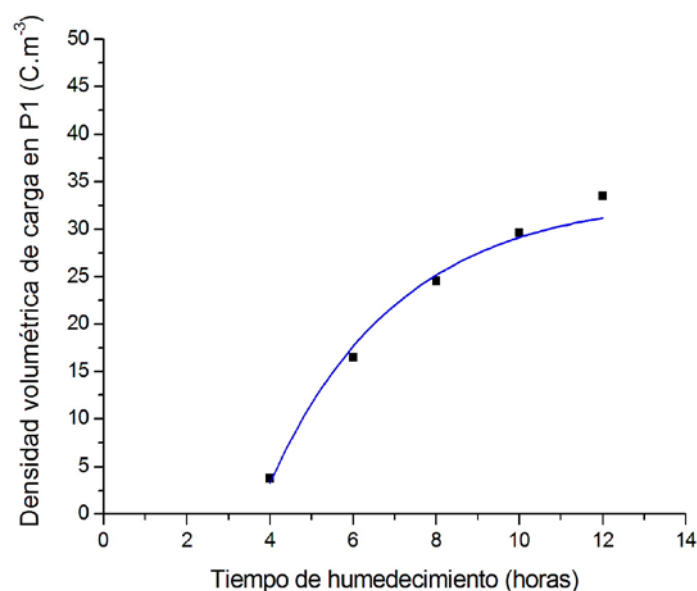


Figura 7. Ajuste de la densidad de carga en el perfil P1 con el tiempo de humedecimiento.

Parámetro	Valor	Error
ρ_0	33.5	0
C	-109.6	17
k	3.1	0.3

Tabla 3. Parámetros del ajuste densidad de carga en el cátodo vs tiempo de humedad

En los perfiles P1 y P2 y en el ánodo hay una tendencia al aumento de la carga pero fluctúan los valores, lo que hace más difícil el ajuste a las funciones del tipo anterior u otra, así como su posterior interpretación.

Consideramos que la humedad absorbida crea defectos en el LDPE que actúan como centros de atrapamiento para la carga inyectada desde los electrodos por emisión termoiónica tipo Schottky (Daomin, et al, 2013). Lo anterior, justifica el aumento de la carga acumulada en cátodo con el tiempo de humedecimiento de las muestras. La absorción de humedad puede contribuir también a que aparezcan cargas eléctricas por ionización a campos eléctricos elevados. Estos dos factores aportan a la formación de carga en el volumen del LDPE. El aumento de la carga negativa en el cátodo posibilita el incremento del campo eléctrico en la interface electrodo-LDPE contribuyendo a que se acumule más carga positiva en el perfil *P1* cerca del cátodo.

Observando, en la *tabla 1*, los valores de las densidades de carga en el cátodo y comparándolos con las del ánodo podemos considerar que la inyección y atrapamiento de carga negativa es más fuerte que la de carga positiva (*figura 5*). Por este motivo, la humedad no propició que se formaran paquetes de carga en el ánodo para un campo eléctrico de 60kV/mm .

Medidas PEA a $65 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ en muestras sin humedecer y humedecidas 12 horas en vapor de agua.

Comparando las figuras 8 y 9, vemos como se forma un ligero paquete de carga que se desplaza desde el electrodo positivo hacia el negativo atravesando las muestras de $150\mu\text{m}$ de espesor. La influencia de la humedad provoca que el tiempo que demora un paquete de carga de espacio en atravesar la muestra sea la mitad (400s) con respecto a la muestra que no está humedecida que es de unos 800s .

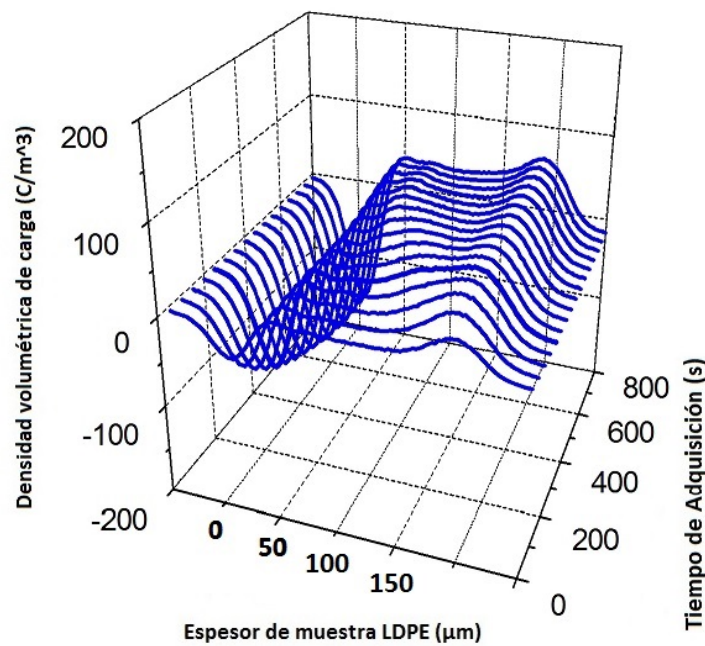


Figura 8: Medidas PEA a $65 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ en muestras de LDPE sin humedecer

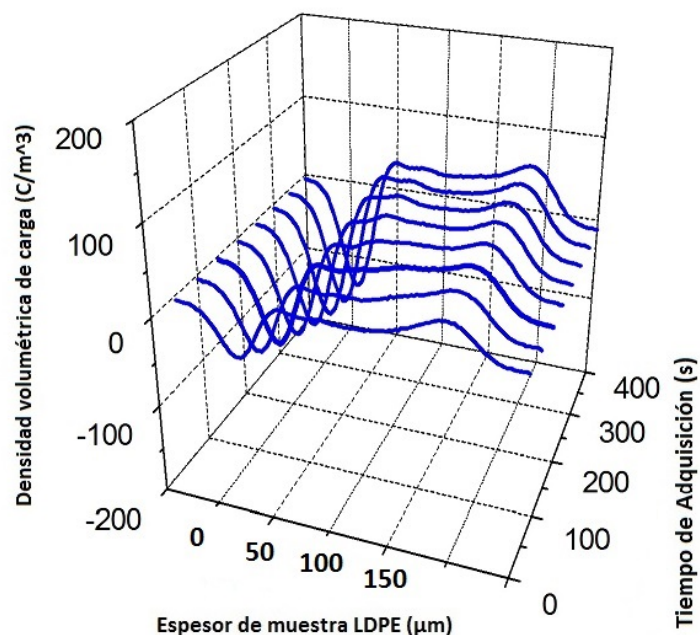


Figura 9. Medidas PEA $65 \frac{kV}{mm}$ en muestras de LDPE humedecidas

PEA a $70 \frac{kV}{mm}$ en muestras sin humedecer y humedecidas 12 horas en vapor de agua.

Al aumentar el campo polarizador hasta $70kV/mm$ vemos que aumenta ligeramente la carga que se forma y que además un paquete de carga demora menos tiempo en atravesar la muestra. En el caso de la muestra humedecida el tiempo es de $300s$ mientras que en la no humedecida es de $600s$ tal como se muestran en las figuras 10 y 11.

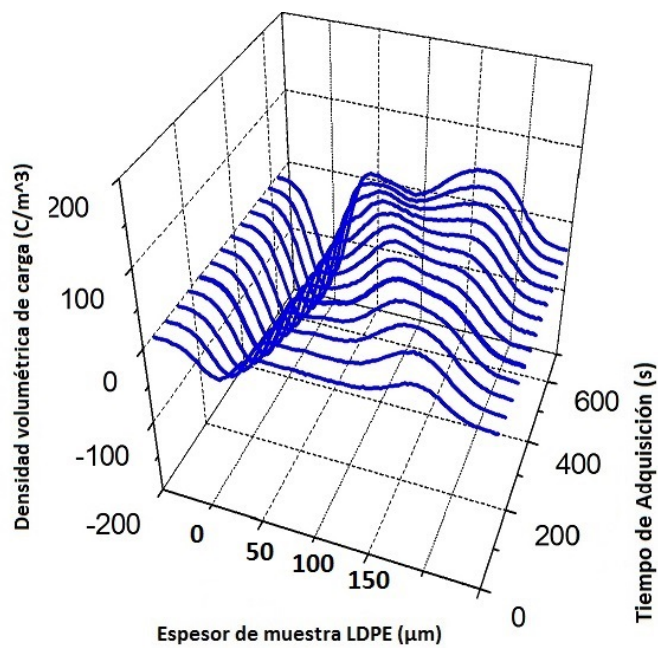


Figura 10: Medidas PEA a $70 \frac{kV}{mm}$ en muestras de LDPE sin humedecer

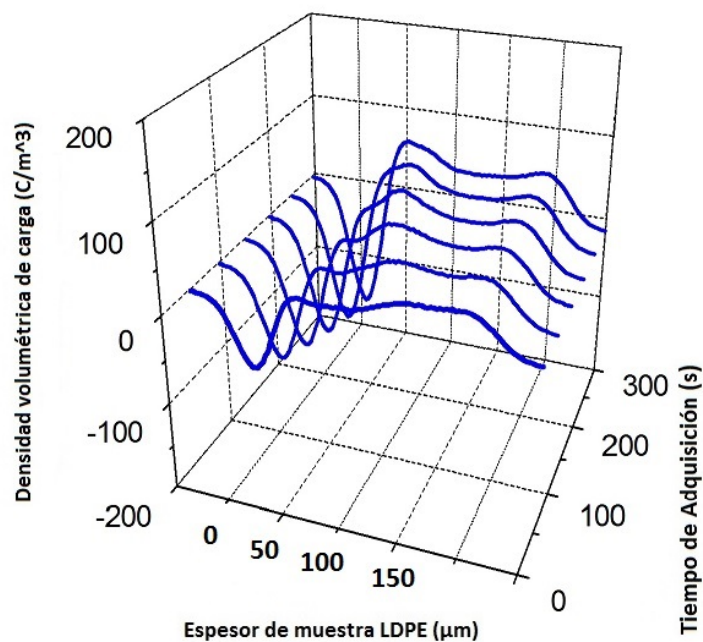


Figura 11: Medidas PEA a $70 \frac{kV}{mm}$ en muestras de LDPE humedecidas

Medidas PEA a $75 \frac{kV}{mm}$ en muestras sin humedecer y humedecidas 12 horas en vapor de agua.

Al aplicarse un campo de 75kV/mm aumenta significativamente la carga transportada; sin embargo el paquete de carga demora más tiempo en atravesar la muestra; unos 1200s en el caso de la muestra sin humedecer y unos 1000s en el caso de la muestra humedecida (figuras 12 y 13).

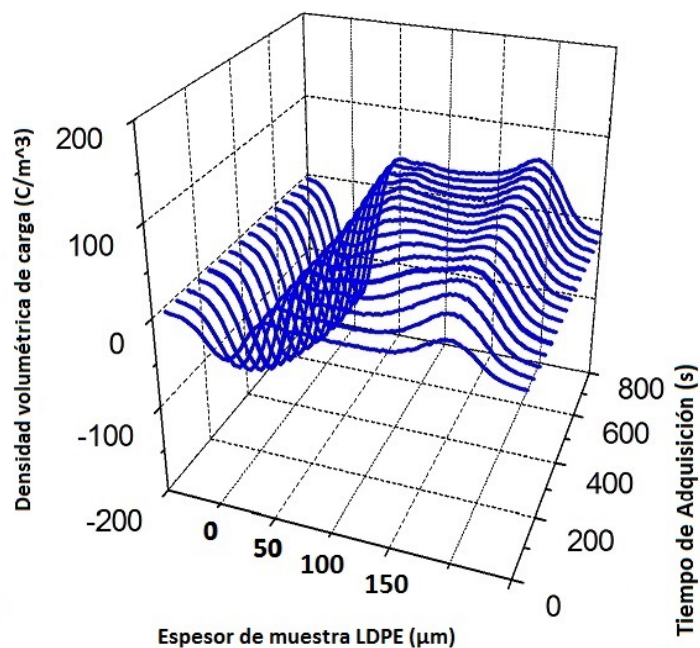


Figura 12: Medidas PEA a $75 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ en muestras de LDPE sin humedecer

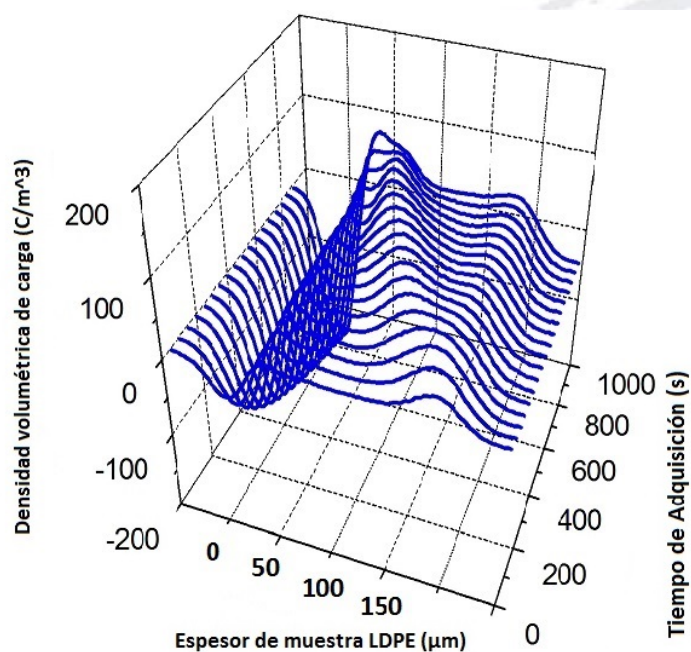


Figura 13. Medidas PEA a $75 \frac{kV}{mm}$ en muestras de LDPE sin humedecer

Medidas PEA a $80 \frac{kV}{mm}$ en muestras sin humedecer y humedecidas 12 horas en vapor de agua.

Cuando se aplicó un campo de $80kV/mm$ sigue aumentando significativamente la carga transportada; el tiempo que demora en atravesar la muestra sin humedecer es de unos $1600s$ y en la humedecida notamos como el efecto de aumentar el campo ha provocado que se trasporte más de un paquete de carga en el mismo tiempo de adquisición. Tal comportamiento se puede observar en las *figuras 14 y 15*.

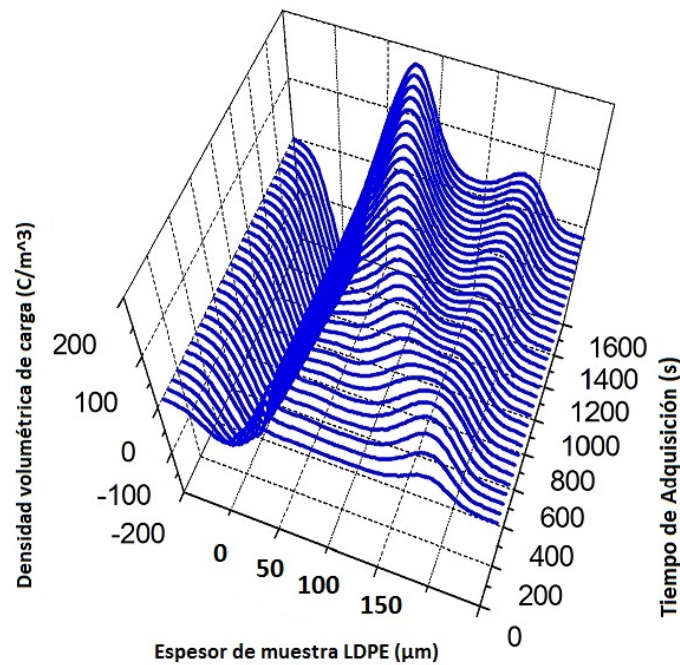


Figura 14: Medidas PEA a $80 \frac{kV}{mm}$ en muestras de LDPE sin humedecer

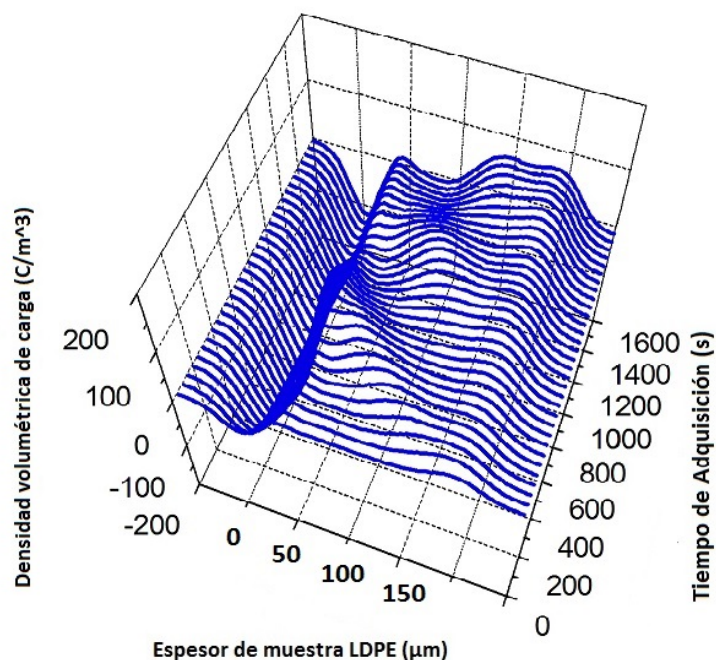


Figura 15 Medidas PEA a $80 \frac{kV}{mm}$ en muestras de LDPE humedecidas

En la *tabla 4* se muestran los tiempos que demora un paquete de carga en atravesar las muestras húmedecidas y no humedecidas; queda claro que para todos los campos aplicados la humedad provoca que el paquete de carga se propague con mayor velocidad empleando menos tiempo que en las no húmedas. El aumento del campo desde 65 a $70 kV/mm$ da lugar a que el paquete se propague más rápido en ambas muestras; nótese que emplea la mitad del tiempo por efecto de la humedad. Sin embargo para campos más grandes, como de 75 y $80 kV/mm$, comienza a aumentar el tiempo de propagación tanto en las muestras sin humedecer como en las humedecidas cuando quizás debería esperarse que el tiempo de propagación continuara disminuyendo.

Potencial Eléctrico (kV)	No humeda Tiempo (s)	Humeda Tiempo (s)
65	800	400
70	600	300
75	1200	1000
80	1600	800

Tabla 4. Tiempos de propagación para diferentes campos eléctricos

En la *tabla 5* se dan los valores de la máxima densidad volumétrica de carga transportada en cada caso. Mostramos las densidades de carga en el cátodo *K*, la máxima del paquete y la del ánodo *A* para cada uno de los campos aplicados en las muestras sin humedecer y humedecidas.

Campo Eléctrico (kV/mm)	Perfiles de Carga	No humeda Densidad (C/m ³)	Humeda Densidad (C/m ³)
65	K	-132.37	-139.47
	P	34.62	33.23
	A	62.20	53.56
70	K	-152.89	-163.44
	P	38.58	59.48
	A	61.92	44.19
75	K	-193.3	-211.50
	P	103.36	92.48
	A	43.53	49.17
80	K	-235.81	-160.53
	P	169.97	58.41
	A	57.95	57.56

Tabla 5. Densidades de carga en cátodo K, perfil P y ánodo A para diferentes campos.

Nótese que al aumentar el campo de 70 a 75 kV/mm hay un aumento considerable de la densidad de carga transportada por el paquete *P*; desde 38.58 hasta 103.36 C/m^{-3} y llega a ser 169.97 C/m^{-3} si se aplica 80 kV/mm . Algo parecido ocurre en las muestras humedecidas que aumenta desde 59.48 hasta 92.48 C/m^{-3} . Lo anterior parece indicar que mientras mayor es la densidad de carga transportada más difícil se le hace al paquete propagarse por el LDPE. En esto puede influir la morfología del LDPE y la frecuencia en que se produce el atrapamiento y liberación de las cargas en los mecanismos de conducción resumidos en las ecuaciones de los modelos de atrapamiento y conducción al principio de este trabajo.

La tendencia del aumento de la densidad de carga en el cátodo y en el ánodo con el campo es notable en ambos tipos de muestras, al igual que el máximo de carga transportada; sin embargo, para la muestra humedecida y con un campo de 80 kV/mm esta tendencia deja de cumplirse; pero nótese en la *figura 15* que se propagan un mayor número de paquetes en el mismo tiempo de adquisición y es de destacar que el primer paquete de menor densidad 58.41 C/m^{-3} vuelve a disminuir su tiempo de propagación a unos 800 s lo cual refuerza la

hipótesis de que un paquete de menor densidad atraviesa la muestra con mayor facilidad que uno de densidad mayor.

Conclusiones

El tiempo de exposición a la humedad de las muestras de LDPE provoca un incremento de la cantidad de carga acumulada tanto en las interfaces electrodo-LDPE como en el volumen de las muestras estudiadas. La humedad provoca que los paquetes de carga de espacio se propaguen con más velocidad por el volumen de las muestras de polietileno.

La absorción de humedad por el LDPE contribuye a que se atrape más carga negativa inyectada en la superficie del LDPE que forma la interface con el cátodo si la comparamos con la interface que forma el LPPE con el ánodo. Por el motivo anterior la humedad no propicia la disminución del campo umbral para la aparición de los paquetes de carga que se forman en el ánodo. En este trabajo, el campo umbral en las muestras estudiadas lo situamos alrededor de los 65kV/mm .

Cuando la densidad de carga transportada alcanza un valor considerable por efecto de campos altos; entonces los paquetes de carga pueden demorar más tiempo en atravesar la muestra, esto puede estar relacionado con la morfología del LDPE y la forma en que se producen el atrapamiento y detrapamiento de carga según los mecanismos de conducción.

Un campo elevado por encima del campo umbral, combinado con la humedad, provoca un mayor número de paquetes de carga contribuyendo a la conducción a través del aislante.

Se necesita un estudio sistemático y detallado para poder establecer un modelo que contemple la medición del porcentaje de humedad absorbido por las muestras y su efecto en la cantidad y velocidad de la carga transportada. De todas formas, lo anterior, se haría muy difícil por las irregularidades de los perfiles obtenidos; cuando se aplica un campo grande se establece una redistribución de carga donde el desprendimiento del paquete puede ser aleatorio.

Los resultados de este trabajo son útiles para tener en cuenta que la reducción de la humedad es un factor importante para disminuir la formación y propagación de carga en el

aislante y una de sus limitaciones es que no cuantificamos el porcentaje de humedad absorbido por las muestras, lo cual debería tenerse en cuenta para trabajos futuros.

Referencias

Aragoneses, A; Tamayo,I; Lebrato,A; Cañadas,J,C; Diego, J,A ; Arencon, D. “ Effect of humidity in charge formation and transport in LDPE”. Journal of Electrostatics. 71, (2013), 611-617.

Chouikhi, S; Boukhris, I; Belgaroui, E; Kallel, A. “Space charge packets in polyethylene nano-scales under dc applied voltage”. Journal of Electrostatics.71, (2013), 14-20.

Daomin, M; Shengtao, L. “A Comparison of Numerical Methods for Charge Transport Simulation in Insulation Materials”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 20, (2013), 955-960.

Dissado, L, A. “The origin and nature of charge packets: a short review”. 10 th IEEE International Conference on Solids Dielectrics (ISDC), (2010), 1-6.

Ohki,Y; Ishimoto,K; Kanegae,E; Tanaka, T; Sekiguchi,Y; Murata, Y; Reddy, C.C “Suppression of packet-like space charge formation in LDPE by the addition of magnesia nanofillers”. Properties and Applications of Dielectrics Materials, ICPADM (2009), 9-14.

Maeno, T; Kushibe, H; Takada K; Cooke, C, M. “Pulsed Electro-acoustic Method for the Measurements of Volume Charges in E-Beam Irradiated PMMA) ”Ann Report CEIDP (1995), 389-397.

Matsui, K; Tanaka, Y; Takada, T; Fukunaga, K; Maeno, T. “Space charge Behavior in LDPE films under 0,5-4.0 MV/cm Fields”.7th International Conference on Properties and Applications of Dielectrics Materials. (2003), 1-5.

Feihu, F; Zhang, Y; Gong B, L; Jianwei, Z; Changshun, W. “Formation and migration of space charge packet in low density polyethylene”. Science in China Ser: E Engineering. Materials Science.48, (2005), 354-360.

Yuanxiang, Z; Yunshan, W; Ninghua, W; Qinghua, S. “Effect of surface topography and morphology on space charge packets in polyethylene”. Journal of Physics: Conferences Series 183 (2009), 1-8.