



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**DISEÑO DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES A ESCALA DE
MICRAS PARA LA REDUCCIÓN DE FACTORES EXTERNOS EXISTENTES EN
LA INDUSTRIA M.E.M.S**

Cristhian Camilo Castiblanco Quevedo
Código 702086

Wilmer Yesid Arévalo Reyes
Código 702099

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
BOGOTÁ, D.C.
2018**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**DISEÑO DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES A ESCALA DE
MICRAS PARA LA REDUCCIÓN DE FACTORES EXTERNOS EXISTENTES EN
LA INDUSTRIA M.E.M.S**

Cristhian Camilo Castiblanco Quevedo

Wilmer Yesid Arévalo Reyes

**Trabajo de grado para otorgar el título de Ingeniero Electrónico y
de Telecomunicaciones**

**Docentes Directores:
Ph.D. Germán Andrés Álvarez
MSc Camilo Téllez Villamizar**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BOGOTA D.C.
2018**



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

Agradezco en primer lugar a Dios por ser la guía en todo este difícil camino y permitirme llegar hasta al final de esta importante etapa.

A mi madre por el apoyo incondicional y las palabras de aliento que me ha dado desde el inicio de este proceso.

De igual manera agradezco al ingeniero Camilo Téllez por el apoyo brindado desde el principio, la confianza depositaba y la paciencia en las largas horas de trabajo realizado.

Al Ph.D. Germán Álvarez por el apoyo en este proyecto de grado.

En general a las personas que han aportado para el crecimiento de este proyecto de grado.

Wilmer Yesid Arévalo Reyes.

Agradezco primeramente a Dios por permitirme culminar con esta etapa importante en mi vida, a mis padres por su gran apoyo, a los Ingenieros Camilo Téllez y Germán Álvarez por brindar sus conocimientos para llevar a cabo la finalización de este proceso, a aquellas personas que de alguna manera aportaron con este objetivo.

Cristhian Camilo Castiblanco Quevedo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. ANTECEDENTES.....	16
3. JUSTIFICACIÓN.....	29
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	30
5. MARCO DE REFERENCIA.....	32
5.1 TEÓRICO- CONCEPTUAL	32
5.1.1 HISTORIA DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	32
5.1.2 MATERIALES	33
5.1.3 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA GALGA EXTENSOMÉTRICA.....	36
5.1.4 TIPOS DE GALGAS SEGÚN SU MATERIAL CONSTITUTIVO	41
5.1.5 LONGITUD DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA.....	43
5.1.6 MODELO DE LA GALGA.....	44
5.1.7 MÓDULO DE YOUNG	45
5.1.8 GALGAS EXTENSOMÉTRICAS SERIE “M” y SERIE “Y”	45
5.1.9 TECNOLOGÍA M.E.M.S.....	47
5.1.10- CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES	51
6. OBJETIVOS.....	52
6.1 GENERAL	52
6.2 ESPECÍFICOS	52
7. ALCANCES Y LIMITACIONES	53
7.1 ALCANCE	53
7.2. LIMITACIONES	53
8. METODOLOGÍA	54
8.1 Etapa 1	54
8.2 Etapa 2	54
8.3 Etapa 3.....	55
8.4 Etapa 4.....	55
8.5 Etapa 5.....	55
9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	56

10. PRODUCTOS A ENTREGAR.....	57
11. INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO	57
12. ANALISIS DE RESULTADOS.....	58
12.1 RECOPILAR INFORMACIÓN SOBRE LOS FENÓMENOS FÍSICOS – MECÁNICOS DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES A ESCALA MICROMÉTRICA Y A SU VEZ LOS FACTORES EXTERNOS INMERSOS EN SU DISEÑO.....	58
12.2 EVALUAR DIVERSAS GEOMETRÍAS DE DISEÑO PARA LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES EN CUESTIÓN.	65
12.3 CALCULAR EL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO Y MECÁNICO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS SUSTRATOS (EJ. PAPEL) E INTERCONEXIONES (EJ. PLATA O GRAFENO) PARA EL DISEÑO DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA LINEALES PROPUESTA.....	69
12.4 VALIDAR POR MEDIO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN, LOS CÁLCULOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS USANDO LOS FACTORES EXTERNOS (TEMPERATURA) Y MECÁNICOS (PRESIÓN) A LOS QUE SON SOMETIDOS LAS DIVERSAS GEOMETRÍAS DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES.....	82
12.5 ANALIZAR LOS DATOS OBTENIDOS EN EL AMBIENTE DE SIMULACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES.....	103
12.5.1 ANÁLISIS POR VARIACIÓN DE TEMPERATURA	103
12.5.2 ANÁLISIS MECÁNICO	106
13. TRABAJOS FUTUROS.....	109
14. CONCLUSIONES	110
15. BIBLIOGRAFÍA.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de la galga extensométrica utilizada.....	17
Tabla 2. Factores en la selección de la galga extensométrica.....	27
Tabla 3. Materiales usados en la base de las galgas extensométricas.....	34
Tabla 4. Aleaciones más comunes para la fabricación de galgas extensométricas.....	35
Tabla 5. Ejemplo de valores de factores de galga y sensibilidad transversal.....	39
Tabla 6. Características de las galgas extensométrica.....	43
Tabla 7. Características de las galgas extensométricas (serie Y y serie M).....	47
Tabla 8. Técnicas de fabricación de M.E.M.S.....	48
Tabla 9. Características de los softwares.....	50
Tabla 10. Galgas extensométricas universales serie Y.....	50
Tabla 11. tipos de transductores.....	51
Tabla 12. Parámetros de las geometrías.....	66
Tabla 13. resistividad de los materiales.....	69
Tabla 14. Calculo del área.....	69
Tabla 15. Variación de la resistencia eléctrica.....	70
Tabla 16. Longitud.....	71
Tabla 17. Gauge Factor (GF).....	72
Tabla 18. Deformación Unitaria.....	73
Tabla 19. Fuerza aplicada a la galga extensométrica lineal.....	74
Tabla 20. módulo de Young de la galga extensométrica lineal.....	75
Tabla 21. resistividad de los materiales.....	76
Tabla 22. Calculo del área.....	76
Tabla 23. Variación de la resistencia eléctrica.....	77
Tabla 24. Longitud.....	78
Tabla 25. Gauge Factor (GF).....	79
Tabla 26. Fuerza aplicada a la galga extensométrica lineal.....	81
Tabla 27. Parámetros usados en los diseños de las galgas extensométricas lineales planteadas.....	82
Tabla 28. Materiales usados en las galgas extensométricas lineales.....	82
Tabla 29. Parámetros y medidas usados en los diseños de las galgas extensométricas lineales.....	84
Tabla 30. Materiales usados en la galga extensométrica lineal de 5 meandros.....	84
Tabla 31. Geometría y fuerza aplicadas en la simulación.....	84
Tabla 32. Materiales usados en la galga extensométrica lineal de 5 meandros.....	90
Tabla 33. Resultados de la simulación de las respectivas fuerzas sobre el sustrato.....	99
Tabla 34. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados.....	101

Tabla 35. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados	102
Tabla 36. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados	104
Tabla 37. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados	105
Tabla 38. Tipos de galga extensométrica lineal vs fuerza con plata	106
Tabla 39. Tipos de galga vs fuerza con grafeno.....	107
Tabla 40. Galga extensométrica de 3 meandros cuadrada lineal	107
Tabla 41. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados	128
Tabla 42. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 2 meandros con bordes cuadrados	129
Tabla 43. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes cuadrados	131
Tabla 44. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes redondos	132
Tabla 45. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes cuadrados.	134
Tabla 46. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes triangulares	135
Tabla 47. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados	137
Tabla 48. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 2 meandros con bordes cuadrados.	138
Tabla 49. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes cuadrados	140
Tabla 50. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes redondos	141
Tabla 51. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes redondos	143
Tabla 52. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes triangulares	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de configuración experimental	17
Figura 2. Fabricación del sensor	18
Figura 3. Geometría de la celda de carga	19
Figura 4. Mallado de la celda de carga.....	20
Figura 5. Deformaciones puntuales	21
Figura 6. Distribución de las galgas extensométricas.....	22
Figura 7. Esquema para la adquisición de datos	23
Figura 8. Diagrama esquemático de los sensores de hidrógeno	24
Figura 9. Línea de transmisión capa 2	25
Figura 10. Insert Pin.....	25
Figura 11. Partes de la galga extensométrica.....	37
Figura 12. Medición del factor de galga y sensibilidad transversal	38
Figura 13. Designación de estándar para las galgas extensométricas de la firma vishay	39
Figura 14. Constitución de una galga de filamento	42
Figura 15. Constitución de una galga de trama pelicular	42
Figura 16. Longitud de la galga	44
Figura 17. Proceso de micro fabricación	48
Figura 18. Etapas de la metodología	54
Figura 19. Cronograma.....	56
Figura 20. ScienceDirect mapa de palabras	59
Figura 21. Proquest mapa de preguntas	60
Figura 22. ScienceDirect mapa de calor	61
Figura 23. Proquest mapa de calor.....	62
Figura 24. Vantage point años de publicación v keywords.....	63
Figura 25. Vosviewer keywords vs año de publicación.....	64
Figura 26. Partes de una galga extensométrica lineal	65
Figura 27. Medidas acotadas de una galga extensométrica lineal de 1 meandro	66
Figura 28 . Diseños de geometrías de galgas extensométricas lineales con 1,2,3 y 5 meandros con bordes cuadrados.....	67
Figura 29. Diseños de geometrías de galgas extensométricas lineales con 1,2,3 y 5 meandros con bordes redondos y 5 meandros con bordes triangulares.....	68
Figura 30. Variación de la resistencia eléctrica del carbono (Grafeno)	70
Figura 31. Variación de la resistencia eléctrica de la plata	71
Figura 32. Gauge factor de la plata	72
Figura 33. Gauge factor del carbono(Grafeno).....	73
Figura 34. Deformación Unitaria.....	74
Figura 35. Módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados con sustrato de papel.....	75

Figura 36. Variación de la resistencia eléctrica del carbono(Grafeno).....	77
Figura 37. Variación de la resistencia eléctrica de la plata	78
Figura 38. Gauge factor de la plata	79
Figura 39. Gauge factor del carbono(Grafeno).....	80
Figura 40. Deformación Unitaria	80
Figura 41. módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados con sustrato de papel.....	81
Figura 42. Cantiléver en poliamida.....	83
Figura 43. Cantiléver en poliamida.....	83
Figura 44. Galga extensométrica lineal de 5 meandros cuadrada.....	86
Figura 45. Galga extensométrica lineal de 3 meandros cuadrada.....	87
Figura 46. Galga extensométrica lineal de 2 meandros redonda.....	88
Figura 47. Galga extensométrica lineal de 1 meandro redonda.....	89
Figura 48. Galga extensométrica cuadrada lineal de 5 meandros.....	91
Figura 49. Galga extensométrica cuadrada lineal de 3 meandros.....	92
Figura 50. Galga extensométrica lineal de 2 meandros redonda.....	93
Figura 51. Galga extensométrica lineal de 1 meandros redonda.....	94
Figura 52. Fuerza en un determinado punto de 8 N, en la zona azul.....	95
Figura 53. Fuerza en puntos determinados de 8 N, en la zona azul	96
Figura 54. Fuerza en el sustrato en el eje +Y de 8N	97
Figura 55. Sustrato de Papel.....	98
Figura 56. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C	100
Figura 57. RANGO DE TEMPERATURA 226.41°C.....	100
Figura 58. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	101
Figura 59. RANGO DE TEMPERATURA 226.89°C.....	102
Figura 60. Diagrama de barras de año de publicación ScienceDirect.....	116
Figura 61. Diagrama de líneas de año de publicación Proquest.....	117
Figura 62. Diagrama de sopa de autores ScienceDirect.....	118
Figura 63. Diagrama de sopa de nombre de autores Proquest	119
Figura 64. Diagrama de sopas de palabras claves ScienceDirect.....	120
Figura 65. Diagrama de sopa de palabras claves Proquest	120
Figura 66. Diagrama de barras de los países con el número de publicaciones Proquest	121
Figura 67. Diagrama del mundo con publicaciones.....	122
Figura 68. Palabras claves frente a los años de publicación ScienceDirect	123
Figura 69. Diagrama de autores frente a los años de publicaciones Proquest	124
Figura 70. Diagrama de palabras claves SienceDirect	125
Figura 71. Diagrama de mapa de calor de palabras claves ScienceDirect ..	126
Figura 72. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	127
Figura 73. Temperatura 226.85°C.....	127
Figura 74. TEMPERATURA DE 26.85°C	128
Figura 75. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	129
Figura 76. RANGO DE TEMPERATURA 26.85 °C.....	130

Figura 77. RANGO DE TEMPERATURA 226.85 °C.....	130
Figura 78. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	131
Figura 79. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	132
Figura 80. RANGO DE TEMPERATURA 27.13°C.....	133
Figura 81. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	133
Figura 82. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	134
Figura 83. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	135
Figura 84. RANGO DE TEMPERATURA 300°K (226.85°C).....	136
Figura 85. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	136
Figura 86. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	137
Figura 87. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	138
Figura 88. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	139
Figura 89. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	139
Figura 90. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	140
Figura 91. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	141
Figura 92. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	142
Figura 93. RANGO DE TEMPERATURA 227.42°C.....	142
Figura 94. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.....	143
Figura 95. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.....	144

TABLA DE ANEXOS

ANEXO A	115
ANEXO B.....	127

OPCIÓN DE GRADO:

- **NOMBRE DEL PROYECTO LIDERADO POR EL DOCENTE (TÍTULO):** Diseño de galgas extensométricas lineales a escala de micras para la reducción de factores externos existentes en la industria M.E.M.S
- **ALTERNATIVA:** Auxiliar de Investigación
- **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Software inteligente y convergencia tecnológica.
- **EJE TEMÁTICO:** Diseño y simulación.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria en general (e.j. industria aeronáutica), es muy importante poder llegar a la obtención de un sistema de medición, que mantenga un monitoreo continuo de las diversas partes mecánicas. Debido a esta situación, aparecen las galgas extensométricas como una solución al tema de monitoreo, ya que este tipo de dispositivos pueden obtener mediciones precisas de las variaciones de los parámetros (como es el caso de las deformaciones que sufren los componentes mecánicos) y en el caso más extremo, se puede lograr detectar a tiempo posibles rupturas en dichos componentes.

Teniendo esto como precedente, las galgas extensométricas se definen como un transductor basado en el principio extensométrico, el cual, al ser sometido a algún efecto mecánico (ej. tensión, presión, etc.) varía su resistencia, siendo capaz de convertir pequeñas deformaciones de un material en medidas cuantificables.

Por otra parte, la fabricación y la miniaturización de las galgas extensométricas han presentado un visible avance, ya que el impacto que han tenido este tipo de transductores en los diferentes campos (ej. la mecánica) ha aportado una mejora en control de las deformaciones. Entre tanto, para realizar la miniaturización de una galga extensométrica se usa tecnología M.E.M.S (por sus siglas en inglés Microelectromechanical systems), que brinda una disminución en el consumo de potencia, alto desempeño, menor peso y un costo más bajo de fabricación, en comparación con otros dispositivos.

Todo lo anterior, introduce la diversidad de los parámetros dentro de los cuales pueden funcionar las galgas extensométricas, así como también, la estructura de dichas galgas y cuáles son las características que se deberían tener en cuenta a la hora de realizar un diseño y simulación de galgas extensométricas de este tipo. Dentro de las condiciones principales de diseño y simulación de una galga extensométrica se encuentran, los materiales utilizados pues estos deben contar con propiedades piezoresistivas, que no es más que la capacidad de transformar cualquier deformación en una variación en su resistencia y el tipo de sustrato, que es la base sobre la cual se fabrican los sensores. Asimismo, en un proceso posterior como es la fabricación de algunas galgas extensométricas, se deben tener en cuenta factores como la sensibilidad o factor de galga al momento de ser implementadas, sin dejar de lado, que cuentan con un corto tiempo de vida útil.

Teniendo en cuenta esto, en el siguiente Trabajo de grado se podrá analizar el valor del factor de galga como el parámetro fundamental de un diseño propuesto de galgas extensométricas y, de esta forma, considerar algunos de estos factores externos (ej. la temperatura, la presión, etc.) que afectan a dicho factor de galga o sensibilidad como también dentro de la miniaturización de este.

Por lo tanto, el siguiente trabajo de grado, se divide en tres etapas que contribuyen a la elaboración de la simulación con galgas extensométricas, además de dar cumplimiento a los objetivos propuestos: Etapa 1: Sustratos y materiales; Etapa 2: Selección del diseño; Etapa 3: Análisis del diseño. En esta última etapa es importante recalcar que se tuvo en cuenta el módulo Young para determinar cuánta ha sido la deformación o el efecto mecánico antes de que se genere una fractura en el material, y de esta forma determinar cuál tuvo un mejor rendimiento al ser sometido a los efectos mecánicos.

2. ANTECEDENTES

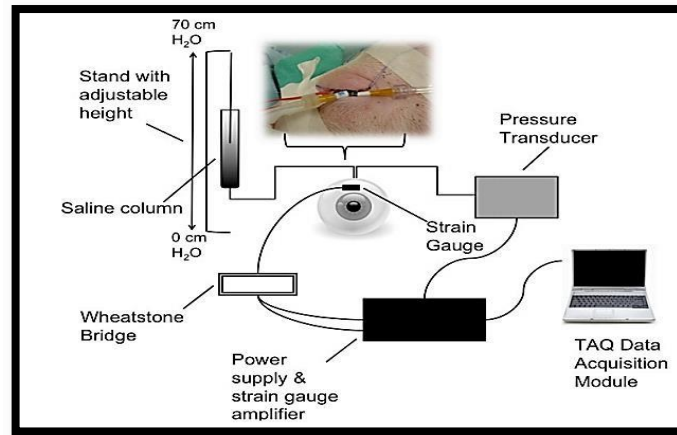
La presente investigación fue realizada trabajando con una ventana de tiempo de 5 años, dicha investigación está destinada a aportar en el crecimiento de los conocimientos en el área de la microelectrónica y, más en específico en la miniaturización de las galgas extensométricas, las cuales cuentan con variedad de aplicaciones (por ejemplo, biomédicas, industriales, entre otras) y diseños de geometrías. Dicho estado del arte, genera una mayor comprensión de lo que son las galgas extensométricas y la diversidad de materiales y características que se pueden encontrar dependiendo de la aplicación o el objeto de fabricación de dichas galgas extensométricas.

Una de las aplicaciones más comunes de las Galgas extensométricas, las encontramos en el campo de la oftalmología, concretamente en el tratamiento para el glaucoma, que es una enfermedad que se encuentra asociada al aumento de la presión intraocular (PIO), lo que puede ocasionar ceguera o pérdida de la visión. Esta enfermedad es indetectable hasta que la visión se ve evidentemente afectada y la única forma de disminuir el progreso de dicha enfermedad es reducir y estabilizar la PIO.¹

Es por esto que, en el año 2013, en la Universidad de Toronto, la estudiante Aphrodite stavropoulos, implementó un sensor extensométrico ubicado en la esclerótica de ojos porcinos como prueba, donde este sensor tiene la función de detectar los cambios de radio de la curvatura de la esclerótica y con ello evaluar con precisión la PIO. La implementación de la anterior propuesta se puede observar en la Figura 1, donde se muestra la ubicación del sensor y el resto de sistema para la adquisición de datos.

¹ STAVROPOULOS, Aphrodite. Continuous Monitoring of Intraocular Pressure from the Sclera. Doctor of Philosophy. Toronto. University of Toronto. Institute of Medical Science, 2013. 172 p. Disponible en la web: < <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/1763860188/7631999B6B834BF1PQ/1?accountid=45660> >

Figura 1. Esquema de configuración experimental



Fuente: STAVROPOULOS, Aphrodite. Schematic of Experimental Setup for Live Porcine Model. [Imagen]. Continuous Monitoring of Intraocular Pressure from the Sclera. Institute of Medical Science. Toronto, 2013. 172. [Consultado el 7 de febrero de 2018]. Disponible en la web: < <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/1763860188/7631999B6B834BF1PQ/1?accountid=45660> >

De igual manera, el sensor utilizado cuenta con unas características específicas que pueden ser observadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de la galga extensométrica utilizada

Bridge supply Voltage (Vo)	5.0 V
Resistance value of gauge	120 Ω
Strain gauge material	Constantan foil
Gauge factor (GF)	2.08 \pm 1.0 %
Sensitivity (Live pig Experiment)	0.569 mV/mmHg
Thermal drift	0.01 mV/ $^{\circ}$ C

Fuente: STAVROPOULOS, Aphrodite. Schematic of Experimental Setup for Live Porcine Model. [Imagen]. Continuous Monitoring of Intraocular Pressure from the Sclera. Institute of Medical Science. Toronto, 2013. 172. [Consultado el 7 de febrero de 2018]. Disponible en la web: < <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/1763860188/7631999B6B834BF1PQ/1?accountid=45660> >

Por otro lado, en el año 2013, la Ing. Ana María Cuéllar de la Universidad de los Andes (Colombia), propuso el diseño de un sensor pasivo de tipo resonador LC, que consta de un capacitor de placas paralelas de altura variable y, un inductor multicapa acoplado al capacitor. De esta forma, la presión externa ejercida sobre las placas disminuye la separación entre las mismas cambiando la capacitancia.²

En dicho sensor, se utiliza polidimetilsiloxano (PDMS) como dieléctrico y, para poder dar soporte al capacitor se utiliza FR4 lo que facilita la fabricación del sensor. Adicionalmente, para efectuar la lectura del cambio en la capacitancia se maneja una antena y se acopla al sensor de manera que se pueda medir la variación de la frecuencia de resonancia del sensor.³

Del mismo modo, la estudiante realizó una simulación en COMSOL Multiphysics evaluando las propiedades electromagnéticas del sensor, utilizando el módulo de radiofrecuencia RF, y las propiedades mecánicas del sensor ejecutando el módulo de deformación mecánica.

Figura 2. Fabricación del sensor



Fuente: CUELLAR, Ana. Fabricación del sensor. [Imagen]. Diseño y fabricación de un sensor para el monitoreo de presión intraocular. Universidad de los Andes. Bogotá. 2013. 29 p. [Consultado el 8 de febrero de 2018]. Disponible en la web: <https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/200911569_fecha_2014_01_21_hora_22_59_35_parte_1.pdf>

Dentro del mismo contexto, para el año 2015 los estudiantes Jesús Gomora y Keevyn Rivera de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de México,

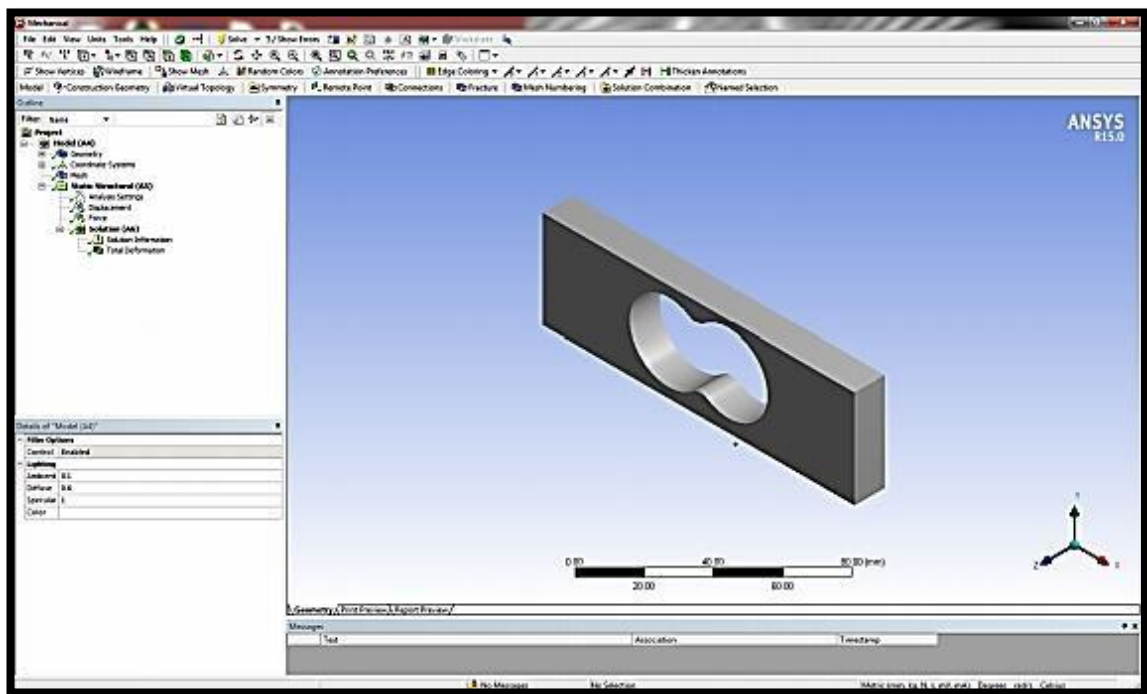
² CUELLAR, Ana. Diseño y fabricación de un sensor para el monitoreo de presión intraocular. Proyecto fin de carrera. Ingeniera Electrónica. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2013. 29 p. Disponible en la web: <https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/200911569_fecha_2014_01_21_hora_22_59_35_parte_1.pdf>

³ Ibid., p. 15.

realizaron la implementación de galgas extensométricas en celdas de carga para medir el empuje de una turbina de gas.⁴

Lo anterior, se logró mediante la simulación del comportamiento de la celda de carga con el fin de observar el rango de deformación que tendría el material y, con ello determinar qué tipo de galga extensométrica se podía utilizar. Adicionalmente, para realizar dicha simulación se implementó el software denominado ANSYS®, que permitió obtener los resultados evidenciados en las Figuras 3, 4 y 5.

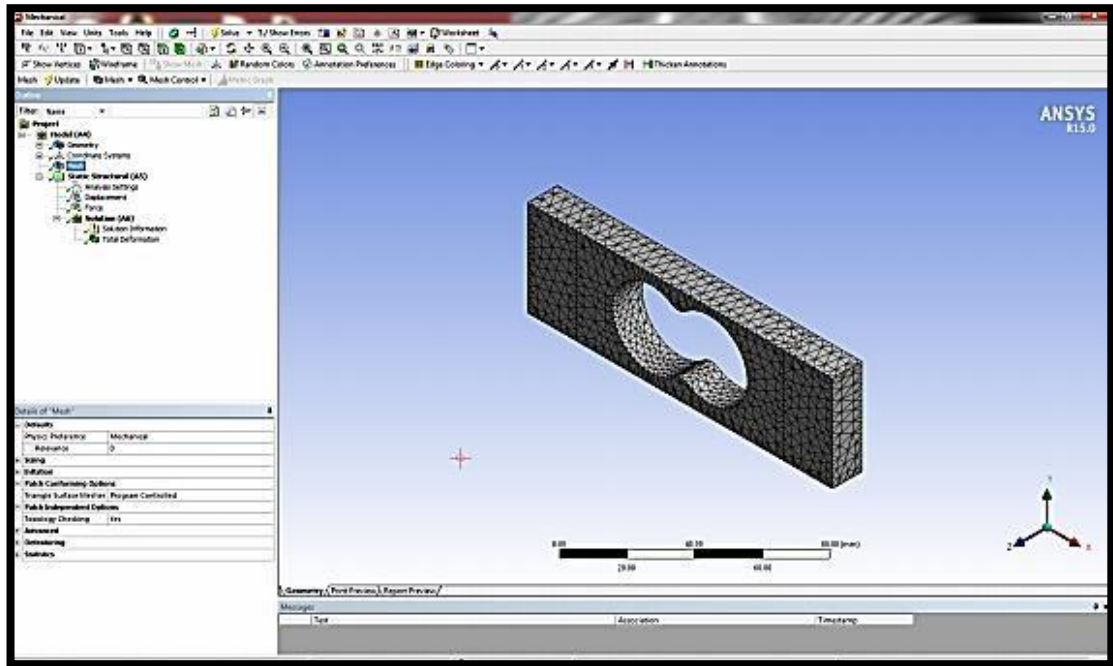
Figura 3. Geometría de la celda de carga



Fuente: GOMORA, Jesús y RIVERA, Keevyn. Geometría de la celda de galga. [Imagen]. Calculo y diseño mecánico de una celda de carga empleada en la medición de empuje para una turbina de gas. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. 2015. 73 p. [Consultado el 10 de febrero de 2018]. Disponible en la web: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/15409/2159%202015%281%29.pdf?sequence=1&Allowed=y> <

⁴ GOMORA, Jesús y RIVERA, Keevyn. Calculo y diseño mecánico de una celda de carga empleada en la medición de empuje para una turbina de gas. Tesis. Ingeniero Mecánico y Eléctrico. México D.F Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2015. 73 p. Disponible en la web: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/15409/2159%202015%281%29.pdf?sequence=1&Allowed=y> <

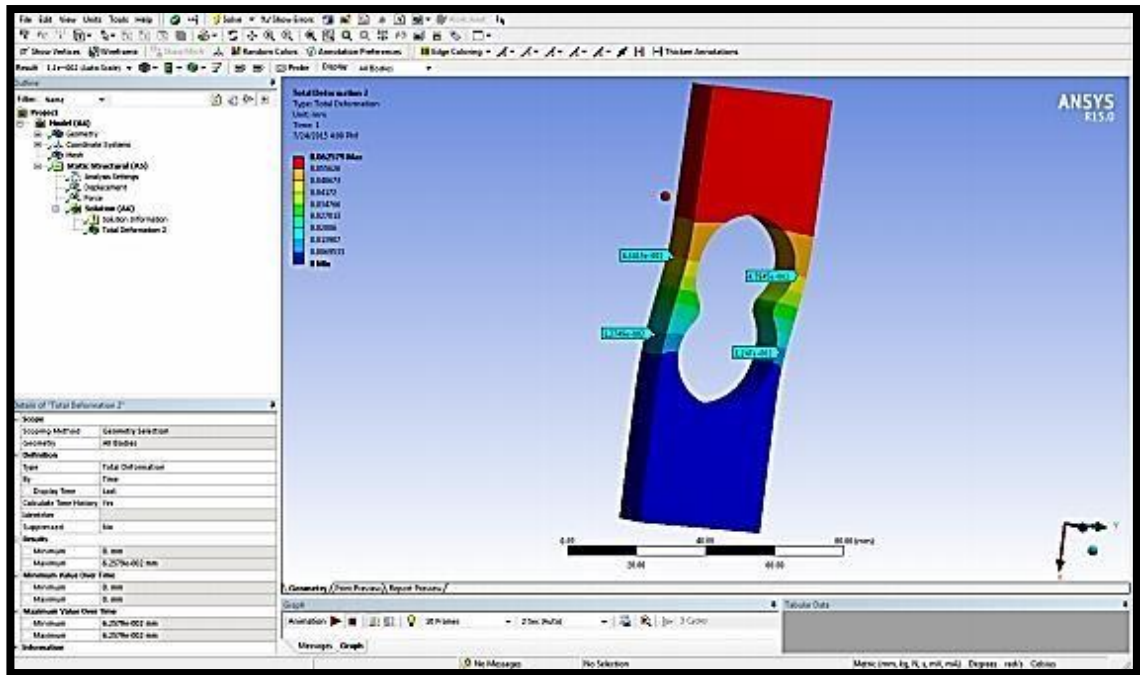
Figura 4. Mallado de la celda de carga



Fuente: GOMORA, Jesús y RIVERA, Keevyn. Geometría de la celda de galga. [Imagen]. Calculo y diseño mecánico de una celda de carga empleada en la medición de empuje para una turbina de gas. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. 2015. 73 p. [Consultado el 10 de febrero de 2018]. Disponible en la web: <
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/15409/2159%202015%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >

En la Figura 5 se puede evidenciar la deformación del material en los puntos donde estarán ubicadas las galgas extensométricas, estas deformaciones son muy pequeñas, en el rango de 1500-1800 micro deformaciones, aplicando una fuerza de 98 Newtons.

Figura 5. Deformaciones puntuales



Fuente: GOMORA, Jesús y RIVERA, Keevyn. Geometría de la celda de galga. [Imagen]. Calculo y diseño mecánico de una celda de carga empleada en la medición de empuje para una turbina de gas. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. 2015. 73 p. [Consultado el 10 de febrero de 2018]. Disponible en la web: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/15409/2159%202015%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y> <

Por otra parte, en la Universidad de Sevilla, en el año 2016 se creó un dispositivo que fuera capaz de detectar las pisadas utilizando galgas extensométricas, donde se pueda presentar una variación de resistencia eléctrica cuando está sometida a fuerzas mecánicas como presión, flexión, entre otras. Con estas galgas extensométricas se podrá analizar el tipo de pisada la cual resulta importante en el ámbito de la salud y del deporte.⁵

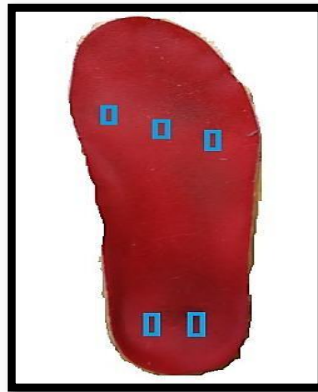
En relación con los temas de salud, se podrá ver si la pisada presenta una descompensación, lo que a futuro podría generar problemas en el resto del cuerpo como, por ejemplo, en las rodillas, la cadera, y la espalda. Por lo que, la detección

⁵ IGLESIAS, Ignacio. Detección de pisada usando galgas extensométricas. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniero Electrónico. Sevilla. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Electrónica, 2016. 89 p. Disponible en la web < <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12328/fichero/Detecci%C3%B3n+de+pisada+usando+galgas+extensom%C3%A9tricas.pdf> >

del tipo de pisada es un factor importante que puede justificar algún tipo de dolencia o prevenirla.⁶

En la Figura 6 se observa la posición de las galgas extensométricas, las cuales detectarán la presión sometida por cada sensor y con ello determinan el tipo de pisada.

Figura 6. Distribución de las galgas extensométricas

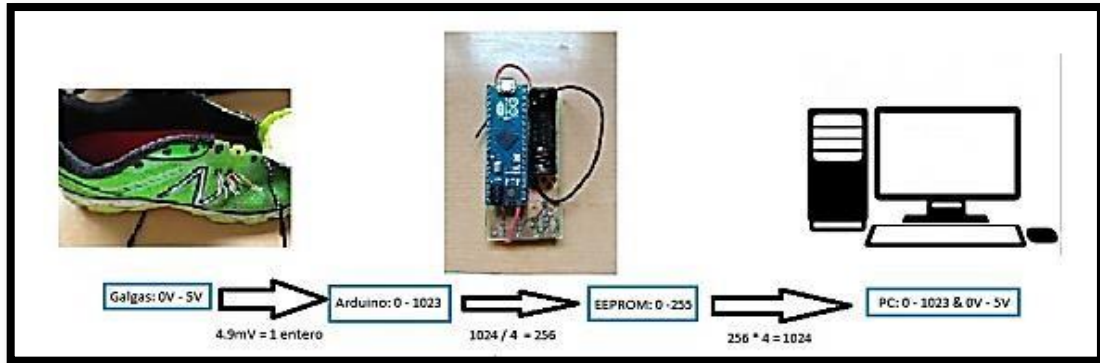


Fuente: IGLESIAS, Ignacio. Colocación de las galgas. [Imagen]. Detección de pisada usando galgas extensométricas. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2016. 89 p. [Consultado el 13 de febrero de 2018]. Disponible en la web <
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12328/fichero/Detecci%C3%B3n+de+pisada+usando+galgas+extensom%C3%A9tricas.pdf> >

En la Figura 7 se observa un esquema para la adquisición de datos de un sistema en el cual se usan galgas extensométricas para la detección de pisadas.

⁶ Ibid., p. 12.

Figura 7. Esquema para la adquisición de datos



Fuente: IGLESIAS, Ignacio. Colocación de las galgas. [Imagen]. Detección de pisada usando galgas extensométricas. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2016. 89 p. [Consultado el 13 de febrero de 2018]. Disponible en la web <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12328/fichero/Detecci%C3%B3n+de+pisada+usando+galgas+extensom%C3%A9tricas.pdf>>

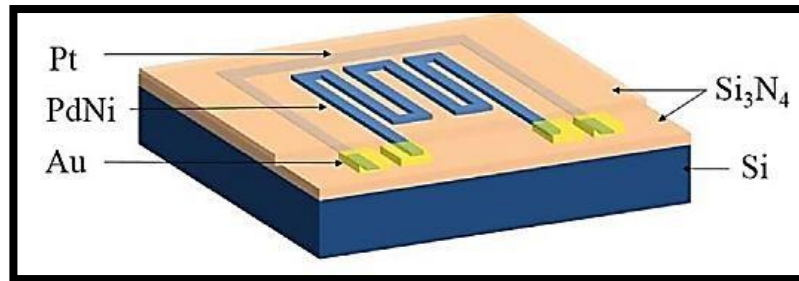
En relación con lo anterior, en el año 2017 se diseñó y fabricó un sensor de gas de hidrogeno utilizando la tecnología M.E.M.S con una serie de materiales evidenciados en la Figura 8. De este modo, en dicho sensor se empleó una oblea de silicio (Si), con una capa de nitruro de silicio (Si_3N_4) como sustrato. Sobre este sustrato, se depositó la aleación PdNi que hace la detección del hidrogeno, con una película de grosor en el tamaño de las micras.⁷

Adicionalmente, se implementó platino (Pt) cerca de la resistencia PdNi para poder realizar una medición de temperatura precisa y disminuir la influencia de la temperatura en el rendimiento del sensor de hidrogeno, sin dejar de lado que se utilizaron electrodos de oro (Au) para una mayor precisión. Como resultado, se obtuvo una buena salida del sensor con repetibilidad en las pruebas, además de ser compacto, pequeño y sin verse perjudicado por las variaciones de temperatura.⁸

⁷ HONGCHUAN, Jiang, et al. Integrated Temperature and Hydrogen Sensors with MEMS Technology. En Sensors [Base de datos en línea]. Vol. 18, no. 1, p. 1-9. Enero, 2018. Disponible en EBSCOhost.

⁸ Ibid., p. 2.

Figura 8. Diagrama esquemático de los sensores de hidrógeno



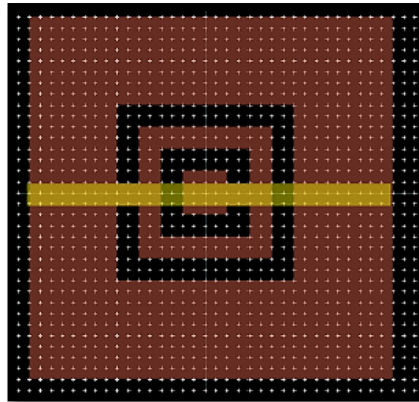
Fuente: HONGCHUAN, Jiang, et al. Schematic diagram of the hydrogen sensors. [Imagen]. Integrated Temperature and Hydrogen Sensors with MEMS Technology. Sensors. Mianyang. 2018. 9 p. Disponible en EBSCOhost.

Del mismo modo, en el año 2017, en la Universidad Católica de Colombia, los estudiantes Duver Vargas y Luis Zamora realizaron el diseño y simulación de sensores planares de microondas en la aplicación de la industria agrícola, esto se hizo con el fin de detectar glifosato en el agua, ya que este presenta efectos de toxicidad en anfibios, gusanos, alteraciones del sistema inmunológico en los peces y también ha resultado ser un agente cancerígeno para el ser humano.⁹

Al mismo tiempo, el software utilizado para el diseño de los sensores planares de microondas fue ADS (Advanced Design System), el cual permite apreciar el comportamiento electromagnético del sensor planar, en 2 y 3 dimensiones. Igualmente, con el manejo de este software y la secuencia de una serie de pasos, se obtuvo como resultado el diseño de los sensores planares que se pueden apreciar en las Figuras 9 y 10.

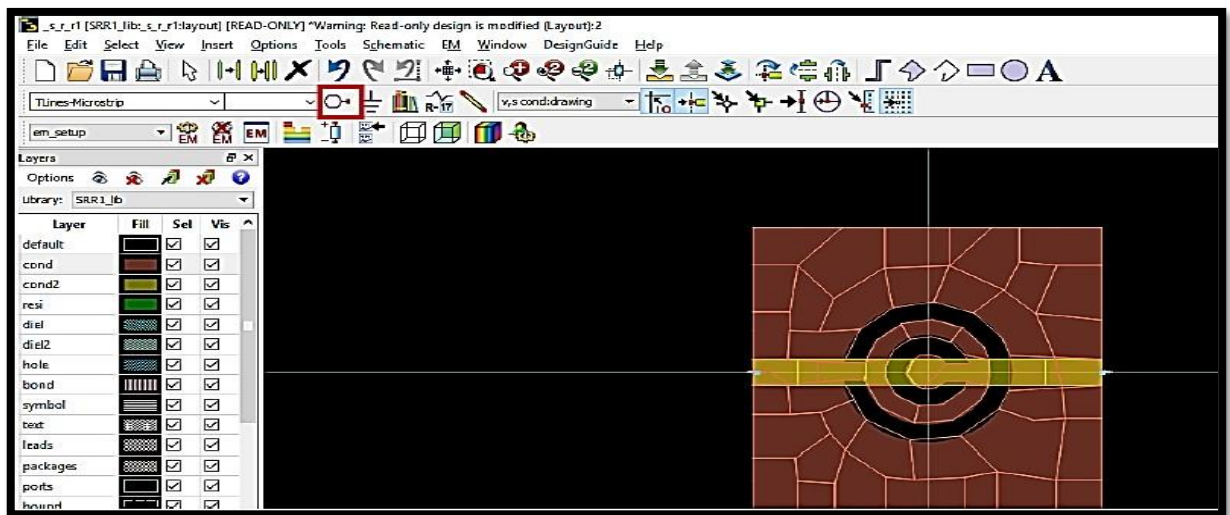
⁹ VARGAS, Duver y ZAMORA, José. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Trabajo de Grado. Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Programa de Ingeniería y Telecomunicaciones, 2017. 97 p.

Figura 9. Línea de transmisión capa 2



Fuente: VARGAS, Duver y ZAMORA, José. Línea de transmisión capa 2. [Imagen]. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. 2017. 97 p.

Figura 10. Insert Pin



Fuente: VARGAS, Duver y ZAMORA, José. Línea de transmisión capa 2. [Imagen]. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. 2017. 97 p.

En contraste, en la Universidad Santo Tomás, desarrollaron en el año 2017 un sistema que fuera capaz de hacer la adquisición de datos, de esfuerzos y

deformaciones para lo que son las cargas estáticas y dinámicas, y el sensor utilizado para esto fueron las galgas extensométricas.¹⁰

Para la selección de la galga extensométrica se tuvieron en cuenta una cantidad de variables las cuales son: factor de la galga, dirección de la rejilla, rango de operación, temperatura de trabajo entre otras, estas variables resultan importantes, ya que esto afecta los resultados de dichas mediciones.¹¹

En los resultados obtenidos por la galga extensométrica se evidenciaron fluctuaciones en las mediciones, esto se debe a los factores externos, que produjeron un valor de error. Otro punto que es importante resaltar, es que dentro de los materiales utilizados como sustrato en la fabricación de dispositivos M.E.M.S., se ha venido consolidando el papel como un material de bajo costo, liviano y fácil para la fabricación.

Por lo que, los sensores de deformación basados en papel que se han implementado hasta el momento han utilizado la impresión de pantalla para depositar partículas conductoras de Carbón Black en papel de cromatografía para lograr un factor de galga (o su acrónimo en inglés “Gauge Factor”) de 4, como se caracteriza bajo cargas estáticas. Asimismo, se ha trabajado con el papel Kraft de madera blanda blanqueada (NBSK) de bajo costo con fibras grandes y un tamaño de poro grande resultante, que promueve el transporte de las suspensiones de partículas Carbón Black depositadas en el papel. Sin dejar de lado, que se han hecho otras investigaciones fundamentadas en el manejo de diferentes tipos de papel como lo son, el papel convencional de impresión, entre otros.¹²

En la Tabla 2 se muestra cuáles son los factores más relevantes que afectan la selección de la galga extensométrica.

¹⁰ FERRO, Kevin. Determinación experimental del estado de esfuerzos y deformaciones a través de galgas extensométricas en componentes mecánicos bajo condiciones de servicio. Trabajo de Grado. Ingeniero Mecánico. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2017. 83 p. Disponible en la web : < <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9220/FerroKevin2017.pdf?sequence=1&isAlloWed=y> >

¹¹ Ibid., p.85.

¹² 26th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS (MEMS). En: (26: 20-24, enero, 2013, Taipei, Taiwan). Paper-based strain sensing material. IEEE. Disponible en la web: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/6474281/> >

Tabla 2. Factores en la selección de la galga extensométrica

1	Objetivo de la medición	
	Primario	Medir deformación
	Secundario	Análisis experimental de tensiones, fabricación de transductores, control de procesos, dispositivos de seguridad
2	Condiciones mecánicas del punto de medición	
	Estado tensional	Uniaxial, Biaxial, direcciones principales conocidas o desconocidas
	Topografía del campo de tensiones	Homogéneo, heterogéneo
	Tipo de sollicitación	Estática; Magnitud, dirección (Positiva, Negativa) Dinámica: Impacto, estocástica, cíclica, alterna, pulsante
3	Condiciones ambientales	
	Duración de la medición	Solo una vez, corta, repeticiones cortas, larga
	Temperatura	Magnitud, rango, velocidad de variación, radiación unilateral, coeficiente de dilatación térmica del material
	Elementos perturbadores	Aceite
		Campos eléctricos, campos magnéticos, flujos energéticos
		radiación de alta energía
Fuerzas externas		
	Cuarto de puente, circuito de tres hilos, medio puente, cuarto de puente doble, puente completo	
	Longitud, resistencia, aislamiento	
4	Condiciones eléctricas del punto de medición	
	Circuito de medición	Maquinabilidad, adhesividad, soldabilidad
	Alimentación de la galga	Accesibilidad, tratamientos superficiales, resistencia a disolventes

Fuente: FERRO, Kevin. Determinación experimental del estado de esfuerzos y deformaciones a través de galgas extensométricas en componentes mecánicos bajo condiciones de servicio. [Trabajo de Grado]. Universidad Santo Tomás. Bogotá. 2017. 83 p. [Consultado el 26 de febrero de 2018]. Disponible en la web : < <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9220/FerroKevin2017.pdf?sequence=1&isAllo wed=y> >

Adicionalmente, el movimiento de partículas y la deposición en el papel y su distribución resultante a través del grosor del papel, depende de los parámetros estructurales del mismo, es decir, porosidad y tortuosidad, así como la física, las propiedades químicas del papel y la suspensión. De hecho, el movimiento de partículas, la deposición en el papel, la porosidad y el diámetro de fibra promedio de la estructura del papel han sido medidos en estudios arrojando medidas de como 26% y 20 μm , respectivamente.¹³

¹³ *Ibíd.*, p, 474.

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a la importancia de las galgas extensométricas lineales en la industria (por ejemplo, en la industria aeronáutica) y en otros diversos campos en donde se destacan la biomedicina, es necesario poder garantizar que los valores de las mediciones o información sean lo más exactos posible. Por esto, se plantea la generación de un diseño y posterior simulación de galgas extensométricas lineales en el cual sean optimizados sus parámetros, dimensiones a escalas micrométricas, ampliando sus posibles aplicaciones y se minimice el impacto de factores externos los cuales terminan por afectar la sensibilidad o factor de galga y, por ende, generar errores en las mediciones.

Por otra parte, una de las principales restricciones que se tiene a la hora de implementar las galgas extensométricas es su tamaño (debido a algunas que son de grandes dimensiones “las galgas extensométrica con longitudes mayores a los 13 mm son consideradas largas”), por lo que se plantea la miniaturización de estas galgas lineales mediante el uso de tecnología M.E.M.S, debido a que las galgas extensométricas lineales usan tecnología M.E.M.S.

Por otro lado, la afectación generada por factores externos (ej. Temperatura y presión) puede ser minimizada mediante la optimización de los parámetros de diseño, así como también de las mejoras en las características eléctricas de los materiales seleccionados en este Trabajo de grado y estudiados a lo largo del documento, que pretenden ayudar a mejorar el rendimiento de las galgas extensométricas bajo condiciones de impacto de factores externos. De este modo, al implementar mejoras en el diseño, se puede llegar no solo a reducir el impacto de factores externos, sino también a optimizar la sensibilidad o factor de galga, la cual este último parámetro, es el más importante en este tipo de sensor, y así obtener mediciones precisas y con ello valores más confiables. Adicionalmente llegar a minimizar los costos y generar una reducción en el peso de este tipo de sensor, lo cual ampliaría las posibles aplicaciones en la industria.

La selección del tipo de tecnología a utilizar, se escoge M.E.M.S y no otro tipo como puede ser N.E.M.S. (por sus siglas en inglés: Nanoelectromechanical systems), debido a los múltiples inconvenientes a la hora de implementar dicha tecnología, entre los que se encuentran la simulación, ya que no se ha encontrado un software viable en el mercado que trabaje con algunos de los parámetros como presión y temperatura a escalas de nanómetros y, por ende, no es posible la fabricación; otro aspecto importante es que no se cuenta con la maquinaria adecuada para implementarla, por ejemplo, en la parte computacional se requiere de grandes capacidades de procesamiento. Por último, el presente trabajo de grado es la fase inicial de un proyecto a gran escala, el cual incluye la fabricación de las galgas extensométricas lineales, que se espera poder realizarse en el próximo año dentro del Grupo de Investigación de Sistemas Tecnológicos de Alta frecuencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria en general se observa que el tamaño de las galgas extensométricas lineales se convierte en un inconveniente a la hora de ser implementadas, ya que este limita las posibles aplicaciones de las mismas, de otro modo al reducir el tamaño de estas galgas se aumentan los posibles campos de aplicación y, por ende, incrementa el número de posibles usos. Asimismo, al ser reducido su tamaño se podrán obtener mejoras en la precisión de las medidas mediante el uso de tecnología M.E.M.S.

De la misma forma, al reducir las dimensiones de las galgas extensométricas lineales se mejoran las condiciones y materiales característicos, esto, se hace usando herramientas de diseño especializadas para realizar estas funciones, se pueden variar los materiales y geometrías sin afectar el presupuesto disponible para esto, ya que al simular se logra un ahorro en el proceso de fabricación de dichas galgas.

Por otro lado, lograr cuantificar los estados de esfuerzos y deformaciones de forma matemática, ha sido la tendencia durante un largo periodo de tiempo, que genera errores a la hora de la implementación de dichos cálculos en diseños y fabricación de componentes mecánicos. En el contexto actual, los diversos avances en la tecnología han ayudado al diseño y fabricación de los componentes, lo que impulsa a una reducción de las dimensiones y una optimización de los materiales empleados en la fabricación de los diferentes componentes, con el fin de ampliar las posibles aplicaciones. Todo esto, se hace con el objetivo de minimizar los costos y reducir el peso a la mayor cantidad posible, sin llegar a cambiar la función del componente diseñado y fabricado, inclusive mejorando algunos de sus aspectos técnicos.

El gran inconveniente que se observa, es poder llegar a calcular con exactitud los valores de esfuerzos y deformaciones precisos en componentes mecánicos cuando se tienen condiciones variables, y del mismo modo, llegar a medir los efectos de las magnitudes físicas y, cómo estas afectan el comportamiento de los componentes mecánicos. Porque lo que se busca, es mejorar tanto el diseño como los parámetros eléctricos y características de los diversos materiales empleados en la fabricación de las galgas extensométricas lineales y, así llegar a obtener mejoras en la fabricación y monitoreo de dichos componentes mecánicos.

Adicionalmente, a la hora de realizar mediciones con galgas extensométricas lineales un componente de gran impacto, es el efecto que producen los factores externos que se encuentran en el ambiente de medición como lo es: la temperatura, presión, etc. Estos factores externos pueden llegar a variar las mediciones efectuadas por las galgas extensométricas lineales y generan efectos indeseados en los resultados de dichas mediciones.

Por otra parte, es evidente que, a la hora de implementar las galgas extensométricas lineales, el gran tamaño que pueden tener estos sensores se convierte en un factor que limita mucho la gama de posibles aplicaciones, ya que puede influir en el factor de galga o sensibilidad, y termina por reducir el tiempo de vida útil de este tipo de sensor. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son los materiales y parámetros de diseño más adecuados para minimizar los impactos generados por factores externos como temperatura y presión en las aplicaciones de las galgas extensométricas lineales utilizando tecnología M.E.M.S?

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 TEÓRICO- CONCEPTUAL

5.1.1 HISTORIA DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

En el año 1856 Lord Kelvin encontró que, al ser aplicada una fuerza sobre un hilo conductor o un semiconductor, se genera una variación en su resistencia eléctrica. Este principio, permite tomar mediciones de fuerzas de muy pequeña magnitud, las cuales son generadas por leves deformaciones en el conductor. Dichos preceptos, fueron fundamentales para el trabajo con dispositivos transductores, entre los que se encuentran las galgas extensométricas. Entre tanto, las galgas extensométricas fueron inventadas en el año 1938 por Edward E. Simmons, quien las definió como transductores pasivos, que, al ser adheridos a una superficie, ayudan a medir la deformación que esta sufre al ser aplicada una fuerza sobre ella, dicha medida se da en rangos de variación de la resistencia de la galga extensométrica. Al mismo tiempo, el tipo más sencillo de galga se encuentra elaborado en un forro flexible aislador que es apoyado en un patrón plano metálico. Por ello, dichas galgas son unidas a las superficies mediante el uso de un adhesivo especial. Asimismo, las variaciones de resistencia son de muy pequeños valores por lo que es necesario el uso de un puente de Wheatstone, que entrega como resultado una medida de una señal eléctrica.¹⁴

Edward E. Simmons Jr. (1911, Los Ángeles, California - 18 de mayo de 2004, en Pasadena, California) era ingeniero eléctrico y el inventor de la galga extensométrica conformada por la resistencia de alambre. Simmons estudio en el Instituto de Tecnología de California, donde recibió un B.S. en 1934 y un M.S. en 1936. Él continuó trabajando para el instituto con la supervisión del profesor Donald Clark. En 1938, Simmons inventó la galga extensométrica. Caltech demandó la patente de la galga, pero Simmons llevó su caso al Tribunal Supremo de California, y ganó los derechos de patente en 1949.¹⁵

Un puente de Wheatstone es un instrumento eléctrico de medida inventado por Samuel Hunter Christie en 1832, mejorado y popularizado por Sir Charles Wheatstone en 1843. Se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. Sir Charles Wheatstone nació en Gloucester, el 6 de febrero de 1802 y murió en París el 19 de octubre de 1875, fue un científico e inventor británico, se destacó durante la época de victoriana, como también en el Estereoscopio, el cual es un aparato donde su función es crear la ilusión de observar imágenes

¹⁴ CISCAR, Vincent. (s,f). Galgas extensométricas. En: Info PLC. Net- Automatización Industrial, Robótica e industria 4.0. Disponible en la web: <
http://www.infoplcn.net/files/documentacion/instrumentacion_deteccion/infoPLC_net_Galgas_extensometricas.pdf >

¹⁵ Ibid., p.4.

tridimensionales, también se destacó en la técnica de Playfair de codificación, y el caleidófono. Wheatstone es mejor conocido por la invención conformada por unas resistencias, el cual tiene como nombre el puente de Wheatstone, donde su utilidad es para medir resistencias eléctricas.¹⁶

5.1.2 MATERIALES

Dentro de los materiales usados en la fabricación de las galgas extensométricas se encuentran:

5.1.2.1 Materiales de la base.

- **Polímeros:** En la naturaleza existen moléculas enormes llamadas macromoléculas. Estas moléculas, están formadas por cientos de miles de átomos por lo que sus pesos moleculares son muy elevados. Los polímeros son un tipo particular de macromolécula, que se caracteriza por tener una unidad que se repite a lo largo de la molécula.¹⁷
- **Fibra:** son estructuras cristalinas que tienen sus cadenas ordenadas y que están compuestas por materiales naturales y sintéticos, orgánicos e inorgánicos, como pueden ser el acetato y la celulosa.¹⁸

La base o portadora de la rejilla, es el material que se ubica entre la superficie del objeto de estudio y la rejilla. Cuenta con las siguientes funciones: Proporcionar firmeza y soporte a la rejilla para el soldado de cables a las etiquetas, también provee una superficie manejable para el pegado de la galga en el objeto de estudio y por ultimo proporcionar un aislamiento eléctrico entre la rejilla de la galga y el objeto de estudio.¹⁹

Los materiales de la base también llamados forros son de dos tipos: 1) Poliimida y 2) Fibra de vidrio reforzada con epoxy-phenolic. Cada forro debe contar características térmicas parecidas a las de la aleación usada y la superficie en la

¹⁶ Ibid., p.4.

¹⁷ LÓPEZ, Francisco. Fundamentos de los polímeros. Trabajo de grado. Mérida: Universidad de los Andes Venezuela. Facultad de Ciencias. Departamento de Química. 2004. 64, p. Disponible en la web: <https://www.researchgate.net/publication/262639386_FUNDAMENTOS_DE_POLIMEROS>

¹⁸ GONZÁLEZ, Juan. Efecto del Contenido de Fibra de Vidrio sobre las Propiedades Mecánicas en Probetas de Polibutilentereftalato (PBT) Reforzado. Trabajo de grado. Ingeniero Industrial. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Industrial, 2013. 120, p. Disponible en la web: <<http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4002/pfc5725.pdf;jsessionid=AE29C449F559A91944F1EEA0D1DFE832?sequence=1>>

¹⁹ CISCAR, Op cit., p, 4.

que va a ser adherida. En la tabla 3 se observa una descripción de los materiales usados en la base de las galgas extensométricas, entre los que se encuentran la composición, los usos y las temperaturas.²⁰

Tabla 3. Materiales usados en la base de las galgas extensométricas

NOMBRE	COMPOSICIÓN	USOS	TEMPERATURAS
Poliamida	Es un tipo de plástico (resina sintética) muy durable, fácil de fabricar, manejable, resistente a altas temperaturas y a la corrosión.	Se usa como revestimiento o membrana. La base con poliamida, es un portador resistente y extremadamente flexible. Se puede usar en superficies circulares, anguladas y de tamaños pequeños.	Tiene una alta resistencia a la vibración y puede operar en ambientes con temperaturas entre -95°C a 175°C. Bases de poliamida, reforzadas con fibra de vidrio, tienen la capacidad de operar en ambientes con temperaturas de hasta 400°C.
Epoxy-Phenolic Temperaturas de acuerdo al estado	Esta base es una combinación de epoxy con phenolic. Epoxy es una resina sintética característica muy cara, usada para hacer plásticos y adhesivos.	Su uso principal se da en el encapsulado de componentes eléctricos y electrónicos. Phenolic se deriva de phenol, el cual es una resina sintética usada para moldear productos, como capa de revestimiento o adhesivo.	Esta base, a diferencia de la base polyimide, puede ser utilizada en ambientes con temperaturas entre -269°C a 290°C. Si es reforzada con fibra de vidrio el límite de operación se puede ampliar a 300°C.

Fuente: CISCAR, Vincent. (s,f). Galgas extensométricas. En: Info PLC. Net- Automatización Industrial, Robótica e industria 4.0. Disponible en la web: < http://www.infoplc.net/files/documentacion/instrumentacion_deteccion/infoPLC_net_Galgas_extensometricas.pdf >

En la Tabla 4 se observa las aleaciones más comunes para la fabricación de galgas extensométricas:

²⁰ Ibid., p. 5.

Tabla 4. Aleaciones más comunes para la fabricación de galgas extensométricas

NOMBRE	COMPOSICIÓN	CARACTERÍSTICAS	TEMPERATURA
Constantan (aleación A)	Es una aleación compuesta por 55% de cobre y 45% de níquel.	Tiene buena sensibilidad a la tensión con un valor de 2,1, bajo coeficiente de temperatura, buena vida de fatiga (resiste miles ciclos de trabajo).	El rango de temperatura de operación óptimo es entre -50°C y 70°C. Si se excede este límite, la aleación puede presentar pequeños cambios de resistencia debido a las variaciones de temperatura y con el tiempo conducir a cambios permanentes.
Isoelastic (aleación D)	Esta es una aleación de níquel (36%), cromo (8%), hierro (55.5%) y molibdeno (0.5%).	Tiene una vida superior a la fatiga que la aleación Constantan, con un alto factor de galga (aproximadamente 3.5). Trabaja en ambientes con interferencia magnética. Se recomienda para medida de tensión dinámica, es decir, las variaciones de la tensión son permanentes y no se tiene un estado de reposo o de referencia. Su principal desventaja es que la respuesta a la tensión es no lineal.	Su rango de temperatura es -195 a 205 °C en condiciones de trabajo dinámicas.
Karma (aleación K)	Esta es una aleación de níquel (75%), cromo (20) más hierro y aluminio.	Buena vida de fatiga y excelente estabilidad (no es afectada por las variaciones de temperatura). Adecuadas para aplicaciones estáticas, las cuales involucran medir tensiones por largo tiempo sin variaciones, es decir, la tensión permanece constante. Adicionalmente, es buena para medir largos períodos de tensión (meses o años) a temperatura ambiente, o cortos períodos de tiempo a temperaturas elevadas.	Su rango de temperatura es de – 269°C a 260°C. Para períodos cortos, las galgas encapsuladas con la aleación K pueden exponerse a temperaturas de 400°C.

Fuente: ESQUER, Gabriel. Determinación de la sensibilidad y efectos de agentes externos en galgas extensométricas. Tesis. Maestro en Ingeniería Mecánica. México D.F. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2013. 172 p. Disponible en la web: <<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17813/1/Determinacion%20de%20la%20sensibilidad%20y%20efectos%20de%20agentes%20externos%20en%20galgas%20extensometricas.pdf>>

Una de las principales características de las aleaciones Constantan y Karma es su buena capacidad para la compensación de la temperatura por sí mismas. Ya que las galgas que miden tensión, son diseñadas para obtener una salida térmica mínima, así compensan por sí solas el efecto de la temperatura. Al momento de seleccionar una aleación de galga se tiene que valorar el número de compensación de la temperatura de la aleación, con sus siglas en inglés (STC, *self temperatura compesation*), dicho parámetro es especificado por el fabricante.²¹

5.1.3 PARÁMETROS A TENER EN CUENTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA GALGA EXTENSOMÉTRICA

Durante la construcción de una galga extensométrica se deben tener en cuenta la unión de sus tres partes principales, las cuales son:

- La rejilla: Es la parte metálica la cual varía su resistencia conforme se aplica una compresión o tensión.
- La base: Es el soporte portador de la rejilla y se fabrica en distintos materiales de tipo aislante.
- Las etiquetas: Sirven para realizar la conexión de la galga extensométrica de señal.

5.1.3.1 La rejilla. Es necesario que la rejilla tenga una protección contra los efectos del medio ambiente, por esto, se usa un encapsulado de la galga. El encapsulado se elabora mediante un recubrimiento con cemento nitrocelulosa a la rejilla y su base. La rejilla es cubierta con varias capas de nitrocelulosa para brindar firmeza y flexibilidad a la galga. Para obtener parámetros especiales a la rejilla y mejorar el rango de temperatura de operación de la galga, se cambia el recubrimiento de nitrocelulosa por fibra de vidrio y resina térmica.²²

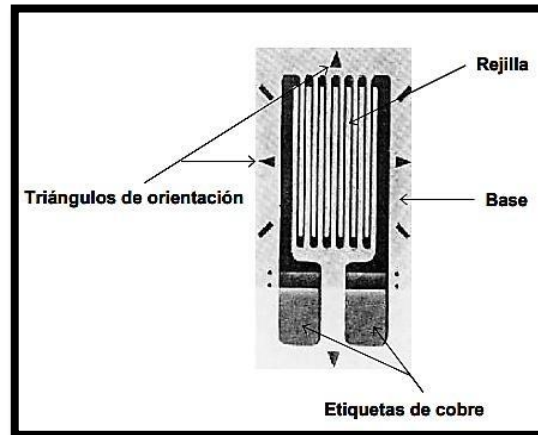
En la Figura 11 se muestran cuatro triángulos, usados para la orientación de la galga en la superficie a ser estudiada y, también se ilustran las partes de las galgas extensométricas.

²¹ Ibid., p. 102.

²² RUÍZ, Guillermo. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensométrica. Tesis. Ingeniero en Electrónica. Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca. Facultad de Ingeniería, 2005. 108 p. Disponible en la web: < http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf

>

Figura 11. Partes de la galga extensométrica



Fuente: RUÍZ, Guillermo. Partes que componen la galga. [Imagen]. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensométrica. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca. 2005. 108 p. [Consultado el 8 de marzo de 2018]. Disponible en la web: < http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf >

5.1.3.2 Rejilla de la galga extensométrica. Las galgas extensométricas son conformadas por un alambrado en forma de rejilla. Para generar a los requerimientos de resistencia, se varía su longitud. El ancho de los alambres es de 0.02 mm y cuando son de una aleación cobre-níquel su espesor es de 0.1 mm en el área de la rejilla. Dependiendo del tipo de aplicación son usados diferentes tipos de alambres para galgas con diversas características (la más usada es cobre-níquel). Así mismo, los alambres de la rejilla pueden ser elaborados de varios tipos de aleaciones para poder: “Mejorar el desempeño a muy altas o muy bajas temperaturas, aumentar la sensibilidad a la tensión o para tener una mejor vida a la fatiga.”²³

- **Lámina de la galga extensométrica:** La lámina de la galga es la forma final en que se fabrica la rejilla. Comúnmente la longitud que más utilizada está en el rango de 3 a 6 mm, con espesor de 0.03 a 0.07 mm.²⁴

5.1.3.3 Parámetros de selección de la galga extensométrica. Para realizar mediciones de tensión, los parámetros de funcionamiento e instalación de una galga son afectadas por los siguientes parámetros:

- **Sensibilidad a la tensión de la rejilla.** La galga cuenta con una relación entre tensión que se aplica al objeto de estudio y las variaciones de

²³ Ibid., p. 3.

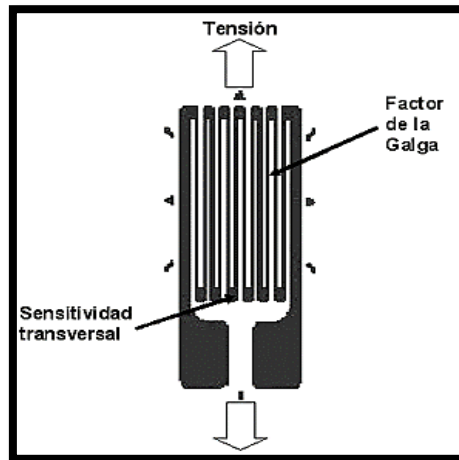
²⁴ Ibid., p. 4.

resistencia, la cual se llama sensibilidad a la tensión o factor de galga; es definida como la relación de cambio de la resistencia eléctrica del conductor al variar la longitud relativa. Este parámetro es adimensional. “El factor de la galga es función de la sensibilidad a la tensión de la aleación de los metales con la que fue fabricada la rejilla de la galga y de otros factores como son: Temperatura, tamaño, configuración de la rejilla y la forma de medirlo”.²⁵

“En los bordes de la rejilla (curvas finales), se presenta una sensibilidad transversal. Esta sensibilidad es observada cuando se es aplicada una tensión excesiva a la galga, lo cual genera el ensanchamiento (compresión) o estiramiento (tensión) de la galga, induciendo que los bordes de la rejilla tengan variaciones en su longitud y con esto la galga tenga un cambio en su resistencia”.²⁶

En la figura 12 se muestran los lugares donde se mide el factor de galga y la sensibilidad transversal.

Figura 12. Medición del factor de galga y sensibilidad transversal



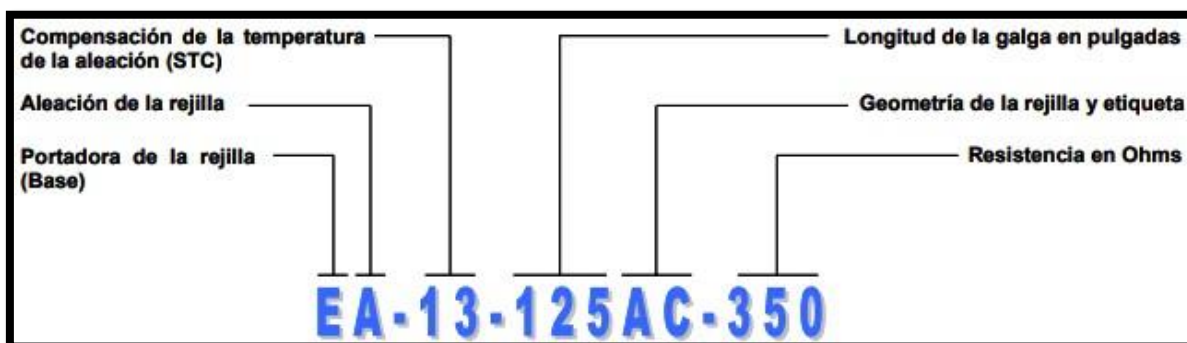
Fuente: RUÍZ, Guillermo. Partes que componen la galga. [Imagen]. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensométrica. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca. 2005. 108 p. [Consultado el 9 de marzo de 2018]. Disponible en la web: < http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf >

En la Figura 13 se observa la designación del estándar para las galgas extensométricas de la firma vishay y la definición de cada uno de sus parámetros.

²⁵ Ibid., p. 5.

²⁶ Ibid., p. 6.

Figura 13. Designación de estándar para las galgas extensométricas de la firma Vishay



Fuente: RUÍZ, Guillermo. Partes que componen la galga. [Imagen]. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensométrica. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca. 2005. 108 p. [Consultado el 3 de septiembre de 2018]. Disponible en la web: < http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf >

Algunos valores típicos de factor de galga y sensibilidad transversal para galgas comerciales son mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Ejemplo de valores de factores de galga y sensibilidad transversal

TIPO DE GALGA	FACTOR DE GALGA (G.F.)	SENSIBILIDAD TRANSVERSAL %
EA-06-250BG-120	2,11	+0,4
EA-50-250BG-120	2,125	+0,9
WK-06-250BG-350	2,05	-3,4
WK-06-500AF-350	2,04	-9,2
WK-15-125AD-350	2,16	-1,9

Fuente: RUÍZ, Guillermo. Partes que componen la galga. [Imagen]. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensométrica. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca. 2005. 108 p. [Consultado el 9 de marzo de 2018]. Disponible en la web: < http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf >

En la ecuación 1 se muestra el factor de galga en función de la división de los cambios en la resistencia de la galga, la resistencia y la deformación unitaria.

Ec 1. Ecuación de la variación de la resistencia eléctrica²⁷

$$\Delta R = \rho(\Delta L/A)$$

Donde:

(ΔR) = Cambios de la resistencia eléctrica (Ω).

ρ = Resistividad del material ($\Omega \cdot m$).

ΔL = Cambio en la longitud efectiva del conductor (m).

A = Área del conductor (m²).

En la ecuación 2 se muestra la variación de la Resistencia en función del producto de la resistividad del material y la división de la variación sufrida en la longitud y el área del conductor.

Ec 2. Ecuación de factor de galga²⁸

$$GF = K = \frac{\frac{\Delta R}{Rg}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

Donde:

GF=K=Factor de galga [adimensional].

ΔR = Cambio en la resistencia de la galga (Ω).

Rg= Resistencia inicial de la galga (Ω).

ΔL = Cambio en la longitud de la galga (m).

L= Longitud de la galga (m).

$\left(\frac{\Delta L}{L}\right) = \varepsilon$ = Deformación unitaria [adimensional].

En la ecuación 3 se muestra el valor del esfuerzo aplicado al objeto el cual se obtiene al dividir la tensión, fuerza, peso, carga entre el área transversal de la estructura.

²⁷ ESQUER. Op cit., p. 54.

²⁸ Ruíz. Op cit., p. 18.

Ec 3. Ecuación del esfuerzo aplicado a un objeto²⁹

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

σ = Esfuerzo aplicado al objeto [N/m²].

P = Tensión, fuerza, peso, carga [N].

A = Área transversal de la estructura [m²].

En la ecuación 4 se obtiene el valor de la deformación unitaria al dividir el cambio de la longitud del objeto entre la longitud inicial del objeto.

Ec 4. Ecuación de la deformación unitaria³⁰

$$\varepsilon = \Delta L / L_0$$

ε = Deformación unitaria [adimensional].

ΔL = Cambio de la longitud del objeto [m].

L_0 = Longitud inicial del objeto [m].

5.1.4 TIPOS DE GALGAS SEGÚN SU MATERIAL CONSTITUTIVO

5.1.4.1 Galgas metálicas. Estas poseen como elemento sensible un conductor metálico el cual a su vez puede tener la forma de un filamento o tramo pelicular.³¹

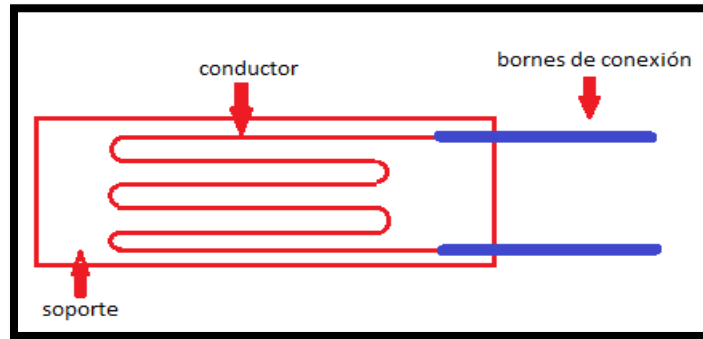
- **Galgas metálicas de filamento (wire strain gage):** El elemento sensible es un hilo conductor metálico con una sección circular de 0,025mm aproximadamente de diámetro y encolado sobre una base aislante de resina epoxica o poliéster. Para obtener la máxima longitud activa dentro de un área reducida, el hilo muestra varios repliegues como se muestra en la figura 14.

²⁹ Ibid., p, 14.

³⁰ Ibid., p, 15.

³¹ IDROVO, Pablo & QUINTANILLA, Luis. Aplicación de galgas extensométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas. Tesis. Ingeniero Mecánico. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Facultad de Ingenierías. Carrera de Ingeniería Mecánica, 2010. 168 p. Disponible en la web: <<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4482/1/UPS-CT001920.pdf> >

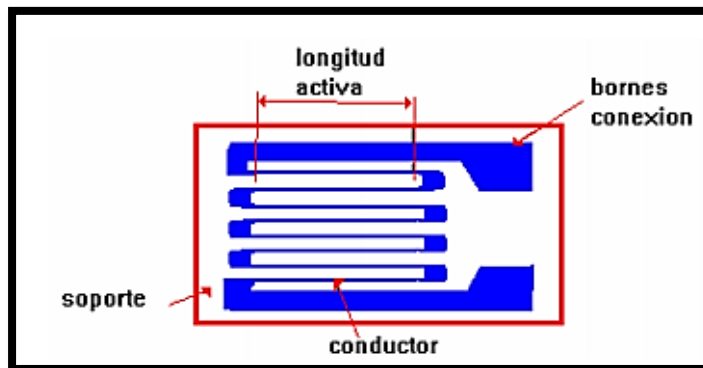
Figura 14. Constitución de una galga de filamento



Fuente: Autoría propia.

- **Galgas metálicas de trama pelicular (foil strain gage):** El elemento sensible es una película de metal de pocas micras de espesor, recortada mediante ataque fotoquímico u otra técnica adecuada. La longitud activa está bien determinada pero sus bucles y las pistas de conexión son prácticamente insensibles a causa de su anchura, esto se evidencia en la figura 15.³²

Figura 15. Constitución de una galga de trama pelicular



Fuente: IDROVO, Pablo & QUINTANILLA, Luis. Constitución de una galga de trama pelicular. [Imagen]. Aplicación de galgas extensométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas. Tesis. Ingeniero Mecánico. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. 2010. 168 p. [Consultado el 11 de septiembre de 2018]. Disponible en la web: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4482/1/UPS-CT001920.pdf> >

5.1.4.2 Galgas Semiconductoras. Este tipo de galgas son muy similares a las metálicas. En este tipo de galga se sustituye el hilo metálico por un material semiconductor. La principal diferencia constructiva de estas galgas respecto a las

³² Ibid., p. 15.

metálicas se encuentra en el tamaño. Los materiales más abundantes para fabricar esas galgas son: Silicio y Germanio, estas pueden ser tipo N o P. Las galgas tipo P aumentan su resistencia con el esfuerzo aplicado mientras que las galgas N la disminuyen. En ambos casos, interesa trabajar con materiales que presenten un bajo coeficiente térmico. Este tipo de galgas poseen un coeficiente K mucho mayor que las fabricadas con material metálico, por lo que su variación de resistencia es más sensible debido a la deformación que sufre el material. Pero su costo es excesivo debido a su método de fabricación por lo que son poco utilizadas.³³

En la tabla 6 se observan los diferentes valores de los parámetros de las galgas metálicas y semiconductoras.

Tabla 6. Características de las galgas extensométrica

PARÁMETRO	METÁLICAS	SEMICONDUCTORAS
Margen de medida ($\mu\epsilon$)	0,1 a 40,000	0,001 a 3000
Factor de sensibilidad (GF)	1,8 a 2,35	50 a 200
Resistencia (Ω)	120,350,600 hasta 5000	1000 a 5000
Tolerancia en la resistencia (%)	0,1 a 0,2	1 a 2
Tamaño (mm)	0,4 a 150	1 a 5

Fuente: RUÍZ, Guillermo. Partes que componen la galga. [Imagen]. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensométrica. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca. 2005. 108 p. [Consultado el 18 de marzo de 2018]. Disponible en la web: < http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf >

5.1.5 LONGITUD DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA

La longitud de la galga es un parámetro importante al momento de la selección de la misma. Porque las mediciones de tensión usualmente se hacen en máquinas o estructuras con pequeñas dimensiones; las galgas con longitudes mayores a los 13 mm son consideradas largas, ofrecen ventajas comparadas con las galgas pequeñas (con longitud de 5 mm), debido a que son fáciles de manejar ya que poseen buena disipación de calor. En la figura 16 se ilustra la longitud de galga.³⁴

³³ Ibid., p. 16.

³⁴ Ibid., p. 103.

Figura 16. Longitud de la galga



Fuente: RUÍZ, Guillermo. Partes que componen la galga. [Imagen]. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensométrica. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca. 2005. 108 p. [Consultado el 9 de marzo de 2018]. Disponible en la web: < http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf >

5.1.6 MODELO DE LA GALGA

“El modelo de la galga es la forma, figura o patrón que se observa en la galga. Debido a la variedad de aplicaciones y usos, existen diferentes modelos de galgas. El modelo incluye: la forma de la rejilla, el número de rejillas y orientación de las mismas (en galgas con múltiples rejillas) y la configuración de las etiquetas de soldado”.³⁵

5.1.6.1 Característica de desempeño³⁵

Dentro de las principales características de desempeño se tienen:

- Variación del factor de galga por la temperatura.
- Resistencia y tolerancia.
- Efectos de la temperatura en la resistencia.
- Capacidad de elongación.
- Vida de fatiga.
- Rango de temperatura de operación de las galgas.

³⁵ Ibid., p. 10.

5.1.7 MÓDULO DE YOUNG

Cuando sobre un cuerpo de longitud “ L_0 ” y área “ A ” de la sección transversal actúa una fuerza de compresión F , el resultado es un cambio ΔL en longitud. Por debajo del límite elástico, la razón entre el esfuerzo y la deformación unitaria, para este caso, se denomina módulo de Young. Dicho valor del módulo de Young depende sólo de la composición del objeto, no de su tamaño o forma. Las unidades usuales de Y (módulo de Young) son newtons por metro cuadrado (N/m^2) y libras por pulgada cuadrada ($1lb/in^2$).³⁶

Ecuación 5. Módulo de Young³⁷

$$Y = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{l_0}}$$

Donde:

F: fuerza de compresión (N).

A: área de la sección transversal (m^2).

ΔL : variación en la longitud (m).

l_0 : Longitud del cuerpo (m).

Módulo de Young = (esfuerzo longitudinal / deformación unitaria longitudinal).

5.1.8 GALGAS EXTENSOMÉTRICAS SERIE “M” y SERIE “Y”

En la actualidad se puede encontrar diferentes series de galgas extensométrica, las cuales tienen ciertas características en particular en donde se tienen la serie M y la serie Y, entre otras.

³⁶ BEISER, Arthur. Elasticidad. En: Física Aplicada. 2 ed. México D, F: Mc Graw-Hill, 1991. 415 p. Disponible en: ProQuest Ebook Central.

³⁷ Ibid., p. 138.

5.1.8.1 Galgas extensométricas serie M. La Serie M está formada por galgas extensométricas de lámina y tiene aplicación en el análisis de tensiones de materiales con alta resistencia a la fatiga, como los composites de fibra. También, se utilizan en aplicaciones de desarrollo de productos; por ejemplo, en la industria aeroespacial o en la de material deportivo.³⁸

Adicionalmente, las galgas extensométricas de la Serie M tienen un rango de temperatura muy amplio. Por su excelente comportamiento a la fatiga, admiten repeticiones de las medidas con frecuencias extremas, incluso con altos niveles de deformación. Es posible combinar distintas propiedades, como diferentes geometrías, valores de resistencia y longitudes de la rejilla de medición para configurar la galga extensométrica ideal. Disponemos de más de 36 configuraciones frecuentes disponibles para entrega inmediata.³⁹

- **Rango de temperatura:** -200 °C a +300 °C
- **Ciclos de carga:** hasta 10 millones de ciclos con cargas de fatiga de $\pm 2000 \mu\text{m/m}$
- **Longitudes de la rejilla de medición:** 1,5 a 6 milímetros

5.1.8.2 Galgas extensométricas serie Y. Las galgas extensométricas de lámina de la Serie Y pueden emplearse en numerosas áreas de aplicación, como para análisis de tensiones estáticas y dinámicas. Miden con alta precisión, son robustas, sumamente flexibles y pueden instalarse sobre distintos materiales, gracias a sus siete ajustes distintos de respuesta de temperatura. Las galgas extensométricas de la Serie Y se encuentran disponibles en versiones muy variadas, para un amplio espectro de aplicaciones. Sus características, geometría, resistencia nominal o longitud de la rejilla de medición pueden combinarse como se desee.

- **Tipos:** más de 2000
- **Longitudes de la rejilla de medición:** de 0,3 a 150 mm
- **Material de la rejilla de medición:** lámina de constantán
- **Material portador y de recubrimiento de la rejilla de medición:** poliimida
- **Resistencia nominal:** 120, 350, 700 y 1000 ohms
- **Rango de temperatura:** -200 °C... + 200 °C

En la Tabla 7 podremos evidenciar las características de las galgas extensométricas de Serie Y y Serie M.

³⁸ HBM. Galgas extensométricas HBM: ideales para mediciones de deformación. [En línea]. [consultado el 4 de septiembre de 2018]. Disponible en la web: < <https://www.hbm.com/es/0014/galgas-extensometricas/> >

³⁹ Ibíd 10.

Tabla 7. Características de las galgas extensométricas (serie Y y serie M)

Serie Y	Serie M
<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de tensiones estáticas y dinámicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de tensiones de materiales con alta resistencia a la fatiga.
<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones de desarrollo de equipos (Ej: en la industria aeroespacial o la de material deportivo).
<ul style="list-style-type: none"> • Son robustas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Admiten repeticiones de las medidas con frecuencias extremas.
<ul style="list-style-type: none"> • Puede instalarse sobre distintos materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de temperatura de - 200°C. a 300 °C.
<ul style="list-style-type: none"> • Más de 2000 de tipos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos niveles de deformación.

Fuente: HBM. Galgas extensométricas HBM: ideales para mediciones de deformación. [En línea]. [consultado el 5 de septiembre de 2018]. Disponible en la web: < <https://www.hbm.com/es/0014/galgas-extensometricas/> >

5.1.9 TECNOLOGÍA M.E.M.S.

“Los MEMS, también conocidos como microsistemas, son definidos típicamente como dispositivos microscópicos diseñados, fabricados, y utilizados para interactuar o producir cambios dentro de un ambiente controlado. Estos pequeños y más sofisticados dispositivos que piensan, actúan, miden y se comunican, están remplazando a los dispositivos actuales tradicionales en muchas aplicaciones”.⁴⁰

En la Tabla 8 se observan las técnicas de fabricación de dispositivos M.E.M.S. y su clasificación por el proceso de fabricación y sus aplicaciones dependiendo del tamaño de su espesor.

⁴⁰ MARQUEZ, David y CÁRDENAS, Oscar. Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos. En Revista Ciencia e Ingeniería. Red Universidad de Los Andes, 2006. Vol. 27, no. 3. Disponible en [ProQuest Ebook Central] < <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliuocatolicasp/detail.action?docID=3207299> >

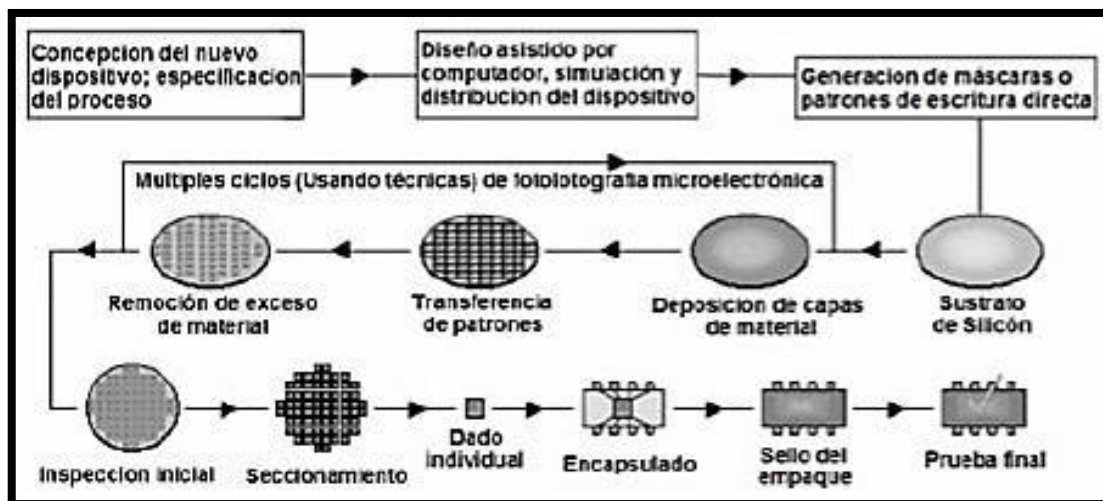
Tabla 8. Técnicas de fabricación de M.E.M.S.

MICRO MECANIZADO	PROCESO	APLICACIONES
Sustrato	Se "esculpe" el sustrato con ataques químicos selectivos.	Espesor ~100µm Microválvulas, bombas de fluido, Inyectores de tinta, Membranas.
Superficie	Se añaden materiales sobre la superficie del sustrato que son los que se "esculpen".	Espesor ~5-10µm Microespejos, Micromotores.
Alta relación de aspecto	Se realizan moldes con un sustrato que luego se rellenan con materiales (técnica LIGA). Resolución horizontal micrónica.	Espesor ~1 cm Sensores de gas, Acelerómetros, Microengranajes.

Fuente: MARQUEZ, David y CÁRDENAS, Oscar. Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos. En Revista Ciencia e Ingeniería. Red Universidad de Los Andes, 2006. Vol. 27, no. 3. Disponible en [ProQuest Ebook Central] < <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucatolicasp/detail.action?docID=3207299> >

En la Figura 17 se observan los pasos del proceso de microfabricación de dispositivos M.E.M.S.

Figura 17. Proceso de micro fabricación



Fuente: MARQUEZ, David y CÁRDENAS, Oscar. Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos. En Revista Ciencia e Ingeniería. Red Universidad de Los Andes, 2006. Vol. 27, no. 3. Disponible en [ProQuest Ebook Central] < <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucatolicasp/detail.action?docID=3207299> >

Los MEMS poseen una serie de ventajas frente a los sistemas de mayor tamaño, entre las cuales se encuentran: ⁴¹

- Posibilidad de fabricación masiva con bajo costo.
- Componentes más finos y delicados.
- Tamaño y peso reducido.
- Consumo de energía reducido.
- Alta precisión y biocompatibilidad.
- Partes mecánicas precisamente diseñadas, las cuales serán más eficientes y durables.
- Micro-materiales con propiedades que les permitan ser más fuertes y ligeros.
- Desarrollo de componentes electrónicos más rápidos, de mayor potencia y funcionalidad.
- Sistemas mecánicos y ópticos más rápidos y complejos.
- Mayor número de partes, mayor funcionalidad.
- Nuevos dispositivos ópto-electrónicos sobre la base de principios cuánticos.
- Aprovechamiento de reacciones químicas resultantes de "nuevas propiedades".
- Como es el reducir las dimensiones de trabajo (exposición de mayor número de electrones disponibles para la reacción).

De ese modo se puede observar algunas de las aplicaciones de la tecnología M.E.M.S. donde se destacan las aplicaciones a nivel aeronáutico y de defensa como:

“El sector aeronáutico se caracteriza por su necesidad de instrumentación y sistemas de medida precisos. Una gran variedad de microsistemas es integrada hoy en día en aplicaciones de aeronáutica. Entre ellos, cabe mencionar medidores de presión de aire, de aceleración, sensores de humedad, presión, gas, temperatura, estabilizadores, etc”. ⁴²

“En el sector aeroespacial, la micro tecnología es la clave en la fabricación de sistemas robustos, efectivos y miniaturizados para la exploración del espacio. Otras aplicaciones en el sector espacial son: microinstrumentos y microelectrónica para misiones espaciales, microhigrómetros, micromotores de propulsión, fotodetectores de infrarrojo, micro robots, etc”. ⁴³

⁴¹ Ibid., p. 112.

⁴² Ibid., p. 114.

⁴³ Ibid., p. 115.

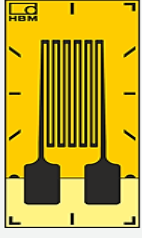
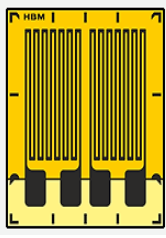
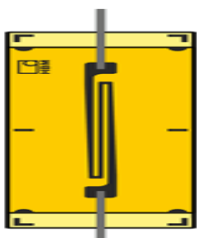
En la Tabla 9 se puede observar las respectivas características que brindan los distintos softwares propuestos en este anteproyecto de grado, para poder realizar la simulación.

Tabla 9. Características de los softwares

ANSYS ⁴⁴	COMSOL ⁴⁵
<ul style="list-style-type: none"> • Distribución de temperatura. • Se puede modelar con precisión una amplia gama de modelos de materiales. • Se puede agregar modelos de materiales definidos por el usuario si es necesario. • Análisis de elementos finitos (FEA) para el análisis estructural utilizando interfaz mecánica ANSYS. • Con Mechanical Enterprise puede modelar materiales avanzados. • La construcción de prototipos de modelos o la manipulación de la geometría durante los cambios de diseño es intuitiva y rápida. • El software ANSYS puede simular de forma única el rendimiento electromagnético en el diseño de componentes, circuitos y sistemas, y puede evaluar la temperatura, la vibración y otros efectos mecánicos críticos. • * Análisis térmicos y mecánicos para evaluar las estrategias de enfriamiento y analizar los efectos mecánicos críticos como ruido-vibración-asperidad (NVH). 	<ul style="list-style-type: none"> • Soporte extendido para paralelismo de memoria compartida: mallado, montaje, preconditionadores, multirejilla, producto de matrices dispersas <ul style="list-style-type: none"> • Solver segregado integrado • Método de mínimos cuadrados Galerkin (GLS) mejorado para difusión aerodinámica. • Soporte para restricciones puntuales no ideales. • Motor de modelado sólido interno mejorado. • *Mallado cuadrangular libre en caras 2D y 3D. <ul style="list-style-type: none"> • Mallado de capa límite. • Copia de mallas desde un contorno a otro. <ul style="list-style-type: none"> • Variables de distancia de contorno. • Herramientas para calcular volumen, área, centro de gravedad, momento de inercia, etc. • *Añadido el soporte para MATLAB versiones 7.4 (2007a) y 7.5 (2007b) • *Nuevo modelo: Solución de la ecuación de Boltzmann de dos términos para un plasma de oxígeno.

Fuente: Autoría propia

Tabla 10. Galgas extensométricas universales serie Y

GALGAS EXTENSOMÉTRICAS UNIVERSALES SERIE Y		
Lineal (1 rejilla) LY4	Doble lineal (2 rejillas) DY4	Lineal (1 rejilla) LY5
		

Fuente: HBM. Galgas extensométricas HBM: ideales para mediciones de deformación. [En línea]. [consultado el 23 de abril de 2018]. Disponible en la web: < <https://www.hbm.com/es/0014/galgas-extensometricas/> >

⁴⁴ ANSYS. Systems [En línea]. Ansys. (s, f). Disponible en la web: < <https://www.ansys.com/es-es/products/systems> >

⁴⁵ SOFTWARE SHOP. COMSOL Multiphysics [En línea]. Software Shop. (s, f). Disponible en la web: < <https://www.software-shop.com/producto/comsol-multiphysics> >

En la actualidad es posible encontrar una variedad de galgas extensométricas, con unas respectivas geometrías, las cuales tienen una serie de variedades en sus características, entre estas, las que se pueden observar en la Tabla 10.

5.1.10- CLASIFICACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES

Como se observa en la Tabla 11 los transductores aptos para la medida de fuerzas pueden clasificarse en los siguientes cuatro grupos: piezoeléctricos, piezorresistivos, LVDT y potenciométricos.

Tabla 11. tipos de transductores

GRUPO	DESCRIPCIÓN
Piezoeléctricos	Miden la fuerza aplicada directamente, suministrando una carga eléctrica proporcional a la deformación a la que están sometidos.
Piezorresistivos	Miden la deformación de un elemento elástico o la fuerza que tiene aplicada por variación de la resistencia de un elemento sensible solidario con él.
LVDT	Miden la deformación de un elemento elástico por variación de la inductancia mutua de un transformador lineal cuyo núcleo móvil.
Potenciométricos	Miden la deformación o la fuerza aplicada sobre un objeto por variación de la resistencia de un circuito potenciométrico cuyo cursor va unido con aquél.

Fuente: FERNÁNDEZ, Manés, et al. Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas. 1 Ed. Barcelona: Marcombo. 1998, 368 p.

De los cuatro tipos anteriores, el que más frecuentemente se utiliza para la medición de pares es el de tipo piezorresistivo. En este dispositivo, los elementos de medida suelen ser muelles que tienen acoplada una serie de galgas extensométricas cuya resistencia eléctrica varía cuando están sometidas a tracción o compresión.

6. OBJETIVOS

6.1 GENERAL

Diseñar galgas extensométricas lineales mediante el uso de tecnología MEMS para reducir el impacto de factores externos: Temperatura y Presión en dichos dispositivos.

6.2 ESPECÍFICOS

- Recopilar información sobre los fenómenos físicos – mecánicos de las galgas extensométricas lineales a escala micrométrica y a su vez los factores externos inmersos en su diseño.
- Evaluar diversas geometrías de diseño para las galgas extensométricas lineales.
- Calcular el comportamiento eléctrico y mecánico de los materiales utilizados en los sustratos: Papel e interconexiones: Plata y Grafeno para el diseño de la galga extensométrica lineal propuesta.
- Validar por medio de una herramienta de simulación, los cálculos eléctricos y mecánicos usando los factores externos: Temperatura y mecánicos: Presión a los que son sometidos las diversas geometrías de galgas extensométricas lineales.
- Analizar los datos obtenidos en el ambiente de simulación para la optimización del diseño de las galgas extensométricas lineales.

7. ALCANCES Y LIMITACIONES

7.1 ALCANCE

Dentro de los alcances que se pueden encontrar en este Trabajo de grado, se establece, el planteamiento de diversas geometrías de diseño de las galgas extensométricas lineales, la validación por medio de una herramienta de simulación de los cálculos eléctricos y mecánicos, usando los factores externos (temperatura) y mecánicos (presión) que afectan a las galgas extensométricas lineal.

Adicionalmente, la elaboración del diseño y simulación de galgas extensométricas lineales mediante el uso de tecnología M.E.M.S, en donde sean optimizados los parámetros y minimizados los impactos de los factores externos (Ej. temperatura), todo esto, por medio del software en el cual se podrá apreciar el comportamiento eléctrico de las galgas extensométricas lineales.

Por último, realizar el diseño de diversos prototipos (o geometrías) de galgas extensométricas lineales, mediante la utilización de un ambiente de simulación variando los materiales empleados, para obtener mediciones de los diferentes factores de galgas y así, poder compararlas entre ellas.

7.2. LIMITACIONES

Las limitaciones encontradas en este Trabajo de grado, giran en torno al Software seleccionado, debido a que este, puede generar todos los parámetros de diseño necesarios y los efectos mecánicos a los cuales van a ser sometidos los materiales o aleaciones para el diseño de galgas extensométricas lineales.

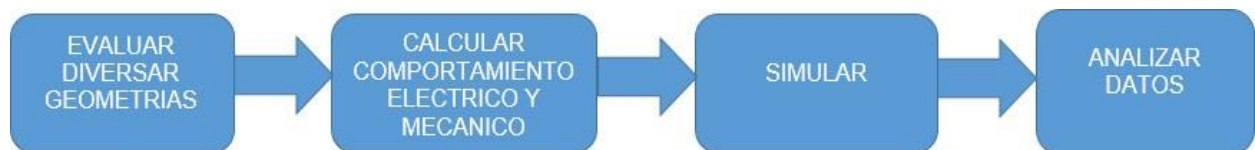
De igual forma, el equipo (ej. El computador) utilizado para tener acceso al software de simulación, debe tener unas determinadas especificaciones de procesamiento como: 16 GB de memoria RAM (mínimo), 4 a 12 núcleos físicos, entre otros. Sin dejar de lado, la dificultad para adquirir los materiales y la escasa información que se encuentra en el ámbito nacional, ya que no es un campo de estudio muy amplio en este país.

8. METODOLOGÍA

En esta sección se describen las etapas para llevar a cabo los objetivos establecidos, cada etapa tendrá una serie de actividades, las cuales serán importantes para el cumplimiento del mismo.

Cada etapa y actividad tendrá un tiempo establecido para la ejecución del mismo la cual esta descrita en la Figura 18.

Figura 18. Etapas de la metodología



Fuente: Autoría propia

8.1 Etapa 1. Recopilar información sobre los fenómenos físicos – mecánicos de las galgas extensométricas lineales a escala micrométrica y a su vez los factores externos inmersos en su diseño.

- Actividad 1.1: Se recurrirá a bases de datos como: ProQuest y ScienceDirect, también se obtendrá información de otras fuentes para obtener conocimientos de los materiales que se van a utilizar para el posterior diseño de la galga extensométrica lineal.
- Actividad 1.2: Entender como se ve afectada la galga extensométrica lineal sometida a los factores externos propuestos a escala micrométrica y conocer los fenómenos físicos – Mecánicos de las galgas extensométricas lineales.
- Actividad 1.3: Realizar el análisis de la información obtenida mediante el uso de software especializados como Vos Viewer y Vantage Point.

8.2 Etapa 2. Evaluar diversas geometrías de diseño para las galgas extensométricas lineales en cuestión.

- Actividad 2.1: Consultar en fuentes como base de datos los parámetros a tener en cuenta para realizar el diseño del respectivo sensor.

- Actividad 2.2: Implementación de la tecnología M.E.M.S para el diseño de la galga extensométricas lineales.
- Actividad 2.3: Realizar el diseño de las galgas extensométricas lineal miniaturizando sus dimensiones en tamaños de micras.

8.3 Etapa 3. Calcular el comportamiento eléctrico y mecánico de los materiales utilizados en los sustratos (ej. Papel) e interconexiones (ej. plata o grafeno) para el diseño de la galga extensométrica lineales propuesta.

- Actividad 3.1: Seleccionar los materiales a ser usados en el sustrato (ej. Papel) e interconexiones (ej. Plata o grafeno).
- Actividad 3.2: Analizar el comportamiento eléctrico y mecánico de los materiales variando el diseño de las galgas extensométricas lineales.
- Actividad 3.3: Realizar el cálculo del comportamiento eléctrico y mecánico de dichos materiales utilizados en el diseño de galgas extensométricas lineales.

8.4 Etapa 4. Validar por medio de una herramienta de simulación, los cálculos eléctricos y mecánicos usando los factores externos (Temperatura) y mecánicos (Presión) a los que son sometidos las diversas geometrías de galgas extensométricas lineales.

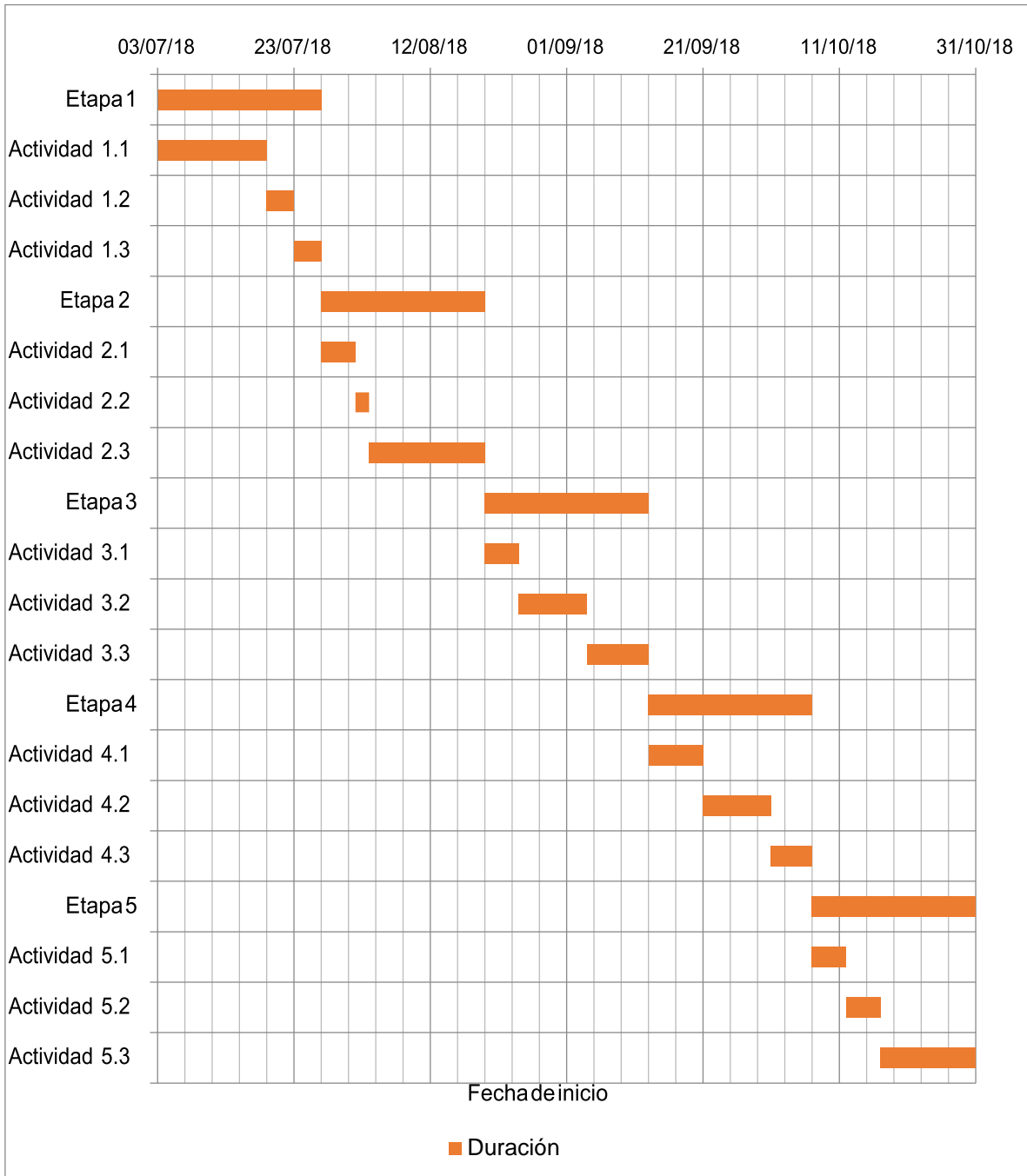
- Actividad 4.1: Seleccionar el software que mejor se adapte a las necesidades para la realización de dicha simulación.
- Actividad 4.2: Simular los efectos mecánicos los cuales van a hacer sometidas las galgas extensométricas lineales.
- Actividad 4.3: Mediante el software seleccionado, observar qué comportamientos eléctricos y mecánicos tienen las galgas extensométricas lineales.

8.5 Etapa 5. Analizar los datos obtenidos en el ambiente de simulación para la optimización del diseño de las galgas extensométricas lineales.

- Actividad 5.1: Obtención de datos de la galga extensométrica lineal.
- Actividad 5.2: Sacar conclusiones de los datos obtenidos.
- Actividad 5.3: Conocer cómo podemos mejorar el resultado de la galga extensométrica lineal.

9. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Figura 19. Cronograma



Fuente: Autoría propia

10. PRODUCTOS A ENTREGAR

Productos A Entregar		
Tipo	Nombre del producto	Fecha de entrega
Documento	Documento proyecto de grado	05/11 /2018

11. INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO

- Instalaciones de la Universidad Católica de Colombia.
- Instalaciones de Universidades Externas.
- Simulador virtual para dispositivos M.E.M.S. (Comsol)
- Software de análisis de información de bases de datos (Vos Viewer 1.6.8. y Vantage Point).

12. ANALISIS DE RESULTADOS

12.1 RECOPIRAR INFORMACIÓN SOBRE LOS FENÓMENOS FÍSICOS – MECÁNICOS DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES A ESCALA MICROMÉTRICA Y A SU VEZ LOS FACTORES EXTERNOS INMERSOS EN SU DISEÑO.

A lo largo de este capítulo se realizará la recopilación de información relacionada con los fenómenos físico–mecánicos de las galgas extensométricas. Ahora bien, para poder llevar a cabo esto, se hizo una consulta de información en las bases de datos ScienceDirect y Proquest (con una cantidad de 500 datos en formato ".ris"), para así, poder crear el análisis en los software Vosviewer y VantagePoint. Donde, la información obtenida se genera por medio de una ecuación de búsqueda que arroja variables, factores, materiales, entre otras, relacionadas con las galgas extensométricas frente a versiones anteriores de dichas ecuaciones.

Dentro de los resultados arrojados en la consulta utilizando la ecuación de búsqueda, se encuentran las bases de este Trabajo de grado, debido a que se evidencian las tendencias en las galgas extensométricas lineales y, se puede trabajar con base a la información de materiales que están siendo usados en mayor cantidad actualmente, mayores puntos de estudio en este tema, variables a ser analizadas, entre otras.

Dado esto, en la base de datos ScienceDirect se puede evidenciar que no se encuentra la opción de afiliaciones y "afiliaciones country", a diferencia de la base de datos Proquest, donde si se tienen dichas opciones. Estas, resultan muy importantes para realizar un mejor análisis respecto a las publicaciones que se están haciendo mediante afiliaciones, y estas pueden ser clasificadas en afiliaciones por ciudades.

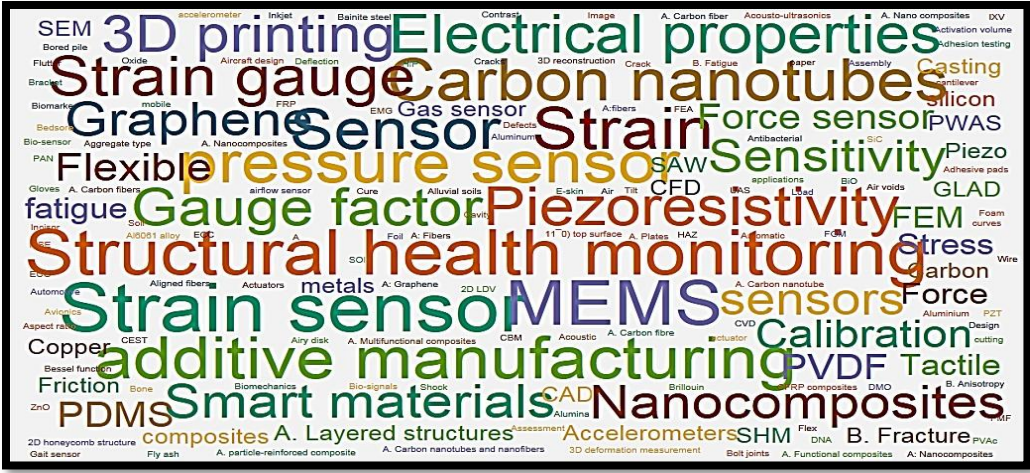
A continuación, es posible ver la ecuación de búsqueda, planteada para realizar la investigación en la base de datos Proquest y ScienceDirect, donde se obtuvieron resultados importantes como materiales, geometrías y parámetros mecánicos, entre otros, de las galgas extensométricas lineales.

- **Ecuación de búsqueda:** (strain gauge) AND (micro sensor OR micro transducer) AND (design OR manufacturing) AND (paper OR copper OR silver OR carbon) AND (linear OR double linear).

En las Figura 20 de la base de datos ScienceDirect y figura 21 de Proquest, se podrá encontrar la variable "keywords", que son de mayor tendencia en publicaciones frente a la ecuación planteada anteriormente, recopilando información importante en los conceptos, propiedades, dimensiones, materiales, variables físicas, entre otras, de las galgas extensométricas lineales.

Por ello, resultan relevantes en la selección de información que se debe tener en cuenta al momento de hacer un estudio detallado de las galgas extensométricas lineales, desde lo más básico (conocimiento general de las galgas extensométricas lineales) hasta lo más complejo (entendimiento del funcionamiento de las galgas extensométricas lineales con sus modelos matemáticos y afectaciones de los factores externos), y con ello obtener una mayor percepción frente a las galgas extensométricas lineales.

Figura 20. ScienceDirect mapa de palabras



Fuente: Autoría propia

En la Figura 20 se encuentran palabras como: piezorresistividad, M.E.M.S. y sensor de presión, las cuales se encuentran dentro del objetivo de este Trabajo de grado, asimismo, se evidencian materiales como carbono, papel y metales, que van a ser implementados dentro del mismo. Por otra parte, se observan las variables GF (Gauge Factor), propiedades eléctricas, sensibilidad, fatiga, y fuerza, que se han venido trabajando a lo largo de esta investigación (se encuentran con un buen tamaño de letra, lo que indica que son tendencias de investigación).

Figura 21. Proquest mapa de preguntas



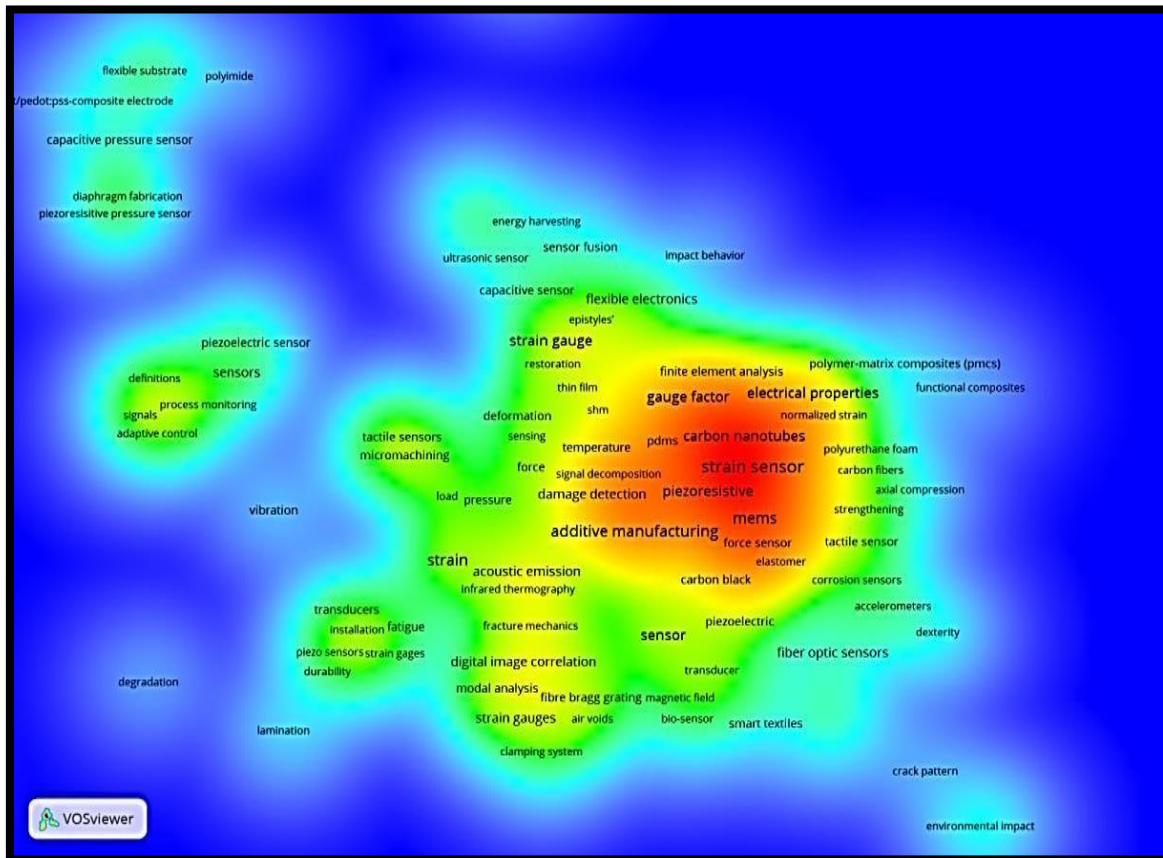
Fuente: Autoría propia

En la Figura 21 se encuentran palabras como sensor, medidor de tensión y diseño, que son base de esta investigación, además presión y temperatura, variables trabajadas como factores externos. De la misma forma, se encuentran materiales como, plata y grafeno que también van a ser implementados dentro de este Proyecto de grado.

Desde otra perspectiva, se encontrará en las Figuras 22 de ScienceDirect y 23 de Proquest, los keywords con mayor tendencia frente a publicaciones (color rojo). Por lo que se puede, evidenciar una relación entre las dos bases de datos, por medio de los mapas de calor, donde se encuentran parámetros o variables que resultan importantes para el desarrollo de la investigación.

Ahora bien, cabe resaltar que en los keywords como: gauge factor, propiedades mecánicas, deformación, geometría, temperatura y presión (Factores Externos), entre otros, también son tenidas en cuenta en esta investigación, para poder obtener un óptimo diseño de las galgas extensométricas lineales.

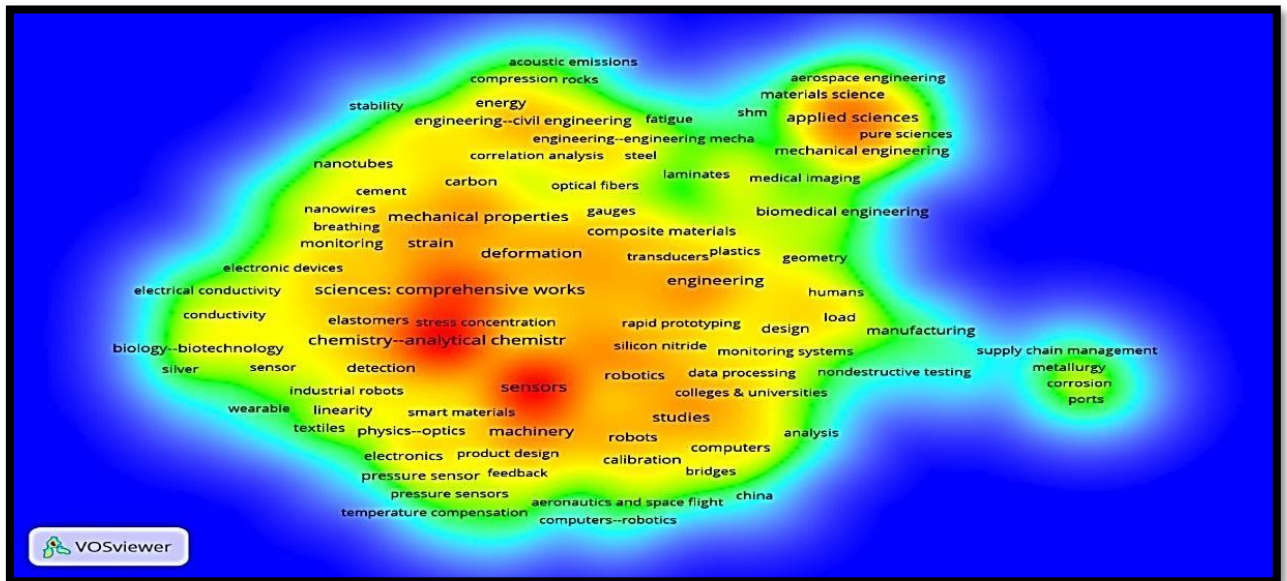
Figura 22. ScienceDirect mapa de calor



Fuente: Autoría propia

En la Figura 22 son evidentes las variables sensor de tensión, piezorresistividad, M.E.M.S., temperatura, GF, propiedades eléctricas, sensor de fuerza y carbono (grafeno), como unas de las más trabajadas, debido a su tamaño de letra. Al mismo tiempo que, al estar en la zona roja del mapa de calor se puede concluir que son una tendencia y, debido a esto, son tenidas en cuenta en esta investigación.

Figura 23. Proquest mapa de calor



Fuente: Autoría propia

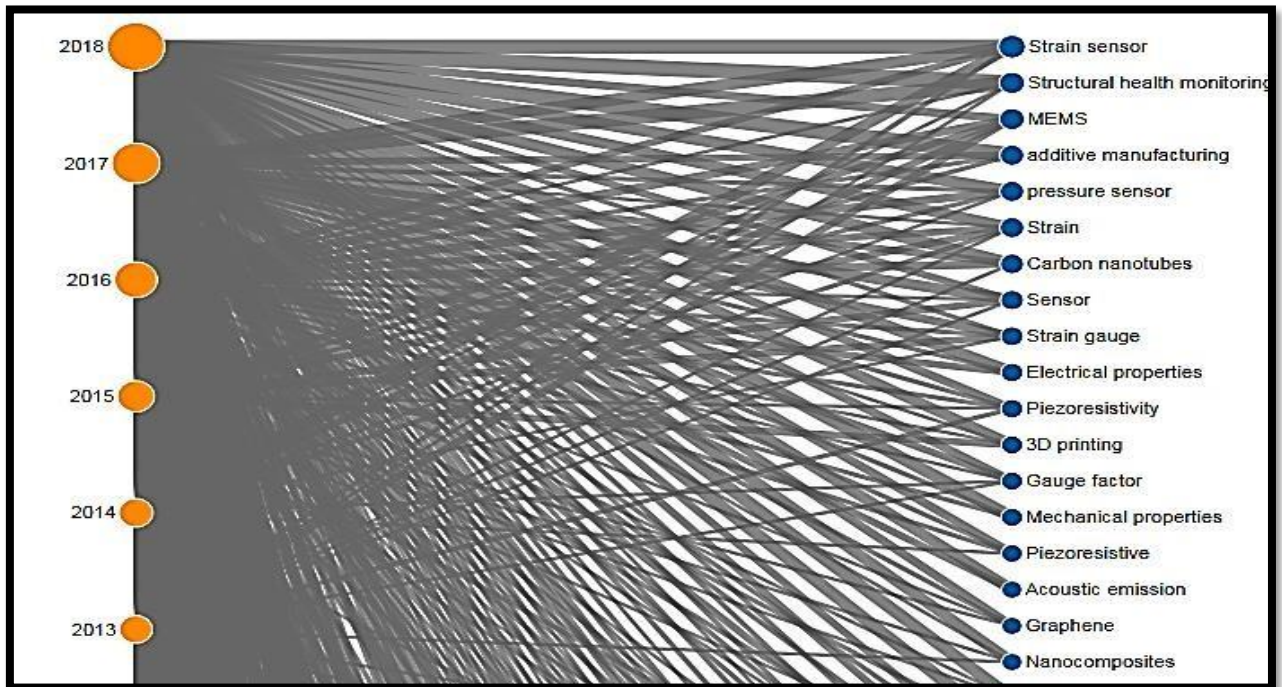
En la Figura 23 se encuentran las palabras sensores, carbono (Grafeno), deformación, diseño, geometrías, transductores, plata y sensores de presión, todas estas, muy cercanas a las zonas rojas del mapa de calor, lo que implica que son una tendencia de investigación en esta base de datos y debido a esto fueron trabajadas a lo largo de esta investigación.

Por otra parte, algo que se puede resaltar son las palabras claves o keywords con mayor tendencia en los últimos años, que resulta de gran importancia para conocer los distintos materiales, parámetros, sustratos, variables físicas, fenómenos físicos y mecánicos, entre otros. Ver figuras 24 y 25.

La figura 24 es de información extraída de la base de datos de ScienceDirect y analizado por el Software Vantage Point y en la imagen 25 se exportó la información de la base de datos Proquest, pero se realizó el respectivo análisis con el Software Vosviewer.

En la figura 24 se evidencia keywords que tienen una mayor tendencia frente a una ventana de tiempo de 2013-2018 y en la figura 25 se visualiza una ventana de tiempo del 2015 -2018 y, se observa que las palabras con mayor número de citas no son las más recientes. Por otro lado, la palabra sensor de presión aparece como una de las más recientes al estar dentro del año 2018 y con mayor número de citas.

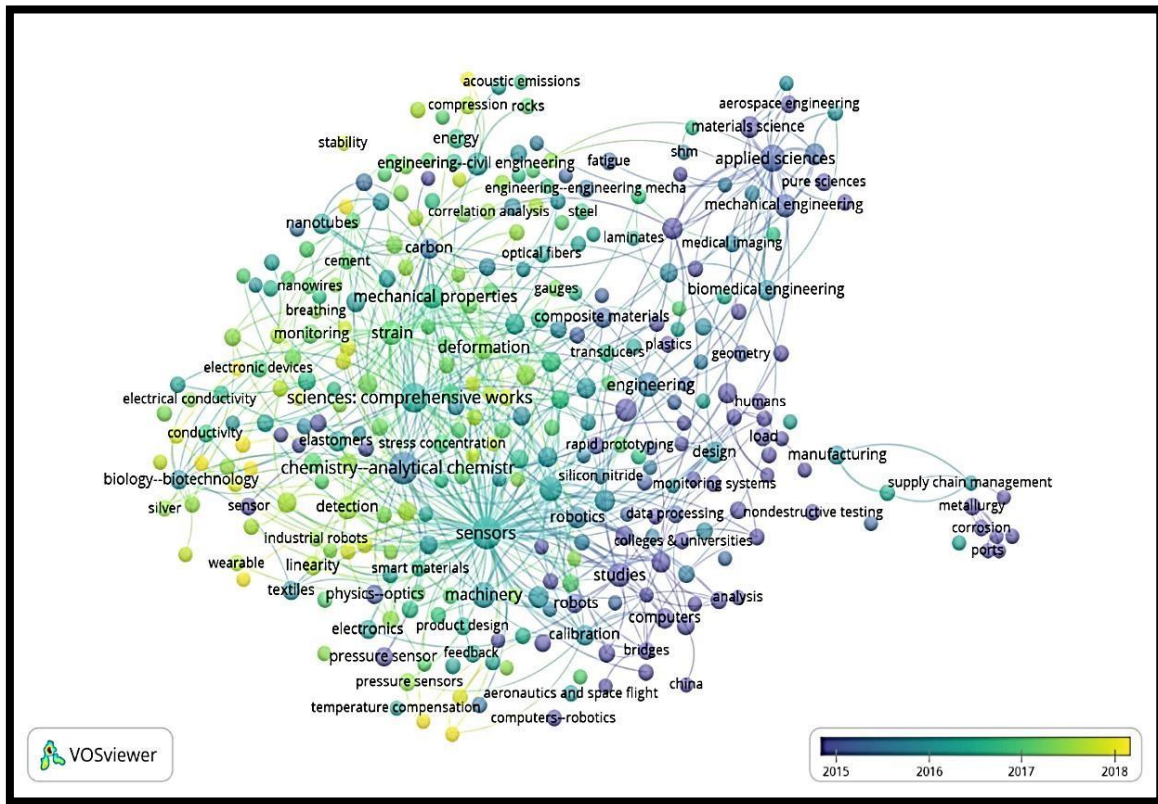
Figura 24. Vantage point años de publicación v keywords



Fuente: Autoría propia

En la Figura 24 se encuentran las palabras sensor de presión, M.E.M.S., piezorresistividad y GF temas tendencia trabajados durante los años 2013 al 2018, lo cual soporta la investigación en cuanto a tendencia y años recientes de trabajo de estos temas trabajados a lo largo de este Trabajo de grado.

Figura 25. Vosviewer keywords vs año de publicación.



Fuente: Autoría propia

En la Figura 25 aparecen las palabras sensor de presión, el cual es el objeto de estudio, de la misma manera, aparecen los materiales plata y carbono (Grafeo); las variables temperatura y presión, que son trabajados como factores externos. Todas estas, con años de estudio entre 2017 y 2018 que indica que son temas trabajados recientemente y son tendencia en esta base de datos.

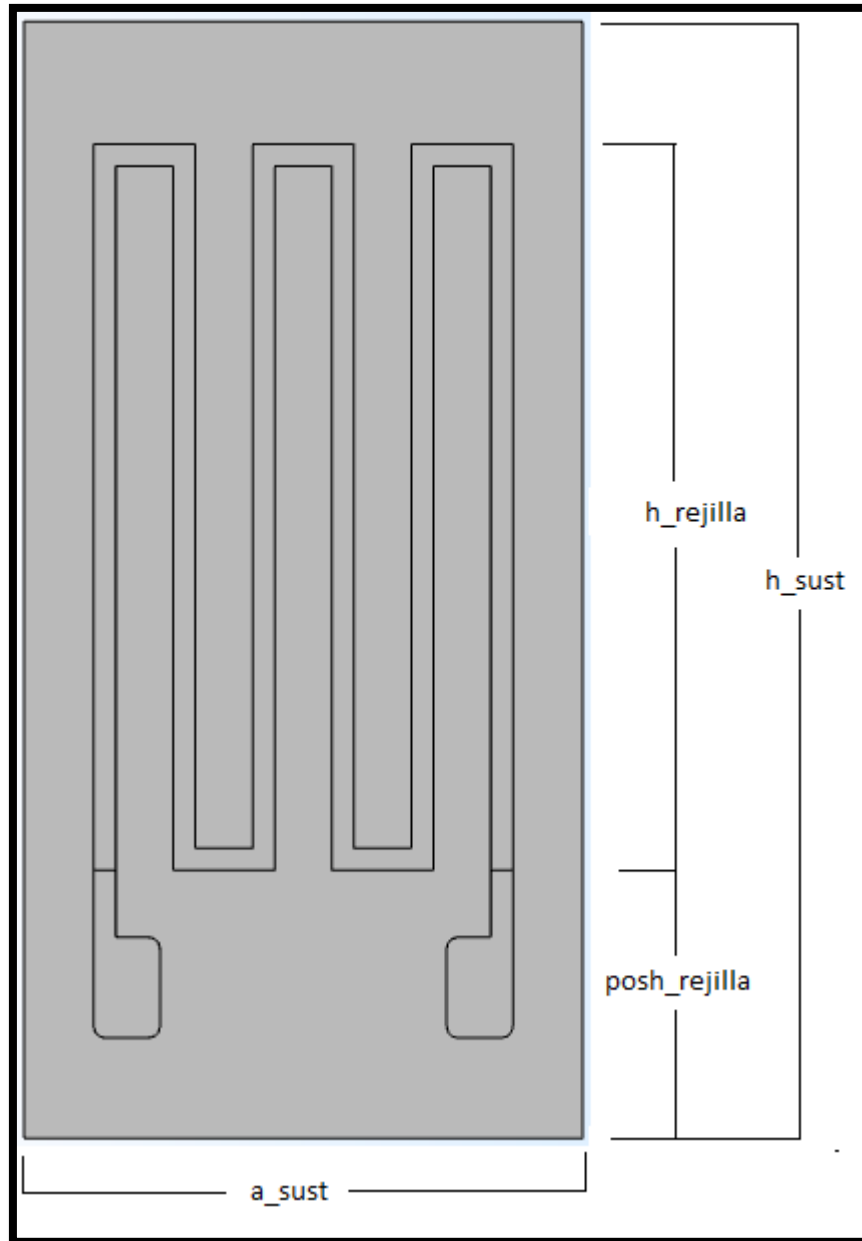
Teniendo presente lo anterior, es importante resaltar que toda la recopilación de información frente a las tendencias de los últimos años y las palabras claves o keywords, son fundamentales para poder conocer qué materiales, sustratos, variables físicas, fenómenos, entre otros, son los de mayor importancia al momento de diseñar y miniaturizar las galgas extensométricas.

Al tiempo que, se pudo verificar que toda la información contenida en el presente Proyecto de Grado, tiene relación con lo obtenido en los Software Vosviewer y Vantage Point de las bases de datos Proquest y ScienceDirect, y que son de gran importancia al momento de realizar un estudio de las galgas extensométricas, así como entender el comportamiento de las mismas.

Para obtener el análisis completo de la búsqueda visitar anexo A.

12.2 EVALUAR DIVERSAS GEOMETRÍAS DE DISEÑO PARA LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES EN CUESTIÓN.

Figura 26. Partes de una galga extensométrica lineal



Fuente: Autoría propia

En la Figura 26, se pueden observar las partes respectivas de una galga extensométrica lineal. En la Tabla 12, se puede apreciar los datos de las dimensiones de la Galga Extensométrica de los respectivos diseños.

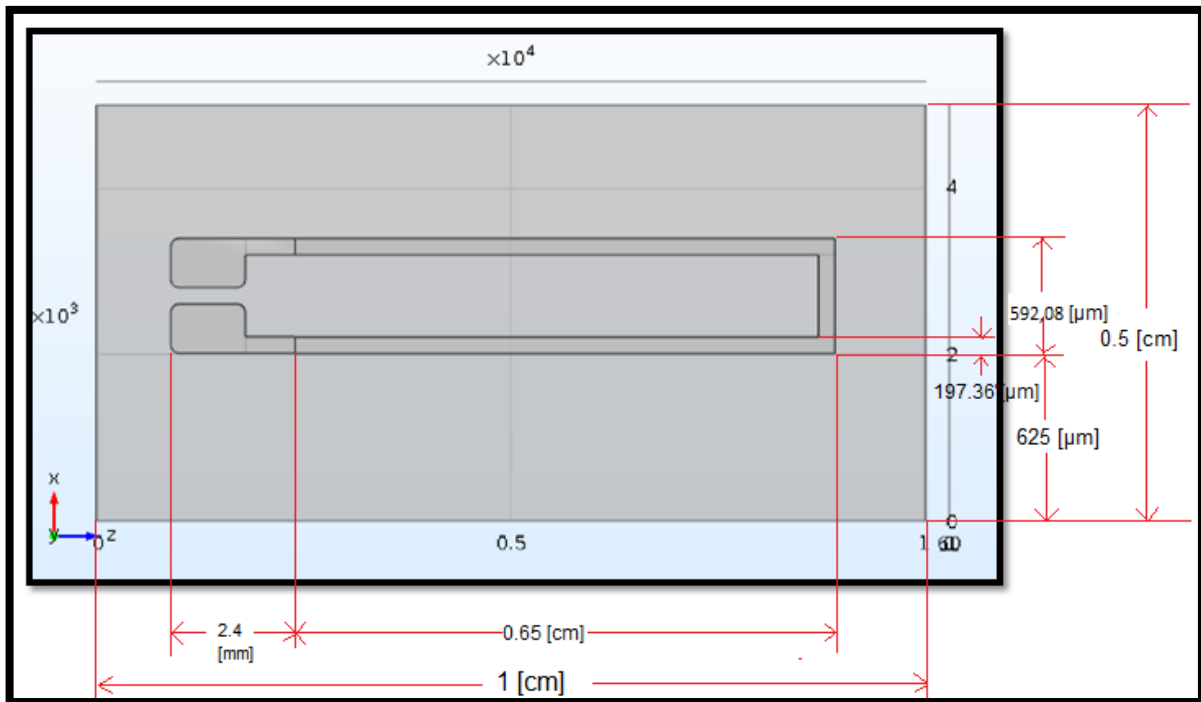
Tabla 12. Parámetros de las geometrías

Nombre	Expresión	Descripción
h_sust	1 [cm]	Altura del sustrato
a_sust	0.5 [cm]	Ancho del sustrato
p_sust	50 [μm]	Profundidad del sustrato
h_rejilla	0.65 [cm]	Altura de rejilla
a_rejilla	197.36 [μm]	Ancho de rejilla
p_rejilla	50 [μm]	Profundidad de rejilla
posh_rejilla	2.4 [mm]	Posición de rejilla
d_rejilla	625 [μm]	Distancia de rejilla
a_electrodo	300 [μm]	Ancho de electrodo

Fuente: Autoría propia.

En la Figura 27 se observan las medidas de la geometría con un meandro de bordes cuadrados.

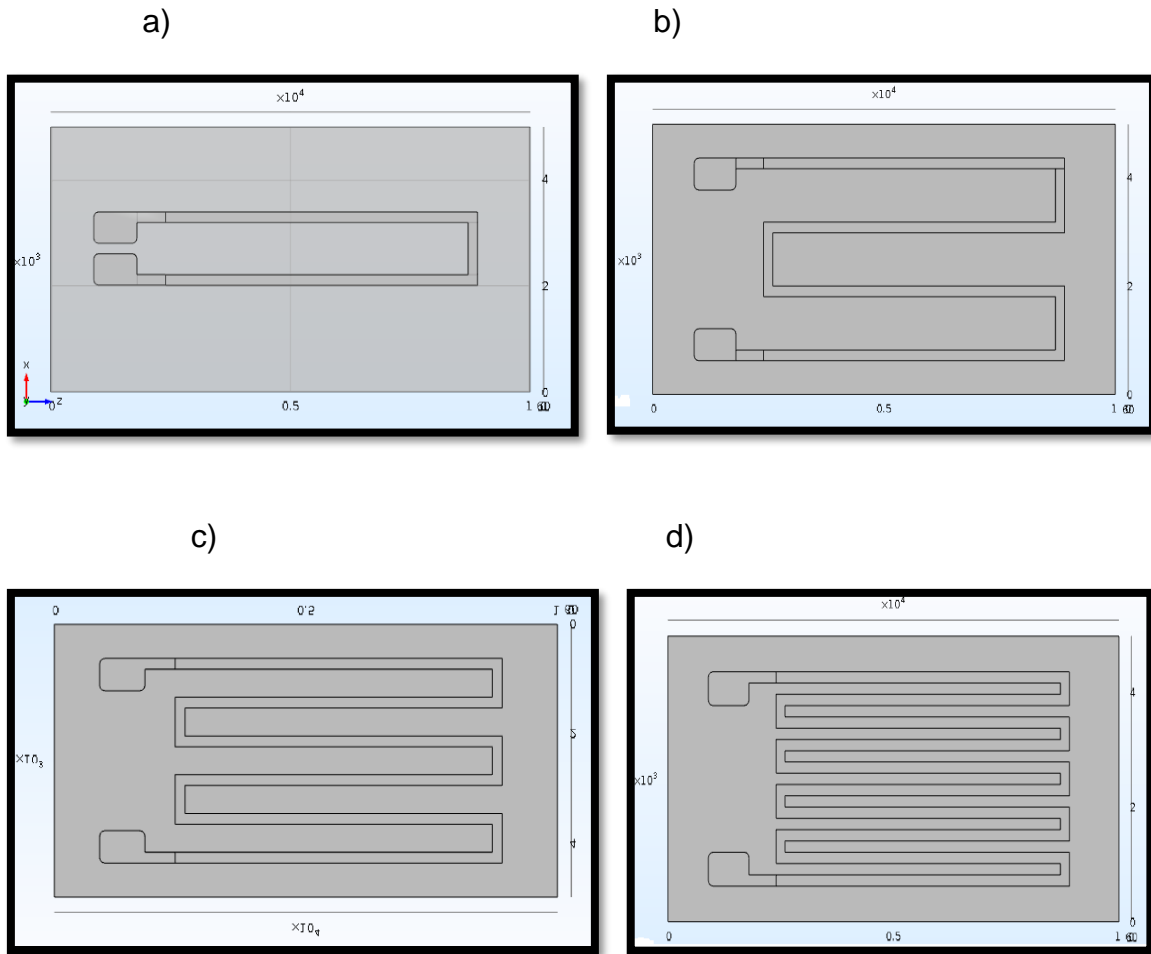
Figura 27. Medidas acotadas de una galga extensométrica lineal de 1 meandro



Fuente: Autoría propia.

En las Figuras 28 y 29 se encuentran los diseños de geometrías de galgas extensométricas lineales con 1,2,3 y 5 meandros con bordes cuadrados y redondos ubicada sobre un sustrato rectangular.

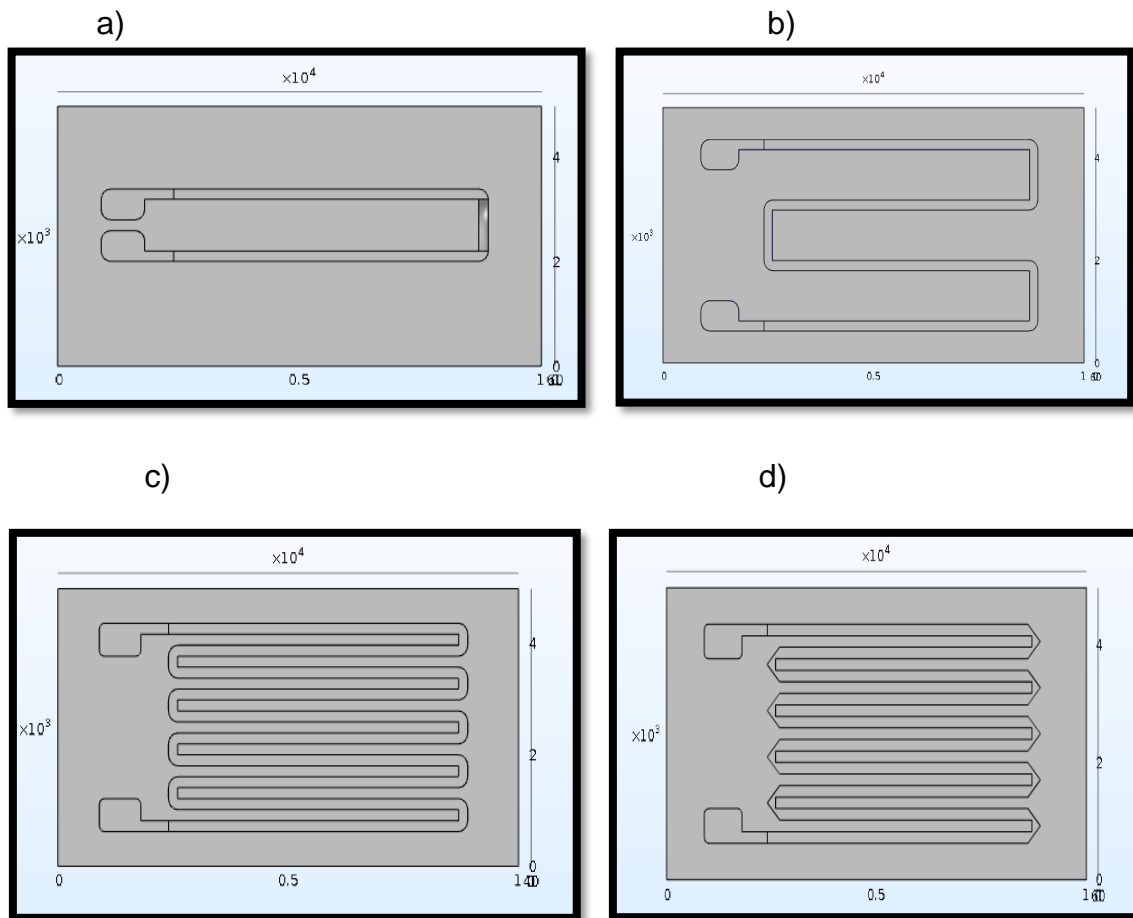
Figura 28 . Diseños de geometrías de galgas extensométricas lineales con 1,2,3 y 5 meandros con bordes cuadrados



Fuente: Autoría propia.

En la figura 28 se observan los diseños con geometrías de 1,2,3 y 5 meandros con bordes cuadrados y sobre un sustrato rectangular los cuales van a ser trabajados y simulados a lo largo del documento, estas geometrías fueron tomadas de los diseños de las galgas extensométricas lineales ilustrados en la Tabla 10.

Figura 29. Diseños de geometrías de galgas extensométricas lineales con 1,2,3 y 5 meandros con bordes redondos y 5 meandros con bordes triangulares



Fuente: Autoría propia.

En la Figura 29 se observan los diseños con geometrías de 1,2,3 y 5 meandros con bordes redondos y 5 meandros triangulares sobre un sustrato rectangular los cuales van a ser trabajados y simulados a lo largo del documento, estas geometrías fueron tomadas y modificadas de los diseños de las galgas extensométricas lineales ilustrados en la Tabla 10.

12.3 CALCULAR EL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO Y MECÁNICO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS SUSTRATOS (EJ. PAPEL) E INTERCONEXIONES (EJ. PLATA O GRAFENO) PARA EL DISEÑO DE LA GALGA EXTENSOMÉTRICA LINEALES PROPUESTA.

Al momento de analizar el comportamiento eléctrico de una galga extensométrica lineal se debe analizar cómo es la variación en su resistencia eléctrica dependiendo de las variaciones de longitud del conductor ya que es el principio de funcionamiento de ese transductor.

En la ecuación 6 se muestra la forma de calcular la variación de la resistencia eléctrica en el conductor de la galga extensométrica lineal. En la Tabla 13 se muestran los valores de resistividad de materiales a 20 °C como la plata o el carbono (Grafeno) en ($\Omega \cdot m$).

Tabla 13. resistividad de los materiales

Material	Resistividad a 20 °C ($\Omega \cdot m$)
Plata	$1,59 \times 10^{-8}$
Grafeno	$1,00 \times 10^{-8}$

Fuente: Autoría propia

Ec 10. Ecuación para calcular el Área:

$$A = L * L$$

Donde:

L = Lado (m).

L = Lado(m).

En la Tabla 14 se realizó el cálculo del área de las tres figuras que conforman a la geometría de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados.

Tabla 14. Calculo del área.

Area	A (m ²)
F. Largas (2)	6,470832E-6
F. Cortas (1)	2,736104E-7
Total	6,744442E-6

Fuente: Autoría propia

Se realizó el cálculo del área total de la geometría de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados obteniendo $A_{total(m)} = 1,38E-10$

En la Tabla 15 se realizó el cálculo de la variación de la resistencia eléctrica de la geometría de 1 meandro con bordes cuadrados con plata o grafeno y cambiando la variación en la longitud del conductor.

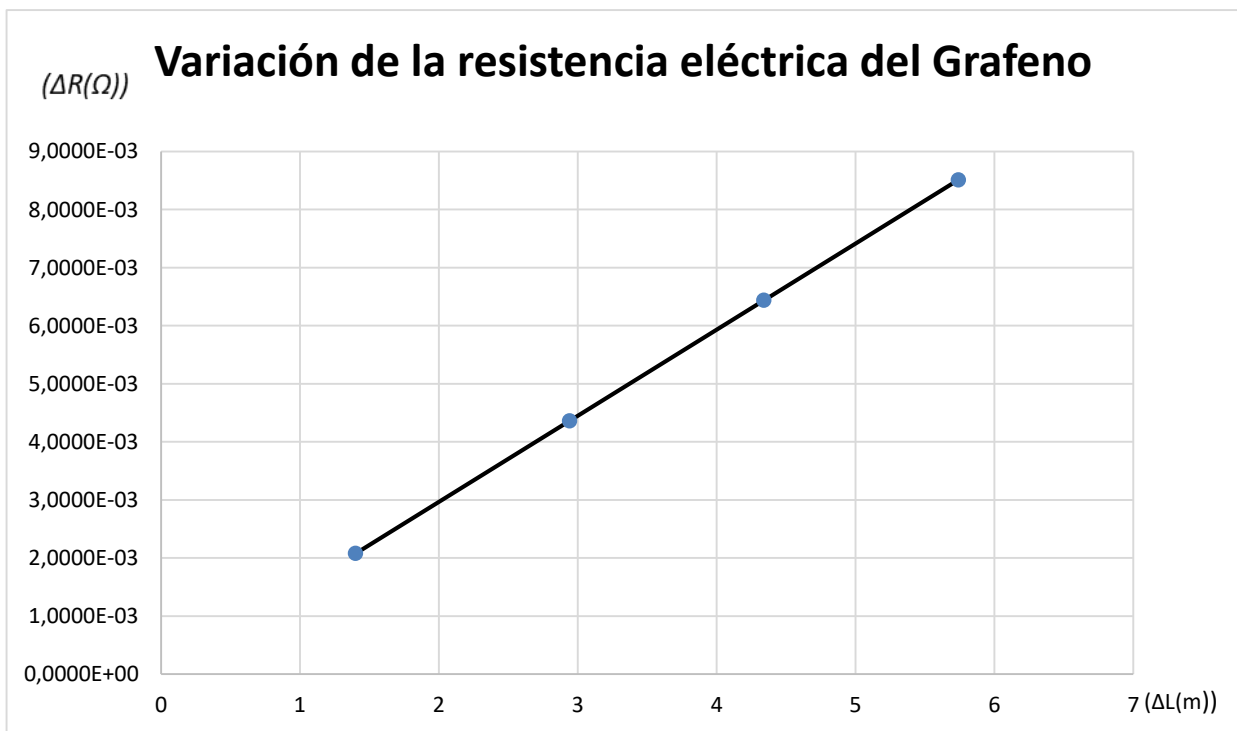
Tabla 15. Variación de la resistencia eléctrica

Grafeno	Plata	Grafeno	$\Delta L(m)$ Gr	$\Delta L(m)$ PI
ΔR	1,0562E-03	2,0758E-03	1,4	0,448
ΔR	2,2113E-03	4,3591E-03	2,94	0,938
ΔR	3,2345E-03	6,4349E-03	4,34	1,372
ΔR	4,2906E-03	8,5107E-03	5,74	1,82

Fuente: Autoría propia

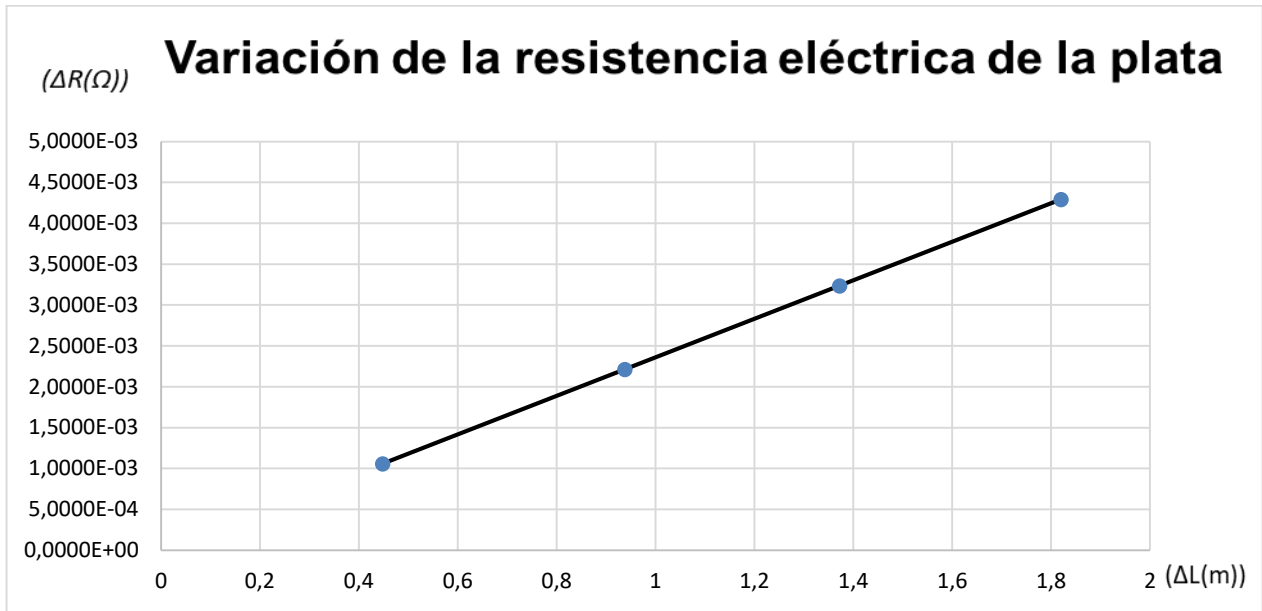
En las Figuras 30 y 31 se puede observar la gráfica Variación de la resistencia eléctrica del Grafeno y la plata en la cual se encuentra como es la variación de la resistencia de este material en función de la variación de la longitud.

Figura 30. Variación de la resistencia eléctrica del carbono (Grafeno)



Fuente: Autoría propia

Figura 31. Variación de la resistencia eléctrica de la plata



Fuente: Autoría propia.

En la figura 30 y 31 se puede evidenciar en el grafeno un valor cercano a los Mega ohmios y de Kilo ohmios en cuanto a la plata esto en su resistividad. En la ecuación 7 se observa cómo realizar el cálculo matemático del factor de galga de las galgas extensométricas lineales.

En la Tabla 16 se observan los cálculos de la longitud de cada una de las figuras que conforman el conductor de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados y al final se tiene la longitud total del conductor.

Tabla 16. Longitud

Longitud	Fig_1	Fig_2	Fig_3	L total
L(m)	0,0065	9,87E-04	0,0065	1,40E-02

Fuente: Autoría propia

En la tabla 17 se encuentran los cálculos del gauge factor de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados, con material de conductor de plata y de grafeno para diversas variaciones de longitud de la galga.

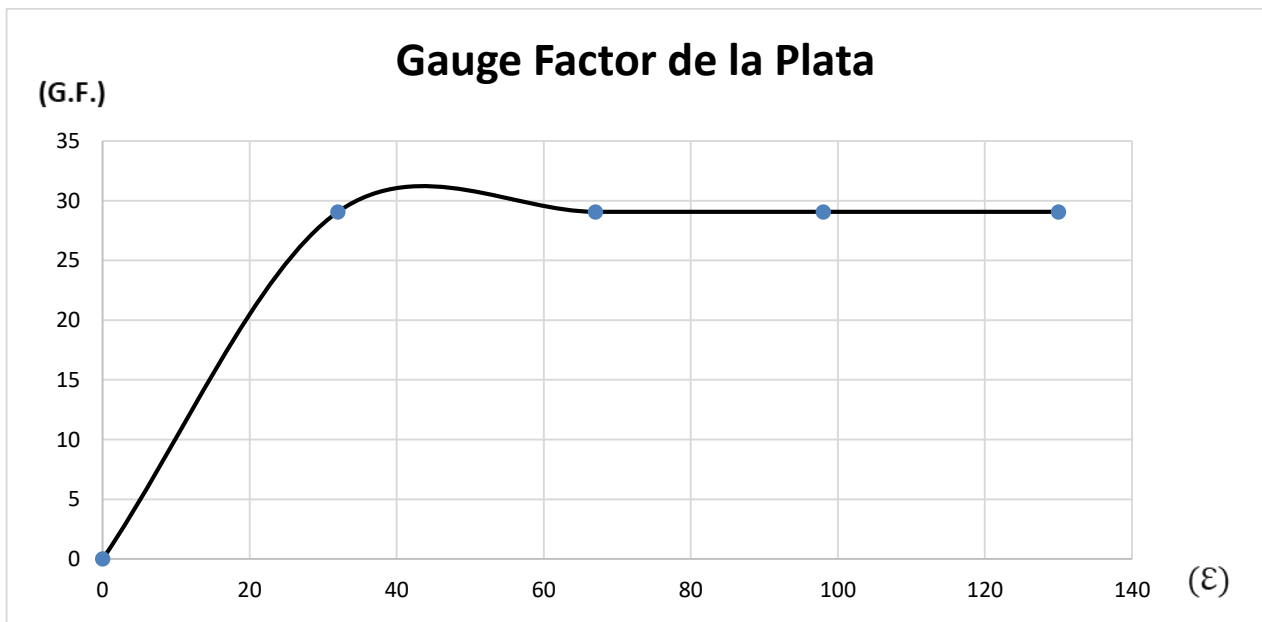
Tabla 17. Gauge Factor (GF)

$GF=(\Delta R/R_g)/(\Delta L/L)$	Plata	Grafeno	E (Gr)	E (Pl)
GF	0	0	0	0
GF	29,0610	29,0610	100	32
GF	29,0610	29,0610	210	67
GF	29,0610	29,0610	310	98
GF	29,0610	29,0610	410	130

Fuente: Autoría propia

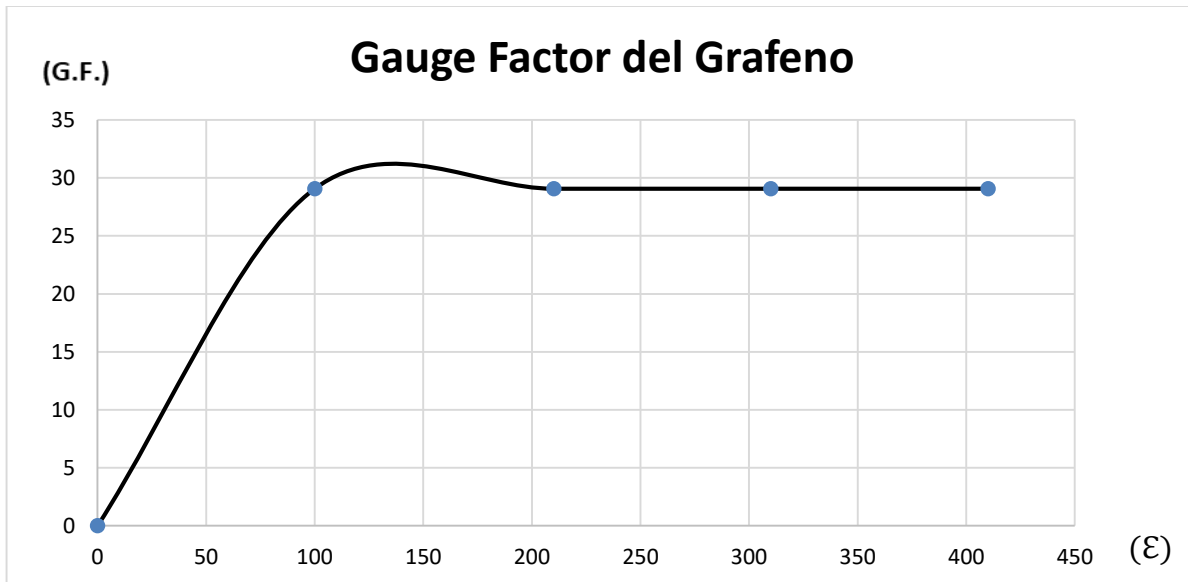
En las Figuras 32 y 33 se observa el gauge factor de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con conductor de plata y grafeno con su variación debido a los cambios en la longitud de la galga.

Figura 32. Gauge factor de la plata



Fuente: Autoría propia.

Figura 33. Gauge factor del carbono(Grafeno)



Fuente: Autoría propia

La ecuación 8 fue usada para calcular la deformación unitaria de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados los resultados obtenidos son ilustrados en la tabla 18 esto dependiendo de la variación en la longitud y la longitud inicial. En la tabla 18 se observan los valores obtenidos de forma teórica para la deformación unitaria de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados.

Tabla 18. Deformación Unitaria

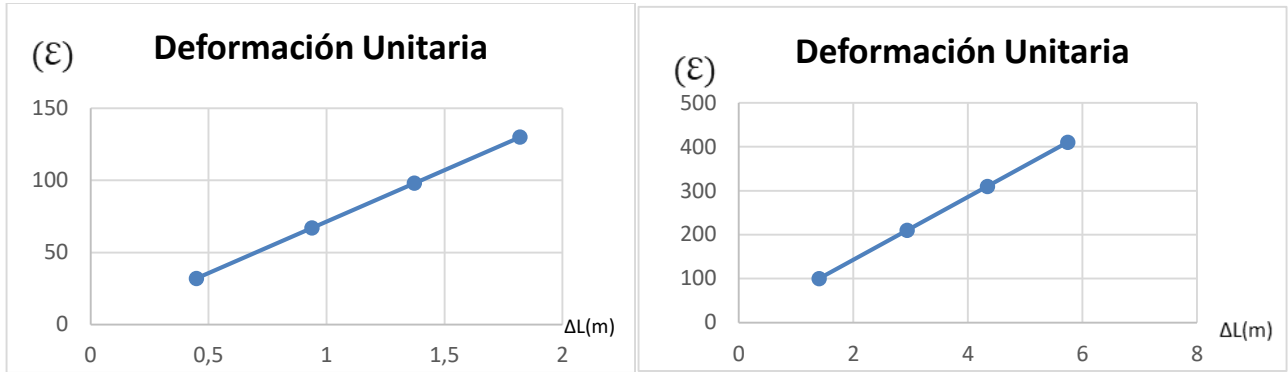
$\Delta L(m)$ PI	$E=\Delta L/L$ (PI)
0,448	32
0,938	67
1,372	98
1,82	130

$\Delta L(m)$ Gr	$E=\Delta L/L$ (Gr)
1,4	100
2,94	210
4,34	310
5,74	410

Fuente: Autoría propia

En la Figura 34 se muestra gráficamente la deformación unitaria y cómo cambia a medida que se modifica la variación en la longitud.

Figura 34. Deformación Unitaria



Fuente: Autoría propia

La ecuación 9 fue usada para realizar los cálculos del módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados las fuerzas aplicadas se observan en la tabla 19. En la tabla 19 se observan las fuerzas aplicadas a la galga extensométrica lineal.

Tabla 19. Fuerza aplicada a la galga extensométrica lineal

F(N)
2
4
6
8

Fuente: Autoría propia

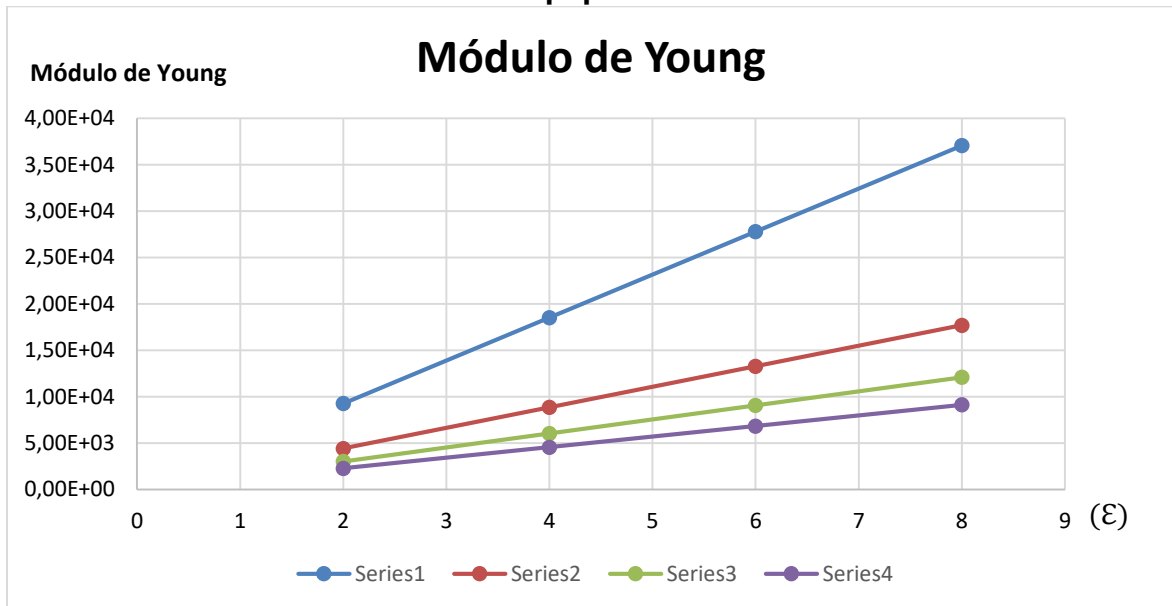
En la Tabla 20 se observan los valores del módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados en la cual se varió la fuerza aplicada con 2,4,6 y 8 N y también la deformación unitaria los resultados se ilustran en la figura 35.

Tabla 20. módulo de Young de la galga extensométrica lineal

$\begin{matrix} f(N) \\ E(m) \end{matrix}$	2	4	6	8
32	9,27E+03	1,85E+04	2,78E+04	3,71E+04
67	4,43E+03	8,85E+03	1,33E+04	1,77E+04
98	3,03E+03	6,05E+03	9,08E+03	1,21E+04
130	2,28E+03	4,56E+03	6,84E+03	9,12E+03

Fuente: Autoría propia

Figura 35. Módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados con sustrato de papel.



Fuente: Autoría propia.

Cada serie es descrita a continuación:

- Serie 1 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon=32$
- Serie 2 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon=67$
- Serie 3 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon=98$
- Serie 4 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon=130$

En la Figura 35 se observa de manera gráfica el módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados el cual se halló mediante una fuerza de 2,4,6 y 8 N sobre el área total de la galga extensométrica lineal y esto conforme a las variaciones de la deformación unitaria encontradas anteriormente.

12.3.1 CALCULOS DE LAS VARIABLES ELECTRICAS Y MECANICAS PARA LA GALGA EXTENSOMÉTRICA LINEAL DE 3 MEANDROS CON BORDES CUADRADOS.

Se realizó el cálculo de las variables eléctricas y mecánicas para la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados. Mediante el uso de la ecuación 6 se calcula la variación de la resistencia eléctrica. En la Tabla 21 se muestran los valores de resistividad de materiales a 20 °C como la plata o el carbono (Grafeno) en ($\Omega \cdot m$).

Tabla 21. resistividad de los materiales

Material	Resistividad a 20 °C ($\Omega \cdot m$)
Plata	$1,59 \times 10^{-8}$
Grafeno	$1,00 \times 10^{-8}$

Fuente: Autoría propia

Usando la ecuación 10 se realizó el cálculo del área total de la galga extensométrica lineal. En la tabla 22 se realizó el cálculo del área de las tres figuras que conforman a la geometría de la galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados.

Tabla 22. Calculo del área

Figura	Área
F. Largas (6)	$1,9412 \times 10^{-5}$
F. Cortas (5)	$1,3680 \times 10^{-6}$
Área total	$2,078054 \times 10^{-5}$

Fuente: Autoría propia.

En la Tabla 23 se realizó el cálculo de la variación de la resistencia eléctrica de la geometría de 3 meandros con bordes cuadrados con plata o carbono (Grafeno) y cambiando la variación en la longitud del conductor.

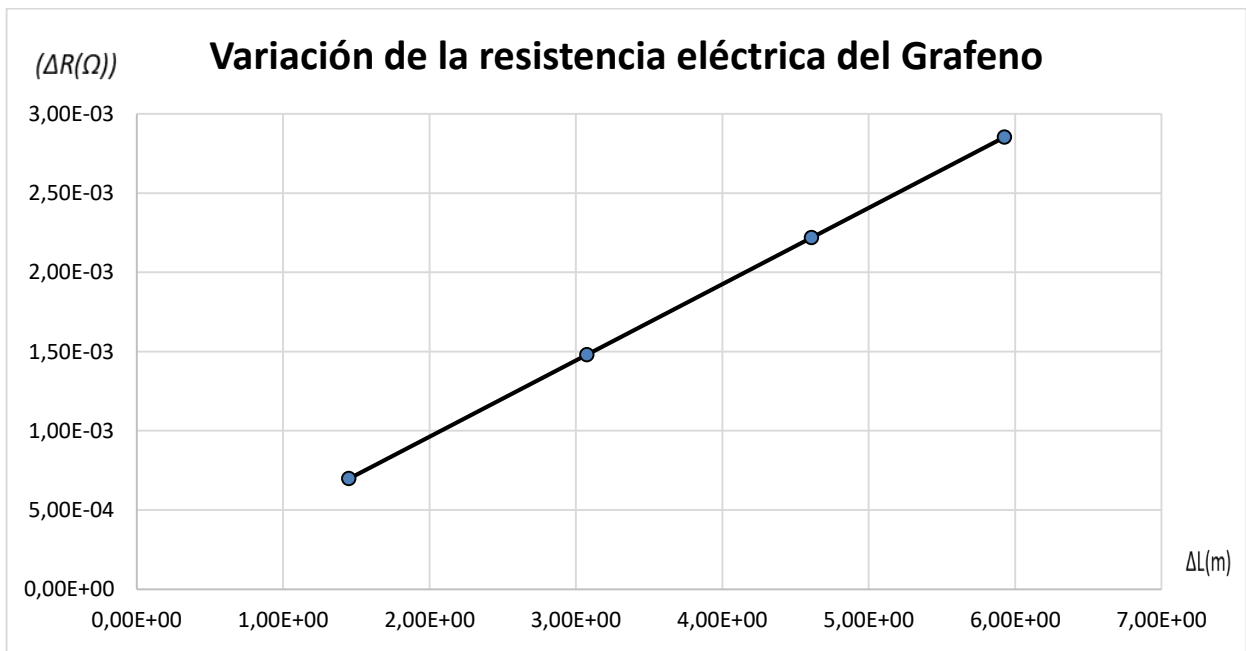
Tabla 23. Variación de la resistencia eléctrica

$\Delta R = \rho (\Delta L/A)$	Plata	Grafeno	$\Delta L(m)$
ΔR	1,11E-03	6,97E-04	1,45E+00
ΔR	2,35E-03	1,48E-03	3,07E+00
ΔR	3,53E-03	2,22E-03	4,61E+00
ΔR	4,53E-03	2,85E-03	5,93E+00

Fuente: Autoría propia.

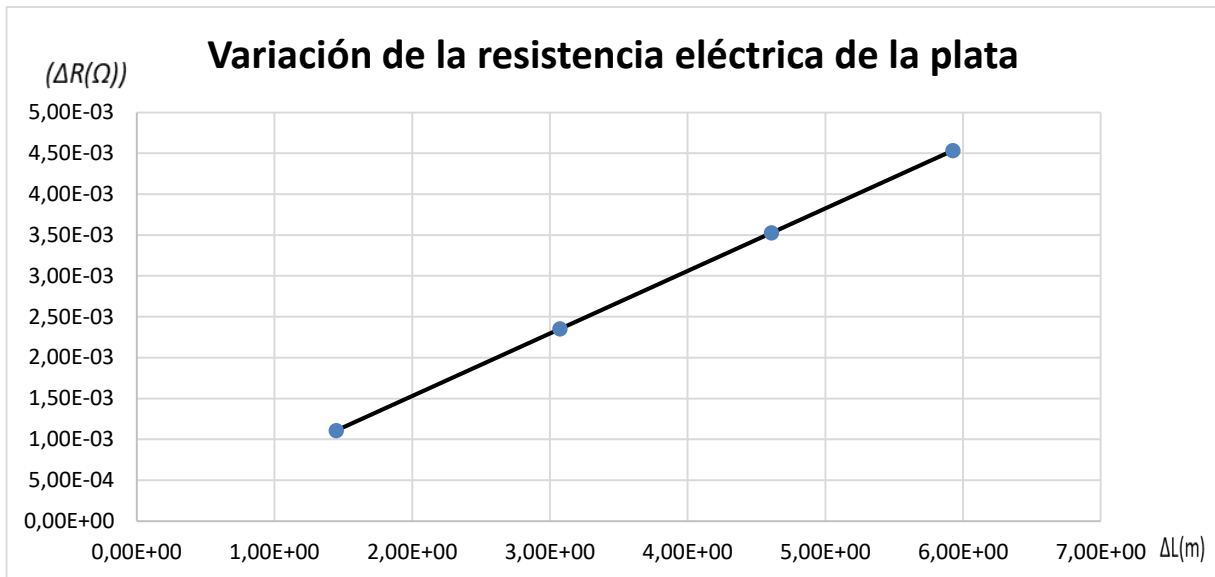
En las Figuras 36 y 37 se observa la gráfica Variación de la resistencia eléctrica del carbono(Grafeno) y la plata en la cual se encuentra como es la variación de la resistencia de este material en función de la variación de la longitud.

Figura 36. Variación de la resistencia eléctrica del carbono(Grafeno).



Fuente: Autoría propia

Figura 37. Variación de la resistencia eléctrica de la plata



Fuente: Autoría propia

En la Tabla 24 se observan los cálculos de la longitud de cada una de las figuras que conforman el conductor de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados y al final se tiene la longitud total del conductor.

Tabla 24. Longitud

	Long 1	Long 2
	0,0065	9,87E-04
	0,0065	9,87E-04
	0,0065	9,87E-04
	0,0065	9,87E-04
	0,0065	9,87E-04
	0,0065	
Σ (Sumatoria Long n)	0,039	4,93E-03
Σ (Sumatoria Long 1+ Long 2)	4,39E-02	

Fuente: Autoría propia

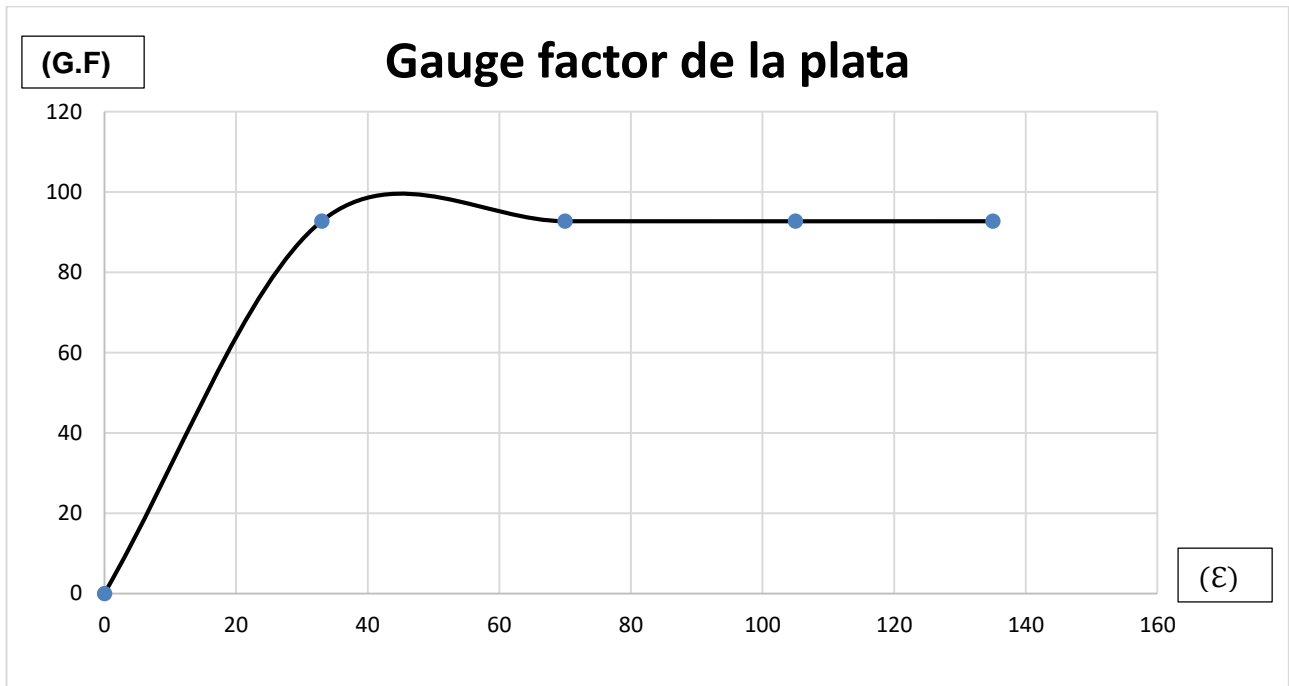
En la Tabla 25 se encuentran los cálculos del gauge factor de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados, con material de conductor de plata y de grafeno para diversas variaciones de longitud de la galga. En las Figuras 38 y 39 se observa el gauge factor de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con conductor de plata y grafeno con su variación debido a los cambios en la longitud de la galga.

Tabla 25. Gauge Factor (GF)

$GF=(\Delta R/R_g)/(\Delta L/L)$	Plata	Grafeno	E
0	0	0	0
GF	9,274106E+01	9,265581E+01	33
GF	9,274106E+01	9,265581E+01	70
GF	9,273100E+01	9,264576E+01	105
GF	9,273323E+01	9,264800E+01	135

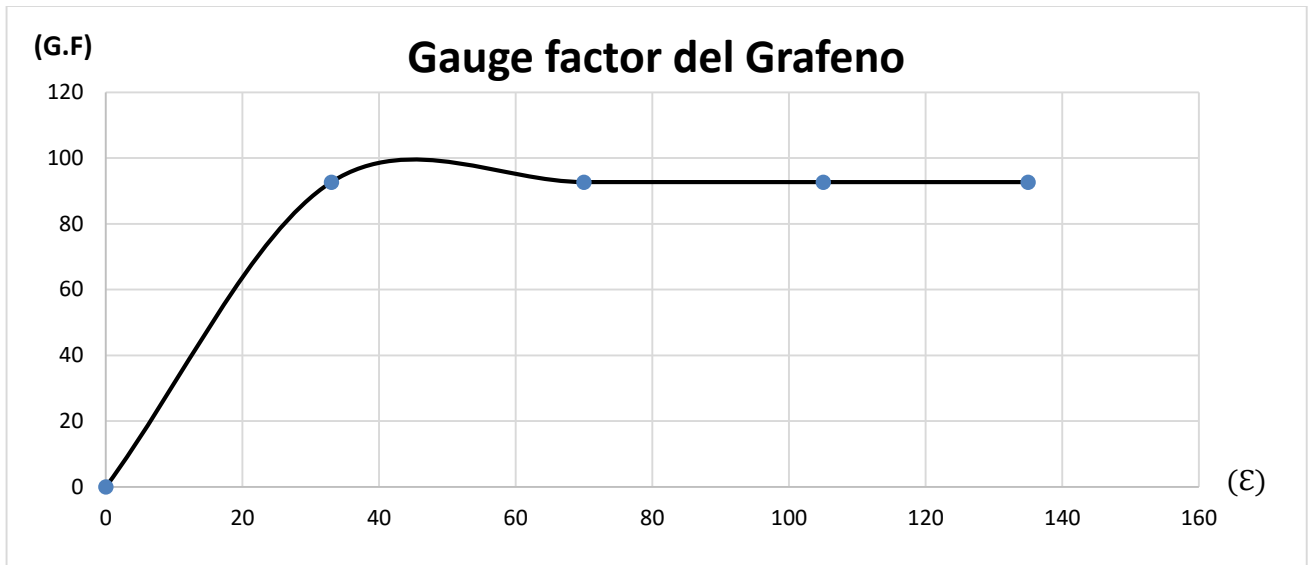
Fuente: Autoría propia.

Figura 38. Gauge factor de la plata



Fuente: Autoría propia

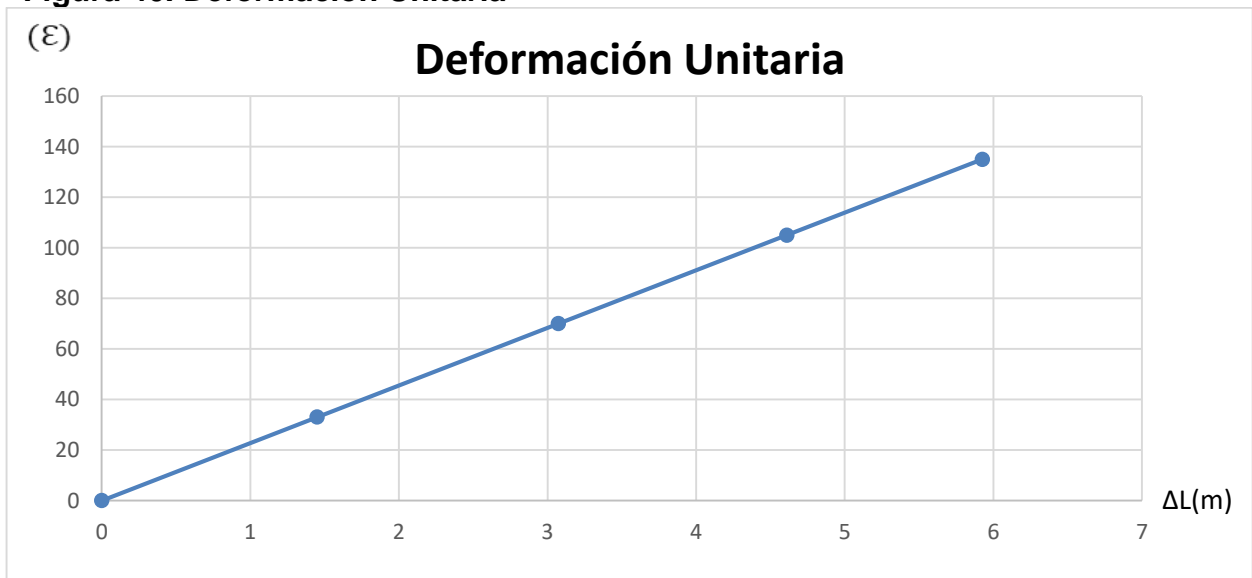
Figura 39. Gauge factor del carbono(Grafeno)



Fuente: Autoría propia

La ecuación 8 fue usada para calcular la deformación unitaria de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados los resultados obtenidos son ilustrados en la Figura 40 esto dependiendo de la variación en la longitud y la longitud inicial. Usando la ecuación 8 se realizó el cálculo de la deformación unitaria de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados (ver tabla 26).

Figura 40. Deformación Unitaria



Fuente: Autoría propia

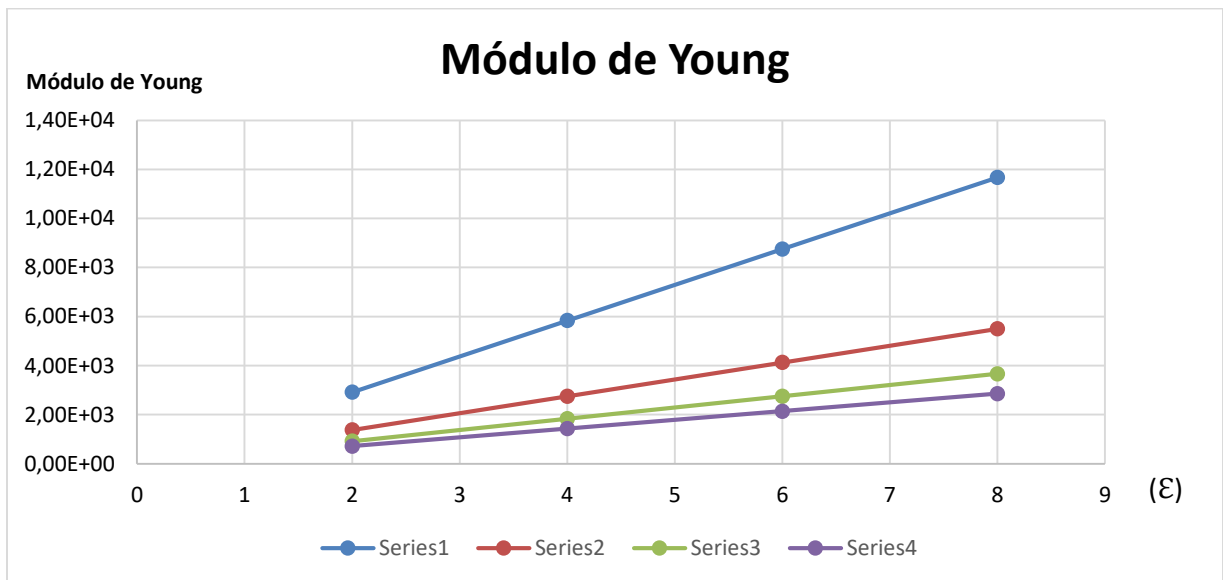
Tabla 26. Fuerza aplicada a la galga extensométrica lineal

F(N)
2
4
6
8

Fuente: Autoría propia

En la Figura 41 se observan los valores del módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados en la cual se varió la fuerza aplicada con 2,4,6 y 8 N y también la deformación unitaria.

Figura 41. módulo de Young de la galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados con sustrato de papel.



Fuente: Autoría propia

Cada serie es descrita a continuación:

- Serie 1 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon= 32$
- Serie 2 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon= 67$
- Serie 3 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon= 98$
- Serie 4 = módulo de Young para $f= 2,4,6$ y $8N$ y $\epsilon= 130$

12.4 VALIDAR POR MEDIO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN, LOS CÁLCULOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS USANDO LOS FACTORES EXTERNOS (TEMPERATURA) Y MECÁNICOS (PRESIÓN) A LOS QUE SON SOMETIDOS LAS DIVERSAS GEOMETRÍAS DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES

En el siguiente capítulo se realizaron las simulaciones de las geometrías propuestas para las galgas extensométricas lineales e implementado variaciones de temperatura y fuerza aplicada. En la Tabla 27 se encuentran los parámetros que fueron utilizados en la elaboración de las geometrías diseñadas de galgas extensométricas lineales.

Tabla 27. Parámetros usados en los diseños de las galgas extensométricas lineales planteadas

Nombre	Expresión	Descripción
BeamL	300[μm]	Altura de sustrato
BeamW	40[μm]	Ancho de sustrato
BeamH	7[μm]	Profundidad del sustrato
a_rejilla	7[μm]	Ancho de rejilla
h_rejilla	200[μm]	Altura de rejilla
p_rejilla	7[μm]	Profundidad rejilla

Fuente: Autoría propia.

En la Tabla 28 se encuentran los materiales usados en el sustrato y rejilla del diseño del cantiléver.

Tabla 28. Materiales usados en las galgas extensométricas lineales

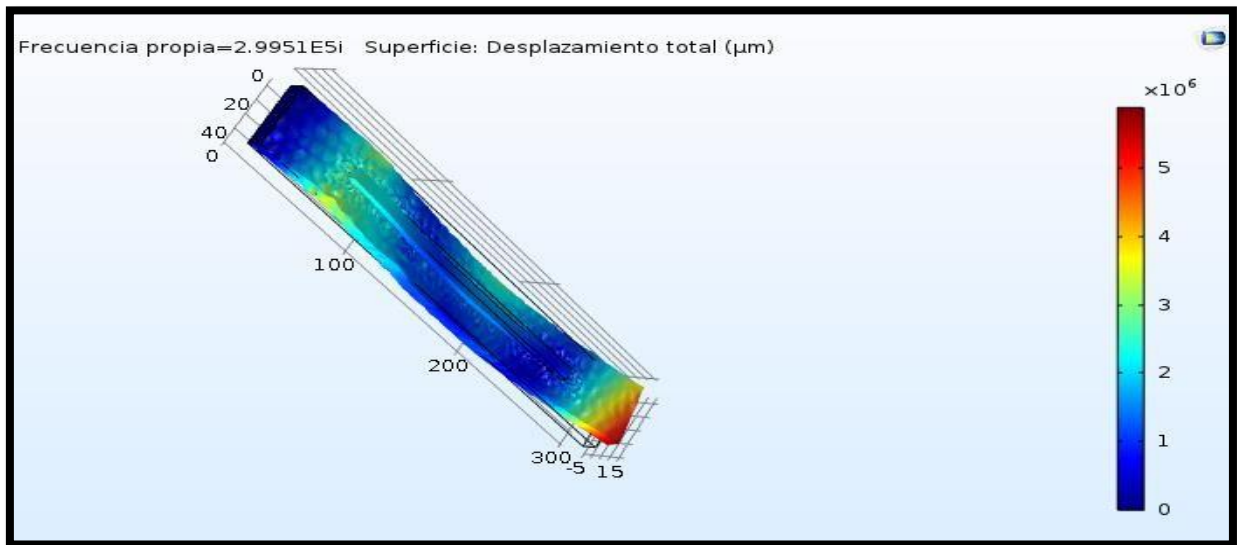
Parte de la rejilla	Material
Sustrato	Poliamida
Rejilla y electrodo	Plata

Fuente: Autoría propia.

En las figuras 42 y 43 se observa la simulación de un cantiléver en poliamida sometido a una presión mediante un estudio de frecuencia propia en el cual se

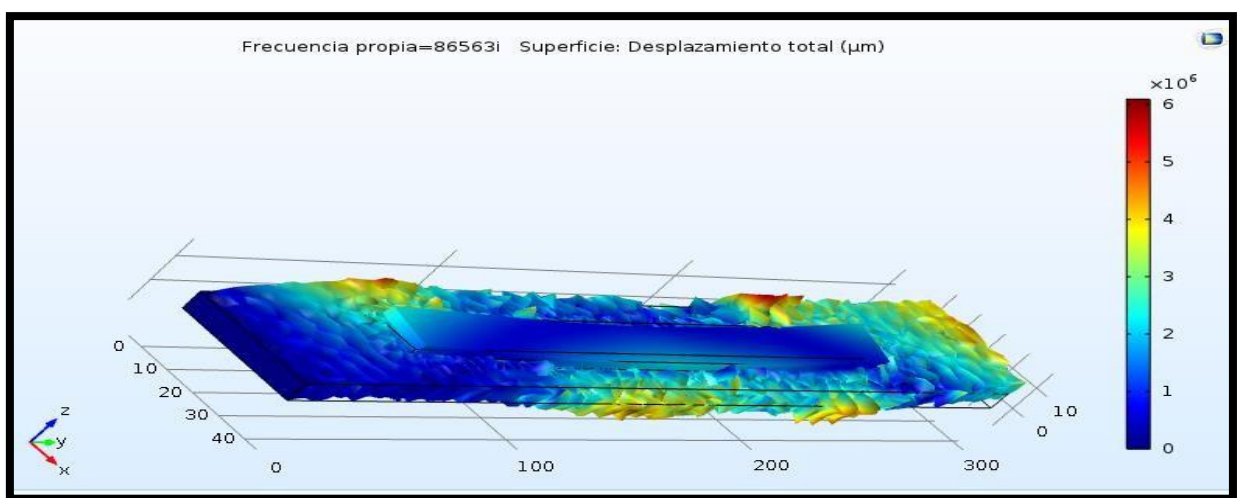
observa el valor de frecuencia propia del diseño y se observa la deformación sufrida por este, de igual forma, se encuentran los puntos de mayor deformación marcados de color rojo y se analiza que la poliamida es un material muy duro y sufre muchas perturbaciones al aplicársele una fuerza externa por lo tanto no es un material muy adecuado para trabajar como sustrato.

Figura 42. Cantiléver en poliamida



Fuente: Autoría propia.

Figura 43. Cantiléver en poliamida



Fuente: Autoría propia.

12.4.1 SIMULACIÓN APLICANDO UNA FUERZA EXTERNA

Tabla 29. Parámetros y medidas usados en los diseños de las galgas extensométricas lineales

Nombre	Expresión	Descripción
h_sust	1 [cm]	Altura del sustrato
a_sust	0.5 [cm]	Ancho del sustrato
p_sust	50 [μm]	Profundidad del sustrato
h_rejilla	0.65 [cm]	Altura de rejilla
a_rejilla	197.36 [μm]	Ancho de rejilla
p_rejilla	50 [μm]	Profundidad de rejilla
posh_rejilla	2.4 [mm]	Posición de rejilla
d_rejilla	625 [μm]	Distancia de rejilla
a_electrodo	300 [μm]	Ancho de electrodo

Fuente: Autoría propia.

En la Tabla 30 se evidencian los materiales utilizados en el diseño de la galga extensométrica lineal.

Tabla 30. Materiales usados en la galga extensométrica lineal de 5 meandros

Parte de la Galga	Material
Sustrato	Papel
Rejilla/Electrodo	Plata

Fuente: Autoría propia.

A continuación, se evidenciará las galgas extensométricas lineales de 1,2 y 5 meandros también con geometrías cuadradas y redondas, y con materiales como papel de sustrato y plata en la rejilla, en estas galgas extensométricas lineales se le simulo distintas fuerzas: 2N, 4N, 6N y 8N, y con ello poder apreciar los distintos comportamientos mecánicos que se tenían en las galgas extensométricas lineales.

Tabla 31. Geometría y fuerza aplicadas en la simulación

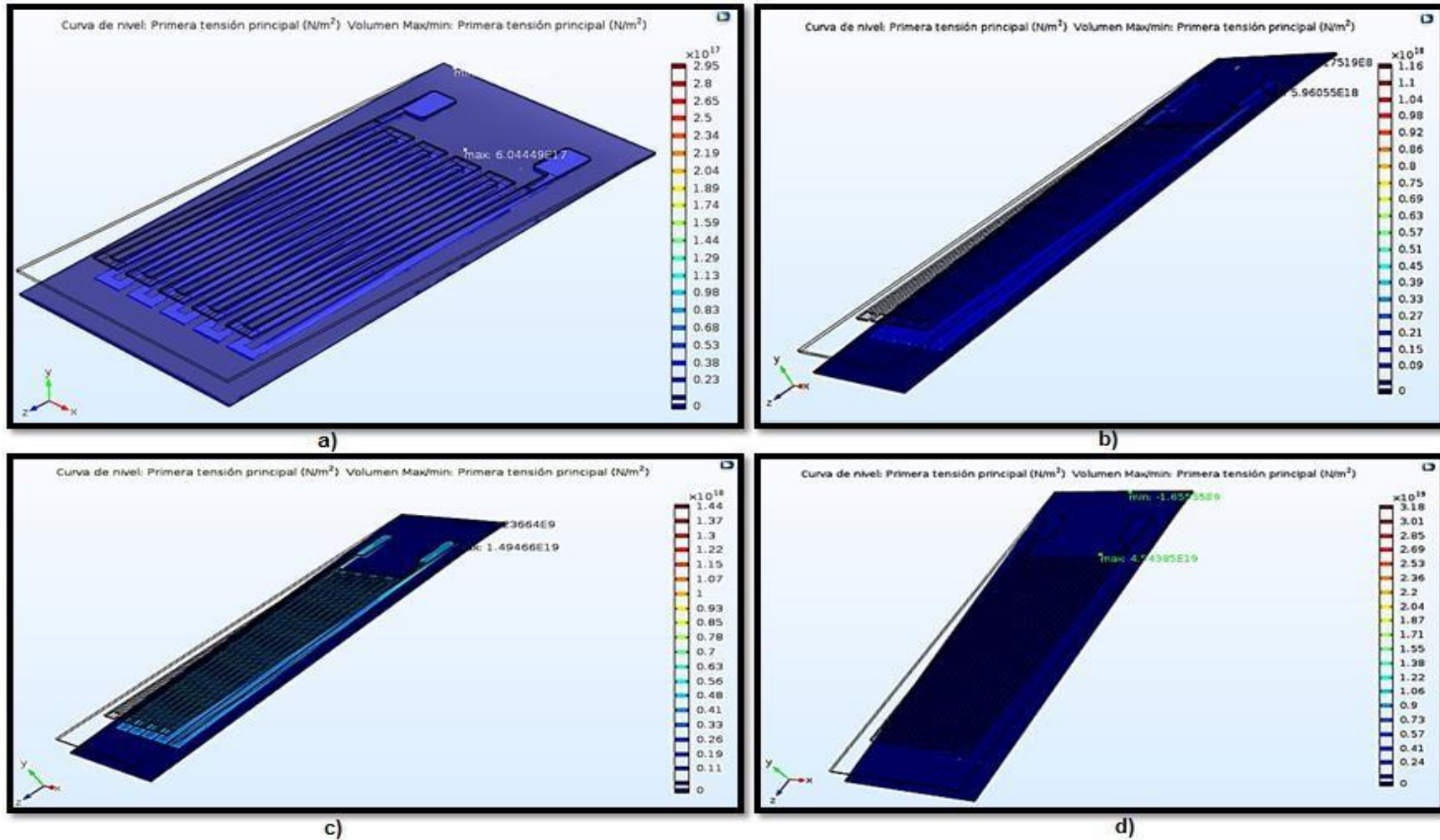
GEOMETRÍA	FUERZA
Galga extensométrica de 5 meandros con bordes cuadrados	2 N

Fuente: Autoría propia.

En la Figura 44, se evidencia la galga extensométrica cuadrada de 5 meandros lineal, sometida a distintas fuerzas de 2N, 4N, 6N y 8N, y los distintos comportamientos mecánicos respecto a la tensión máxima tenida por la galga, de la misma manera, la galga extensométrica lineal de 3 meandros cuadrada como se aprecia en la Figura 45. Asimismo, en la Figura 46 la galga extensométrica lineal de 2 meandros lineal la cual es sometida a las respectivas fuerzas, y la Figura 47 la galga extensométrica lineal de 1 meandro redonda, se evidencia su comportamiento con las fuerzas a la que es sometida, estas galgas lineales tienen sus materiales los cuales son fueron reflejados en la Tabla 31.

Figura 44. Galga extensométrica lineal de 5 meandros cuadrada

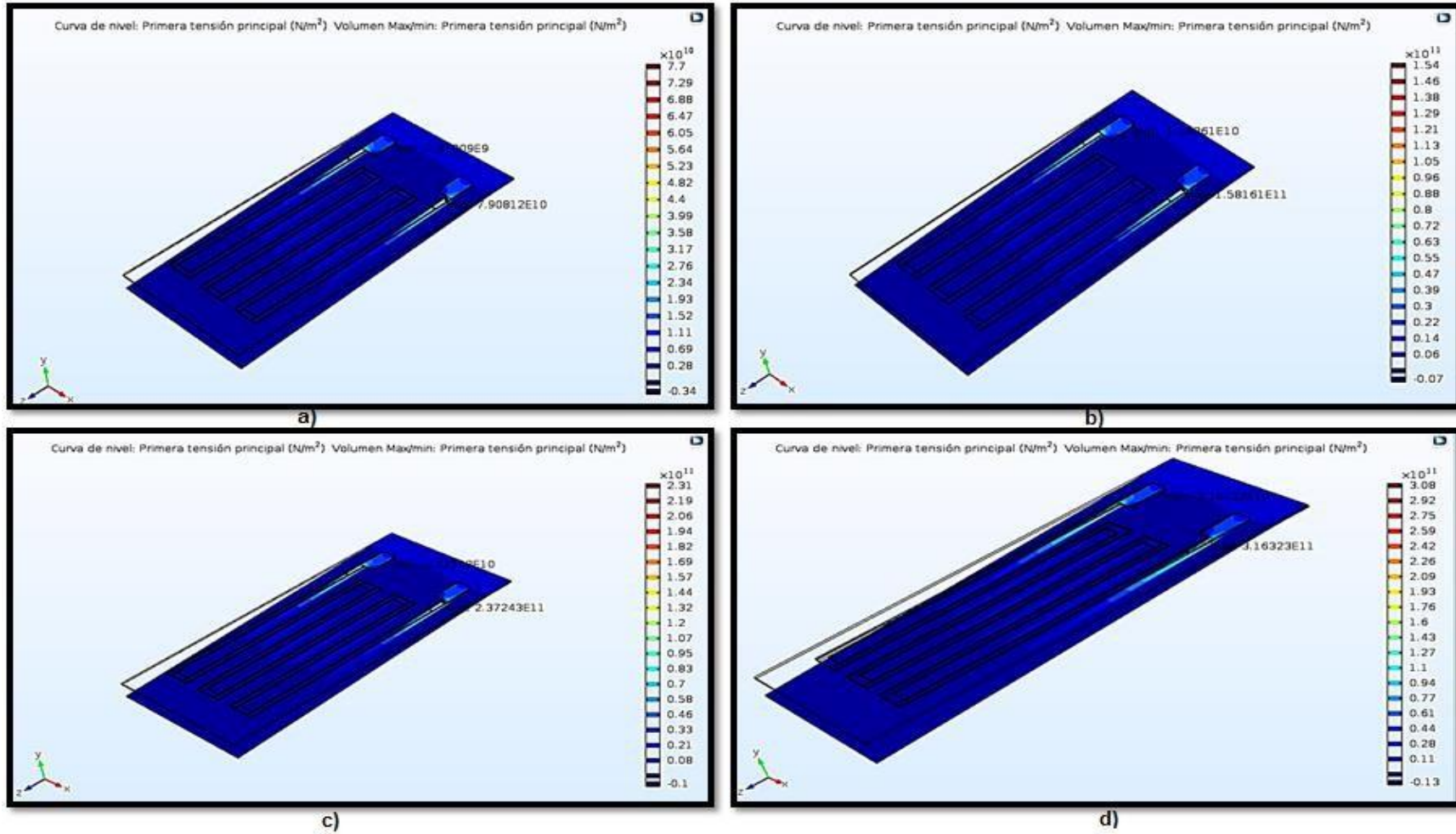
a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N



Fuente: Autoría propia.

Figura 45. Galga extensométrica lineal de 3 meandros cuadrada

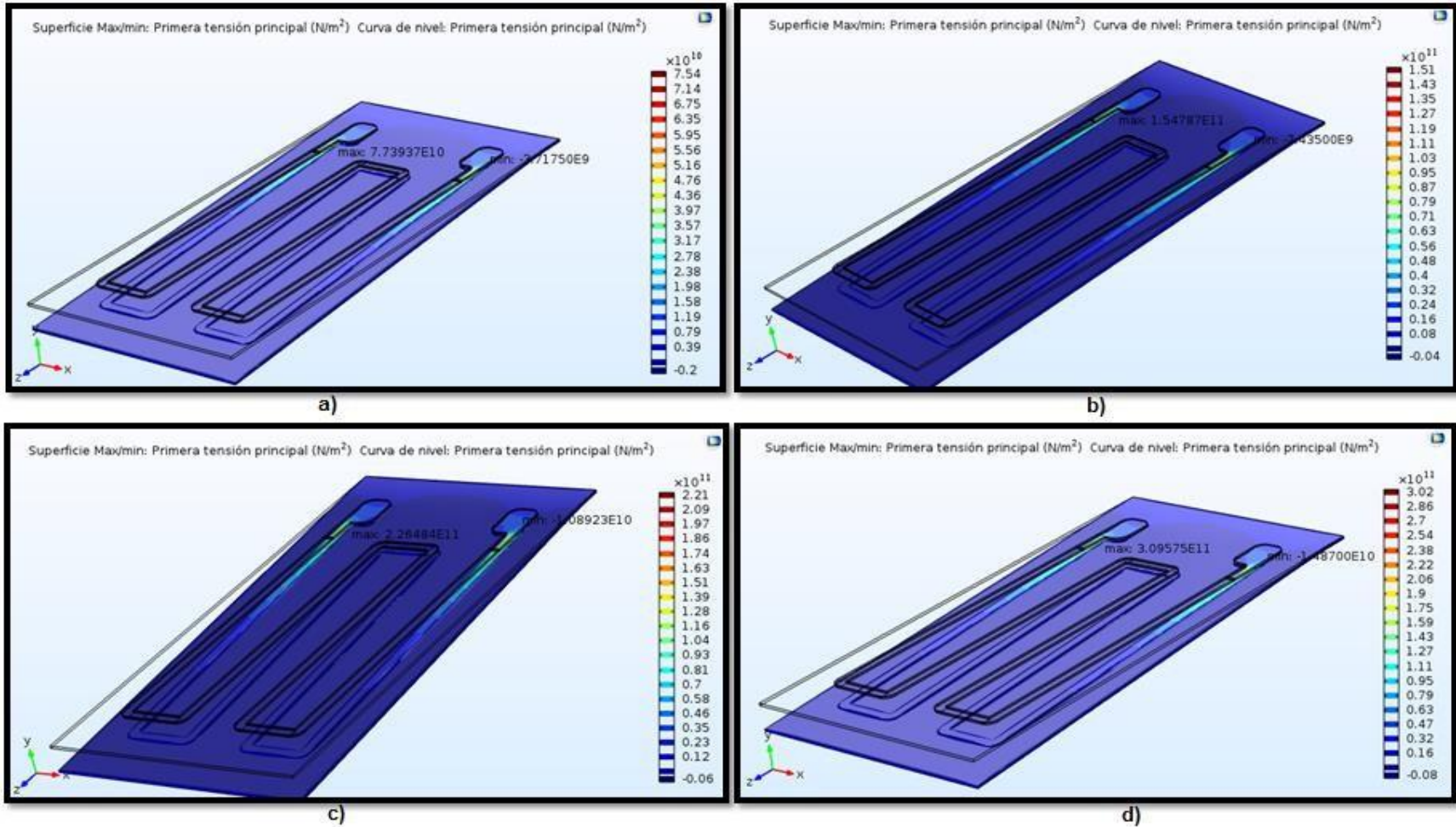
a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N



Fuente: Autoría propia.

Figura 46. Galga extensométrica lineal de 2 meandros redonda

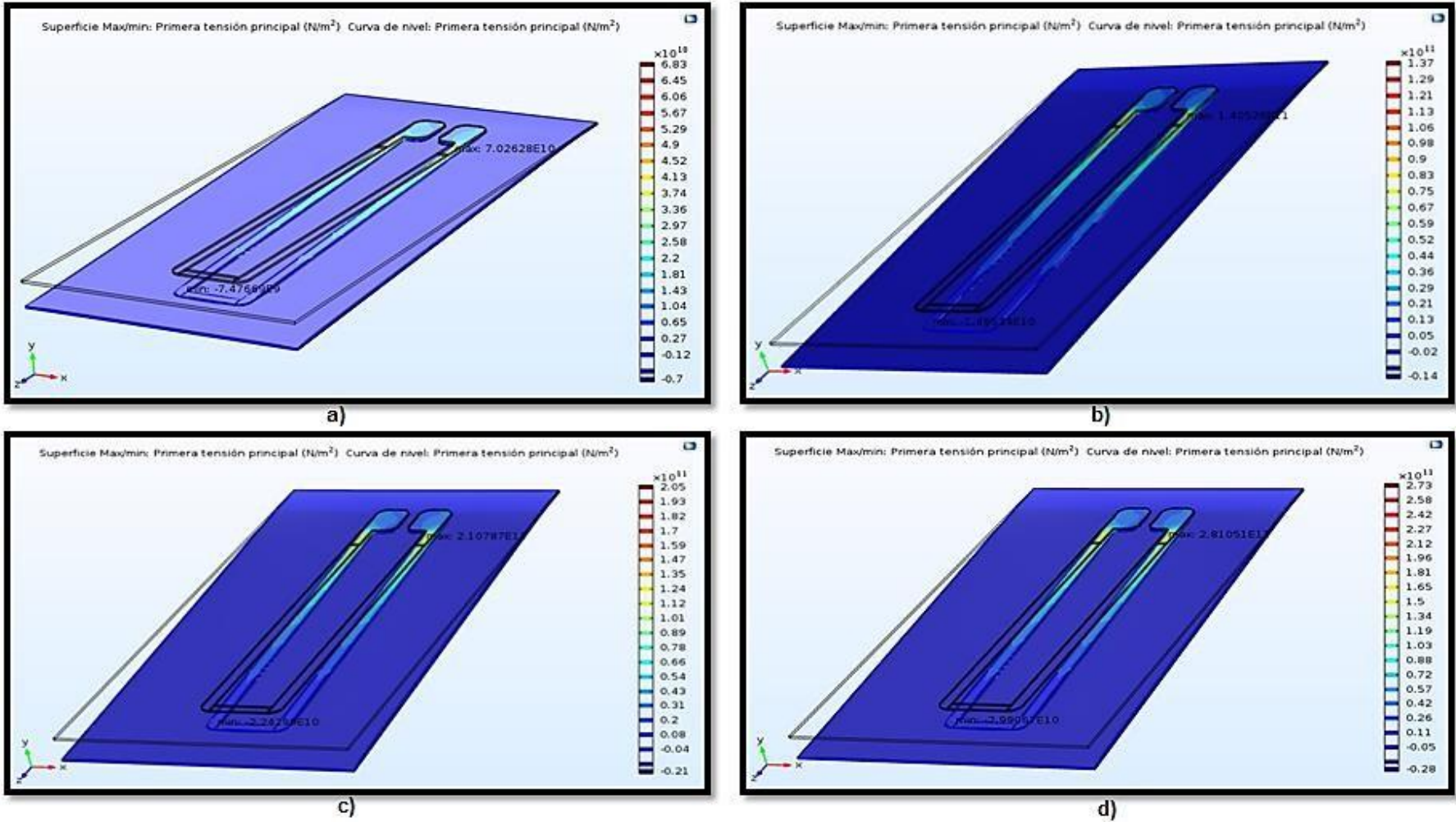
a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N



Fuente: Autoría propia.

Figura 47. Galga extensométrica lineal de 1 meandro redonda

a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N



Fuente: Autoría propia.

En la Tabla 32, se evidencia los materiales que componen las distintas galgas extensométricas que son evidenciadas a continuación (Figura 48 – Figura 51).

Tabla 32. Materiales usados en la galga extensométrica lineal de 5 meandros

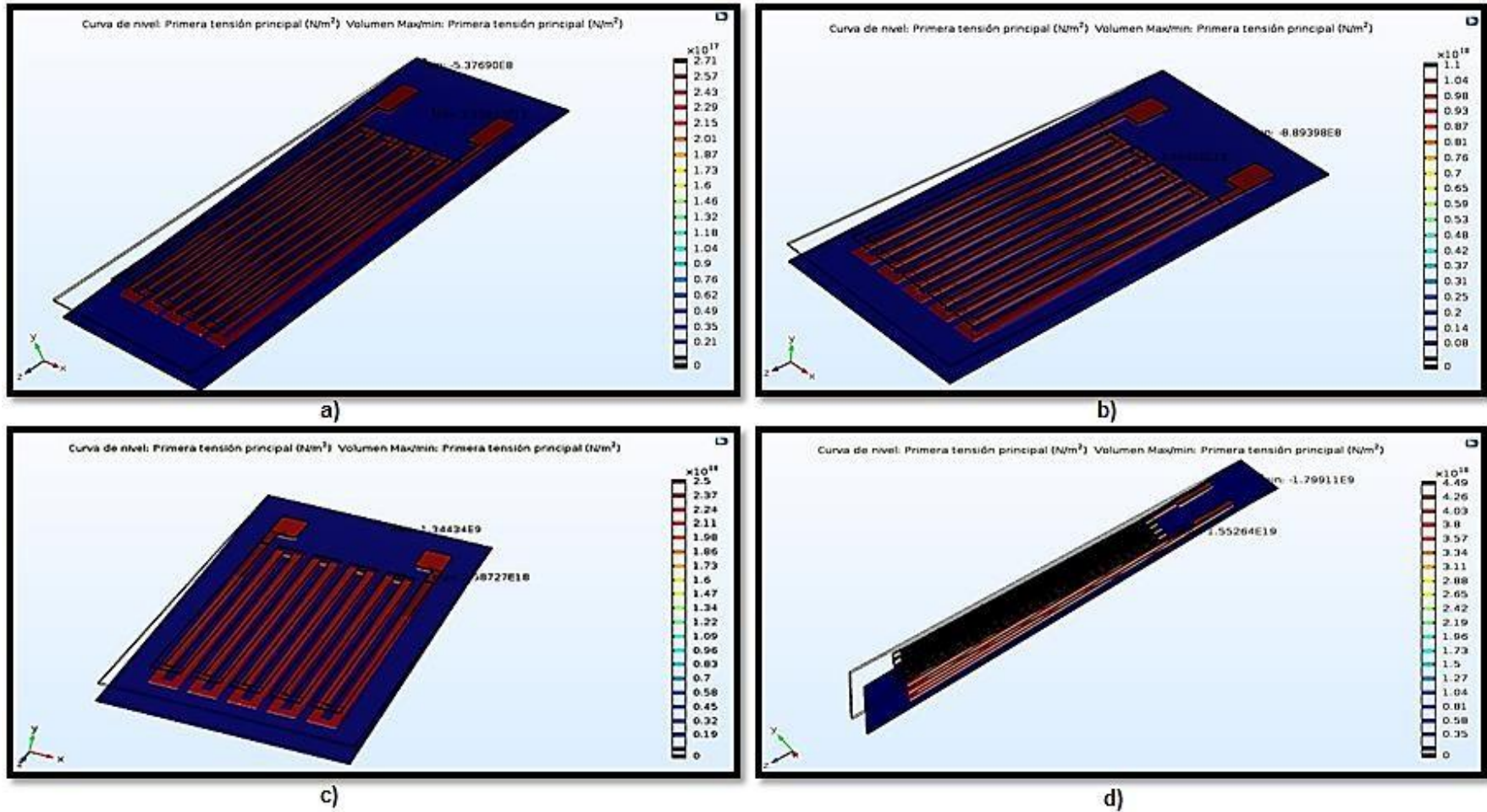
Parte de la Galga	Material
Sustrato	Papel
Rejilla/Electrodo	Grafeno

Fuente: Autoría propia.

En la Figura 48, se evidencia la galga extensométrica cuadrada de 5 meandros lineal, la cual es sometida a distintas fuerzas de 2N, 4N, 6N y 8N, y los distintos comportamientos mecánicos respecto a la tensión máxima tenida por la galga extensométrica lineal, de la misma manera la galga extensométrica cuadrada de 3 meandros lineal lo cual es evidenciado en la Figura 49, en la Figura 50 se observa la galga extensométrica redonda de 2 meandros lineal y en la Figura 51 es la galga extensométrica lineal de 1 meandro redonda, frente a los materiales las cuales están conformadas son los que se aprecian en la Tabla 32, como lo observado anteriormente se simulan distintas geometrías con distintas fuerzas sobre su superficie (estrés), para posteriormente analizar los datos obtenidos y concluir cual es la que tiene mejor comportamiento mecánico en función a la fuerza a la cual están siendo sometidas las distintas geometrías de las galgas extensométricas lineales.

Figura 48. Galga extensométrica cuadrada lineal de 5 meandros

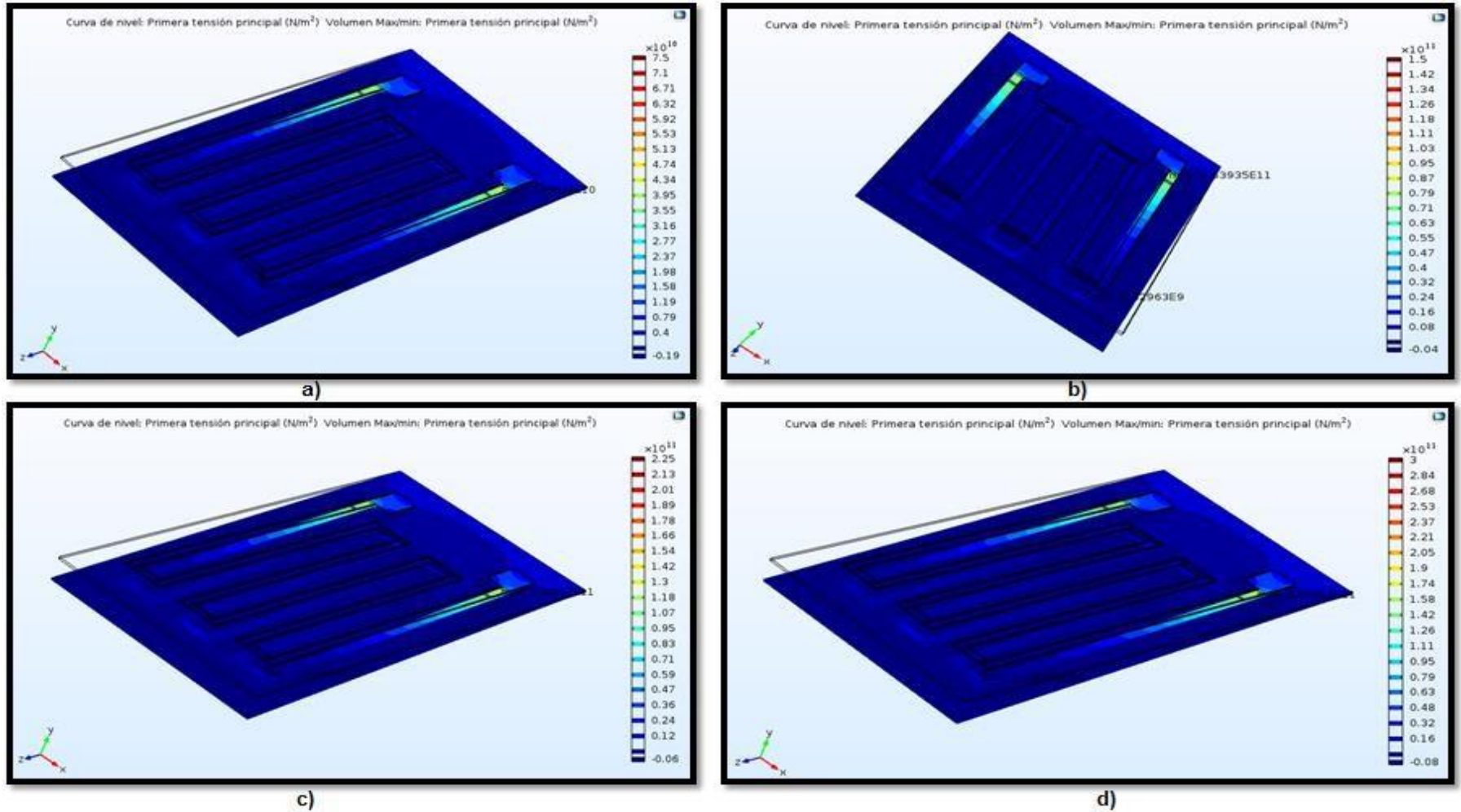
a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N



Fuente: Autoría propia.

Figura 49. Galga extensométrica cuadrada lineal de 3 meandros.

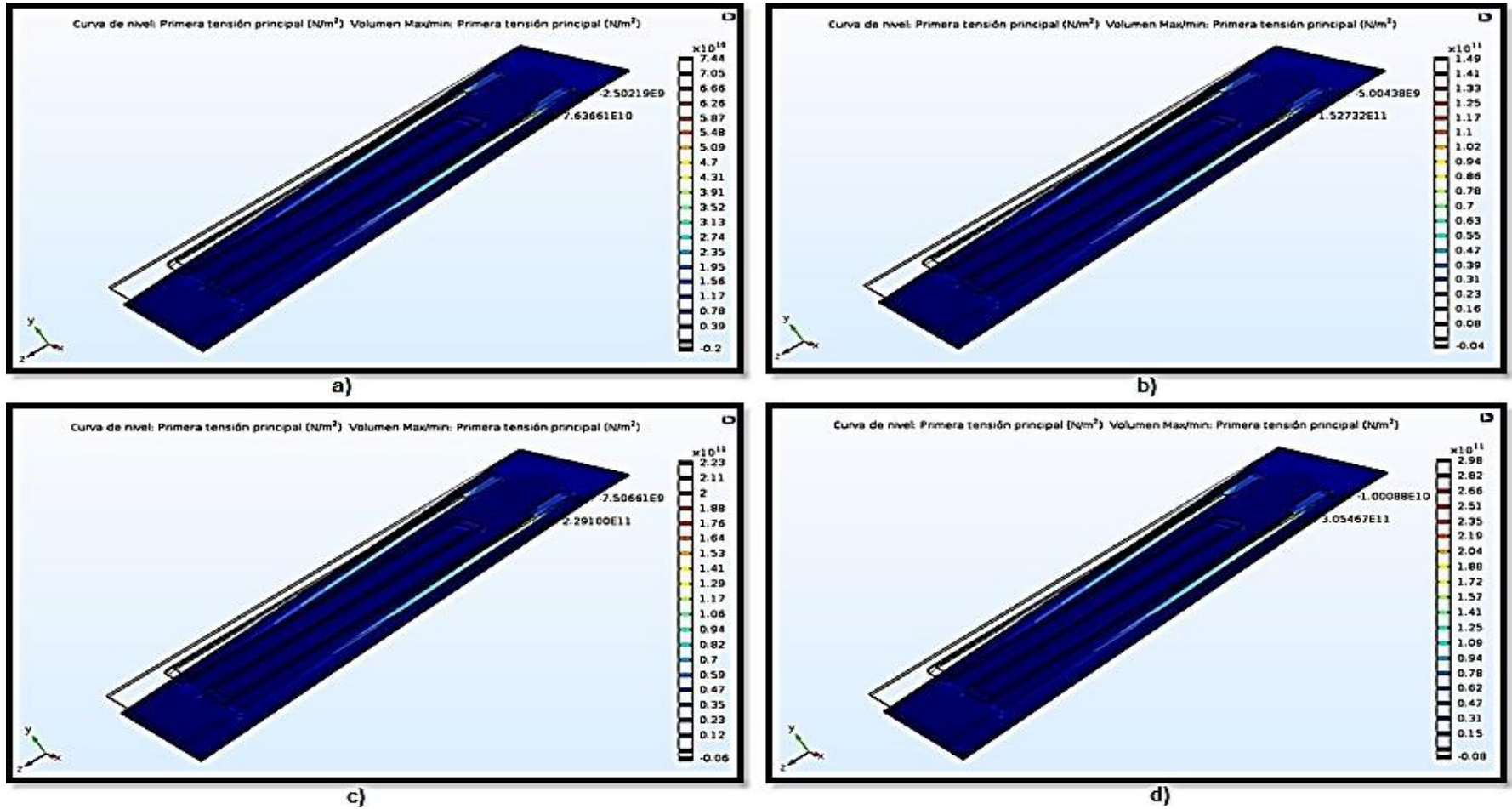
a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N



Fuente: Autoría propia.

Figura 50. Galga extensométrica lineal de 2 meandros redonda

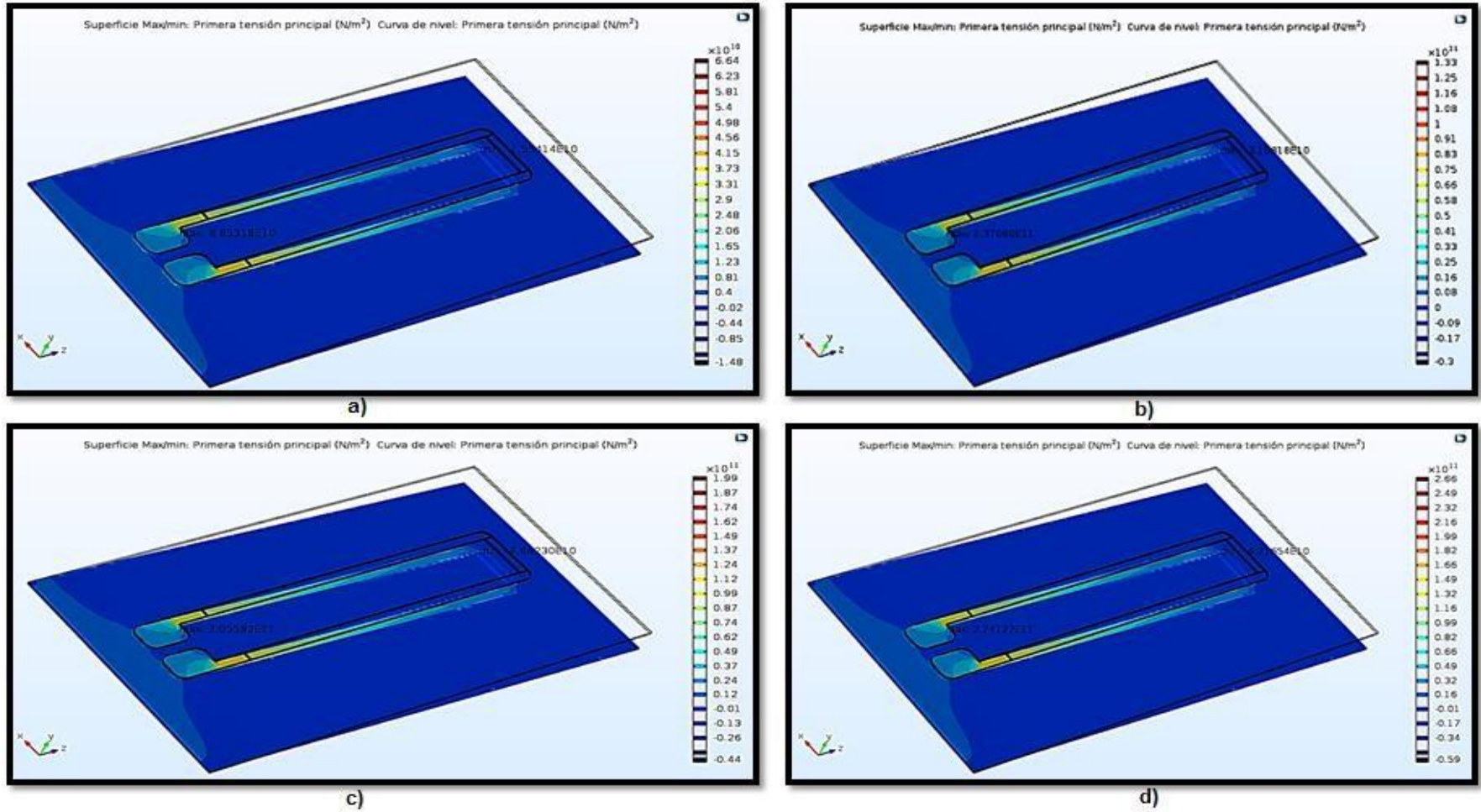
a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N



Fuente: Autoría propia.

Figura 51. Galga extensométrica lineal de 1 meandros redonda.

a) Galga sometida a 2N; b) Galga sometida a 4N; c) Galga sometida a 6N; d) Galga sometida a 8N

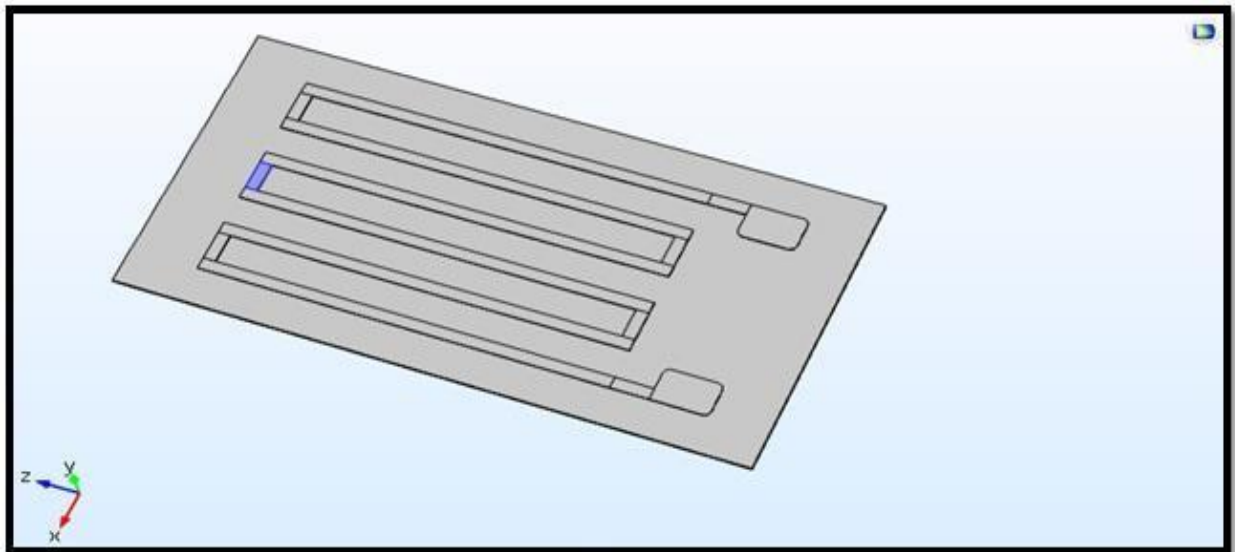


Fuente: Autoría propia.

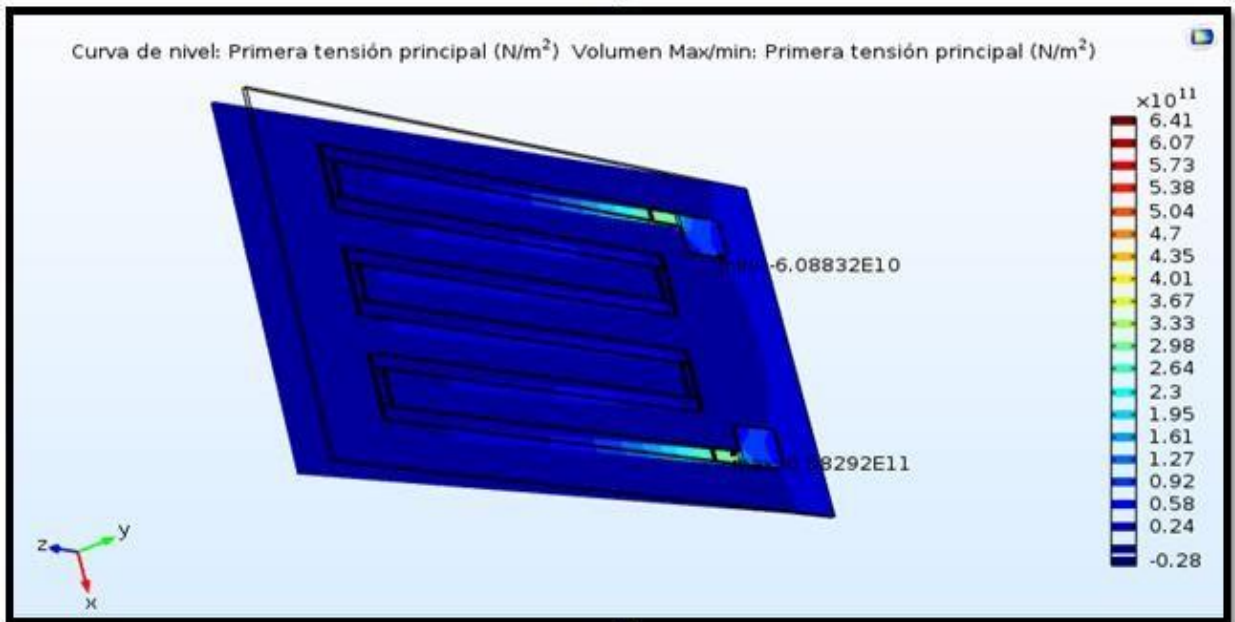
En la Figura 52, se evidencia una galga extensométrica cuadrada de 3 meandros lineal donde el sustrato está compuesto por papel y las rejillas con los electrodos están compuestos por plata, se ejerce una fuerza de 8N, sobre la zona azul como se aprecia a continuación.

Figura 52. Fuerza en un determinado punto de 8 N, en la zona azul

- a) Zona donde se está ejerciendo la fuerza de 8N.
- b) Resultado de la fuerza ejercida sobre la respectiva zona



a)

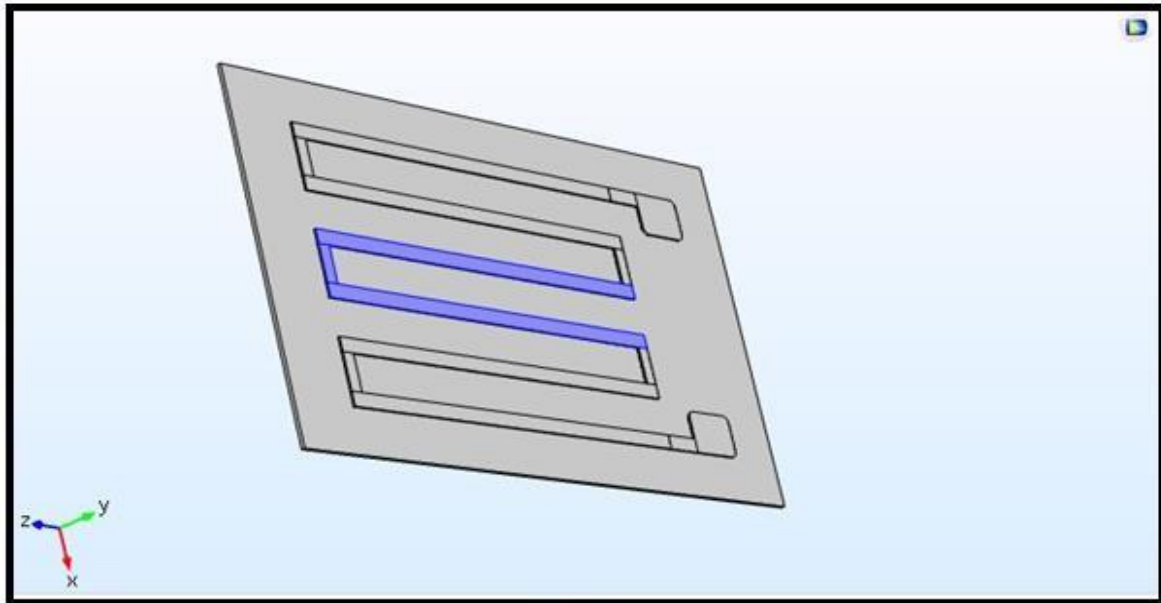


b)

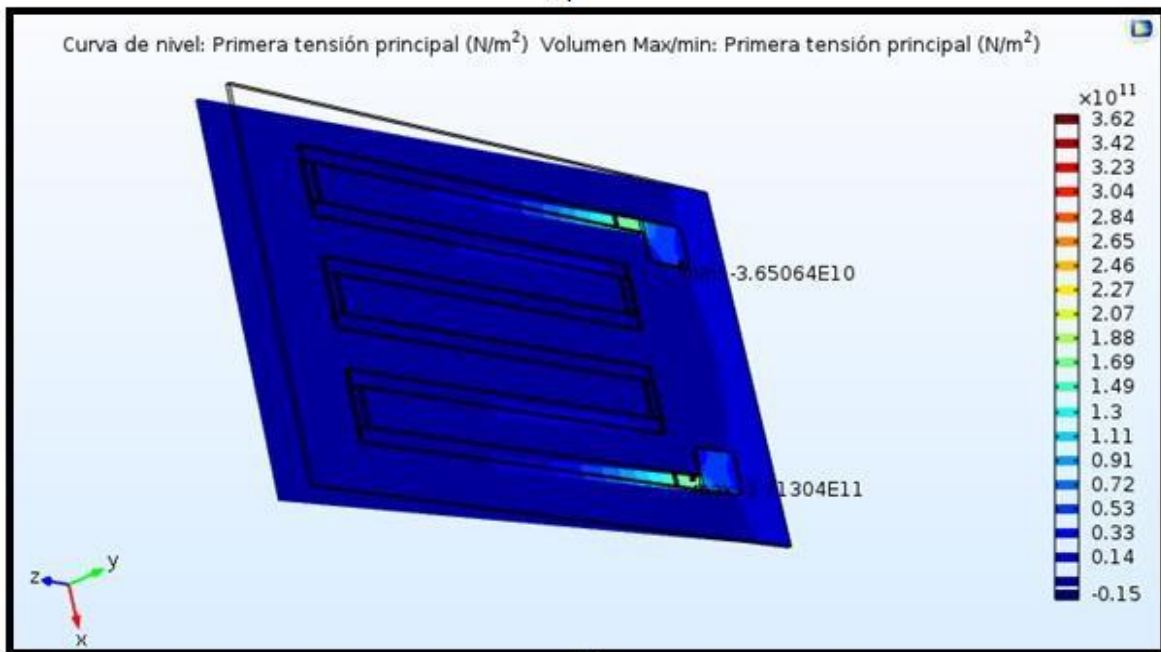
Fuente: Autoría propia.

Figura 53. Fuerza en puntos determinados de 8 N, en la zona azul

- a) Zona donde se está ejerciendo la fuerza de 8N.
- b) Resultado de la fuerza ejercida sobre la respectiva zona



a)



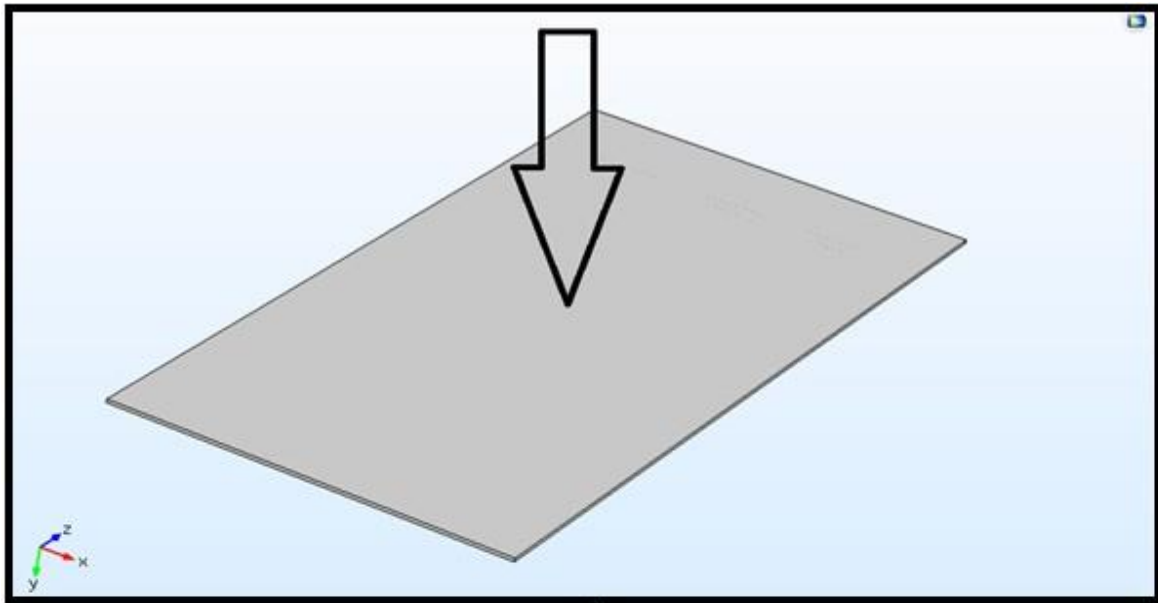
b)

Fuente: Autoría propia.

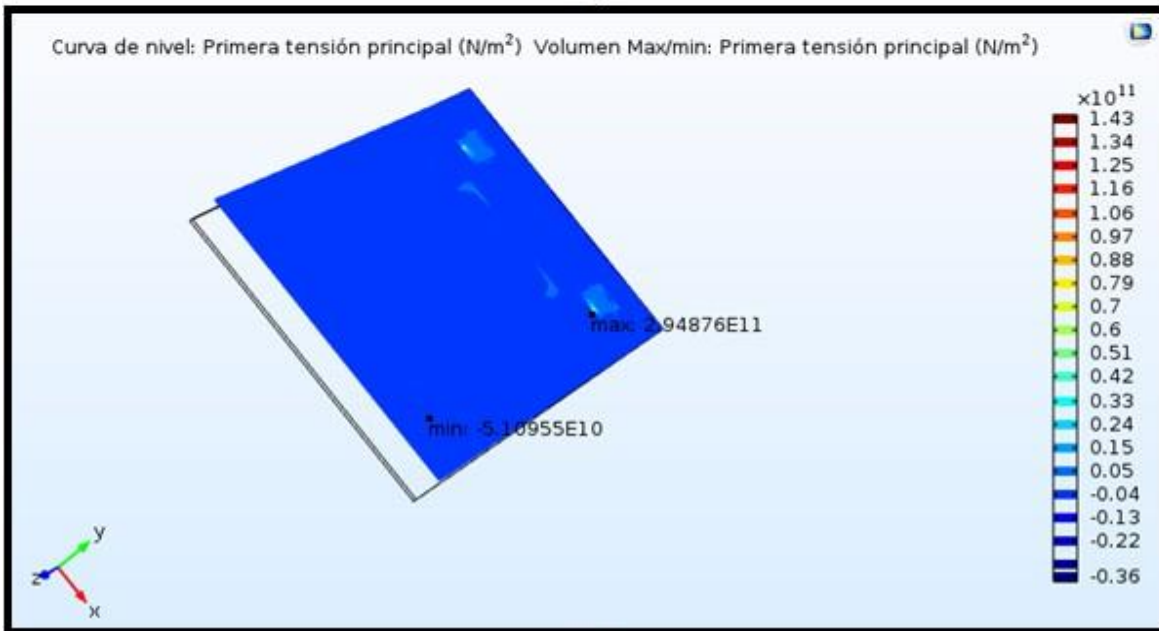
En la Figura 53, se puede evidenciar la galga extensométrica lineal de 3 meandros cuadrada, con materiales de sustrato papel, rejilla y electrodos de plata, es sometida a una fuerza de 8N sobre el sustrato en el eje +Y del respectivo simulador, y con ello se aprecia su tensión máxima en la Figura 53 (b)

Figura 54. Fuerza en el sustrato en el eje +Y de 8N

- a) Zona sobre el sustrato de 8N
Resultados de tensión de la fuerza sobre el sustrato



a)



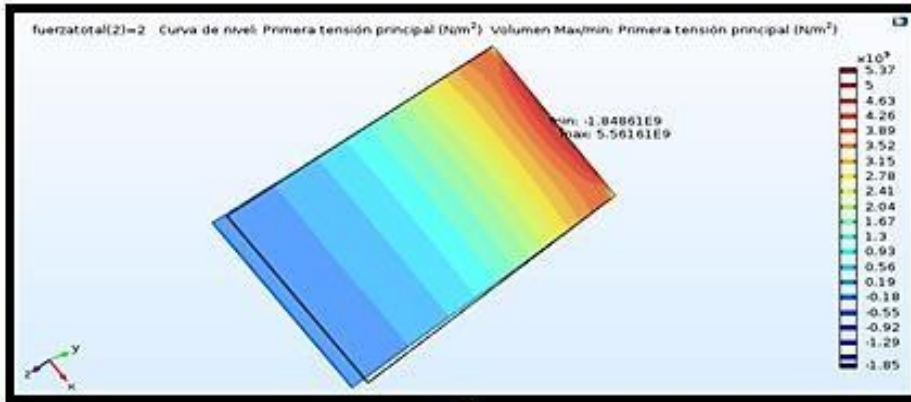
b)

Fuente: Autoría propia.

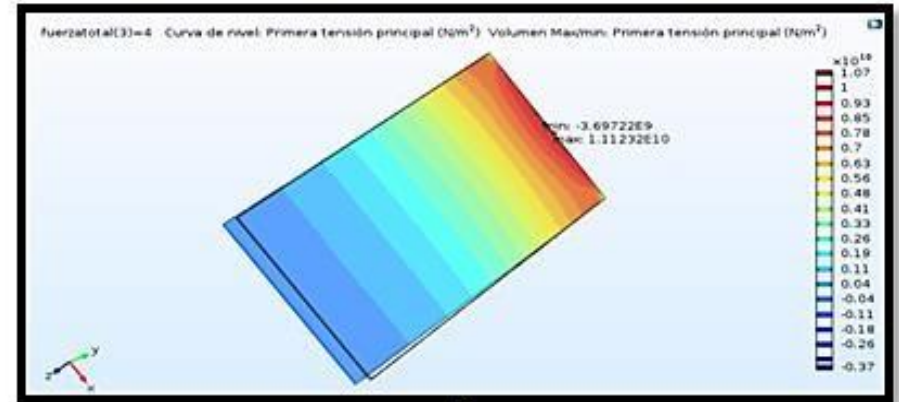
En la figura 54 se observa una Fuerza aplicada en el sustrato en el eje +Y de 8N.

Figura 55. Sustrato de Papel

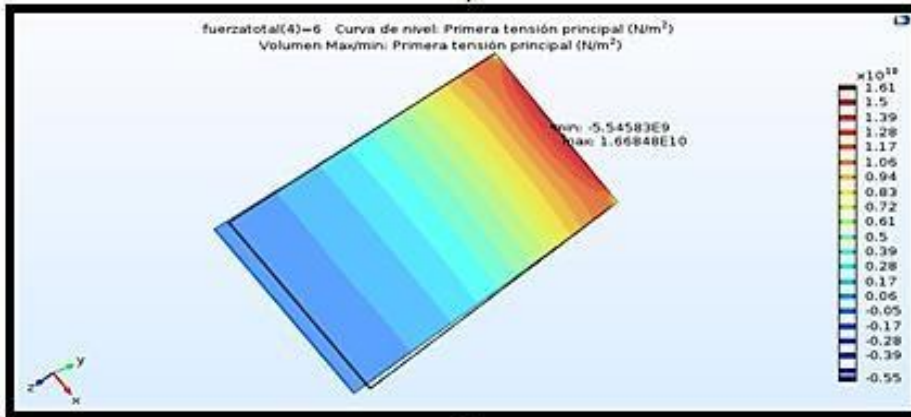
a) Sometido a una fuerza de 2N; b) sometida a una fuerza de 4N ; c) Sometida a una fuerza de 6 N ; d) Sometida a una fuerza de 8 N



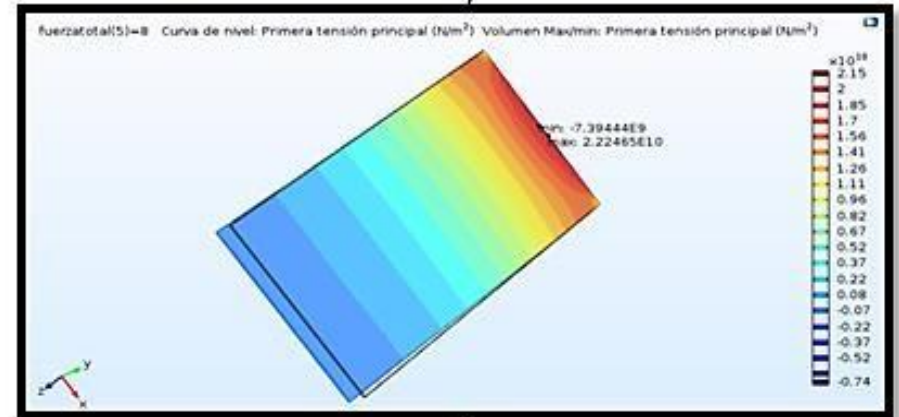
a)



b)



c)



d)

Fuente: Autoría propia.

En la Figura 55, se puede observar el sustrato de Papel sometido a distintas fuerzas sobre su superficie obteniendo las respectivas tensiones para cada fuerza ejercida sobre ella.

En la Tabla 33, se puede apreciar las tensiones obtenidas cuando se le ejerce las respectivas fuerzas sobre el sustrato, se evidencia que su tensión es inferior frente a las demás galgas extensométricas lineales propuestas en el presente trabajo de grado, con ello se puede decir que el sustrato cuando contiene una rejilla ya sea Grafeno o Plata, está la vuelve más rígida la cual va a obtener una mayor tensión por lo cual se va a oponer a la deformación volviéndola menos sensible de cierta manera.

Tabla 33. Resultados de la simulación de las respectivas fuerzas sobre el sustrato

Fuerza [N]	Tensión máxima [N/m ²]
2	5.56161×10^9
4	1.11232×10^{10}
6	1.66848×10^{10}
8	2.22465×10^{10}

Fuente: Autoría propia.

12.4.2 SIMULACIÓN REALIZADA CON VARIACIÓN DE TEMPERATURA

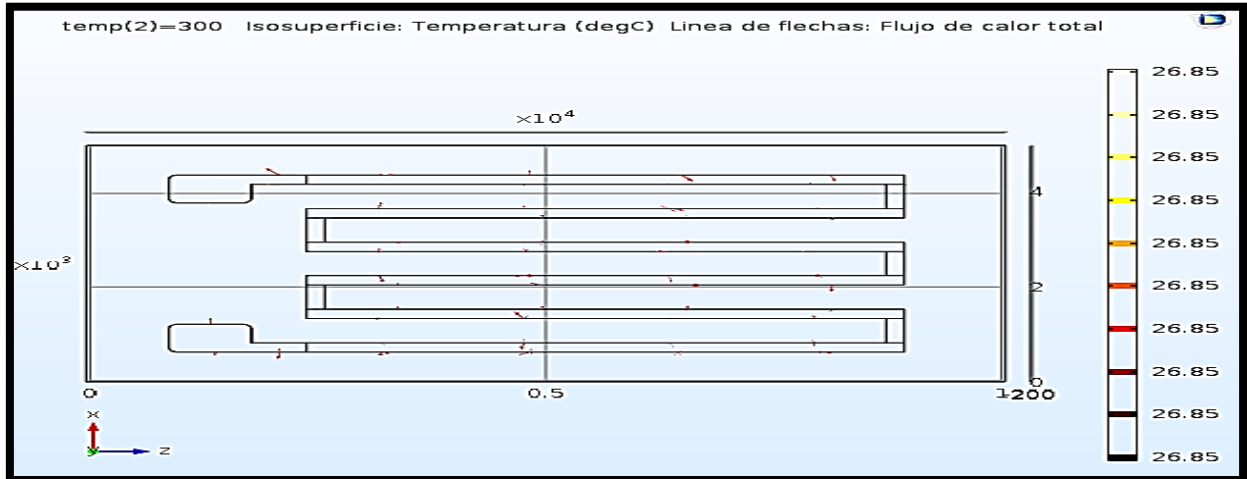
Se realizaron simulaciones con galgas extensométricas lineales de 1,2,3 y 5 meandros también con geometrías cuadradas y redondas, de igual forma, se trabajaron con un sustrato de papel y material de meandros de plata y grafeno con las medidas ilustradas en el capítulo II, donde, se realizaron variaciones de temperatura y se inició con 26.85°C, se varió a 226.85 °C de temperatura cercana a la máxima soportada por el papel antes de su combustión (que es de 233°C) y se observaron los diferentes comportamientos de las geometrías mediante el uso del ambiente de simulación de COMSOL multiphysics, los resultados se observan a lo largo del presente capítulo.

Para mayor información sobre las simulaciones con variación de temperatura y geometrías revisar anexo B.

12.4.2.3 GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 3 MEANDROS CON BORDES CUADRADOS

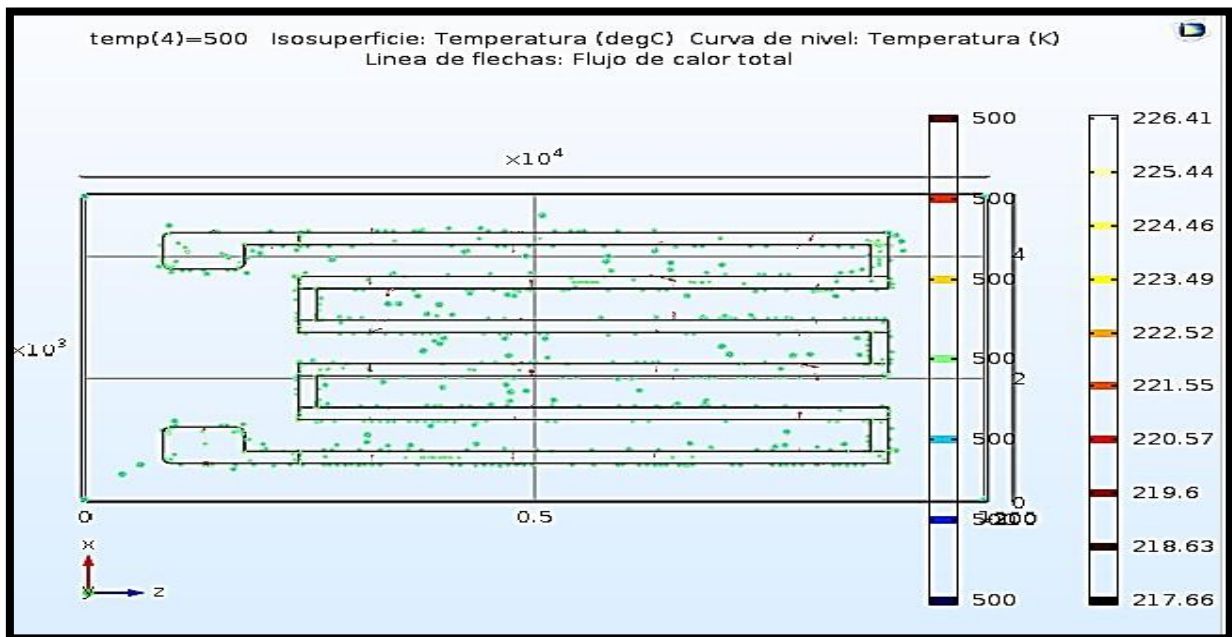
En la figura 56 y 57 se observa las galgas extensométricas lineales de 3 meandros con bordes cuadrados con sustrato de papel y rejilla de plata la cual fue la que menos afectaciones sufrió al aumentar su temperatura de 26,85 °C a 226.41 °C.

Figura 56. RANGO DE TEMPERATURA 26.85 °C



Fuente: Autoría propia.

Figura 57. RANGO DE TEMPERATURA 226.41 °C



Fuente: Autoría propia.

En la tabla 34 se observan los parámetros trabajados en la geometría de la galga extensométrica lineal y las variaciones de temperatura implementadas.

Tabla 34. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados

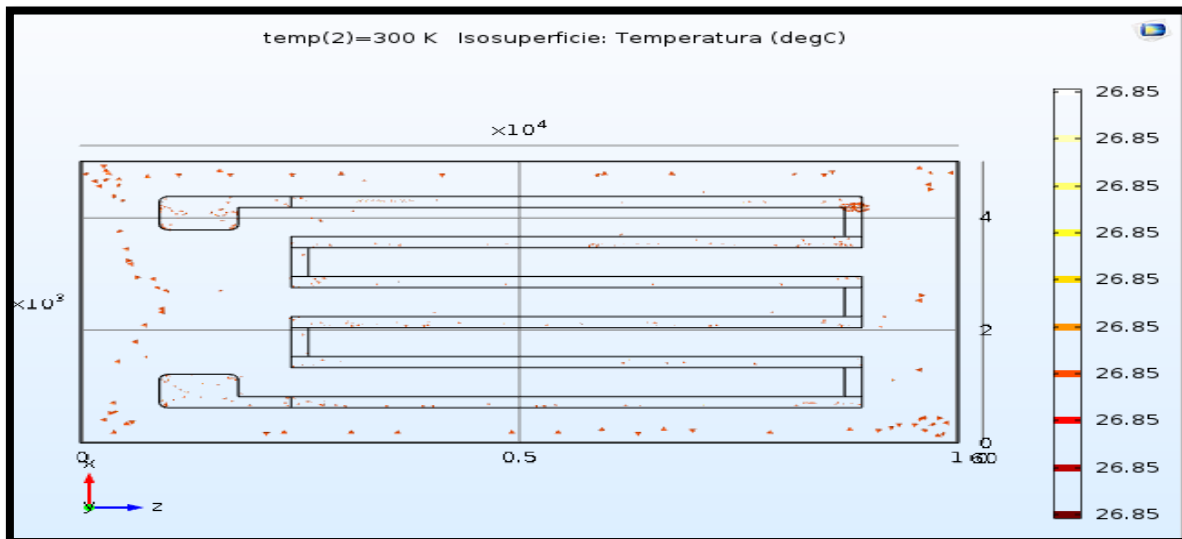
Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
3 meandros con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufre afectaciones y plata sufre pequeñas afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

12.4.3.3 GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 3 MEANDROS CON BORDES CUADRADOS

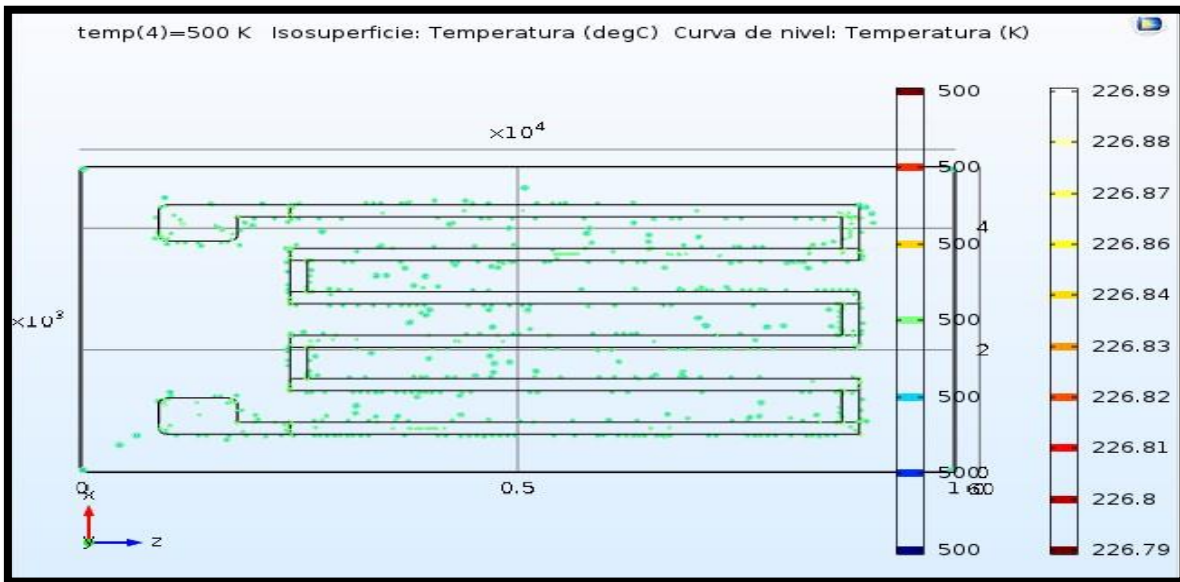
En la figura 58 y 59 se observa las galgas extensométricas lineales de 3 meandros con bordes cuadrados con sustrato de papel y rejilla de grafeno la cual fue la que menos afectaciones sufrió al aumentar su temperatura de 26,85 °C a 226.41 °C.

Figura 58. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C



Fuente: Autoría propia.

Figura 59. RANGO DE TEMPERATURA 226.89°C



Fuente: Autoría propia.

En la tabla 35 se observan los parámetros trabajados en la geometría de la galga extensométrica lineal y las variaciones de temperatura implementadas.

Tabla 35. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 3 meandros con bordes cuadrados

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
3 meandro con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel no sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

12.5 ANALIZAR LOS DATOS OBTENIDOS EN EL AMBIENTE DE SIMULACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LINEALES.

12.5.1 ANÁLISIS POR VARIACIÓN DE TEMPERATURA

En el presente Trabajo de Grado se realizaron una serie de simulaciones que generaron variaciones de los materiales usados en los diseños de las galgas extensométricas lineales, papel en el sustrato, plata y grafeno en los meandros, además de las variables a las cuales fueron sometidas estos diseños temperatura y fuerza.

Ahora bien, al realizar las variaciones de temperatura en las galgas extensométricas lineales diseñadas, se observó que en todas se presentó un comportamiento general, en el cual la temperatura de 26.85°C o 300°K no tenía mayores afectaciones en sus materiales, tanto en el sustrato de papel como en la plata o carbono (Grafeno) de los meandros. Del mismo modo, al aumentar el flujo de temperatura a 226.85°C o 500°K , punto de temperatura cercana a la máxima soportada por el papel antes de su combustión que es de 233°C , se encontró que varía de cierta forma la afectación generada, dependiendo del tipo de geometría y materiales empleados en el diseño.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede encontrar que la geometría que mostró la menor cantidad de afectaciones por temperatura de todas las geometrías evaluadas, fue la cuadrada de tres meandros vista en las Figuras 55 y 69 sin importar el tipo de material usado en sus meandros, pues tanto los de plata como los de grafeno mostraron los mismos resultados.

De igual manera, se encuentra que el papel el cual puede ser clasificado como un aislante térmico es comprobado en las simulaciones en donde se muestra que no logra ser afectado en grandes cantidades por el efecto de la temperatura inclusive en algunas simulaciones se observa que estando cerca de su temperatura de combustión no logra sufrir efectos de la temperatura lo cual indica que es un buen material para trabajar como sustrato en términos de temperatura.

Por otra parte, al momento de observar el material de la rejilla que mejores comportamientos mostró, se encuentra que el grafeno sobresale, debido a que tiene un valor de conductividad térmica el cual es de 4000 W/ (m.K) , muy grande en comparación con el de la plata que es de tan solo 490 W/ (m.K) y, de ahí sus diferencias en el comportamiento al variar la temperatura.

En la tabla 36 de ilustran los resultados obtenidos de cada geometría de galga extensométrica lineal con sustrato de papel y rejilla de plata al variar su temperatura en el ambiente de simulación.

Tabla 36. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
1 meandro con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados	Plata y papel con grandes afectaciones por los efectos de la temperatura
2 meandros con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufre afectaciones y plata con grandes afectaciones por los efectos de la temperatura
3 meandros con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufre afectaciones y plata sufre pequeñas afectaciones por temperatura
5 meandros con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Plata y papel sufren grandes afectaciones por temperatura
5 meandros con bordes triangulares	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufre afectaciones y plata sufre grandes afectaciones por temperatura
1 meandro con bordes redondos	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufren afectaciones y plata sufre afectaciones por temperatura
5 meandros con bordes redondos	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Plata y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

En la tabla 37 de ilustran los resultados obtenidos de cada geometría de galga extensométrica lineal con sustrato de papel y rejilla de plata al variar su temperatura en el ambiente de simulación.

Tabla 37. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
1 meandro con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura
2 meandros con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura
3 meandro con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel no sufren grandes afectaciones por temperatura
5 meandros con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura
5 meandros con bordes triangulares	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura
1 meandro con bordes redondos	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Papel no es afectado y grafeno sufre grandes afectaciones por temperatura
5 meandros con bordes redondos	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Plata y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

12.5.2 ANÁLISIS MECÁNICO

En la tabla 38 se puede apreciar que a mayor fuerza sometida la galga extensométrica se tiene una mayor tensión, desde otro punto de vista, se evidencia que a menor número de meandros hay un decremento en la tensión máxima, por ejemplo, en la galga de 5 meandros cuadrada se tiene un valor $\times 10^{17}$ a diferencia de la galga de 3 meandros que es de un valor de tensión $\times 10^{10}$. Dicha tensión máxima disminuye de manera exponencial, dando a entender que, a mayor número de meandros, la galga extensométrica es más rígida.

Tabla 38. Tipos de galga extensométrica lineal vs fuerza con plata

TIPOS DE GALGA	2 N	4 N	6 N	8 N	
Galga extensométrica lineal de 5 meandros cuadrada [Figura 44]	6.0444×10^{17}	5.96055×10^{18}	1.49466×10^{19}	4.54385×10^{19}	TENSIÓN MAXIMA [N/m ²]
Galga extensométrica lineal de 3 meandros cuadrada [Figura 45]	7.90812×10^{10}	1.58162×10^{11}	2.37243×10^{11}	3.16324×10^{11}	
Galga extensométrica lineal de 2 meandros redonda [Figura 46]	7.73937×10^{10}	1.54787×10^{11}	2.32181×10^{11}	3.09575×10^{11}	
Galga extensométrica lineal de 1 meandro redonda [Figura 47]	7.02628×10^{10}	1.40526×10^{11}	2.10787×10^{11}	2.8105×10^{11}	

Fuente: Autoría propia.

En la tabla 39, se evidencia los distintos diseños de galgas extensométricas, con la respectiva fuerza ejercida en la superficie en el eje Y, y con ello, las tensiones máximas de cada una de ellas, los materiales utilizados en el diseño de las galgas presentes en la Tabla 41, en el sustrato papel y en la rejilla Grafeno.

Tabla 39. Tipos de galga vs fuerza con grafeno

TIPOS DE GALGA	2 N	4 N	6 N	8 N	
Galga extensométrica lineal de 5 meandros cuadrada [Figura 48]	3.15942×10^{17}	2.46658×10^{18}	2.58727×10^{18}	1.55264×10^{19}	TENSIÓN MAXIMA [N/m ²]
Galga extensométrica lineal de 3 meandros cuadrada [Figura 49]	7.69648×10^{10}	1.53935×10^{11}	2.30902×10^{11}	3.07859×10^{11}	
Galga extensométrica lineal de 2 meandros redondos [Figura 50]	7.63661×10^{10}	1.52732×10^{11}	2.29100×10^{11}	3.05467×10^{11}	
Galga extensométrica lineal de 1 meandro redonda [Figura 51]	6.85318×10^{10}	1.37060×10^{11}	2.05592×10^{11}	2.74127×10^{11}	

Fuentes: Autoría propia.

En la Tabla 40, se puede evidenciar los resultados obtenidos de una galga extensométrica lineal con bordes cuadrados, con material de sustrato papel y su rejilla y electrodo de plata con una fuerza de 8N, esta fuerza fue aplicada en distintos puntos de las galgas extensométricas lineal para con ello poder analizar los respectivos resultados obtenidos en el simulador y con ello concluir que efectos se tienen cuando se aplica la respectiva fuerza en distintos puntos de la galga extensométrica.

Tabla 40. Galga extensométrica de 3 meandros cuadrada lineal

Fuerza de 8 N ejercida sobre la galga extensométrica lineal	Resultados de la tensión máxima obtenida [N/m ²]
En toda la superficie de la galga extensométrica	3.16320×10^{11}
En un meandro de la galga extensométrica	3.71304×10^{11}
En un determinado punto de la galga extensométrica	6.58292×10^{11}
En el sustrato de la galga extensométrica	2.94876×10^{11}

Fuente: Autoría propia.

Frente a los resultados obtenidos en la Tabla 38, se observa que a mayor área de aplicación de la respectiva fuerza se tiene una menor tensión sobre un área específica, con esto, se puede decir que la galga extensométrica de 3 meandros lineal con bordes cuadrados tiene una mayor deformación cuando se le ejerce una fuerza en su superficie total. Del mismo modo, cuando se ejerce una fuerza en el sustrato, se evidencia que se tiene una menor tensión sobre el área que cuando se le ejerce una fuerza sobre la superficie de la rejilla, teniendo como análisis que, si le aplica una fuerza sobre el sustrato, da como resultado que la galga extensométrica lineal tiende a tener una mayor deformación con la respectiva fuerza ejercida y con ello una mayor sensibilidad frente a las deformaciones a medir.

Adicionalmente, con los datos registrados en la Tabla 40, se evidencia que para tener una mayor sensibilidad en las mediciones de las galgas extensométricas lineal de 3 meandros, lo óptimo es tener una fuerza la cual afecte la totalidad de la superficie de la respectiva galga, para así obtener la menor tensión posible, ya que como se ha visto, estas fuerzas (tensión N/m^2) se oponen a la fuerza aplicada dificultando la deformación y con ello la sensibilidad de la respectiva galga extensométrica lineal.

13. TRABAJOS FUTUROS

Se propone que los estudios consecuentes, frente a la miniaturización de la galga extensométrica lineal sea la fabricación del mismo, con base a esto realizar un enfoque correspondiente a:

- Técnicas de fabricación existentes en la tecnología MEMS
- Escoger una aplicación frente a todas las existentes en la industria de estas galgas extensométricas lineales (ej. biomedicina) y realizar dicha aplicación para posteriormente obtener la adquisición de datos y con ello el respectivo análisis de los datos obtenidos.
- Hacer una actualización frente a tendencias de materiales, parámetros, tecnologías, entre otras, para con ello hacer una posible optimización del sensor con la tecnología existente para ese entonces.

14.CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Grado se propuso como objetivo principal lograr diseñar galgas extensométricas lineales utilizando tecnología M.E.M.S para reducir el impacto de factores externos como la temperatura y la presión, para ello, se desarrollaron tres etapas que contribuyeron asertivamente en el cumplimiento de dicho objetivo, sin dejar de lado, las especificidades que giran en torno a él.

De esta manera, a continuación, se presentarán las etapas y las metas cumplidas en cada una de ellas:

Etapa 1. Sustratos y materiales: durante esta etapa se trabajaron diversos materiales para el sustrato como la poliamida y el papel, al realizar las pruebas se observó que la poliamida es un material muy rígido que genera muchas perturbaciones cuando se somete a presión; contrariamente, el papel es un material que tiene un buen comportamiento en presión y temperatura.

Adicionalmente, se logró realizar un estudio del comportamiento de los materiales para los meandros, ente los que se pudo encontrar la plata, que mostró un comportamiento poco satisfactorio en la temperatura y en los materiales (sustrato de papel y meandros en plata o grafeno).

Etapa 2. Selección del diseño: en el desarrollo de esta etapa se realizaron diferentes diseños y se elaboraron variaciones de los mismos en sus geometrías (número de meandros con bordes cuadrados o redondos).

Etapa 3. Análisis del diseño: esta sin duda alguna, fue la etapa más importante, ya que se realizaron las simulaciones de variación de temperatura y fuerza aplicadas al diseño, todo esto, a partir de las diferentes geometrías escogidas y las variaciones de los materiales, a los cuales se les realizó una serie de simulaciones en donde se varió la temperatura de 26.85°C a 226.85°C y se observó el comportamiento de los materiales de las galgas extensométricas lineales

Igualmente, se aplicaron fuerzas de 2,4,6 y 8 N y se analizó el comportamiento de las galgas extensométricas lineales propuestas, teniendo en cuenta el módulo Young para determinar cuánta ha sido la deformación o el efecto mecánico antes de que se genere una fractura en el material, y de esta forma, determinar cuál tuvo un mejor rendimiento al ser sometido a los efectos mecánicos.

Ahora bien, durante el desarrollo del Proyecto de Grado se consiguió dar respuesta a los objetivos específicos propuestos de la siguiente manera: en primer lugar, se logró realizar la recopilación de información sobre los fenómenos físicos y mecánicos, en bases de datos tales como Proquest y ScienceDirect, donde, los resultados fueron analizados en los Software Vosviewer y Vantage Point.

En estos, fueron evidentes los parámetros y variables físicas, mecánicas y materiales de mayor tendencia en los últimos cinco años, dentro de las aplicaciones relacionadas con la tecnología M.E.M.S, lo cual fue de gran importancia para poder obtener el conocimiento de cuáles son las tendencias frente a materiales y

parámetros a tener en cuenta al momento de realizar un diseño de una galga extensométrica lineal. De la misma forma, se pudieron ver los diversos campos de aplicación de este tipo de transductor, así como se conoció cuáles son los países que más investigación realizan en este campo, dando como resultado que el tema en cuestión no es campo muy amplio de estudio en este continente.

En segundo lugar, se realizó la evaluación de diversas geometrías de diseño para las galgas extensométricas lineales, empezando con geometrías de 1,2,3 y 5 meandros con bordes cuadrados y redondos, sustrato de papel y meandros de plata y grafeno, donde se ejecutaron las variaciones de temperatura y fuerza en el ambiente de simulación. Entre estas geometrías evaluadas, se encontró que la geometría de 3 meandros con bordes cuadrados fue la que mejor comportamiento tuvo al ser expuesta a variaciones en la temperatura, ya que disipa de mejor forma la temperatura en el material de los meandros.

Con lo anterior, se evidenció que con los datos obtenidos de la galga extensométrica lineal de tres meandros es superior frente a las demás geometrías propuestas en el presente trabajo de Grado, puesto que tiene mejor comportamiento mecánico y eléctrico cuando es sometida a factores externos como presión y temperatura. Dado esto, al ser observados estos materiales con mejor desempeño frente a las afectaciones de los respectivos factores externos, el Grafeno fue superior a la plata teniendo en cuenta sus propiedades eléctricas y mecánicas, las cuales tienen grandes ventajas en relación con el flujo de electrones, oxidación, conductividad térmica, entre otros. Esto se debe, a la estructura atómica del Grafeno y su configuración electrónica, que al ser más ordenada permite una conducción térmica más eficiente.

Dentro de los problemas encontrados al trabajar en un material como la plata, está presente la fácil oxidación de esta y, por ende, la alteración y la disminución de la eficiencia de los parámetros originales. En tercer lugar, al realizar el cálculo teórico del comportamiento eléctrico y mecánico de los materiales utilizados como la plata y el grafeno usados en los anteriores diseños propuestos, se puede decir que, en cuanto a la variación de la resistencia eléctrica del grafeno y la plata, el primero presenta una mayor variación de su resistencia eléctrica en comparación con los valores generados por la plata.

En lo que respecta a los valores teóricos obtenidos para el Gauge Factor parámetro fundamental de las galgas extensométricas lineales, se encontró que los dos materiales producen valores con un comportamiento lineal, sin embargo, el grafeno presenta un mayor valor dentro de este parámetro. Del mismo modo, al observar los valores obtenidos de forma teórica del comportamiento del Módulo de Young para la geometría de un meandro con bordes cuadrados, se pudo encontrar que para la serie que se trabajó con el valor de deformación unitaria menor, se obtuvieron valores mayores de Modulo de Young en comparación con las demás series, lo que indica que, al deformarse un material en menor cantidad va a tener una menor posibilidad que se generen fracturas en su estructura.

En cuarto lugar, se pudo comprobar que el papel es un aislante térmico, ya que los resultados generados al variar la temperatura en un ambiente de simulación, demuestran que al someterse a temperaturas cercanas a su punto de combustión no logra ser afectado en grandes cantidades en comparación con los materiales como la plata y el grafeno. Ello indica, que es un material apropiado para trabajar en temperaturas variables hasta puntos muy cercanos a su punto de combustión.

Por otro lado, al momento de analizar los materiales utilizados en la rejilla de la galga extensométrica lineal, se pudo evidenciar que el grafeno sobresale en comparación con la plata, pues en las simulaciones se observa que la plata tiene mayores afectaciones respecto al grafeno, lo cual se muestra al comparar los valores de conductividad térmica, donde el grafeno cuenta con 4.000 W(m.K) y la plata 490 W(m.K).

Al analizar las simulaciones realizadas donde se varió la fuerza a la que es sometida la galga extensométrica lineal, se tiene que, a mayor cantidad de meandros este transductor tiende a ser más rígido, lo que indica que la tensión máxima disminuye directamente proporcional a la cantidad de meandros.

En cuanto a los valores de Gauge Factor, se obtuvo que en la galga extensométrica lineal de tres meandros con bordes cuadrados, se genera una mayor deformación cuando se le ejerce una fuerza en su superficie total, lo cual indica que al momento de ser implementadas se debe tener en cuenta que la deformación se encuentre ubicada en la mayor cantidad de superficie posible y, de este modo, poder conseguir la mayor sensibilidad posible de la galga y, por ende, obtener valores más acertados en las mediciones.

Finalmente, el desarrollo de este trabajo de Grado permitió el ingreso del diseño de dispositivos en escala de micras mediante la implementación de tecnología M.E.M.S, como una nueva área de estudio en la Universidad Católica de Colombia, puesto que es un trabajo con un gran componente de innovación, que aporta al crecimiento investigativo de este campo en el país. Igualmente, lo que se pretende, es abrir la posibilidad de llegar a la fabricación de estos dispositivos, que pueden llegar a contribuir en los distintos campos de aplicación.

15. BIBLIOGRAFÍA

ALTAIR HYPERWORKS. FEKO Overview [En línea]. Altair Hyperworks. (s, f). Disponible en la web: < <https://altairhyperworks.com/product/FEKO> >

ANSYS. Systems [En línea]. Ansys. (s, f). Disponible en la web: < <https://www.ansys.com/es-es/products/systems> >

BEISER, Arthur. Elasticidad. En: Física Aplicada. 2 ed. México D, F: Mc Graw-Hill, 1991. 415 p. Disponible en: ProQuest Ebook Central.

BENÍTEZ, Rafael. Cómo desarrollar una estrategia de comunicación en 8 pasos. En Todo muy singular. Marketing Digital, People Analytics, Algo de Psicología y curiosidad por un tubo...Disponible en la web : < <http://www.benitezrafa.es/como-desarrollar-una-estrategia-de-comunicacion-en-8-pasos/> >

CISCAR, Vincent. (s,f). Galgas extensométricas. En: Info PLC. Net- Automatización Industrial, Robótica e industria 4.0. Disponible en la web: < http://www.infopl.net/files/documentacion/instrumentacion_deteccion/infoPLC_net_Galgas_extensometricas.pdf >

CUELLAR, Ana. Diseño y fabricación de un sensor para el monitoreo de presión intraocular. Proyecto fin de carrera. Ingeniera Electrónica. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2013. 29 p. Disponible en la web: <https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/200911569_fecha_2014_01_21_hora_22_59_35_parte_1.pdf >

ESQUER, Gabriel. Determinación de la sensibilidad y efectos de agentes externos en galgas extensométricas. Tesis. Maestro en Ingeniería Mecánica. México D.F. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2013. 172 p. Disponible en la web: < <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17813/1/Determinacion%20de%20la%20sensibilidad%20y%20efectos%20de%20agentes%20externos%20en%20galgas%20extensometricas.pdf>>

FERNÁNDEZ, Manés, et al. Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas. 1 Ed. Barcelona: Marcombo. 1998, 368 p.

FERRO, Kevin. Determinación experimental del estado de esfuerzos y deformaciones a través de galgas extensométricas en componentes mecánicos bajo condiciones de servicio. Trabajo de Grado. Ingeniero Mecánico. Bogotá: Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2017. 83 p.

GOMORA, Jesús y RIVERA, Keevyn. Calculo y diseño mecánico de una celda de carga empleada en la medición de empuje para una turbina de gas. Tesis. Ingeniero Mecánico y Eléctrico. México D.F Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2015. 73 p. Disponible en la web: < <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/15409/2159%202015%281%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >

GONZÁLEZ, Juan. Efecto del Contenido de Fibra de Vidrio sobre las Propiedades Mecánicas en Probetas de Polibutilentereftalato (PBT) Reforzado. Trabajo de grado. Ingeniero Industrial. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Industrial, 2013. 120, p. Disponible en la web: < <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4002/pfc5725.pdf;jsessionid=AE29C449F559A91944F1EEA0D1DFE832?sequence=1>>

HONGCHUAN, Jiang, et al. Integrated Temperature and Hydrogen Sensors with MEMS Technology. In Sensors [Base de datos en línea]. Vol. 18, no. 1, p. 1-9. Enero, 2018. Disponible en EBSCOhost.

IDROVO, Pablo & QUINTANILLA, Luis. Aplicación de galgas extensométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas. Tesis. Ingeniero Mecánico. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Facultad de Ingenierías. Carrera de Ingeniería Mecánica, 2010. 168 p. Disponible en la web: <<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4482/1/UPS-CT001920.pdf> >

IGLESIAS, Ignacio. Detección de pisada usando galgas extensométricas. Proyecto Fin de Carrera. Sevilla. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Electrónica, 2016. 89 p. Disponible en la web: <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12328/fichero/Detecci%C3%B3n+de+pisada+usando+galgas+extensom%C3%A9tricas.pdf> >

LÓPEZ, Francisco. Fundamentos de los polímeros. Trabajo de grado. Mérida: Universidad de los Andes Venezuela. Facultad de Ciencias. Departamento de Química. 2004. 64, p. Disponible en la web: <https://www.researchgate.net/publication/262639386_FUNDAMENTOS_DE_POLIMEROS >

MARQUEZ, David y CÁRDENAS, Oscar. Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos. En Revista Ciencia e Ingeniería. Red Universidad de Los Andes, 2006. Vol. 27, no. 3. Disponible en [ProQuest Ebook Central] <<https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioucatolicasp/detail.action?docID=3207299> >

MORENO, María. Diseño e implementación de microposicionadores. Proyecto fin de carrera. Ingeniera Electrónica. Bogotá: Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2015. 28 p. Disponible en la web: <https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/201112111_fecha_2015_01_23_hora_14_22_22_parte_1.pdf >

RUÍZ, Guillermo. Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Tesis. Ingeniero en Electrónica. Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca. Facultad de Ingeniería, 2005. 108 p. Disponible en la web: <http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/9676.pdf >

SOFTWARE SHOP. COMSOL Multiphysics [En línea]. Software Shop. (s, f). Disponible en la web: <<https://www.software-shop.com/producto/comsol-multiphysics> >

STAVROPOULOS, Aphrodite. Continuous Monitoring of Intraocular Pressure from the Sclera. Doctor of Philosophy. Toronto. University of Toronto. Institute of Medical Science, 2013. 172 p. Disponible en la web: <<https://search-proquest-com.ezproxycdc.ucatolica.edu.co/docview/1763860188?accountid=45660> >

VARGAS, Duver y ZAMORA, José. Diseño y simulación de estructuras de sensores de microondas planares para la detección de presencia de glifosato en el agua. Trabajo de Grado. Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Programa de Ingeniería y Telecomunicaciones, 2017. 97 p.

ANEXO A

En el presente documento se realizará la recopilación de parámetros y variables físicas y mecánicas que resultan importantes a tener en cuenta al momento de realizar el diseño de galgas extensométricas. Para la recopilación de esta información se recurre a base de datos tales como: ScienceDirect y Proquest, para luego realizar el respectivo análisis de los resultados obtenidos en la búsqueda, y esto se hace con los Software Vosviewer y Vantage Point.

Se plantearon 3 ecuaciones de búsquedas obteniendo distintos resultados, hubo una ecuación de búsqueda la cual nos brindó una mayor información frente a variables, parámetros, materiales entre otras, y esta ecuación es la presente analizada (strain gauge) AND (micro sensor OR micro transducer) AND (design OR manufacturing) AND (paper OR copper OR silver OR carbon) AND (linear OR double linear). Para iniciar en el análisis de realizo la clasificación por Software para análisis de datos y la respectiva base de datos, esto se hizo con un total de datos de 500, en una ventana de 5 años.

Software para análisis de datos: Vantage Point

Base de datos: ScienceDirect

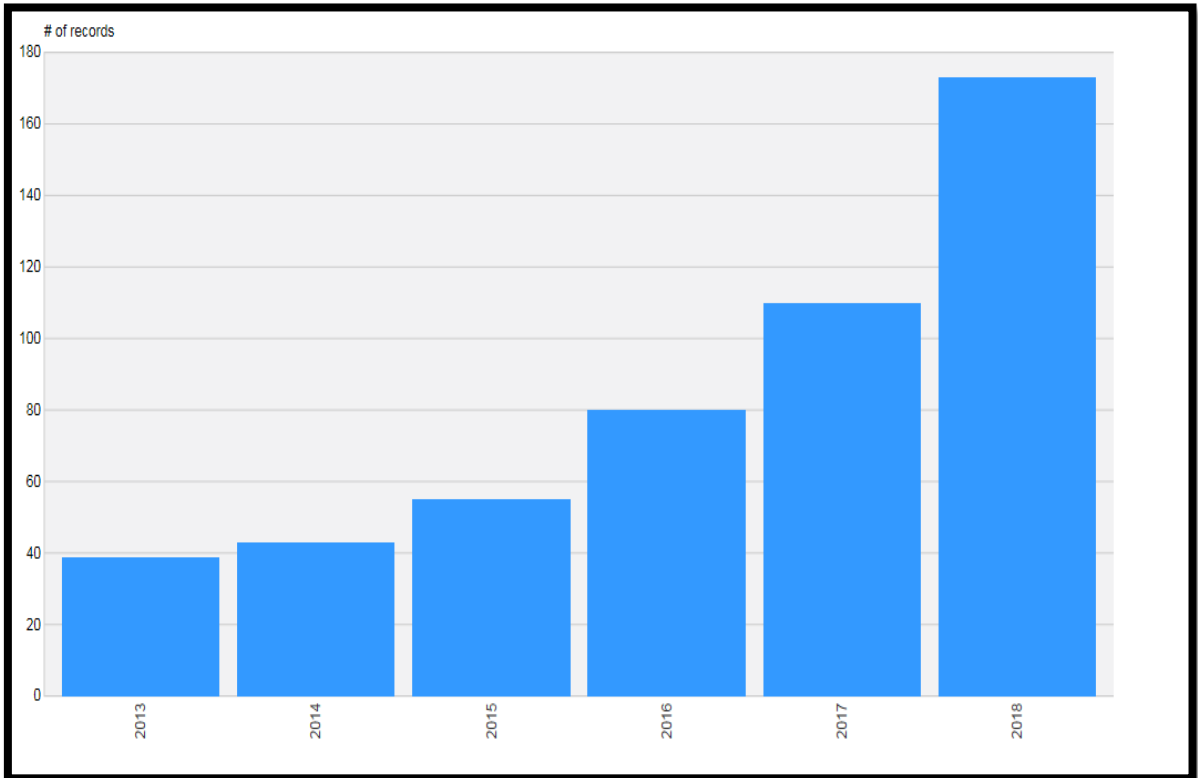
Total de datos: 500

Formato: “.ris”

- **Año de Publicación**

En la Figura 60, se puede evidenciar una tendencia la cual va incrementando a trascurrir los años, por ejemplo para el año 2018 se tiene una mayor cantidad de publicaciones a diferencia de los demás años, con esto se puede digerir que los temas planteados en la ecuación de búsqueda tiene una gran relevancia ya que su tendencia en la actualidad frente a publicaciones es mayor, esto fue obtenido en la base de datos ScienceDirect, para el año 2019 se espera tener una mayor cantidad de publicaciones relacionados con los respectivos temas.

Figura 60. Diagrama de barras de año de publicación ScienceDirect



Software para análisis de datos: Vantage Point

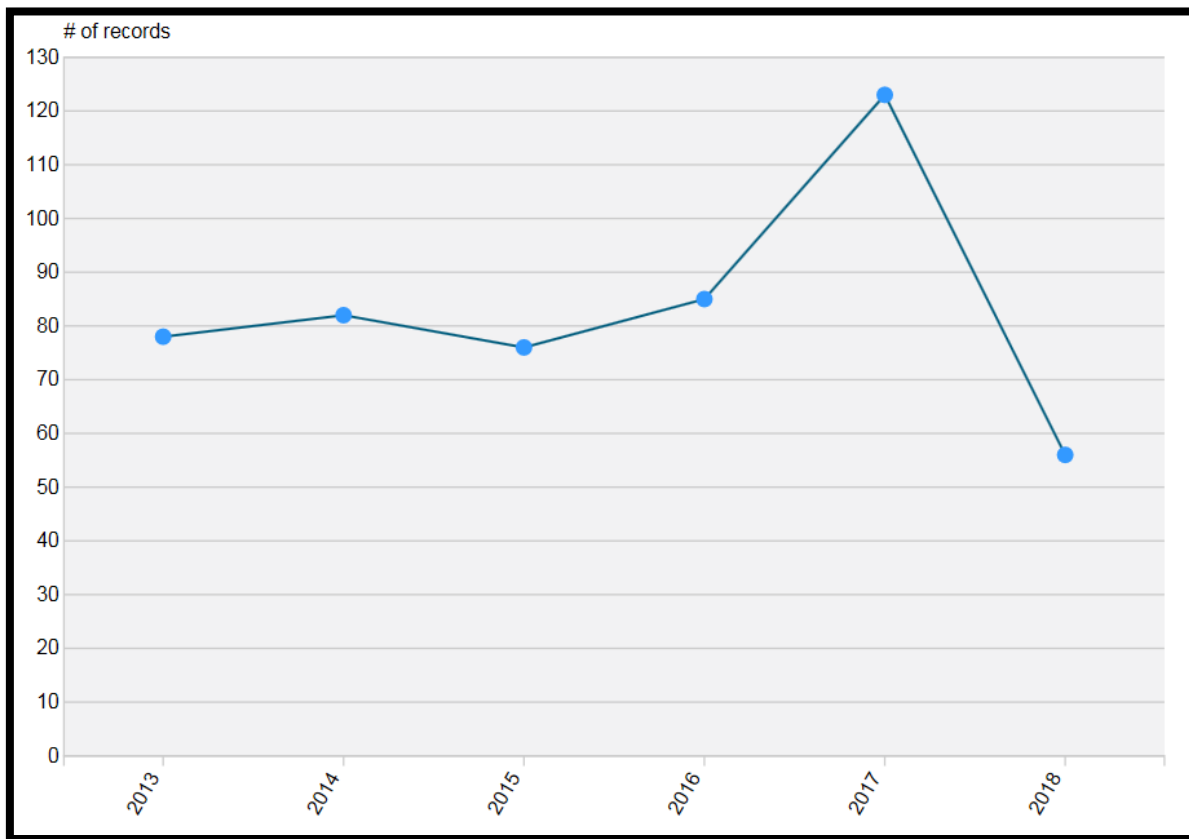
Base de datos: Proquest

Total de datos: 500

Formato: ".ris"

En la Figura 61, podemos apreciar que para el año 2018 se tiene un decremento frente al número de publicaciones, algo contrario con lo que ocurre en la base de datos ScienceDirect, los resultados obtenidos en la Figura 61, fueron obtenidos de la base de datos Proquest, también se puede evidenciar que el número de publicaciones es inferior frente a la base de datos ScienceDirect

Figura 61. Diagrama de líneas de año de publicación Proquest



- **Autores**

Software para análisis de datos: Vantage Point

Base de datos: ScienceDirect

Total de datos: 500

Formato: “.ris”

En la Figura 62, se puede evidenciar los autores con mayor tendencia (los de mayor tamaño), estos son los que hacen mayor número de publicaciones con respecto a los demás (los más pequeños), si se desea entrar más a profundo frente al tema se recomienda los autores evidenciados en la Figura 62, estos actores fueron obtenidos en la base de datos ScienceDirect y se realizó el respectivo análisis en el Software VantagePoint.

Figura 62. Diagrama de sopa de autores ScienceDirect



Software para análisis de datos: Vantage Point

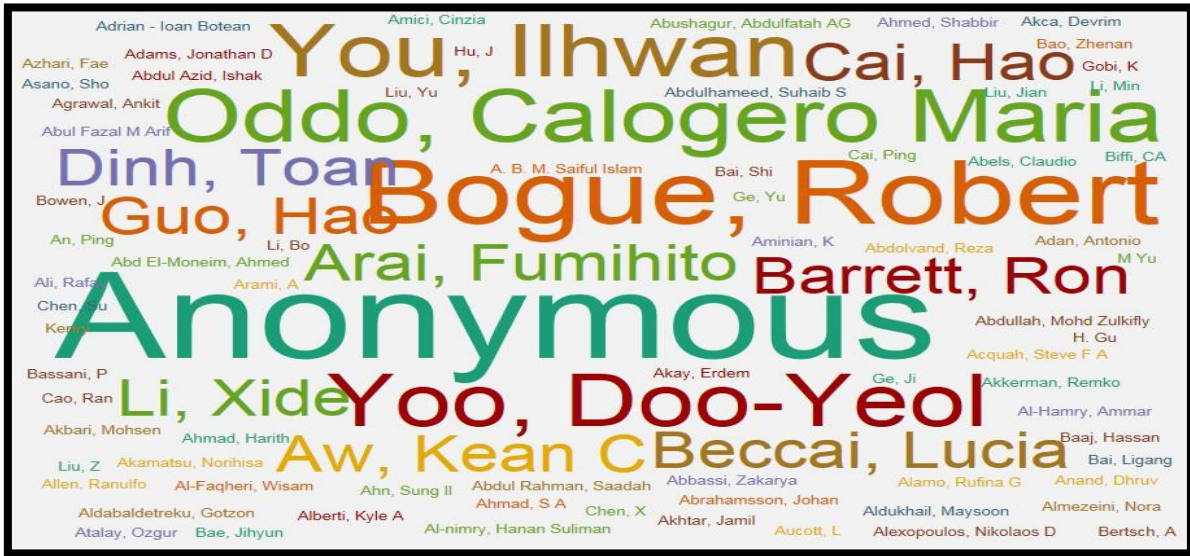
Base de datos: Proquest

Total de datos: 500

Formato: “.ris”

Ahora bien, se hizo la respectiva búsqueda en la base de datos Proquest, obteniendo los resultados en la Figura 63, teniendo como resultado que los autores que aparecen con letra más grande son lo de mayores publicaciones, algo que cabe resaltar es el ANONIMOS, esto genera una cierta desconfianza frente a la información consultada en la respectiva base de datos.

Figura 63. Diagrama de sopa de nombre de autores Proquest



Software para análisis de datos: Vantage Point

Base de datos: ScienceDirect

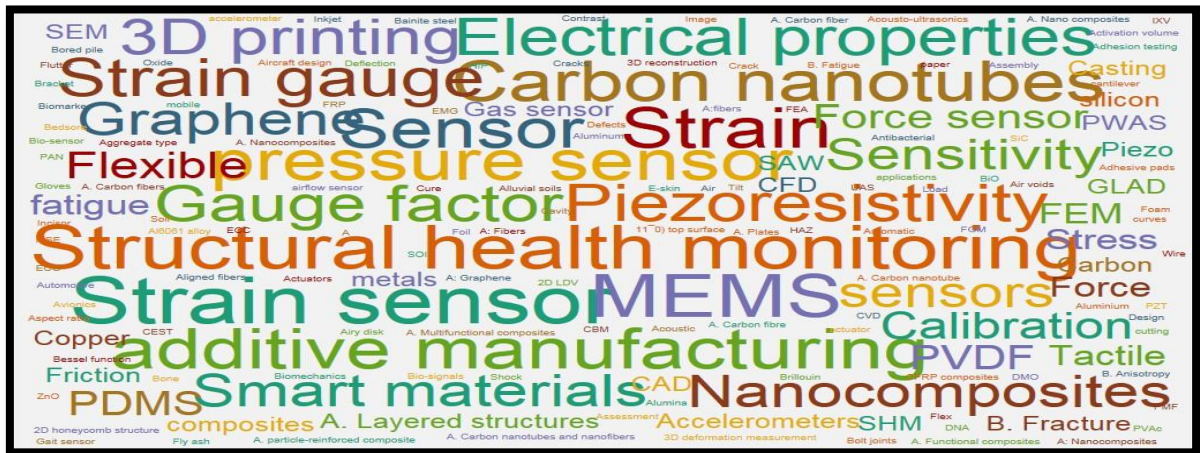
Total de datos: 500

Formato: “.ris”

- **Palabras claves**

En la Figura 64, se puede evidenciar las palabras claves con más relevancia, estas resultan importantes como variables para este proyecto de grado como: presión, flexibilidad, propiedades eléctricas, estrés, MEMS, entre otras, gracias a esto se puede tener una visión frente a la tecnología de la actualidad y cual es tendencia, y con ello poder estar actualizados para innovar y realizar mejoras u optimización de lo existente, esto fue obtenido en la base de datos de ScienceDirect.

Figura 64. Diagrama de sopas de palabras claves ScienceDirect



Software para análisis de datos: Vantage Point

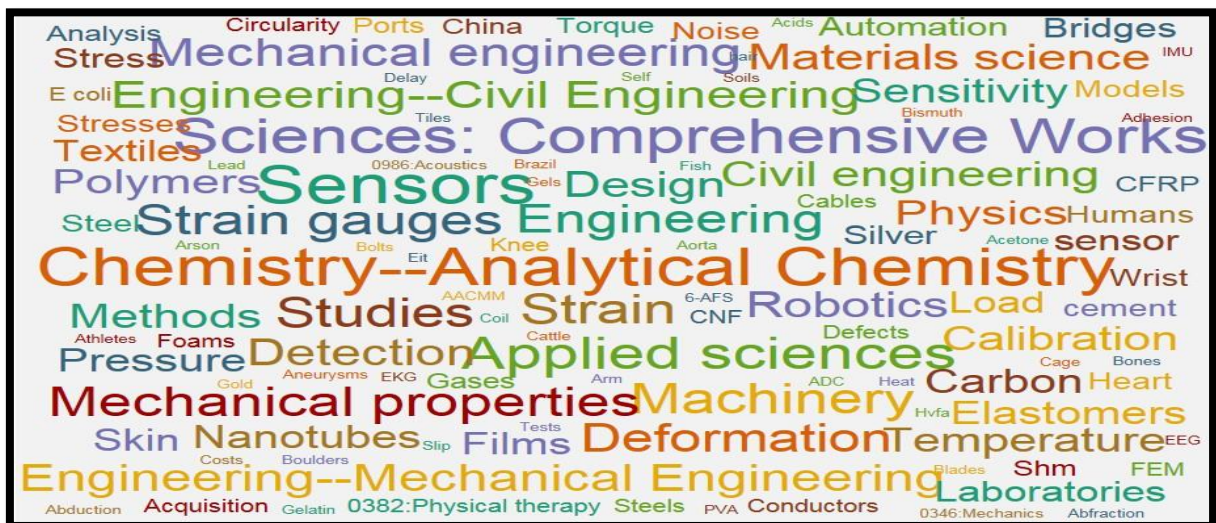
Base de datos: Proquest

Total de datos: 500

Formato: ".ris"

En la Figura 65, se puede evidenciar las palabras claves con más relevancia, estas resultan importantes como variables para este proyecto de grado como: presión, flexibilidad, propiedades eléctricas, estrés, MEMS, entre otras, usadas en el presente proyecto de grado.

Figura 65. Diagrama de sopa de palabras claves Proquest



Fuente: Autoría propia

- Países

Software para análisis de datos: Vantage Point

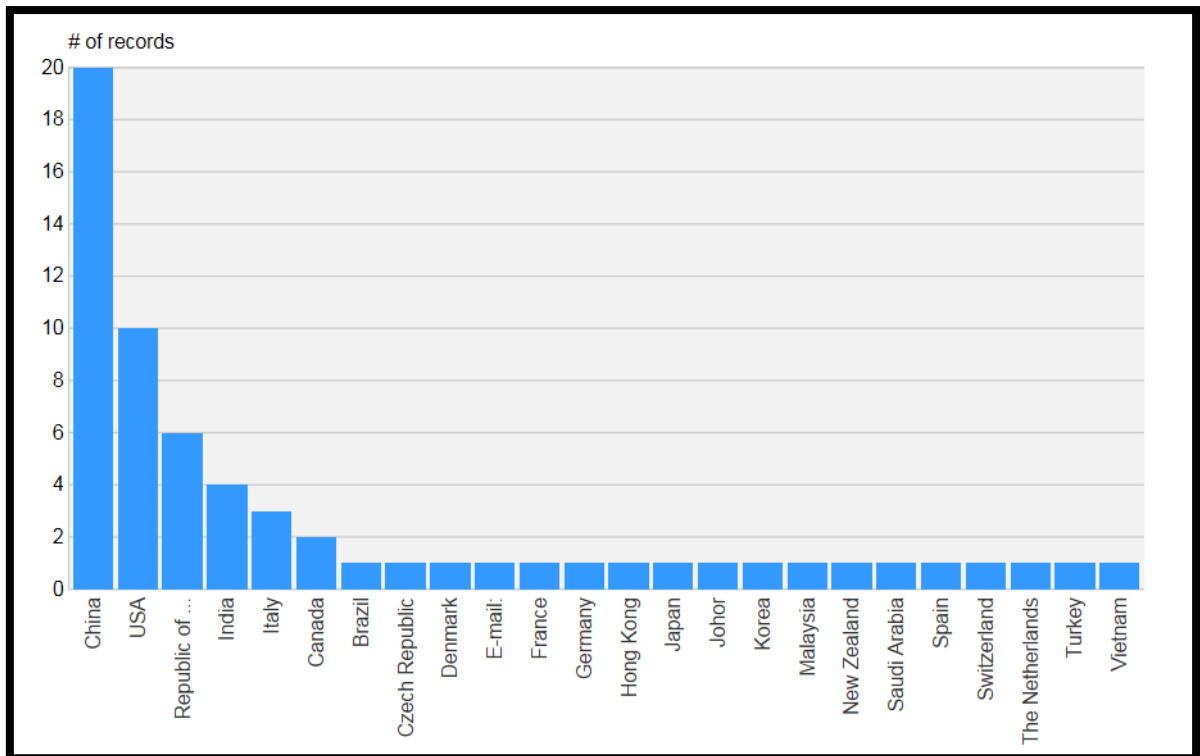
Base de datos: Proquest

Total de datos: 500

Formato: “.ris”

En la Figura 66, se evidencia que China tiene una mayor cantidad de publicaciones respecto a los demás países, por ejemplo, China en comparación con USA que es el segundo país con más publicaciones cuenta con la mitad de publicaciones.

Figura 66. Diagrama de barras de los países con el número de publicaciones Proquest



Fuente: Autoría propia

Software para análisis de datos: Vantage Point

Base de datos: Proquest

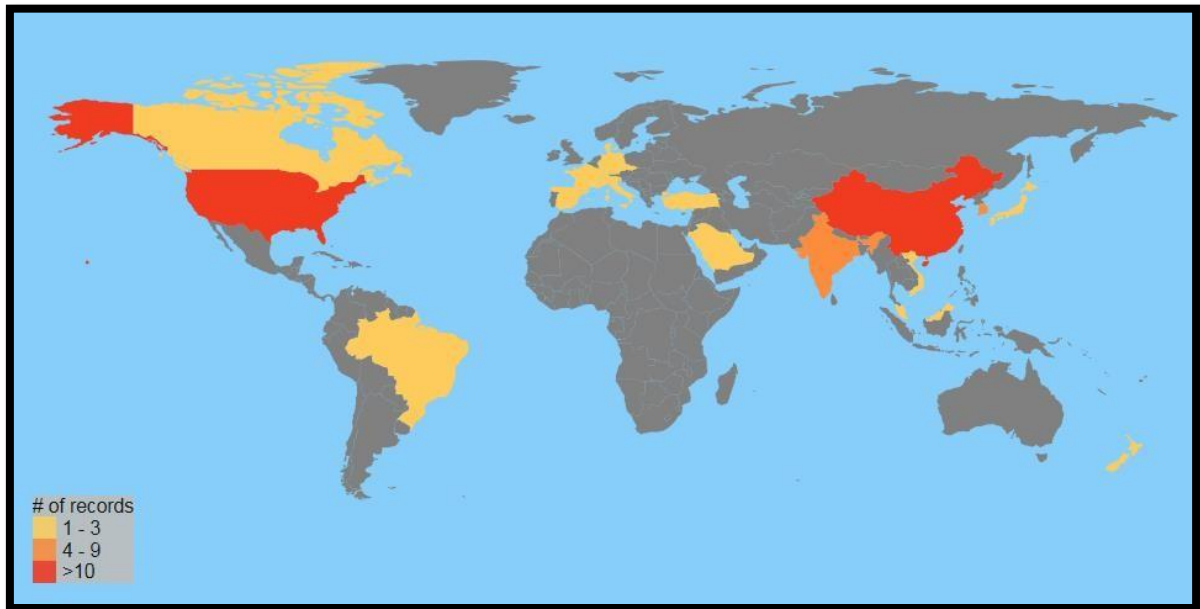
Total de datos: 500

Formato: “.ris”

En la Figura 67, se evidencia que Latinoamérica excepto Brasil, no se tienen publicaciones en la base de datos de Proquest, frente a los respectivos temas planteados en la ecuación de búsqueda lo cual ilustra que en este continente no se

han realizado publicaciones y denota una baja participación en comparación con el resto de países.

Figura 67. Diagrama del mundo con publicaciones



Fuente: Autoría propia

- **Año de publicación vs palabras claves**

Software para análisis de datos: Vantage Point

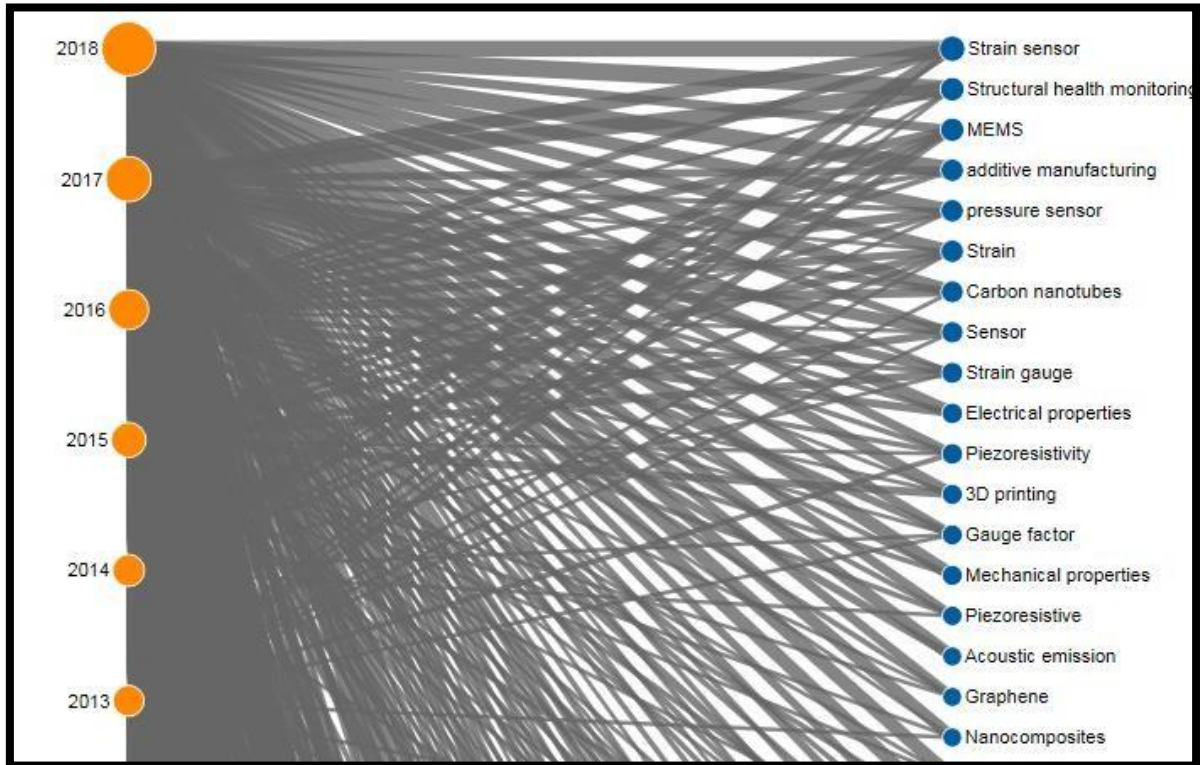
Base de datos: ScienceDirect

Total de datos: 500

Formato: ".ris"

En la Figura 68, se puede observar que las palabras claves encontradas en la base de datos son importantes ya que muchas de estas están implementadas en el presente trabajo de grado (Ej: MEMS, propiedades mecánicas, piezorresistivo, sensor de presión, entre otras).

Figura 68. Palabras claves frente a los años de publicación ScienceDirect



Fuente: Autoría propia

Software para análisis de datos: Vantage Point

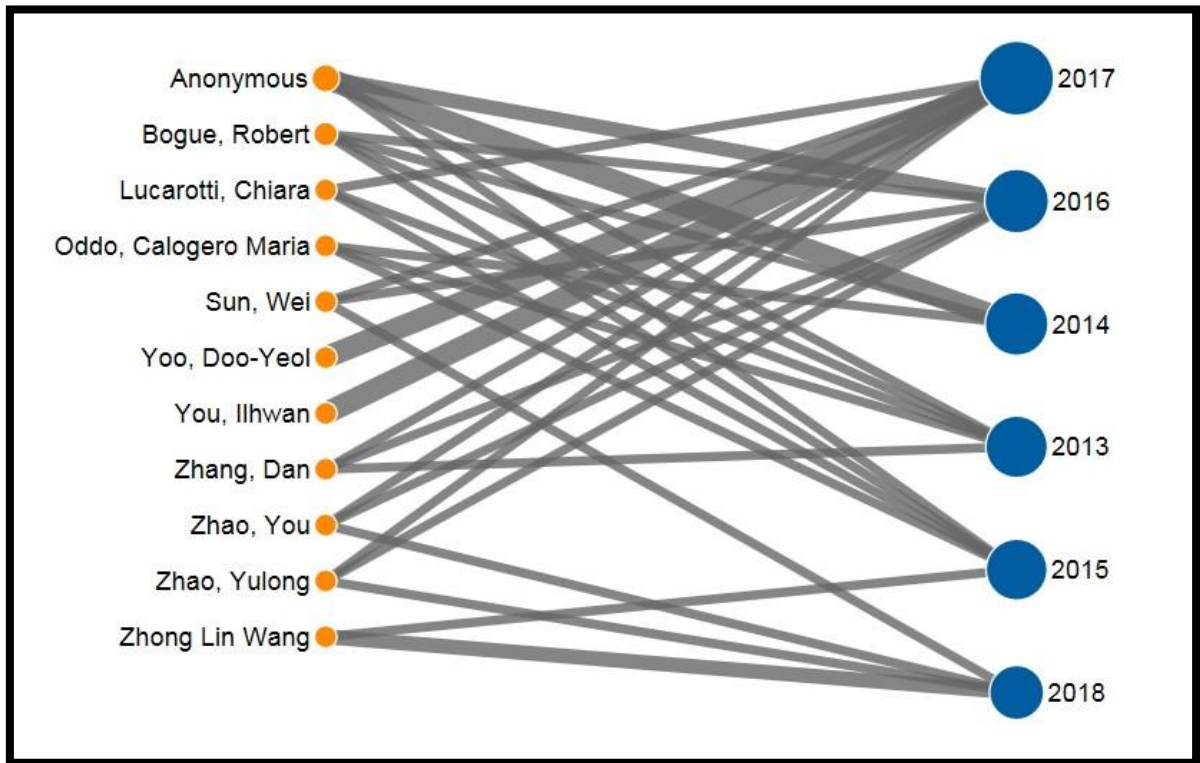
Base de datos: Proquest

Total de datos: 500

Formato: ".ris"

En la Figura 69, de la base de datos de Proquest se puede evidenciar los autores que tiene una cantidad de publicaciones mayor a 3 (>3) de igual manera para ScienceDirect, los cuales resultan importantes para tener una mayor fijación en sus publicaciones.

Figura 69. Diagrama de autores frente a los años de publicaciones Proquest

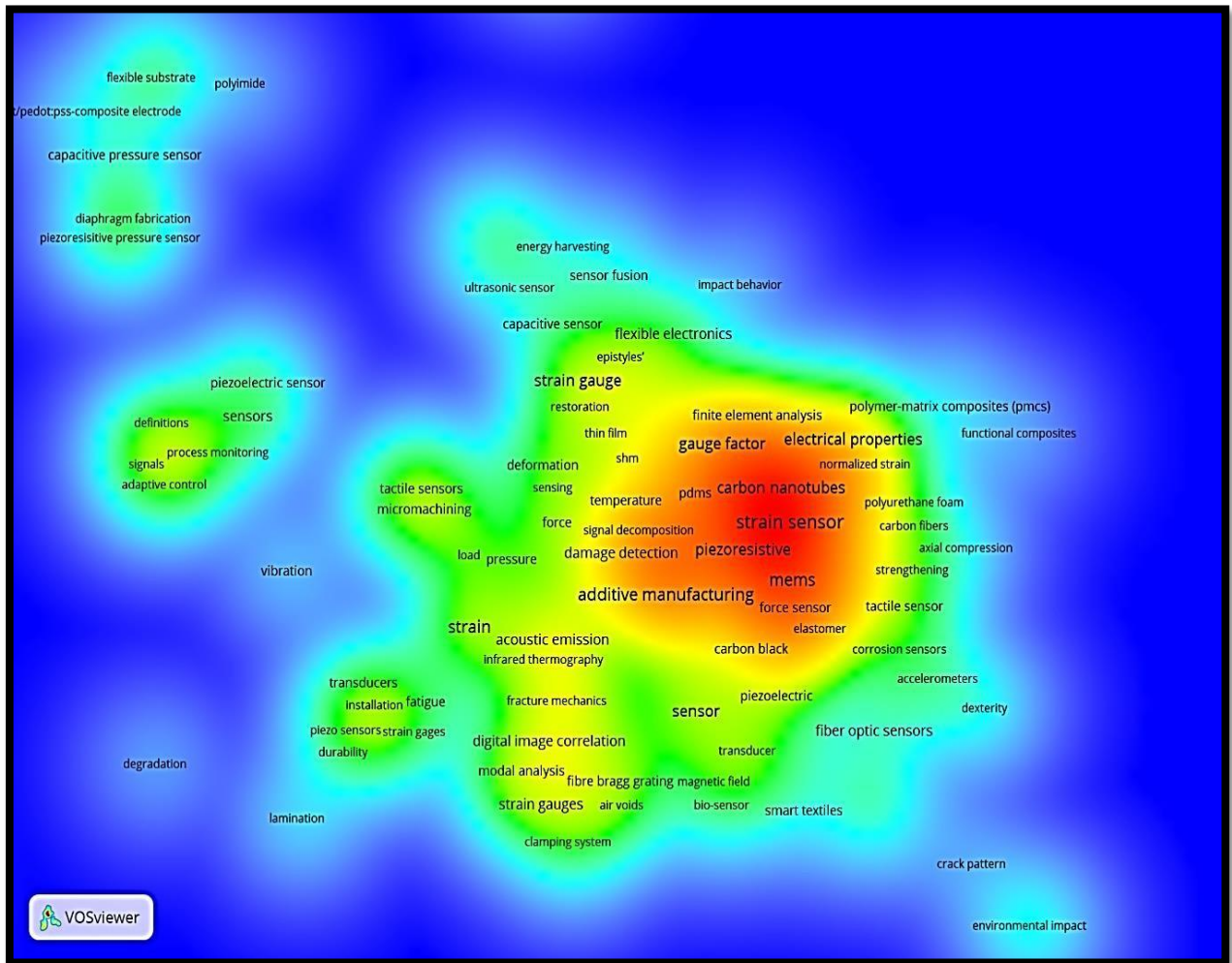


Fuente: Autoría propia

En los siguientes Figuras se podrá evidenciar los análisis de las búsquedas realizadas en las respectivas bases de datos, esto se hace con el Software Vosviewer.

Característica: Resumen en la Figura 70, se utilizó el tipo de análisis estadístico por “Co-Ocurrencia” y método de conteo “Conteo total”, se seleccionó la opción Densidad de Calor. En la Figura 70, se puede evidenciar palabras que sobresalen y se relacionan a las demás como: MEMS, sensor fuerza, deformación, temperatura, piezorresistividad etc.

Figura 70. Diagrama de palabras claves ScienceDirect



Fuente: Autoría propia

Característica: Resumen En la Figura 71, se utilizó el tipo de análisis estadístico por “Co-ocurrencia” y método de conteo “Conteo total”, se seleccionó la opción de Visualización de Calor.

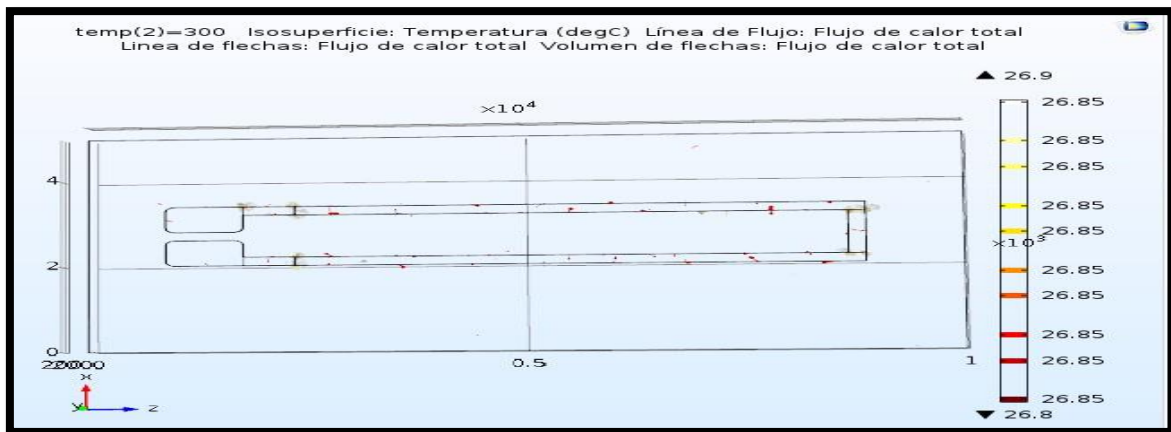
En la Figura 71, podemos evidenciar palabras que se relacionan y resaltan a las demás como: micro, piezorresistividad, optimización entre otras, las cuales están color rojo, lo cual quiere decir que se tienen una mayor relación frente a la ecuación de búsqueda con mayor número de citas.

ANEXO B

Simulación de galgas extensométricas lineales con geometrías de 1,2,3 y 5 meandros con bordes cuadrados, 1,2 y 5 con bordes redondos y 5 bordes triangulares a las cuales se realizó una variación de temperatura de 26.9 °C a 226.85 °C en el ambiente de simulación de COMSOL MULTIPHYSICS.

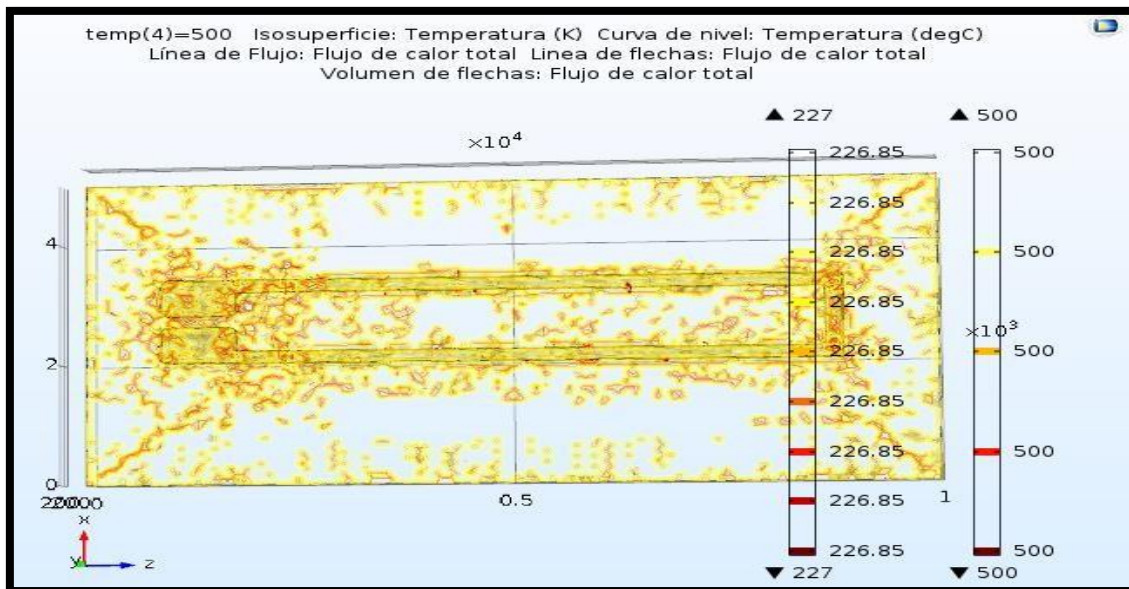
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 1 MEANDRO CON BORDES CUADRADOS

Figura 72. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 73. Temperatura 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

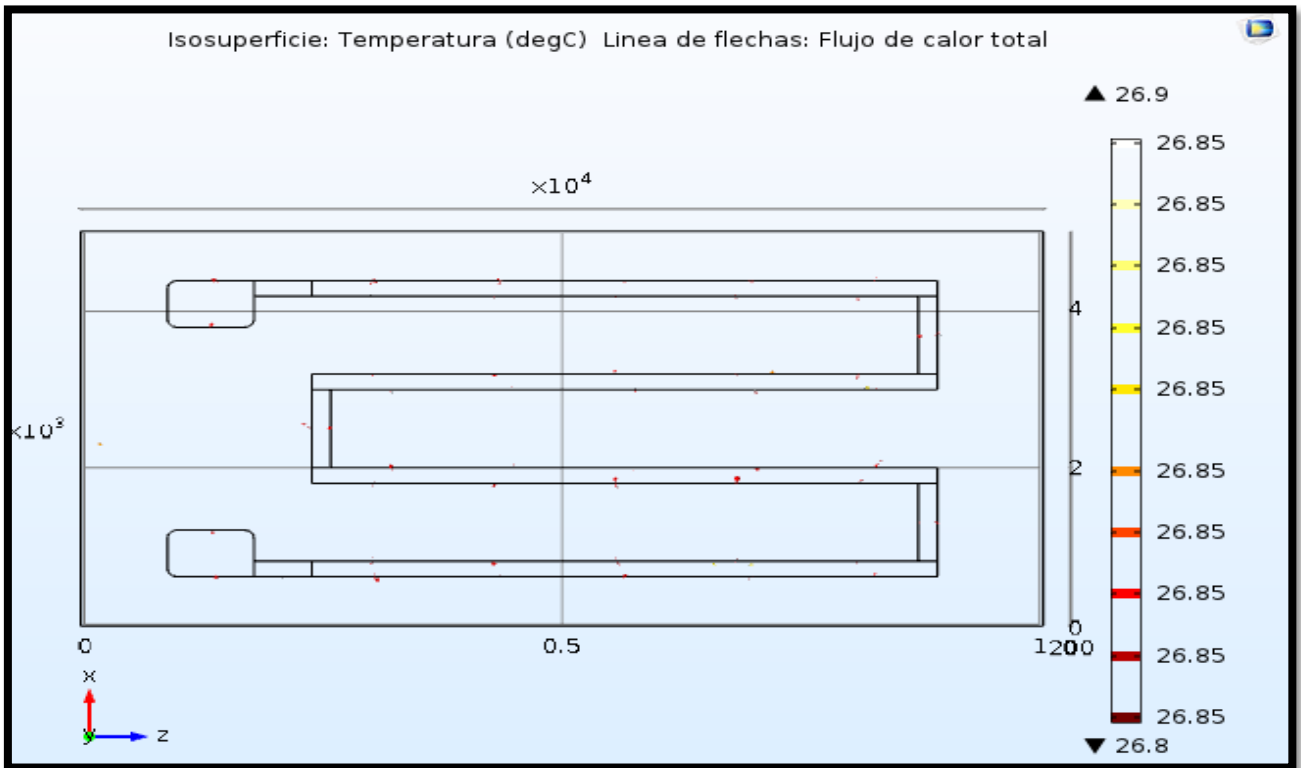
Tabla 41. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados

Geometría	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
1 meandro con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados	Plata y papel con grandes afectaciones por los efectos de la temperatura

Fuente: Autoría propia.

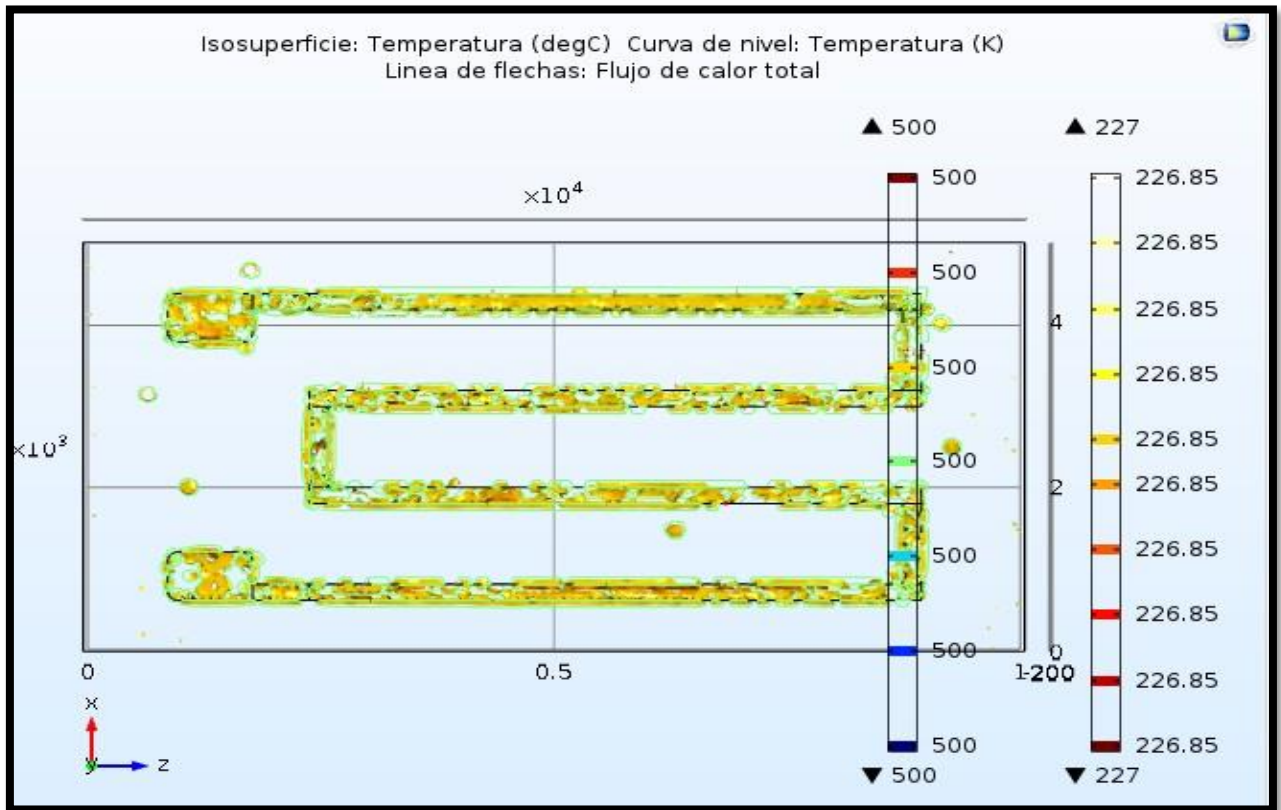
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 2 MEANDROS CON BORDES CUADRADOS

Figura 74. TEMPERATURA DE 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 75. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

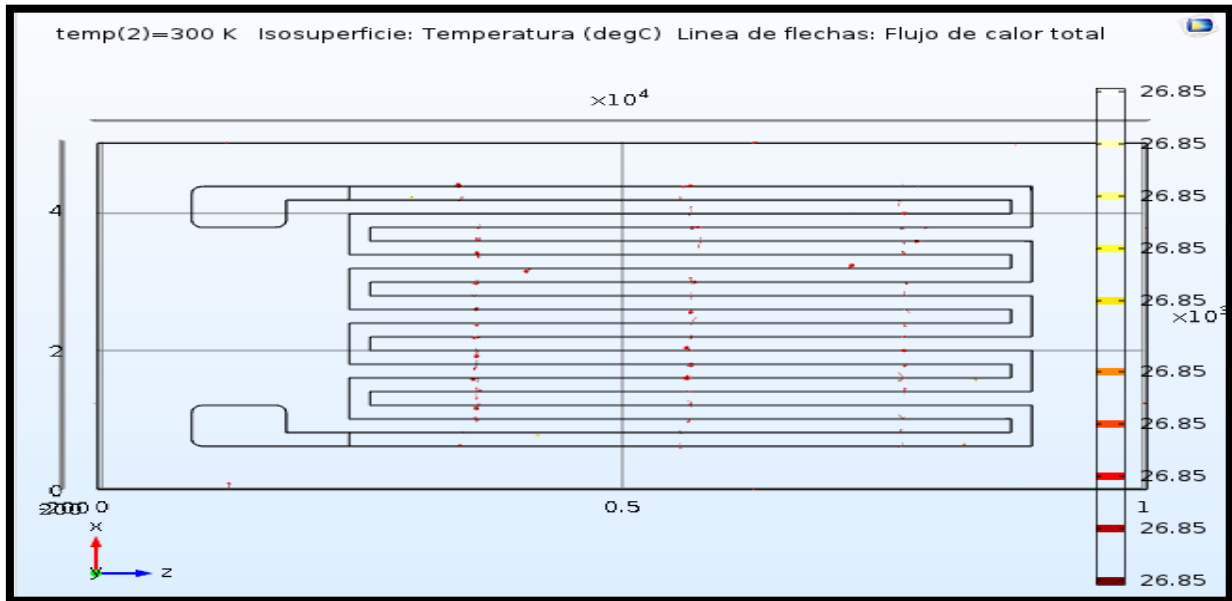
Tabla 42. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 2 meandros con bordes cuadrados

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
2 meandros con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufre afectaciones y plata con grandes afectaciones por los efectos de la temperatura

Fuente: Autoría propia.

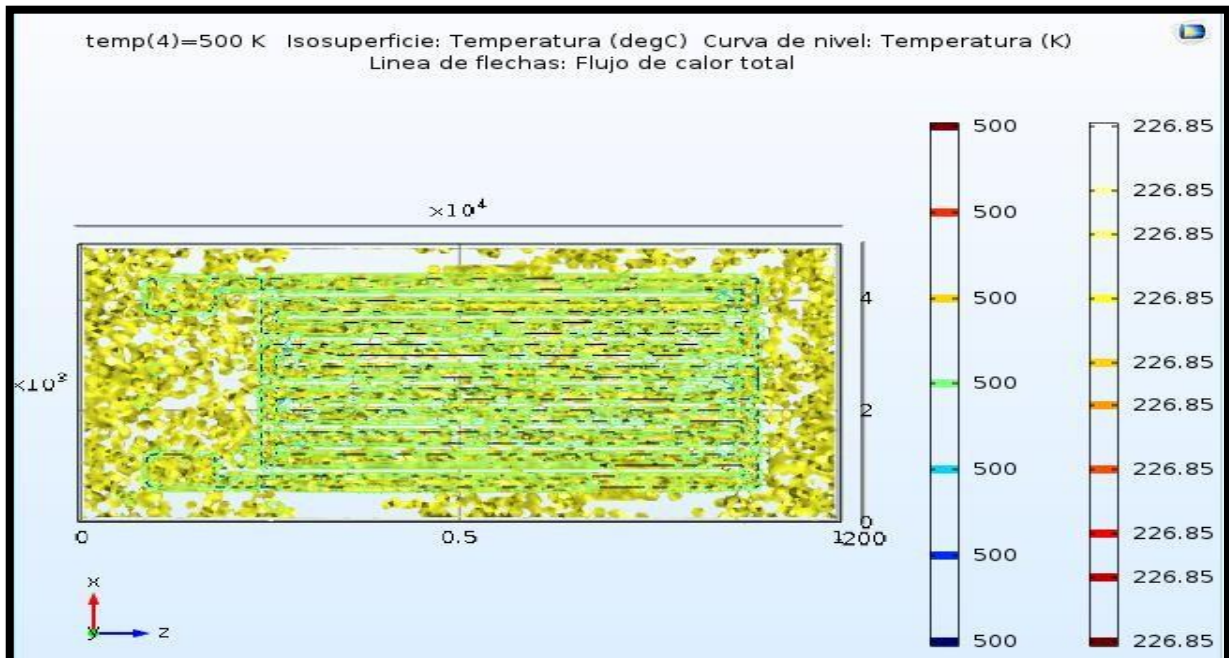
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 5 MEANDRO CON BORDES CUADRADOS

Figura 76. RANGO DE TEMPERATURA 26.85 °C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 77. RANGO DE TEMPERATURA 226.85 °C.



Fuente: Autoría propia.

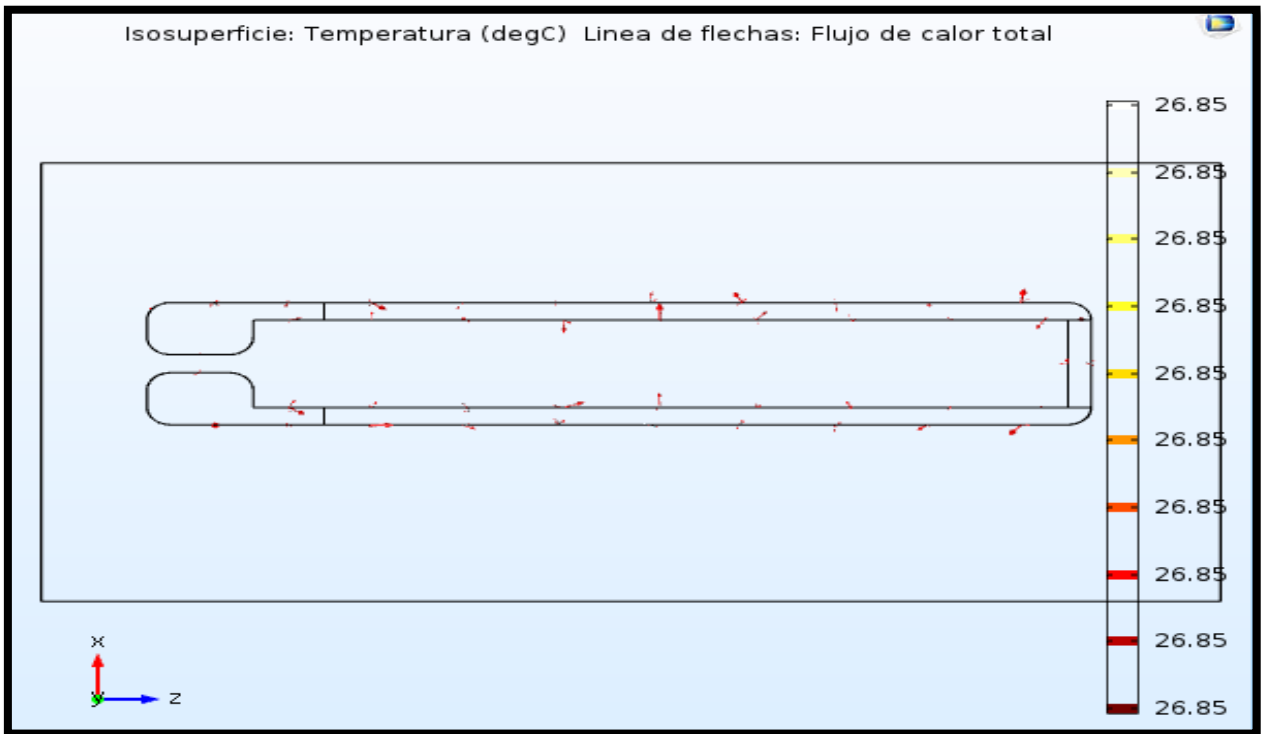
Tabla 43. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes cuadrados

Geometría	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
5 meandros con bordes cuadrados	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Plata y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

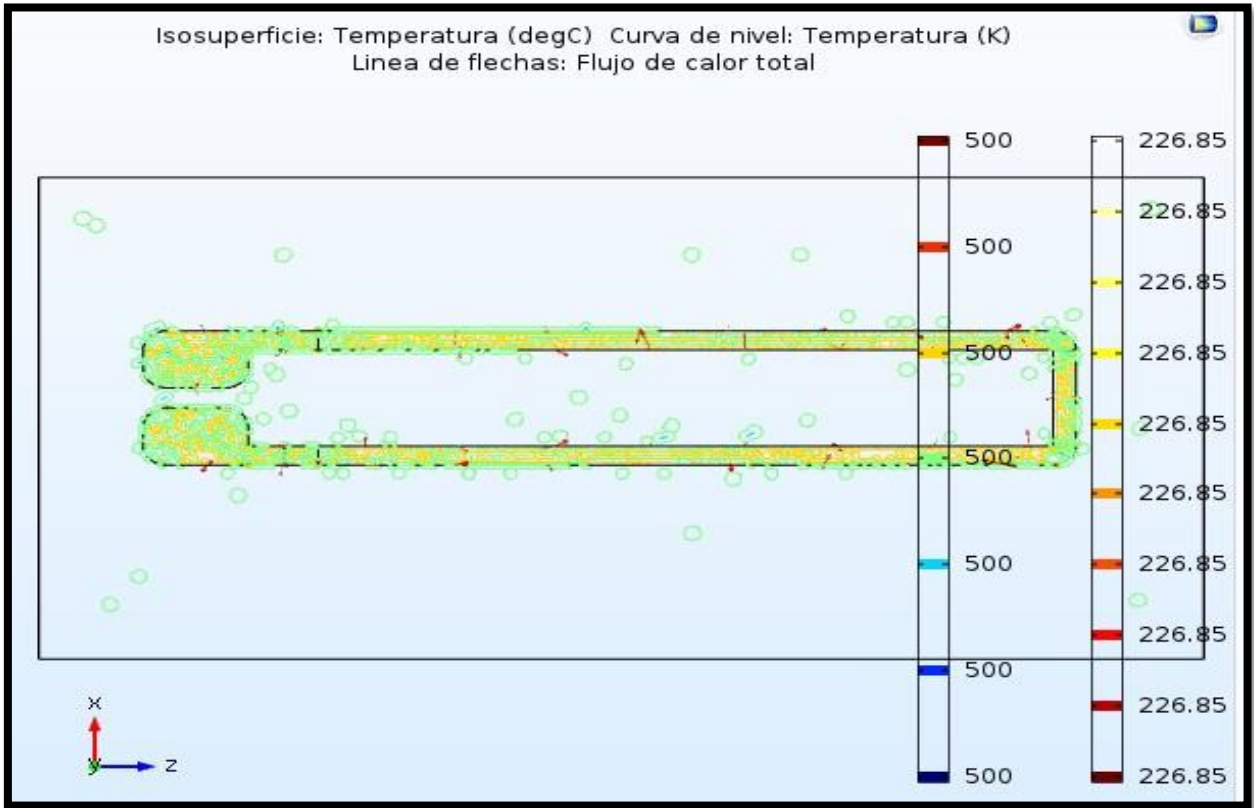
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 1 MEANDRO CON BORDES REDONDOS

Figura 78. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 79. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

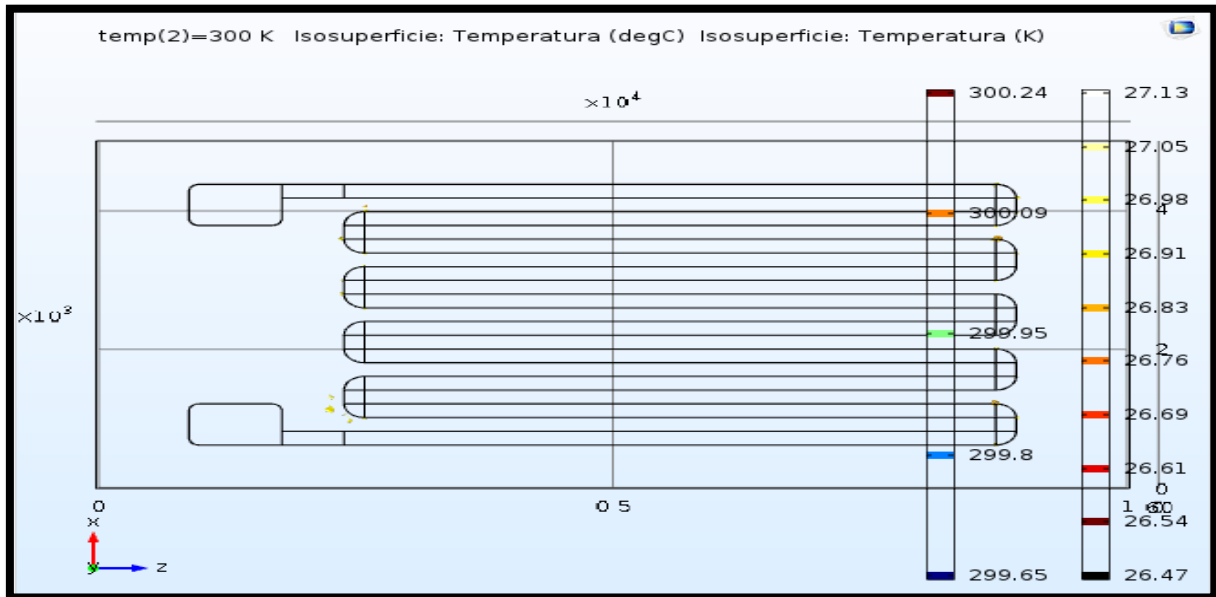
Tabla 44. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes redondos.

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
1 meandro con bordes redondos	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufren afectaciones y plata sufre afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

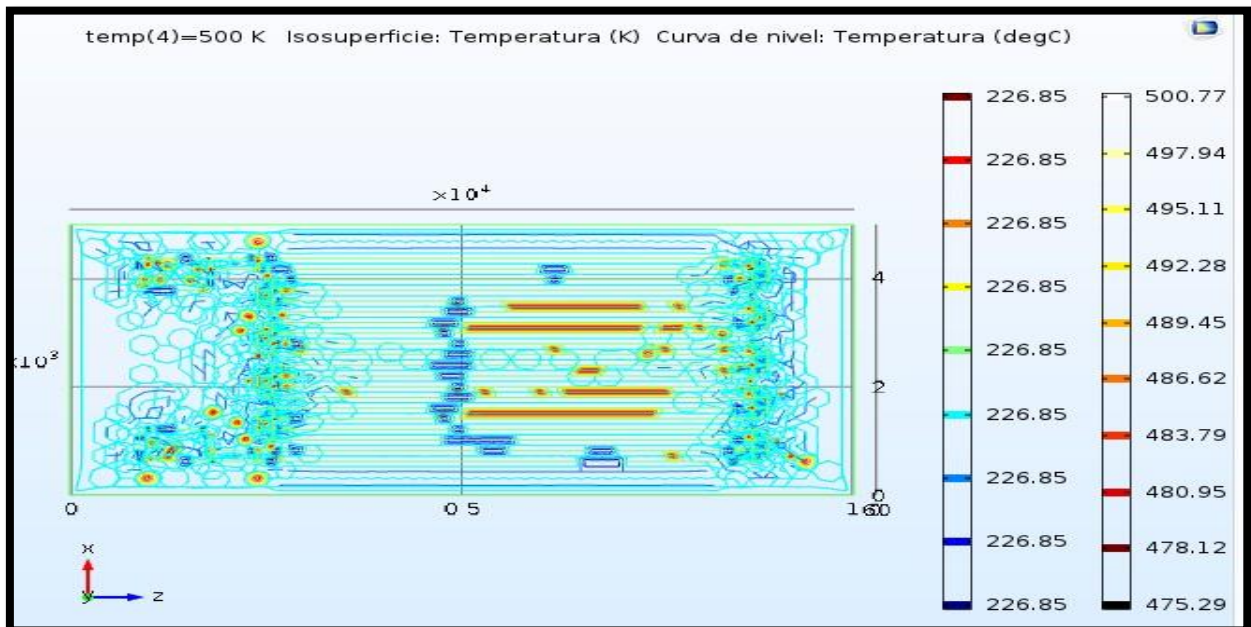
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 5 MEANDROS CON BORDES REDONDOS

Figura 80. RANGO DE TEMPERATURA 27.13°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 81. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

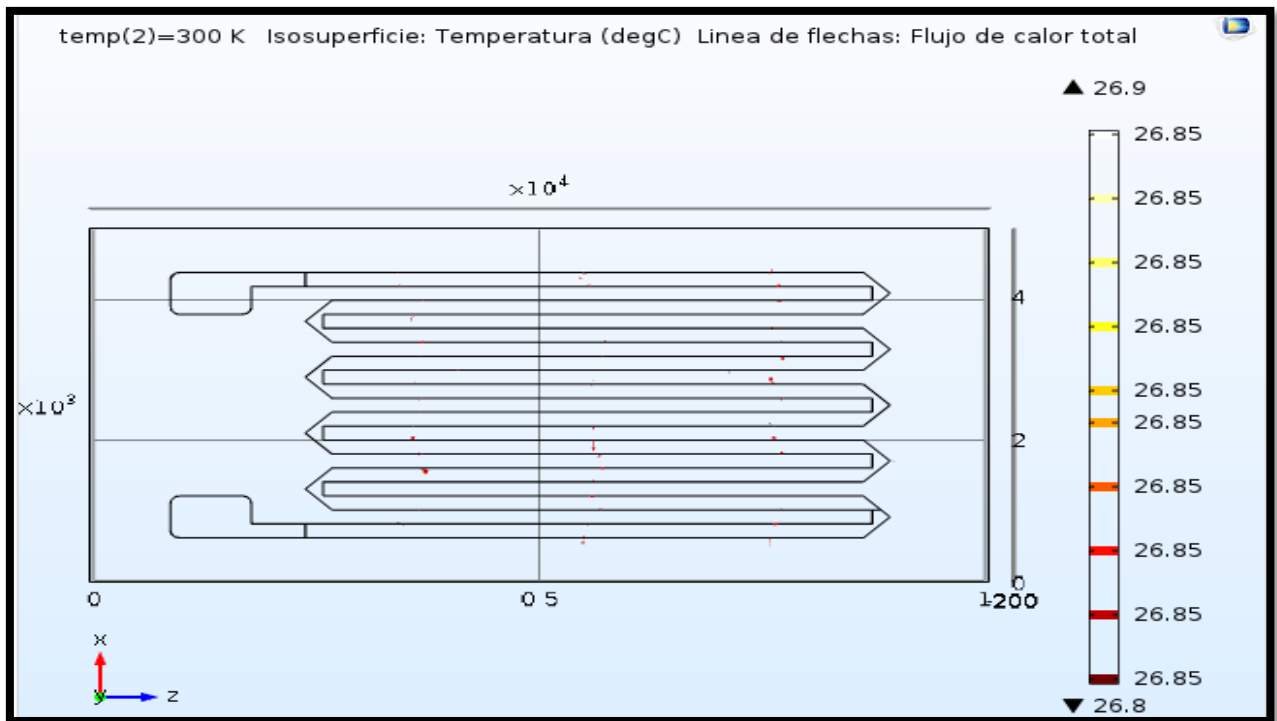
Tabla 45. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes cuadrados.

Geometría	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
5 meandros con bordes redondos	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Plata y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

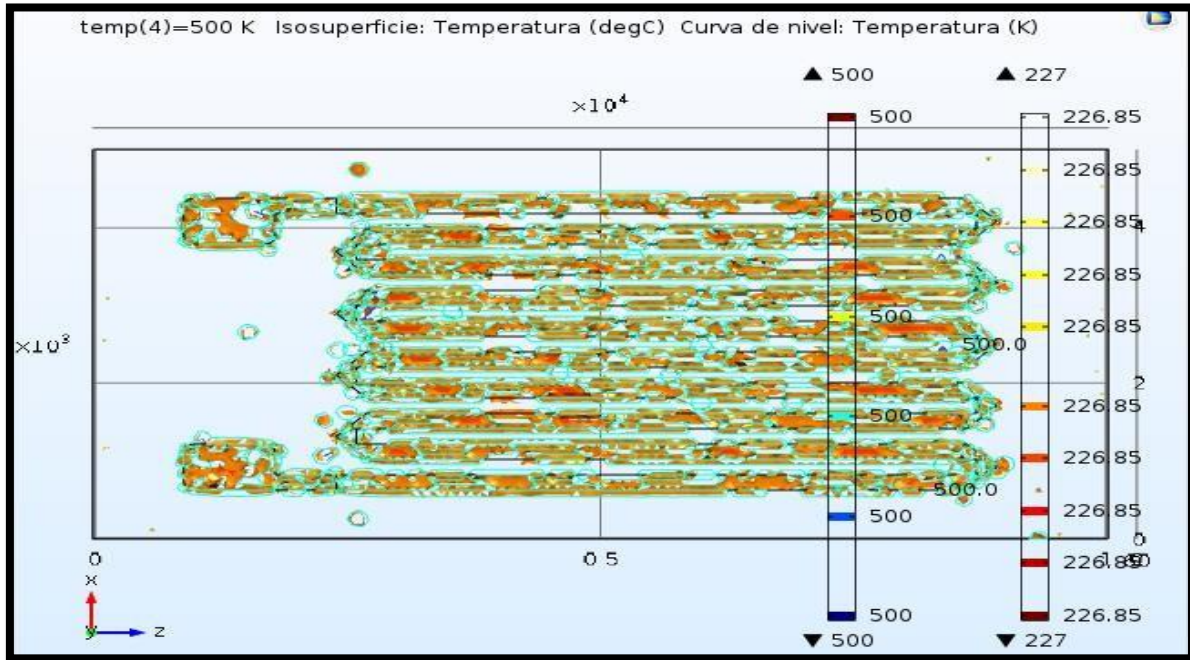
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 5 MEANDROS CON BORDES TRIANGULARES

Figura 82. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 83. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

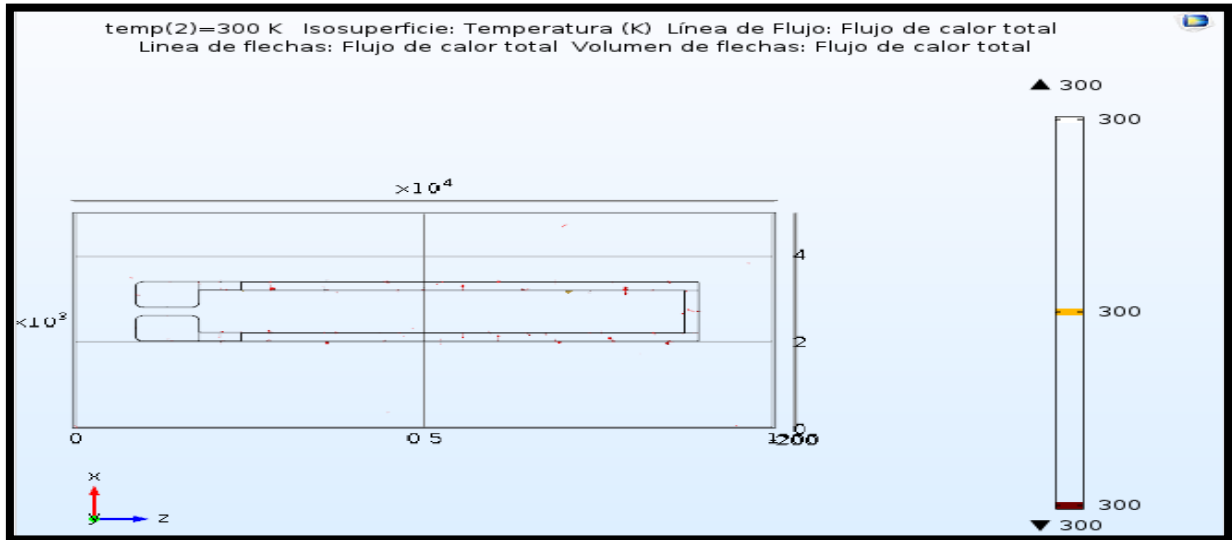
Tabla 46. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes triangulares.

Geometría	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
5 meandros con bordes triangulares	Papel	Plata	Plata y papel no afectados por la temperatura	Papel no sufre afectaciones y plata sufre grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

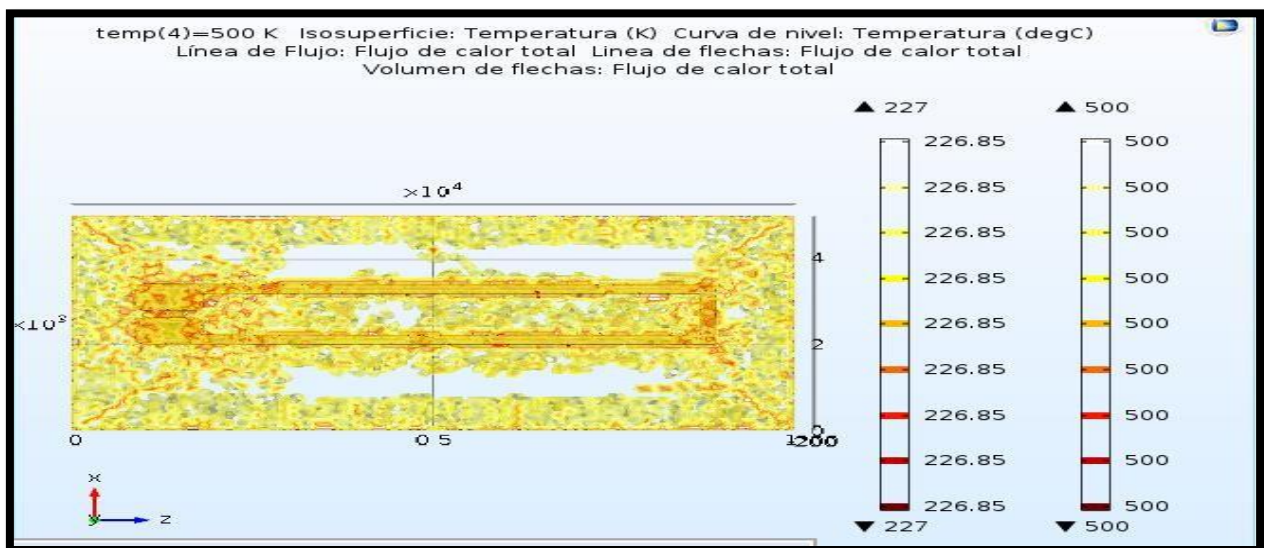
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 1 MEANDRO CON BORDES CUADRADOS

Figura 84. RANGO DE TEMPERATURA 300°K (226.85° C).



Fuente: Autoría propia.

Figura 85. RANGO DE TEMPERATURA 226.85° C.



Fuente: Autoría propia.

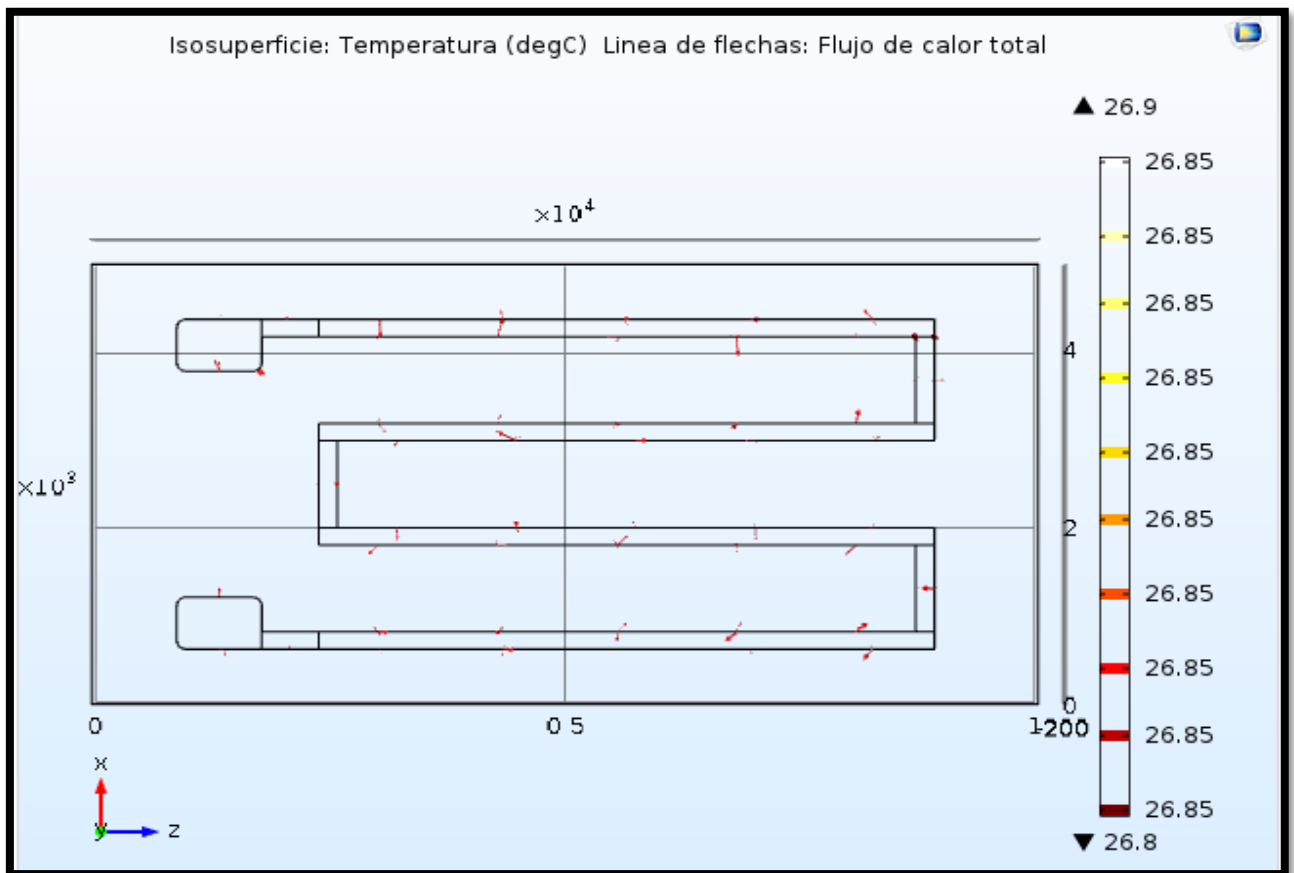
Tabla 47. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes cuadrados

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
1 meandro con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

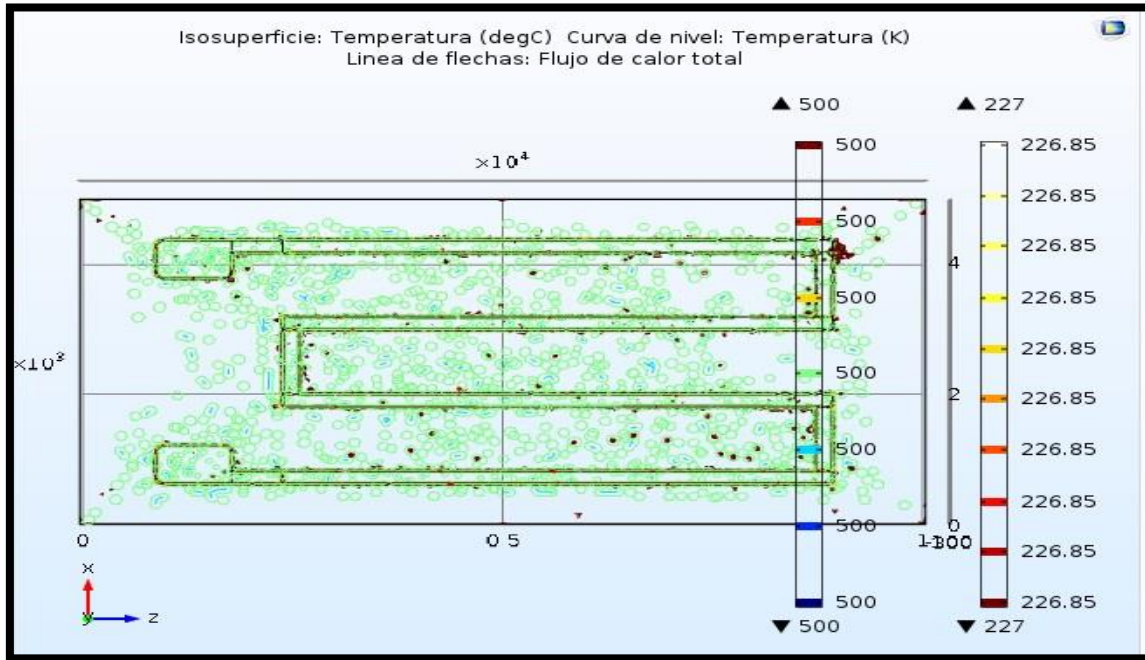
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 2 MEANDROS CON BORDES CUADRADOS

Figura 86. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 87. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

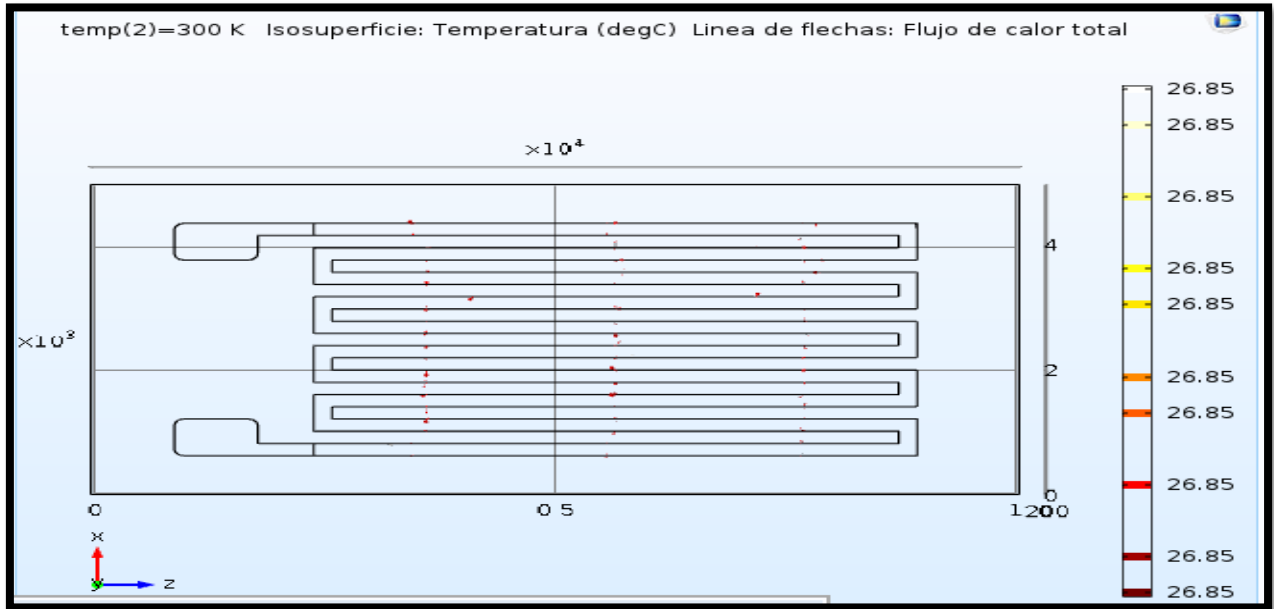
Tabla 48. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 2 meandros con bordes cuadrados.

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
2 meandros con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

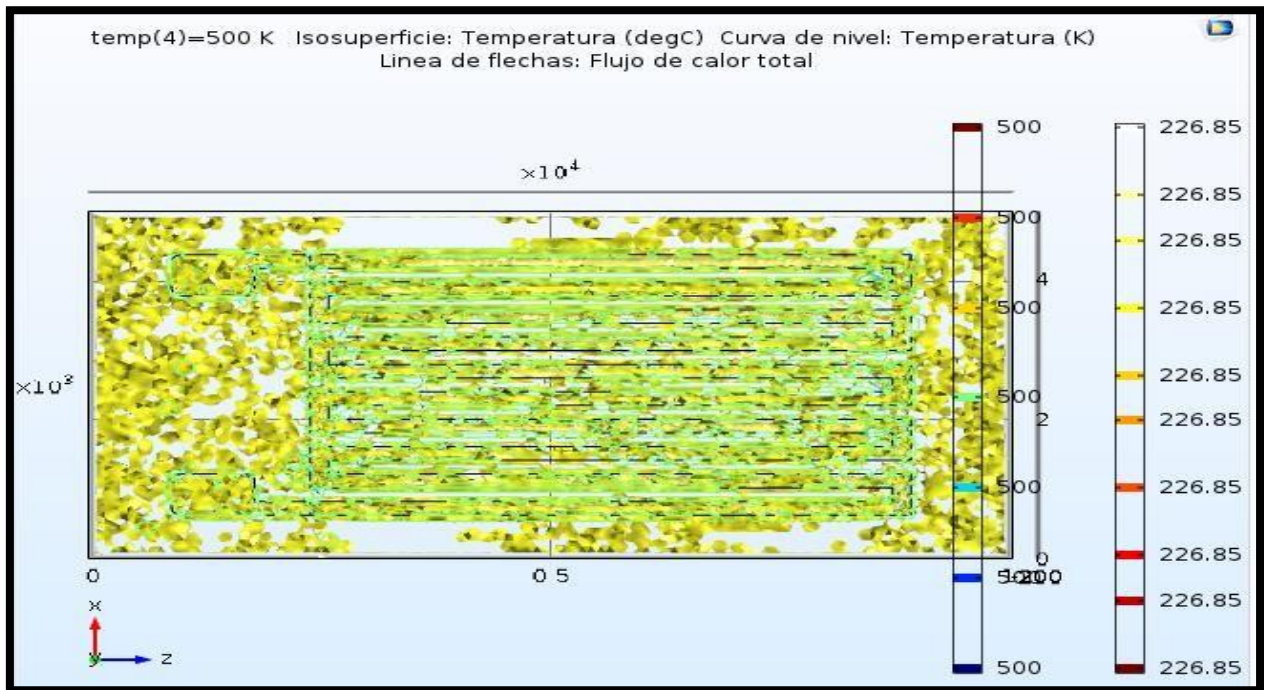
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 5 MEANDROS CON BORDES CUADRADOS

Figura 88. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 89. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

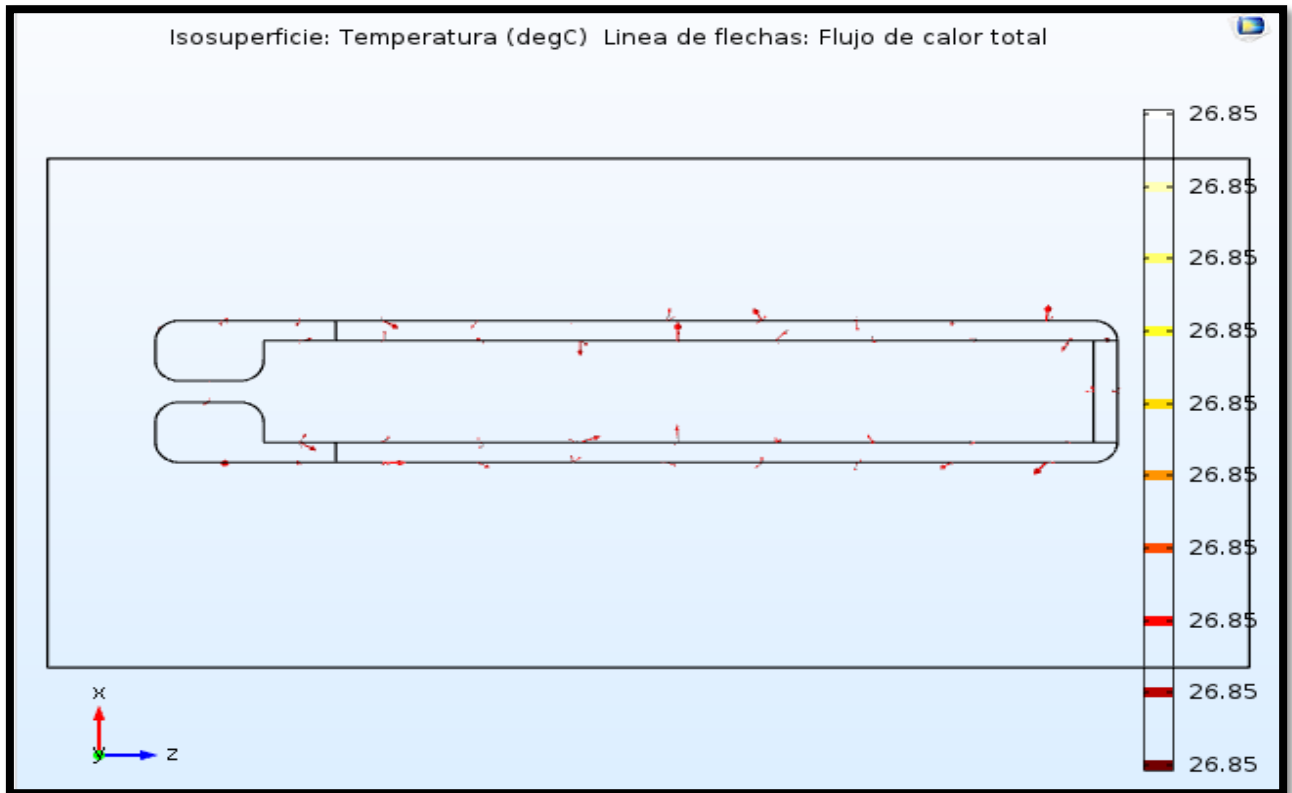
Tabla 49. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes cuadrados

Geometría	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
5 meandros con bordes cuadrados	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

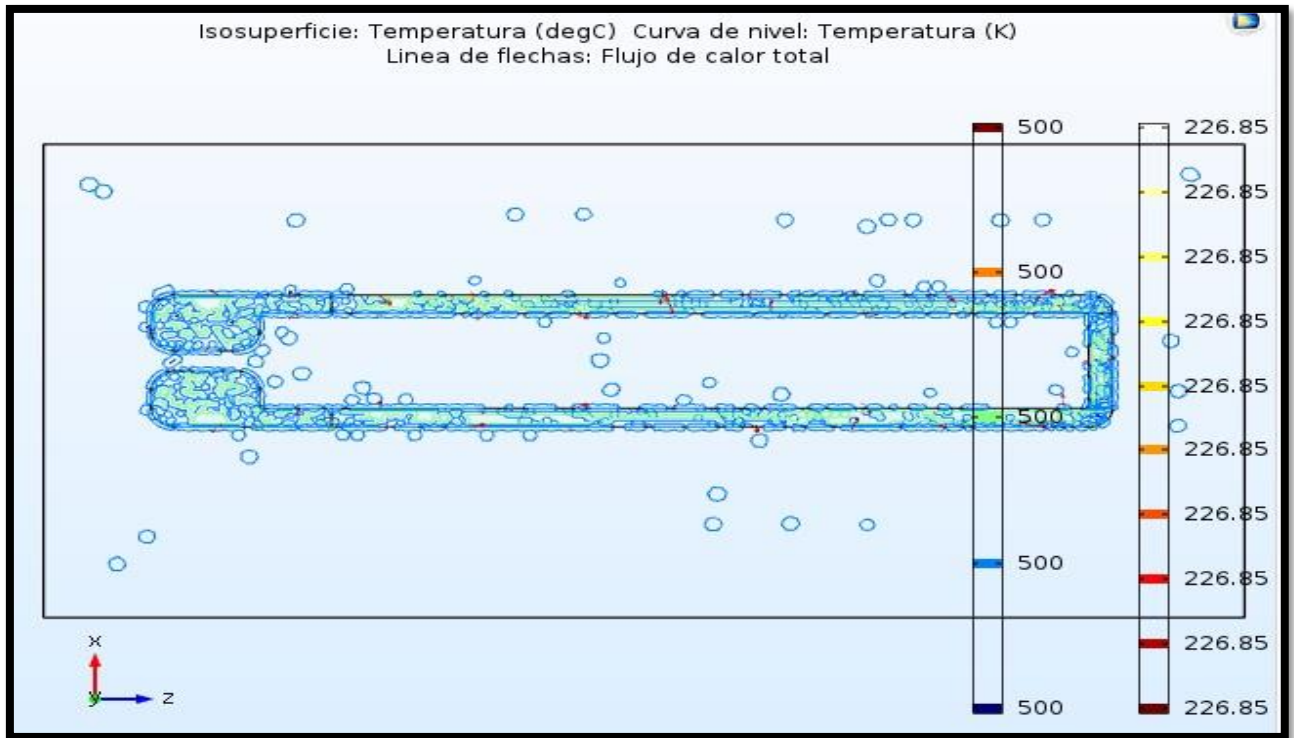
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 1 MEANDRO CON BORDES REDONDOS

Figura 90. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 91. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

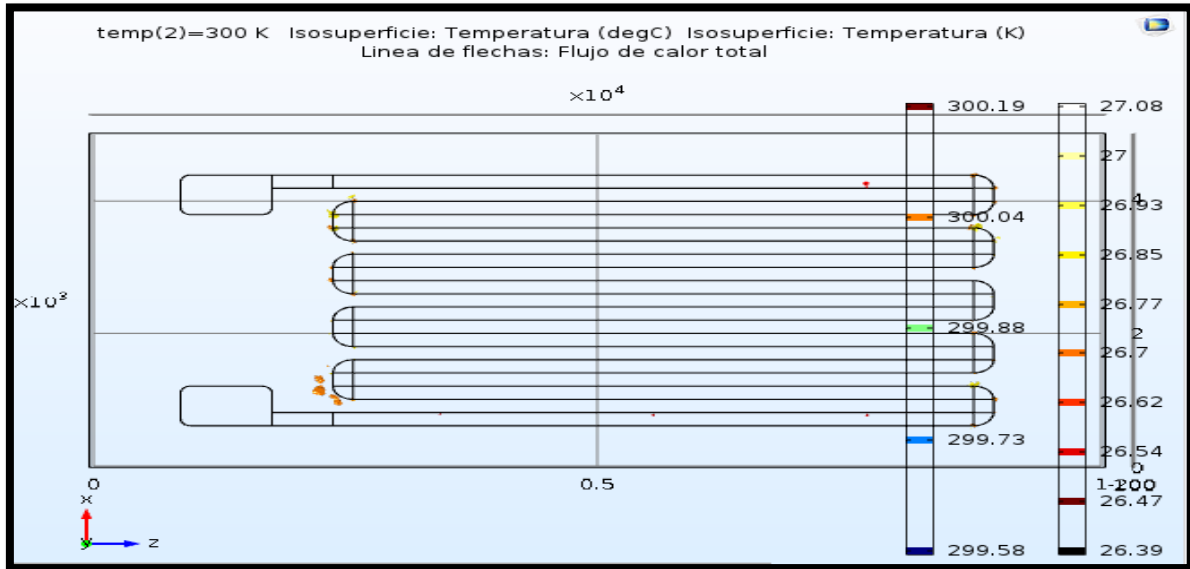
Tabla 50. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 1 meandro con bordes redondos.

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
1 meandro con bordes redondos	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Papel no es afectado y grafeno sufre grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

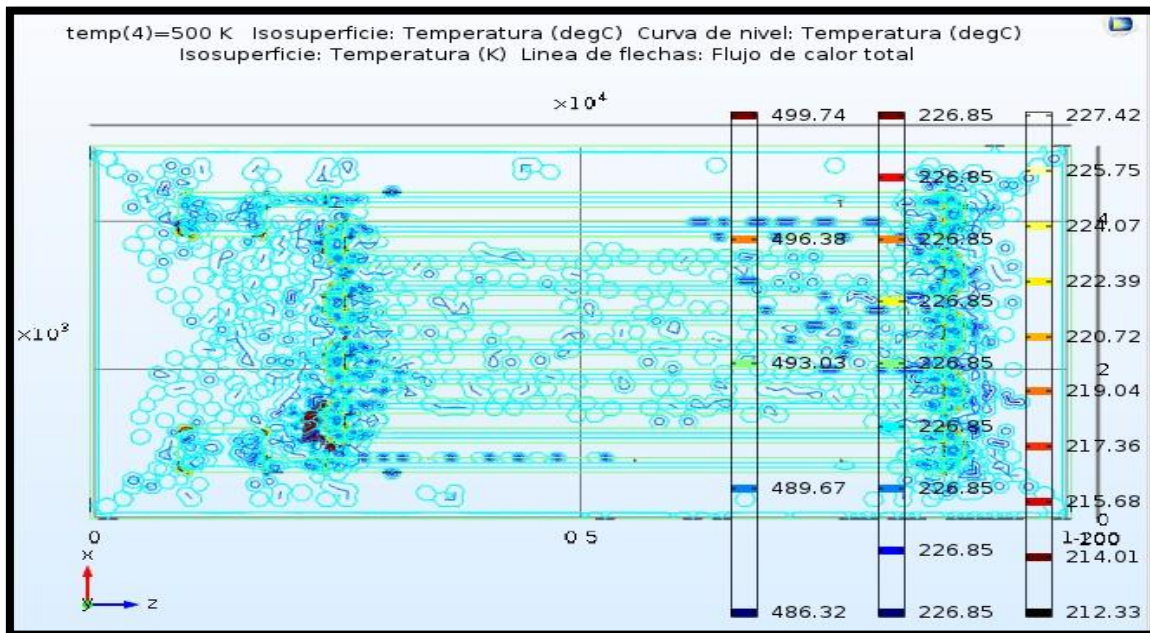
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 5 MEANDROS CON BORDES REDONDOS

Figura 92. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 93. RANGO DE TEMPERATURA 227.42°C.



Fuente: Autoría propia.

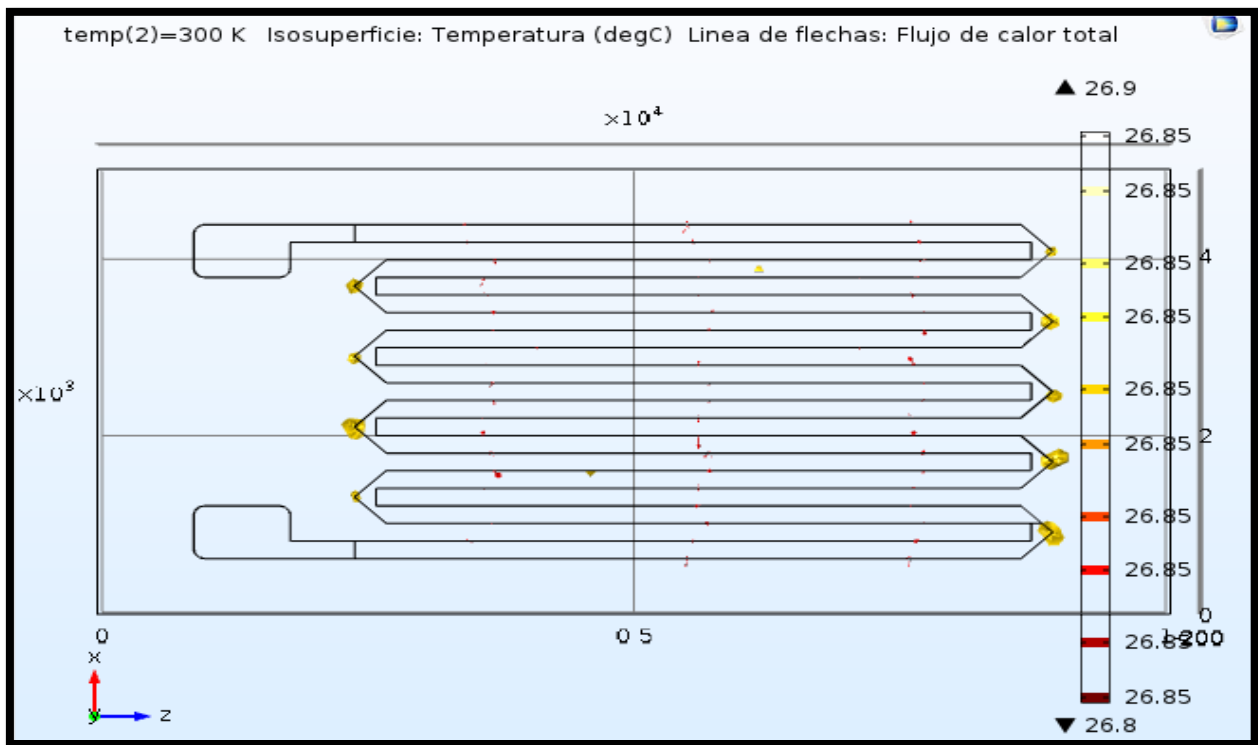
Tabla 51. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes redondos.

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
5 meandros con bordes redondos	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.

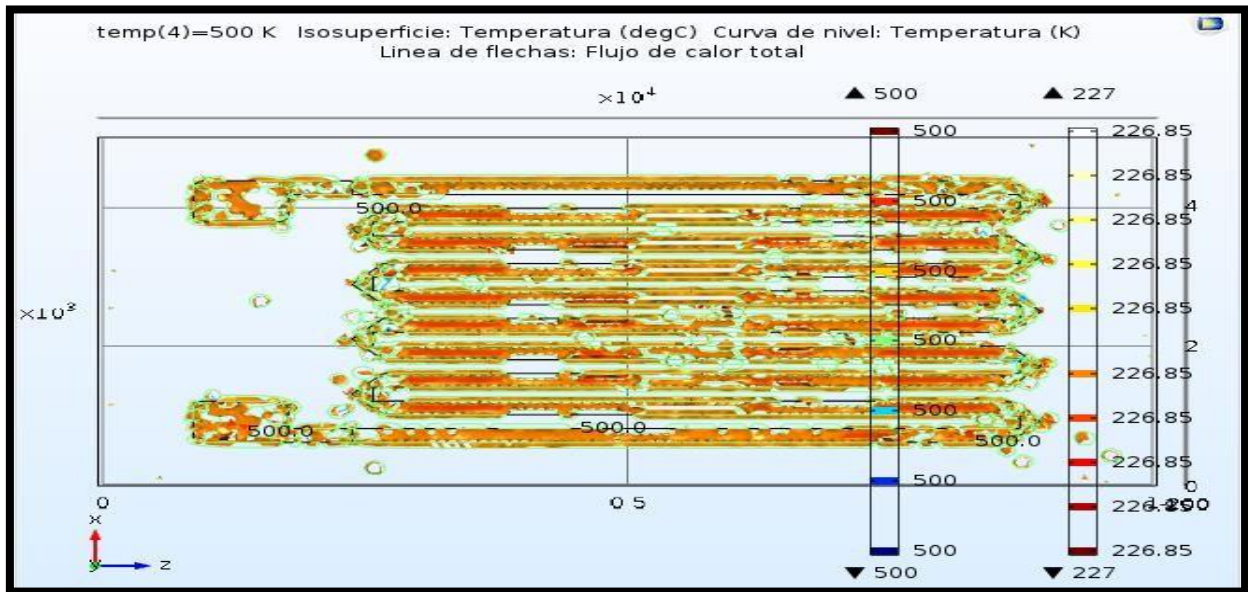
GALGA EXTENSOMETRICA LINEAL 1 MEANDRO CON BORDES CUADRADOS

Figura 94. RANGO DE TEMPERATURA 26.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Figura 95. RANGO DE TEMPERATURA 226.85°C.



Fuente: Autoría propia.

Tabla 52. Resultados de la simulación con galga extensométrica lineal de 5 meandros con bordes triangulares.

Geometria	Material sustrato	Material rejilla	Temperatura 26.85 °C	Temperatura 226.85 °C
5 meandros con bordes triangulares	Papel	Grafeno	Grafeno y papel no afectados por la temperatura	Grafeno y papel sufren grandes afectaciones por temperatura

Fuente: Autoría propia.