



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**SOBRE LAS PROPIEDADES ELECTROMECAÑICAS  
DE MATERIALES POROSOS SEMICONDUCTORES  
CON BASE DE POLIURETANO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**F Í S I C O**

**P R E S E N T A**

**VALENTE VÁZQUEZ VELÁZQUEZ**



**DIRECTOR DE TESIS**

**M. EN C. FERNANDO ANGELES URIBE**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

# Hoja de datos del jurado

- **Datos del alumno:**

Vázquez

Velázquez

Valente

0155 6812 1002

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

30513159-5

- **Datos del tutor:**

M. en C.

Fernando

Angeles

Uribe

- **Datos del sinodal 1:**

Dr.

Ernesto José María de la Salette



Belmont

Moreno

■ **Datos del sinodal 2:**

Dra.

Martha

Rosete

Aguilar

■ **Datos del sinodal 3:**

Fis.

Andrés Valentín

Porta

Contreras

■ **Datos del sinodal 4:**

Dra.

Andrea Luisa

Aburto

Espina

■ **Datos del trabajo escrito:**

Sobre las propiedades electromecánicas de materiales porosos semiconductores con base de poliuretano

110

2018

*Disminuye la velocidad y disfruta de la vida.  
No es solo por el paisaje que te pierdes por  
ir demasiado rápido, también pierdes el  
sentido de a dónde vas y porqué.*

*-Eddie Cantor*



# Dedicatoria

*Este trabajo de tesis va dedicado a  
todas aquellas personas responsables de  
ocasionar un retraso (por mínimo que sea)  
en la conclusión de este escrito.*

---

# Agradecimientos

*Debo agradecer en primer lugar por todo el apoyo, la paciencia y la comprensión a las cuatro personas más importantes para mí: Lucina, Arturo, Teresa y Julieta, mi familia. Gracias por siempre estar ahí.*

*A mis sinodales: Dr. Belmont, Dra. Rosete, Fís. Porta y Dra. Aburto, muchas gracias por tomarse el tiempo de revisar este texto y aportar sus correcciones pertinentes para su debida conclusión.*

*Un agradecimiento muy especial a la familia Acevedo Molina por todo el apoyo brindado tanto a mí como a mi familia durante estos casi 10 años.*

*Gracias Azucena, entendí que no solo el tiempo es relativo, sino también la distancia. A veces, las casualidades son maravillosas e inexplicables.*

*A mis compañeros no solo de aula y/o universidad, sino de momentos: Dulce, Magdiel, Miguel, Christian, Luis, Iván, Karen, Paco, Borrego, Isaac... gracias por haber hecho placentero el camino, amigos.*

*Gracias al Taller de Control y Electrónica del edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de*

---

*Ciencias de la UNAM por el espacio y material brindado para la elaboración y conclusión de este trabajo de tesis.*

*Por último, un agradecimiento enorme a NikoTeam: Fernando, Donají, Luis y Boris; gracias por su amistad, su apoyo, la paciencia, las pláticas, los cafés, las clases, las comidas, las sobremesas, los consejos, el espacio en el cubículo, su guía, las ñoñeces, sus regaños, las risas interminables, los viajes... y demás. Lo aprendido con ustedes es in-  
mesurable. Con un agradecimiento especial a ti, Fernando, por haber sido mi guía en la  
realización de este trabajo y ayudarme a comprender lo incomprensible.*

# Resumen

Los sensores táctiles son elementos que proveen una señal proporcional a la presión que se les aplica, sin llegar a ser un sensor de fuerza, cuyas características de rango y respuesta son diferentes. Las diferentes tecnologías tienen sus ventajas y desventajas, pero un factor común es el elevado precio y la poca adecuación a proyectos específicos. Ejemplos de esto son los siguientes: Mano robótica con sensores táctiles (Shadow Robot Company, 2017), Sensor táctil (Silicio MX, 2016), Sensores de presión MPX2100 (NXP Semiconductors, 2008) y Medidor de fuerza (ATI Industrial Automation, 2017).

En la búsqueda de nuevos materiales que sean viables para el desarrollo de sensores táctiles, se ha encontrado que las propiedades electromecánicas de las esponjas conductoras o antiestáticas son viables para tal efecto. Estos tipos de materiales, tienen como principal, si no es que única función, el empaque y protección de diversos componentes electrónicos, sensibles a la estática, esto se debe a la cierta cantidad de partículas de carbón (grafito) que contiene, obteniendo así cualidades semiconductoras. En trabajos previos (Angeles, 2015) se ha reportado una relación entre sus propiedades de deformación y de conducción, dando así una posibilidad de desarrollo e investigación instrumental usando dichas propiedades físicas.

En este trabajo de tesis se estudia la correlación entre sus propiedades eléctricas y las deformaciones mecánicas a las que se ve sujeto. Para las deformaciones mecánicas se caracteriza: el Módulo de Young, el Módulo de corte y el Módulo de Poisson. En el caso de



---

las propiedades eléctricas se caracterizara su resistencia. Todos los datos son recopilados y procesados vía un microcontrolador para efectuar pruebas de control.

Para encontrar la correlación de las propiedades mecánicas con las eléctricas se obtienen superficies de respuesta del comportamiento de su resistencia considerando secciones transversales milimétricas.

De los resultados obtenidos puedo concretar que las esponjas o espumas conductoras son un buen transductor entre fuerza mecánica y resistencia eléctrica, además este material es factible para que se emplee como un sensor táctil.

# Índice general

Hoja de Datos del Jurado	III
Dedicatoria	VII
Agradecimientos	IX
Resumen	XI
Índice general	XIII
Índice de figuras	XVI
Índice de tablas	XXI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivo . . . . .	2
1.3. Espumas . . . . .	3
1.3.1. Polímeros . . . . .	3
1.3.2. Porosidad . . . . .	5
1.4. Propiedades físicas . . . . .	6
1.4.1. Mecánicas . . . . .	6

---

1.4.2. Eléctricas . . . . .	9
1.5. Sensores . . . . .	10
1.5.1. Sensores táctiles . . . . .	11
1.5.2. Relación físico-biológico . . . . .	12
<b>2. Modelo matemático</b>	<b>17</b>
2.1. Primeras observaciones . . . . .	17
2.2. Desarrollo . . . . .	21
2.2.1. Construcción geométrica . . . . .	21
2.2.2. Variables . . . . .	22
2.3. Área de contacto . . . . .	23
2.4. Resistencia . . . . .	24
<b>3. Diseño experimental</b>	<b>27</b>
3.1. Radio de poros . . . . .	28
3.2. Módulo de Young . . . . .	29
3.3. Histéresis elástica . . . . .	31
3.4. Circuito electrónico base . . . . .	31
3.5. Sistema de lectura . . . . .	33
3.6. Fuerza vs Resistencia . . . . .	34
<b>4. Resultados</b>	<b>37</b>
4.1. Resultados . . . . .	37
4.1.1. Radio promedio de poros . . . . .	37
4.1.2. Módulo de Young . . . . .	39
4.1.3. Histéresis . . . . .	42
4.1.4. Circuito electrónico . . . . .	43
4.1.5. Fuerza vs Resistencia . . . . .	43
4.2. Discusión . . . . .	49

---

4.2.1. Radio promedio de poros . . . . .	49
4.2.2. Módulo de Young . . . . .	49
4.2.3. Histéresis . . . . .	50
4.2.4. Fuerza vs Resistencia . . . . .	50
<b>5. Aplicaciones y perspectivas</b>	<b>53</b>
5.1. Interruptor . . . . .	53
5.1.1. Desarrollo propuesto . . . . .	54
5.2. Sensor táctil . . . . .	55
5.3. Tenaza sujetadora . . . . .	56
5.3.1. Desarrollo propuesto . . . . .	57
<b>6. Conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>65</b>
<b>Anexo I: Tablas</b>	<b>71</b>
<b>Anexo II: Gráficas</b>	<b>81</b>



# Índice de figuras

1.1. Diagrama de un polímero . . . . .	3
1.2. Fotografías de estructuras con poros abiertos y cerrados . . . . .	5
1.3. Fotografías de estructuras con poros parcialmente abiertos y mixtos . . . . .	5
1.4. Gráfica de deformación $\varepsilon$ contra esfuerzo $\sigma$ . . . . .	7
1.5. Diagrama del Módulo de Cizalladura . . . . .	7
1.6. Diagrama del Módulo de Poisson . . . . .	8
1.7. Diagrama del ciclo de Histéresis . . . . .	9
1.8. Figura representativa de la epidermis y dermis . . . . .	12
1.9. Diagrama del interior de la piel humana . . . . .	15
2.1. Diagrama base de sistema de coordenadas . . . . .	17
2.2. Diagrama medición rápida . . . . .	18
2.3. Diagrama medición rápida aplicando una fuerza transversal . . . . .	18
2.4. Gráfica resultados medición rápida . . . . .	19
2.5. Diagrama espuma-superficie conductora . . . . .	19
2.6. Esquema de deformación causado por fuerzas de corte . . . . .	20
2.7. Diagrama de un poro con radio $r$ . . . . .	21
2.8. Acercamiento al inciso (b) del esquema 2.7 . . . . .	23
2.9. Diagrama de las circunferencias de los poros . . . . .	23

2.10. Gráfica representativa de la ecuación (2.16) . . . . .	25
3.1. Diagrama de la superficie de contacto . . . . .	27
3.2. Fotografía del sensor . . . . .	28
3.3. Medición representativa del radio de poros . . . . .	28
3.4. Patrón de medida o regla para medir los cambios en la deformación de la esponja. . . . .	29
3.5. Diagrama del sistema montado para la obtención del Módulo de Young . . . . .	30
3.6. Diagrama del tipo de mediciones para obtener el Módulo de Young del material . . . . .	30
3.7. Diagrama eléctrico general . . . . .	31
3.8. Diagrama esquemático electrónico de una fuente de corriente usando un LM317 . . . . .	32
3.9. Diagrama esquemático electrónico de un seguidor de voltaje usando un op-amp LM358 . . . . .	32
3.10. Diagrama esquemático electrónico del sistema de lectura . . . . .	33
3.11. Diagrama del sistema de medición de fuerzas . . . . .	34
4.1. Foto del material deformable con medida patrón . . . . .	38
4.2. Medición de radio promedio de poros . . . . .	38
4.3. Calibración del patrón de medida . . . . .	39
4.4. Fotografía del material deformable antes y durante una fuerza incidente . . . . .	40
4.5. Gráfica esfuerzo $\sigma$ contra deformación $\epsilon$ . . . . .	41
4.6. Obtención del Módulo de Young por ajuste lineal . . . . .	41
4.7. Fotografía del material deformable antes, durante y después de una fuerza incidente . . . . .	42
4.8. Ciclo de histéresis . . . . .	42
4.9. Medida de la frecuencia de respuesta del material con un osciloscopio . . . . .	43
4.10. Gráfica de calibración del sistema electrónico . . . . .	44

4.11. Gráfica obtenida de las fuerzas inducidas al material poroso . . . . .	45
4.12. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza .	46
4.13. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza.	46
4.14. Gráfica obtenida al medir el voltaje inducido al sensor . . . . .	47
4.15. Gráfica obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 100 KΩ . . . . .	48
4.16. Gráfica obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 560 KΩ . . . . .	48
4.17. Gráfica obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 1 MΩ . . . . .	49
5.1. Diagrama esquemático electrónico propuesto para desarrollar un interruptor	54
5.2. Diagrama de flujo del funcionamiento del interruptor . . . . .	55
5.3. Esquema del funcionamiento de la huella dactilar . . . . .	56
5.4. Esquema 3D de la tenaza prototipo . . . . .	57
5.5. Diagrama esquemático del circuito electrónico utilizado para el control de la Tenaza . . . . .	58
6.1. Gráfica comparando al sensor fabricado con el material deformable junto a un sensor comercial FSR . . . . .	60
6.2. Gráfica descriptiva al usar tres esponjas, una sobre otra, para aumentar la respuesta del sensor en función del Módulo de Young . . . . .	60
6.3. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 1 MΩ a partir de 10 N . . . . .	62
6.4. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 1 MΩ a partir de 10 N . . . . .	62
A1. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 KΩ . . . . .	81



A2. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 K $\Omega$ . . . . .	82
A3. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 47 K $\Omega$ . . . . .	82
A4. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 47 K $\Omega$ . . . . .	83
A5. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 100 K $\Omega$ . . . . .	83
A6. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 100 K $\Omega$ . . . . .	84
A7. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 560 K $\Omega$ . . . . .	84
A8. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 560 K $\Omega$ . . . . .	85
A9. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 1 M $\Omega$ . . . . .	85
A10. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 1 M $\Omega$ . . . . .	86
A11. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 4.7 M $\Omega$ . . . . .	86
A12. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 4.7 M $\Omega$ . . . . .	87
A13. Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 M $\Omega$ . . . . .	87
A14. Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 M $\Omega$ . . . . .	88

# Índice de tablas

1.1. Valores de resistividad conocidos de diferentes materiales. . . . .	10
4.1. Radio medido de 14 poros dentro de la Figura 4.2, en píxeles . . . . .	39
4.2. Masas usadas para la medición de la deformación del material. . . . .	40
4.3. Valores de resistencias para la calibración . . . . .	44
A1. Líneas contadas en el patrón de la Figura 3.4 para la medición de la de- formación . . . . .	71
A2. Medidas en mm de las deformaciones del material . . . . .	72
A3. Datos calculados de esfuerzo y deformaciones con base en las tablas A1 y A2	72
A4. Datos calculados de histéresis con base en las tablas A1 y A2 . . . . .	73
A5. Valores promedios obtenidos de la lectura analógica del controlador al ca- librar el sistema de lectura para cada resistencia de referencia . . . . .	74
A6. Valores promedios obtenidos de la lectura analógica del controlador al in- ducir una fuerza a la espuma para cada resistencia de referencia . . . . .	75
A7. Valores promedios obtenidos del voltaje de entrada al sensor por cada fuerza inducida . . . . .	75
A8. Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 10 K $\Omega$ entre Fuerza y Resistencia. . . . .	76

---

A9. Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 47 K $\Omega$ entre Fuerza y Resistencia. . . . .	76
A10. Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 100 K $\Omega$ entre Fuerza y Resistencia. . . . .	77
A11. Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 560 K $\Omega$ entre Fuerza y Resistencia. . . . .	77
A12. Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 1 M $\Omega$ entre Fuerza y Resistencia. . . . .	78
A13. Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 4.7 M $\Omega$ entre Fuerza y Resistencia. . . . .	78
A14. Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 10 M $\Omega$ entre Fuerza y Resistencia. . . . .	79
A15. Valores de capacitores en el subcircuito RC del diagrama de la Figura 3.10 para una frecuencia de 60 Hz . . . . .	79

# 1

## Introducción

*-Empieza por el principio -dijo el Rey con gravedad*

*-y sigue hasta llegar al final; allí te paras.*

– Lewis Carroll

### 1.1. Motivación

A lo largo del tiempo, algunos desarrollos novedosos y sorprendentes han logrado su éxito a raíz de que se les ha encontrado un uso diferente para el que fueron fabricados, este es el caso de las espumas o esponjas antiestáticas; dicho material fue concebido con el principal propósito de resguardar posibles golpes y descargas electrostáticas a componentes electrónicos durante su transportación y/o almacenaje, sin embargo, este trabajo dio resultados favorables para afirmar que, a partir de ahora, estos materiales ya tienen otra aplicación.

En años recientes, se han reportado otros usos a este tipo de esponjas, por ejemplo, un económico transductor de presión (Angeles, 2015), esto se debe a que se encontró que la resistencia eléctrica medida en algunos arreglos con estos materiales, está en función de la deformación aplicada a estos<sup>1</sup>. Así que lo anterior ha dado pie a diferentes estudios

---

<sup>1</sup>En capítulos más adelante diré que dicha conclusión no es completamente válida, ya que influye el

en estos tipos de esponjas, los cuales vienen en este escrito más adelante.

Dichos estudios me han provisto de material suficiente para decir que, dependiendo de las características físicas del material, pueden usarse como simples interruptores o hasta complejos sensores táctiles, con lo cual, el hecho de pensar que aquí he encontrado otra forma de relacionar la física con la biología, lo cual me resulta ampliamente satisfactorio.

Por otro lado y no menos importante, es aclarar que el tipo de material que se expondrá más adelante ha sido reciclado de empaques que contenían componentes electrónicos, dando como resultado un trabajo amable con el ambiente, tratando así de redimir un poco la contaminación en su fabricación ya que recientemente se ha señalado que el proceso de fabricación de las espumas en China es uno de los procesos más contaminantes del planeta por seguir emitiendo clorofluorocarbonos, continuando así con el daño a la capa de ozono (El Financiero, 2018), además obteniendo un bajo costo de implementación.

## 1.2. Objetivo

Este trabajo de tesis tiene dos objetivos principales. El primero es desarrollar un modelo matemático del material deformable sobre la relación entre los cambios de su resistencia eléctrica en función de su deformación física transversal cada que se le induce a este un esfuerzo mecánico, esto con el fin de obtener una relación matemática que ayude a diseñar algún tipo de sensor, de fuerza ejemplo. El segundo es realizar una caracterización física de este material en sus propiedades electromecánicas para comparar con el modelo teórico.

Una vez caracterizado el material, propondré diferentes aplicaciones prácticas usando la esponja, por ejemplo un sensor táctil.

---

área de contacto entre el material deformable y una superficie conductora.

## 1.3. Espumas

A continuación hablaré de los diferentes tipos de esponjas o espumas que existen en la industria, comentando sus usos, aplicaciones, y características más importantes.

Las espumas están fabricadas a base de polímeros, principalmente artificiales, los cuales han tenido su expansión industrial desde principios de los años 40 del siglo pasado.

### 1.3.1. Polímeros

Un polímero es una gran molécula construida por pequeñas unidades llamadas monómeros. Se clasifican dependiendo su origen, composición, estructura o comportamiento con calor aplicado.

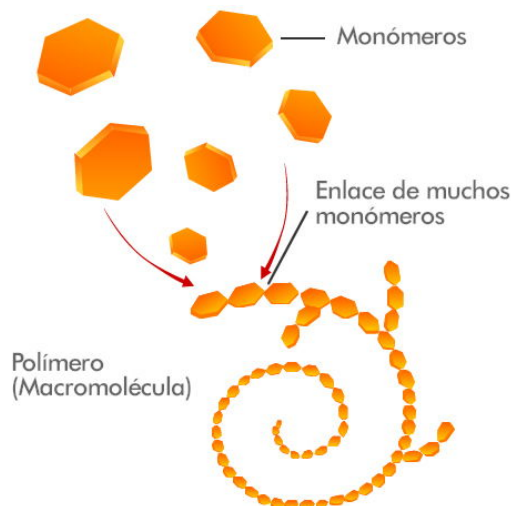


Figura 1.1: Diagrama de la unión de monómeros formando un polímero (Portal Educativo, 2015).

- Por origen: Los hay naturales y artificiales, los primeros son aquellos que se encuentran directo en la naturaleza, como en tallos y troncos, un ejemplo es la celulosa; los segundos son aquellos que se obtienen en un laboratorio, por ejemplo, el nylon (Ureta, Ernesto, 1996).
- Por composición: Se dividen en dos, homopolímeros y copolímeros; el primero es la unión de monómeros de un solo tipo y el segundo la unión de diferentes monómeros.

- Por estructura: la unión de estas unidades se hace en diversas formas, que van desde tipos fideos, ramificaciones y hasta redes tridimensionales (véase Figura 1.1); la unión ocurre por un efecto llamado polimerización.
- Por comportamiento térmico: termoestables y termoplásticos.

La columna vertebral de los polímeros, químicamente hablando, está compuesta principalmente por átomos de carbono, a veces en combinación con oxígeno y/o nitrógeno.

En forma general, los materiales fabricados a partir de polímeros han estado presentes en diversas aplicaciones en ciencia e ingeniería. Se pueden dividir en dos ramas, que son: polímeros electroactivos y conductores. Los polímeros electroactivos son aquellos que presentan un cambio físico en presencia de un campo eléctrico. Unas aplicaciones que utilizan estos materiales son: xerografía, diodo orgánico de emisión de luz (OLED), celdas solares, óptica no lineal y más. Los polímeros conductores son, como su nombre lo indica, materiales cuyas moléculas son capaces de conducir electricidad; en el año 2000 Shirakawa, Heeger y McDiarmid ganaron el premio Nóbel de Química por el estudio de las características eléctricas de estos materiales. Los polímeros conductores han servido para hacer diferentes aplicaciones como: electrónica blanda, diodos de emisión de luz (LED), dispositivos fotovoltaicos, diferentes estilos de sensores, etc.

Existen dos clases de materiales con los que se fabrican las espumas antiestáticas o conductoras, el más famoso y el más practicado es el poliuretano (PU o PUR) y el segundo es el polietileno (PE). Me enfocaré en el primer material nombrado principalmente por ser el más común en su fabricación y segundo porque fue el material que se utilizó para este trabajo.

Entonces, el poliuretano es un tipo de polímero que está conformado por una familia de moléculas formadas por complejas reacciones de grupos de isocianatos<sup>2</sup> y de sus diferentes interacciones químicas con demás elementos o moléculas (alcoholes en su mayoría), esta reacción libera dióxido de carbono, el cual forma burbujas en todo el material, provocando

---

<sup>2</sup>Un isocianato es grupo funcional de los átomos - N=C=O (1 nitrógeno, 1 carbón, 1 oxígeno), son compuestos fundamentales en la síntesis de poliuretano.

así la porosidad. Las esponjas son, probablemente, la aplicación más grande que existe para estos tipos de materiales, hay espumas rígidas o flexibles que sirven comúnmente como colchones, asientos, esponjas, artificiales, material de embalaje, rellenos, y demás (Areizaga et al., 2002); la principal diferencia es que los flexibles tienen una densidad promedio de 25 a 60 Kg/m<sup>3</sup> y los rígidos arriba de 100 Kg/m<sup>3</sup>. Las espumas de poliuretano flexible tienen un límite de resistencia frente a la aplicación de una carga, su estructura interna es de celda abierta, permeable al aire y tienen un comportamiento elástico frente a deformación (Oertel and Abele, 1994).

### 1.3.2. Porosidad

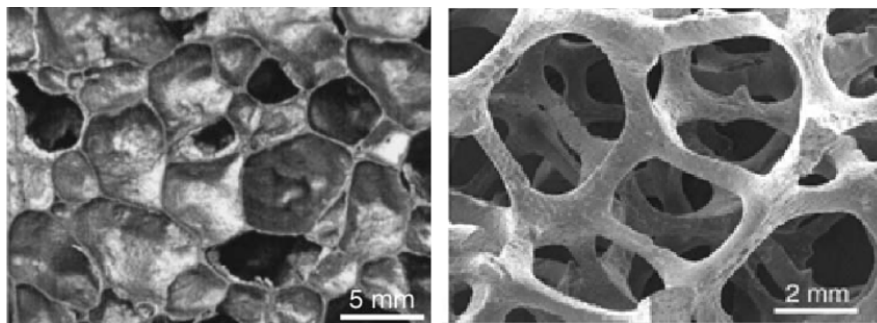


Figura 1.2: Fotografía que muestra la diferencia de poros abiertos (derecha) y cerrados (izquierda) (Kranzlin and Niederberger, 2015).

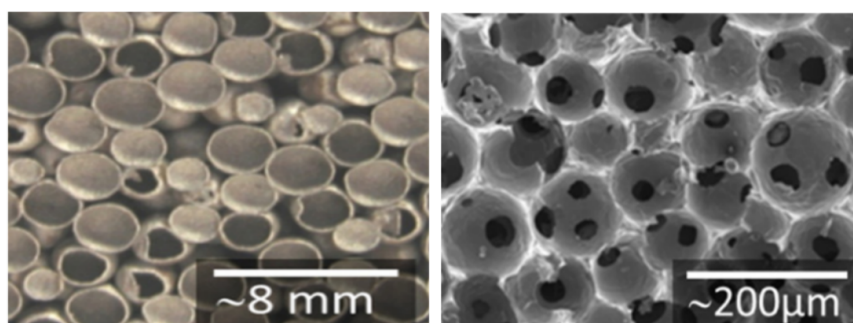


Figura 1.3: Fotografía que muestra la diferencia de poros semi abiertos (derecho) y mixtos (izquierda) (Kranzlin and Niederberger, 2015).



Otra clasificación útil para los materiales estudiados en este trabajo está en función de su porosidad. Una manera de definir esta propiedad es: *el espacio volumétrico vacío entre cierto material en su fase sólida* (Smithson, 2012). La clasificación más general es poros abiertos y cerrados (véase Figura 1.2), aunque dependiendo de la fabricación, también se puede clasificar como poros parcialmente abiertos y mixtos (Kranzlin and Niederberger, 2015) (véase Figura 1.3).

## 1.4. Propiedades físicas

Ahora es momento de hablar de las principales características físicas a las que fueron objeto de estudio las espumas utilizadas en este trabajo, todo esto con el fin de caracterizar el material para usarlo en diferentes aplicaciones.

### 1.4.1. Mecánicas

Para el estudio característico de las propiedades elásticas y deformables del material, es imprescindible estudiar su módulo de Young, módulo de corte o Cizalladura y razón de Poisson; lo anterior es para definir una región en donde el material tenga un comportamiento definido, todo esto, solamente para materiales lineales e isotrópicos (Young and Lovell, 1991).

#### Módulo de Elasticidad

El módulo de Young o Módulo de Elasticidad, es la relación inversa entre el esfuerzo aplicado al objeto  $\sigma$  y su deformación resultante  $\varepsilon$  de un material, es decir:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

lo cual también se puede ver como la relación entre la fuerza  $F$  aplicada a una superficie  $S$  entre el estado inicial y final de la deformación,  $\Delta x/x$ , es decir:

$$E = \frac{F/S}{\Delta x/x} \quad (1.2)$$

En una gráfica de esfuerzo-deformación (véase Figura 1.4) se nota al Módulo de Young como la pendiente de la parte lineal, antes del límite de elasticidad.

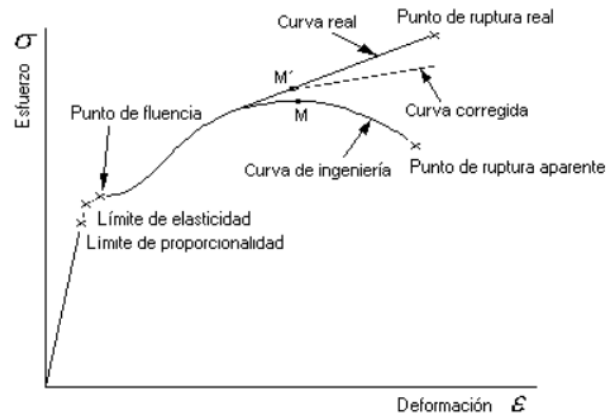


Figura 1.4: Gráfica de deformación  $\varepsilon$  contra esfuerzo  $\sigma$ , donde es posible observar la parte lineal, antes del límite elástico. Su pendiente da el Módulo de Young (WinnTess3, 2012).

### Módulo de Elasticidad Transversal

Este módulo, también llamado Módulo de Cizalladura, es la relación matemática entre una fuerza de corte aplicada sobre una superficie en específico  $\sigma$  y el ángulo de desplazamiento  $\theta$  (véase Figura 1.5), se representa por:

$$G = \frac{F/A}{\Delta x/L} \approx \frac{\sigma}{\theta} \quad (1.3)$$

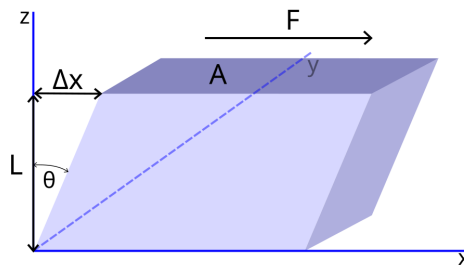


Figura 1.5: Diagrama que indica la dirección de una fuerza F y la deformación de un objeto al aplicarle una fuerza de corte paralela al eje X.

### Módulo de Poisson

El coeficiente de Poisson, denotado por la letra griega  $\nu$ , es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones  $\varepsilon$  longitudinales que sufre el material en sentido perpendicular a la fuerza aplicada.

Así, si sobre el cuerpo de la Figura 1.6, se aplica una fuerza en el eje Z del material, la deformación resultante será en los ejes  $x$  y  $y$ ; que matemáticamente está descrito como:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_y} \quad (1.4)$$

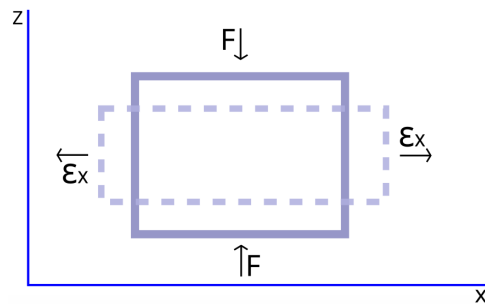


Figura 1.6: Diagrama de deformaciones perpendiculares a la fuerza aplicada.

Cabe resaltar que, existe una relación matemática que relaciona los tres módulos vistos anteriormente, dicha relación nos dice que el Módulo de Cizalladura es proporcional al cociente entre el Módulo de Young y el Módulo de Poisson.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.5)$$

### Ciclo de histéresis

Una parte crucial es el comportamiento elástico del material antes y después de aplicar una presión en su superficie. Para construir un sensor táctil es indispensable que el material deformable tenga un ciclo de histéresis prácticamente nulo.

Los materiales elásticos se alargan o contraen de forma proporcional a la fuerza que produce la deformación, además, idealmente estos recuperan su forma original cuando la fuerza que produce la deformación deja de actuar.

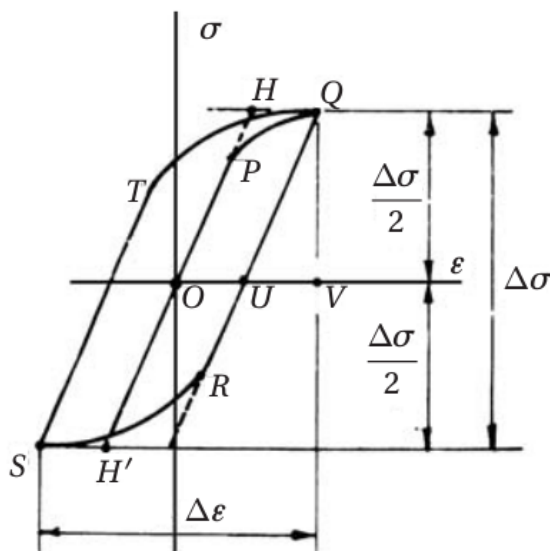


Figura 1.7: Diagrama del ciclo completo de Histéresis (Núñez, 2011).

La tensión o esfuerzo mecánico aplicado a un material idealmente elástico, daría como resultado una línea recta con una pendiente relacionada con el Módulo de Young en una gráfica de deformación contra esfuerzo (línea  $H - H'$  de la Figura 1.7). Al quitar la palabra *idealmente*, nos encontramos con un desfase entre la tensión mecánica aplicada y la deformación producida, dando como resultado un ciclo, llamado: ciclo de histéresis mecánico (véase Figura 1.7) (Núñez, 2011).

El ciclo empieza en el origen ( $O$ ), sube a la región  $PQ$  al aplicarle el esfuerzo, una vez que el esfuerzo deja de actuar sobre el material, este recorre la línea  $QU$ , esto nos indica que el material se recupero del esfuerzo aplicado, más no de la deformación. Que tan lejos esté  $U$  del origen es que tanto se deformó el material.

## 1.4.2. Eléctricas

### Resistividad

En primer lugar, debo definir que es la resistencia eléctrica. La resistencia eléctrica  $R$  de un material conductor es la propiedad física que impide el paso de una corriente

eléctrica  $I$  dado una tensión o voltaje  $V$ , a mayor resistencia menor corriente eléctrica. Estas propiedades, para corriente continua  $DC$  están relacionadas por la Ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (1.6)$$

La resistividad  $\rho$  es una propiedad eléctrica específica del material que mide la dificultad que presenta una sustancia para conducir la corriente eléctrica. A diferencia de la resistencia, la resistividad es una propiedad intensiva, ya que no depende del tamaño o la extensión (largo  $L$  y área  $A$ ) del conductor, solamente del material con el que está fabricado este.

$$R = \frac{\rho \times L}{A} \quad (1.7)$$

donde si despejamos la resistividad se tiene que:

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad (1.8)$$

A continuación se muestra una tabla de la resistividad de diferentes materiales:

Material	Resistividad a 20 °C ( $\Omega \cdot m$ )
Plata	$1.59 \times 10^{-8}$
Cobre	$1.68 \times 10^{-8}$
Aluminio	$2.65 \times 10^{-8}$
Tungsteno	$5.6 \times 10^{-8}$
Hierro	$9.71 \times 10^{-8}$
Grafito	$3 - 60 \times 10^{-5}$
Acero Inox.	$71.1 \times 10^{-8}$
Cuarzo	$7.5 \times 10^{17}$
Germanio	$1 - 500 \times 10^{-3}$

Tabla 1.1: Valores de resistividad conocidos de diferentes materiales (Hyperphysics, 2017).

## 1.5. Sensores

Serna et al. (2010) definen a los sensores como dispositivos electrónicos que nos permiten interactuar con el entorno, de tal manera que nos proporcionan información de ciertas

variables del medio para procesarlas con el fin de generar o activar diferentes tipos de procesos. Estos pueden clasificarse en diferentes formas: por su aporte de energía, tipo de señal de salida, modo de funcionamiento o tipo de medición (Areny, 2004):

- Señal: analógicos y digitales.
- Energía: moduladores y generadores.
- Funcionamiento: deflexión y comparación.
- Medición: Resistiva, capacitiva, inductiva, etc.

### 1.5.1. Sensores táctiles

En las últimas décadas, ha existido un auge significativo en el desarrollo e implementación de diferentes tipos de transductores para diversos usos. No solo en el ámbito científico, sino también el industrial, existen empresas privadas dedicadas a estos temas donde son capaces de desarrollar su propia tecnología, principalmente se han dado en el área de prótesis y en la milicia. Los que me interesan, para este trabajo, son los sensores táctiles.

Para bien o para mal, lo cual no discutiré aquí, el hecho de emular el comportamiento natural de un cuerpo biológico siempre ha sido una inquietud que el ser humano ha tenido, por ejemplo, el cómo vuelan las aves o cómo nadan los peces, por mencionar algunos; de estas inquietudes han nacido muchas maquinarias y dispositivos, como lo son los aviones, submarinos y más. Como fue pasando el tiempo y aumentando la tecnología, estas inquietudes también lo fueron haciendo, tanto así como para querer emular no solo las acciones naturales, sino también los sentidos.

Existen muchos ejemplos de lo anterior, uno de ellos es que en el año 2007 se logró biomimetizar el sentido del olfato simulando el comportamiento de las membranas cobertoras de las células nerviosas cuando hay actividad olfativa usando membranas celulares artificiales (Sinner, 2010). Otro ejemplo es el proyecto “5 in 5” de IBM, el cual trabaja en diferentes proyectos usando múltiples aplicaciones con el fin de desarrollar y predecir los

avances tecnológicos que habrá próximamente, muchas de sus aplicaciones y predicciones se enfocan en la emulación de sentidos, como la vista (IBM, 2017).

### 1.5.2. Relación físico-biológico

Al ser un sensor táctil, debe haber una relación entre la física del dispositivo y la biología que quiere emularse: el sentido del tacto. Para este caso en especial, primero haré una descripción a grandes rasgos de como funciona este sentido en el ser humano.

La piel es el órgano más grande del cuerpo humano, está compuesta por la epidermis y la dermis subyacente (véase Figura 1.8). Además de recubrir todo el tejido blando, la piel desempeña otras funciones como: protección (lesiones y/o bacterias), regulación térmica, recepción de sensaciones, excreción (sudor) y absorción (UV) (Gartner and Hiatt, 1997).



Figura 1.8: Figura representativa de la epidermis y dermis (study.com, 2018).

Sobre el sentido del tacto, específicamente el del ser humano, se sabe que la piel dispone de una serie de mecanismos nerviosos que se encargan de almacenar la información sensorial generada por los diferentes receptores del cuerpo. Estos mecanismos denominados sentidos somáticos, son capaces de detectar, por ejemplo, las sensaciones táctiles y de posición en el tejido corporal (Pedreño Molina et al., 2000).

Los sentidos somáticos del cuerpo humano, se pueden encuadrar en tres grandes grupos con sus respectivos receptores llamados corpúsculos (Gartner and Hiatt, 1997):

- Sentidos Mecanorreceptores: Incluyen las sensaciones táctiles (tacto, textura, presión, vibración) y de posición.
  - Los discos de Merkel son mecanorreceptores especializados en percibir el tacto discriminatorio, se localizan sobre todo en piel lampiña y regiones del cuerpo más sensibles al tacto.
  - Los corpúsculos de Meissner se especializan en la discriminación táctil. Dichos receptores se ubican en las papilas dérmicas de la porción lampiña de los dedos y las palmas de las manos, en donde constituyen alrededor de la mitad de los receptores táctiles. También se hallan en párpados, labios, lengua, pezones, piel de los pies y el antebrazo. Los corpúsculos de Meissner, que miden  $80 \times 30 \mu\text{m}$ , se sitúan en las papilas dérmicas con sus ejes largos orientados de manera perpendicular a la superficie de la piel. Los corpúsculos de Meissner son sensibles en especial a bordes y puntas y movimientos de estos objetos.
  - Los corpúsculos de Pacini se localizan en la dermis y la hipodermis en los dedos de las manos y las mamas, así como también en el tejido conectivo de las articulaciones y el mesenterio. Estos mecanorreceptores se especializan en percibir presión, tacto y vibraciones. Los corpúsculos de Pacini son receptores ovoides y grandes, de 1 a 2 mm de largo por 0.1 a 0.7 mm de diámetro.
  - Los corpúsculos de Ruffini se les halla en la dermis de la piel, lechos de las uñas y cápsulas articulares. Estos receptores son grandes, de 1 mm de largo por 0.02 mm de diámetro. La cápsula de tejido conectivo que rodea a cada uno de estos receptores está fija en cada extremo, lo cual incrementa su sensibilidad al estiramiento y presión de la piel y en las cápsulas articulares También se cree que son sensibles al incremento de temperatura.
- Sentidos Termorreceptores: Incluyen las sensaciones de frío y calor.
  - Aunque no se han identificado receptores específicos para calor, se presupone que estos receptores son terminaciones desnudas de fibras nerviosas que reac-



cionan a incrementos de la temperatura.

- Los receptores de frío derivan de terminaciones nerviosas que se ramifican y penetran en la epidermis. Originalmente se pensó los bulbos terminales de Krause, eran receptores sensibles al frío, pero pruebas actuales no apoyan esta idea, se desconoce su función.
  - Debido a que los termorreceptores no se activan por estímulos físicos, se piensa que responden para diferenciar índices de reacciones bioquímicas dependientes de temperatura.
- Sentidos Nocirreceptores: Incluyen las sensaciones que dañen los tejidos del cuerpo, es decir, de dolor.
- Estos receptores son terminaciones desnudas de fibras nerviosas que se ramifican libremente en la dermis antes de penetrar en la epidermis, Los nocirreceptores se dividen en tres grupos: a) los que responden a esfuerzo o daño mecánico, b) los que reaccionan a extremos de calor o frío y c) los que responden a compuestos químicos como bradicinina<sup>3</sup>, serotonina<sup>4</sup> e histamina<sup>5</sup>.

Por tanto, la forma de la piel, el grosor de esta y la cantidad de corpúsculos definen

---

<sup>3</sup>Nonapéptido que provoca la contracción del músculo liso, aumenta la permeabilidad capilar y reduce la presión arterial. Se forma en la sangre a través de un precursor inactivo, el bradicinínógeno, por la acción de enzimas proteolíticas (p. ej., el veneno de la serpiente) (Clínica Universidad de Navarra, 2018).

<sup>4</sup>Neurotransmisor que se sintetiza a partir del aminoácido triptófano. En el cerebro las vías serotoninérgicas ejercen principalmente un control inhibitor. La serotonina o 5HT está relacionada con los estados emocionales y el estado de ánimo. Bajos niveles de serotonina conllevan depresión, problemas en el control de la ira y de los estados agresivos, desórdenes de tipo obsesivo-compulsivo y problemas emocionales en general (Enciclopedia de Salud, 2018a).

<sup>5</sup>Sustancia fisiológica presente en los tejidos resultado del metabolismo del aminoácido histidina. También se libera histamina en las reacciones inflamatorias de tipo alérgico, causando la dilatación de los capilares sanguíneos y la contracción de la musculatura lisa de los bronquios. Puede producirse una intoxicación histamínica por consumo de alimentos descompuestos o mal refrigerados, principalmente pescado (Enciclopedia de Salud, 2018b).

la sensibilidad del tacto.

Para que lo anterior quede un poco más claro, en la siguiente imagen se puede observar la posición y forma de estos corpúsculos en la piel.

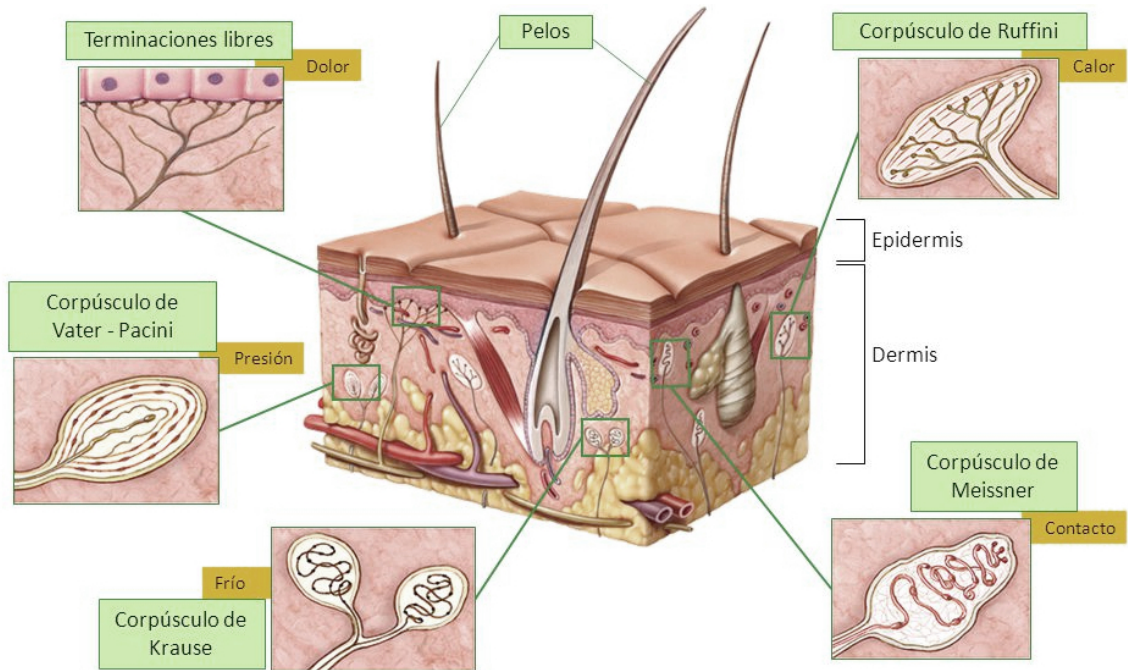


Figura 1.9: Diagrama del interior de la piel humana (Ciencia Na Pele, 2017).



# 2

## Modelo matemático

*El aprender las leyes de la física puede ser,  
a veces, un proceso lento y doloroso...*

– Marcelo Alonso & Edward J. Finn

El objetivo de este capítulo es modelar matemáticamente la relación entre la fuerza aplicada en la deformación del material poroso y su resistencia eléctrica.

### 2.1. Primeras observaciones

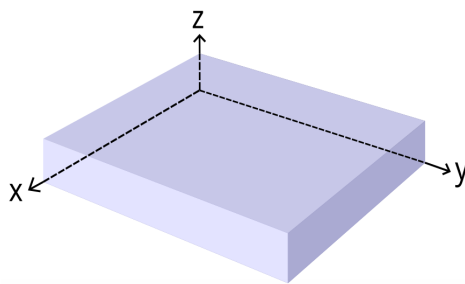


Figura 2.1: Se muestra el diagrama de ejes coordenados de referencia a usarse en el modelo matemático.

Para realizar el modelo matemático deben existir bases de donde partir. En primer lugar debo decir que la esponja tiene forma de prisma rectangular, tomaré el eje coordenado de referencia como se ve en la Figura 2.1.

Lo siguiente es aclarar la nota al pie de la página 1. La resistencia eléctrica del material, la cual es inducida por el grafito depositado en él, no es directamente proporcional a su deformación, veamos porque.

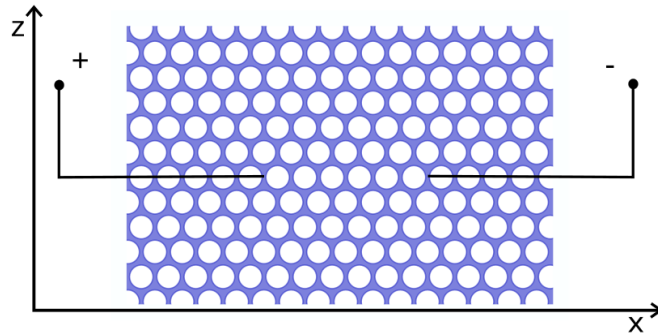


Figura 2.2: Diagrama de una primera medición rápida de la resistencia del material poroso.

En diferentes estudios se ha intentado caracterizar la resistencia eléctrica de todo tipo de espumas, por ejemplo, las metálicas (Zhou et al., 2012); se coloca un par de puntas de prueba en extremos de material inmerso en una diferencia de potencial (véase Figura 2.2), para que así, si se sabe la corriente y utilizando la Ley de Ohm, se pueda calcular su resistencia.

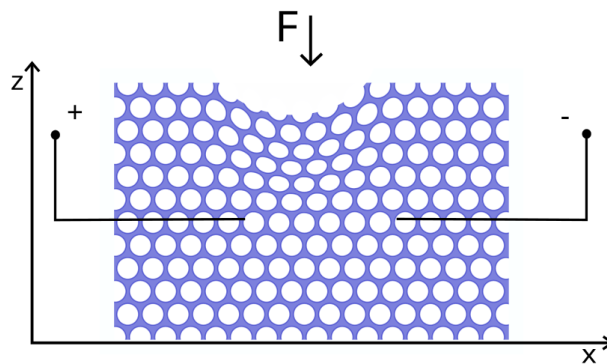


Figura 2.3: Diagrama de una primera medición rápida de la resistencia del material poroso aplicando una fuerza transversal a este.

Efectué una medición rápida de la forma descrita anteriormente y no obtuve resultados concretos, la resistencia, al ejercer fuerzas variables transversales en la espuma (véase

Figura 2.3), o no cambiaba o lo hacía de forma irregular (véase la gráfica de la Figura 2.4).

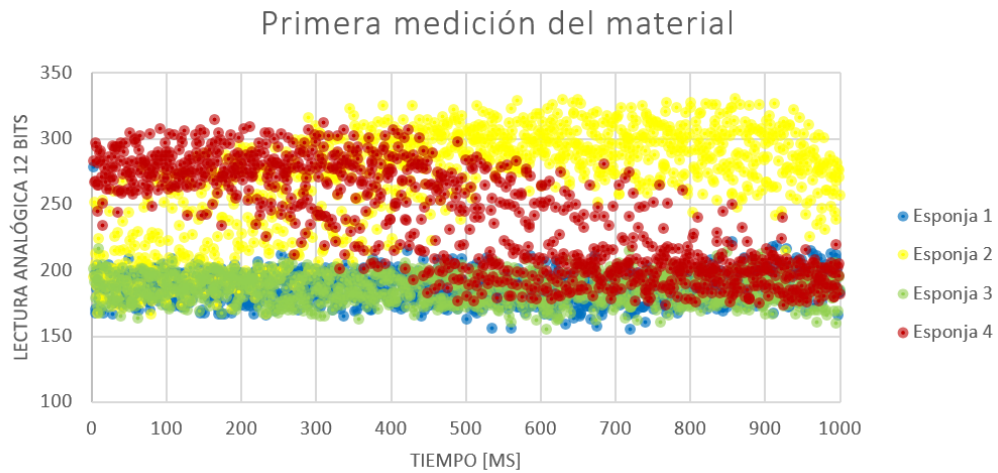


Figura 2.4: Gráfica de los resultados de una primera medición rápida de la resistencia en 4 muestras diferentes del material poroso.

Esto sucede porque lo que se mide no es la resistencia, más bien se mide la resistividad indirectamente, ya que las variables  $L$  y  $A$  de la ecuación (1.7) no sufren alteraciones, es decir, permanecen constantes. Las únicas deformaciones resultantes en el material son de los poros.

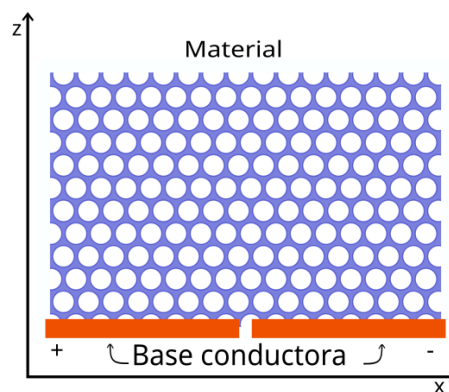


Figura 2.5: Diagrama del sistema de medición basado en el cambio del área de contacto entre el material poroso y la superficie conductora.

Una forma de obtener cambios consistentes en los valores de la medición de la resistencia eléctrica de la espuma cuando se aplica una fuerza, fue colocando a esta sobre una superficie conductora (véase Figura 2.5). Al tener un material de porosidad abierta, el área de contacto entre la superficie conductora y la esponja es menor al área de dicha superficie, y conforme se va aplicando una fuerza transversal al material, el área de contacto va aumentando, disminuyendo así el valor medido de la resistencia eléctrica, en casos ideales se tendría que en cuanto los poros han sido “eliminados” debido a una deformación máxima, la resistencia es cero.

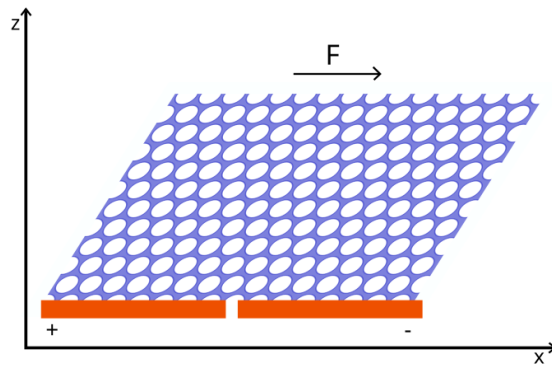


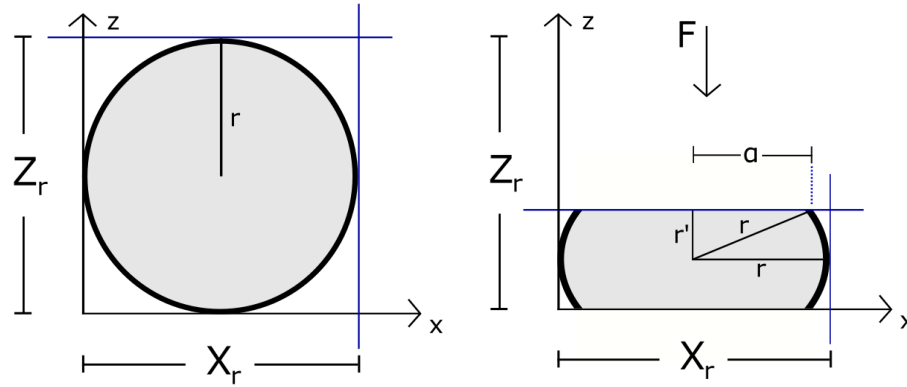
Figura 2.6: Diagrama representando la deformación del material poroso a causa de fuerzas de corte.

Basándome en lo descrito anteriormente, los Módulos de Cizalladura y el de Poisson no tienen efectos prácticos en este trabajo. Es sencillo observar porqué. El Módulo de Cizalladura considera fuerzas tangenciales, esto dice que la esponja se deformaría en forma de paralelogramo (véase Figura 2.6), por tanto, se tiene que el área de contacto seguiría siendo la misma, claro, hasta que la fuerza aplicada sea tan grande como para deshacer el contacto entre la espuma y la base, en este caso el material no tiene un fin práctico útil.

Por otro lado, la deformación longitudinal existe pero se considera nula al tener un material de porosidad abierta, luego entonces, tampoco tiene sentido tomar en cuenta el Módulo de Poisson, esto sucede ya que el material desplazado “en su mayoría” es solamente aire.

## 2.2. Desarrollo

### 2.2.1. Construcción geométrica



(a) Diagrama de un poro antes de incidir una fuerza  
 (b) Diagrama de un poro con una fuerza incidente

Figura 2.7: Diagrama de un poro con radio  $r$  antes y después de la deformación.

A partir del comportamiento previamente descrito, es posible modelar física y matemáticamente este suceso. En primera instancia, hay que suponer que los poros son esféricos de un radio  $r$  (véase el inciso (a) de Figura 2.7), con los diámetros  $Z_r$  y  $X_r$  dependiendo del eje, entonces, por construcción geométrica para un poro, tenemos que para el inciso (a) de la imagen antes mencionada se cumple:

$$\begin{aligned} Z_r &= 2r \\ X_r &= 2r \end{aligned} \quad (2.1)$$

Ahora, como mencioné anteriormente, la deformación longitudinal se puede tomar como nula ya que es un poro abierto, así que  $X_r$  permanece constante. En un caso ideal la deformación mecánica del material sería como se observa en el inciso (b) de la Figura 2.7, entonces  $Z_r$  queda como:

$$Z_r = \eta r' \quad (2.2)$$



donde es evidente notar que el parámetro  $\eta$  es una variable que depende de la fuerza aplicada al poro, ya que cuando dicha fuerza sea nula, entonces este parámetro será igual a dos. Así que lo siguiente es encontrar quienes son  $\eta$ ,  $\alpha$  y el radio deformado  $r'$ , donde  $\alpha$  será llamado como el radio de contacto.

### 2.2.2. Variables

Observando el diagrama (b) de la figura 2.7 es posible observar que en el eje Z existe una diferencia  $r - r'$  a la cual la llamaremos  $\Delta r$ , donde dicha diferencia es igual a cero cuando la fuerza aplicada también es cero.

Del capítulo anterior, se tiene la ecuación (1.2), si se toma a  $\Delta r$  y  $r$  como  $\Delta x$  y  $x$  respectivamente y se despeja  $r'$ , se obtiene nuestra primer variable:

$$r' = r - \frac{F \cdot r}{S \cdot E} \quad (2.3)$$

lo cual explica que si  $F = 0$ , entonces,  $\Delta r = 0$ .

Por comodidad, si se factoriza  $r$  y se define una  $\mu$  como

$$\mu = 1 - \frac{F}{S \cdot E} \quad (2.4)$$

entonces la ecuación (2.3) queda como:

$$\mathbf{r}' = \mu \mathbf{r} \quad (2.5)$$

Ahora, para obtener  $\eta$ , se despeja  $r$  de la primera ecuación del sistema (2.1):

$$r = \frac{Z_r}{2} \quad (2.6)$$

y sustituyendo lo anterior en la ecuación (2.5) y despejando  $Z_r$ , se obtiene:

$$Z_r = \frac{2r'}{\mu} \quad (2.7)$$

que al comparar con la ecuación (2.2) se observa que:

$$\eta = \frac{2}{\mu} \quad (2.8)$$

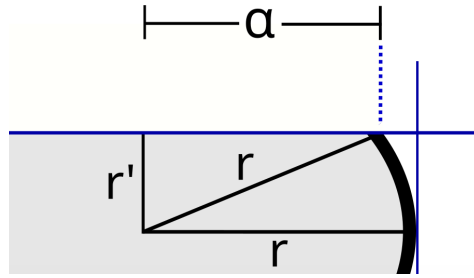


Figura 2.8: Acercamiento al inciso (b) del esquema gráfico del modelo matemático

Lo anterior concuerda con la hipótesis de que la variable  $\eta$  se encuentra en función de la fuerza aplicada al material, es claro observar que si  $F = 0$ , entonces  $\eta = 2$ .

Por último, para determinar  $\alpha$ , se tiene que, por el Teorema de Pitágoras aplicado a la Figura 2.8, se tiene:

$$r^2 = \alpha^2 + r'^2 \quad (2.9)$$

sustituyendo la ecuación (2.5) en la anterior y despejando  $\alpha^2$ , se tiene que:

$$\alpha^2 = r^2 (1 - \mu^2) \quad (2.10)$$

### 2.3. Área de contacto

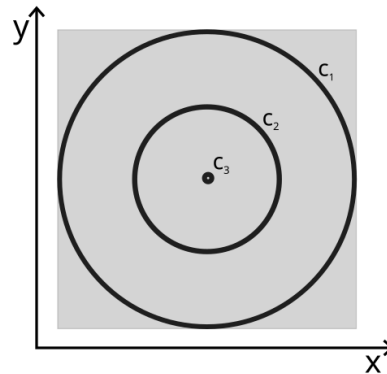


Figura 2.9: Diagrama de tres circunferencias representando poros dependiendo de la fuerza aplicada.  $C_1$  cuando  $F \gg 0$ ,  $C_2$  cuando  $F > 0$  y  $C_3$  cuando  $F = 0$ . La zona gris es la superficie conductora.

Como expliqué anteriormente, la resistencia eléctrica del material cambia en función del área de contacto. Siguiendo esto, para un solo poro y observando de nuevo la figura 2.8, es claro identificar que  $\alpha$  es el radio de contacto entre la esponja y la superficie conductora. Haciendo un análisis,  $\alpha$  debe ser mínima cuando la fuerza que se ejerce en la espuma es cero y si la fuerza es mayor a cero,  $\alpha$  tenderá a  $r$  (véase Figura 2.9).

Entonces, se puede observar en la imagen 2.9 que el área de contacto es el área del círculo. Si el radio es  $\alpha$ , entonces el área de contacto es:

$$A_c = \pi\alpha^2 \quad (2.11)$$

A la ecuación anterior se le debe hacer un ajuste, debe multiplicarse por un factor de 2, ya que como puede verse en la figura 2.7, el contacto es tanto en la parte superior como inferior del poro, por tanto:

$$A_c = 2\pi\alpha^2 \quad (2.12)$$

Por lo tanto, sustituyendo  $\alpha^2$  (ecuación (2.10)) en la ecuación anterior,  $A_c$  queda como:

$$A_c = 2\pi r^2 (1 - \mu^2) \quad (2.13)$$

Si se sustituye la ecuación (2.4) en la ecuación anterior, es evidente notar que el área de contacto es proporcional al cuadrado de la fuerza aplicada.

$$A_c = 2\pi r^2 \left( 1 - \left( 1 - \frac{F}{S \cdot E} \right)^2 \right) \quad (2.14)$$

## 2.4. Resistencia

Del capítulo uno, hay que recordar que la resistencia eléctrica está en función de la resistividad  $\rho$ , el largo  $L$  y el área  $A$  transversal del material, deben notarse dos cosas: para este caso en particular el área transversal  $A$  es el área de contacto de los poros de la esponja, y si  $L$  es el largo de la esponja, entonces:

$$R = \frac{\rho L}{A_c} \quad (2.15)$$

Así que, la resistencia es inversamente proporcional al cuadrado de la fuerza aplicada (véase Figura 2.10), por tanto:

$$\mathbf{R} = \frac{\rho \mathbf{L}}{2\pi r^2 (1 - \mu^2)} \quad (2.16)$$

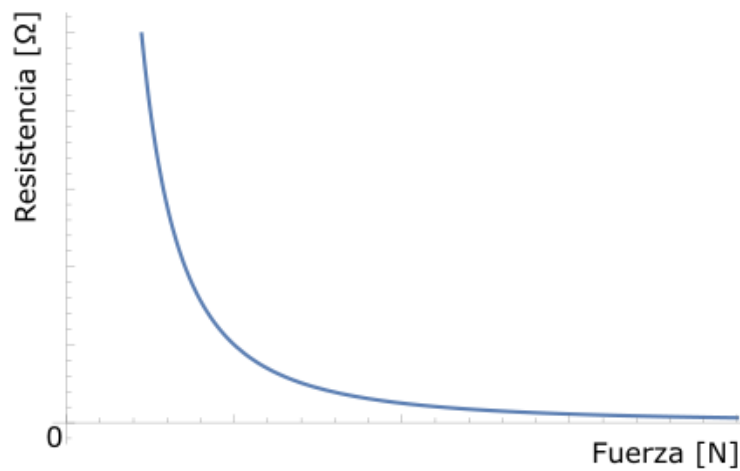


Figura 2.10: Gráfica de la ecuación (2.16) donde se representa el comportamiento de la Resistencia eléctrica respecto a la Fuerza inducida para valores y constantes arbitrarios.



# 3

## Diseño experimental

*Soy de los que piensan que la ciencia tiene una gran belleza.  
Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico, es  
también un niño colocado ante fenómenos naturales  
que le impresionan como un cuento de hadas.*

– Marie Curie

Una vez obtenido el modelo teórico de la relación Fuerza vs Resistencia, faltaría cotejarlo contra el comportamiento de una esponja real midiendo las cantidades involucradas. Para esto, obtuve algunas de las variables de la relación (2.16) del capítulo anterior, por ejemplo: el tamaño del radio de la porosidad y el módulo de elasticidad. En este capítulo presento una descripción de los procedimientos y montajes experimentales con su debida referencia a los resultados que reporto en el siguiente capítulo.

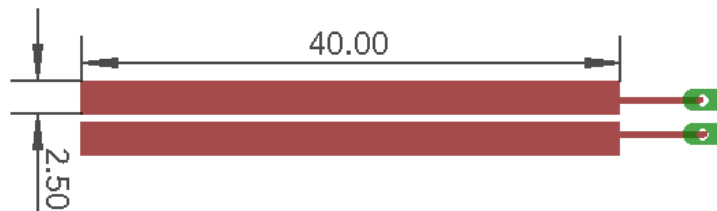


Figura 3.1: Diagrama de la superficie de contacto partida en dos rectángulos. Las unidades están en mm.

Lo primero que realicé fue un pequeño circuito electrónico impreso (véase Figura 3.1) donde se tienen dos áreas de  $1 \pm 0.02 \text{ cm}^2$  cada una en forma de rectángulos conectadas a un pin header cada una, estas áreas funcionan como la superficie de contacto; la muestra de la esponja que usé es de un tamaño de  $5.5 \times 40 \times 8.5 \text{ mm}$ , justo para que el tamaño de la esponja coincida con el área de contacto.

Es partir de ahora que, en este texto, llamaré *sensor* al conjunto espuma-superficie (véase Figura 3.2).

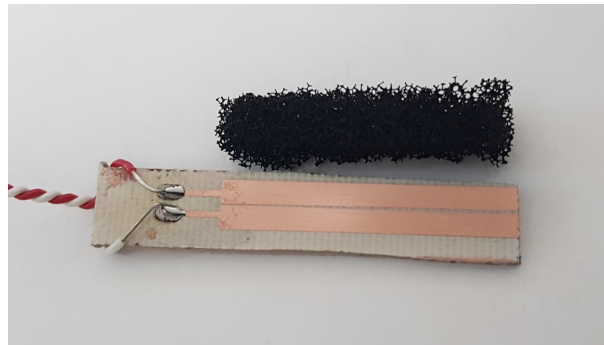


Figura 3.2: Fotografía del material deformable junto con la placa de la superficie de contacto.

### 3.1. Radio de poros

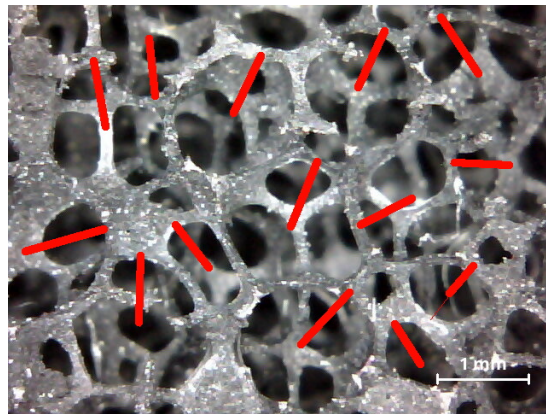


Figura 3.3: Medición representativa del radio de los poros, la medida el programa lo da en píxeles y con una longitud de referencia se cambia a una otra longitud conocida.

Los materiales estudiados en este trabajo tienen, afortunadamente, la característica de tener una porosidad homogénea, es decir, todos los poros son del mismo orden de magnitud.

El procedimiento que hice para obtener el radio promedio de los poros fue tomar una fotografía con un microscopio digital con zoom de 800X Farmabionics (2017) de un área en particular de la esponja junto con una medida de referencia; con dicha foto y usando Gimp (2017), un software de manipulación de imágenes, pude medir el tamaño de todos los poros que estén contenidos en esa foto, para así obtener un radio promedio (véase Figura 3.3). La medida que da el software es en píxeles, por tanto es necesario hacer una conversión de unidades (véanse los resultados 4.1, 4.2 y 4.3 del capítulo 4).

### 3.2. Módulo de Young

En primera instancia busqué lugares en donde se pudiera hacer la medición formal del Módulo de Young a la espuma, esto con el objetivo principal de reducir la incertidumbre de la medición; lamentablemente esto no me fue posible ya que la medición no se pudo efectuar de acuerdo a los requerimientos necesarios o el procedimiento era muy costoso.

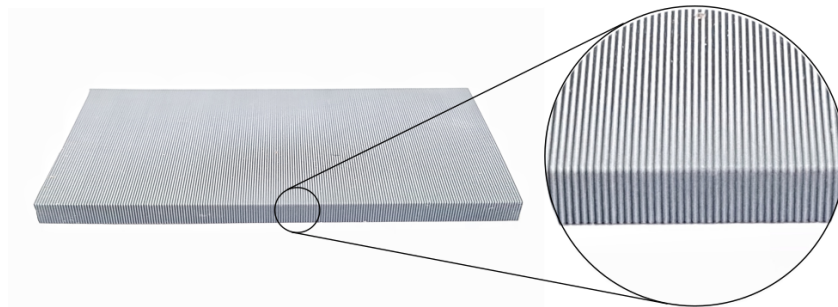


Figura 3.4: Patrón de medida o regla para medir los cambios en la deformación de la esponja.

Dado lo anterior, decidí usar una cámara digital de 12 Mpx de resolución con ayuda de un lente macro de 10X y un patrón de medida (véase Figura 3.4), esto con el fin de observar y medir el cambio de la deformación física transversal. Con esto, el patrón de



medida hará función de una regla, luego entonces se puede hacer el mismo procedimiento que en la sección anterior, medir y convertir (véase el resultado 4.4 del capítulo 4).

Tomé el sensor y lo acoplé frente a la cámara, de tal manera que su campo de visión cubra por completo una cara de la espuma (véase Figura 3.5), dicho campo también debe incluir el patrón de medida. Lo complicado es centrar el lente para evitar en mayor medida de lo posible el error de paralaje y aberraciones del lente.

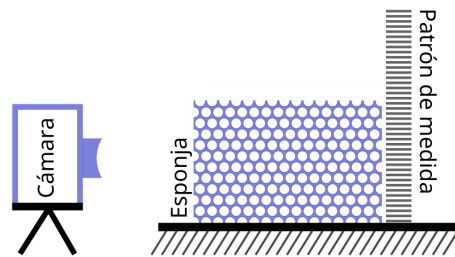


Figura 3.5: Se muestra el diagrama del sistema utilizado para la obtención del Módulo de Young del material deformable.

Una vez montado lo anterior, tomé las fotografías colocando cierto número de pesas sobre la espuma de diferentes masas, esto con el fin de medir la deformación inicial y final para cada una de estas (véase Figura 3.6), por último, con las medidas recabadas, hice un análisis estadístico para obtener el Módulo de Young (véanse los resultados en las gráficas de las figuras 4.5, 4.6 y en el resultado (4.5) del siguiente capítulo).

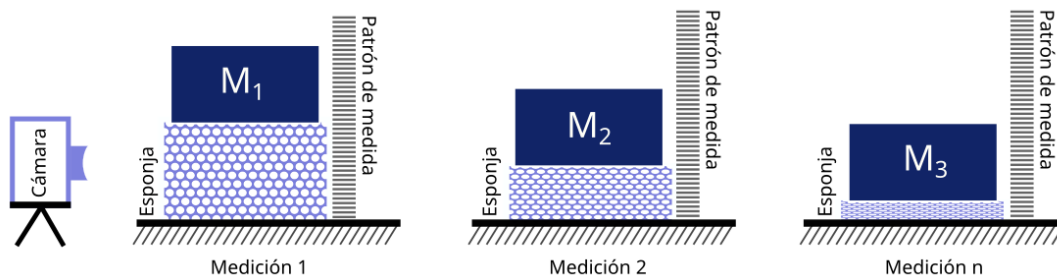


Figura 3.6: Diagrama del tipo de mediciones para obtener el Módulo de Young del material. Es sencillo observar que:  $M_1 < M_2 < M_3$ .

### 3.3. Histéresis elástica

Siguiendo un procedimiento experimental similar al de la sección anterior, tomé a la esponja y al patrón de medida y de nuevo los coloqué frente a la cámara.

Lo siguiente fue tomar fotografías de antes, durante y después de colocar cada pesa, esto con el fin de medir las deformaciones de carga y descarga con ayuda de la computadora (véase el resultado en la gráfica de la figura 4.8).

### 3.4. Circuito electrónico base

Cuando al sensor se le aplica una fuerza, el cambio del área de contacto entre la espuma y la superficie conductora producen una variación de resistencia eléctrica, para analizar dicha variación es conveniente montar un circuito electrónico, el cual es una parte crucial en los experimentos realizados en este trabajo de tesis. Este es el sistema electrónico base, de aquí parto para todos los demás circuitos electrónicos usados en este texto.

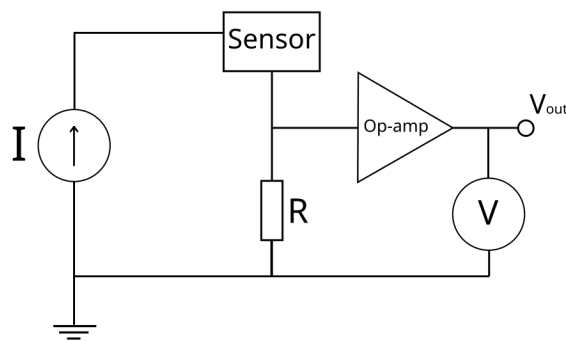


Figura 3.7: Diagrama eléctrico general.

El problema a resolver es el cómo medir una resistencia eléctrica sin saber de antemano un rango en específico, es decir, medir un valor que va de 0 hasta más de 20 M $\Omega$ ; además tener valores de resistencias tan altos, produce una impedancia igual de grande, lo que implica un problema si es que se requiere analizar esta señal con un microcontrolador.

Así que, para resolver estos dos fines, implementé un circuito que constó de dos partes

cruciales: una fuente de corriente constante y un amplificador operacional en modo de seguidor de voltaje (véase Figura 3.7).

La fuente de corriente constó de un regulador de tensión variable LM317 (Texas Instruments, 2016), según su hoja de especificaciones, para lograr una fuente de corriente se tiene que conectar una resistencia entre el pin  $V_{out}$  y  $Adj$  (véase Figura 3.8) para que con ayuda de la fórmula (3.1) saber la corriente de salida.

$$I = \frac{1.2}{R1} \quad (3.1)$$

Entonces, al conocer la corriente inducida al sistema junto con la diferencia de potencial (la cual se obtiene al medirla) calculé la resistencia del material. Otro beneficio, es controlar indirectamente la temperatura de operación del material, ya que al no inducir corriente en exceso sobre ella no produce un aumento significativo en su temperatura.

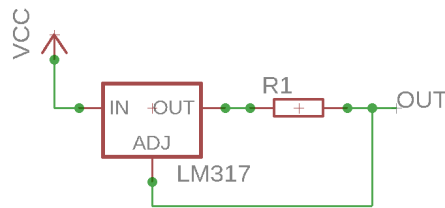


Figura 3.8: Diagrama esquemático electrónico de una fuente de corriente usando un LM317.

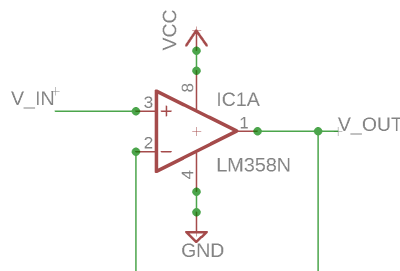


Figura 3.9: Diagrama esquemático electrónico de un seguidor de voltaje usando un op-amp LM358

El op-amp que monté en el circuito fue el LM358 (Texas Instruments, 2014) en modo de seguidor de voltaje (véase Figura 3.9). Este modo de operación del op-amp fue necesario

para aislar los voltaje de entrada y salida pero manteniéndolos del “mismo” valor, para así utilizar un microcontrolador para el análisis de las señales emitidas por el sensor.

### 3.5. Sistema de lectura

Para la recolección de datos y el análisis de la señal emitida por el sensor en el sistema electrónico, usé un microcontrolador Tiva C (Texas Instruments, 2017a) mediante el protocolo de comunicación UART<sup>1</sup>

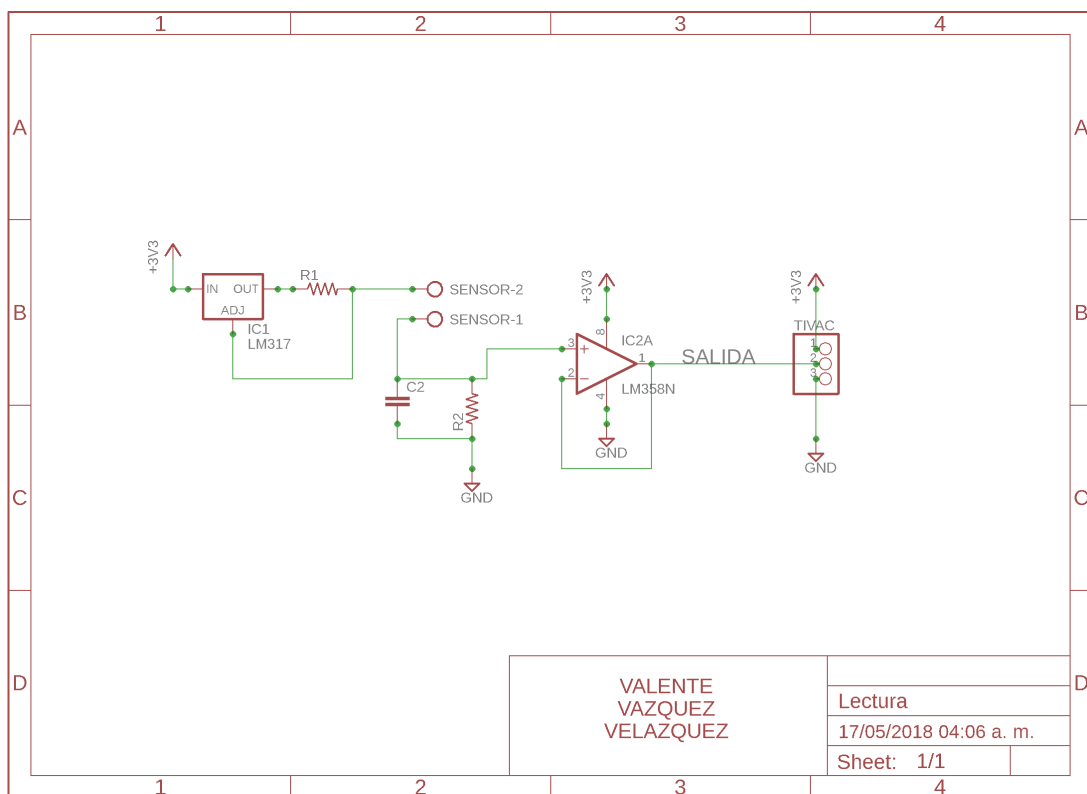


Figura 3.10: Diagrama esquemático electrónico que muestra el sistema de lectura, donde la conexión de SALIDA va directamente a un pin analógico del microcontrolador.

<sup>1</sup>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter por sus siglas en inglés, están compuestos por tres pistas fundamentales: TX, RX y GND. Lo que hace muy útil a este puerto es que trabaja con niveles lógicos TTL (transistor-transistor logic) lo cual hace que dos micros se puedan comunicar sin necesidad de convertir los voltajes con transreceptores/drivers (GeekyTheory, 2017).

El sistema electrónico de lectura constó del sistema electrónico base más el microcontrolador. Se puede observar que en el circuito electrónico de la Figura 3.10 existe un subcircuito RC ( $R_2$  y  $C_2$ ) que funciona como filtro pasa bajo, en él la resistencia  $R_2$  es proporcional a la sensibilidad del sistema ya que se forma un divisor de tensión con el sensor y dicha resistencia.

Utilicé dos IDEs de programación, Energia (2017) y Processing (2017), el primero fue para programar las ordenes al microcontrolador, ahí especificué el pin de entrada para la señal analógica que recibo del sensor y abrir la comunicación Serial; el segundo lo usé para leer el puerto Serial del microcontrolador y guardar la recolección de datos a un archivo de texto plano para su posterior análisis físico y estadístico.

### 3.6. Fuerza vs Resistencia

Este fue el procedimiento experimental más importante de este trabajo.

Para obtener la relación experimental entre fuerza y resistencia, conecté el sensor al sistema de lectura, coloqué cierto número de pesas de diferentes masas sobre el sensor y tomé las lecturas que arroja el sistema para cada una de ellas. En la figura 3.11 se puede observar el diagrama del sistema montado.

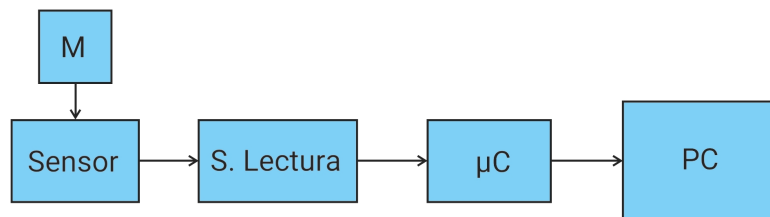


Figura 3.11: Diagrama del sistema utilizado para obtener la fuerza aplicada al material deformable.

Primero, al saber las masas de la pesas pude calcular la fuerza aplicada al material, ya que el peso es el producto de la masa por la constante de aceleración de gravedad<sup>2</sup>  $g$  (véase el resultado en la gráfica de la figura 4.11 del siguiente capítulo). Segundo, al calibrar el sistema electrónico pude conocer los valores de los voltajes de salida de este en función de la resistencia inducida por el sensor, dando así una forma de relacionar el cambio medido de la resistencia eléctrica del material con la fuerza aplicada (véase el resultado en la gráfica de la figura 4.10 del siguiente capítulo).

La calibración del circuito la realicé cambiando la entrada el sensor por ciertos números de resistencias de valores comerciales, también se cambian los valores de la resistencia  $R_2$  y se hace una medida por cada combinación posible de resistencias.

---

<sup>2</sup>En la Ciudad de México, específicamente en la delegación Coyoacán,  $g$  tiene un valor de  $9.78 \pm 0.01 \% m/s^2$  (MetAs S.A. de C.V., 2018).



# 4

## Resultados

*La ciencia, mi muchacho, está compuesta de errores, pero son errores que es útil cometer, porque conducen poco a poco a la verdad.*

– Julio Verne

En este capítulo, en primera instancia presento todos los resultados experimentales obtenidos, seguido de estos, hago un análisis de cada resultado. Es importante mencionar que todos los datos recabados se encuentran en tablas en el Anexo I al final del documento.

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Radio promedio de poros

Al tomar una foto del material deformable junto a la medida de referencia (véase Figura 4.1), que solamente para este caso es un trozo de alambre, el cual se sabe que tiene un grosor de  $0.94 \pm 0.02$  mm y al medirla con ayuda del programa Gimp, se obtiene un grosor de  $101 \pm 2$  px; haciendo una simple regla de tres, se llega al resultado:

$$1\text{px} = 9.31 \pm 0.38\mu\text{m}. \quad (4.1)$$



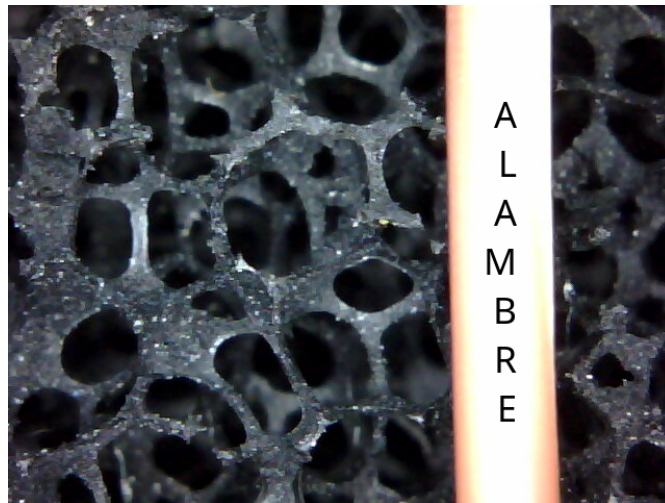


Figura 4.1: Foto tomada al material deformable junto a un patrón de medida.

Ahora, capturé otra foto del material (véase Figura 4.2) para contar el número de poros, trazar un radio en cada poro visto y medirlos, de nuevo con Gimp.

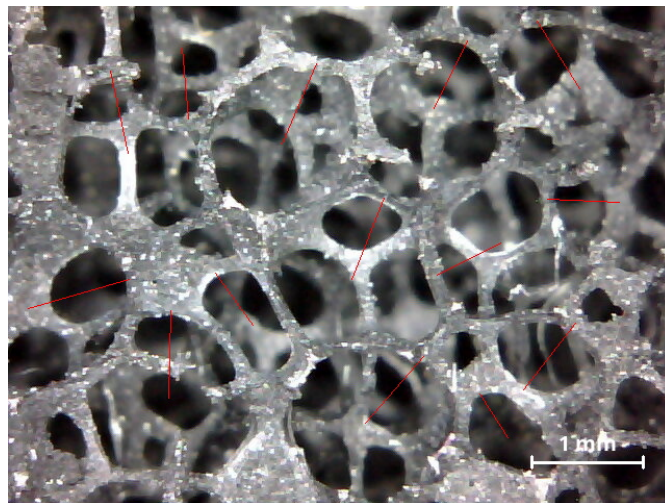


Figura 4.2: Se dibuja un radio a cada poro visible para tener un promedio final de la porosidad del material deformable.

En la siguiente tabla de muestras los valores medidos de todos los poros observados:

Poros	radio (px $\pm 2$ )	Poros	radio (px $\pm 2$ )
1	80.8	2	69.4
3	84.2	4	72.4
5	77.4	6	71.2
7	68.4	8	83.9
9	62.8	10	84
11	102.9	12	85
13	51.9	14	81.2

Tabla 4.1: Radio medido de 14 poros dentro de la Figura 4.2, en píxeles

Al hacer un promedio de estos datos, obtuve que el radio promedio de los poros es de:

$$R_P = 77 \pm 4 \text{ px} \quad (4.2)$$

que al convertir en mm, llegué a un radio promedio de poros de:

$$R_P = 0.72 \pm 0.07 \text{ mm} \quad (4.3)$$

#### 4.1.2. Módulo de Young

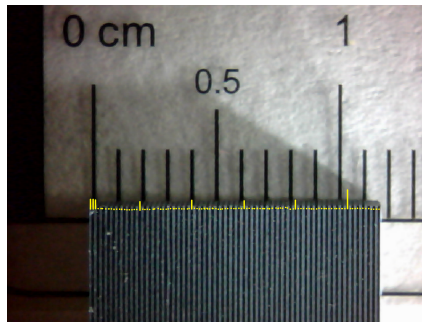


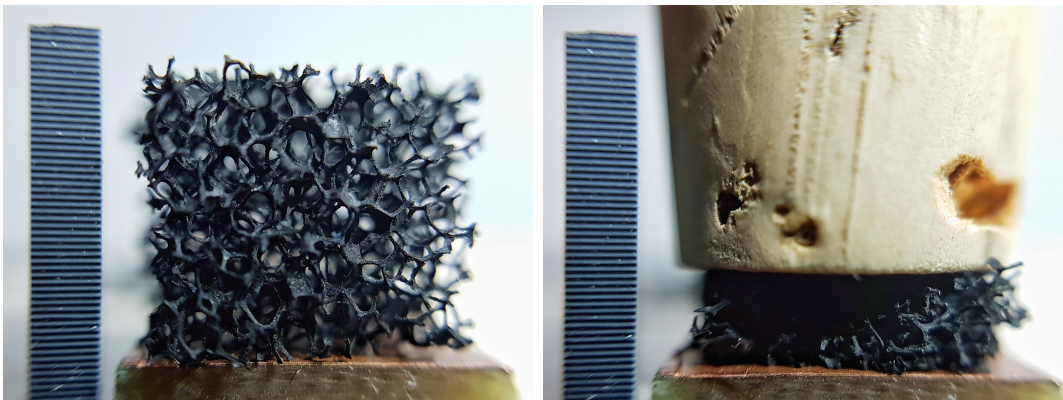
Figura 4.3: Se muestra el tamaño del patrón de medida, los puntos y líneas amarillas representan las cuentas.

Antes que nada, debo presentar la resolución que tomé del patrón de medida que utilicé para la medición de la deformación de la espuma (véase la Fig. 3.4).

En la figura 4.3 muestro una foto tomada con el microscopio del patrón de medida, en ella se puede observar que conté, con ayuda del software Gimp, un número de 112 líneas en una longitud de  $11.54 \pm 0.02$  mm, lo cual da una resolución de:

$$1 \text{ línea} = 0.1030 \pm 0.0002 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Con ayuda del patrón de referencia, pude medir en las fotografías la deformación de la esponja, tomé una foto antes de colocar una masa y una vez ya colocada (véase Figura 4.4). Tomé 6 medidas de las deformaciones para cada una de las masas de la tabla 4.2.



(a) Esponja antes de incidir una fuerza

(b) Esponja con fuerza incidiendo

Figura 4.4: Se muestran dos fotografías donde se puede observar al material antes y durante su deformación, junto con el patrón de medida.

Medida	masa $\pm 0.5$ g	Medida	masa $\pm 0.5$ g
1	0	2	38
3	75	4	252
5	369	6	409
7	775	8	1163
9	1664	10	2076
11	3782		

Tabla 4.2: Masas usadas para la medición de la deformación del material.

Así que tanto las fuerzas aplicadas al material como las deformaciones fueron negativas, a continuación (véase Figura 4.5) muestro la gráfica de Esfuerzo  $\sigma$  contra Deformación  $\epsilon$

obtenida de los promedios de las seis mediciones seguida de la gráfica con el ajuste lineal para la obtención del Módulo de Young (véase Figura 4.6).

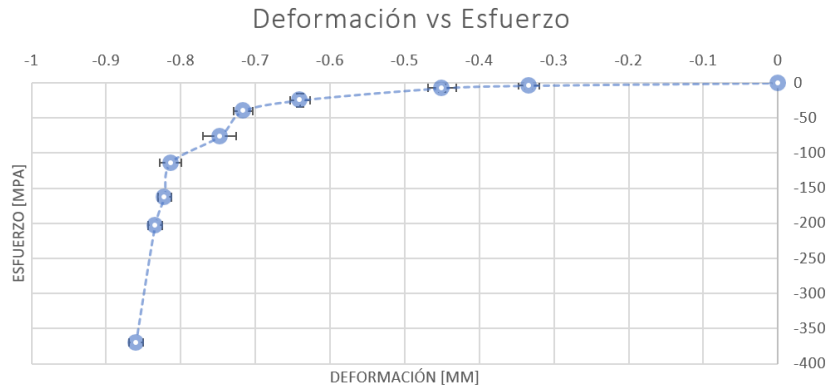


Figura 4.5: Se muestra la gráfica obtenida de la medición de la deformación en función de los esfuerzos aplicados al material.

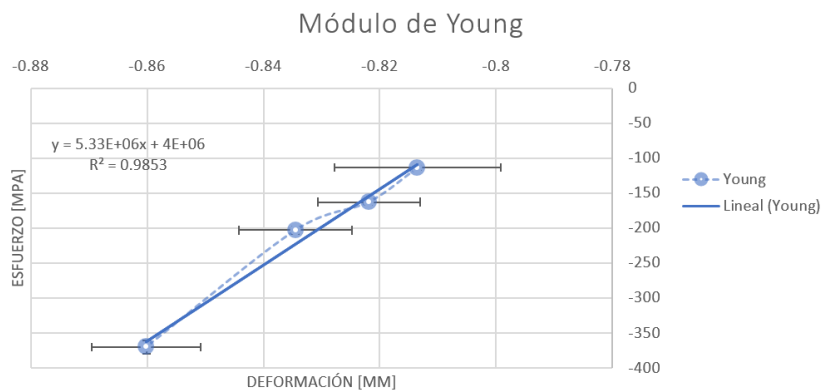


Figura 4.6: Se muestra la gráfica obtenida al aplicarle un ajuste a la zona lineal de los datos obtenidos anteriormente.

Por tanto, calculé que el Módulo de Young es:

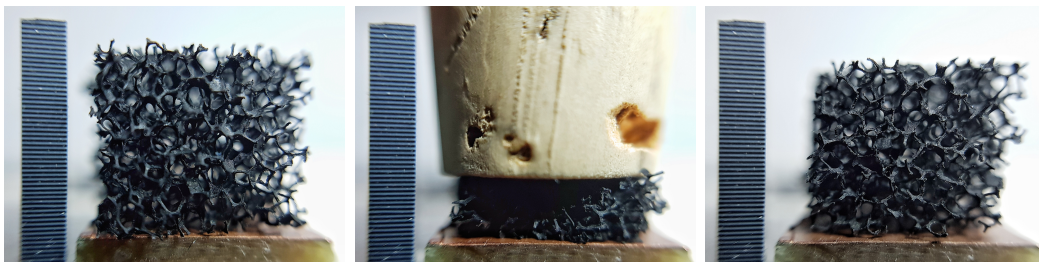
$$E = (5.33 \pm 0.47) \times 10^6 \text{ N/m}^2 \quad (4.5)$$

### 4.1.3. Histéresis

Una parte crucial es el comportamiento elástico del material, al querer usarlo como un sensor de presión o un sensor táctil es importante que su ciclo de histéresis sea pequeño.

El procedimiento fue similar al del Módulo de Young, con la diferencia que tomé tres fotografías por masa utilizada, una antes, una durante y otras después (véase Figura 4.7).

En la gráfica de la Figura 4.8 presento los resultados del promedio de seis medidas del comportamiento elástico de la espuma, cuando coloco pesas en ciclos de carga y descarga.



(a) Esponja antes de incidir una fuerza (b) Esponja con fuerza inci- diendo (c) Esponja después de inci- dir una fuerza

Figura 4.7: Se muestran tres fotografías donde se puede observar al material antes, durante y después de su deformación, junto con el patrón de medida (imagen representativa).

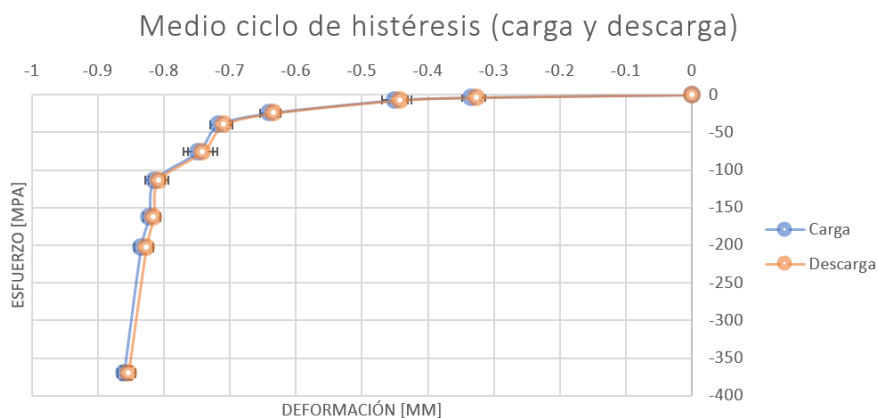


Figura 4.8: Se muestra la gráfica de medio ciclo de histéresis del material.

#### 4.1.4. Circuito electrónico

La resistencia R1 del diagrama electrónico de la Figura 3.10, es de un valor de  $56 \pm 5\%$   $\Omega$ , al usar la ecuación (3.1), calculé una corriente de:  $21.4 \pm 0.1$  mA.

Para el filtro pasa bajo del subcircuito R-C (R2-C2) que se muestra en la salida del sensor, está calculado para una frecuencia de 60 Hz. Esta frecuencia la obtuve midiendo la respuesta del sensor con un osciloscopio (véase Figura 4.9)(Electrónica Estudio, 2018). En la tabla A15, que se encuentra en el Anexo I, muestro los valores de los condensadores para cada una de las resistencias de referencias, las obtuve con la ecuación (4.6) que describe la frecuencia de corte para un circuito R-C.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.6)$$

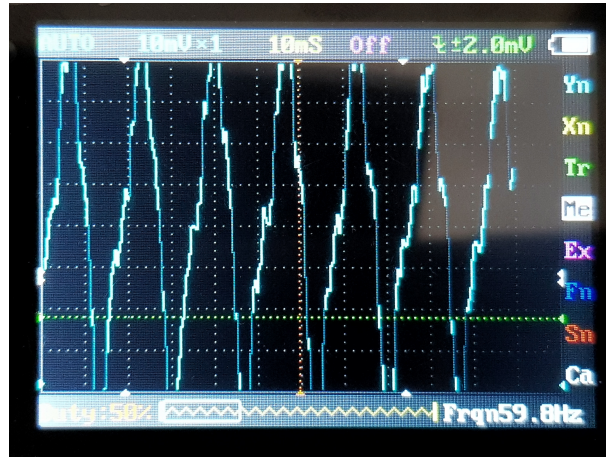


Figura 4.9: Medida de la frecuencia de respuesta del material con un osciloscopio.

#### 4.1.5. Fuerza vs Resistencia

##### Calibración

Para realizar la calibración del sistema electrónico usé 18 valores de resistencias emulando la resistencia de entrada del sensor y 7 más para la resistencia de referencia o sensibilidad (véase Tabla 4.3), además registré 500 mediciones por cada combinación posible, las cuales dan como resultado la gráfica de la Figura 4.10.



Número	Resistencia sensor $\pm 5\%$ [ $\Omega$ ]	Resistencia referencia $\pm 5\%$ [ $K\Omega$ ]
1	1	10
2	56	47
3	680	100
4	1000	560
5	4700	1000
6	8100	4700
7	47000	10000
8	75000	
9	100000	
10	330000	
11	560000	
12	680000	
13	1000000	
14	2000000	
15	4700000	
16	10000000	
17	20000000	
18	30000000	

Tabla 4.3: Valores de resistencias para la calibración.

## Calibración del sistema electrónico

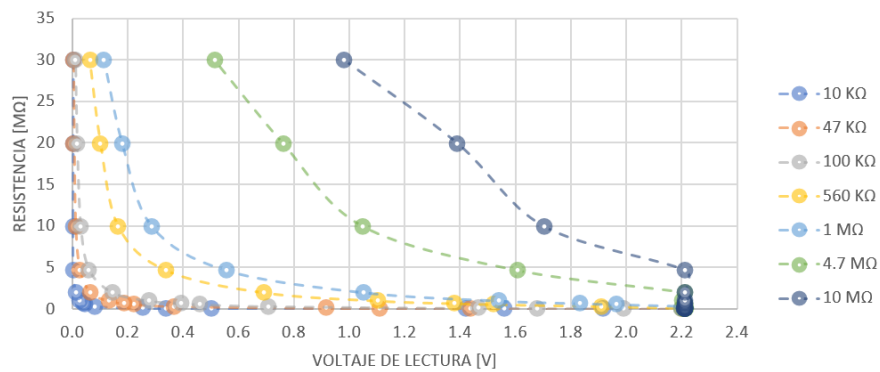


Figura 4.10: Se muestra la gráfica de calibración obtenida al medir los voltajes de salida del sistema electrónico para cada combinación posible de resistencias.

## Fuerza

Una vez calibrado el sistema, solo queda hacer una medición del voltaje de salida del sistema de lectura en función de la fuerza ejercida a la esponja, esto con el fin de hacer una correlación entre la Resistencia eléctrica y la Fuerza ejercida al material.

En esta ocasión, realicé 10 tomas de mediciones, de mil lecturas cada una, del voltaje de salida del sistema de lectura por cada combinación posible entre masa colocada en el sensor y la resistencia de referencia, estos resultados se pueden observar en la siguiente gráfica.

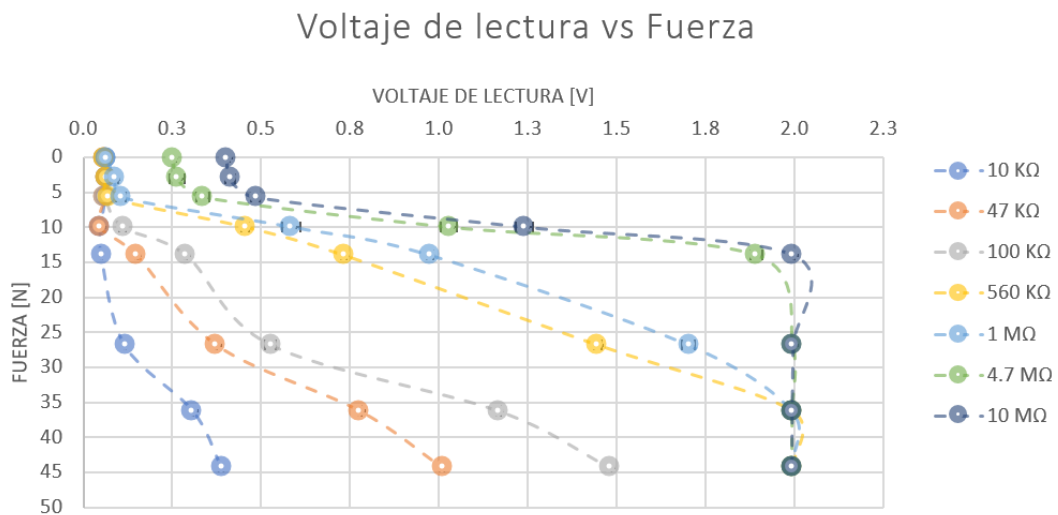


Figura 4.11: Se muestra la gráfica obtenida del promedio de los voltajes de salida del sistema electrónico para cada combinación entre fuerzas inducidas al material y resistencias de referencia.

## Fuerza vs Resistencia

A continuación presento los resultados más importantes de este trabajo de tesis, aquí correlaciono los resultados anteriores, es decir, la Resistencia eléctrica y la Fuerza inducida. En esta sección muestro solamente cinco gráficos, en las primeras dos coloco todas las relaciones obtenidas respecto a las resistencias de referencia, después muestro la gráfica donde se aprecian los valores de la diferencia de potencial inducido al sensor y por último



los mejores resultados obtenidos: las correlaciones de las resistencias de referencia de 100 KΩ 560 KΩ y 1 MΩ; al final de este trabajo, en el Anexo II, se encuentran las gráficas separadas por cada una de estas relaciones.

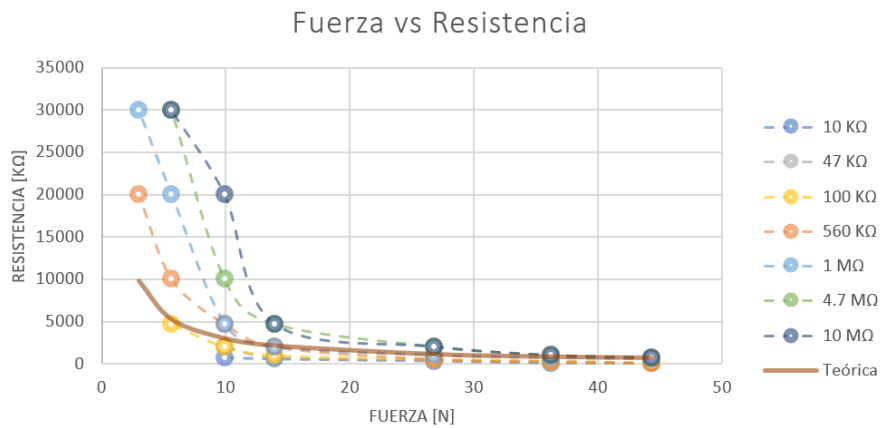


Figura 4.12: Se muestra la gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores entre la resistencia eléctrica y la fuerza inducida.

Otra opción de visualización es en una gráfica semilogarítmica:

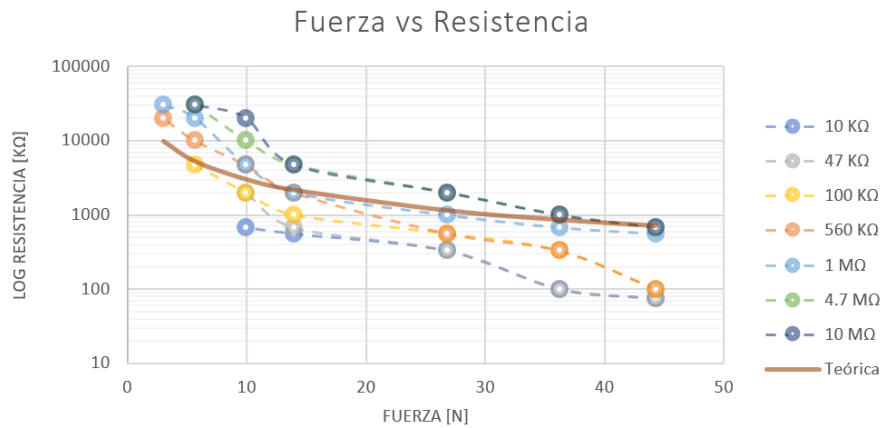


Figura 4.13: Se muestra la gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores entre la resistencia eléctrica y la fuerza inducida

Para el cálculo de la resistencia del sensor en el circuito de lectura, sabiendo que se trata de un divisor de tensión eléctrica, medí el voltaje de entrada al sensor  $V_i$  y el de

salida  $V_o$  con el microcontrolador (véase Fig. 4.14), además, con un multímetro MUL-33 (Truper, 2018) medí la resistencia de carga  $R_L$  del circuito, la cual tiene un valor de  $7.2 \pm 0.077 \text{ M}\Omega$ . Así que, sabiendo  $R_2$ , pude obtener los valores de las resistencias del sensor con la siguiente fórmula:

$$R_1 = R_p \frac{V_i - V_o}{V_o} \quad (4.7)$$

donde  $R_p$  es la suma en paralelo de la resistencia de carga  $R_L$  y la resistencia de referencia, es decir,  $R_2$ .

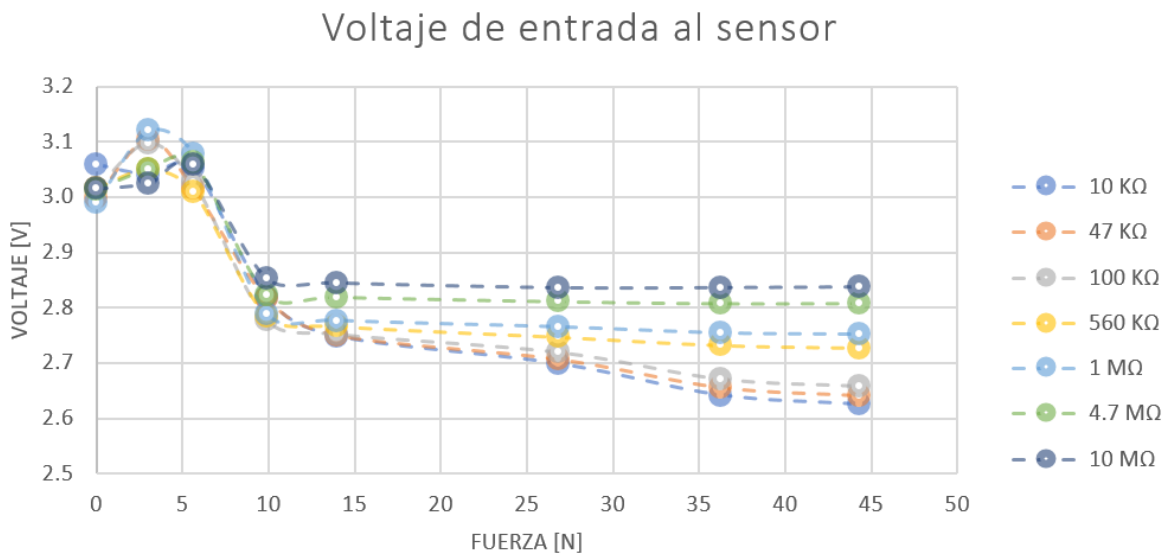


Figura 4.14: Gráfica obtenida al medir el voltaje inducido al sensor respecto a la Fuerza ejercida a este.

Los mejores resultados los presento en las siguientes tres gráficas, fueron para las resistencias de referencia de  $100 \text{ K}\Omega$ ,  $560 \text{ K}\Omega$  y  $1 \text{ M}\Omega$ , obtuve coeficientes de correlación de 0.988, 0.998 y 0.976 respectivamente. Cada gráfica (también las del Anexo) tiene la correlación experimental (azul), la resistencia calculada obtenida al resolver matemáticamente el circuito electrónico de lectura (gris) y la relación teórica obtenida en el capítulo 2 (naranja) (véase ecuación (2.16)).

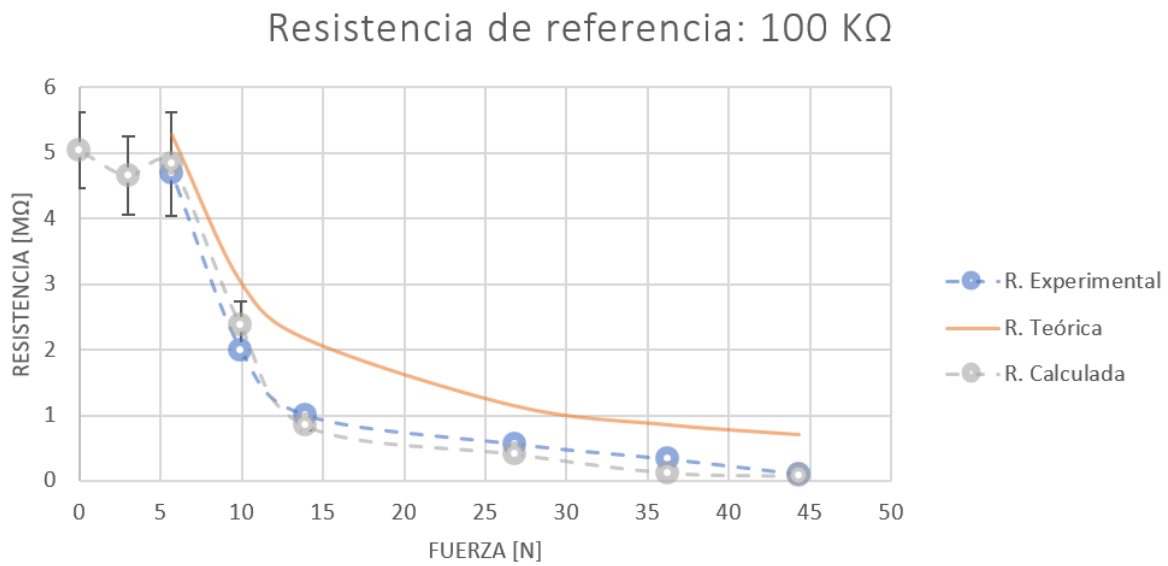


Figura 4.15: Se muestra la gráfica obtenida al correlacionar los valores entre la Fuerza inducida y la Resistencia eléctrica para una resistencia de referencia de 100 K $\Omega$ .

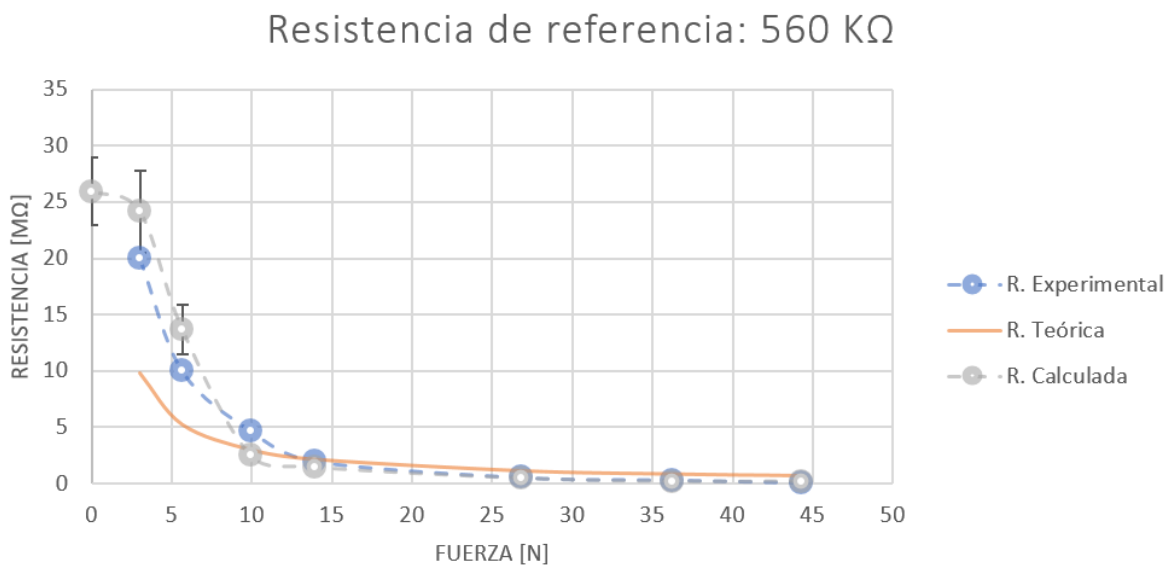


Figura 4.16: Se muestra la gráfica obtenida al correlacionar los valores entre la Fuerza inducida y la Resistencia eléctrica para una resistencia de referencia de 560 K $\Omega$ .

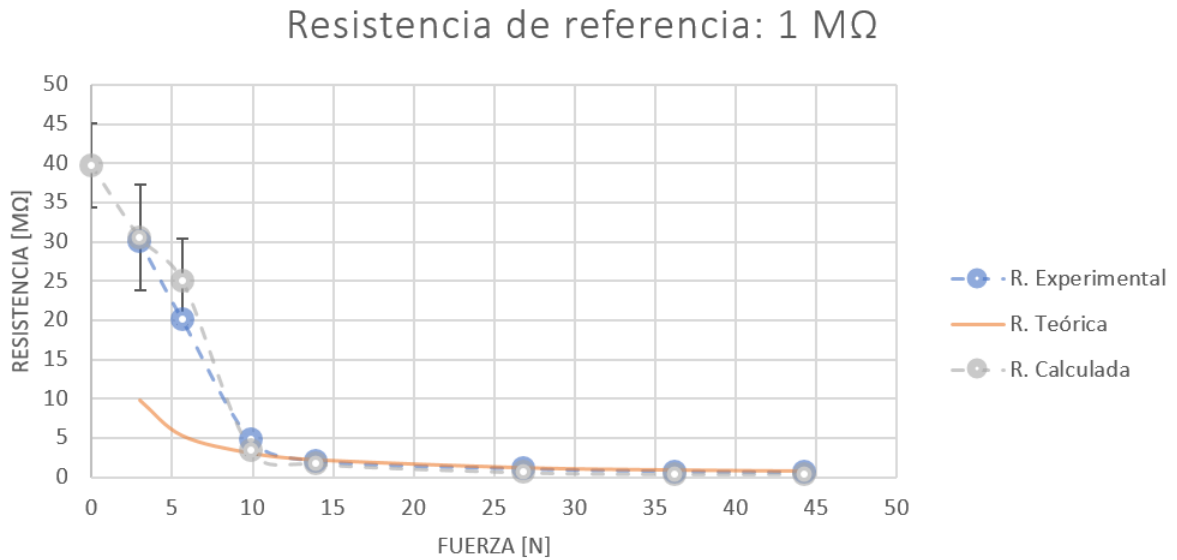


Figura 4.17: Se muestra la gráfica obtenida al correlacionar los valores entre la Fuerza inducida y la Resistencia eléctrica para una resistencia de referencia de 1 MΩ.

## 4.2. Discusión

### 4.2.1. Radio promedio de poros

En la Figura 4.2 es evidente notar que, efectivamente, el material deformable tiene la propiedad de tener porosidad de celda abierta y con un tamaño homogéneo y uniforme, esto favorece la toma de un promedio de poros, ya que de lo contrario, se tendría que optar por otro tipo de medición o resolución del problema.

### 4.2.2. Módulo de Young

Al conocer el radio de los poros de la espuma, me fue posible saber que objeto podría utilizar como un sistema de referencia ya que las deformaciones no iban a ser más grandes que el alto del material, es decir, 8.5 mm.

La resolución obtenida del patrón de referencia (véase Figura 3.4), es aproximadamente 1.2% de la altura de la esponja; por este motivo, el error de una sola medición del Módulo

de Young es del orden del 80%, pude reducir este error a menos del 9% tomando un promedio de seis mediciones. Usé dos muestras de esponjas, es decir, 3 mediciones para cada una.

### 4.2.3. Histéresis

Un punto positivo del material estudiado es su ciclo de histéresis. La recuperación del material después de inducir una fuerza es aceptable, en promedio, el material presenta un retraso en la recuperación de forma de 0.011 mm, lo cual representa un 0.13% respecto a la altura inicial.

### 4.2.4. Fuerza vs Resistencia

#### Calibración

En la gráfica de calibración de la Figura 4.10, se puede observar lo que sería un comportamiento ideal del sensor. Es posible hacer notar que las resistencias de referencia de 560 K $\Omega$  y 1 M $\Omega$  presentan un comportamiento más suave a las demás. Arriba de estos valores la gráfica empieza a tener un comportamiento lineal; abajo de estos valores la curva de respuesta es más cerrada.

#### Fuerza

Tomé 10 muestras de medidas por combinación posible entre resistencias de referencias y masas utilizadas, lo que hace un total de 630,000 medidas. Esto lo hice para reducir errores en las mediciones ya que al efectuar una sola toma los errores iban por arriba del 400%.

Se puede notar un comportamiento parecido a la gráfica de calibración, aunque, como mencioné anteriormente, los valores altos de resistencia de referencia como 4.7 y 10 M $\Omega$  tienen una razón de cambio grande, esto sería apto para sensar fuerzas de pequeñas

magnitudes; en cambio para valores pequeños como de  $10\text{ K}\Omega$  pasa lo contrario, esta sería una buena opción para sensar fuerzas de grandes magnitudes.

### Fuerza vs Resistencia

Se puede observar en las gráficas de las Figuras 4.12 y 4.13 que las correlaciones obtenidas tienen un comportamiento hiperbólico, igual que el modelo matemático construido en el Capítulo 2. Dicho comportamiento lo puedo dividir en dos: para fuerzas arriba de  $15\text{ N}$  y para abajo de esta fuerza

Para fuerzas pequeñas (menos de  $15\text{ N}$ ), no se tiene un comportamiento uniforme, esto se debe a la oscilación de la fuente de corriente y a la deformación no uniforme de todos los poros. El comportamiento errático debido a la oscilación de la fuente se puede confirmar con los valores del voltaje inducido al sensor (véase tabla de la Figura 4.14) y los errores obtenidos al momento de calcular la resistencia del sensor en el circuito de lectura (véanse las gráficas y tablas del Anexo); la deformación de todos los poros no es uniforme ya que al aplicar una fuerza los poros que están en medio de la esponja son los últimos en deformarse.

Para fuerzas arriba de  $15\text{ N}$  y resistencias de referencias arriba de  $100\text{ K}\Omega$  el comportamiento teórico y el experimental son similares, más no iguales. Es por esto que, si se hace un análisis estadístico de errores porcentuales se podrá notar que estos varían mucho. Esto se debe a varias razones. Es prácticamente imposible sensar una fuerza con gran exactitud utilizando estos materiales, esto es porque las deformaciones no son homogéneas en todos los poros de la espuma y además las propiedades físicas dependerán de cada fabricante siendo las menos importantes las propiedades mecánicas.

Por otro lado, los coeficientes de correlación  $R$  obtenidos, son arriba de  $0.92$ . Esto confirma el hecho de que el comportamiento arriba de  $15\text{ N}$  es similar para las gráficas teóricas y experimentales.

Es muy importante aclarar que, el modelo matemático realizado en el capítulo dos, es para este material en particular. El modelo matemático general para cualquier tipo

de esponja debe incluir más variables, por ejemplo, respecto al tipo de porosidad o a la cantidad de grafito en esta.

# 5

## Aplicaciones y perspectivas

*Las ciencias aplicadas no existen,  
solo las aplicaciones de la ciencia.*

– Louis Pasteur

El haber realizado una caracterización física al material deformable donde se relaciona variables como Fuerza y Resistencia, da como resultado la propuesta de algunas aplicaciones prácticas.

Propongo, en específico, tres aplicaciones: un interruptor, un sensor táctil y una tenaza identificadora. El enfoque de dichas aplicaciones realizadas en este trabajo son del área de la mecatrónica e instrumentación.

### 5.1. Interruptor

La aplicación más sencilla es un interruptor. Un switch o interruptor es un dispositivo que consta de dos estados, prendido y apagado, es un sistema binario.

Mostraré la aplicación más sencilla de un interruptor, la cual es controlar el encendido o apagado de un foco o led. Ya dependerá del lector un uso más avanzado a este.



### 5.1.1. Desarrollo propuesto

El circuito electrónico de control para este caso es una modificación del circuito de la Figura 3.10 del Capítulo 3. Se diferencia en el microcontrolador y en el potenciómetro (R1), el cual tiene como función definir el umbral de sensibilidad del interruptor (véase Figura 5.1).

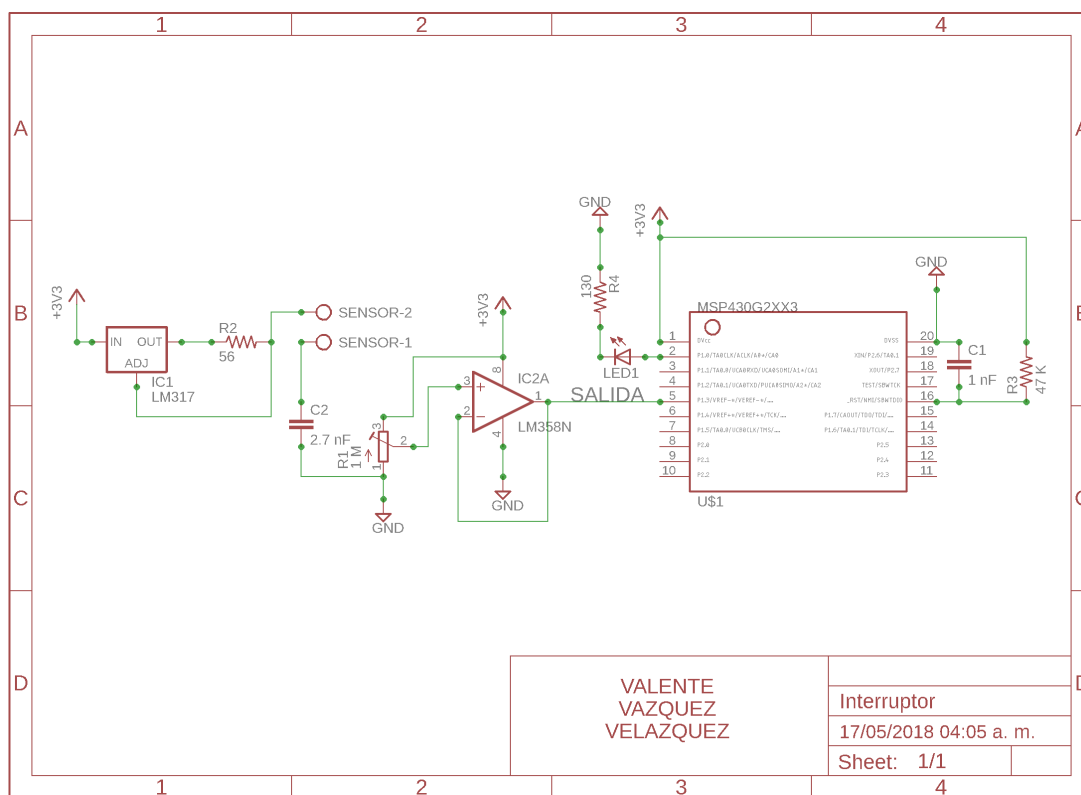


Figura 5.1: Diagrama esquemático electrónico propuesto para desarrollar un interruptor.

La señal SALIDA de la figura anterior se conecta a una entrada digital del microcontrolador MSP430G2553 (Texas Instruments, 2017b) y a este se le introduce ciertas instrucciones para el control del encendido y apagado del LED1 siguiendo el diagrama de flujo de la Figura 5.2.

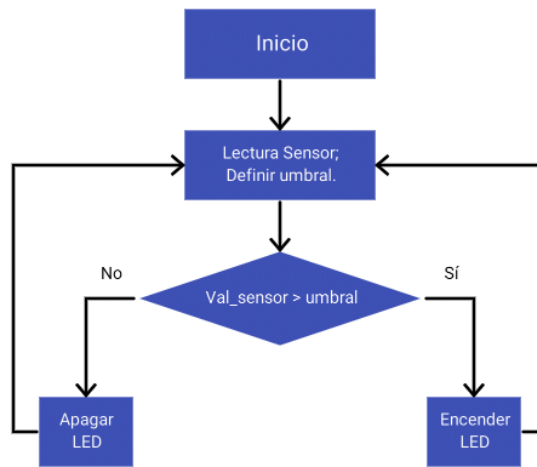


Figura 5.2: Diagrama de flujo del funcionamiento del Interruptor.

## 5.2. Sensor táctil

Como describí en la sección 1.3.2, la piel tiene mecanorreceptores; para este caso en particular, este sensor puede funcionar específicamente como los corpúsculos de Merkel, Meissner o Pacini, todos estos son los encargados de percibir grados de presión en distintas frecuencias.

Entonces, el material ya está caracterizado para analizar fuerzas o presiones ejercidas sobre él, junto con su medio ciclo de histéresis elástico; es importante mencionar que los dedos humanos también tienen una histéresis elástica, es fácil observar que cuando uno presiona con el dedo algún material, la piel tarda en recuperar su forma. Lo único que faltaría es caracterizar los cambios en su frecuencia mientras está en funcionamiento.

Para este año en curso, 2018, ya existen estos tipos de sensores táctiles, un ejemplo de ellos, enfocado a prótesis, fue publicado en eLIFE Science (Oddo et al., 2016) con título: *La estimulación intraneural provoca la discriminación de las características de textura mediante la punta de los dedos artificiales en humanos intactos y amputados* (t. del a.) y otro, que en lo personal me gusta más, es BioTac, fabricado por la empresa SynTouch (2018). Ambos sensores se especializan en la identificación de texturas basándose en los cambios de frecuencia que percibe el sensor.

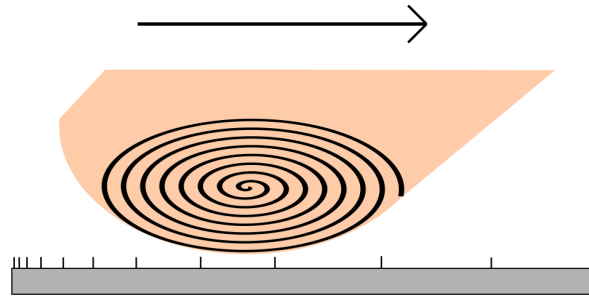


Figura 5.3: Esquema del funcionamiento de la huella dactilar.

No es difícil saber por qué se enfocan en la percepción de frecuencias al fabricar estos tipos de sensores; se debe a que el dedo humano (por mencionar un caso en particular) cuenta con huellas digitales, la función principal de estas NO es la de identificación personal, más bien es la de percibir cambios de frecuencias al existir un contacto y con esto saber el tipo de material que el dedo está tocando y la presión con que puede sujetarlo. Lo anterior sucede por la forma física de las huellas digitales, las cuales son diminutos bordes que al estar en contacto con algún material amplifican la frecuencia de vibración, y si a esto le sumamos una alta densidad de corpúsculos en esa zona, la sensación aumenta (Gartner and Hiatt, 1997) (véase Figura 5.3). Es por esto que a veces no sentimos una hormiga caminando sobre nuestra espalda, sin embargo, sí sentimos cuando la hormiga camina sobre nuestros dedos.

Así que, una vez obtenidas las propiedades electromecánicas de la esponja y con una debida caracterización en su frecuencia, este material deformable es apto para ser un sensor táctil.

### 5.3. Tenaza sujetadora

Esta aplicación tiene como objetivo fabricar un sistema de control sobre la sujeción de un objeto con una tenaza. La sujeción está en función de la fuerza registrada con dos sensores de presión colocados en sus puntas de área de contacto de  $2 \text{ cm}^2$  cada uno.

### 5.3.1. Desarrollo propuesto

#### Mecánica



Figura 5.4: Esquema 3D de la tenaza prototipo para esta aplicación.

Para el dispositivo prototipo, la tenaza puede ser impresa en 3D (véase la Fig. 5.4), el diseño tiene licencia libre y su movimiento depende de un micro servomotor, cuyo movimiento está en función de la fuerza registrada por los sensores de presión. Es importante mencionar que las puntas de la tenaza cuentan con una zona plana en cada punta, las cuales siempre se encuentran paralelas (USFRobotDesignME from Thingiverse, 2014).

#### Electrónica

La alimentación principal del circuito sería de 5 Volts, con ella se alimenta al micro servo motor y a un regulador de 3.3 V para alimentar al microcontrolador, al op-amp y a la fuente de corriente de los sensores (Véase la Fig. 5.5).

#### Lógica

Se puede diseñar un algoritmo simple para relacionar la posición de la tenaza con la fuerza de sujeción de la siguiente forma, por ejemplo: Cuando la fuerza registrada por los sensores es igual a cero, el movimiento de la tenaza es libre; una vez que la

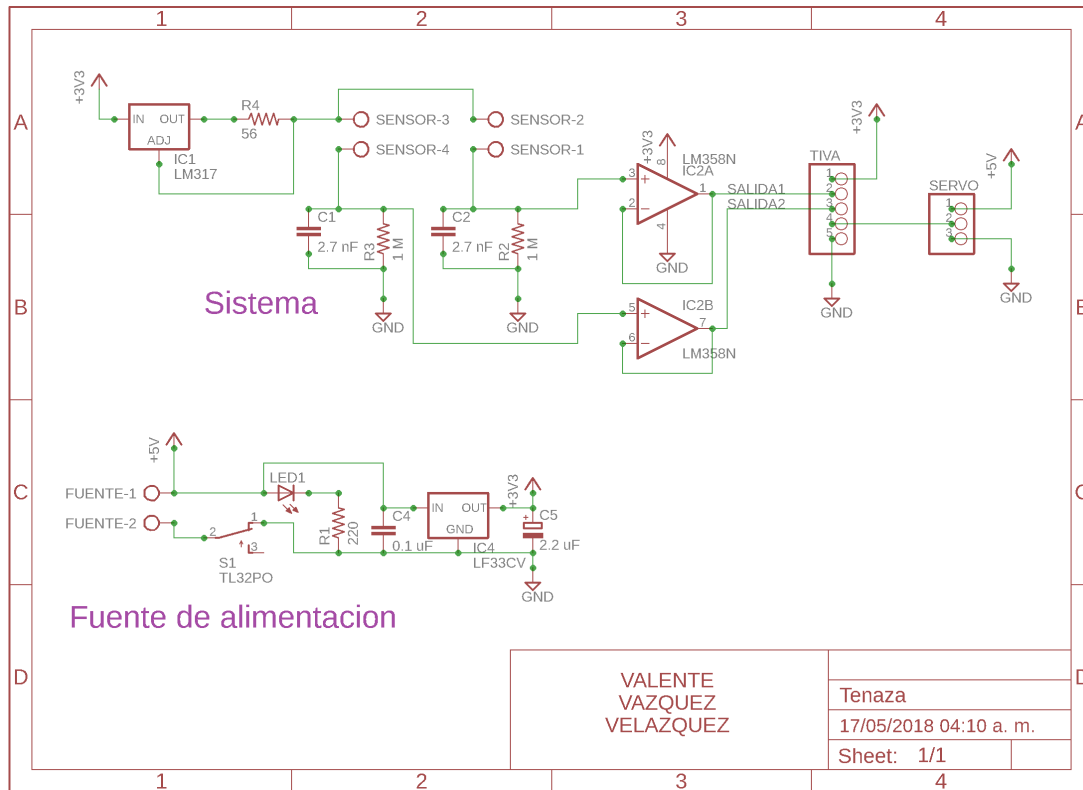


Figura 5.5: Diagrama esquemático del circuito electrónico utilizado para el control de la Tenaza.

fuerza comienza a aumentar el movimiento se restringe. Si la diferencia entre dos medidas consecutivas tiende a cero, el movimiento efectuado por el micro servomotor de la tenaza deja de actuar.

# 6

## Conclusiones

*La ciencia es respecto del alma lo que es la luz respecto de los ojos y si las raíces son amargas, los frutos son muy dulces.*

– Aristóteles

Al trabajar con sensores, irremediablemente uno siempre recurre a las comparaciones, lo cual es bueno para saber que tan bien o mal se están realizando las cosas, para detectar fallas en implementación, caracterización y/o diseño, observar costos, materiales, etc. Por esto es conveniente realizar una comparación con algún sensor comercial que tenga una aplicación similar para obtener una retroalimentación conjunta de su funcionamiento.

Dicha comparación la realicé con un sensor resistivo de fuerza comercial como lo es el sensor FSR (Mouser, 2018), en la gráfica de la figura 6.1 se puede notar un comportamiento muy similar. La única diferencia es la conducta del material en la subida y bajada, es decir, al hacer y dejar de hacer presión al sensor, esto se debe, como ya lo había comentado en capítulos anteriores, a la homogeneidad de la deformación de los poros de la esponja. Una forma de reducir ese comportamiento es usar más de un tipo de espumas con módulos de elasticidad diferentes, una sobre otra, por ejemplo en una gráfica de deformación  $\epsilon$  contra esfuerzo  $\sigma$  (véase Figura 6.2) se puede observar que el módulo de Young de las esponjas 1

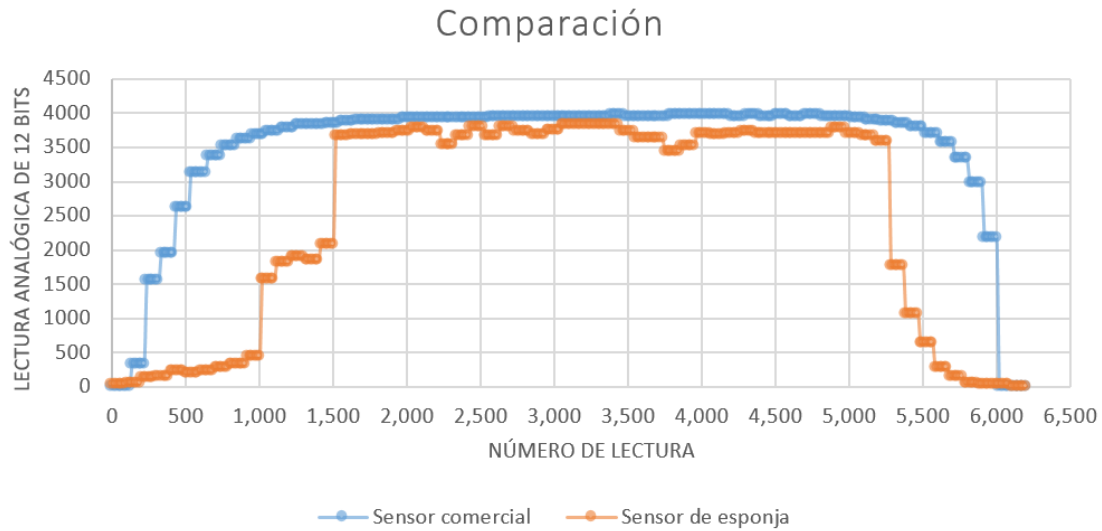


Figura 6.1: Gráfica comparando al sensor fabricado con el material deformable junto a un sensor comercial FSR.

y 3 son menores al módulo de la esponja 2, esto con el fin de que cuando una fuerza incida sobre estas, las esponjas de los extremos respondan más rápido a las áreas de contacto, por ende, la homogeneidad de la deformación se obtendría en un lapso menor.

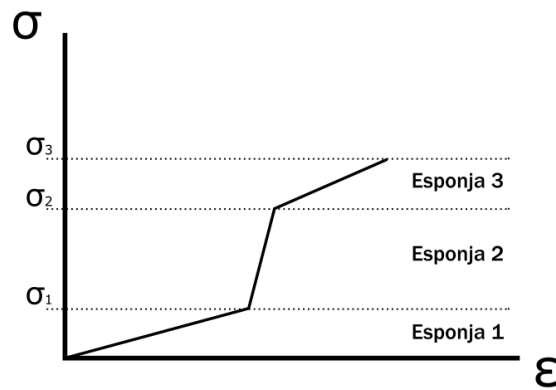


Figura 6.2: Gráfica descriptiva al usar tres esponjas, una sobre otra, para aumentar la respuesta del sensor en función del Módulo de Young.

## 6. CONCLUSIONES

---

Otro punto importante en la comparación, es el costo de implementación. El sensor FSR tiene un costo promedio en tiendas de electrónica en México, para un área efectiva de  $1576.1 \text{ mm}^2$ , de \$210.00 MXN; en mi caso, un sensor de la misma área efectiva, su implementación aproximadamente costaría \$5.00 MXN, es decir un casi 3% del costo de los sensores comerciales dándole una enorme y muy importante superioridad respecto a estos.

También puedo decir que otra gran ventaja de este trabajo, es la posibilidad de aplicarlo a otras espumas o esponjas conductivas; en el texto no menciono que lo escrito en el Capítulo 3 es una metodología, pero lo es ya que los procedimientos experimentales mencionados ahí están escritos de tal forma que su reproducción no debería ser complicada. Mis principales recomendaciones para implementar lo mejor posible el sensor caracterizado en este trabajo o algún otro, son: para mejorar la respuesta del sensor, la superficie de contacto se recomienda sea de oro, también encontré que la mejor manera de colocar la espuma junto con su base, es utilizando un material elástico que los cubra y los una, por ejemplo un globo, y por último que no importa la geometría del sensor, siempre y cuando se conozca el área de contacto, puede tener forma rectangular, circular o cualquier otra a conveniencia.

Resumiendo lo escrito en el Capítulo 4, se tienen dos resultados en concreto de la caracterización de la espuma antiestática, el comportamiento arriba de los 10 N de fuerza incidente y por debajo de esta. El comportamiento pobre que tiene el sensor por debajo de los 10 N se debe a dos causas principales, el modo de deformación de los poros y al ruido del sistema electrónico; lo primero es comprobable al observar el comportamiento de subida y bajada del transductor (véase Fig. 6.1), y lo segundo al observar el comportamiento errático del voltaje de entrada al sensor (véase Fig. 4.14). Por último, el sensor funciona de manera óptima para valores de fuerza inducida por arriba de 10 N, esto se sabe al realizar un análisis de los datos recabados ya que en este caso, el coeficiente de correlación resultó de: 0.9974, obteniendo así un excelente resultado experimental; además también obtuve que el valor de la resistencia de referencia ( $R_2$ ) que responde mejor al modelo



matemático construido en el Capítulo 2 es de  $1\text{ M}\Omega$  (véanse la Fig. 6.3 y 6.4).

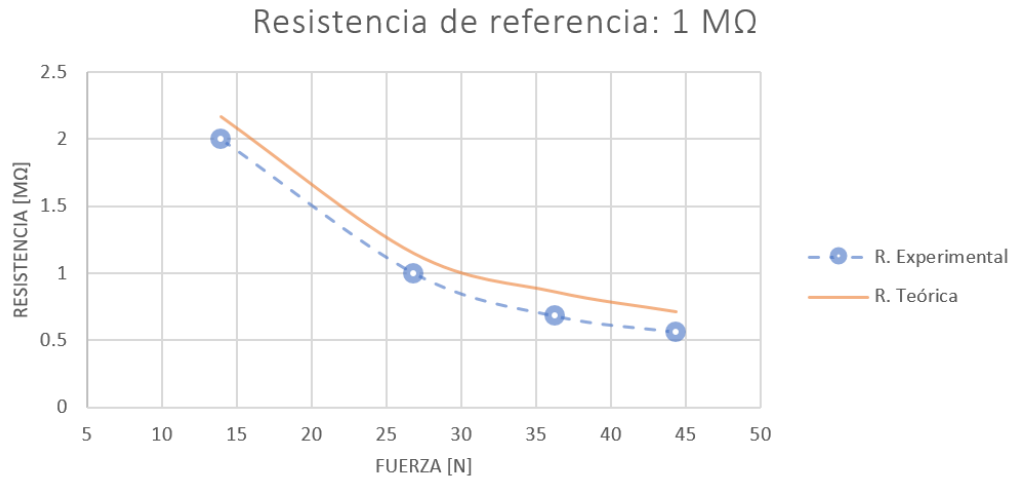


Figura 6.3: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de  $1\text{ M}\Omega$  a partir de  $10\text{ N}$ .

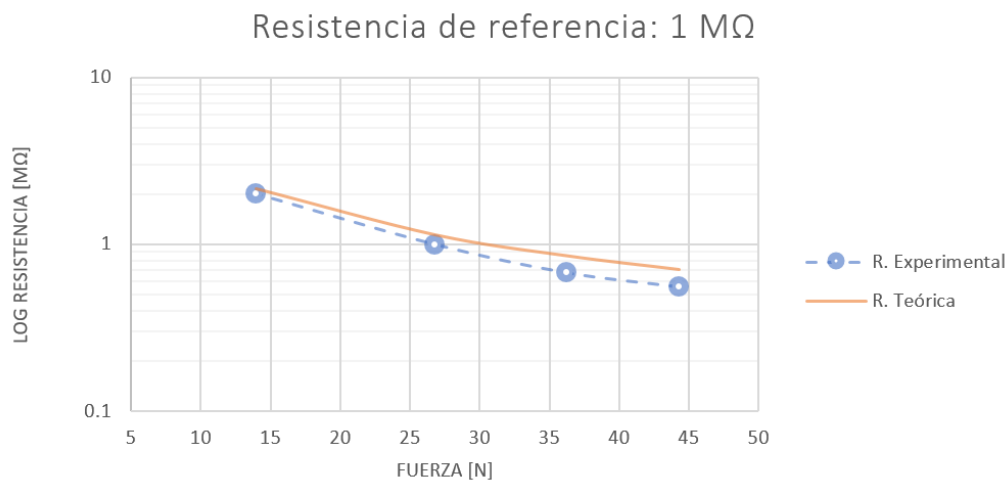


Figura 6.4: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de  $1\text{ M}\Omega$  a partir de  $10\text{ N}$ .

En conclusión, los beneficios principales de este trabajo son:

- La implementación de un excelente sensor de esfuerzos utilizando las espumas conductoras. Como un gran punto a favor, dicha implementación es extremadamente

## 6. CONCLUSIONES

---

económica, esto lo hace especial si se requieren hacer  $n$  pruebas antes de un diseño final de uno o más dispositivos.

- Con los debidos conocimientos en electrónica analógica y digital, filtros, amplificación y manejo de señales y microcontroladores se puede reducir aún más el ruido de funcionamiento del sensor, además de aumentar su respuesta y resolución.
- El diseño geométrico del sensor es libre para los fines prácticos que más convengan siempre y cuando se conozca el área efectiva de contacto, con esto se aumenta en demasía la utilidad práctica de este ya que puede ser usado en aplicaciones donde se requiera una mínima área efectiva con geometría conocida así como en aplicaciones donde se necesite una geometría de extraño diseño y gran tamaño.
- Se reduce el impacto ambiental ya que a la esponja conductiva la convertí en un material reutilizable.

Por lo tanto, de los resultados de las mediciones recabadas a lo largo de este trabajo de tesis junto con las comparaciones mencionadas anteriormente, puedo afirmar que los objetivos mencionados en el capítulo uno fueron cubiertos satisfactoriamente ya que sí es posible utilizar las espumas antiestáticas como un excelente transductor de esfuerzos, sumado a esto, el modelo matemático desarrollado en el capítulo dos ha sido comprobado favorablemente, este último es capaz de describir y predecir la relación entre Fuerza mecánica y Resistencia eléctrica en las espumas conductoras para así ayudar en posibles construcciones de sensores en un futuro próximo. Como complemento, el estudio de este tipo de material me ha dado las suficientes pruebas para afirmar que doy pie a su implementación como un sensor táctil, esto es excelente ya que abarataría los costos de fabricación de robots con capacidades táctiles y sobretodo de prótesis inteligentes de extremidades tanto humanas como de animales.

El trabajo a futuro que queda es obtener medidas con intervalos de fuerza mayores, y si es posible, encontrar un punto de ruptura para documentar cual sería la máxima fuerza que soportan estos materiales, también se debe probar con diferentes esponjas con otro

tipo de porosidades y con diferentes módulos de elasticidad, para así generalizar el modelo matemático construido en el capítulo dos.

Como nota personal, este trabajo de tesis me ha dado una real y verdadera introducción a lo que realiza un profesional de la física. Aprendí que el trabajo que se hace dentro de un laboratorio no es fácil, se necesita dedicación, paciencia, esfuerzo y pasión, solamente la persona que lo ha realizado sabe de lo que hablo, por ejemplo, solamente para mis datos finales obtuve y analicé más de medio millón de medidas, eso me llevó horas de trabajo midiendo y muchas horas más de análisis. Sé que voy por el camino correcto ya que durante mi transcurso en la licenciatura hubo profesores que siempre me recalcaron que un físico debe hacer dos cosas: modelos matemáticos que describan fenómenos naturales a partir de su observación y resolver problemas de cualquier tipo, así que, en resumen, gracias a este trabajo puedo afirmar que, como físico, sí, puedo hacer ambas, y afortunadamente, lo disfruto.

# Bibliografía

- Angeles, F. (2015). ¿Sensor táctil simple de bajo costo para aplicaciones robóticas? In *Simposio de robótica educativa, Facultad de Ingeniería, UNAM*. (Citado en páginas XI y 1.)
- Areizaga, J., Cortázar, M., Elorza, J., and Iruin, J. (2002). *Polímeros*. Síntesis. (Citado en página 5.)
- Areny, R. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Accedo Rápido. Marcombo. (Citado en página 11.)
- ATI Industrial Automation (2017). <http://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx>. (Citado en página XI.)
- Ciencia Na Pele (2017). <http://alvinhouau.blogspot.mx/2014/09/>. (Citado en página 15.)
- Clínica Universidad de Navarra (2018). <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/bradicinina>. (Citado en página 14.)
- El Financiero (2018). <https://www.elfinancierocr.com/desde-nueva-york/un-gran-dano-ambiental-china-en-la-mira/5G5YQ760F5D4NHQQYW4JUF4VNA/story/>. (Citado en página 2.)

- Electrónica Estudio (2018). <http://www.electronicaestudio.com/docs/DS201MANUAL.pdf>. (Citado en página 43.)
- Enciclopedia de Salud (2018a). <http://www.encyclopediasalud.com/definiciones/serotonina>. (Citado en página 14.)
- Enciclopedia de Salud (2018b). <http://www.encyclopediasalud.com/definiciones/histamina>. (Citado en página 14.)
- Energia (2017). <http://energia.nu/>. (Citado en página 34.)
- Farmabionics (2017). <https://www.farmabionics.com.mx/producto/microscopios-usb/microscopio-digital-usb-base-ajustable-800x-gris/>. (Citado en página 29.)
- Gartner, L. P. and Hiatt, J. L. (1997). *Texto Atlas de Histología*. McGraw Hill, Interamericana. (Citado en páginas 12 y 56.)
- GeekyTheory (2017). <https://geekytheory.com/puertos-y-buses-1-i2c-y-uart/>. (Citado en página 33.)
- Gimp (2017). <https://www.gimp.org/>. (Citado en página 29.)
- Hyperphysics (2017). <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Tables/rstiv.html>. (Citado en página 10.)
- IBM (2017). <https://www.ibm.com/blogs/think/2017/01/ibm-research-5-in-5-2017/>. (Citado en página 12.)
- Kranzlin, N. and Niederberger, M. (2015). Controlled fabrication of porous metals from the nanometer to the macroscopic scale. *Mater. Horiz.*, 2:359–377. (Citado en páginas 5 y 6.)
- MetAs S.A. de C.V. (2018). <http://www.metas.com.mx/utilerias/calculoacelgravedad.php>. (Citado en página 35.)

- Mouser (2018). <https://www.mouser.mx/ProductDetail/Ohmite/FSR01CE?qs=sGAEpiMZZMvDU9HV27FC0bGd8X7AvRMz6U4ouHzDxv0Td08iBJPSaw%3d%3d>. (Citado en página 59.)
- NXP Semiconductors (2008). <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MPX2100.pdf>. (Citado en página XI.)
- Núñez, Carlos. Roca, A. J. J. (2011). *Comportamiento mecánico de los materiales. Volumen 2: Ensayos mecánicos. Ensayos no destructivos*. Textos Docents. Universitat de Barcelona. (Citado en página 9.)
- Oddo, C. M., Raspopovic, S., Artoni, F., Mazzoni, A., Spigler, G., Petrini, F., Giambattistelli, F., Vecchio, F., Miraglia, F., Zollo, L., Di Pino, G., Camboni, D., Carrozza, M. C., Guglielmelli, E., Rossini, P. M., Faraguna, U., and Micera, S. (2016). Intraneural stimulation elicits discrimination of textural features by artificial fingertip in intact and amputee humans. *eLife*, 5:e09148. <https://doi.org/10.7554/eLife.09148>. (Citado en página 55.)
- Oertel, G. and Abele, L. (1994). *Polyurethane handbook: chemistry, raw materials, processing, application, properties*. Hanser. (Citado en página 5.)
- Pedreño Molina, J., Guerrero González, A., and López Coronado, J. (2000). Estudio de los sensores táctiles artificiales aplicados a la robótica de agarre. *Jornadas de Automática (21<sup>a</sup>: 2000: Sevilla)*. (Citado en página 12.)
- Portal Educativo (2015). <https://www.portaleducativo.net/cuarto-medio/9/clasificacion-de-los-polimeros>. (Citado en página 3.)
- Processing (2017). <https://processing.org/>. (Citado en página 34.)
- Serna, A., Ros, F., and Rico, J. (2010). *GUÍA PRÁCTICA DE SENSORES*. Creaciones Copyright, S.L. (Citado en página 10.)

- Shadow Robot Company (2017). <http://www.shadowrobot.com/>. (Citado en página XI.)
- Silicio MX (2016). <http://silicio.mx/grove-sensor-tactil>. (Citado en página XI.)
- Sinner, E.-K. (2010). La ciencia emula el olfato. *Max Plank Gesellschaft*. (Citado en página 11.)
- Smithson, T. (2012). How porosity is measured. *Oilfield Review*, 24:63–64. (Citado en página 6.)
- study.com (2018). <https://study.com/cimages/multimages/16/epidermis-delimited.jpg>. (Citado en página 12.)
- SynTouch (2018). <https://www.syntouchinc.com/en/>. (Citado en página 55.)
- Texas Instruments (2014). <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>. (Citado en página 32.)
- Texas Instruments (2016). <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>. (Citado en página 32.)
- Texas Instruments (2017a). <http://www.ti.com/lit/ug/spmu296/spmu296.pdf>. (Citado en página 33.)
- Texas Instruments (2017b). <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2353.pdf>. (Citado en página 54.)
- Truper (2018). <https://www.truper.com.mx/pdf/manuales/10401.pdf>. (Citado en página 47.)
- Ureta, Ernesto (1996). *Polímeros. Estructura, propiedades y aplicaciones*. Limusa Noriega Editores. (Citado en página 3.)
- USFRobotDesignME from Thingiverse (2014). <https://www.thingiverse.com/thing:252834>. (Citado en página 57.)

- 
- WinnTess3 (2012). <http://blogwintess.blogspot.mx/2012/11/modulo-de-elasticidad-de-una-membrana.html>. (Citado en página 7.)
- Young, R. J. and Lovell, P. A. (1991). *Introduction to polymers*. Chapman and Hall. (Citado en página 6.)
- Zhou, W., Tang, Y., Song, R., Jiang, L., Hui, K., and Hui, K. (2012). Characterization of electrical conductivity of porous metal fiber sintered sheet using four-point probe method. *Materials And Design*, 37:161–165. (Citado en página 18.)





## Anexo I: Tablas

Masa $\pm 0.05$ [g]	Antes $\pm 1$ [líneas]	Durante $\pm 1$ [líneas]	Después $\pm 1$ [líneas]
0	78	78	78
38	78	52	76
75	77	44	75
252	77	27	75
369	77	26	75
409	77	22	74
775	77	19	74
1163	76	15	73
1664	76	14	72
2076	76	13	71
3782	75	11	71

Tabla A1: Líneas contadas en el patrón de la Figura 3.4 para la medición de la deformación

Masa $\pm 0.05$ [g]	Antes [mm]	Durante [mm]	Después [mm]
0	$8.037 \pm 0.117$	$8.037 \pm 0.117$	$8.037 \pm 0.117$
38	$8.037 \pm 0.117$	$5.358 \pm 0.112$	$7.831 \pm 0.117$
75	$7.934 \pm 0.117$	$4.534 \pm 0.111$	$7.728 \pm 0.116$
252	$7.934 \pm 0.117$	$2.782 \pm 0.108$	$7.728 \pm 0.116$
369	$7.934 \pm 0.117$	$2.679 \pm 0.108$	$7.728 \pm 0.116$
409	$7.934 \pm 0.117$	$2.267 \pm 0.107$	$7.625 \pm 0.116$
775	$7.934 \pm 0.117$	$1.958 \pm 0.106$	$7.625 \pm 0.116$
1163	$7.831 \pm 0.117$	$1.546 \pm 0.106$	$7.522 \pm 0.116$
1664	$7.831 \pm 0.117$	$1.443 \pm 0.106$	$7.419 \pm 0.116$
2076	$7.831 \pm 0.117$	$1.339 \pm 0.105$	$7.316 \pm 0.116$
3782	$7.728 \pm 0.116$	$1.133 \pm 0.105$	$7.316 \pm 0.116$

Tabla A2: Medidas en mm de las deformaciones del material

Masa $\pm 0.0005$ [Kg]	Fuerza [N]	Esfuerzo [Pa]	Def. Unitaria [mm]
0	$0.000 \pm 0.005$	$0.000 \pm 48.900$	$0.000 \pm 0.029$
0.038	$-0.372 \pm 0.005$	$-3716.400 \pm -43.638$	$-0.333 \pm 0.024$
0.075	$-0.734 \pm 0.005$	$-7335.000 \pm -133.742$	$-0.429 \pm 0.022$
0.252	$-2.465 \pm 0.005$	$-24645.600 \pm -564.775$	$-0.649 \pm 0.019$
0.369	$-3.609 \pm 0.005$	$-36088.200 \pm -849.696$	$-0.662 \pm 0.019$
0.409	$-4.000 \pm 0.005$	$-40000.200 \pm -947.105$	$-0.714 \pm 0.018$
0.775	$-7.580 \pm 0.006$	$-75795.000 \pm -1838.396$	$-0.753 \pm 0.017$
1.163	$-11.374 \pm 0.006$	$-113741.400 \pm -2783.261$	$-0.803 \pm 0.016$
1.664	$-16.274 \pm 0.007$	$-162739.200 \pm -4003.306$	$-0.816 \pm 0.016$
2.076	$-20.303 \pm 0.007$	$-203032.800 \pm -5006.617$	$-0.829 \pm 0.016$
3.782	$-36.988 \pm 0.009$	$-369879.600 \pm -9161.102$	$-0.853 \pm 0.016$

Tabla A3: Datos calculados de esfuerzos y deformaciones con base en las tablas A1 y A2

Esfuerzo [Pa]	Carga [mm]	Descarga [mm]
0.000 ± 48.900	0.000 ± 0.029	0.000 ± 0.029
-3716.400 ± -43.638	-0.333 ± 0.024	-0.316 ± 0.025
-7335.000 ± -133.742	-0.429 ± 0.022	-0.413 ± 0.023
-24645.600 ± -564.775	-0.649 ± 0.019	-0.640 ± 0.019
-36088.200 ± -849.696	-0.662 ± 0.019	-0.653 ± 0.019
-40000.200 ± -947.105	-0.714 ± 0.018	-0.703 ± 0.019
-75795.000 ± -1838.396	-0.753 ± 0.017	-0.743 ± 0.018
-113741.400 ± -2783.261	-0.803 ± 0.016	-0.795 ± 0.017
-162739.200 ± -4003.306	-0.816 ± 0.016	-0.806 ± 0.017
-203032.800 ± -5006.617	-0.829 ± 0.016	-0.817 ± 0.017
-369879.600 ± -9161.102	-0.853 ± 0.016	-0.845 ± 0.017

Tabla A4: Datos calculados de histéresis con base en las tablas [A1](#) y [A2](#)

Resistencia $\pm 5\%[\Omega]$	10 [K $\Omega$ ] Voltaje [V]	47 [K $\Omega$ ] Voltaje [V]	100 [K $\Omega$ ] Voltaje [V]	560 [K $\Omega$ ] Voltaje [V]	1 [M $\Omega$ ] Voltaje [V]	4.7 [M $\Omega$ ] Voltaje [V]	10 [M $\Omega$ ] Voltaje [V]
1	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.201 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.207 $\pm$ 0.001
56	2.211 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.209 $\pm$ 0.002	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001
680	2.213 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001	2.203 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001
1000	2.212 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.208 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001
4700	1.918 $\pm$ 0.002	2.212 $\pm$ 0.001	2.214 $\pm$ 0.001	2.201 $\pm$ 0.002	2.214 $\pm$ 0.001	2.215 $\pm$ 0.001	2.214 $\pm$ 0.001
8100	1.559 $\pm$ 0.002	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.207 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001
10000	1.423 $\pm$ 0.002	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.209 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001
47000	0.503 $\pm$ 0.003	1.441 $\pm$ 0.001	1.988 $\pm$ 0.002	2.207 $\pm$ 0.001	2.209 $\pm$ 0.002	2.209 $\pm$ 0.002	2.210 $\pm$ 0.001
75000	0.337 $\pm$ 0.004	1.112 $\pm$ 0.002	1.678 $\pm$ 0.002	2.204 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001
100000	0.255 $\pm$ 0.003	0.919 $\pm$ 0.001	1.467 $\pm$ 0.002	2.206 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001
330000	0.082 $\pm$ 0.003	0.368 $\pm$ 0.003	0.707 $\pm$ 0.002	1.910 $\pm$ 0.003	2.213 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001	2.213 $\pm$ 0.001
560000	0.048 $\pm$ 0.001	0.226 $\pm$ 0.003	0.459 $\pm$ 0.003	1.522 $\pm$ 0.002	1.963 $\pm$ 0.002	2.211 $\pm$ 0.001	2.212 $\pm$ 0.001
680000	0.040 $\pm$ 0.002	0.188 $\pm$ 0.004	0.392 $\pm$ 0.004	1.380 $\pm$ 0.002	1.833 $\pm$ 0.002	2.211 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001
1000000	0.028 $\pm$ 0.002	0.130 $\pm$ 0.003	0.277 $\pm$ 0.004	1.101 $\pm$ 0.002	1.542 $\pm$ 0.002	2.202 $\pm$ 0.002	2.212 $\pm$ 0.001
2000000	0.013 $\pm$ 0.001	0.066 $\pm$ 0.003	0.146 $\pm$ 0.004	0.689 $\pm$ 0.002	1.053 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001	2.211 $\pm$ 0.001
4700000	0.005 $\pm$ 0.002	0.029 $\pm$ 0.002	0.062 $\pm$ 0.001	0.336 $\pm$ 0.005	0.555 $\pm$ 0.002	1.607 $\pm$ 0.002	2.213 $\pm$ 0.001
10000000	0.004 $\pm$ 0.002	0.013 $\pm$ 0.001	0.031 $\pm$ 0.002	0.165 $\pm$ 0.005	0.288 $\pm$ 0.003	1.049 $\pm$ 0.002	1.703 $\pm$ 0.002
20000000	0.005 $\pm$ 0.002	0.007 $\pm$ 0.002	0.018 $\pm$ 0.003	0.101 $\pm$ 0.003	0.182 $\pm$ 0.003	0.761 $\pm$ 0.002	1.390 $\pm$ 0.002
30000000	0.005 $\pm$ 0.002	0.006 $\pm$ 0.001	0.012 $\pm$ 0.002	0.063 $\pm$ 0.002	0.116 $\pm$ 0.002	0.514 $\pm$ 0.002	0.982 $\pm$ 0.008

Tabla A5: Valores promedios obtenidos de la lectura analógica del controlador al calibrar el sistema de lectura para cada resistencia de referencia

Fuerza [N]	10 K $\Omega$ Lectura [V]	47 K $\Omega$ Lectura [V]	100 K $\Omega$ Lectura [V]	560 K $\Omega$ Lectura [V]	1 M $\Omega$ Lectura [V]	4.7 M $\Omega$ Lectura [V]	10 M $\Omega$ Lectura [V]
0.00 $\pm$ 0.00	0.062 $\pm$ 0.005	0.058 $\pm$ 0.002	0.058 $\pm$ 0.001	0.059 $\pm$ 0.002	0.065 $\pm$ 0.003	0.251 $\pm$ 0.008	0.405 $\pm$ 0.005
3.01 $\pm$ 0.01	0.062 $\pm$ 0.002	0.065 $\pm$ 0.003	0.064 $\pm$ 0.003	0.064 $\pm$ 0.004	0.087 $\pm$ 0.010	0.263 $\pm$ 0.020	0.412 $\pm$ 0.014
5.65 $\pm$ 0.01	0.062 $\pm$ 0.004	0.060 $\pm$ 0.003	0.061 $\pm$ 0.004	0.102 $\pm$ 0.006	0.105 $\pm$ 0.013	0.336 $\pm$ 0.018	0.484 $\pm$ 0.012
9.92 $\pm$ 0.01	0.049 $\pm$ 0.002	0.047 $\pm$ 0.001	0.110 $\pm$ 0.008	0.479 $\pm$ 0.012	0.586 $\pm$ 0.026	1.027 $\pm$ 0.023	1.240 $\pm$ 0.023
13.94 $\pm$ 0.02	0.050 $\pm$ 0.001	0.149 $\pm$ 0.003	0.288 $\pm$ 0.003	0.732 $\pm$ 0.008	0.974 $\pm$ 0.009	1.893 $\pm$ 0.018	1.996 $\pm$ 0.001
26.80 $\pm$ 0.03	0.116 $\pm$ 0.001	0.374 $\pm$ 0.002	0.526 $\pm$ 0.014	1.446 $\pm$ 0.010	1.702 $\pm$ 0.018	1.995 $\pm$ 0.001	1.995 $\pm$ 0.001
36.23 $\pm$ 0.04	0.307 $\pm$ 0.002	0.777 $\pm$ 0.003	1.168 $\pm$ 0.005	1.993 $\pm$ 0.001	1.993 $\pm$ 0.001	1.992 $\pm$ 0.001	1.992 $\pm$ 0.001
44.30 $\pm$ 0.05	0.388 $\pm$ 0.005	1.009 $\pm$ 0.006	1.480 $\pm$ 0.003	1.992 $\pm$ 0.001	1.992 $\pm$ 0.001	1.992 $\pm$ 0.001	1.992 $\pm$ 0.001

Tabla A6: Valores promedios obtenidos de la lectura analógica del controlador al inducir una fuerza a la espuma para cada resistencia de referencia.

75

Fuerza [N]	10 K $\Omega$ Voltaje [V]	47 K $\Omega$ Voltaje [V]	100 K $\Omega$ Voltaje [V]	560 K $\Omega$ Voltaje [V]	1 M $\Omega$ Voltaje [V]	4.7 M $\Omega$ Voltaje [V]	10 M $\Omega$ Voltaje [V]
0.00 $\pm$ 0.00	3.059 $\pm$ 0.091	2.999 $\pm$ 0.049	3.016 $\pm$ 0.055	3.016 $\pm$ 0.044	2.990 $\pm$ 0.037	3.013 $\pm$ 0.033	3.015 $\pm$ 0.025
3.01 $\pm$ 0.01	3.040 $\pm$ 0.042	3.103 $\pm$ 0.050	3.098 $\pm$ 0.051	3.050 $\pm$ 0.051	3.120 $\pm$ 0.068	3.050 $\pm$ 0.047	3.025 $\pm$ 0.049
5.65 $\pm$ 0.01	3.052 $\pm$ 0.083	3.015 $\pm$ 0.066	3.028 $\pm$ 0.079	3.010 $\pm$ 0.072	3.079 $\pm$ 0.057	3.063 $\pm$ 0.059	3.058 $\pm$ 0.035
9.92 $\pm$ 0.01	2.818 $\pm$ 0.015	2.816 $\pm$ 0.004	2.778 $\pm$ 0.002	2.785 $\pm$ 0.001	2.789 $\pm$ 0.002	2.823 $\pm$ 0.002	2.852 $\pm$ 0.006
13.94 $\pm$ 0.02	2.749 $\pm$ 0.001	2.750 $\pm$ 0.001	2.752 $\pm$ 0.001	2.767 $\pm$ 0.001	2.777 $\pm$ 0.001	2.819 $\pm$ 0.002	2.845 $\pm$ 0.002
26.80 $\pm$ 0.03	2.699 $\pm$ 0.001	2.707 $\pm$ 0.001	2.720 $\pm$ 0.002	2.747 $\pm$ 0.001	2.765 $\pm$ 0.001	2.812 $\pm$ 0.001	2.836 $\pm$ 0.003
36.23 $\pm$ 0.04	2.642 $\pm$ 0.001	2.656 $\pm$ 0.001	2.671 $\pm$ 0.001	2.732 $\pm$ 0.001	2.754 $\pm$ 0.001	2.808 $\pm$ 0.001	2.836 $\pm$ 0.002
44.30 $\pm$ 0.05	2.625 $\pm$ 0.001	2.641 $\pm$ 0.001	2.658 $\pm$ 0.001	2.727 $\pm$ 0.001	2.751 $\pm$ 0.001	2.808 $\pm$ 0.002	2.837 $\pm$ 0.004

Tabla A7: Valores promedios obtenidos del voltaje inducido al sensor por cada fuerza inducida.

10 [K $\Omega$ ]			
R. Experimental [ $\Omega$ ]	R. Teórica [ $\Omega$ ]	R. Circuito [ $\Omega$ ]	Fuerza [N]
75000	710753	57634 $\pm$ 5017.7	44.30 $\pm$ 0.05
100000	859362	75823 $\pm$ 5764.0	36.23 $\pm$ 0.04
330000	1146482	222333 $\pm$ 17667.7	26.80 $\pm$ 0.03
560000	2165746	533538 $\pm$ 39760.1	13.94 $\pm$ 0.02
680000	3026963	559195 $\pm$ 64159.8	9.92 $\pm$ 0.01
Coeficientes de correlación: Experimental: 0.964 Calculada: 0.956			

Tabla A8: Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 10 K $\Omega$  entre Fuerza y Resistencia. Se incluye además la resistencia calculada dentro del sistema electrónico.

47 [K $\Omega$ ]			
R. Experimental [ $\Omega$ ]	R. Teórica [ $\Omega$ ]	R. Circuito [ $\Omega$ ]	Fuerza [N]
75000	710753	75532 $\pm$ 6037.6	44.30 $\pm$ 0.05
100000	859362	112831 $\pm$ 8631.2	36.23 $\pm$ 0.04
330000	1146482	291270 $\pm$ 22558.9	26.80 $\pm$ 0.03
680000	2165746	812701 $\pm$ 76524.9	13.94 $\pm$ 0.02
2000000	3026963	2724383 $\pm$ 208533.1	9.92 $\pm$ 0.01
Coeficientes de correlación: Experimental: 0.952 Calculada: 0.941			

Tabla A9: Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 47 K $\Omega$  entre Fuerza y Resistencia. Se incluye además la resistencia calculada dentro del sistema electrónico.

100 [K $\Omega$ ]			
R. Experimental [ $\Omega$ ]	R. Teórica [ $\Omega$ ]	R. Circuito [ $\Omega$ ]	Fuerza [N]
100000	710753	78500 $\pm$ 5855.2	44.30 $\pm$ 0.05
330000	859362	127013 $\pm$ 9890.4	36.23 $\pm$ 0.04
560000	1146482	410882 $\pm$ 43243.0	26.80 $\pm$ 0.03
1000000	2165746	844790 $\pm$ 70078.0	13.94 $\pm$ 0.02
2000000	3026963	2387296 $\pm$ 358711.3	9.92 $\pm$ 0.01
4700000	5279701	4833355 $\pm$ 787807.2	5.65 $\pm$ 0.01
Coeficientes de correlación: Experimental: 0.988 Calculada: 0.988			

Tabla A10: Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 100 K $\Omega$  entre Fuerza y Resistencia. Se incluye además la resistencia calculada dentro del sistema electrónico.

560 [K $\Omega$ ]			
R. Experimental [ $\Omega$ ]	R. Teórica [ $\Omega$ ]	R. Circuito [ $\Omega$ ]	Fuerza [N]
100000	710753	191684 $\pm$ 14080.3	44.30 $\pm$ 0.05
330000	859362	192846 $\pm$ 14120.7	36.23 $\pm$ 0.04
560000	1146482	467418 $\pm$ 40932.7	26.80 $\pm$ 0.03
2000000	2165746	1444099 $\pm$ 126012.5	13.94 $\pm$ 0.02
4700000	3026963	2501397 $\pm$ 256692.7	9.92 $\pm$ 0.01
10000000	5279701	13687568 $\pm$ 2199535.1	5.65 $\pm$ 0.01
20000000	9872806	24131658 $\pm$ 3693193.8	3.01 $\pm$ 0.01
Coeficientes de correlación: Experimental: 0.998 Calculada: 0.983			

Tabla A11: Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 560 K $\Omega$  entre Fuerza y Resistencia. Se incluye además la resistencia calculada dentro del sistema electrónico.



1 [M $\Omega$ ]			
R. Experimental [ $\Omega$ ]	R. Teórica [ $\Omega$ ]	R. Circuito [ $\Omega$ ]	Fuerza [N]
560000	710753	334486 $\pm$ 25209.7	44.30 $\pm$ 0.05
680000	859362	335466 $\pm$ 25302.3	36.23 $\pm$ 0.04
1000000	1146482	548631 $\pm$ 56041.1	26.80 $\pm$ 0.03
2000000	2165746	1624863 $\pm$ 144986.7	13.94 $\pm$ 0.02
4700000	3026963	3303636 $\pm$ 432398.8	9.92 $\pm$ 0.01
20000000	5279701	24951539 $\pm$ 5476037.3	5.65 $\pm$ 0.01
30000000	9872806	30516931 $\pm$ 6710745.6	3.01 $\pm$ 0.01
Coeficientes de correlación: Experimental: 0.976 Calculada: 0.942			

Tabla A12: Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 1 M $\Omega$  entre Fuerza y Resistencia. Se incluye además la resistencia calculada dentro del sistema electrónico.

4.7 [M $\Omega$ ]			
R. Experimental [ $\Omega$ ]	R. Teórica [ $\Omega$ ]	R. Circuito [ $\Omega$ ]	Fuerza [N]
680000	710753	1165378 $\pm$ 103221.6	44.30 $\pm$ 0.05
1000000	859362	1164111 $\pm$ 101583.6	36.23 $\pm$ 0.04
2000000	1146482	1164670 $\pm$ 101670.9	26.80 $\pm$ 0.03
4700000	2165746	1392526 $\pm$ 161041.3	13.94 $\pm$ 0.02
10000000	3026963	4969710 $\pm$ 610832.9	9.92 $\pm$ 0.01
30000000	5279701	23045778 $\pm$ 3886305.3	5.65 $\pm$ 0.01
Coeficientes de correlación: Experimental: 0.974 Calculada: 0.924			

Tabla A13: Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 4.7 M $\Omega$  entre Fuerza y Resistencia. Se incluye además la resistencia calculada dentro del sistema electrónico.

10 [MΩ]			
R. Experimental [Ω]	R. Teórica [Ω]	R. Circuito [Ω]	Fuerza [N]
680000	710753	1776941 ± 174455.7	44.30 ± 0.05
1000000	859362	1773080 ± 169813.6	36.23 ± 0.04
2000000	1146482	1765147 ± 171121.9	26.80 ± 0.03
4700000	2165746	1780558 ± 169855.9	13.94 ± 0.02
20000000	3026963	5439969 ± 709119.2	9.92 ± 0.01
30000000	5279701	22279164 ± 3051746.8	5.65 ± 0.01
Coeficientes de correlación: Experimental: 0.969 Calculada: 0.923			

Tabla A14: Tabla de datos correlacionados para una resistencia de referencia de 10 MΩ entre Fuerza y Resistencia. Se incluye además la resistencia calculada dentro del sistema electrónico.

Resistencia [Ω]	Capacitor [F]	Valor Comercial
10000	2.65E-07	274
47000	5.64E-08	563
100000	2.65E-08	273
560000	4.74E-09	472
1000000	2.65E-09	272
4700000	5.64E-10	561
10000000	2.65E-10	271

Tabla A15: Valores de capacitores en el subcircuito RC del diagrama de la Figura 3.10 para una frecuencia de 60 Hz.



## Anexo II: Gráficas

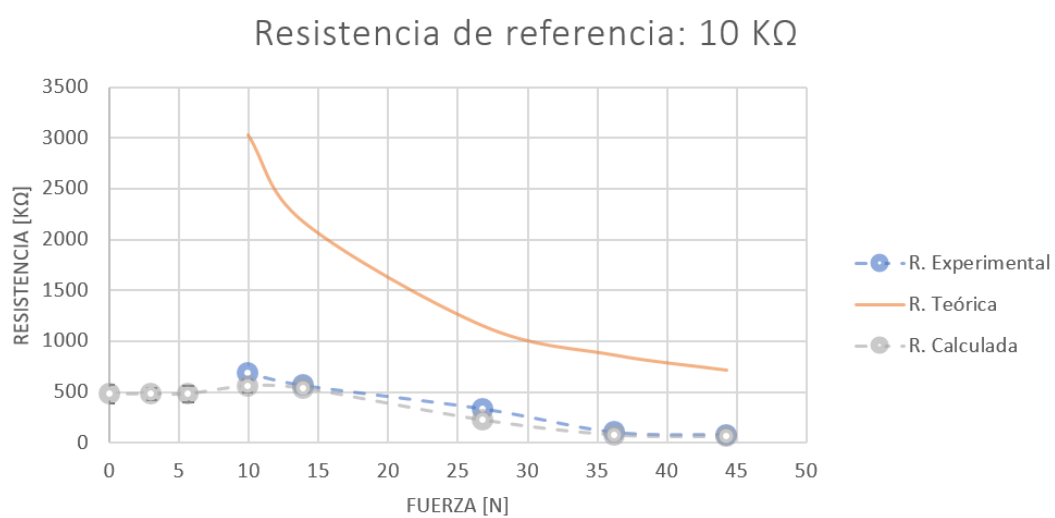


Figura A1: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 K $\Omega$

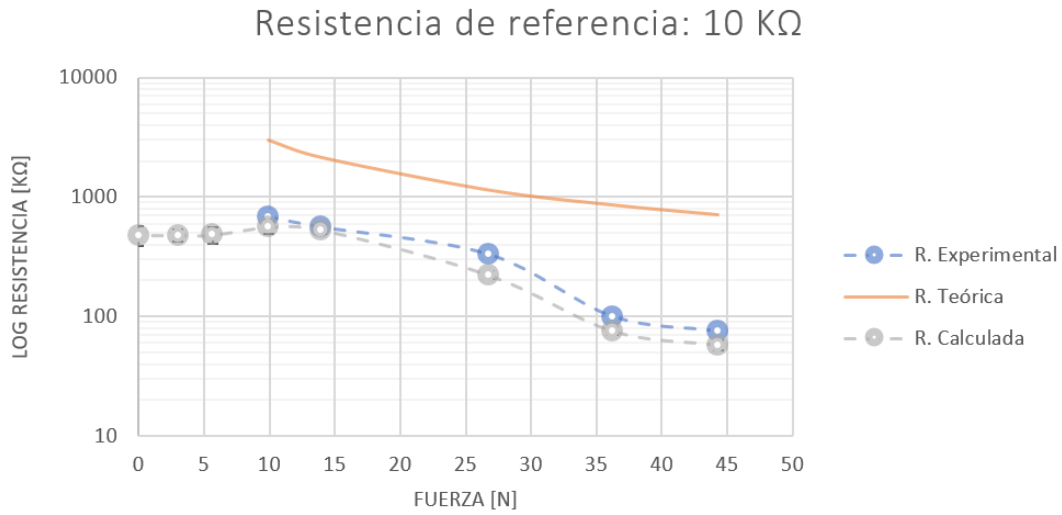


Figura A2: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 KΩ

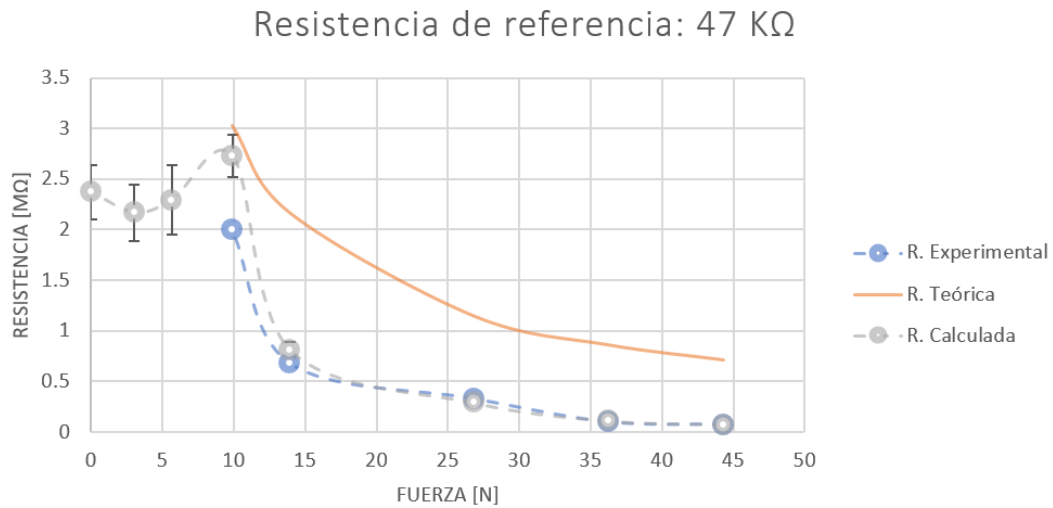


Figura A3: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 47 KΩ

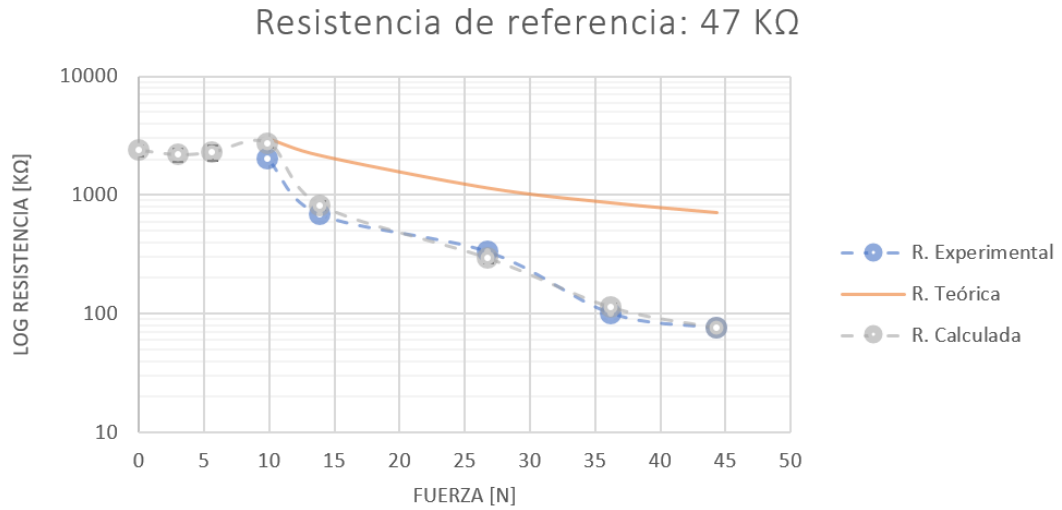


Figura A4: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 47 KΩ

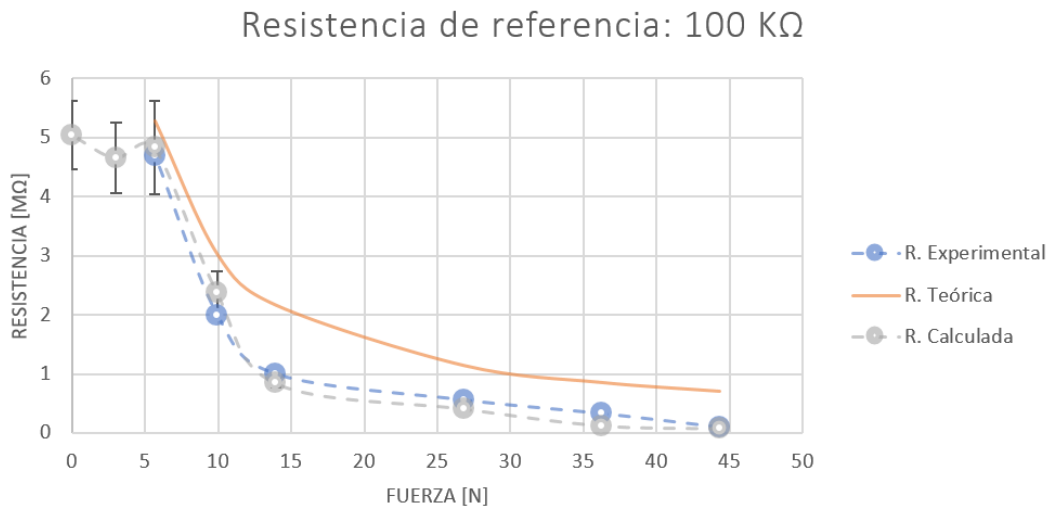


Figura A5: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 100 KΩ

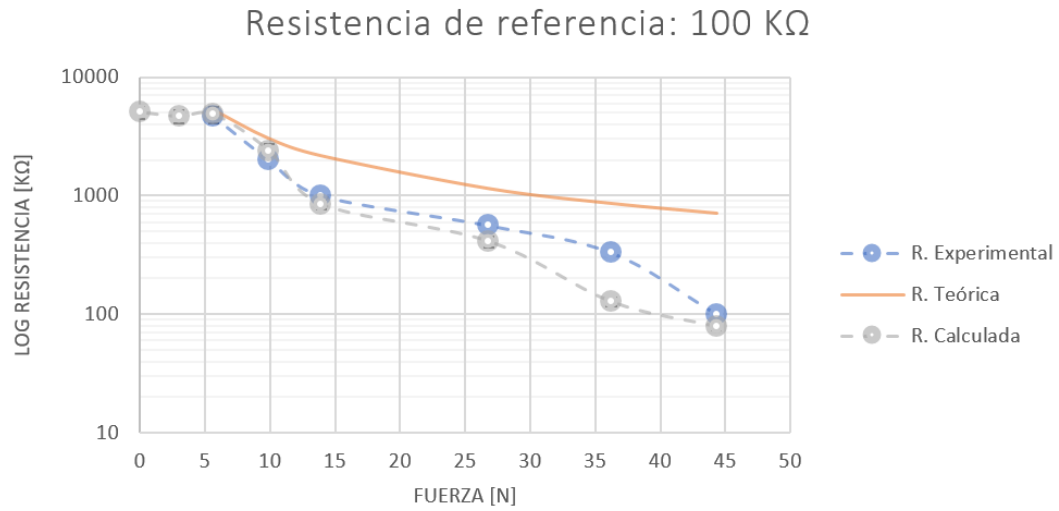


Figura A6: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 100 KΩ

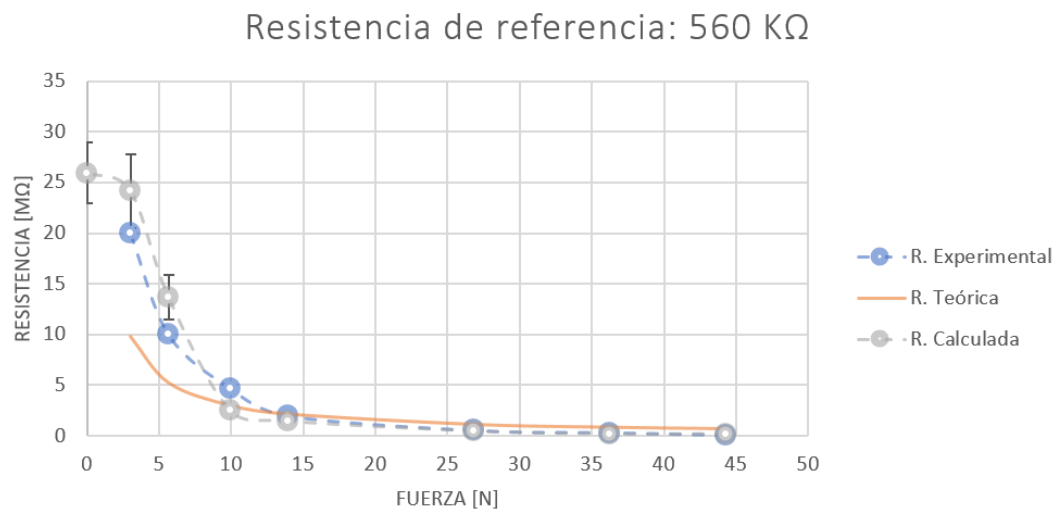


Figura A7: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 560 KΩ

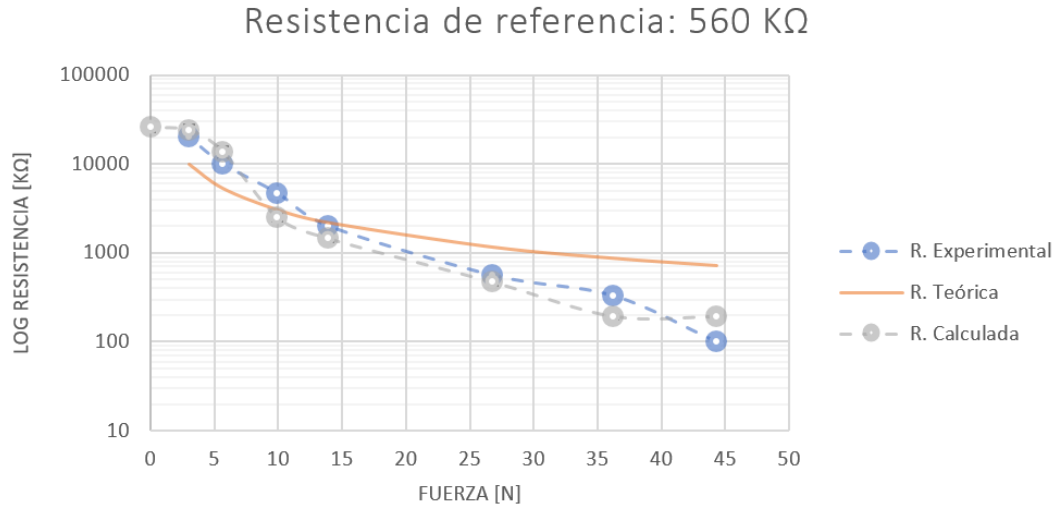


Figura A8: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 560 K $\Omega$

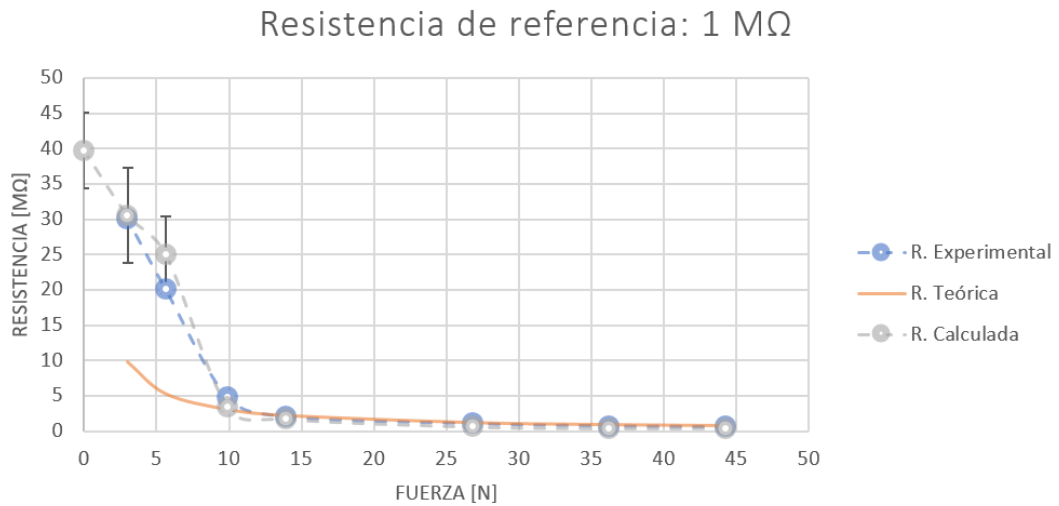


Figura A9: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 1 M $\Omega$



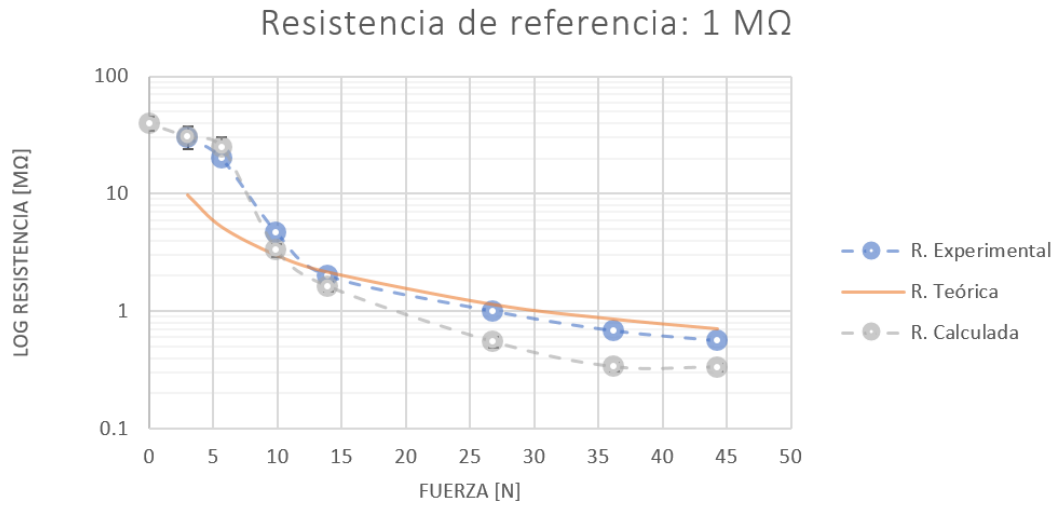


Figura A10: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 1 MΩ

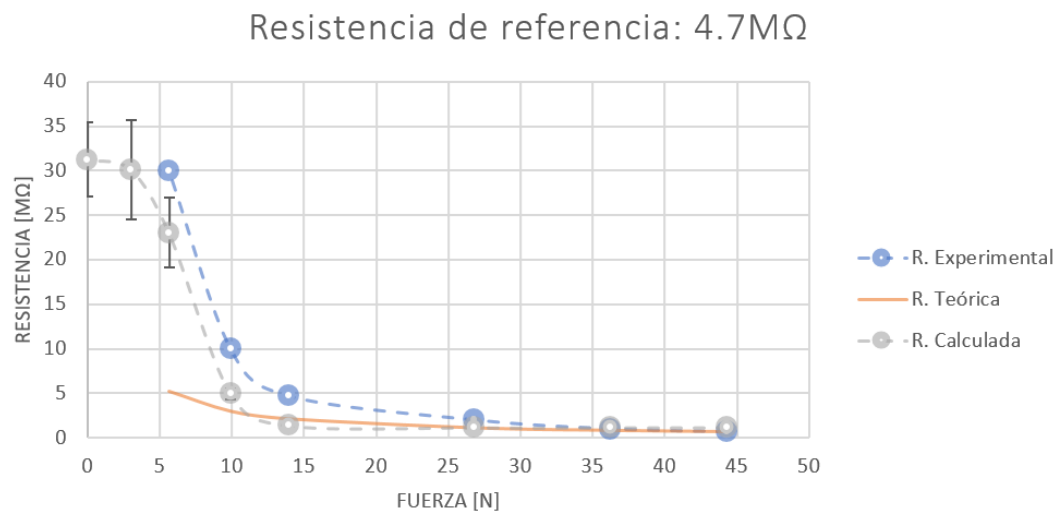


Figura A11: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 4.7 MΩ

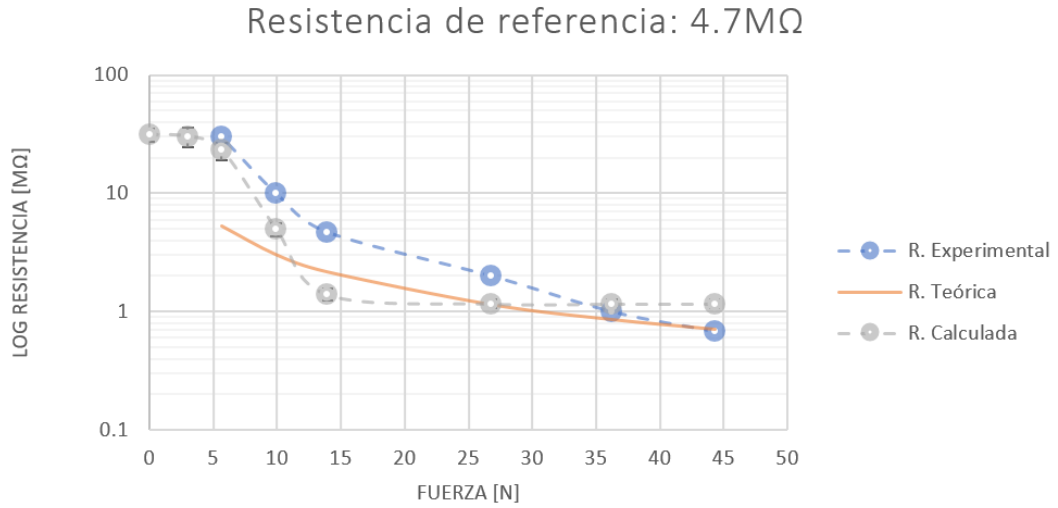


Figura A12: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 4.7 MΩ

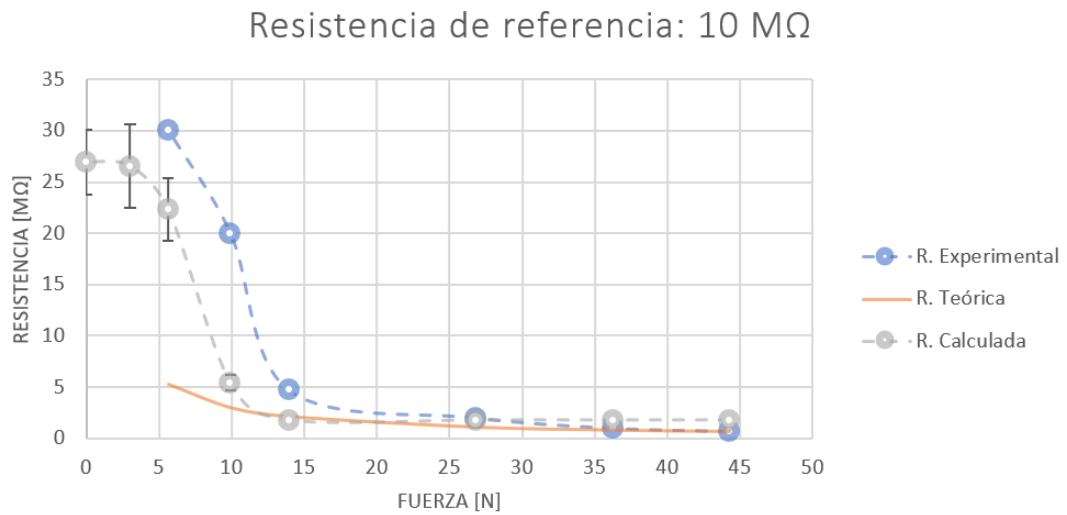


Figura A13: Gráfica lineal obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 MΩ

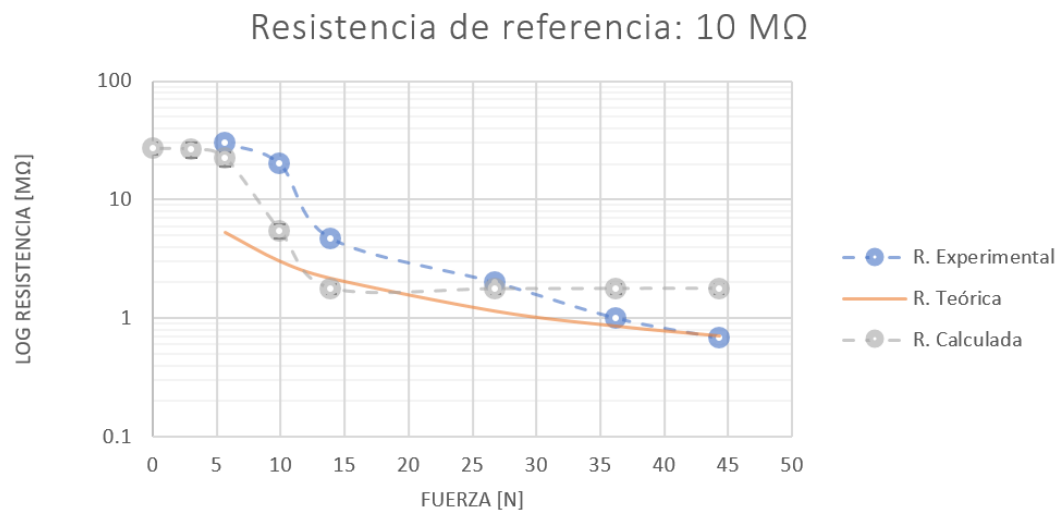


Figura A14: Gráfica semilog obtenida al correlacionar los valores de resistencia y fuerza para una resistencia de referencia de 10 M $\Omega$