

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIERREZ

INFORME TÉCNICO DE RESIDENCIA PROFESIONAL

INGENIERÍA MECÁNICA

DEPENDENCIA:

CENIDET

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

NOMBRE DEL PROYECTO:

“CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE ACTUADORES DE
POLÍMEROS ELECTROACTIVOS”

PRESENTADO POR:

OLEA GÓMEZ ROBERTO AHARÓN

ASESOR INTERNO:

M.C. ARRIOJA CÁRDENAS IGNACIO

ASESOR EXTERNO:

DR. ABUNDEZ PLIEGO ARTURO

PERÍODO DE REALIZACIÓN:

ENERO-JUNIO 2015

INDICE.

<i>Lista de Figuras</i>	I
<i>Lista de Tablas</i>	III

Capítulo 1 “Introducción”

<i>1.1. Justificación</i>	2
<i>1.2. Objetivo</i>	3
<i>1.3. Problemas a Resolver</i>	3

Capítulo 2 “Actuadores de Polímeros Electroactivos (EAPs)”

<i>2.1. Historia de los Polímeros Electroactivos</i>	4
<i>2.2. Clasificación de EAPs</i>	7
<i>2.2.1. EAPs Electrónicos</i>	13
<i>2.2.1.1. Polímeros Ferroeléctricos</i>	13
<i>2.2.1.2. Electretos</i>	13
<i>2.2.1.3. EAPs Dieléctricos</i>	14
<i>2.2.1.4. Injerto de Elastómeros Electrostrictivos</i>	16
<i>2.2.1.5. Papel Electrostrictivo</i>	17
<i>2.2.1.6. Elastómeros Electrovisco-Elásticos</i>	17
<i>2.2.1.7. Elastómeros de Cristales Líquidos (LCE)</i>	18
<i>2.2.2. EAPs Iónicos</i>	18
<i>2.2.2.1. Geles de Polímeros Iónicos</i>	18
<i>2.2.2.2. Materiales Compuestos de Metal-Polímero Ionomérico</i>	19
<i>2.2.2.3. Polímeros Conductivos</i>	20
<i>2.2.2.4. Nanotubos de Carbón</i>	21
<i>2.2.2.5. Fluidos Electrorreológicos</i>	21
<i>2.3. Fundamentos Básicos de los Elastómeros Dieléctricos EAP</i>	23
<i>2.4. Prototipos de Actuadores</i>	26
<i>2.5. Electrodo Basado en Carbón</i>	28
<i>2.5.1. Métodos de Aplicación del Electrodo</i>	31

Capítulo 3. “Construcción y Caracterización Mecánica de Actuadores de Polímeros Electroactivos”.

3.1. Construcción	34
3.1.1. Banco de Pruebas	34
3.1.2. Fuente de Alimentación	46
3.1.3. Elastómero Dieléctrico	47
3.2. Caracterización	49
Conclusiones	62
Referencias	66

LISTA DE FIGURAS.

<i>Figura 1</i>	4
<i>Figura 2</i>	15
<i>Figura 3</i>	16
<i>Figura 4</i>	17
<i>Figura 5</i>	19
<i>Figura 6</i>	19
<i>Figura 7</i>	20
<i>Figura 8</i>	22
<i>Figura 9</i>	23
<i>Figura 10</i>	25
<i>Figura 11</i>	25
<i>Figura 12</i>	27
<i>Figura 13</i>	28
<i>Figura 14</i>	29
<i>Figura 15</i>	32
<i>Figura 16</i>	35
<i>Figura 17</i>	35
<i>Figura 18</i>	35
<i>Figura 19</i>	36
<i>Figura 20</i>	36
<i>Figura 21</i>	37
<i>Figura 22</i>	37
<i>Figura 23</i>	38
<i>Figura 24</i>	38
<i>Figura 25</i>	39
<i>Figura 26</i>	39
<i>Figura 27</i>	40
<i>Figura 28</i>	40
<i>Figura 29</i>	41
<i>Figura 30</i>	41
<i>Figura 31</i>	42
<i>Figura 32</i>	43
<i>Figura 33</i>	43
<i>Figura 34</i>	43

<i>Figura 35</i>	44
<i>Figura 36</i>	44
<i>Figura 37</i>	45
<i>Figura 38</i>	45
<i>Figura 39</i>	46
<i>Figura 40</i>	47
<i>Figura 41</i>	48
<i>Figura 42</i>	49
<i>Figura 43</i>	50
<i>Figura 44</i>	50
<i>Figura 45</i>	51
<i>Figura 46</i>	52
<i>Figura 47</i>	52
<i>Figura 48</i>	53
<i>Figura 49</i>	54
<i>Figura 50</i>	55
<i>Figura 51</i>	56
<i>Figura 52</i>	56
<i>Figura 53</i>	57
<i>Figura 54</i>	58
<i>Figura 55</i>	59
<i>Figura 56</i>	59
<i>Figura 57</i>	60
<i>Figura 58</i>	60
<i>Figura 59</i>	61
<i>Figura 60</i>	61
<i>Figura 61</i>	62
<i>Figura 62</i>	64
<i>Figura 63</i>	64

LISTA DE TABLAS.

<i>Tabla 1</i>	2
<i>Tabla 2</i>	7
<i>Tabla 3</i>	8
<i>Tabla 4</i>	9
<i>Tabla 5</i>	10
<i>Tabla 6</i>	11
<i>Tabla 7</i>	12
<i>Tabla 8</i>	26
<i>Tabla 9</i>	47
<i>Tabla 10</i>	48
<i>Tabla 11</i>	49
<i>Tabla 12</i>	49
<i>Tabla 13</i>	54
<i>Tabla 14</i>	55
<i>Tabla 15</i>	57
<i>Tabla 16</i>	58

CAPITULO 1. INTRODUCCION.

La inspiración hacia la naturaleza y el avance científico han permitido que el hombre desarrolle constantemente tecnologías nuevas capaces de imitar las características mecánicas de los seres vivos, tal es el caso de los músculos, que es el generador de la fuerza motora de los animales. El músculo se contrae o se expande de acuerdo a pequeñas señales eléctricas que el cerebro le manda para definir el movimiento. Basándose en este principio es como los actuadores de polímeros electroactivos pueden llegar a realizar dicha caracterización mecánica de forma similar.

Este reporte habla del desarrollo del proyecto “Construcción y caracterización mecánica de actuadores de polímeros electroactivos” pero antes de profundizar este tema primero se debe tener en claro algunos conceptos básicos para el entendimiento de este contenido. Primeramente un actuador es un dispositivo que tiene como objetivo transformar la energía en un movimiento mecánico, dicho movimiento en este proyecto será en forma lineal. La energía mencionada anteriormente por lo regular se basa en hidráulica o neumática pero en este proyecto el movimiento del actuador será un polímero alimentado por corriente eléctrica.

Un polímero es un compuesto molecular que se distingue por tener una masa molar grande, que comprende desde miles a millones de gramos, y por estar formado de muchas unidades que se repiten. El desarrollo de la química en los polímeros empezó en la década de 1920 con la investigación del comportamiento desconcertante de ciertos materiales, incluidos: la madera, la gelatina, el algodón y el hule [Chang et. al., 2010].

En 1990 comenzaron los estudios hacia los polímeros electroactivos (EAPs) o también llamados “músculos artificiales”, nombre que se le dio debido a que se comportan de manera similar a los músculos naturales. Estos polímeros tienen características muy atractivas: son ligeros, baratos, tolerantes a la fractura y flexibles [Bar-Cohen, 2004].

Generalmente, EAPs pueden inducir deformaciones que son dos veces más altas que un cerámico electroactivo, además, el tiempo de respuesta de los EAP es menor que el de las aleaciones con memoria, en la tabla 1 que se muestra a continuación podemos apreciar la comparación cualitativa entre el músculo natural y los actuadores comerciales [Pelrine, 2002].

Actuador	Deformación	Presión de accionamiento	Densidad	Eficiencia	Velocidad (rápido y lento)
Músculo natural	●	●	●	●	●
Electromagnético	●	●	■	●	■
Piezoeléctrico	■	●	◆	●	●
Aleación con memoria de forma	◆	●	◆	■	■
Magnetoestrictivo	■	●	■	●	■
Electrostático	●	■	●	●	●
Elastómero Dieléctrico	●	●	●	●	●
<p>● = Alta ◆ = Media ■ = Baja</p>					

Tabla 1. Comparación del músculo natural con tecnologías de actuadores artificiales [Pelrine, 2002].

Se observa en la tabla 1, que el elastómero dieléctrico es el tipo de actuador que se pone a la altura del musculo natural en cuestión del rendimiento, por lo tanto este tipo de material se eligió para el proyecto, además que puede ser obtenido sin dificultad de manera comercial.

El tipo de material, el diseño, la construcción, entre otros factores que son importantes para la realización de este proyecto se darán a conocer en los siguientes capítulos.

1.1. JUSTIFICACION.

En la construcción de actuadores de polímeros electroactivos siempre se han presentado ciertas dificultades para su realización como por ejemplo: las limitaciones del diseño, obtener materiales para la construcción y los resultados de desplazamiento y fuerza que se pueda obtener en la ejecución de pruebas, debido a esto, es necesario realizar diferentes tipos de actuadores para generar resultados en donde, en base a estos, se pueda tener una idea del campo de aplicación en el cual se logren usar adecuadamente.

1.2. OBJETIVO.

EL objetivo general del proyecto es:

“Construir y caracterizar mecánicamente actuadores de polímeros electroactivos, para generar tablas de desempeño mecánico, por medio de las cuales se puedan seleccionar actuadores para aplicaciones particulares.”

Los objetivos específicos se presentan a continuación:

- *Recabar información acerca de los trabajos anteriores acerca de este tema para conocer los tipos de actuadores que existen y posteriormente concluir que tipo de actuador realizar.*
- *Obtener los materiales adecuados para la construcción de los actuadores.*
- *Construir los actuadores y un banco de pruebas (el banco de pruebas será adaptable a diferentes tipos de actuadores).*
- *Realizar pruebas de calibración del sensor de presión y de posición que se utilizaran para obtener las tablas de desempeño.*
- *Construir con el polímero electroactivo un actuador en forma de multicapa.*

1.3. PROBLEMAS A RESOLVER.

Desarrollar, construir y caracterizar actuadores de polímeros electroactivos con la obtención de materiales comerciales y de uso común, además de ampliar la relación existente de los conocimientos mecánicos aplicados a este tipo de nuevas tecnologías.

CAPITULO 2. ACTUADORES DE POLIMEROS ELECTROACTIVOS (EAPs).

Los EAPs se conocen como “músculos artificiales” y esto se debe a que se comportan exactamente como un músculos natural. Los músculos se consideran sistemas altamente optimizados ya que son fundamentalmente lo mismo para todos los animales y las diferencias entre especies son pequeñas. Los músculos naturales son impulsados por un mecanismo complejo y son capaces de levantar grandes cargas con un tiempo de respuesta corto (milisegundos). La operación de los músculos depende del enlace de hidrógeno reversible impulsado químicamente entre dos polímeros: actina y miosina. Las células musculares son más o menos de forma cilíndrica, con diámetros entre 10 y 100 μm , con una longitud de hasta varios centímetros. Es difícil determinar el rendimiento de los músculos: la mayoría de las mediciones se han realizado en músculos de las conchas de vieiras [Marsh et. al., 1992]. Un esfuerzo pico de 150-300 kPa se desarrolla en una deformación alrededor de 25%, mientras que la potencia de salida máxima es 150-225 W/kg. La potencia

media es de unos 50 W/kg, con una densidad de energía de 20-70 J/kg que disminuye al aumentar la velocidad. Aunque los músculos producen fuerzas lineales, todos los movimientos en las articulaciones son rotativos. Por lo tanto, la fuerza de un animal no es simplemente la fuerza muscular, sino que es la fuerza muscular modificada por la ventaja mecánica de la articulación, que por lo general varía con la rotación de la articulación. La energía mecánica es proporcionada por una energía libre de químicos de una reacción que implica trifosfato de adenosina (ATP) hidrólisis. La liberación de iones Ca^{2+} es responsable del encendido y apagado de los cambios conformacionales asociados con la restricción muscular [Bar-Cohen, 2004].



Figura 1. Los EAPs se conocen como músculos artificiales por la similitud del comportamiento con los músculos [Bar-Cohen, 2004].

2.1. HISTORIA DE LOS POLIMEROS ELECTROACTIVOS.

El tema de “polímeros electroactivos” es bastante amplio, debido a esto, primero se conocerá los avances importantes que se han logrado con este tipo de material.

Los polímeros que son estimulados químicamente se descubrieron hace más de medio siglo, cuando se demostraron que los filamentos de colágeno se contraían de forma reversible o se expandían cuando se sumergían en soluciones acuosas de ácidos o alcalinos, respectivamente [Katchalsky, 1949]. Este primer trabajo fue pionero en el desarrollo de polímeros sintéticos que imitan a los músculos biológicos.

Los inicios de los EAPs se remontan a un experimento realizado en 1880 que fue elaborado por Roentgen usando tiras de 16 x 100 cm de caucho natural que se

cargaban y descargaban con un extremo fijo y una masa unida al otro extremo libre [Roentgen, 1880]. Es interesante notar que Roentgen atribuyó el cambio de volumen en el material al efecto térmico del campo eléctrico y la interacción con la banda de caucho que está hecho de material dieléctrico [Bar-Cohen, 2004].

Tiempo después, en 1899, Sacerdote formuló la deformación que presenta el polímero en reacción a un campo eléctrico. Este avance fue seguido en 1925 con el descubrimiento de un polímero piezoeléctrico llamado “electrec”, el cual consiste en cera de carnauba, colofonia y cera de abejas, estos se solidificaron por enfriamiento y fueron sometidos a un campo de polarización de corriente directa [Eguchi, 1925].

En el año 1949, Katchalsky demostró que los filamentos de colágeno cuando se sumergen en soluciones de ácido o álcali, responden con un cambio de volumen. Se encontró que los filamentos de colágeno se expanden en una solución ácida y se contraen en una solución alcalina. Aunque otros estímulos han sido investigados, debido a su facilidad y practicidad, la mayoría de las investigaciones se ha dedicado al desarrollo de polímeros que responden a estímulos eléctricos, con la finalidad de imitar sistemas biológicos [Bar-Cohen, 2004].

Transcurriendo el año de 1969, siguiendo las observaciones sustanciales de las actividades piezoeléctricas en el material Poli (floruro de polivinilideno) (PVF2) [Bar-Cohen et. al., 1996; Zhang et. al., 1998], investigadores comenzaron a examinar otros sistemas de polímeros y a partir de esto una serie de materiales eficaces han surgido. El mayor avance en el desarrollo de los materiales EAP se ha producido en los últimos 15 años, donde se ha trabajado con materiales que pueden inducir deformaciones superiores al 100% [Pelrine et. al., 1998].

Pelrine llevó a cabo los primeros estudios sobre la respuesta de elastómeros dieléctricos. Él descubrió que pre-deformar las películas mejora el rendimiento con un incremento en el accionamiento de deformación del 30% a más del 100% para los elastómeros de silicona [Pelrine et. al., 2000]. Sommer-Larson también estudió la respuesta mecánica y eléctrica de los actuadores de elastómeros dieléctricos mientras fueron sometidos a una tensión de accionamiento variable sinusoidal. Ellos midieron la corriente consumida por el actuador y determinaron una correlación entre la corriente y la expansión del actuador [Sommer-Larson et. al., 2001]. Carpi investigó el rendimiento planar de los actuadores (DEAP) hechos de un elastómero acrílico para condiciones isotónicas (carga constante) e isométricas (longitud constante). Ellos encontraron el mejoramiento de la deformación del actuador cuando se aumentó la tensión previa [Carpi et. al., 2003]. Un trabajo similar se llevó a cabo por Spinks y Truong que sugirió que la producción de trabajo es mayor cuando los elastómeros electrostáticos corresponden con muelles más suaves [Spinks et. al. 2005]. Bao estudio las propiedades de flexión de los actuadores EAP usando una cámara CCD para digitalizar la curva de flexión y una computadora de algoritmo para resolver el problema en una viga en voladizo inversa (EAP) con un limitador de posición en la punta. Usando este método eran capaz de medir la fuerza

en la punta de la viga mientras estaba excitado por diversos voltajes aplicados [Bao et. al., 2004].

Tiempo después, Bauer y Paajanen desarrollaron un protocolo de caracterización electromecánica para actuadores de elastómeros dieléctricos utilizando el poli-acrílico VHB 4910. Midieron la actual tensión de la respuesta del actuador así como la expansión de la superficie usando un video-extensómetro [Bauer et. al., 2004]. Jung y otros científicos midieron la variación de la capacitancia en virtud de la carga mecánica de un actuador bajo una tensión de accionamiento aplicada y encontraron una correlación directa al desplazamiento medido real [Jung et. al., 2008]. Chuc investigó las capacidades de la “auto-detección” (Método para realizar pruebas a los DEs) y señaló que la impedancia del elastómero “DE” varía dependiendo de las fuerzas externas que actúan sobre él. También encontraron que el producto de la capacitancia y la resistencia de la DE es constante [Chuc et. al., 2008]. Fox y Goulbourne caracterizaron la respuesta dinámica electromecánica de las membranas borde-montado de un elastómero dieléctrico (DE). La forma de la membrana se midió mientras que la membrana se sometió a diferentes entradas de tensión y de precargadas desde una cámara de presión para diversos estados iniciales [Fox et. al., 2007; Fox et. al., 2008]. Wissler y Mazza caracterizaron el comportamiento mecánico de VHB 4910 utilizando grandes experimentos de deformación (uniaxial y la deformación equibiaxial) [Wissler et. al., 2007]. Matysek estudió los actuadores EAP en forma de pila, hechas de dos siliconas diferentes y cómo las propiedades eléctricas de los materiales cambian con la deformación mecánica aplicada o de la tensión aplicada, descubriendo que el bajo rendimiento podría estar relacionado con altas temperaturas de curado y con la capa de espesores superiores a 50 μm [Matysek et. al., 2008]. Dubois informó acerca de la caracterización, el ajuste activo y el modelado de la primera frecuencia de modo de resonancia de las membranas dieléctricas de EAP [Dubois et. al., 2008]. Zhao analizó la inestabilidad de los elastómeros dieléctricos utilizando una función de energía libre que incluyó contribuciones de estiramiento y de polarización [Zhao et. al., 2007].

2.2. CLASIFICACION DE EAPs.

Generalmente, EAPs pueden inducir deformaciones muy altas, aproximadamente dos veces la magnitud que se puede alcanzar en la rigidez y la fragilidad de los cerámicos electroactivos (EAC). Además los materiales EAPs son superiores a las aleaciones con memoria alta (SMA) en el sentido de que tienen mayor velocidad de respuesta, menor densidad y una mayor capacidad de recuperación [Hollerbach et. al. 1992; Hunter and Lafontaine, 1992; Huber et. al. 1997; and Madden et. al. in prees]. En las tablas 2 y 3, se observan las comparaciones que hay entre EAP, EAC and SMA, que son los diferentes tipos de materiales de accionamiento, para categorías generales y específicas del material. Estas tablas muestran la superioridad de la EAP en la densidad, la tensión de accionamiento y la potencia. Las limitaciones actuales de los actuadores que están hechos de materiales EAP, incluyen baja fuerza de accionamiento y son robustos, esto limita el alcance de sus aplicaciones prácticas [Bar-Cohen, 2004].

Propiedades	EAP	SMA	EAC
Tensión de accionamiento	Arriba de 300%	<8% corta vida en fatiga	Típicamente 0.1-0.3%
Fuerza (MPa)	0.1-40	200	30-40
Velocidad de reacción	µsec a min	msec a min	µsec a sec
Densidad	1-2.5 g/cc	5-6 g/cc	6-8 g/cc
Tensión de excitación	1-7 para EAP iónicos y 10-150 V/µm para EAP electrónicos	5-volt	50-800 V
Potencia consumida*	m-Watts	Watts	Watts
Comportamiento a la fractura	Resistente, elástico	Resistente, elástico	Frágil

Tabla 2. Comparación de propiedades entre EAP, SMA y EAC [Bar-Cohen, 2004].

Propiedades	Elastómero electrostático de silicona	Polímero Electrostrictor	Cristal único electrostrictor	Cristal único magnetrostrictor
Tensión de accionamiento	100%	4%	1.7%	2%
Bloqueo de fuerza/área	0.2 MPa	0.8 Mpa	65 MPa	100 Mpa
Velocidad de reacción	msec	μsec	μsec	μsec
Densidad	1,5 g/cc	3 g/cc	7.5 g/cc	9.2 g/cc
Campo eléctrico	144 V/μm	150 V/μm	12 V/μm	2500 Oe
Tenacidad a la fractura	Grande	Grande	Bajo	Grande

Tabla 3. Comparación de los materiales de accionamiento típicos [Peline et. al., 1998; Zhang et. al., 1998; Park and Shrou, 1997; Hathaway and Clark, 1993]. Nota: Se calcularon los valores asumiendo las propiedades elásticas que fueron independientes del campo aplicado y por lo tanto son aproximadas.

Hay muchos tipos de polímeros que tienen propiedades controlables y este comportamiento pueden ser provocados por una variedad de estimuladores. Algunos de estos polímeros pueden sostener un cambio permanente, mientras que otros presentan respuestas reversibles. Generalmente los polímeros pueden ser pasivos, pero mediante la incorporación de materiales activos se pueden convertir en estructuras inteligentes. Estas estructuras permiten controlar la forma y las deformaciones, tomando ventaja de las características de la resiliencia y tenacidad de los polímeros [Bar-Cohen, 2004].

Además de la excitación eléctrica, también existen otros tipos de estimulantes que provocan las deformaciones en los polímeros, por ejemplo: químicos, térmicos, neumáticos, ópticos y magnéticos. Pero la comodidad y la practicidad de estímulos eléctricos, así como el progreso técnico, dieron lugar a un creciente interés en los materiales de EAP.

Generalmente, los EAPs que exhiben cambios en su forma original en respuesta a la estimulación eléctrica se puede dividir en dos categorías principales en función de su mecanismo de activación: electrónicos (impulsado por un campo eléctrico o fuerzas de Coulomb) e iónicos (difusión de iones).

Los polímeros electrónicos (electrostrictivos, electrostáticos, piezoeléctricos, y ferroeléctricos) requieren altos campos eléctricos de activación ($> 150 \text{ V}/\mu\text{m}$) cerca del nivel de desagregación. Sin embargo, se puede mantener el desplazamiento inducido bajo la activación de un campo eléctrico continuo, lo que les permite ser considerados para aplicaciones robóticas. Además, estos materiales tienen una respuesta más rápida y pueden ser operados en el aire sin restricciones. En contraste, los materiales EAP iónicos (geles, materiales compuestos de polímero-metal, polímeros conductores, y los nanotubos de carbono) requieren de tensiones

de accionamiento de bajos voltajes (entre 1 a 5 V). Sin embargo, necesitan mantenerse en medios húmedos, y a excepción de los polímeros conductores es difícil de mantener el desplazamiento inducido (DC). Los desplazamientos inducidos tanto de la EAPs electrónicos e iónicos pueden ser diseñados geoméricamente para flexionarse, estirarse o estrecharse. Cualquiera de los materiales EAPs existentes pueden obtener una respuesta con una curvatura significativa, esto ofrece que los actuadores tengan una reacción fácil de observar y una atractiva respuesta. Sin embargo, los actuadores de flexión tienen aplicaciones relativamente limitadas para tareas mecánicamente exigentes debido a la baja fuerza o torque en donde pueden ser inducidos [Bar-Cohen, 2004].

A continuación en la tabla 4 se presenta las ventajas y desventajas de los tipos de EAPs.

Tipo de EAP	Ventajas	Desventajas
EAP electrónicos	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden operar bajo ciertas condiciones durante un largo periodo de tiempo. • Respuesta rápida (a niveles de msec). • Puede mantener la deformación bajo la activación de dc. • Induce relativamente grandes fuerzas de accionamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere altos voltajes (~150 MV/m). El reciente desarrollo de los EAPs ferroeléctricos permiten utilizar 20 MV/m. • La temperatura de transición vítrea es inadecuada para tareas de accionamiento de baja temperatura y, en el caso de EAP ferroeléctricos, las aplicaciones de alta temperatura están limitados por la temperatura de Curie
EAP iónicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Produce grandes desplazamientos de flexión. • Requiere de bajo voltaje. • Un actuador bidireccional depende de la polaridad del voltaje 	<ul style="list-style-type: none"> • A excepción de las CPs y NTs, EAPs iónicos no tienen deformaciones bajo corriente directa. • Respuesta lenta (fracción de un segundo) • EAPs inducen una fuerza relativamente baja de actuación. • Excepto para los CPs es difícil producir un material consistente (particularmente IPMC). • En sistemas acuosos el material sostiene una electrólisis a > 1.23 V. • Necesita de un electrolito y la encapsulación. • Baja eficiencia de acoplamiento electromecánico.

Tabla 4. Comparación de las ventajas y desventajas de los dos tipos de EAPs [Bar-Cohen, 2004].

En la tabla 5 se observa la comparación de las tecnologías de actuadores con el músculo natural, en las tablas 6 y 7 se presentan las ventajas y desventajas de los materiales electrónicos e iónicos respectivamente.

	Tipo de actuador (ejemplos específicos)	Máxima deformación (%)	Presión máxima (MPa)	Densidad específica de energía elástica (J/g)	Densidad de energía elástica (J/cm ³)	Máxima eficiencia (%)	Velocidad relativa (Ciclo completo)
Polímeros Electroactivos.	Elastómeros dieléctricos						
	Acrílico	380	8.2	3.4	3.4	60-80	Medio
	Silicona	63	3.0	0.75	0.75	90	Rápido
	Polímeros electrostrictivos (P(VDF-TrFE-CFE) ²	4.5	45	>0.6	1.0	-	Rápido
	Injerto de elastómero ³	4	24	0.26	0.48	-	Rápido
	Polímero Conductor electroquímico-mecánico (Polianilina) ⁴	10	450	23	23	< 1%	Lento
Transductores No-EAP	Polímeros mecano-químicos/Geles (Polielectrolito) ⁵	>40	0.3	0.06	0.06	30	Lento
	Polímero piezoeléctrico (PVDF) ⁶	0.1	4.8	0.0013	0.0024	n/a	Rápido
	Dispositivos electrostáticos (Formación de fuerza integrada) ⁷	50	0.03	0.0015	0.0015	>90	Rápido
	Electromagnético (Bobina de voz) ⁸	50	0.10	0.003	0.025	> 90	Rápido
	Piezoeléctrico Cerámico (PZT) ⁹	0.2	110	0.013	0.10	>90	Rápido
	Cristal único (PZN-PT) ¹⁰	1.7	131	0.13	1.0	>90	Rápido
	Memoria de forma Aleación(TiNi) ¹¹	>5	>200	>15	>100	< 10	Lento
	Polímero de memoria de forma ¹²	100	4	2	2	<10	Lento
Musculatura Natural	Térmico (Expansión) ¹³	1	78	0.15	0.4	<10	Lento
	Magnetostrictivo (Terefol-D Productos Etrema) ¹⁴	0.2	70	0.0027	0.025	60	Rápido
	Musculo Natural (Esqueleto humano) ¹⁵	>40	0.35	0.07	0.07	>35	Medio

Tabla 5.

¹ Pelrine, Eckerle and Chiba, 1992.

² Xia et. al., 2003.

³ Su, J., comunicación personal.

⁴ Bobbio et. al., 1993.

⁵ Estos valores se basan en bobinas de voz con 0.01 m de espesor, 50% de conductores, el 50% de imanes permanentes, campo magnético de 1 T, 2 ohm-cm de resistividad y 40.000 W/m² disipación de potencia.

⁶ PZT B, en un campo eléctrico máximo de 4 V/μm.

⁷ Park and Shrout, 1997.

⁸ PVDF, en un campo eléctrico de 30 V/μm.

⁹ Hunter et. al., 1991.

¹⁰ Tobushi, Hayashi and Kojima, 1992.

¹¹ Aluminio con un cambio de temperatura de 500°C.

¹² Baughman et. al., 1990.

¹³ Shahinpoor, 1995.

¹⁴ Terfenol-D Productos Etrema .

¹⁵ Hunter y Lafontaine, 1992.

Principio	Ventajas	Desventajas	Tipo reportado
Polímeros Ferroeléctricos			
<p>Polímeros que exhiben un cambio de forma sostenida en respuesta al campo eléctrico. Algunos de estos polímeros tienen una polarización eléctrica espontánea haciéndolos ferroeléctricos.</p> <p>La introducción de radiación de electrones en copolímeros P (VDF-TrFE) con defectos en su estructura cristalina aumentan dramáticamente la deformación inducida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Induce relativamente grandes deformaciones (~ 150 MV/m). • Ofrece alta densidad de energía mecánica que resulta del alto (relativamente) módulo elástico. • Respuesta rápida (niveles ms) 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de alta tensión (~150 MV/m). • El reciente desarrollo permite un menor voltaje. • Difícil de producir en masa. • Hacer multicapas finas sigue siendo un desafío y sensible a los defectos. • Aplicaciones a altas temperaturas están limitadas por la temperatura de Curie. 	<ul style="list-style-type: none"> • Electro-radiados P(VDF-TrFE). • Terpolímeros P(VDF-TrFE). • P(VDF-TrFE-CTFE)- CTFE altera el orden en el lugar de la irradiación.
EAP dieléctricos o ESSP			
<p>Las fuerzas Coulomb entre los electrodos exprimen al material, causando una expansión en el plano de los electrodos. Cuando la rigidez es baja la película delgada se puede estirar al 200-380%.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Desplazamientos grandes alcanzando niveles de 200-380% de área de deformación. • Respuesta rápida (niveles ms). • Barato de producir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de alta tensión (~150 MV/m). • La obtención de grandes desplazamientos compromete la fuerza de accionamiento. • Requiere una pre deformación 	<ul style="list-style-type: none"> • Silicona. • Poliuretano. • Poliacrílico.
Injerto de elastómeros electrostrictivos			
<p>El campo eléctrico hace que la alineación molecular del grupo de elastómeros cristalinos de injerto se unan a la columna vertebral.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Niveles de deformación de 5%. • Relativamente gran fuerza. • Más barato de producir. • Respuesta rápida (niveles ms). 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de alta tensión (~150 MV/m). 	<ul style="list-style-type: none"> • Copolímero-poli (Vinilideno-flúor-trifluoroetileno).
Elastómeros de cristales líquidos			
<ul style="list-style-type: none"> • Expone una ferroelectricidad espontánea. • Se contrae cuando se calienta ofreciendo una excitación al no electroactivarse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando se calienta induce una deformación y un esfuerzo grande (~200 kPa y 45% respectivamente). • Requiere un campo mucho más bajo que los ferroeléctricos y EAP dieléctrica (1,5 MV/m, 4% de tensión). • Respuesta rápida (<133 Hz). 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja electro-restrictiva respuesta. • Respuesta lenta. • Histéresis 	<ul style="list-style-type: none"> • Poliacrílico. • Polisiloxano.

Tabla 6. Resumen de los EAP electrónicos principales [Bar-Cohen, 2004].

Principio	Ventajas	Desventajas	Tipo reportado
Geles iónicos (IGL)			
La aplicación de un voltaje provoca el movimiento de iones de hidrógeno dentro o fuera del gel. El efecto es una simulación del químico de reacción con ácido y alcalino.	<ul style="list-style-type: none"> Potencialmente capaz de igualar la densidad de fuerza y energía de los músculos biológicos. Requiere de baja tensión. 	<ul style="list-style-type: none"> Funciona muy lento –requiere de capas muy finas. 	Los ejemplos incluyen: PAMPS y PAN.
Polímeros iónicos de metal-polímero (IPMC)			
El polímero base proporciona canales para la movilidad de los iones positivos en una red fija de iones negativos en racimos interconectados. Las fuerzas electrostáticas y de cationes móviles son responsables de la flexión.	<ul style="list-style-type: none"> Exige baja tensión (1-5V). Proporcionar una flexión significativa. 	<ul style="list-style-type: none"> Respuesta de baja frecuencia (rango de 1 Hz). Extremadamente sensible a la deshidratación. dc provoca una deformación permanente. Sujeto a la hidrólisis por encima de 1.23 V. Deriva desplazamientos bajo una tensión continua. 	Polímero base: <ul style="list-style-type: none"> Nafion. Flemion.
Polímeros conductivos			
Son materiales que se hinchan en respuesta a una tensión aplicada como resultado de la oxidación o reducción, dependiendo de la polaridad provocando la inserción de los iones.	<ul style="list-style-type: none"> Requiere relativamente baja tensión. Induce relativamente grandes fuerzas. Biológicamente compatible 	<ul style="list-style-type: none"> Expone deterioro lento bajo el accionamiento cíclico. Sufren de fatiga después de la activación repetida. Respuesta lenta (<40 Hz). 	Polipirrol, polianilina y politiofenos.
Nanotubos de carbón (CNT)			
El enlace carbono-carbono de los nanotubos (NT) suspendidos en un electrolito cambia la longitud de los electrolitos como resultado de la inyección de carga que afecta el equilibrio carga iónica entre el NT y el electrolito.	<ul style="list-style-type: none"> Potencialmente provee un trabajo superior/ciclo y tensiones mecánicas. El carbón ofrece una alta estabilidad térmica a altas temperaturas <1.000 ° C. 	<ul style="list-style-type: none"> Caro Difícil de producir en masa. 	Nanotubos de carbono de pared única y múltiples.
Fluidos electrorreológicos (ERF)			
ERFs experimentan cambio de viscosidad dramática cuando se somete a campo eléctrico causando un momento dipolar inducido en las partículas suspendidas para formar cadenas a lo largo de las líneas de campo.	<ul style="list-style-type: none"> Control de la viscosidad para las válvulas virtuales. Habilita mecanismos hápticos con alta resolución espacial. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de alto voltaje. 	Partículas de polímero fluorosilicona base en aceite.

Tabla 7. Resumen de los EAP iónicos principales [Bar-Cohen, 2004].

2.2.1. EAPS ELECTRONICOS.

2.2.1.1. POLIMEROS FERROELECTRICOS.

La piezoelectricidad fue descubierta en 1880 por Pierre y Paul-Jacques Curie, quienes encontraron que cuando se comprimen ciertos tipos de cristales (por ejemplo: cuarzo, turmalina, y sal de Rochelle) a lo largo de ciertos ejes, una tensión se produce en la superficie del cristal. Un año después, observaron el efecto inverso, que tras la aplicación de una corriente eléctrica, estos cristales sostienen un alargamiento.

La piezoelectricidad se encuentra sólo en materiales de tipo noncentro y el fenómeno se llama ferroelectricidad y se presenta cuando un cristal nonconductor o material dieléctrico exhibe polarización eléctrica espontánea [Bar-Cohen et. al.,1996]. Estos polímeros son parcialmente cristalinos, con una fase amorfa inactivo, y tienen un módulo de Young cerca de 1-10 GPa. Este relativamente alto módulo elástico ofrece una alta densidad de energía mecánica. Un campo grande de corriente alterna (~200 MV/m) puede inducir deformaciones de casi el 2%. Por desgracia, este nivel de campo está peligrosamente cerca de la ruptura dieléctrica y la histéresis dieléctrica (las pérdida y calefacción) es muy grande [Bar-Cohen, 2004].

2.2.1.2. ELECTRETOS.

El comportamiento piezoeléctrico en polímeros también aparece en los electretos, que son materiales que consisten en una combinación geométrica de capas duras y blandas [Sessler and Hillenbrand, 1999].

En el año de 1925 se descubrió este tipo de material el cual mantiene la polarización eléctrica después de ser sometidos a una fuerte eléctrica [Eguchi, 1925]. Las cargas positivas y negativas dentro del material son desplazados de forma permanente a lo largo y en contra de la dirección del campo, respectivamente. Los electretos se pueden preparar de polímeros como cerámica y ciertas ceras, en los que las moléculas individuales están inicialmente al azar, y bajo un campo eléctrico sostienen una polarización permanente. Algunos materiales electretos se construyen sometiendo un material fundido a un campo eléctrico fuerte, mientras que se solidifica. Las aplicaciones actuales de los electretos incluyen micrófonos electrostáticos.

2.2.1.3. EAPS DIELECTRICOS.

Los polímeros con baja rigidez elástica y una constante dieléctrica alta se pueden utilizar para inducir grandes deformaciones de accionamiento sometiéndolas a un campo electrostático. Este EAP dieléctrico, también conocido como polímero electrostáticamente restringido (ESSP), puede ser representado por un condensador de placas paralelas [Pelrine et. al., 1998]. En la figura 2 se muestra un esquema de un EAP dieléctrico que está en condiciones activadas (arriba). La sección inferior izquierda de la figura muestra una película de silicona y la misma película activada por electricidad se observa en la parte de abajo. La sección inferior derecha de la figura muestra un actuador de EAP que se realizó de una película de silicona que se desplaza a la forma de una cuerda. La cuerda, que tiene 2 mm de diámetro y 3 cm de largo, demostró que puede levantar y soltar una roca de 17 gr utilizando aproximadamente 2.5 kV.

La deformación inducida es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, multiplicado por la constante dieléctrica y es inversamente proporcional al módulo elástico. El uso de polímeros con altas constantes dieléctricas y la aplicación de altos campos eléctricos conducen a grandes fuerzas y tensiones. Para llegar a los niveles de campo eléctrico requeridas, es necesario o bien el uso de una alta tensión y/o emplear películas delgadas. Bajo un campo eléctrico, la película se aprieta en la dirección del espesor, causando la expansión en la dirección transversal. Para un par de electrodos con una forma circular, el cambio del diámetro y espesor pueden determinarse usando la conservación de volumen:

$$D^2 t = D_0^2 t_0 \quad (1)$$

donde D y t son el diámetro y el espesor de la película cuando se aplica el campo eléctrico, y D_0 y t_0 son las dimensiones originales de la película sin la aplicación del campo correspondiente [Bar-Cohen, 2004].

La característica anterior permite la producción de los actuadores longitudinales utilizando películas de elastómero dieléctrico con electrodos flexibles que parecen actuar de manera similar a los músculos biológicos. Para este propósito, "SRI International Scientists" construyen actuadores utilizando dos capas de silicona con electrodos de carbono en ambos lados de una de las capas, donde se envolvieron las capas para formar un actuador que tiene la forma de una cuerda. El actuador en forma de cuerda se expandió longitudinalmente como resultado del efecto de Poisson causado por las Fuerzas de Maxwell. De este modo, la expansión lateral conduce a un tramo lateral de la cuerda EAP. Los actuadores EAP dieléctricos requieren grandes campos eléctricos (~ 100 V/ μm) y pueden inducir niveles significativos de deformación (10 a 200%). En general, los voltajes asociados están cerca de la rigidez dieléctrica del material, y un factor de seguridad que reduce la potencia que se necesita. Por otra parte, la pequeña fuerza de ruptura de aire (2-3 V/ μm) presenta un desafío adicional. El módulo de Young es bastante

independiente de la temperatura hasta que la temperatura de transición vítrea se alcanza, en cuyo punto un fuerte aumento en el módulo se produce, por lo que hace al material demasiado rígido para ser utilizado como un actuador a bajas temperaturas.

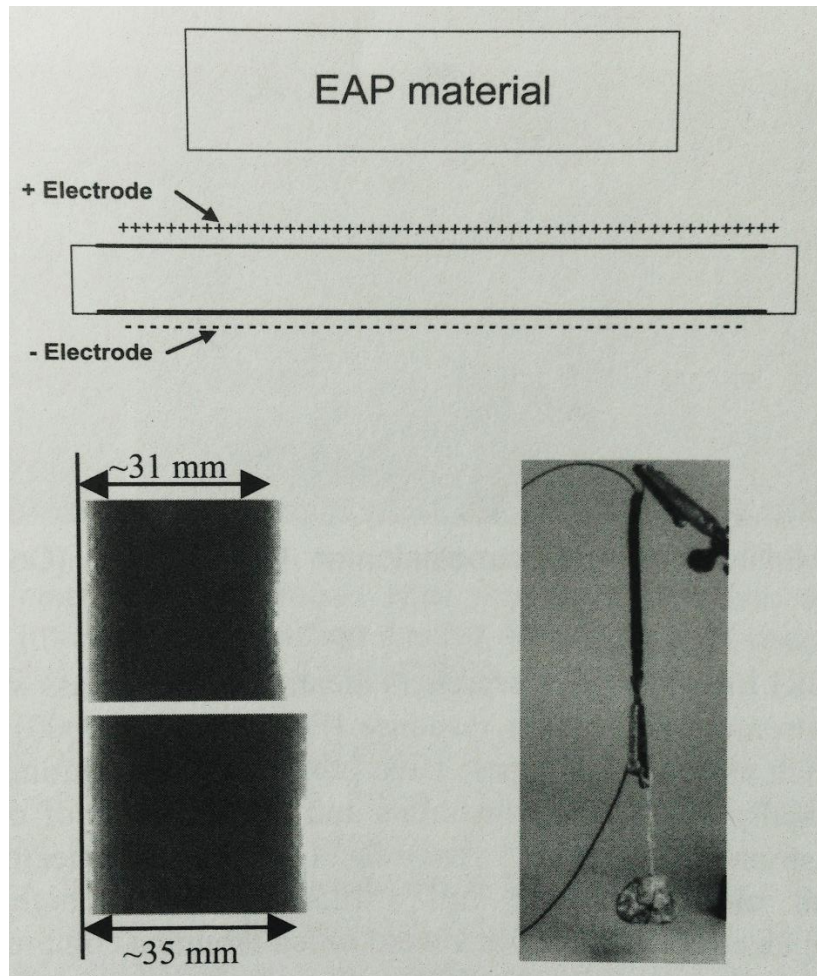


Figura 2. Bajo la electro activación, un elastómero dieléctrico con electrodos en ambas superficies se expande lateralmente y se puede lograr que se opere dicho elastómero longitudinalmente [Bar-Cohen, 2004].

En el año 2000, la SRI identificó una nueva clase de polímeros que exhibe una respuesta extremadamente alta de deformación [Pelrine et. al., 2000]. Estos elastómeros acrílicos (tales como cintas 3M VHB) han producido deformaciones planas de más de 300% para las restricciones biaxialmente simétricas y deformaciones lineales de hasta 215% para las limitaciones uniaxiales. Recientemente, los investigadores de este equipo diseñaron un rollo electroelastómero multifuncional (MER) en el que se rodaron películas EAP dieléctricas de electroelastómero altamente pre estiradas alrededor de un muelle de

compresión para formar un actuador [Pei et. al., 2002]. Cuando se libera, el resorte mantiene las películas de polímero pre deformadas axialmente al tiempo que permite el accionamiento axial. Un ejemplo de este actuador (MER) se muestra en la figura 3 y que representa el avance en la fabricación de actuadores basados en EAP con una configuración estándar.



Figura 3. Rollo Electroelastómero Multifuncional (MER). (Imagen de SRI).

2.2.1.4. INJERTO DE ELASTOMEROS ELECTROESTRICTIVOS.

En 1998, el injerto de elastómero EAP fue desarrollado en “NASA Langley Research Center”, este material exhibe una gran deformación inducida por el campo eléctrico debido a la electrostricción. Este polímero electrostrictivo consta de dos componentes, una macromolécula de columna vertebral flexible y un polímero injertado que puede formar una estructura cristalina. La fase cristalina polar del injerto proporciona una respuesta cuando se aplica un campo eléctrico. Este material ofrece una alta deformación inducida por el campo eléctrico (~4%) y una excelente procesabilidad. La Combinación del elastómero-electrostrictivo injertado con un poli piezoeléctrico (fluoruro de vinilideno-trifluoroetileno) puede ser operado tanto como un sensor piezoeléctrico y como un actuador electrostrictivo [Bar-Cohen, 2004].

2.2.1.5. PAPEL ELECTROESTRICTIVO.

El uso del papel como un actuador EAP electrostrictivo fue demostrado por la Universidad Inha, Corea [Kim et. al., 2000]. El papel se compone de una multitud de partículas discretas, principalmente de naturaleza fibrosa, que forman una estructura de red (Figura 4). El papel se produce en diversos procesos mecánicos con aditivos químicos, esto hace posible preparar un papel que tiene propiedades electroactivas. Tal actuador EAP ha sido preparado por la unión de dos papeles laminados de plata con electrodos de plata colocados en la superficie exterior. Cuando se aplica una tensión eléctrica a los electrodos del actuador produce el desplazamiento de flexión, y su rendimiento depende de la tensiones de excitación, las frecuencias, el tipo de adhesivo, y del papel. Los estudios indican que el efecto de electrostricción que se asocia con este actuador es el resultado de fuerzas electrostáticas y una interacción intermolecular del adhesivo. El actuador demostrado es ligero y fácil de fabricar. Varias aplicaciones que se están considerando actualmente incluyen materiales flexibles de absorción del sonido, altavoces activos y dispositivos de control inteligente.

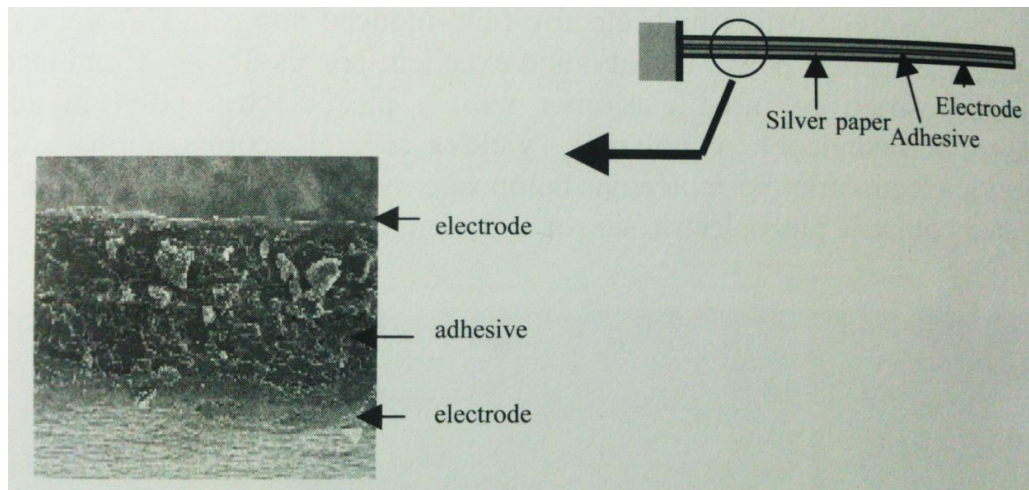


Figura 4. Imagen del papel EAP, donde se muestra una vista micrográfica de la sección transversal en la parte de la izquierda y una vista del esquema del actuador en la derecha [Bar Cohen, 2004].

2.2.1.6. ELASTOMEROS ELECTROVISCO-ELASTICOS.

Los elastómeros electrovisco-elásticos representan una familia de polímeros electroactivos que son materiales compuestos de elastómero de silicona y una fase polar. En el estado donde no está curado, este material se comporta como fluido electrorreológico. Un campo eléctrico se aplica durante el curado para orientar y fijar la posición de la fase polar en la matriz elastomérica. Estos materiales que permanezcan en el estado "sólido", pero que tienen un módulo de corte cambian con un campo eléctrico aplicado ($<6 \text{ V}/\mu\text{m}$) [Shiga, 1997]. Un efecto magnético

fuerte también puede ser introducido de una manera análoga y logra un cambio del 50% en el módulo de cizallamiento [Klapcin'ski et. al., 1995; Davis, 1999; Zrinyi et. al., 1999]. Estos materiales pueden ser utilizados como alternativa para aplicaciones de amortiguamiento. Además, pueden ser utilizados para realizar amortiguaciones en apoyo del control de la precisión de brazos robóticos en un sistema de bucle cerrado.

2.2.1.7. ELASTOMEROS DE CRISTALES LIQUIDOS (LCE).

El pionero en las investigaciones de elastómeros de cristales líquidos fue la universidad de Albert-Ludwings (Freiburg, Alemania) [Finkelmann et. al., 1981]. Estos materiales se pueden utilizar para formar un actuador EAP que tiene características piezoeléctricas y puede ser activado eléctricamente mediante la inducción del efecto Joule. El mecanismo de actuación de estos materiales implica una transición de fase entre fases nemáticas e isotrópicas en un período de menos de un segundo. El proceso inverso es más lento, teniendo aproximadamente 10 segundos, y requiere una refrigeración, lo que provoca la expansión del elastómero de su longitud original. Las propiedades mecánicas de los materiales LCE pueden ser controlados y optimizados por la selección efectiva de la fase cristalina líquida, la densidad de reticulación, la flexibilidad de la cadena principal del polímero y el acoplamiento entre un grupo de cristales líquidos y los estímulos externos.

2.2.2. EAPS IONICOS.

2.2.2.1. GELES DE POLIMEROS IONICOS (IPG).

Los geles de polímeros pueden ser sintetizados para producir actuadores fuertes que tiene el potencial de lograr que coincidan la densidad de fuerza con la energía de los músculos biológicos. Estos materiales (por ejemplo: poliacrilonitrilo) se activan generalmente por una reacción química, cambiando de un ácido a un ambiente alcalino haciendo que el gel se convierta en más denso. Esta reacción puede ser estimulada eléctricamente, como se ha demostrado por los investigadores de la Universidad de Arizona, EE.UU. [Calvert et. al., 1998; Liu y Calvert, 2000]. Cuando se activan, estos geles cambian, el lado del cátodo se convierte en más alcalino y el lado del ánodo en más ácido. Sin embargo, la respuesta de esta estructura de múltiples capas de gel es relativamente lenta debido a la necesidad de difundir iones a través del gel. La expansión y la contracción de un gel en capas de 6x6 cm a 3x3 cm (figura 5) ocurre durante un período de aproximadamente 20 min, lo que está lejos de ser práctico. También, el gran desplazamiento inducido causó daños a los electrodos, lo que lleva al fracaso del actuador después de 2 a 3 ciclos de activación. Los esfuerzos actuales están dirigidos hacia el desarrollo de capas delgadas. El progreso más actual de este tipo de materiales fue al realizarlo con electrodos de forma de fibra, realizado por investigadores de la Universidad de Nuevo México, utilizando una mezcla de fibras conductoras y PAN [Schereyer et. al., 2000].

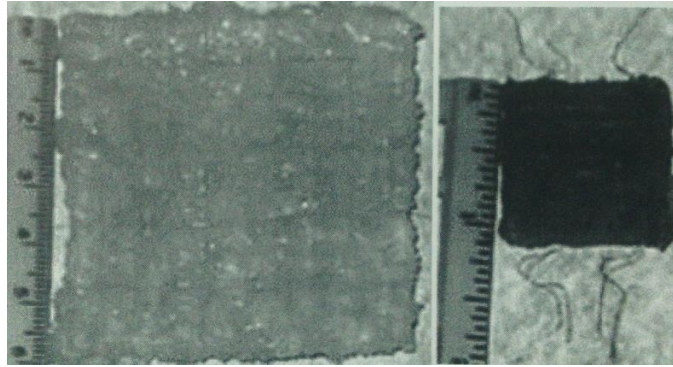


Figura 5. Cambio de tamaño debido a una estimulación eléctrica [Liu and Calvert, 2000]. (Imagen de Wiley-VCH).

2.2.2.2. MATERIALES COMPUESTOS DE METAL-POLIMERO IONOMERICO (IPMC).

Los materiales compuestos de polímero ionomérico de metal (IPMC) es un EAP que se dobla en respuesta a una activación eléctrica (figura 6) como resultado de la movilidad de los cationes en la red de polímero. En el año de 1992 se demostró que los IPMC tienen esta característica electroactiva, por tres grupos de investigadores: Oguro et. al. [1992] en Japón, Shahinpoor [1992] y Sadeghipour et al. [1992] en los Estados Unidos. Se requiere un voltaje relativamente bajo para estimular la flexión en los IPMC, donde el polímero base proporciona canales para la movilidad de los iones positivos en una red fija de iones negativos en racimos interconectados. Dos tipos de polímeros de base se utilizan para formar un IPMC: Nafion (hecha por DuPont) y Flemion (fabricado por Asahi Glass, Japón).

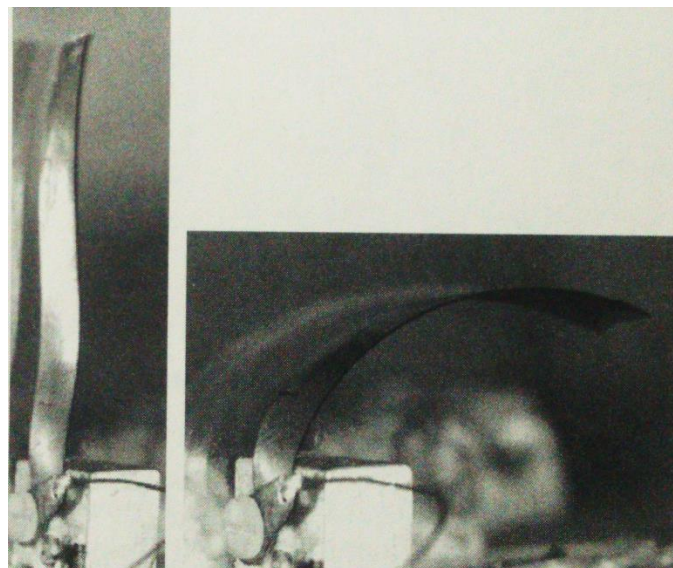


Figura 6. IPMC activado por corriente eléctrica [Bar Cohen, 2004].

2.2.2.3. POLIMEROS CONDUCTIVOS (CP).

Los polímeros conductores normalmente funcionan durante el ciclo Redox. La oxidación y la reducción se producen en los electrodos, lo que induce a un cambio de volumen considerable debido principalmente al intercambio de iones con un electrolito. Un sándwich de dos electrodos de polímero conductivo (por ejemplo: polipirrol, polianilina o PAN dopado en HCl) con un electrolito entre ellos forma un actuador EAP (figura 7). Cuando se aplica una tensión entre los electrodos, la oxidación se produce en el ánodo y la reducción en el cátodo. Los iones (H^+) migran entre el electrolito y los electrodos para equilibrar la carga eléctrica. La adición de los iones provoca hinchamiento del polímero y por el contrario la contracción es provocada por la eliminación de iones. Como resultado, el sándwich se dobla. Uno de los parámetros que afecta la respuesta es el espesor de las capas; las capas más delgadas son más rápidas (tan rápido como 40 Hz), pero inducen una fuerza menor. Dado que las fuerzas de cizallamiento fuertes actúan sobre la capa del electrolito, se necesita mucho cuidado para proteger el material de un fallo prematuro. Los actuadores de polímeros conductivos generalmente requieren voltajes en el intervalo de 1-5 V, y la velocidad aumenta con el voltaje que tiene, tiene altas densidades de energía mecánica de más de 20 J/cm³ pero con bajas eficiencias de 1% [Bar-Cohen, 2004].

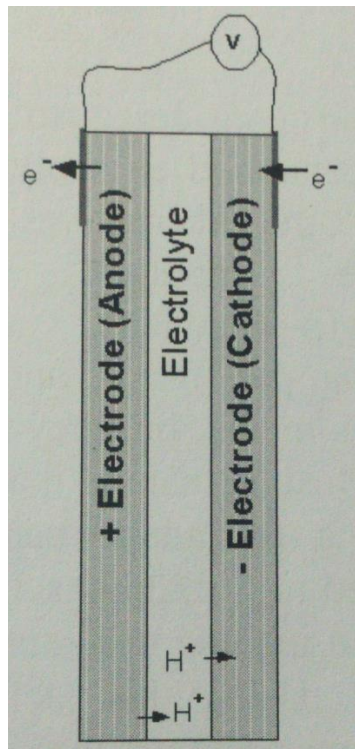


Figura 7. Esquema de un actuador de polímero conductivo [Bar Cohen, 2004].

2.2.2.4. NANOTUBOS DE CARBON (CNT).

En 1999, los nanotubos de carbono con diamante surgieron como EAP [Baughman et. al., 1999]. El enlace carbono-carbono en los nanotubos (NT) que está suspendido en un electrolito y el cambio en la longitud del enlace son responsables del mecanismo de actuación. Una red de enlaces conjugadas conecta todos los carbonos y proporciona un camino en el flujo de electrones a lo largo de dicho enlace. El electrolito forma una doble capa eléctrica con los nanotubos y permite la inyección de grandes cargas que afectan a la carga iónica equilibrada entre el NT y el electrolito. La eliminación de los electrones hace que los nanotubos tengan una carga positiva neta, que se extiende a través de todos los núcleos de carbono que causan repulsión entre los núcleos de carbono adyacentes e incrementa la longitud de enlace CC. La inyección de electrones en el enlace también causa el alargamiento de la unión resultante en un aumento en el diámetro y la longitud de los nanotubos. Estos cambios de dimensiones se traducen prácticamente al diámetro y a la longitud de los nanotubos y por consiguiente, estos cambios de dimensiones conllevan al movimiento macroscópico de la red de nanotubos enredados a una extensión de la CNT como resultado.

Teniendo en cuenta la resistencia mecánica, el módulo de los nanotubos de carbono individuales y los desplazamientos del actuador alcanzables, este actuador tiene el potencial de producir mayor trabajo por ciclo que cualquier otro tipo de actuadores previamente reportados y también genera una mayor deformación. Además, ya que el carbono ofrece una alta estabilidad térmica, los nanotubos de carbono con el tiempo pueden ser utilizados a temperaturas de alrededor de 1000°C, esto supera las capacidades de los materiales de actuadores alternativos de alto rendimiento. El material consiste en tubos de tamaño manométrico y fue probado para inducir las deformaciones en el rango de 1% a lo largo de la longitud. El principal obstáculo para la comercialización de este tipo de EAP es su alto costo y la dificultad de la producción en masa del material. Un actuador de nanotubo de carbono se puede construir mediante la laminación de dos tiras estrechas que se cortan de una hoja de nanotubos de carbono usando una capa intermedia adhesiva, que está aislada electrónicamente. El "dispositivo de cantilever" resultante se sumerge en un electrolito tal como una solución de cloruro de sodio y una conexión eléctrica se realiza en la forma de dos tiras de nanotubos. La aplicación de alrededor de 1.0 V es suficiente para causar la flexión, y la dirección depende de la polaridad del campo [Bar-Cohen, 2004].

2.2.2.5. FLUIDOS ELECTORREOLOGICOS (ERF).

Los fluidos electrorreológicos (ERF) experimentan cambios drásticos en su viscosidad cuando se someten a un campo eléctrico (Figura 8). Estos fluidos se realizan a partir de suspensiones de un fluido aislante como base y partículas de 0.1-100 μm . Winslow explica el efecto electrorreológico en la década de 1940, usando las dispersiones en aceite de los polvos [Winslow, 1949]. El efecto

electrorreológico, a veces llamado el efecto Winslow, surge de la diferencia en las constantes dieléctricas del fluido y las partículas. En presencia de un campo eléctrico, las partículas, debido a un momento dipolar inducido, forman cadenas a lo largo de las líneas de campo. Esta estructura inducida cambia la viscosidad de la ERF, el esfuerzo de rendimiento y otras propiedades, lo que permite que la ERF cambie la consistencia de la de un líquido a algo que es visco-elástico, tal como un gel, con tiempos de respuesta a los cambios en los campos eléctricos de milisegundos. El control de los fluidos electrorreológicos es la promesa de nuevas posibilidades en ingeniería para el accionamiento y control del movimiento mecánico. La capacidad de controlar la viscosidad y la rápida respuesta de ERF permite la simplificación de los mecanismos que están involucrados con la hidráulica. Sus propiedades solidas en presencia de un campo pueden utilizarse para transmitir fuerzas sobre un rango grande y han encontrado un gran número de aplicaciones, incluyendo amortiguadores, amortiguadores activos, embragues, dispositivos de agarre de adaptación, y bombas de caudal variable.

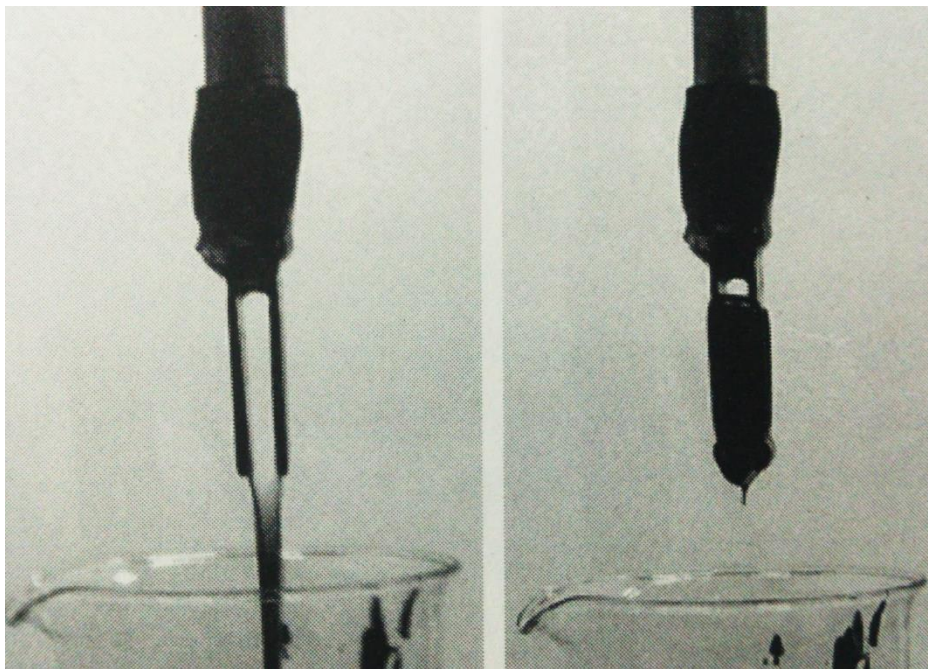


Figura 8. En la imagen de la izquierda el fluido electrorreológico se encuentra en estado normal, a la derecha se observa en un estado activado. (Cortesía de “Smart Technology Limited”, UK).

2.3. FUNDAMENTOS BASICOS DE LOS ELASTOMEROS DIELECTRICOS EAP.

Este proyecto se diseñó para trabajar con elastómeros dieléctricos, estos materiales son el acrílico y la silicona, es por eso que se hablará más de dichos materiales.

La comprensión del funcionamiento de los elastómeros dieléctricos puede ayudar a explicar cuestiones relativas a la aplicación de esta tecnología en los actuadores. Todos los actuadores basados en la tecnología de elastómeros dieléctricos operan bajo el principio simple que se muestra en la figura 9. Cuando se aplica un voltaje a través de los electrodos, el polímero reduce su espesor y se expande en el área.

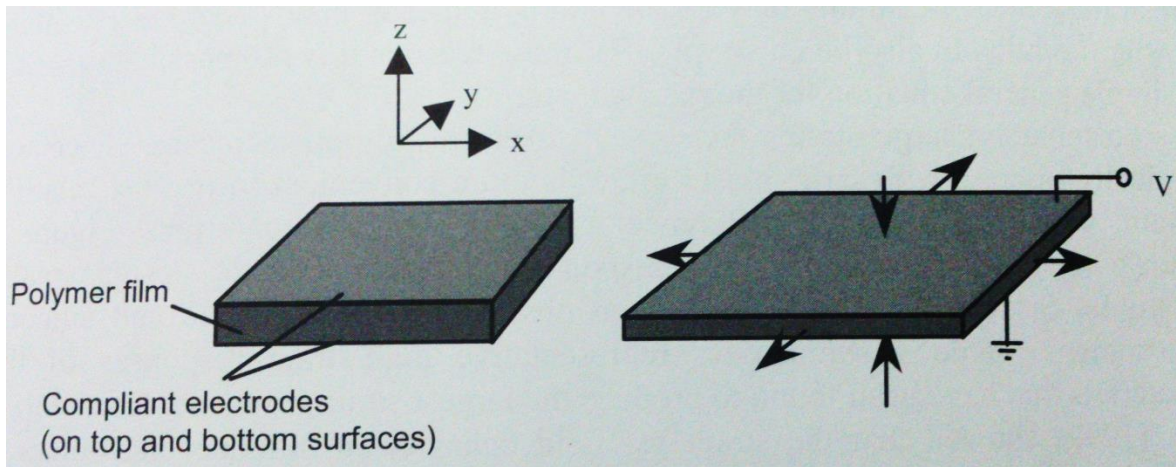


Figura 9. Principio de operación de un elastómero dieléctrico [Bar Cohen, 2004].

El cambio de volumen neto de los materiales poliméricos que se ha investigado es pequeño [Pelrine, Kornbluh y Kofod, 2000] debido al alto módulo de volumen. Por lo tanto, los electrodos deben ser compatibles, para permitir la deformación en la película.

La respuesta observada en la película es causada principalmente por la interacción entre las cargas electrostáticas en los electrodos. En pocas palabras, las cargas opuestas en los dos electrodos se atraen entre sí, mientras que las cargas iguales en cada electrodo se repelen entre sí. Este dominio de la respuesta observada por estos efectos electrostáticos diferencia esta tecnología de otros sobre la base de la respuesta electromecánica de ciertos elastómeros semicristalinos [Zhenyi et. al., 1894].

Usando el modelo electrostático simple, podemos derivar la presión efectiva producida por los electrodos en la película como una función de la voltaje aplicado [Pelrine et. al., 1995]. Esta presión, p , es:

$$p = \epsilon_r \epsilon_0 E^2 (V/t)^2 \quad (2)$$

Dónde ϵ_r y ϵ_0 son permitividad relativa del polímero (constante dieléctrica) y la permitividad del vacío, respectivamente; E es el campo eléctrico aplicado; V es el voltaje aplicado; y t es el espesor de la película. La presión efectiva en la ecuación 2 es el resultado de la compresión en el espesor y la tensión en las direcciones planas de la película, pero porque los dos modos se acoplan en una película fina, es más conveniente considerar que actúa la presión efectiva solo en compresión del espesor. La respuesta del polímero es funcionalmente similar a la de los polímeros electrostrictivos en que la respuesta está directamente relacionada con el cuadrado del campo eléctrico aplicado.

La deformación resultante producido en el polímero dependen de las condiciones de frontera y de las cargas en el polímero. Además, las deformaciones dependen del módulo de elasticidad del polímero, que pueden ser no lineales para elastómeros con grandes deformaciones. Una complicación adicional es que los polímeros se accionan a menudo con pre deformaciones. Tales pre deformaciones pueden ser anisótropos y por estas razones, no es posible escribir una ecuación general simple para la deformación resultante [Bar-Cohen, 2004].

Afortunadamente, grandes deformaciones son fáciles de medir por medios ópticos. En la Figura 10 se muestra la respuesta de deformación extremadamente alta que algunos diseños de actuadores hacen posible. Deformaciones de más de 100% se han observado en ambos elastómeros: acrílicos y de silicona. La Tabla 8 resume las respuestas de altas deformación representativas de los materiales que se han encontrado. Kornbluh et. al., [1999] demostró que la deformación contra el comportamiento del campo de los elastómeros de silicona es consistente con el modelo electrostático dada por la ecuación. La deformación de la película del polímero se puede utilizar de muchas maneras para producir músculos de accionamiento lineal. Por ejemplo, la película y los electrodos se pueden formar en un tubo (formando un rollo), estirados sobre un marco o laminados a un sustrato flexible para producir la flexión. La mejor configuración depende de la aplicación y las propiedades de la película [Bar-Cohen, 2004]. Varias configuraciones hechas por los autores se muestran en figura 11.

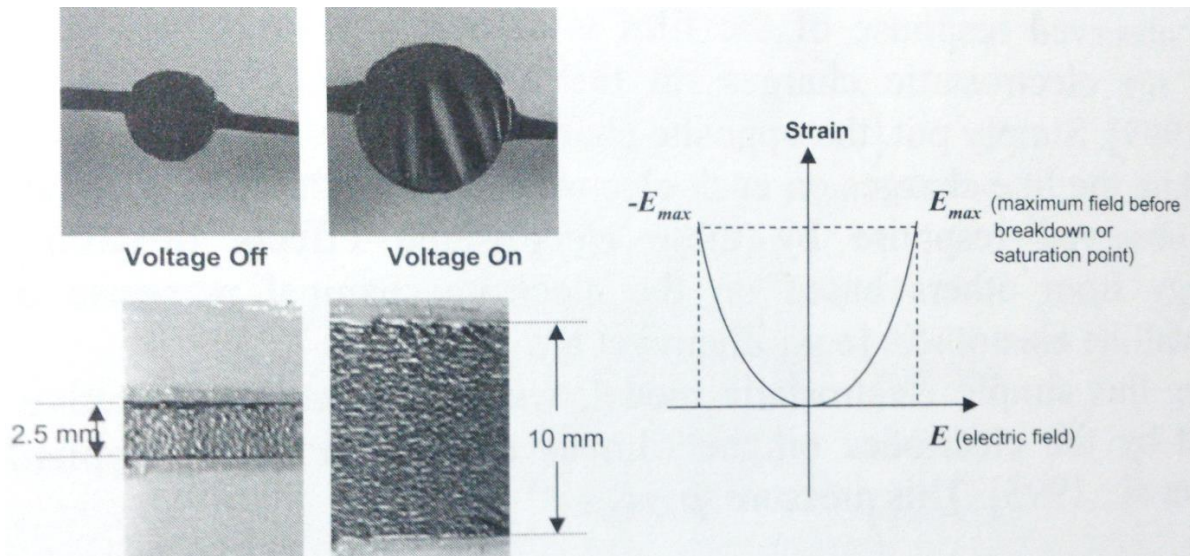


Figura 10. Respuesta de deformación de una capa de acrílico. En la parte de la izquierda, arriba se observa una película acrílica circular que se deforma con un voltaje activado, abajo una respuesta lineal acrílica. El área oscura es el electrodo y la película es transparente. En la parte de la derecha se observa la respuesta típica del espesor de una deformación plana aplicada a un campo eléctrico sin cargas externas [Bar Cohen, 2004].

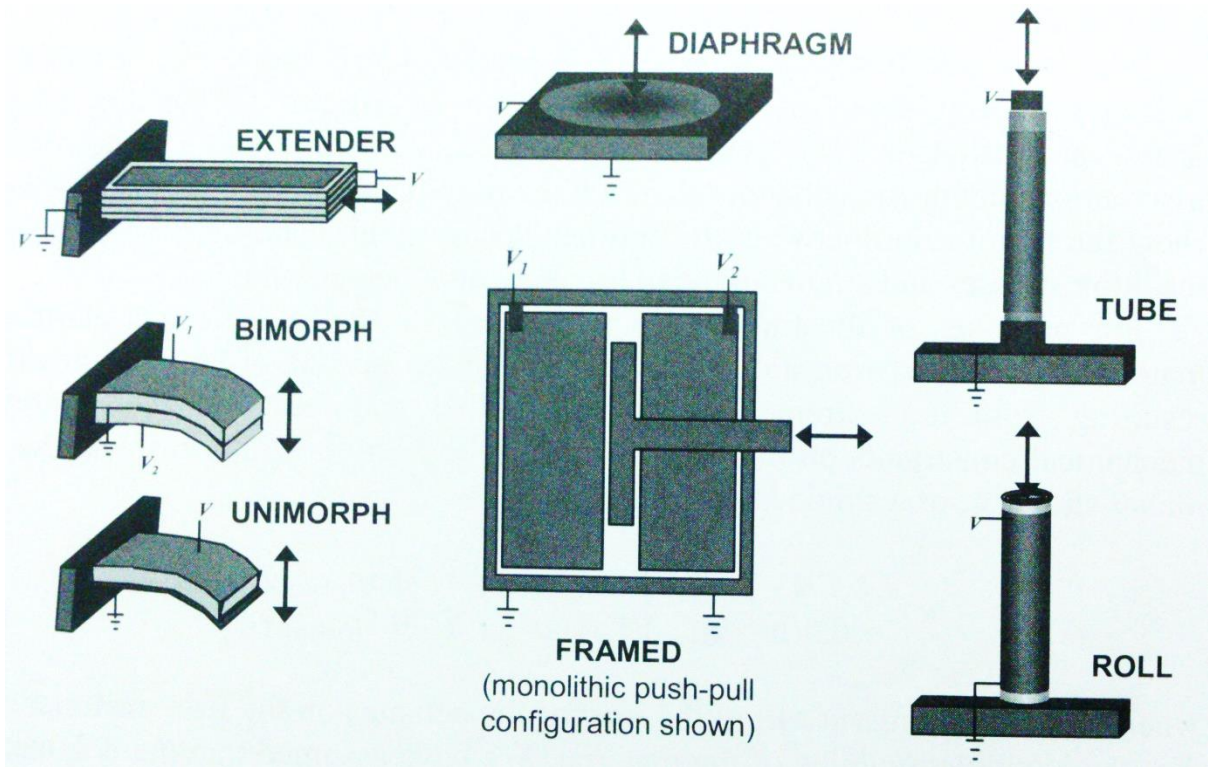


Figura 11. Configuraciones de los actuadores de elastómeros dieléctricos. A la izquierda se ve la configuración de “viga en voladizo”, en medio “diafragma” y a la derecha se aprecia en “rollo” [Bar Cohen, 2004].

Material	Deformación relativa del espesor (%)	Deformación relativa del área (%)	Prueba del Campo de Fuerza MV/m	Presión (MPa)	Energía elástica estimada e (MJ/m ³)
Respuesta circular					
Silicona A ¹	48	93	110	0.3	0.098
Silicona B ¹	39	64	350	3.0	0.75
Elastómero de acrílico ³	61	158	412	7.2	3.4
Respuesta lineal					
Silicona A ¹	54	117	128	0.4	0.16
Silicona B ¹	39	63	181	0.8	0.2
Elastómero de acrílico ³	68	215	240	2.4	1.4

Tabla 8. Respuestas de deformación (lineal y circular) de los electro elastómeros.

¹ Nusil CF19-2186, NuSil Corporation Carpinteria, California

² Dow Corning HS III, Dow Corning Corporation, Midlan, Michigan

³ 3M VHB 4910, 3M Corporation, St. Paul, MN

2.4. PROTOTIPOS DE ACTUADORES.

Varios prototipos o actuadores con polímeros electroactivos se han utilizado para demostrar la flexibilidad de la tecnología, para refinar las técnicas de fabricación, para identificar problemas potenciales y para la fiabilidad a largo plazo de la prueba. La mayor parte del trabajo hasta la fecha se ha centrado en estructuras relativamente simples en escalas de milímetros en tamaño con electrodos estampados, sin embargo, este tipo de tecnología tiene potencial para realizar actuadores complejos y de fases múltiples o dispositivos de múltiples grados de libertad [Pelrine et. al., 1998].

Los actuadores lineales se basan en procedimientos de fabricación simples en 2D. La configuración básica del actuador se puede apilar en paralelo para aumentar la fuerza producida o en serie para aumentar la carrera. En este sentido cada actuador es como el elemento activo de una sola fibra muscular.

El actuador lineal en la figura 12 se compone de dos capas de acrílico intercalados juntos. La configuración básica del actuador se compone de dos actuadores conectados en serie. Este enfoque permite actuadores más largos y delgados que

están más cerca de tener la forma a músculos naturales sin que no se sacrifique el acoplamiento de energía. Una ventaja de la construcción de dos capas es que el electrodo de alto voltaje puede ser sellado en el centro del actuador. Entonces es relativamente simple apilar varios actuadores en paralelo con el fin de producir la fuerza requerida [Bar-Cohen, 2004].

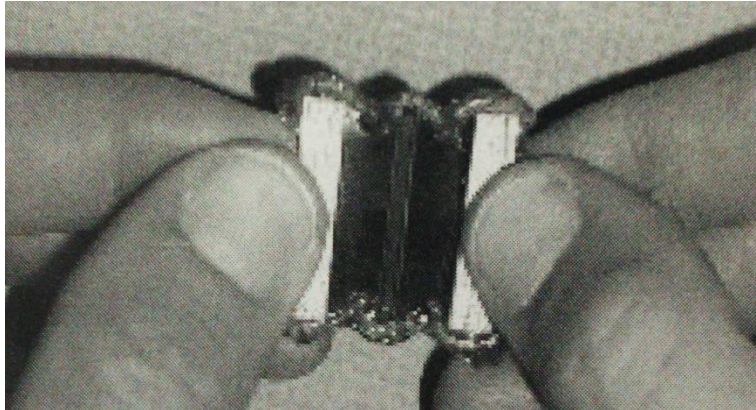


Figura 12. Músculo artificial lineal hecho de una película de acrílico [Bar Cohen, 2004].

Los actuadores como las que se muestran en la Figura 12 tienen una fuerza de salida de alrededor de 2 N, con una carrera de hasta 10 mm. Los actuadores miden aproximadamente 3 cm de lado, incluyendo las conexiones mecánicas. La masa de los actuadores es de aproximadamente 1.5 gr; sin embargo, la masa de la zona activa es sólo 0.12 gr . La densidad de energía específica de estos actuadores es diez veces más que los actuadores piezoeléctricos disponibles comercialmente. Actuadores similares se han producido de polímeros de silicona, aunque su deformación no es tan grande.

La Figura 13 se observa un actuador hecho de una película de silicona de una sola capa de 40 μm de espesor. Este actuador es de 7 cm de ancho y 3 cm de longitud (incluyendo conectores). Es capaz de una carrera libre de 5 mm y una fuerza de más o menos 1 N. Su masa es de 1 gr y la masa de la película activa es inferior a 0.1 gr.

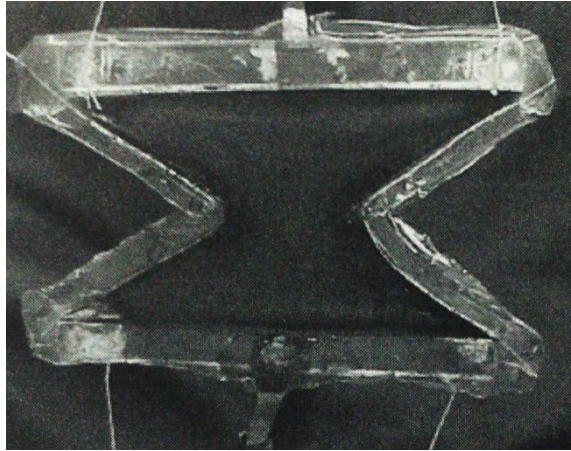


Figura 13. Actuador hecho de silicona [Bar Cohen, 2004].

Actuadores de rollo generan gran fuerza y una carrera en una geometría compacta. Los actuadores de rollo incorporan una amplia área de sección transversal y por lo tanto pueden producir una fuerza relativamente grande. Uno de los tipos de actuadores de rollo que más ha tenido éxito es el "rollo de resorte" (Figura 3). Este actuador se forman a partir de la película de acrílico que se estira a tensión y se enrolla alrededor de un resorte interno.

Los actuadores en forma de rollo se han hecho en un variedad de longitudes y diámetros con carreras máximas de hasta 2 cm y fuerzas de hasta 33 N.

Se espera que el máximo rendimiento de los dispositivos de elastómeros dieléctricos aumenten en gran medida con forme se mejoran los diseños, ya que estos dispositivos están todavía muy por debajo del máximo rendimiento medido de los polímeros.

La principal desventaja del actuador en rollo es que es más difícil de fabricar, puesto que ya no es una estructura plana. Además, el acoplamiento de energía de un rollo no es tan buena como la de un actuador plano, ya que sólo una dirección de deformación está acoplado a la carga. [Bar-Cohen, 2004].

2.5. ELECTRODO BASADO EN CARBON.

Los electrodos más utilizados para los elastómeros dieléctricos (DEAs) se basan en partículas de carbono y se pueden clasificar en tres principales variantes (Figura 14): las partículas sueltas de carbono simplemente se depositan sobre la membrana elastomérica; la grasa de carbono consiste en partículas de carbón dispersas en un medio viscoso, como el petróleo; y el conductor de caucho se forma por dispersión de partículas de carbono en un elastómero, que es reticulado después de que se ha aplicado sobre la membrana.

Polvo de carbono: Una de las principales ventajas del polvo a base de electrodos es que no contribuyen a la rigidez de la membrana en la que se aplican, debido a la ausencia de una fuerza de unión entre los aglomerados.

Los polvos de carbono sueltos (principalmente carbón negro y grafito), aplicado directamente sobre la membrana dieléctrica fueron el material de elección en los primeros días de DEAs, ya que permiten demostrar las grandes capacidades de deformación de estos actuadores suaves.

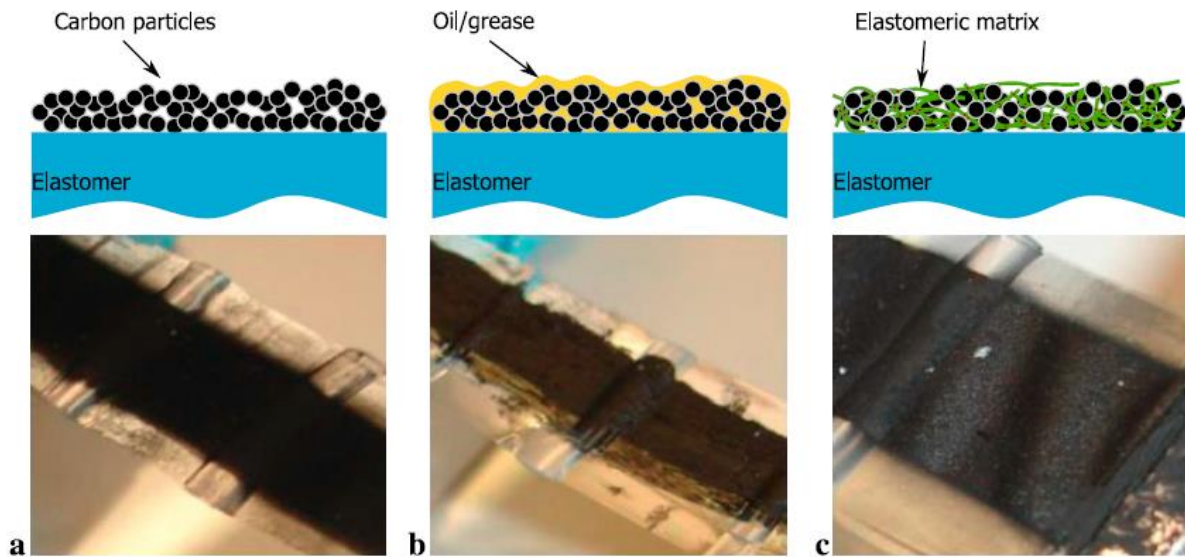


Figura 14. Los tres tipos principales de electrodos a base de carbón: (a) polvos de carbono sueltos consta de partículas de carbón negro (o grafito) directamente aplicado sobre la membrana de elastómero. (b) la grasa de carbono se compone de partículas de carbono dispersas en un aceite viscoso. (c) de goma conductiva consiste de partículas de carbono dispersas en un elastómero reticulado [O' Brien et. al., 2007].

Aunque los metales son intrínsecamente más conductores que el carbono, sus polvos tienen una tendencia a formar un aislante de capa de óxido en la superficie [Huang, 2002]. Además las partículas de metal son demasiado grandes para crear suficientes contactos y una mejor conductividad se puede obtener con partículas de carbono [Rwei et. al., 2002].

Los polvos metálicos rara vez se utilizan para DEAs, aunque algunos artículos informan sobre el uso de electrodos de grasa de plata [Toht et. al., 2002; K. Jung et. al., 2008]. La alta resistencia eléctrica de los electrodos basados en carbono no juegan un papel principal para los actuadores, siempre y cuando la constante de tiempo eléctrica del dispositivo siga siendo más pequeño que el ancho de la banda mecánica. Por ejemplo un 1 cm^2 y $40 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor de la DEA con una membrana de silicona tiene una capacitancia de aproximadamente 65 pF . Con electrodos cuya resistencia sería en $\text{M}\Omega$, pueden llegar hasta 1 kHz .

Además de ser bastante difíciles de manejar debido a su alta sensibilidad a las cargas estáticas, los polvos sueltos presentan varias desventajas: el mantenimiento de la cobertura total en grandes deformaciones es difícil [Pelrine et. al., 2000; Kornbluh et. al., 1999] y la vida útil del electrodo se limita debido a la posibilidad de las partículas conductoras para separarse desde el electrodo. En consecuencia, los electrodos con polvos sueltos se encuentran principalmente en combinación con adhesivos elastómeros de acrílicos (como VHB de 3M) como capas dieléctricas: como este material es intrínsecamente pegajoso, las partículas conductoras llegan a unirse a la superficie. Una excepción notable donde se utilizan electrodos de grafito en polvo suelto por combinación con un elastómero de silicona está en el proceso de multicapa [Schlaak et. al., 2005; Lotz et. al., 2011]. Pero a medida que cada electrodo está cubierto efectivamente por la siguiente capa dieléctrica, no se puede hablar estrictamente de polvos sueltos para este caso particular.

Grasa de carbón: Una manera de resolver los problemas mencionados anteriormente es unir los polvos en una matriz viscosa, tales como la grasa. Aunque es más fácil de manejar que los polvos sueltos y capaz de obtener deformaciones más grandes, mientras funcione como conductor, los electrodos de grasa de carbono también tienen desventajas: la grasa puede tener problemas de estabilidad a largo plazo causados por el secado o la difusión en la membrana dieléctrica, que puede causar cortocircuitos o inflamaciones en la elasto-membrana. Como cualquier material viscoso, la grasa también se arrastra bajo la gravedad, la cual afecta negativamente el tiempo de vida de estos electrodos, particularmente para dispositivos almacenados verticalmente. La ausencia de un estudio fiable sobre este tipo de electrodo (y DEAs en general) hace que sea difícil evaluar la importancia de estos factores. Además, la grasa de manera similar al polvo, puede ser objeto de la abrasión mecánica, lo que también afecta negativamente el tiempo de vida [Samuel Rosset et. al., 2012].

Goma conductiva: Por último, el carbón negro conductor se puede incorporar en una matriz de elastómero, tal como la silicona, el cual se cura después de aplicar el electrodo en la membrana con el fin de obtener un polímero de carbón conductor compuesto. Debido a que en ese caso el electrodo está unido a la membrana, es mucho menos propenso a la ablación o la migración del material del electrodo con el tiempo, lo que provoca positivamente impactos de esperanza de vida del electrodo. Sin embargo, debido de la matriz elastomérica, la contribución del electrodo a la rigidez del elastómero no se puede descuidar, en comparación con el polvo de carbono o grasa. Estos tipos de electrodos funcionan mejor para películas dieléctricas más gruesas, es decir, cuando el espesor del electrodo es insignificante en comparación con el espesor del elastómero dieléctrico [Pelrine et. al., 1998]. La rigidez de un elastómero de carbón negro compuesto es muy dependiente de la cantidad de partículas de relleno, que deben ser suficientemente altas como para estar por encima del umbral de percolación. El umbral de percolación es muy dependiente de la superficie del carbón negro, así como la matriz en la que se

dispersa y puede variar entre 1-24 % [Huang, 2007]. En la silicona, se ha observado una percolación umbral aproximadamente 6% para “Ketjenblack EC-300 J” de AkzoNobel, y de alrededor de 3% para “Ketjenblack EC-600 JD”. Con grafito (4206 de Merck) en “DowCorning Sylgard 184 se observó un umbral de percolación del 23% [Kofod et. al., 2001].

2.5.1 METODOS DE APLICACIÓN DEL ELECTRODO.

Mientras los prototipos simples se pueden fabricar sin mucha importancia respecto de la forma, la precisión y la homogeneidad del espesor de los electrodos, que simplemente se untan en la membrana elastomérica [O’ Brien et. a., 2010; Carpi et. al., 2003; Carpi et. al., 2004; Loverich et. al., 2006], la mayoría de los actuadores para aplicaciones comerciales requieren electrodos de una forma precisa, modelado en cm, mm o incluso en escala de micras. Varias técnicas pueden ser utilizadas para aplicar los electrodos de carbono en un elastómero dieléctrico (Figura 15), como se describe a continuación.

Shadow masking (máscara de sombra): Una máscara de sombra, o una plantilla se puede colocar en la membrana del elastómero para exponer selectivamente la superficie que debe ser recubierta con el material conductor [Pelrine et. al., 1998]. Si la homogeneidad del espesor y la reproducibilidad no es una principal preocupación, la solución conductiva puede ser simplemente aplicar el material conductor en la máscara con un cepillo, que se ha realizado para polvos sueltos y grasas de carbono [Pelrine et. al., 2000]. Para mejorar la uniformidad, el recubrimiento por pulverización puede ser utilizado en combinación con una máscara de sombra para realizar una fina capa uniforme sobre la membrana elastomérica. Para este proceso de pila automatizada, Schlaak et al. han puesto a prueba una capa de aerosol a través de una máscara de sombra tanto de polvo de grafito seco y grafito en suspensión de isopropanol [Schlaak et. al., 2005; Lotz et. al., 2011, Matysek et al., 2009].

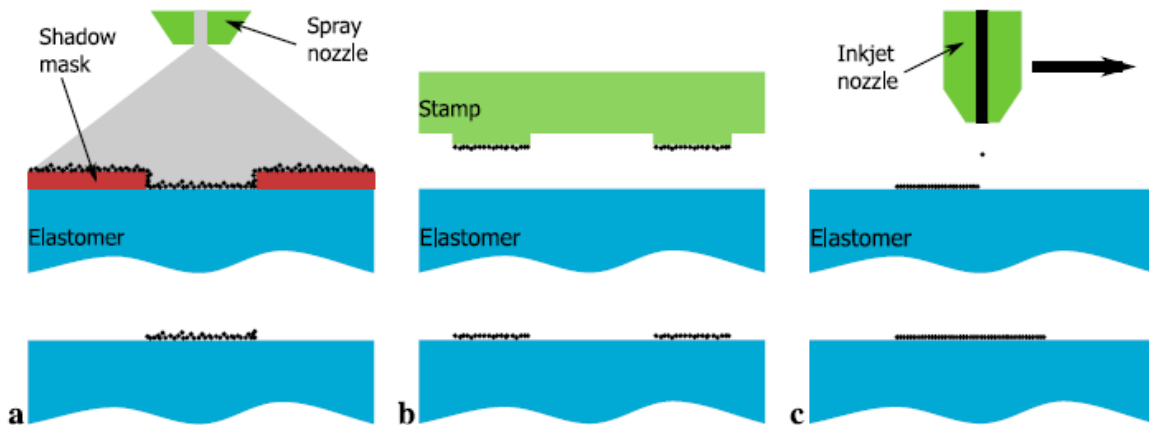


Figura 15. En esta figura se muestra las diferentes formas de aplicar el electrodo: (a) El uso de una máscara de sombra para proteger selectivamente parte de la membrana elastomérica. El electrodo de carbono puede entonces ser dispensado en la superficie. La máscara de sombra se retira posteriormente. (b) El uso de un sello de elastómero estampado para recoger el material del electrodo y aplicarlo sobre la membrana elastomérica. (c) El uso de técnicas de impresión convencionales, tales como impresión de inyección de tinta.

Con este proceso, el cual alterna entre la aplicación de una capa de silicona por un recubrimiento centrifugado, la reticulación activada por calor de la silicona, y la deposición posterior de los electrodos, se ha desarrollado un método de producción eficiente, que permite construir actuadores de hasta 100 capas con un tiempo de producción de 5 minutos por capa, lo que demuestra que el electrodo de carbono también puede ser utilizado para mayor escala y aplicaciones comerciales.

Una desventaja de utilizar una plantilla para definir la forma del electrodo es el contacto entre la máscara y la membrana del elastómero, particularmente en el caso de una membrana delgada suspendida. Si la aplicación de la máscara y la pulverización del electrodo se puede realizar rápidamente, se debe remover la máscara lentamente y con cuidado con el fin de no dañar la membrana pegada en la máscara. Dar un pequeño espacio entre la máscara y la membrana no es aconsejable porque el flujo de aire desde el sistema de revestimiento por pulverización puede deformar la membrana, conduciendo a una pérdida de resolución [Samuel Rosset et. al., 2012].

Estampado: Las estructuras modeladas también se pueden obtener al estampar el electrodo conductor en la membrana dieléctrica. Un sello suave con el patrón deseado se fabrica para este tipo. Pequeñas estructuras y una buena resolución se pueden obtener con este método. El estampado de carbón negro en polvo se hace posible con el uso de el adhesivo VHB como capa dieléctrica: lo pegajoso de la superficie asegura la transferencia de las partículas de carbón de la estampa a la membrana y la fija en la superficie de elastómero. Comercialmente estas técnicas

de estampado están disponibles también para ser utilizados con grasa de carbono o de caucho conductor [Samuel Rosset et. al., 2012].

Técnicas de impresión: Todavía hay espacio para el desarrollo de técnicas eficaces, rápidas y de alta resolución de modelado para electrodos basados en carbono. Los tres tipos principales de electrodo de carbono se pueden preparar en forma de una tinta conductora y la mayoría de las técnicas desarrolladas para la industria de la impresión, incluyendo la impresión de inyección de tinta y procesos de serigrafía, se pueden aplicar al patrón de electrodos conductores en elastómeros. El polímero de célula solar, por ejemplo, es usada para estos métodos de impresión para la fabricación de dispositivos flexibles [Krebs et. al., 2009]. Entre los métodos de impresión estándar, la impresión de inyección de tinta es particularmente interesante, ya que es un método donde no hay contacto y por tanto, se adapta bien para las finas membranas. Además este es un método versátil debido a que la forma del electrodo se puede adaptar a voluntad simplemente modificando el mapa de bits que se utiliza para imprimir el electrodo. Esto hace que sea una muy interesante ventaja sobre las máscaras de sombra, porque los diferentes diseños se pueden imprimir de forma rápida, lo que permite la optimización de la forma de electrodo. Las impresoras con múltiples cabezales de impresión son capaces de obtener un gran rendimiento, esto hace que esta técnica sea atractiva para la producción de gran volumen comercial. Una dificultad importante reside en el desarrollo de una tinta apta para este tipo de aplicaciones de EAP, que no es una tarea sencilla. Los parámetros están limitados por un gran número de factores: la viscosidad del líquido, la tensión superficial y la presión. Por ejemplo, la impresora Dimatix DMP-2800 de Fujifilm requiere tintas con viscosidades entre 10 y 12 mPa s, y tensión de superficie entre 22 y 33 mN/m. Para evitar la obstrucción en los pequeños orificios de boquilla (típicamente 10-100 μm dependiendo fabricante), las partículas de carbono deben ser dispersados cuidadosamente y no se permite la sedimentación. La velocidad de evaporación de la tinta no debe ser demasiado alta para evitar la obstrucción de la boquilla. El ángulo de contacto entre la tinta y el elastómero deben ser lo suficientemente baja para obtener buena humectación. Si el ángulo de contacto es demasiado alta, corre el riesgo de que las gotitas adyacentes se fundan y formen una gran piscina de tinta, causando una dramática pérdida de resolución. Esto es especialmente problemático con siliconas que tienen una superficie muy baja energía. Diferente tratamientos superficiales (activación de plasma, exposición a rayos UV) pueden ayudar a aumentar temporalmente la energía superficial. La tasa de evaporación de la tinta debe ser controlada a fin de evitar la efecto "mancha de café", que es causada por el movimiento de la tinta a la periferia de la gotita, dando lugar a un recubrimiento no uniforme una vez que la capa está seca. Este efecto puede evitarse eligiendo cuidadosamente los disolventes utilizados para la formulación de tinta, usando una mezcla de disolventes con diferentes presiones [Tekin et. al., 2004].

CAPITULO 3. CONSTRUCCION Y CARACTERIZACIÓN MECANICA DE ACTUADORES POLIMEROS ELECTROACTIVOS.

3.1. CONSTRUCCION.

Este proyecto se basó en la realización de un banco de pruebas hecho de perfiles estructurales de aluminio con el fin de montar fácilmente los sensores de presión y de desplazamiento que evaluarán dos actuadores lineales en forma cilíndrica que contendrán la configuración de multicapa, cada sensor es controlado por un arduino. El polímero electroactivo con el que se ha realizado las pruebas es de la marca Sista Dow Corning silicona (elastómero dieléctrico) con una fuente de alimentación EMCO C50 que se encargó de producir los voltajes requeridos para las pruebas. A continuación se darán más detalles de la construcción.

Se decidió construir el actuador en multicapas por la relativa facilidad de construcción que se presenta ante el actuador de tipo rollo, además que el actuador trabajara a compresión, debido a que el elastómero dieléctrico se contrae al meterle una carga eléctrica, lo que hace que el material se adelgace y con esto permita un movimiento de compresión en el actuador.

3.1.1. BANCO DE PRUEBAS.

Los actuadores que se construyeron se realizaron para adaptarse al actuador de tipo multicapa, debido a que este tipo de actuadores tienen mejores características a comparación de otros actuadores.

El banco de pruebas primero se diseñó en SolidWorks para mandar a hacer las piezas resultantes en acrílico, pero para aprovechar el material del centro de investigación y ahorrar costos, se descartó esta opción y se utilizó perfiles estructurales de aluminio.

Se cortaron con arco y segueta, y posteriormente se mandó a rectificar, en total se hicieron 13 barras, 4 barras de 29 cm y 9 barras de 14 cm de largo, tal como podemos apreciar en las figuras 16, 17 y 18.



Figura 16. Cortando la barra estructural de aluminio para obtener una pieza de 14 cm.



Figura 17.



Figura 18. Corte de la estructura de aluminio para generar una pieza de 29 cm.

Posteriormente se compró un perfil en “L” y una varilla de 1.2 cm de ancho, tanto el perfil como la varilla son de acrílico.

El perfil se obtuvo con la finalidad de obtener una pieza de 2 cm de ancho para poder ensamblar el banco de pruebas en las uniones de las barras con diferentes tamaños, en total se cortaron 8 piezas. La varilla se cortó para conseguir una pieza de 12 cm de largo para ser usada como el vástago del actuador.

Como el corte fue con segueta y arco, el corte no quedó 100% recto, entonces se utilizó una lija para poder resolver dicho problema, tal como se muestra las imágenes 19, 20 y 21.



Figura 19. Perfil en “L” lijado.

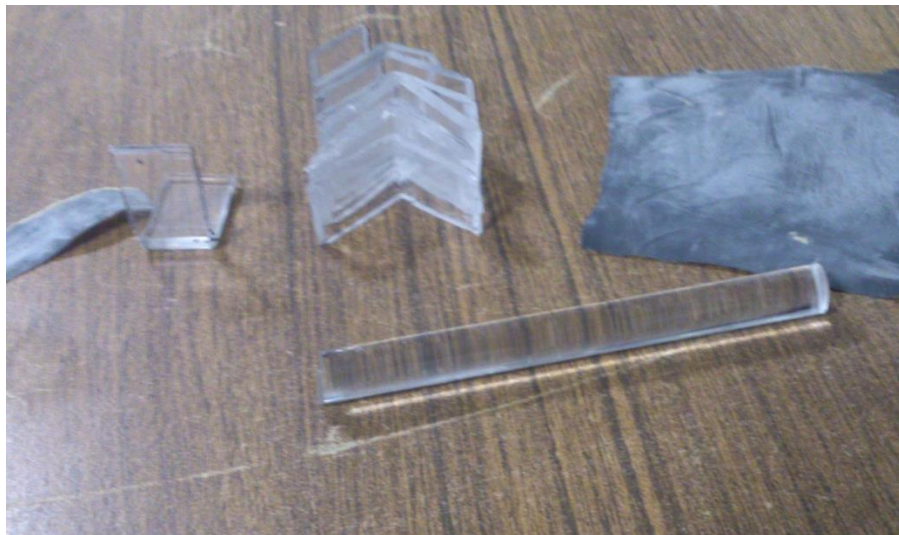


Figura 20. Perfil en “L” y varilla de acrílico acabados de lijar.



Figura 21. Esta imagen muestra las 8 piezas que se obtuvieron del perfil en “L”.

Con el taladro de banco que hay en el laboratorio de mecánica se perforaron todas las barras de aluminio obtenidas anteriormente para poder atornillarlos después (Figura 22 y 23), también los perfiles en “L” se perforaron (Figura 24). El corte del acrílico tuvo que ser con cuidado y con mucha delicadeza debido a que si la broca bajaba rápidamente, la pieza de acrílico se cuarteaba y después se rompía, estos pasó dos ocasiones y se tuvo que cortar otra vez el perfil en “L” para compensar las piezas rotas.



Figura 22. Proceso de taladrado de la barra estructural de aluminio (se arroja un poco de agua para que no se caliente el material).



Figura 23. Ultima barra perforada.



Figura 24. En esta imagen se acomoda el perfil en "L" en el lugar donde es preciso abrir un agujero.

Se compraron tornillos y tuercas para poder unir las barras de aluminio, primero se ensambla la parte superior e inferior de la estructura cuadrática planeada, donde se utilizaron las barras de 14 cm de largo para formar dicha estructura (figura 25 y 26).



Figura 25. Ensamblando la parte inferior del banco de pruebas.



Figura 26. Parte superior del banco de pruebas.

Una vez ensambladas estas partes de la estructura se prosiguió a unir las con las barras de 29 cm de largo y con esto ya se tenía la estructura base del banco de pruebas (figura 27, 28 y 29).



Figura 27. En esta imagen se atornillan las barras estructurales.



Figura 28. Unión de las barras de 14 y 29 cm.

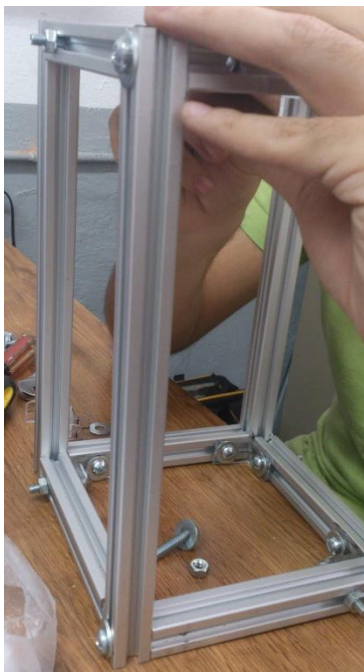


Figura 29. Estructura del banco de pruebas.

Se cortaron otras dos barras de 14 cm para colocarse en la parte de en medio del segmento inferior y superior de la estructura, debido a que servirán como base para la colocación de dos placas de acrílico donde ira montado el actuador (parte inferior) y el sensor de movimiento (parte superior), se tuvo que hacer una rosca en la parte del agujero de la barra estructural de aluminio con un tornillo para que pudieran unirse con las demás piezas (Figura 30 y 31).



Figura 30. Realizando una rosca a la barra estructural de aluminio.



Figura 31. Vista de la barra estructural después de atornillarla.

Se compró un tubo de acrílico con un diámetro de 5 cm y con un espesor de 3mm, se cortó y se lijó para obtener dos pedazos de tubo de 9 cm de largo (Figura 32), después a dos pequeñas placas circulares de 5 cm de diámetro se les hizo un agujero (el agujero tiene el mismo diámetro de la varilla de acrílico utilizada para el vástago) con el taladro de banco.

La varilla mencionada anteriormente se pegó con un adhesivo en la parte central de una placa circular de 4.4. cm de diámetro, con el objetivo de crear el pistón del actuador (Figura 33). Posteriormente ya que estaban unidas estas piezas, en la parte superior del vástago se le abrió un agujero con el taladro (Figura 34) para atornillarle una placa de 7.2 x 5.8 cm con el fin de montar sobre esta placa el sensor de presión, una vez realizado esto, se pegaron las placas circulares con el tubo de acrílico formando así el actuador (Figura 35 y 36).

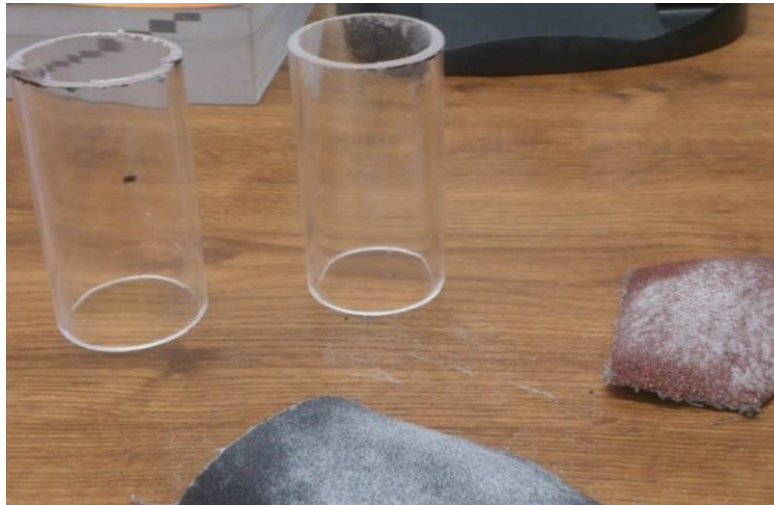


Figura 32. Tubos de acrílico de 9 cm.



Figura 33. Pistón del actuador.



Figura 34. Perforando el tubo del vástago.



Figura 35. En esta imagen se muestra el actuador listo para ensamblarse.

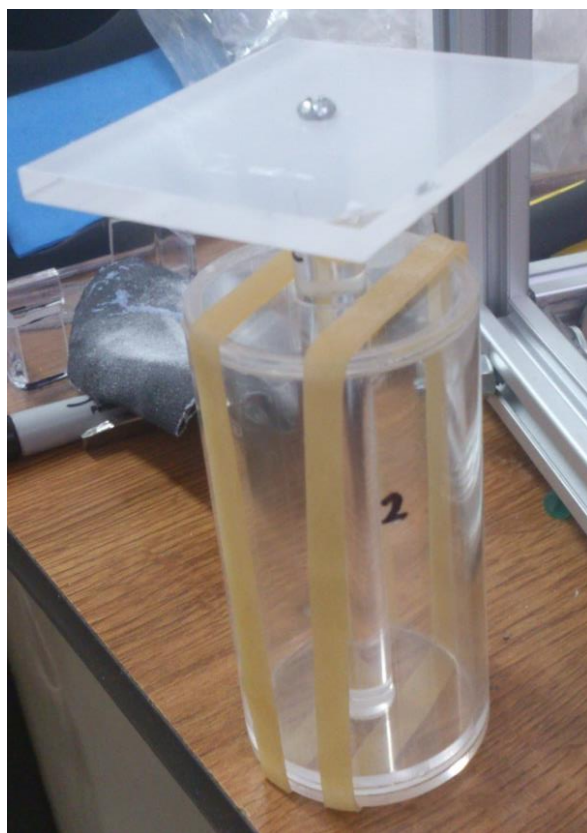


Figura 36. Actuador terminado.

De una placa de acrílico de 8.5x12.5 cm y con un espesor de 0.5 cm, se le pegaron 4 pequeños pedazos sobrantes de acrílico, de tal modo que ayuden a sostener el actuador cuando este encima de esta placa, además que se le abrió dos agujeros para poder atornillarla a la base de la estructura cuadrática del banco de pruebas (Figura 37 y 38), terminado esto se concluyó con la construcción del banco de pruebas (Figura 39).

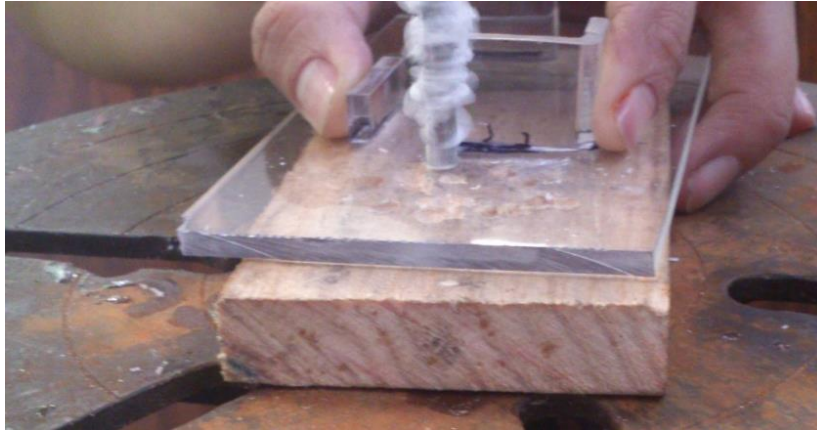


Figura 37. Placa de acrílico cuya función es sostener el actuador.

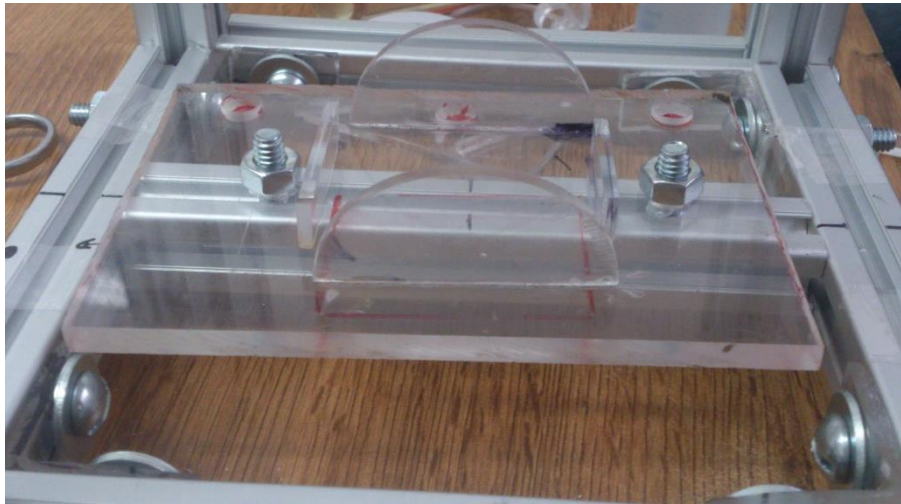


Figura 38. Placa de acrílico ya montada en el banco de pruebas.

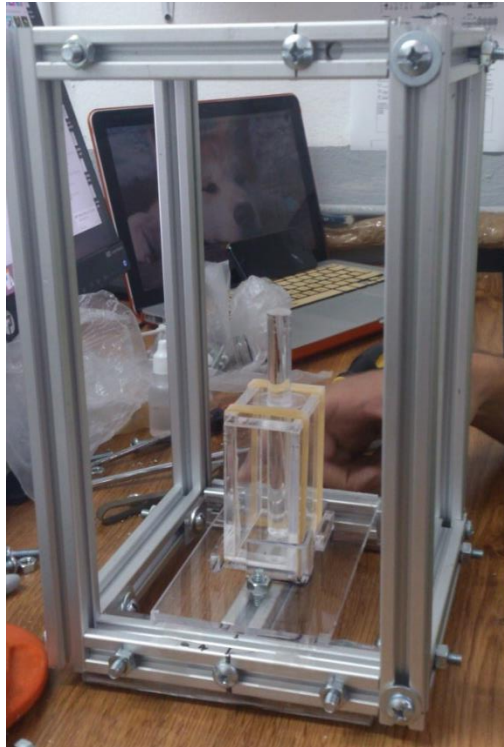


Figura 39. En esta imagen se puede apreciar la estructura del banco de pruebas terminado en el cual está montado un actuador de forma cuadrada.

3.1.2. FUENTE DE ALIMENTACION

Lo que da movimiento a los actuadores de polímeros electroactivos son las cargas de los electrodos que se generan al recibir altos voltajes, por eso fue necesario conseguir carbón mineral en grafito y una fuente que genere voltajes en rangos de kV.

Buscando entre varios convertidores de corriente, el más adecuado para esta tarea es el convertidor “EMCO C50”, debido a que es una fuente de alimentación de alta tensión regulable. Este convertidor arroja voltajes de salida que van de 0 a 5000 con un amperaje de 0 a 0.2 mA (Figura 40). Para que pueda funcionar, se conecta a una fuente de 12 V, además que tiene una entrada de voltaje, si la entrada de voltaje se alimenta con 0.1 V, el convertidor arrojará 100 V, si la entrada es de 1 V, arrojará 1000 V y así respectivamente.

Esto nos sirve para evaluar el comportamiento del material en el rango de voltajes que este dispositivo maneja, iniciando en 0 con escalas de 0.5 kV hasta llegar a 5 kV. No se trabajarán con voltajes más altos que 5000 V debido a que puede conducir al material a su estado de ruptura.



Figura 40. Convertidor EMCO C50.

3.1.3. ELASTOMERO DIELECTRICO.

La silicona es el elastómero dieléctrico con el cual se decidió trabajar, debido a que en proyectos anteriores se ha demostrado que tanto la silicona como el acrílico son buenos materiales de trabajo para la construcción de actuadores de polímeros electroactivos, además que para este proyecto, el acrílico se ha venido trabajando con anterioridad y se necesitaba otro material con el cual generar una respuesta diferente.

Al inicio se pensó en trabajar con Dow Corning 732 cuya constante dieléctrica es de 2.8 y el modulo elástico es de 325 psi, pero debido a la dificultad de conseguir este material debido a que no es comercial, se descartó. Entonces se buscaron siliconas comerciales, las cuales fueron: Dow Corning f109 de uso general, Dow Corning f107 para uso de vidrios y aluminios, y Dow Corning 736 sellador de altas temperaturas.

Las características son las siguientes:

Para Dow Corning f109.

Propiedades.	
Densidad	1.02 g/ml
Olor	Ácido acético
Dureza	>18
Módulo de elasticidad	250 psi
Alargamiento a la ruptura	>350 % (ASTM D412)
Extrusión	370 g/min

Tabla 9. Propiedades de Dow Corning f109 (Propiedades obtenidas de www.dowcorning.com).

Para Dow Corning 736.

Propiedades.	
Densidad	1.03 g/ml
Olor	Ácido acético
Dureza	26
Módulo de elasticidad	325 psi
Alargamiento a la ruptura	600%
Extrusión	390 g/min

Tabla 10. Propiedades de Dow Corning 736 (Propiedades obtenidas de www.dowcornign.com).

Para la silicona Dow Corning f107 no se encontró la tabla de propiedades debido a que debes tener una cuenta en la página de internet de Dow Corning para que te proporcionen más datos del producto. Cabe mencionar que la constante dieléctrica de los silicones se tomó como referencia de 2.8 debido a que no se menciona en las tablas de las propiedades (se tomó como referencia 2.8 debido a que otras siliconas tienen este dato como constante dieléctrica).

Para hacer las capas de silicona se realizó un molde, primero se diseñó en Solidworks y después se mandó a hacer en acrílico, este diseño consiste en tres piezas de acrílico que forman un molde donde realizar capas circulares de silicona con un diámetro de 5 cm y un espesor de 0.5 mm de diámetro, tal como se muestra en la figura 41.

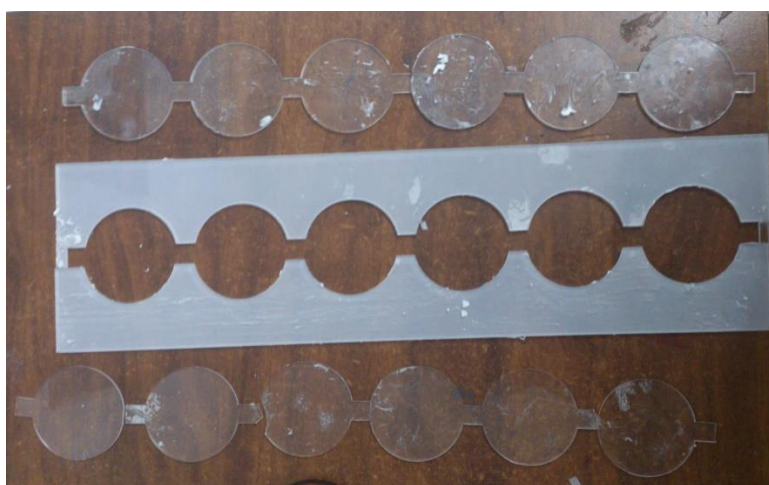


Figura 41. Molde de capas de silicona.

3.2. CARACTERIZACION

Al obtener el banco de pruebas totalmente construido, se hizo la conexión necesaria para poder probar el funcionamiento del sensor de presión. Un arduino se utilizó para poder recabar los datos. Se consiguió unas masas calibradas de diferentes pesos, donde en intervalos de tiempos se tomaba el dato que arrojaba el sensor al dejar caer suavemente la masa sobre este, tal como podemos ver en la figura 42. En la tabla 11 podemos apreciar los datos del sensor que arrojó al dejar que la masa interactuara sobre este, una vez dejando caer la masa, se esperó 10 segundos a que los datos que arrojaba el sensor se estabilizaran.

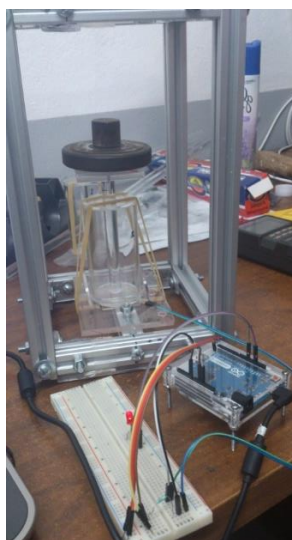


Figura 42. Pruebas de funcionamiento del sensor de presión.

Prueba 1	
Masa (gr)	Dato Arrojado por el Sensor.
291	313.5
373	360
473	439
511	443
615	495

Tabla 11. Datos de la Prueba 1.

Prueba 2	
Masa (gr)	Dato Arrojado por el Sensor.
291	335
373	399
473	450
511	477
615	508

Tabla 12. Datos de la Prueba 2.

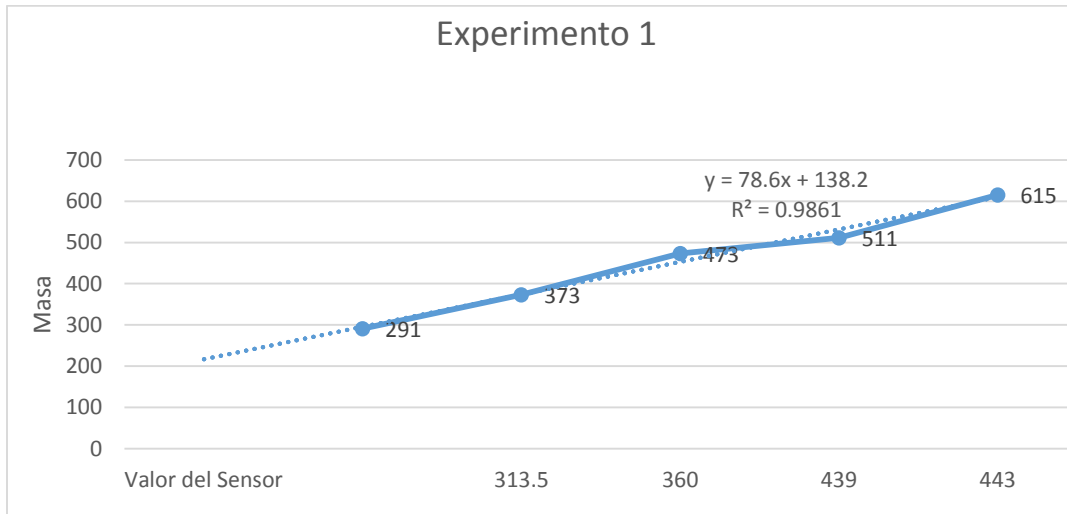


Figura 43. Gráfica de la prueba 1.

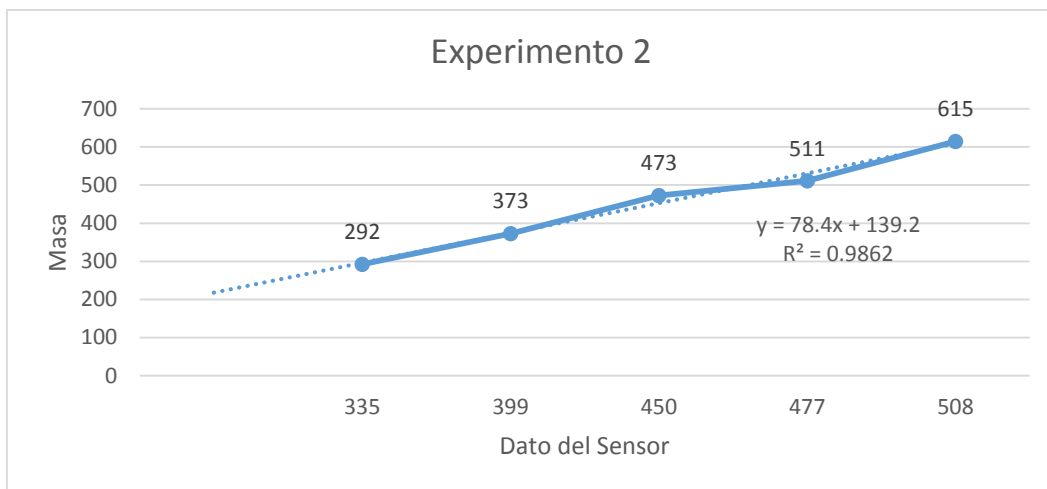


Figura 44. Gráfica de la prueba 2.

Como pudimos observar el comportamiento de la gráfica tiende a ser lineal, con una pequeña variación en el tercer punto, el coeficiente de determinación resulto de 0.98 el cual resulta tener una muy buena calidad del modelo para replicar los resultados.

Una vez hecho pruebas con el sensor de presión, se decidió hacer una prueba con una cinta de acrílico 3 M 4910 para poder apreciar el movimiento del actuador sin añadirle el sensor de desplazamiento. Esta prueba se realizó con una configuración en multicapa con cuadros de 1x1 pulgadas, se le pego al acrílico un shadow masking hecho de acetato para una correcta distribución del carbón, además que también ayudo a que las capas de acrílico se pegaran unas con otras debido a que

cuando se le distribuye carbón, estas capas ya no se adhieren entre ellas, al terminar de realizar la conexión con el convertidor se prosiguió en aplicarle voltajes de 0 a 5 kV (Figura 45 y 46).

Una vez aplicando los voltajes, fue hasta llegar a 3 kV que el actuador empezó a lanzar chispas haciendo corto en los extremos del acrílico.

Se hicieron otras dos configuraciones más con el mismo resultado, se concluyó que el acrílico al estar manchado de carbón en los extremos, las dos cargas entraban en contacto provocado un corto circuito.

Después se tomó una capa individual de acrílico y se le aplico un voltaje hasta llegar a los 5000 V, pero no se percibió movimiento alguno, debido a que a pesar que el espesor del acrílico era de 1 mm, no era lo suficientemente pequeño como para permitir la interacción de las cargas como se pensaba. Además que entre más pequeño sea el espesor, la presión ejercida sobre el polímero será mayor, esto se demuestra en la ecuación 2 descrita anteriormente, donde el espesor es inversamente proporcional a la presión Maxwell. Por eso se decidió hacer pruebas pero con la capa del polímero estirada para reducir el espesor.

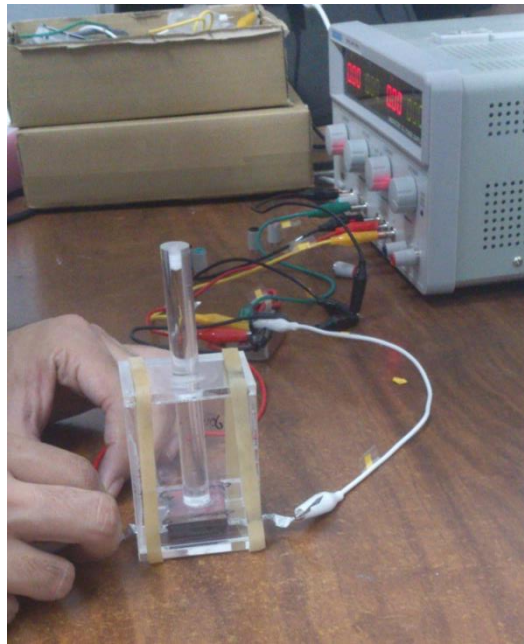


Figura 45. Pruebas con cinta de acrílico 3 M4910.

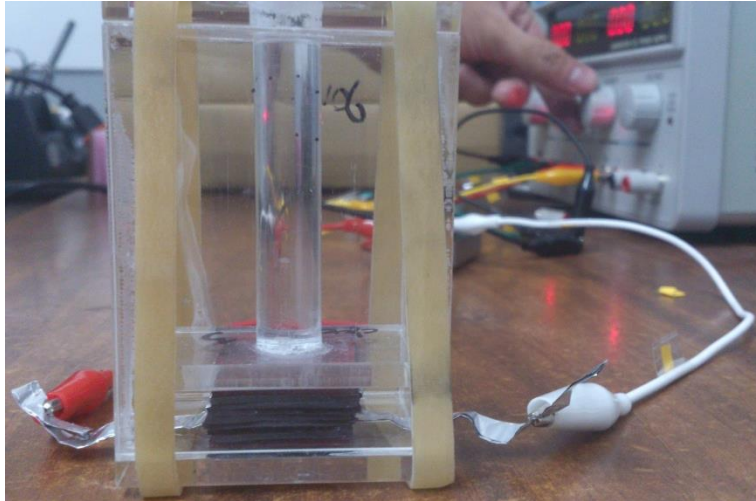


Figura 46. Imagen donde se muestra al actuador siendo aplicado con un voltaje.

Realizadas estas pruebas, se prosiguió a formar siliconas en el molde construido y se evaluó el cambio de área y el tiempo de respuesta al aplicarle un voltaje a los tres diferentes tipos de siliconas, cada prueba se hizo con capas individuales de silicona con las medidas especificadas anteriormente (diámetro de 5 cm con un espesor de 0.5 mm).

Primero se evaluó el cambio de área, para ello, se cortó el tubo de 5 cm de diámetro en varias piezas con el fin de obtener una pequeña base para poder montar la capa de silicona estirada (figura 47).



Figura 47. Pequeñas bases para montar una capa de silicona estirada.

Esta prueba se basó en estirar la capa de silicona de 5 cm a 7.2 cm y pegarla a la base de acrílico, esto adelgazo el espesor de 0.5 mm a 0.22 mm. Una vez pegada a la base se le coloco una máscara de sombra de acetato para colocar el carbón mineral distribuido uniformemente tanto en la cara superior como inferior de la capa de silicona, primero se distribuyó el carbón en forma circular, después en forma cuadrática. Se cortó dos pedazos de papel aluminio que sirvieron para hacer una conexión entre el electrodo y el convertidor. El rango del voltajes que se le aplico fueron de 0 a 4.5 kV y de 0 a 5 kV con aumentos de 0.5 kV. Primero se evaluó la silicona Dow Corning f109, después Dow Corning f107 y por ultimo Dow Corning 736.

Para evaluar este cambio de área, justamente cuando se le aplicaba un aumento de voltaje se le tomaba una foto, después de completar el rango de voltaje, las imágenes se exportaban a "SolidWorks", después se trazaba con líneas el contorno del carbón y se medía el área resultante de este trazo.

Las siguientes figuras muestran la silicona Dow Corning f109 con el carbón distribuido circularmente y el voltaje máximo que se le aplico fue de 4.5 kV.

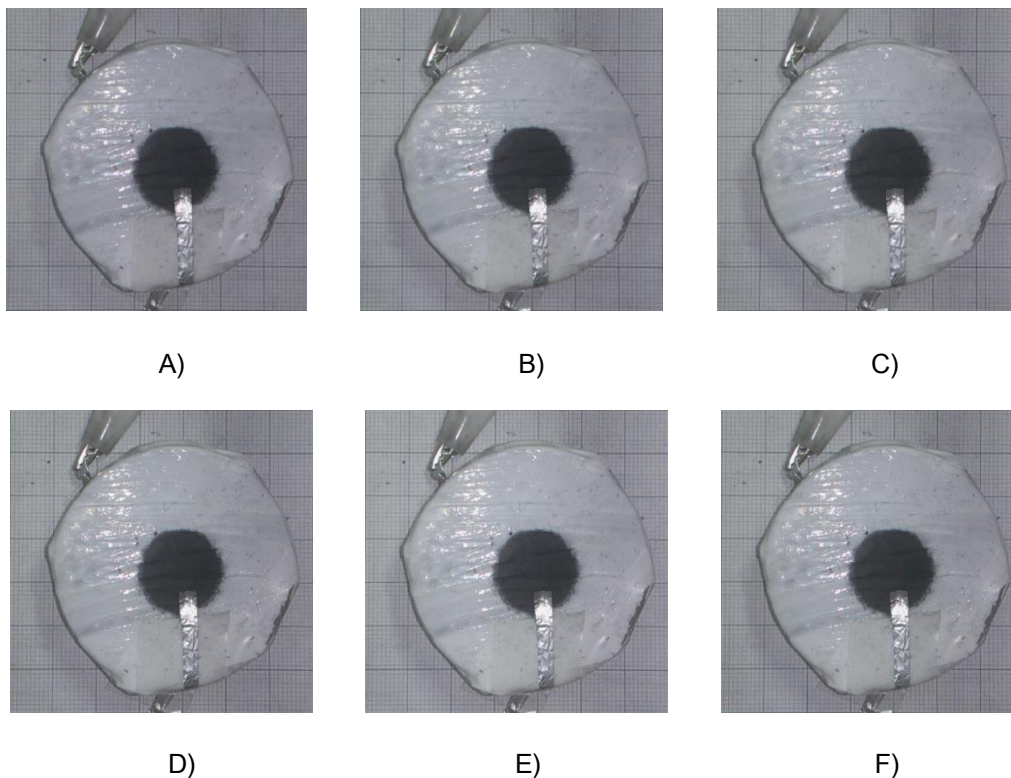


Figura 48. A) Imagen de la capa a 0 kV, B) imagen de la capa a 2.5 kV, C) imagen de la capa a 3 kV, D) imagen de la capa a 3.5 kV, E) imagen de la capa a 4kV, y D) imagen de la capa a 4.5 kV.

Voltaje (kV)	Área (cm ²)
0	2.61
0.5	2.64
1	2.65
1.5	2.66
2	2.67
2.5	2.71
3	2.72
3.5	2.72
4	2.69
4.5	2.73

Tabla 13. Datos de la prueba 1 de la evaluación del área.

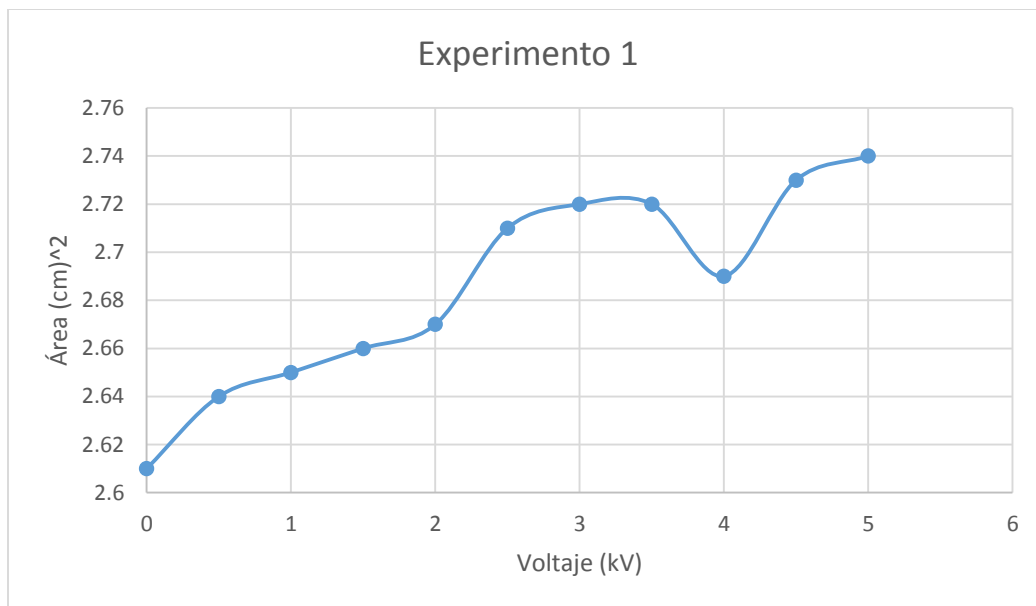


Figura 49. Gráfica de los datos obtenidos en la prueba 1.

El segundo experimento se realizó distribuyendo el carbón en forma cuadrada para dibujar el contorno del carbón de manera más precisa, además, al igual que la anterior prueba, solo se le aplicó hasta 4.5 kV.

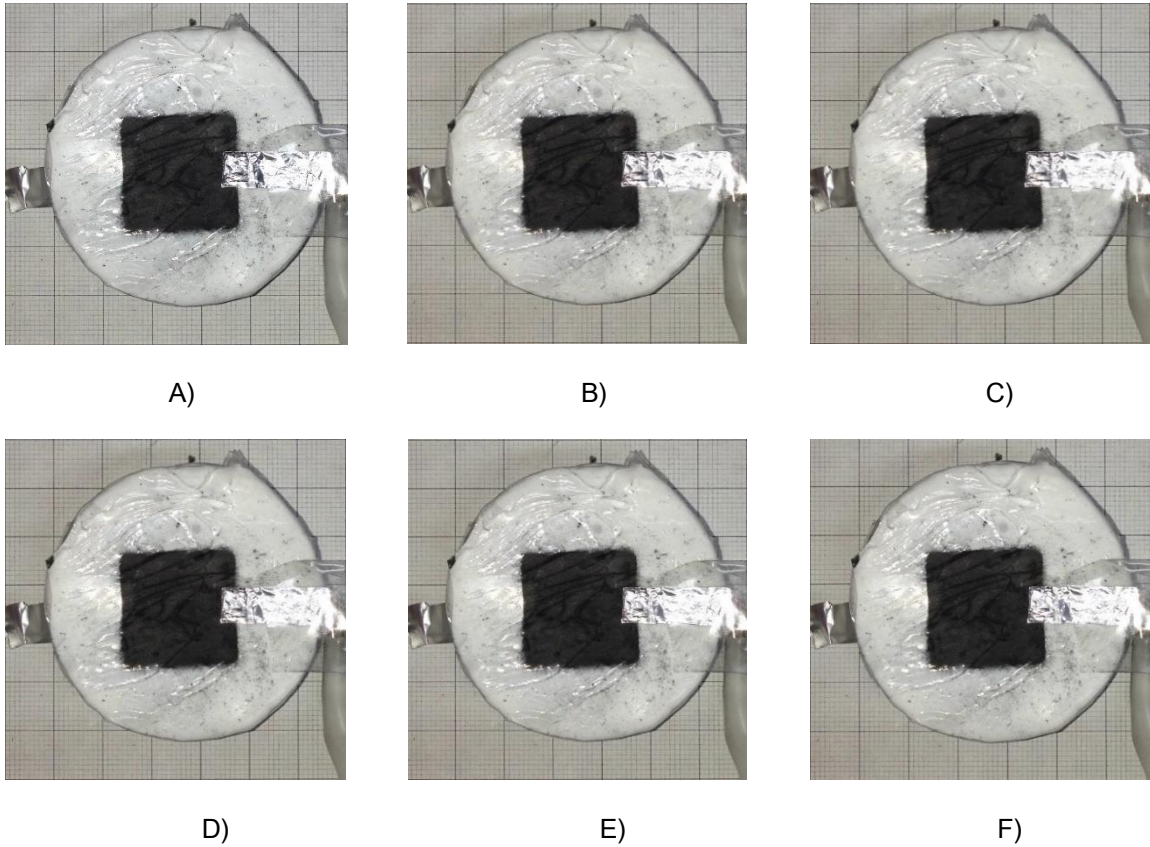


Figura 50. A) Imagen de la capa a 0 kV, B) imagen de la capa a 1 kV, C) imagen de la capa a 2.5 kV, D) imagen de la capa a 3.5 kV, E) imagen de la capa a 4 kV, y F) imagen de la capa a 4.5 kV.

Voltaje (kV)	Área (cm ²)
0	5.38
0.5	5.48
1	5.49
1.5	5.55
2	5.52
2.5	5.57
3	5.56
3.5	5.63
4	5.65
4.5	5.71

Tabla 14. Datos de la prueba 2 de la evaluación del área.

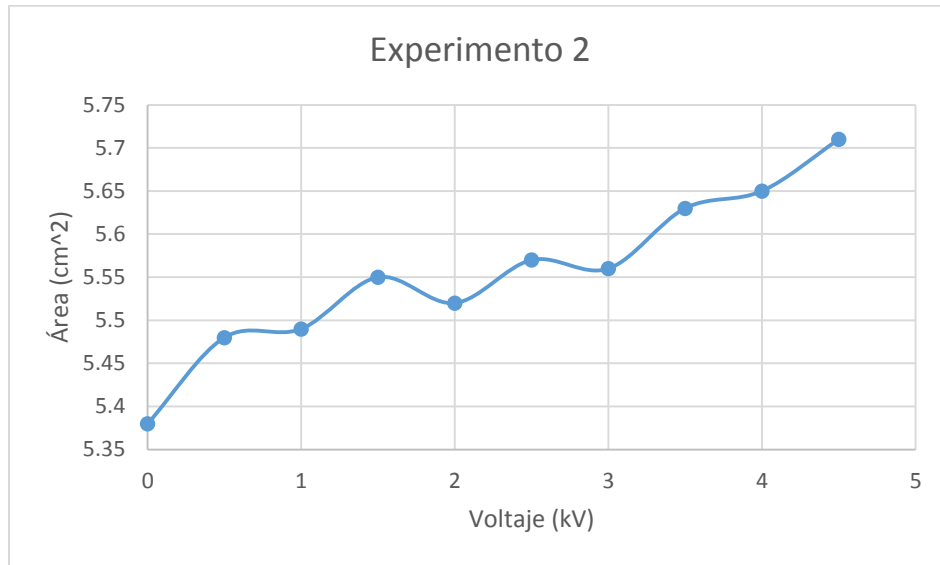


Figura 51. Gráfica de los datos obtenidos en la prueba 2.

Para la siguiente prueba se utilizó la silicona Dow Corning f107.

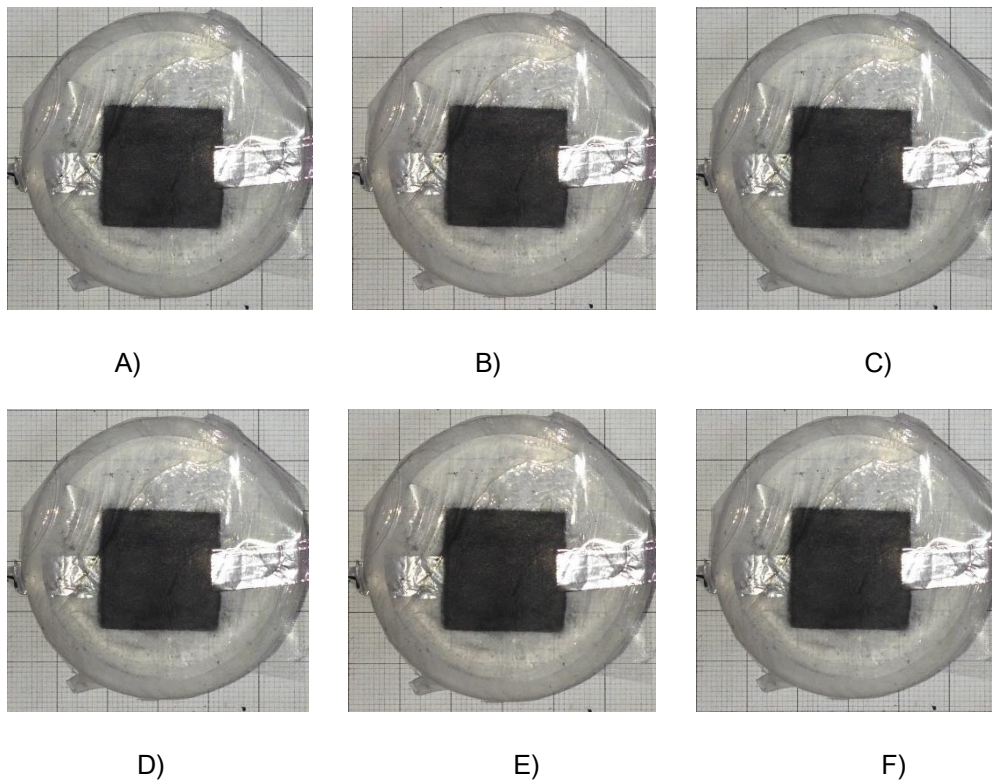


Figura 52. A) Imagen de la capa a 0 kV, B) imagen de la capa a 1 kV, C) imagen de la capa a 2.5 kV, D) imagen de la capa a 3.5 kV, E) imagen de la capa a 4 kV, y F) imagen de la capa a 4.5 kV.

Voltaje (kV)	Área (cm ²)
0	5.55
0.5	5.55
1	5.59
1.5	5.61
2	5.62
2.5	5.64
3	5.64
3.5	5.65
4	5.65
4.5	5.74

Tabla 15. Datos de la prueba 3 de la evaluación del área.

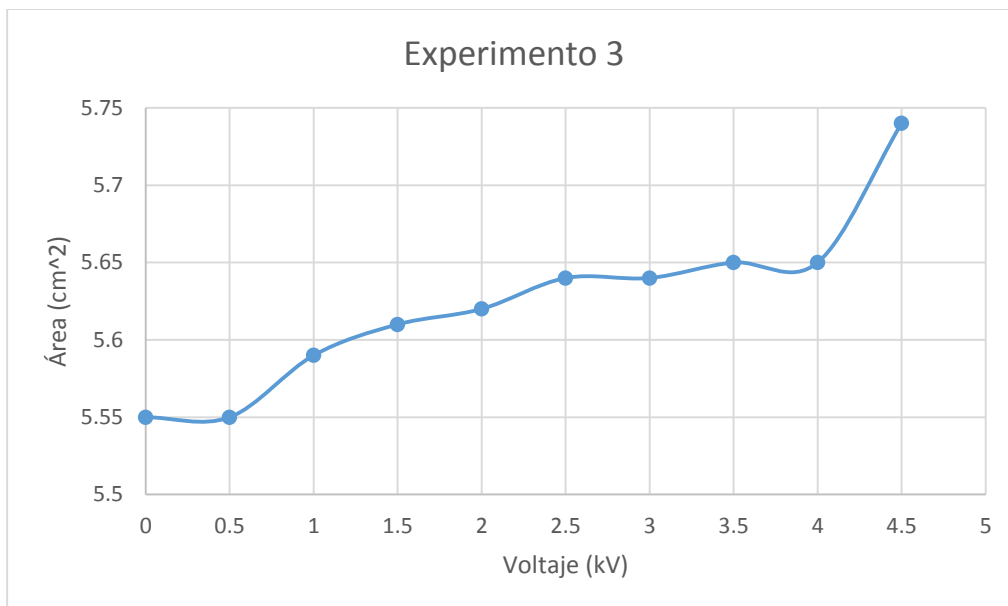


Figura 53. Gráfica de los datos obtenidos en la prueba 3.

Para el experimento 4 se utilizó Dow Corning 736 pero no hubo variaciones en el área, por lo tanto se descartó este material y se hizo una prueba más con Dow Corning f109, pero esta vez se tomó más de cerca las fotos para tener una mayor precisión en las imágenes, además que en esta ocasión se llegó a probar hasta los 5000 V.

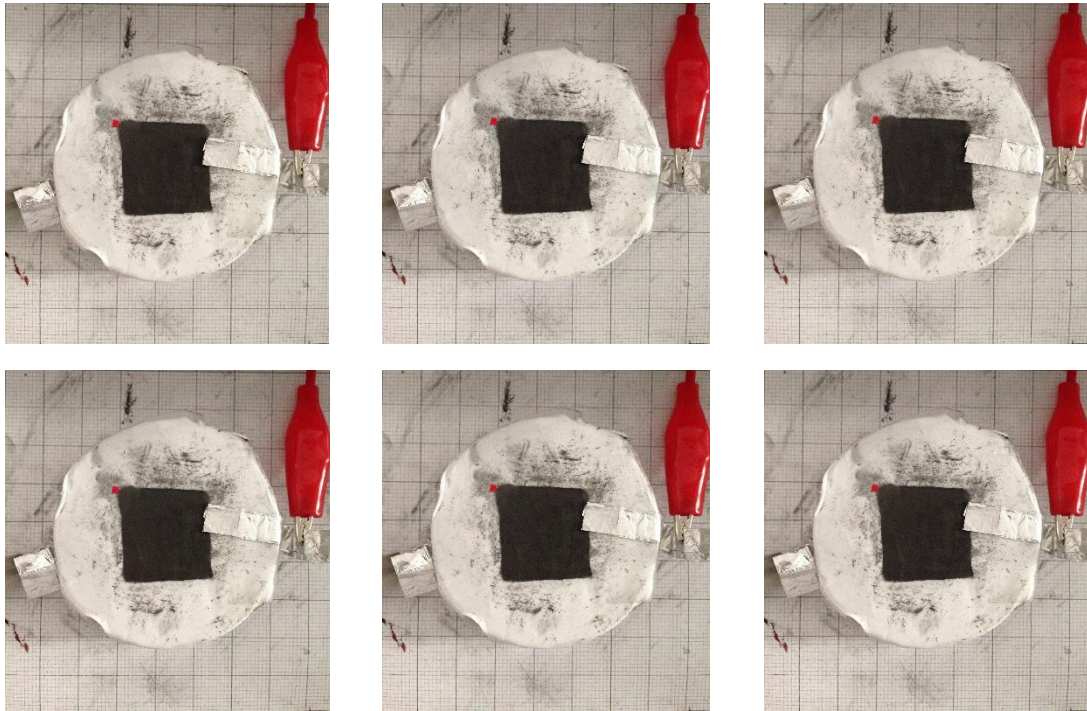


Figura 54. A) Imagen de la capa a 0 kV, B) imagen de la capa a 2.5 kV, C) imagen de la capa a 3.5 kV, D) imagen de la capa a 4 kV, E) imagen de la capa a 4.5 kV, y F) imagen de la capa a 5 kV.

Voltaje (kV)	Área (cm ²)
0	7.42
0.5	7.43
1	7.44
1.5	7.46
2	7.47
2.5	7.48
3	7.49
3.5	7.53
4	7.58
4.5	7.61
5	7.69

Tabla 16. Datos de la prueba 4 de la evaluación del área.

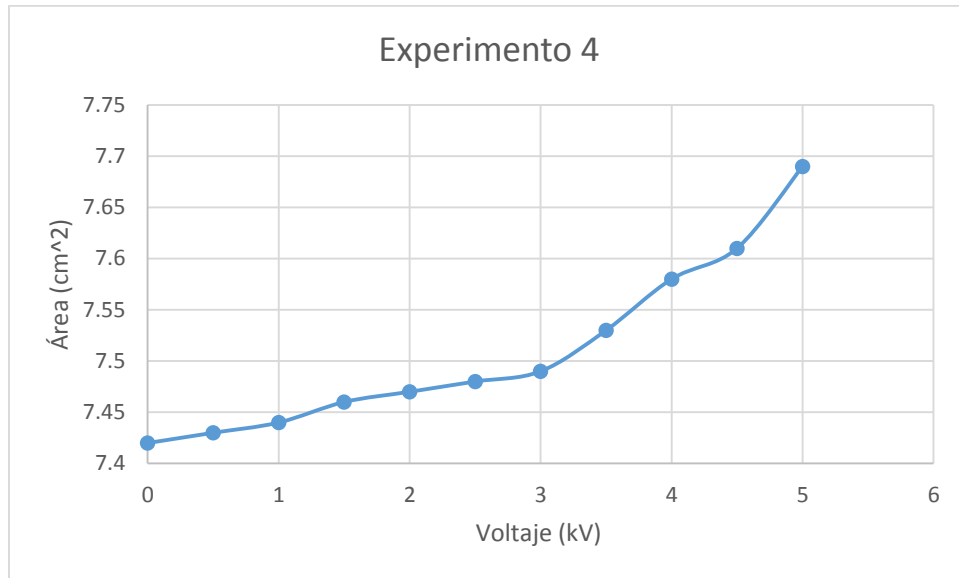


Figura 55. Gráfica de los datos obtenidos en la prueba 4.

Acabando estas pruebas, se grabó en video el momento donde el elastómero dieléctrico se mueve al aplicarle un voltaje, con el fin de evaluar el tiempo de respuesta del material. Se hizo la prueba con silicona Dow Corning f109 debido a que fue la única silicona que se pudo apreciar el movimiento a simple vista. Para poder llevar a cabo esta prueba se utilizó el programa “Tracker Video Analysis”.

Primero se grabó la respuesta en un intervalo de 0 a 3.5 kV. En la figura 56 se puede observar la gráfica del tiempo de respuesta, donde t , es el tiempo y r es el desplazamiento del punto que se analizó en el programa, dicho punto tiene el nombre de “masa” debido a que el programa automáticamente lo llama así (Figura 57).

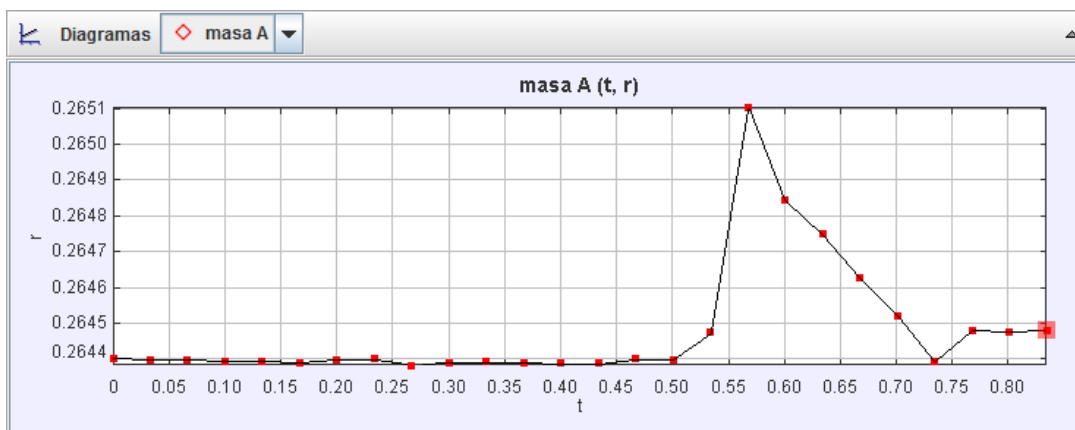


Figura 56. Gráfica del tiempo de respuesta de 0 a 3.5 kV (Gráfica hecha en el programa Tracker).

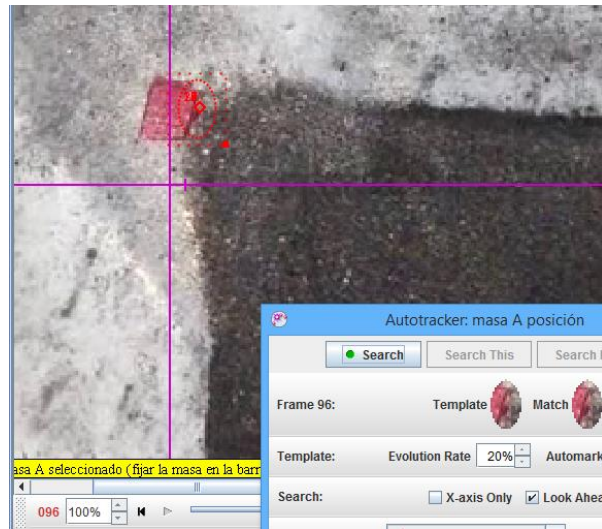


Figura 57. Punto analizado en el video.

Para el intervalo de 0 a 4 kV, la gráfica es la siguiente:

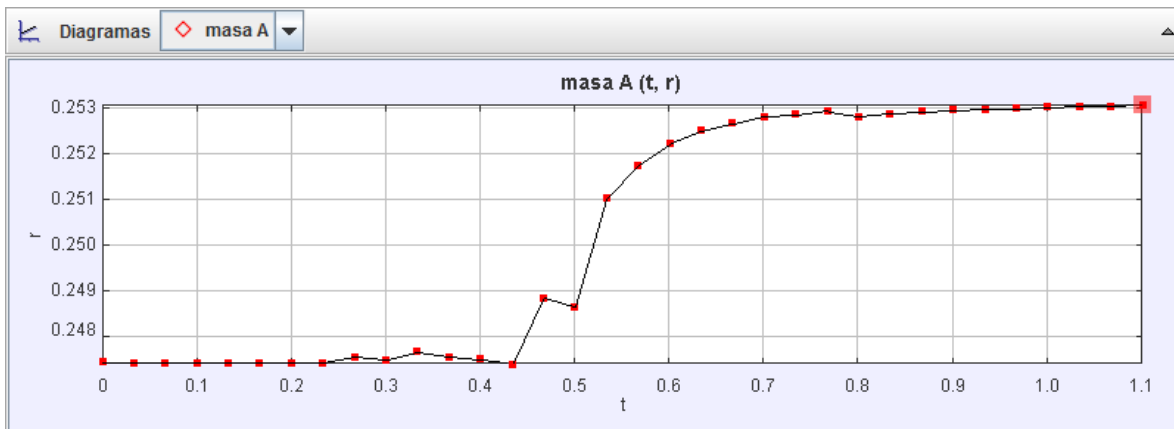


Figura 58. Gráfica del tiempo de respuesta de 0 a 4 kV (Después de la elevación se mantiene así debido a que en el video tarda un poco de tiempo en bajar el voltaje a 0. Gráfica hecha en el programa Tracker).

De 0 a 4.5 kV:

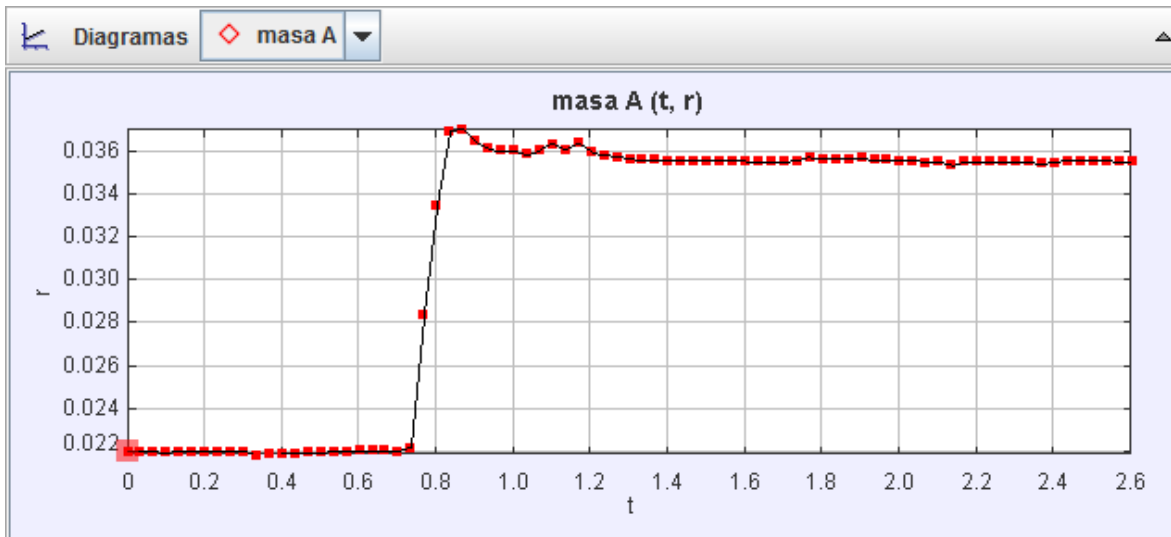


Figura 59. Gráfica del tiempo de respuesta de 0 a 4.5 kV (Gráfica hecha por el programa Tracker).

De 0 a 5 kV:

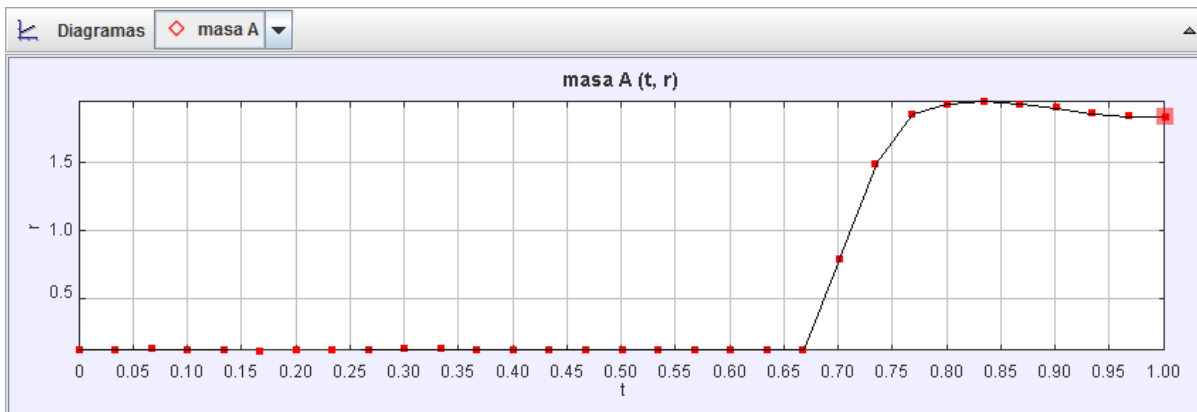


Figura 60. Gráfica del tiempo de respuesta de 0 a 5 kV (Gráfica hecha por el programa Tracker).

Se tomó una pequeña base circular, donde se apilaron 20 capas estiradas de silicona Dow Corning f109 en forma de multicapa y se prosiguió a meterle una carga (Figura 61) pero ocurrió lo mismo que el experimento donde se apilaron las capas de acrílico, hizo corto entre las capas, donde algunas partes diminutas resultaron

quemadas y no se desplazó. Después se volvió a hacer otra configuración en multicapa con el mismo material pero solo se obtuvo los mismos resultados.



Figura 61. Configuración en multicapa de la silicona Dow Corning f109.

CONCLUSIONES.

Al analizar los resultados obtenidos en los experimentos , se notó mucha variación en estos, dicha variación se debe a diversos factores, uno de ellos es el estiramiento del polímero, al inicio se realizó un pequeño mecanismo para poder estirar el elastómero, pero este tendía a romper la capa, por lo que se decidió estirarlo con la mano, esto hace que el espesor no quede uniformemente estirado, provocando que al ser activado por un campo eléctrico, no todas las zonas se muevan de la misma manera, además de las inconsistencias que existen al crear una capa de silicona, debido a que el material no es muy líquido, este tiene una consistencia pastosa, por lo que al crear la capa, pudieran haber quedado huecos minúsculos de aire lo cual provoca que las cargas eléctricas entren en contacto y produzcan un corto circuito.

Conforme se fue haciendo experimentos, las capas de silicona creadas se hacían con más cuidado a la vez, se distribuía con cuidado el carbón evitando que toda la capa se ensuciara o que hubiera carbón en las orillas que pudieran hacer un vínculo con la carga opuesta, si con más cuidado se realizaba la capa elastomérica, resultados más precisos se obtenían. Otro factor que afecta a los resultados son las

fotos tomadas, al exportar la foto a SolidWorks y querer dibujar el contorno, entre más acercas la foto para tener una mayor precisión del contorno de la zona del carbón, más salen a relucir los pixeles, esto quiere decir que si existen algunas manchas juntas al contorno, se pueden llegar a confundir con la zona del carbón, por lo que el dibujo se realizó minuciosamente para evitar errores. La geometría de la zona del carbón también fue importante, debido a que seguir el contorno en una figura circular es más difícil que seguir el contorno de una figura cuadrática. También fue preciso tomar fotos y videos a una distancia muy cercana, debido a que así ya no se necesitaba hacer zoom en las imágenes al momento de dibujar el contorno o analizar un punto en movimiento, tal como se muestra en el experimento 4, donde las fotos fueron a una distancia menor que las otras pruebas y los resultados salieron con menos variaciones.

Además con estos experimentos se observó que las siliconas se comportaron de manera diferente. De los tres tipos de silicona que se hicieron pruebas, solo el Dow Corning f109 fue el más indicado para trabajar, debido a que se pudo observar a simple vista el desplazamiento del material con la interacción del campo eléctrico, los otros dos Dow Corning no se percibieron a simple vista el cambio de área. Dow Corning f109 es más flexible a comparación de los otras dos y es más fácil de manejar para la creación de la capa elastomérica. Dow Corning 736 se rompe con mucha facilidad al querer estirar el material y Dow Corning f107 es menos elástico y es más difícil estirarlo, lo que se hace difícil trabajar con estos dos últimos materiales.

En los datos que arrojaron las pruebas del cambio del área del elastómero podemos observar que se produce un mayor movimiento con la silicona "Dow Corning f109" debido a que en el experimento 1 cambio 0.12 cm^2 del área original, el experimento 2 cambio 0.33 cm^2 , el cambio del experimento 3 es 0.19 cm^2 y del experimento 4 es 0.27 cm^2 .

A pesar que el cambio de área del experimento 1 es el menor (Dow Corning f109), se considera que hubieron muchos factores que pudieron haber afectado a este experimento, debido a que el experimento 2 y 4, los cambios de área son mayores y el material es la silicona f109, por eso se considera que la silicona Dow Corning f107 se movió menos y en la silicona Dow Corning 736 hubo cambios mínimos que se considera que no se movió en el proceso de activación.

En las siguientes figuras se aprecian las graficas comparativas de los resultados teoricos con los practicos en las pruebas de cambio de área.

Gráfica de la prueba donde se utilizó silicona Dow Corning f107.

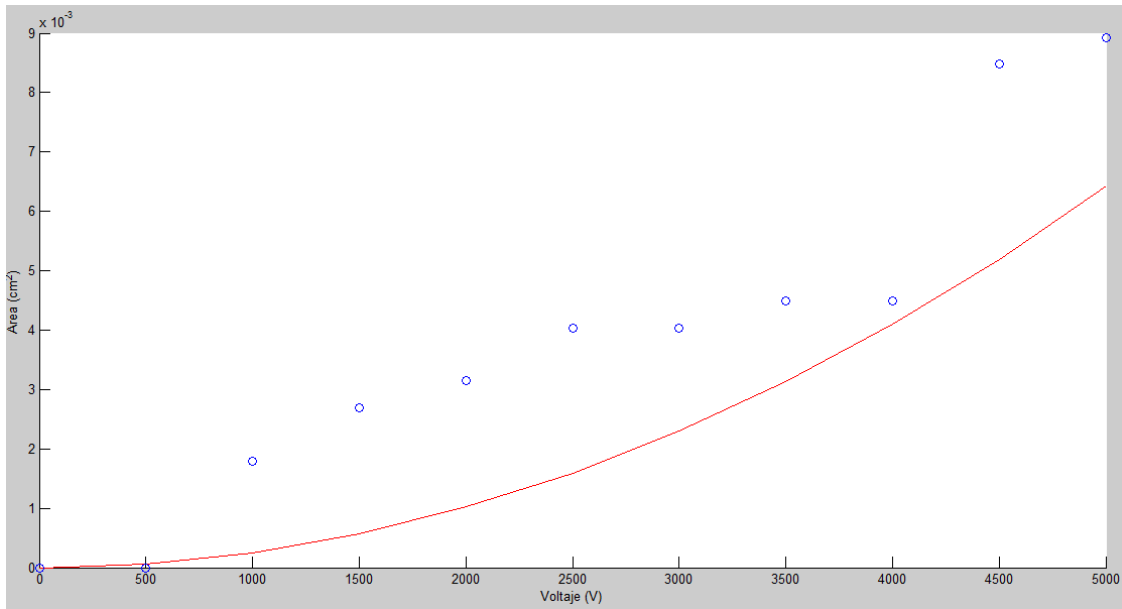


Figura 62. Gráfica comparativa del cambio de área teórico con el cambio de área experimental del material Dow Corning f107, la línea roja representa la curva teórica y los puntos azules representa la curva experimental (Gráfica hecha por el programa Matlab).

Gráfica del experimento 4 donde se utilizó “Dow Corning f109”.

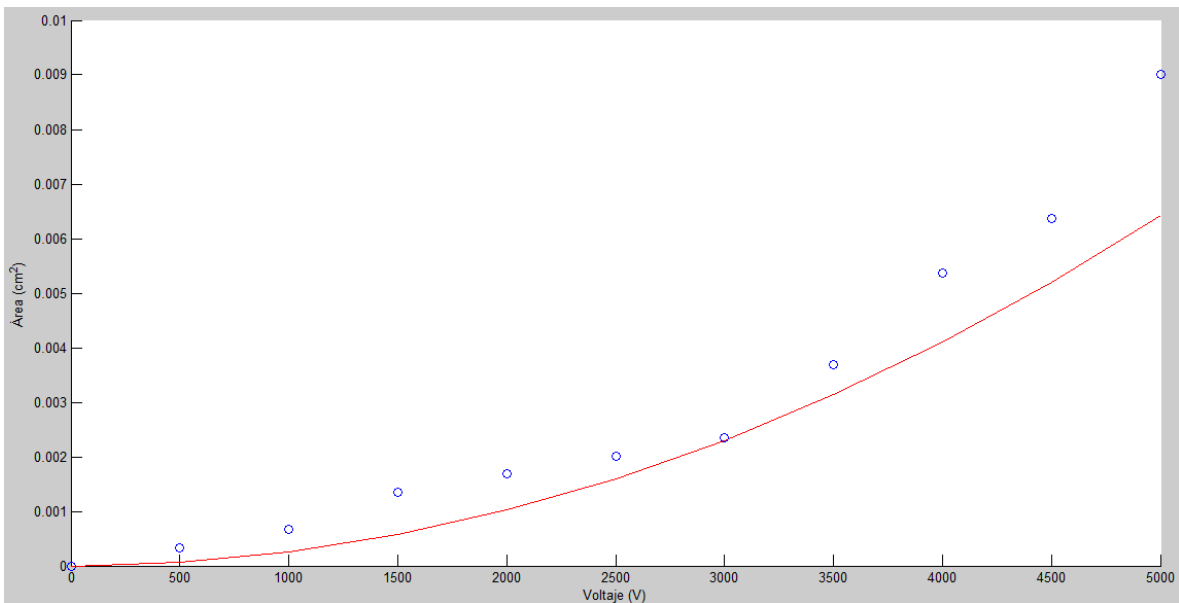


Figura 63. Gráfica comparativa del cambio de área teórico con el cambio de área experimental del material Dow Corning f109, la línea roja representa la curva teórica y los puntos azules representa la curva experimental (Gráfica hecha por el programa Matlab).

Para el material Dow Corning f017, la curva experimental tiene muchas variaciones con errores porcentuales elevados, el error porcentual máximo es de 85.8064% en el punto 3 y el mínimo es de 8.5508% para el séptimo punto.

La curva experimental no tiene mucha variación en la gráfica de Dow Corning f019. Esta gráfica tuvo un error porcentual menor a comparación de la gráfica del f107, como el máximo error fue de 81.0931% en el punto 4 y el error mínimo fue de 2.2740% para el séptimo punto.

Se puede concluir que el material Dow Corning f109 tiene una mayor movilidad en la aplicación de un campo eléctrico, el cual funcionaría mejor para la realización de un actuador.

Para las pruebas del tiempo de reacción del material de la silicona f109 tiene un tiempo de respuesta de 200.199 milisegundos, el doble que el tiempo de respuesta de un músculo real de fibra rápida, cuyo tiempo es de 100 milisegundos. Esto lo hace un material adecuado para la aplicación de actuadores de músculos artificiales porque hay otros polímeros que tardan mucho más tiempo en reaccionar ante un campo eléctrico.

Se piensa que los mismos factores que afectaron a la configuración multicapa realizada anteriormente, perturbaron a la configuración hecha de silicona, el comportamiento del material ante las pruebas lo hace adecuado para utilizarlo en actuadores de polímeros electroactivos, la desventaja principal es la dificultad de estirar el material y de realizar la configuración en multicapa sin que se rompan las capas, se ensucien o se quemen por un corto circuito, debido a esto no se pudo obtener un actuador en funcionamiento donde se pudiera analizar todo el conjunto de multicapas lo que resultó a un análisis de las capas individuales del elastómero dieléctrico.

REFERENCIAS.

- Bao X., Bar-Cohen Y., Chang Z., and Sherrit S., 2004, "Characterization of bending EAP beam actuators, *Proc. SPIE* 5385 383-94.
- Bar-Cohen Y., Ed., "Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscle", 2nd edition. Bellingham, WA: SPIE Press, 2004.
- Bar-Cohen Y., Xue and S.-S., Lih, "Polymer piezoelectric transducers for ultrasonic NDE, "First International Internet Workshop on Ultrasonic NDE, Subject: Transducers, organized by R. Diederichs, *Utonline Journal*, Germany, <http://www.ndt.net/article/yosi/yosi.htm> (Sept. 1996).
- Bauer S. and Paajanen M., 2004, "Electromechanical characterization and measurement protocol for dielectric elastomer actuators", *Proc. SPIE* 6168 61682K.
- Baughman, R., L. Shacklette, R. Elsenbaumer, E. Pichta and C. Becht, "Conducting polymer electromechanical actuators", *Conjugated Polymeric Materials: Opportunities in Electronics, Optoelectronics and Molecular Electronics*, eds. J. L. Bredas and R. R. Chance, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands (1990), pp. 559-582.
- Baughman R. H., C. Cui, A. A. Zakhidov, Z. Iqbal, J. N. Basrisci, G. M. Spinks, G. G. Wallace, A. Mazzoldi, D. de Rossi, A. G. Rinzler, O. JAschinski, S. Roth and M. Kertesz, "carbon Nanotube Actuators", *Science*, Vol. 284, (1999), pp. 1340-1344.
- Bobbio, S., M. Kellam, B. Dudley, S. Goodwin Johansson, S. Jones, J. Jacobson, F. Tranjan and T. Dubois, "Integrated forcé arrays", in *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, Fort Lauderdale, Florida (February 1993).
- B. O'Brien, J. Thode, I. Anderson, E. Calius, E. Haemmerle, S. Xie, "Integrated extension sensor based on resistance and voltage measurement for a dielectric elastomer", in *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, vol. 6524 (SPIE, San Diego, 2007), p. 652415.
- B. O'Brien, E.P. Calius, T. Inamura, S.Q. Xie, I.A. Anderson, *Dielectric elastomer switches for smart artificial muscles. Appl. Phys. A, Mater. Sci. Process.* 100(2), 385–389 (2010).
- Calver P., J. O'Kelly, C. Souvignier, "Solid freeform fabrication of organic-inorganic hybrid Materials", *Materials Science and Engineering*, Vol.C 6, (1998), pp. 167-174.
- Carpi F., Chiarelli P., Mazzoldi A. and De Rossi D., 2003, "Electromechanical characterization of dielectric elastomer planar actuators: comparative evaluation of differet electrode materials and different counterloads", *Sensors Actuators* 107 85-92.
- Carpi F., D. De Rossi, "Dielectric elastomer cylindrical actuators: electromechanical modelling and experimental evaluation", *Materials Science and Engineering C* 24(4), 555–562 (2004).
- Chang, R., "Química", Décima edición ,Mc Graw Hill, México, 2010.

- Chuc N. H., Thuy D. V., Park J., Kim D., Koo J., Lee Y., Nam J. D. and Choi H. R., 2008, "A dielectric elastomer actuator with self-sensing capability", *Proc. SPIE 6927 69270V*.
- Davis, L. C., "Model of magnetorheological elastomers", *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No. 6 (1999), pp. 3348-3351.
- Eguchi M., "On the Permanent Electret," *Philosophical Magazine*, Vol. 49 (1925) pp. 178.
- Finkelmann H., H. J. Kock, and G. Rehage, "Investigations on liquid crystalline silozanes: 3. Liquid crystalline elastomer- a new type of liquid crystalline material", *Makromolekular Chemistry, Rapid Communications*, Vol. 2 (1981), pp. 317.
- Fox J. W. and Goulbourbe N. C., 2007, "An experimental study on the dynamic response of a dielectric elastomer membranes", *Proc. SPIE 6927 69271P*.
- Fox J. W. and Goulbourbe N. C., 2008, "Nonlinear dynamic characteristics of dielectric elastomer membranes, *Proc. SPIE 6927 69271P*.
- Hathaway K. B., Clarck A. E., "Magnetostrictive materials", *MRS Bulletin*, Vol. 18, No. 4 (April 1993), pp. 34-41.
- Heitner-Wirguin, C. "Recent advances in perfluorinated ionomer membranes: Structure, properties and applications", *Journal of Membrane Science*, V 120, No. 1, (1996), pp. 1-33.
- Hollerbach J., I. Hunter & J. Ballantyne, "A comparative analysis of actuator technologies for robotics", O. Khatib, J Craig & Lozano-Perez (Eds), *The Robotics Review 2*, MIT Press, Cambridge MA (1992), pp. 299-342.
- Huang J. C., "Carbon black filled conducting polymers and polymer blends". *Adv. Polym. Technol.* 21(4), 299–313 (2002).
- Hunber J., N.A Fleck, and M. F. Ashby, "The selection of mechanical actuators base don performance indices" in *Proc. R. Soc. Lond. A*, 453, (1997), pp. 2185-2205.
- Hunter, I., and S. Lafontaine, J. Hollerbach, and P. Hunter, "Fast reversible NiTi fibers for use in microrobotics", *Proc. 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems-MEMS '91*, Nara, Japan, (1991), pp. 166-170.
- Hunter I. & S. Lafontaine, "A comparison of muscle with artificial actuators", *Technical Digest IEEE Solid State Sensors & Actuators Workshop* (1992), pp 178-185.
- J.C. Huang, "Carbon black filled conducting polymers and polymer blends", *Adv. Polym. Technol.* 21(4), 299–313 (2002).
- Jung K., Kim K. J. and Choi H. R., 2008, "self-sensing of dielectric elastomer actuator", *Proc. SPIE 6927 69271S*.
- Katchalsky, A., "Rapid swelling and deswelling of reversible gels of polymeric acids by ionization", *Experientia*, Vo. V, (1949), pp. 203-209.
- K. Jung, K.J. Kim, H.R. Choi, "A self-sensing dielectric elastomer actuator", *Sens. Actuators A*, Phys. 143(2), 343–351 (2008).

- Kim J., J.-Y. Kim and S.-J. Choe, "Electro-active papers: its possibility as actuators", Bar-Cohen Y., (Ed.), *Proceedings of the SPIE's EAPAD Cong., part of the 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, SPIE Proc. Vol. 3987, (2000) pp. 203-209.
- Klapcin'ski T., A. Galeski and M. Kryszewski, "Polyacrylamide gels filled with ferromagnetic anisotropic powder: a model of a magnetochemical device", *J. Appl. Polymer Science*, Vol.58, (1995) pp. 1007.
- Kofod G., "Dielectric elastomer actuators. Ph.D. Thesis, The Technical University of Denmark", (2001).
- Kornbluh R., R. Pelrine, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, S. Chiba, "High-field electrostriction of elastomeric polymer dielectrics for actuation", in *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, vol. 3669 (1999), pp. 149–161.
- Kornbluh, R., R. Pelrine, Q. Pei, S. Oh, and J. Joseph, "Ultrahigh strain response of field-actuated elastomeric polymers", *Proc. of SPIE Smart Structures and Materials 2000; Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen in, Vol. 2987 (2000), pp. 51-64.
- Krebs F. C., "Fabrication and processing of polymer solar cells: a review of printing and coating techniques" *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93(4), 394–412 (2009).
- Liu Z. and P. Calvert, "Multilayer hydrogels and musclelike actuators", *Advanced Materials*, Vol. 12, No. 4 (2000), pp. 288-291.
- Lotz P., H. F. Matysek, M. Schlaak, *Fabrication and application of miniaturized dielectric elastomer stack actuators. IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 16(1), 58–66 (2011).
- Loverich J. J., I. Kanno, H. Kotera, "Concepts for a new class of all-polymer micropumps", *Lab Chip* 6(9), 1147–1154 (2006).
- Marsh R. L., J. M. Olson, and S. K. Guzik, "Mechanical performance of scallop adductor muscle during swimming", *Nature*, 357: (6377) (1992), pp. 411-413.
- Matysek M., Lotz P., Flittner K. and Schlaak H. F., 2008, "High precision characterization of dielectric elastomer stack actuators and their material parameters", *Proc. SPIE* 6927 692722.
- Matysek. M, P. Lotz, T. Winterstein, H.F. Schlaak, *Dielectric elastomer actuators for tactile displays*, in *Proceedings of 3rd Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2009* (2009), pp. 290–295.
- Oguro, K., Y. Kawami and H. Takenaka, "Bending of an ion-conducting polymer film-electrode composite by an electric stimulus at low voltage", *Trans. Journal of Micromachine Society*, Vol. 5, (1992) pp. 27-30.
- Park S. E., Shrout T. R., "Relaxor based ferroelectric single crystals for electromechanical actuators", *Materials Research Innovations*, Vol. 1, No.1 (1997), pp.20-25.

- Park, S., and T. Shrout, "Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals", *J. Applied Physics*, 82 (1997), pp. 1804-1811.
- Pei, Q., M. Rosenthal, R. Perine, S. Stanford, and R. Kornbluh. 2002. "3-D Multifunctional Electroelastomer Roll Actuators and Their Application for Biomimetic Walking Robots", *Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technology*, ed. A. McGowan, *Proc. SPIE*, Vol. 4698, pp. 246-253.
- Pelrine, R., J. Eckerle and S. Chiba, "Review of artificial muscle approaches", invited paper, *Proc. Of the Third Intl.Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan (1992).
- Pelrine, R., R. Kornbluh, J. Joseph and J. Marlow, "Analysis of the electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation", *Sensors and Actuators A: Physical* 64 (1995), pp. 77-85.
- Pelrine R., R. Kornbluh, and J. P. Joseph, "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation", *Sensor Actuat. A*, Vol. 64 (1998), p. 77-85.
- Pelrine R., R. Kornbluh, J. Joseph, R. Heydt, Q. Pei, S. Chiba, High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators. *Materials Science and Engineering C* 11(2), 89–100 (2000).
- Pelrine R., Kornbluh R., Pei Q. and Joseph J., 2000, "High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%", *Science* 287 836-9.
- Pelrine R, Roy Kornbluh, Qibing Pei, Scott Stanford, Seajin Oh, Joe Eckerle, "Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion", *Smart Structures and Materials 2002*.
- Roentgen, W. C., "About the changes in shape and volumen of dielectrics caused by electricity," Section III in G. Wiedemann (Ed.), *Annual Physics and Chemistry Series*, Vol. 11, John Ambrosius Barth Publisher, Leipzig, German (1880) pp. 771-786 (in German).
- Rwei S.-P., F.- H. Ku, K.- C. Cheng, "Dispersion of carbon black in a continuous phase: electrical, rheological, and morphological studies", *Colloid Polym. Sci.* 280(12), 1110–1115 (2002).
- Sadeghipour, K., R. Salomon, and S. Neogi, "Development of a novel electrochemically active membrane and 'smart' material based vibration sensor/damper", *Smart Materials and Structures*, (1992), pp. 172-179.
- Samuel R., Herbert R. S., "Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators", 2012.
- Sessler G. M., and J. Hillenbrand, "Novel polymer electrets", *MRS Symposium Proceedings on Electroactive Polymers (EAP)*, Vol. 600, Warrendale, PA, (1999) pp. 143-158.
- Shahinpoor, M., "Conceptual design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using ionic polymeric gel muscles", *Smart Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1 (1992), pp. 91-94.

- Shahinpoor, M., "Micro-electro-mechanics of ionic polymer gels as electrically controllable artificial muscles", *J. Intelligent Material Systems and Structures*, 6 (1995), pp.307-314.
- Schlaak H. F. M. Jungmann, M. Matysek, P. Lotz, "Novel multilayer electrostatic solid-state actuators with elastic dielectric", in *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2005*, vol. 5759 (2005), pp. 121–133
- Schreyer, H. B., N. Gebhart, K. J. Kim, and M. Shahinpoor, "Electric activation of artificial muscles containing polyacrylonitrile gel fibers", *Biomacromolecules J.*, ACS Publications, Vol. 1, (2000), pp. 642-647.
- Shiga, T. "Deformation and viscoelastic behavior of polymer gels in electric fields", *Adv. Polym. Sci.*, Vol. 134, (1997), pp.1735-1738.
- Sommer-Larsen P, Hooker J, Kofod G, West K, Benslimane M and Gravesen P, 2001, "Response of dielectric elastomer actuators", *Proc. SPIE* 4329 157-63.
- Spinks M. and Truong V., 2005, *Work-per-cycle analysis for electromechanical actuators*", *Sensors Actuators* 119 455-61.
- Tekin E., B.-J. De Gans, U.S. Schubert, *Ink-jet printing of polymers—from single dots to thin film libraries*. *J. Mater. Chem.* 14(17), 2627–2632 (2004).
- Tobushi, H., S. Hayashi and S. Kojima, "Mechanical properties of shape memory polymer of polyurethane series", *JSME International J., Series I*, 35, 3 (1992).
- Toth L. A., A.A. Goldenberg, *Control system design for a dielectric elastomer actuator: the sensory subsystem*, in *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, vol. 4695 (2002), pp. 323–334.
- Winslow, W. M., "Induced fibrillation of suspensions", *Journal of Applied Physics*, Vol. 20, (1949), p.1137.
- Wissler M. and Mazza E., 2007, "Mechanical behavior of an acrylic elastomer used in dielectric elastomer actuators", *Sensor Actuators A* 134 494-504.
- Xia, F., H. Li, C. Huang, H. Xu, F. Bauer, Z. Cheng, Q. Zhang, "Poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) based high performance electroactive polymers", *Proc. Of SPIE Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, ed. Y. Bar-Cohen, 5051 (2003), pp. 133-142.
- Zhang Q. M., V. Bharti, and X. Zhao, "Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly (vinylidene fluoridetrifluorethylene) copolymer", *Science*, Vol. 280, pp. 2101-2104 (1998).
- Zhenyi, M., J. I. Scheinbeim, J. W. Lee and B. A. Newman, "High field electrostrictive response of polymers", *J. Polymer Sciences, Part B-Polymer Physics*, 32 (1994), pp. 2721-2731.

Zrinyi M., D.. Szabo and J. Feher, "Comparative studies of electro- and magnetic field sensitive polymer gels". Y. Bar-Cohen, (Ed.), *Proceedings of the SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and MAterials, EAPAD Cong., SPIE Proc. Vol. 3669, (1999) pp. 406-413.*