

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TEXTIL Y PAPELERA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**

**ESTUDIO DE LA RESPUESTA ELÉCTRICA DE TEJIDOS  
PIEZORESISTIVOS SOMETIDOS A ESTIRAMIENTO Y  
DEFORMACIÓN POR PRESIÓN**

---

**AUTOR**  
**Vicente Cambra Sánchez**

**DIRIGIDA POR**  
**Dra. M<sup>a</sup> Ángeles Bonet Aracil**  
**Dr. Pablo Díaz García**

---

**JUNIO 2017**







**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TEXTIL Y PAPELERA**



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

**TESIS DOCTORAL**

ESTUDIO DE LA RESPUESTA ELÉCTRICA DE TEJIDOS  
PIEZORESISTIVOS SOMETIDOS A ESTIRAMIENTO Y  
DEFORMACIÓN POR PRESIÓN

---

**AUTOR**

**Vicente Cambra Sánchez**

**DIRIGIDA POR**

**Dra. M<sup>a</sup> Ángeles Bonet Aracil**

**Dr. Pablo Díaz García**

---



## ***Agradecimientos***

Deseo agradecer a la Dra. María Ángeles Bonet y al Dr. Pablo Díaz García por su magnífica labor como directores de este trabajo y por la paciencia que han mostrado después de tantos años de dedicación.

A mis compañeros de AITEX por el apoyo prestado.

Y a mi mujer, mis dos hijos, familia y amigos, por confiar en mí, y darme el aliento necesario en este interminable camino.





## RESUMEN

---

### **ESTUDIO DE LA RESPUESTA ELÉCTRICA DE TEJIDOS PIEZORESISTIVOS SOMETIDOS A ESTIRAMIENTO Y DEFORMACIÓN POR PRESIÓN**

La tesis versa sobre el desarrollo de materiales piezoresistivos. Como objetivo se plantea la investigación de un sistema compuesto por un tejido de punto para ser utilizado como sensor piezoresistivo que permita relacionar el comportamiento eléctrico en función de la elongación aplicada. Paralelamente también se estudiará la correlación entre la deformación elástica y la ocasionada al aplicar una presión detectando la zona donde se produce la presión. Para ello se utilizarán tejidos de punto y se les incorporarán textiles conductores. Se diseñará un método de ensayo y se evaluarán las propiedades de los tejidos. Como resultado final se obtendrá un textil inteligente.

## RESUM

---

### **ESTUDI DE LA RESPOSTA ELÈCTRICA DE TEIXITS PIEZORESISTIUS SOTMESOS A ESTIRAMENTS I A DEFORMACIÓ PER PRESSIÓ**

La tesi versa sobre el desenvolupament de materials piezoresistius. Com a objectiu es planteja la investigació d'un sistema compost per un teixit de punt per a ser utilitzat com a sensor piezoresistiu que permeti relacionar el comportament elèctric en funció de l'elongació aplicada. Paral·lelament, també s'estudiarà la correlació entre la deformació elàstica i l'ocasionada a l'aplicar una pressió i la detecció de la zona on es produeix la pressió. Per a dur-ho a terme s'utilitzaran teixits de punt als quals s'incorporaran tèxtils conductors. Es dissenyarà un mètode d'assaig i s'avaluaran les propietats dels teixits. Com a resultat final, s'obtindrà un tèxtil intel·ligent.

## ABSTRACT

---

### **STUDY ON THE ELECTRICAL RESPONSE OF PIEZORESISTIVE FABRICS SUBJECTED TO STRETCHING AND DEFORMATION BY PRESSURE**

The thesis deals with the development of piezoresistive materials. Its objective is to investigate a system formed of a knitted fabric to be used as a piezoresistive sensor that allows electrical behaviour to be interrelated based on the elongation applied. Simultaneously, the correlation between elastic deformation and that caused by applying pressure by detecting the area where the pressure is produced will also be studied. For this purpose, knitted fabrics will be used and conductive textiles will be added to them. A testing method will be designed and the properties of the fabric will be evaluated. As a result, a smart textile will be obtained.



# Índice de Contenidos.

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1.- Consideraciones generales acerca de los textiles inteligentes	3
I. 1.1. Estructura inteligente	3
I.1.2. Materiales intrínsecamente inteligentes	4
I.1.3. Definición y evolución de los textiles inteligentes	5
I.1.4.- Textiles inteligentes activos	7
I.1.4.1.- Textiles con memoria de forma	8
I.1.4.1.1. Aleaciones con Memoria de Forma	8
I.1.4.1.2. Cerámicas con Memoria de Forma	9
I.1.4.1.3. Polímeros con Memoria de Forma	9
I.1.4.1.4. Aleaciones Ferromagnéticas con Memoria de Forma	9
I.1.4.2. Textiles cromoaactivos	10
I.1.4.2.1. Materiales electrocromicos	10
I.1.4.2.2. Materiales fotocromicos	11
I.1.4.2.3. Materiales termocromicos	11
I.1.4.2.4. Materiales piezocromicos	12
I.1.4.3 – Textiles con microcápsulas	13
I.1.4.4 - Textiles electroactivos	17
I.1.4.4.1 Polímeros conductores	17
I.1.4.4.2. - Materiales piezoeléctricos	21
I.1.5.- Textiles inteligentes por la integración de tecnologías: textrónica	22
I.1.5.1 - Sensores para sistemas textrónicos	23
I.1.5.2. Resto de componentes de un sistema textrónico	26
I.1.5.2.1. Conexiones entre el dispositivo textil y el resto del sistema	26
I.1.5.2.2. Circuito de acondicionamiento de señales (ACS)	28
I.1.5.2.3. Conversor Analógico Digital (CAD o A/D)	29
I.1.5.2.4. Unidad de control (UdC)	29
I.1.5.2.5. Buses y puertos de comunicaciones	29
I.1.5.2.6. Dispositivos externos actuadores para textiles	30
I.1.5.3. Procesos internos de transformación de la información	31
I.1.5.3.1. Procesos de acondicionamiento de las señales	31
I.1.5.3.2. Proceso de conversión de la señal analógica en su forma digital	32
I.1.5.4 Arquitecturas de red para textrónica	34
I.1.5.4.1. Redes inalámbricas	35
I.1.5.4.2. Redes para sistemas llevables	36
I.1.5.4.3. Tecnologías de redes para comunicación externa	36
I.1.5.4.4. Redes personales para la comunicación sobre el cuerpo	37
I.1.5.5. Limitaciones en los sistemas textrónicos	37
I.1.5.5.1. Confortabilidad	38

I.1.5.5.2. Limitado rango de sensores.....	38
I.1.5.5.3. Suministro eléctrico.....	39
I.1.5.5.4. Exposición a condiciones del entorno.....	40
I.1.5.5.5. Condiciones de uso y procesos de mantenimiento.....	40
I.1.5.5.6. Conexiones y conductividad.....	40
I.1.5.5.7. Estandarización.....	41
I.1.5.5.8. Limitaciones no exclusivamente científico-técnicas.....	42
I.1.5.6. Ámbitos de aplicación de la tetrónica.....	42
I.1.5.6.1. Salud.....	42
I.1.5.6.2. Confort.....	43
I.1.5.6.3. Automoción.....	44
I.1.5.6.4. Hogar y domótica.....	45
I.1.5.6.5. Defensa y protección personal.....	46
I.1.5.6.6. Deporte y calidad de vida.....	47
I.2.- Textiles sensores de la deformación elástica.....	49
I.2.1.- Piezoelectricidad para el desarrollo de materiales sensibles por deformación elástica.....	49
I.2.1.1. Definición de piezoelectricidad.....	49
I.2.1.2. Evolución histórica del descubrimiento.....	50
I.2.1.3. Principios del fenómeno: modelo físico de actuación.....	51
I.2.1.4. Relación entre presión y señal eléctrica. Constante de carga piezoeléctrica y constante de voltaje piezoeléctrico.....	52
I.2.1.5. Descripción matemática.....	52
I.2.1.6. Materiales piezoeléctricos.....	53
I.2.1.6.1. Cristales de origen natural.....	53
I.2.1.6.2. Cristales sintéticos.....	54
I.2.1.6.3. Cerámicas.....	54
I.2.1.6.4. Piezocerámicas sin plomo.....	56
I.2.1.6.5. Polímeros. PVDF.....	56
I.2.2. Revisión de sensores textiles de la deformación elástica.....	56
I.2.2.1. Sensores textiles por la deposición de films poliméricos.....	57
I.2.2.2. Sensores textiles por recubrimiento superficial.....	57
I.2.2.3. Sensores textiles con elementos capacitivos.....	58
I.2.2.4. Sensores textiles por la utilización de fibras conductoras.....	59
I.2.2.5. Sensores textiles por el recubrimiento de velos de nanofibras.....	61
I.2.2.6. Sensores textiles por la utilización de fibra óptica.....	61
I.2.2.7. Sensores textiles por la utilización de fibras piezoeléctricas.....	62
I.2.2.8. Integración de sensores en tecnología textil.....	63
I.3. Textiles conductores.....	63
I.3.1.- Fibras textiles conductoras.....	63
I.3.1.1.- Introducción: conductividad eléctrica.....	63
I.3.1.2. Fibras eléctricamente conductoras: generalidades.....	65

I.3.1.3. Fibras intrínsecamente conductoras.....	65
I.3.1.4. Fibras poliméricas intrínsecamente conductoras.....	66
I.3.1.5. Filamentos continuos metálicos.....	67
I.3.1.6. Fibras e hilados recubiertos con materiales conductores.....	68
I.3.1.6.1. Fibras recubiertas por metales.....	68
I.3.1.6.2. Fibras recubiertas por polímeros conductores.....	70
I.3.1.7. Fibras funcionalizadas con partículas conductoras.....	70
I.3.1.7.1. Proceso aditivación de nanopartículas en fibras termoplásticas.....	71
I.3.1.7.2. Nanopartículas conductoras.....	71
I.3.1.8. Otras fibras conductoras: fibras híbridas.....	73
I.3.2. Textiles conductores.....	73
I.3.2.1. Materiales para textiles conductores: hilos conductores.....	74
I.3.2.1.1. Definición y estructuras de los hilados conductores.....	74
I.3.2.1.2. Hilados conductores puros.....	75
I.3.2.1.3. Hilados conductores mixtos.....	75
I.3.2.2. Procesos de fabricación de textiles conductores.....	76
I.3.2.2.1. Tejeduría de calada de textiles conductores.....	76
I.3.2.2.2. Tejeduría de punto de textiles conductores.....	78
I.3.2.2.3. Bordado de textiles conductores (e-broidery).....	80
I.3.2.2.4. Cosido de hilados conductores.....	81
I. 3.3. Consideraciones finales.....	81
II. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN.....	83
II.1. Objetivos.....	85
II.2. Planificación.....	88
III. EXPERIMENTAL.....	97
III.1. Materiales.....	99
III.2. Métodos y procedimientos.....	101
III.2.1.- Fabricación de hilos conductores.....	102
III.2.2.- Fabricación de tejidos conductores.....	108
III.2.3.- Banco de ensayos para el estudio de sensibilidad al estiramiento.....	110
III.2.3.1. Descripción del primer banco de ensayos para la medida de la variación de la respuesta eléctrica en función de la deformación elástica del tejido.....	111
III.2.3.2. Descripción del segundo banco de ensayos para la medida de la variación de la respuesta eléctrica en función de la deformación elástica del tejido.....	116
III.2.3.3. Descripción del tercer banco de ensayos para el diseño de un textil inteligente a la deformación por elongación.....	120
III.2.4.- Banco de ensayo para el estudio de sensibilidad a la presión.....	121
III.3. Técnicas experimentales.....	122

IV.1. Tejidos sensibles a la deformación por estiramiento.....	127
IV. 1.1.- Estudio de la respuesta eléctrica de tejidos inteligentes sometidos a estiramiento..	127
IV.1.1.1. Sensibilidad a la elongación en el sentido de las filas.....	128
IV.1.1.2. Sensibilidad a la elongación en el sentido de las columnas.....	146
IV.1.1.3. Conclusiones parciales .....	154
IV. 1.2. Diseño de textiles inteligentes como sensores de estiramiento en función de la respuesta eléctrica.....	156
IV.1.2.1. Estudio de la homogeneidad en las medidas de conducción eléctrica.....	159
IV.1.2.2. Estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente al estiramiento .....	170
IV.1.2.3. Reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente al estiramiento .....	179
IV.1.2.4. Conclusiones parciales .....	182
IV. 1.3. Fabricación de un textil inteligente sensible a la deformación por elongación para su utilización como sensor de respiración.....	184
IV.1.3.1. Estudio de la medida de deformación por estiramiento en tórax o abdomen....	184
IV.1.3.2. Diseño y desarrollo de un sensor textil por deformación por estiramiento para medida de respiración .....	185
IV.1.3.3. Fabricación de un body de bebé con sensor textil por deformación por estiramiento integrado y monitorización de la respiración .....	195
IV.1.3.4. Conclusiones parciales .....	198
IV.2. Tejidos sensibles a la deformación por presión.....	200
IV. 2.1. Estudio de la respuesta eléctrica de tejidos inteligentes sometidos a presión.....	200
IV.2.1.1. Modelo 1: Estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.....	201
IV.2.1.2. Modelo 2: Estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos.....	210
IV.2.1.3. Modelo 3: Estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos.....	216
IV.2.1.4. Modelo 4: Estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales.....	221
IV.2.1.5. Modelo 5: Estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante .....	228
IV.2.1.6. Conclusiones parciales.....	233
IV. 2.2. Optimización de textiles inteligentes como sensores de presión.....	236
IV.2.2.1. Respuesta de un sistema sensor de presión en diferentes puntos .....	237
IV.2.2.2. Respuesta de un sistema sensor con bandas aislantes. Evaluación de la influencia de una perturbación sobre las zonas cercanas.....	253
IV.2.2.3. Respuesta de un sistema complejo con aislante y substrato de espuma para individualizar las respuestas.....	286
IV.2.2.4. Conclusiones parciales.....	303

V. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS	307
V.1. Conclusiones finales	309
V.2. Futuros trabajos	313
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	317
VII. APÉNDICES	333
VII.1. Listado de Figuras	335
VII.2. Listado de Tablas	344





## **I.- Introducción.**



# I.- Introducción.

## I.1.- Consideraciones generales acerca de los textiles inteligentes.

### I.1.1.- Estructura inteligente.

Las estructuras inteligentes son aquellas que pretenden imitar el comportamiento de la naturaleza. De esta manera, y siguiendo el modelo de los sentidos de los seres vivos, (vista, oído, olfato, gusto y tacto) la ciencia de los materiales e ingenierías, entre otros, están desarrollando, de manera análoga a los mencionados sentidos, lo que se denomina “sensores”: ópticos, acústico-ultrasónicos, eléctricos y químicos. Estos sensores generan una respuesta que se suele transmitir en forma de señales eléctricas, las cuales son transmitidas al centro de proceso de la información (al microcontrolador o unidad de control), lo que siguiendo el paralelismo sugerido sería el cerebro. El papel desempeñado por la unidad de control es la toma de decisiones en función de las señales de entrada detectadas por los sensores para posteriormente enviar las señales oportunas a los actuadores, (los músculos, siguiendo la analogía propuesta), para responder de acuerdo a la estrategia programada en la unidad de control (figura I1).

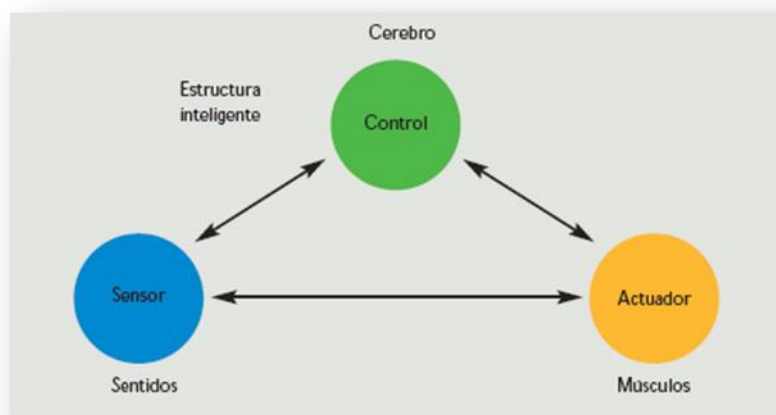


Figura I1. Estructura inteligente [1]

Los materiales inteligentes son materiales que tienen múltiples propiedades funcionales. Estas propiedades de los materiales se alteran significativamente de manera controlada y reversible por algunos estímulos externos, por ejemplo, corrientes o campos eléctricos o magnéticos. [1]

Para dotar a la propia estructura de la capacidad de toma de decisiones es necesario embeber dentro de la propia estructura la unidad de control y de proceso de la información junto con los sensores y actuadores. [2]

Los criterios o rasgos comunes que deben presentar los llamados materiales o estructuras inteligentes son los siguientes: [3]

- Estos materiales, de manera intrínseca o embebida, presentan **sensores** de reconocimiento y medida de la intensidad del estímulo, los cuales suelen ser

campos mecánicos, como deformaciones, esfuerzos o temperaturas y en base al correspondiente fenómeno físico estos campos son transformados en señales de salida que pueden ser fácilmente medibles, y que generalmente implican campos eléctricos que producen diferencia de potencial eléctrico o campos magnéticos que inducen corriente eléctrica.

- Presentan **actuadores**, embebidos o intrínsecos, que responden ante un estímulo. Emplean como señales de entrada campos eléctricos, térmicos o magnéticos que mediante las propiedades del material activo son transformadas en una señal de salida mecánica como un campo de desplazamientos, deformaciones o esfuerzos, con la consiguiente generación de una fuerza que puede ser empleada con el objeto de realizar un cierto trabajo.
- Para controlar la respuesta de una forma predeterminada presentan **mecanismos de control y selección de la respuesta**.
- El tiempo de respuesta es corto.
- El sistema regresa a su estado original tan pronto como el estímulo cesa.

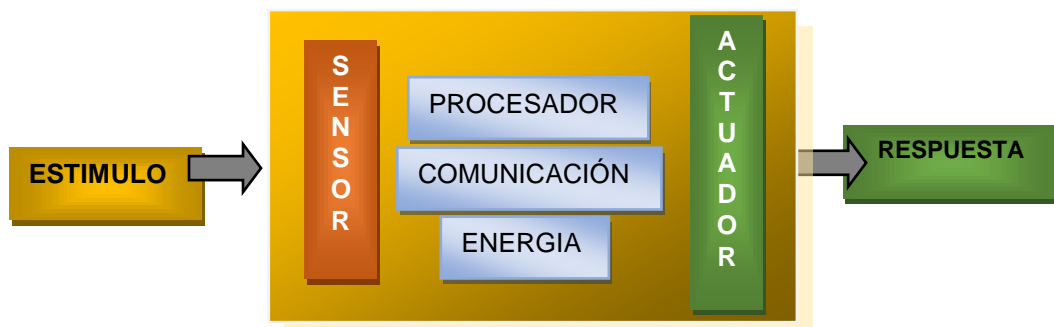


Figura 12. Representación de las componentes de un sistema inteligente

### I.1.2. Materiales intrínsecamente inteligentes

Una definición ampliamente aceptada, y que es muy importante señalar llegados a este punto, determina que **un material intrínsecamente inteligente es aquel que desempeña simultáneamente el papel de: sensor, procesador y de actuador** [4].

Y así, de manera general, un material inteligente se define como aquel que posee una o más propiedades que pueden ser modificadas significativamente de manera controlada por un estímulo externo (tales como tensión mecánica, temperatura, humedad, pH o campos eléctricos o magnéticos) de manera reversible.

Los fundamentos físicos en los que se basa el funcionamiento de estos materiales se conocen desde el siglo XIX en la mayor parte de los casos. Ahora bien, el campo tecnológico de los denominados materiales inteligentes ha evolucionado significativamente en los últimos años, y desde entonces la ciencia de los materiales lo

ha convertido en una disciplina propia de investigación, si bien desde los años 50 se emplean materiales y conceptos que bien podrían denominarse como inteligentes.

Los materiales intrínsecamente inteligentes más habituales y conocidos son [5]

1. Materiales con memoria de forma

- Aleaciones
- Polímeros
- Cerámicas

2. Materiales cromóactivos

- Fotocrómicos
- Termocrómicos
- Electrocrómicos
- Piezocrómicos

3. Materiales con microcápsulas

- PCM's (Cambio de fase)
- Aromas
- Cosméticos

4. Materiales electroactivos

- Electroactivos
- Polímeros conductores
- Piezoeléctricos

5. Materiales fotoactivos

- Fosforescentes
- Electroluminiscentes
- Fluorescentes

### 1.1.3. Definición y evolución de los textiles inteligentes

Los textiles inteligentes, "smart textiles" en la literatura anglosajona, se definen como textiles que pueden detectar, y reaccionar o adaptarse a condiciones medioambientales o a estímulos mecánicos, térmicos, químicos, fuentes eléctricas o magnéticas. Estos materiales son capaces de actuar ante un estímulo externo porque integran **sensores**, y son capaces de actuar ante este estímulo porque presentan **actuadores**, pudiendo también presentar otros mecanismos de control. Estos tres elementos pueden ser intrínsecos al textil o estar embebidos en él. [6]

Dicho de otro modo, los textiles inteligentes son materiales activos formados por la incorporación de elementos de detección y actuación en tejidos capaces de responder

y actuar en consecuencia a este estímulo de detección. Hasta ahora, la mayoría de textiles inteligentes sólo se basan en dispositivos microelectrónicos. [7]

Según su actividad funcional los textiles inteligentes pueden ser clasificados en tres categorías, según su nivel de evolución: [8]

- Primera generación de textiles Inteligentes: son los denominados de tipo pasivo, y solamente son capaces de detectar las condiciones medioambientales o estímulos externos, y no presentan un elemento actuador. Por lo que, no revisten interés para este trabajo, pues no son capaces de interactuar con su entorno.
- La segunda generación, de tipo activo, son textiles que tienen la capacidad de detectar y de actuar en frente a una determinada situación, se denominan comúnmente textiles funcionales.

Este tipo de textiles inteligentes no hacen uso de tecnologías informáticas ni de sistemas electrónicos dentro de su estructura textil, sino que únicamente integran materiales con una funcionalidad concreta, como puede ser de memoria de la forma, camaleónicos, hidrófugos y permeables al vapor, pueden almacenar calor, termorreguladores, absorben el vapor, etc...

- Y por último, los de tercera generación, o sistemas textiles inteligentes o textiles ultra Inteligentes, en ocasiones, simplemente e-textiles. Éstos pueden detectar, reaccionar y adaptarse a las condiciones y estímulos del medio a través de un sistema electrónico e informático integrado y embebido en la propia estructura textil. En definitiva, suelen disponer de unidad de procesamiento, la cual trabaja como cerebro, con capacidad cognitiva en base al sistema operativo, que es la encargada de procesar la señal que recibe y emitir la respuesta pertinente.

Por lo tanto, la incorporación de elementos electrónicos al textil es un campo emergente de investigación y multidisciplinar que reúne a especialistas en tecnología informática, electrónica, materiales, y textiles, el cual se denomina **TEXTRÓNICA**.

En definitiva, la evolución de este campo de conocimiento da lugar a dos grandes tipos de textiles inteligentes: los no tetrónicos y los textiles inteligentes tetrónicos, o simplemente e-textiles.

La generación y desarrollo actual de los textiles inteligentes es posible fundamentalmente por tres hitos a destacar:

- la aparición en las últimas décadas de un gran rango de materiales intrínsecamente inteligentes que serán expuestos más adelante y que pueden ser aplicados a la tecnología textil. Entre ellos, las nuevas materias primas textiles con función de sensor, como nuevas fibras textiles conductoras producidas a partir de polímeros novedosos con propiedades avanzadas, o nuevos acabados técnicos,

- la integración de componentes electrónicos miniaturizados y los nuevos componentes tecnológicos del ámbito de la informática y las tecnologías de la información,
- y por último, el desarrollo del sector energético, lo cual ha permitido el desarrollo de baterías con mayores prestaciones energéticas, potencia, y reducción significativa del tamaño a cambio de una mayor ligereza, flexibilidad y adaptabilidad, lo cual favorece la integración en la estructuras textiles.

Tal y como se tratará más adelante, es posible desarrollar textiles inteligentes de diversa tipología, atendiendo a la **funcionalidad** que se le desee dotar al producto textil, y atendiendo al estímulo de medida que es capaz de medir el sensor. En este sentido, encontramos de forma generalizada sensores que miden:

- 1- parámetros del cuerpo humano,
- 2- señales del propio entorno,
- 3- las propias condiciones del estado del textil.

Dependiendo de la funcionalidad buscada en un textil inteligente, se diseña un actuador que la ejecute y sea capaz de emitir una respuesta determinada. En un hipotético ejemplo del primer tipo de textil inteligente, (sensor de parámetros del cuerpo humano) el sensor integrado en el textil podría detectar la falta de insulina en un paciente diabético y actuaría administrándole la hormona en la dosis deseada.

En la actualidad, existen un gran número de campos de aplicación de los textiles inteligentes, hacia los cuales se están orientando la investigación y el desarrollo de los mismos. Se ofrece más información a este respecto en el apartado [1.1.5.6. Ámbitos de aplicación de la textrónica](#), sin embargo, cabe adelantar, a modo de ejemplo, que algunos de los campos de aplicación más interesantes, por sus posibilidades, son el de la medicina y la salud, el deporte y el ocio, o bien el ámbito militar, de la seguridad y la protección personal, entre otros muchos.

Como se ha apuntado, el área de los textiles inteligentes es muy incipiente e integra principalmente la interacción interdisciplinar de la electrónica, la informática y la tecnología textil, sin embargo, otras muchas ramas de la ciencia y la tecnología como la nanotecnología, la química de polímeros o la domótica, entre otras, están aportando y aportarán en el futuro sus avances y técnicas emergentes, para que sirvan de base para desarrollo en este campo de conocimiento.

A modo de conclusión, en el medio y largo plazo, los textiles dispondrán de comportamiento inteligente, dispondrán de materiales intrínsecamente inteligentes o conformarán un sistema inteligente que integre un sensor, un sistema de procesamiento y un actuador.

#### 1.1.4.- Textiles inteligentes activos.

En este apartado se describen las diversas posibilidades que otorgan los materiales inteligentes existentes que anteriormente fueron expuestos como activos de segunda generación, los cuales son aquellos que son capaces de reaccionar ante estímulos del medio sin la necesidad de integrar elementos electrónicos ni informáticos.

Obviamente, el grado de complejidad de estos textiles será inferior a los textiles de tercera generación, así como sus capacidades para interactuar con el medio.

#### I.1.4.1.- TEXTILES CON MEMORIA DE FORMA

Incluyen en su constitución materiales que son capaces de “memorizar” su forma, es decir, es el efecto que puede describirse como la capacidad de un material para cambiar la forma debido a la aplicación de un estímulo externo y de luego recuperarla una vez cesa ese estímulo exterior.

Bajo el término de materiales con memoria de forma existen cuatro clases diferentes, según la naturaleza, o del material en sí, o del estímulo externo al que responden. Las cuatro clases en las que se pueden dividir se exponen a continuación.

##### I.1.4.1.1. Aleaciones con Memoria de Forma

Existen aleaciones metálicas que presentan esta propiedad reversible, también conocidas como SMAs, por sus siglas en inglés (Shape Memory Alloy). El origen del efecto de memoria de forma SMA es la transición de fase sólida sin la difusión de moléculas entre la fase austenita a temperatura más alta y la fase martensita a la temperatura más baja. Debido a que la temperatura de transformación martensítica en SMAs es inferior a las de los materiales metálicos convencionales, a temperatura ambiente, los SMAs pueden deformarse fácilmente a una forma deseada. La transformación de fase austenita a martensita en estos materiales es totalmente reversible. Por lo tanto, SMA puede exhibir el efecto de memoria de forma de dos maneras después de un proceso térmico adecuado. [9]

Las aleaciones de memoria de forma tienen propiedades distintas a las aleaciones convencionales, ya que poseen dos propiedades diferentes, una en la fase martensítica y otra en la fase austenítica. [10]

El material se deforma en la fase martensítica y recupera de forma reversible sus dimensiones originales mediante el calentamiento por encima de una temperatura crítica de transición, y recupera su forma en el enfriamiento posterior, ver figura I3. [11]

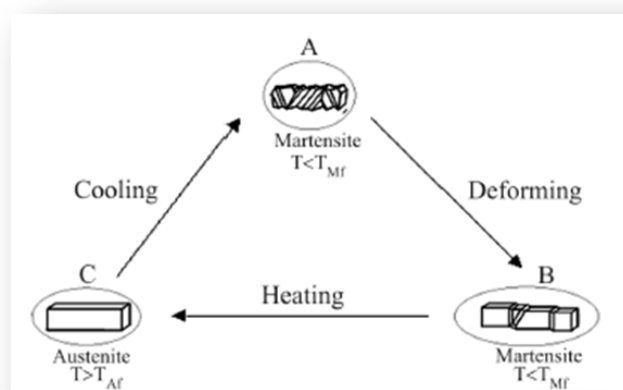


Figura I3 Representación esquemática del efecto memoria de forma. [11]



#### *1.1.4.1.2. Cerámicas con Memoria de Forma*

Las cerámicas se definen como: materiales inorgánicos, no metálicos, que se producen habitualmente empleando arcillas y otros minerales naturales o procesados químicamente. Las cerámicas inteligentes, llamadas SMCs (Shape Memory Ceramics), normalmente, están basadas en  $ZrO_2$ , pero existen otros ejemplos basados en niobato de magnesio o cerámicas perovskitas. En este caso, el principio de actuación es el mismo, es de nuevo la temperatura la responsable del cambio de forma, también de forma reversible.

#### *1.1.4.1.3. Polímeros con Memoria de Forma*

También podemos encontrar el mismo efecto cuando hablamos de polímeros, en este caso, el efecto de Memoria de Forma, SMP (siglas en inglés de "Shape Memory Polymer"), se basa en la transformación de fase de conmutación de dominios o segmentos tales como vidrio-caucho y transiciones de cristal amorfo. Los SMPs pueden recordar solamente su forma original (permanente), aunque la forma temporal (deformada) se puede memorizar mediante la aplicación de fuerza externa y el proceso térmico adecuado. [9]

La capacidad de deformación de los SMPs es grande, se pueden deformar bajo presión hasta más del cien por cien en la mayoría de materiales, tienen una baja densidad aproximadamente  $1 \text{ g cm}^3$ , y además, otra de las ventajas significativas es que los SMPs son biocompatibles y biodegradables. [9]

El desarrollo de los polímeros con memoria de forma. Es actualmente de gran interés, debido a su ligereza, alta recuperación de la forma, fácil manipulación y bajo costo con respecto a las aleaciones con memoria de forma. Estos polímeros presentan la capacidad de cambiar su forma mediante la aplicación de un estímulo externo, que puede ser: el calor, la luz, el campo eléctrico o el campo magnético, humedad, pH... [12]

Estos son los polímeros con mayor interés en el ámbito textil, debido a su composición polimérica, y en muchos casos termoplástica, por lo que se puede llegar a obtener hilos textiles sintéticos con propiedades de memoria de forma, la cual varía en función de la temperatura. Hay que tener en cuenta que la transición del cambio de forma viene acompañada de un cambio en las características mecánicas del material polimérico, por lo que muchas veces puede cambiar también sus propiedades mecánicas de este material, lo cual limita mucho sus aplicaciones.[13]. En esta referencia se puede ver un video de una camisa desarrollada con material textil con memoria de forma (nitinol) y donde se puede apreciar como en función de la temperatura la camisa se puede llegar a adaptar al morfotipo de la persona.

#### *1.1.4.1.4. Aleaciones Ferromagnéticas con Memoria de Forma*

Los llamados en inglés Ferromagnetic Shape Memory Alloys o FSMAs, son materiales que sufren el efecto de memoria de forma bajo la aplicación de diferentes campos magnéticos y que presentan grandes elongaciones. En este caso el comportamiento

es similar al de las aleaciones con memoria de forma (SMAs) pero el estímulo al que responden es el campo magnético aplicado. Tal y como se observa en la figura I4.

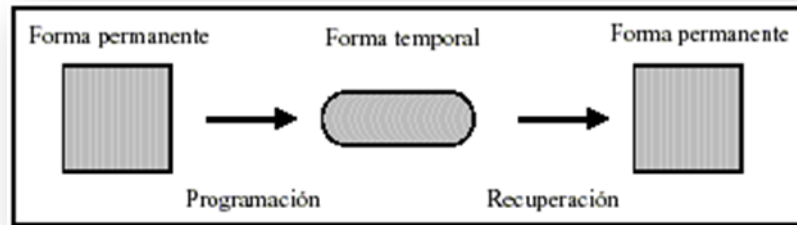


Figura I4. Representación esquemática del efecto memoria de forma

#### I.1.4.2. TEXTILES CROMOACTIVOS

Estos textiles deben sus propiedades inteligentes a los materiales cromosactivos que integran en su estructura, y que presentan la propiedad de cambiar el color como consecuencia de algún fenómeno externo como puede ser la corriente eléctrica, radiación UV o la temperatura. En función de dicho estímulo se pueden clasificar en:

- Electrocrómicos: debida a la electricidad
- Fotocrómicos: al ser expuestos a la luz.
- Termocrómicos: por acción térmica externa.
- Piezocrómicos: por acción de la presión.

##### *I.1.4.2.1. Materiales electrocrómicos*

Estos materiales presentan la propiedad de cambiar de espectro de absorción y, generalmente, de color, al cambiar su estado de oxidación por la aplicación de una diferencia de potencial externa. El dopado de los polímeros conductores puede ocasionar un cambio en el estado electrónico del polímero de no conductor a conductor. Este cambio de estado influye no solamente en las propiedades electrónicas, sino también en las ópticas. Por ejemplo, la polianilina en su estado reducido es no conductora y transparente, en estado neutro es conductora y de color verde, y en estado oxidado es no conductora y azul oscura. Este cambio de color asociado al estado de oxidación se denomina electrocromismo y suele aplicarse, a modo de ejemplos, en la fabricación de dispositivos electrocrómicos como ventanas inteligentes y papeles electrónicos, así como también en fibras textiles. Algunos polímeros asociados a cambios de color los encontramos en la siguiente tabla 11.

Tabla 1. Cambios de color asociados polímeros conductores

Polímero	Color / forma no dopada	Color / Forma dopada
Politiofeno	Rojo	Azul
Polipirrol	Amarillo-verdoso	Azul oscuro
Polianilina	Amarillo	Verde o azul
Poliisotianafteno	Azul	Amarillo brillante

#### 1.1.4.2.2. Materiales fotocromicos

El fenómeno de fotocromismo se puede definir como un cambio de color reversible inducido en un compuesto impulsado en una o ambas direcciones por la acción de la radiación electromagnética. Muchos materiales fotosensibles cambian de color con la irradiación de la luz ultravioleta (UV) o visible y luego vuelven a su color original después del cese de la incidencia de este foco de luz. Cuando se produce por una fuente térmica se conoce como fotocromismo Tipo T, y cuando se produce fotoquímicamente se conoce como fotocromismo tipo P. La mayoría de los colorantes utilizados en la industria vuelven a su estado original de forma térmica por lo que pertenecen al grupo de fotocromismo tipo T. [14]

Estos materiales son generalmente moléculas orgánicas inestables reversibles que cambian la configuración molecular, por rotura de enlaces covalentes o cambio de configuración espacial, con la influencia de una radiación especial. El cambio molecular perturba los espectros de absorción de la molécula y en consecuencia el color. Los usos en textiles se dirigen principalmente a moda y en algunos casos a aplicaciones técnicas cuando los requerimientos técnicos no son muy altos.

Investigadores chinos han desarrollado una fibra ultrafina mediante la técnica de electrohilatura, a partir de un material híbrido formados por material orgánico (PVA) e inorgánico, que presenta propiedades fotocromicas, entre otras. [15]. Por otro lado, de la mano también de investigadores chinos, aparece un novedoso material zeolítico que ofrece un nuevo tipo de sistema de transferencia de electrones, lo que dota al material de capacidad de fotocromismo, entre otros. [16]

#### 1.1.4.2.3. Materiales termocrómicos

Los materiales termocrómicos cambian reversiblemente de color con el cambio de la temperatura, y se suele producir en un rango de temperaturas determinado. Habitualmente son compuestos semiconductores.

Los materiales que poseen esta funcionalidad son: [17]

- Polímeros que poseen esta característica por sí mismo (polímeros conjugados como poliacetilenos, polianilinas...).
- Pigmentos o colorantes termocrómicos
- Cristal líquido

- Materiales microencapsulados

Los siguientes cuatro tipos de materiales exhiben termocromismo: [14]

- Compuestos orgánicos
- Compuestos inorgánicos
- Polímeros
- Sol-gel

Los sistemas termocromáticos que se han utilizado con más éxito en textiles son principalmente dos: el cristal líquido y el sistema de cambio molecular. En ambos casos, los colorantes se encuentran en el interior de microcápsulas y son aplicados en el tejido de la prenda como un pigmento en base de resina.

Los tipos más importantes de cristal líquido para los sistemas termocromáticos son los denominados Cholesteric Liquid Crystals, donde las moléculas adyacentes se disponen de forma helicoidal. La temperatura puede influir en la reflexión de la luz por los cristales líquidos al reflejar la estructura de las hélices. El índice de refracción del cristal líquido y el tono de la disposición helicoidal de las moléculas regulan la longitud de onda de la luz reflejada. Cuando la temperatura varía, la longitud de paso también varía. Como resultado de la variación de la longitud de onda reflejada, provoca un cambio progresivo en el espectro de color. [14]

Por otra parte, los tipos más comunes de colorantes que exhiben termocromismo a través del cambio molecular son las espirolactonas, aunque también han sido identificados otros tipos. Un precursor del tinte y un revelador de color se disuelven en un solvente orgánico. La solución entonces es microencapsulada y se mantiene en estado sólido en temperaturas inferiores al punto de fusión. Bajo una fuente de calor, el sistema se colorea o pierde color en el punto de fusión de la mezcla.

En cuanto a los materiales orgánicos termocrómicos típicos alcanzan su cambio de color debido a un cambio estructural de la molécula, como pasa por ejemplo con los politiofenos, y algunos derivados de polifenilvinilo, PPV, los cuales exhiben estas propiedades. Sin embargo, disponen de bastantes limitaciones, ya que estos materiales presentan un contraste de cambio de color bajo a temperaturas poco prácticas, además, presentan una baja reversibilidad debido a los cambios de la fase que acompañan el cambio del color. [18]

Hun-Jen y Lan-Hui, incorporan al tejido hilos conductores eléctricos para aumentar la generación de calor a temperatura ambiente, y así poder controlar la tensión aplicada, y por lo tanto controlar la variación de color. [19]

#### *1.1.4.2.4. Materiales piezocrómicos*

Por último, los materiales piezocrómicos poseen la propiedad de cambiar de color cuando se ejerce sobre él una presión determinada.

En la actualidad, las sustancias orgánicas que presentan esta propiedad todavía presentan muchas limitaciones. Aunque para este tipo de materiales la variedad de aplicaciones posibles es muy amplio, como son: sistemas ópticos, sistemas sensibles a la presión, etc.

Las investigaciones realizadas en este campo, demuestran que se puede obtener materiales con estas propiedades, si se ensamblan molecularmente átomos de hidrogeno a una base aromática, formando una única estructura molecular. El material resultante, un derivado sustituido del tetrafenilpireno, cambia de color cuando se le induce una presión, y además, se ha demostrado que esto fenómeno resulta reversible. Este principio de diseño es simple y aplicable a desarrollar una amplia gama de materiales con esta propiedad. [20]

#### I.1.4.3. TEXTILES CON MICROCÁPSULAS

La microencapsulación podría definirse como el proceso de recubrimiento de sustancias activas con materiales de distinta naturaleza, generalmente poliméricos, para dar lugar a partículas de tamaño micrométrico. El producto resultante de este proceso tecnológico recibe la denominación de “microcápsulas”, “microesferas” o “micropartículas”, en función de su morfología y estructura interna. Todos ellos presentan como característica común su tamaño de partícula, el cual es siempre inferior a 1 mm. Cuando las partículas poseen un tamaño inferior a 1 micra, el producto resultante del proceso de microencapsulación recibe la denominación de “nanoesferas”, “nanopartículas” o “nanocápsulas”.

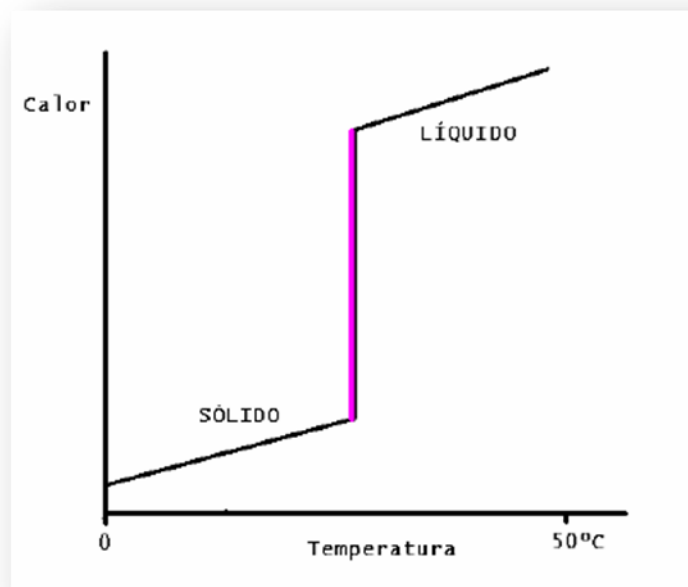
Una de las primeras industrias en aplicar estas técnicas fue la industria del papel, para el desarrollo de papel de calco sin carbón. Actualmente las microcápsulas se emplean en sectores industriales muy diversos, tales como: farmacéutico (liberación controlada de medicamentos), agricultura (liberación lenta de pesticidas y fertilizantes), alimentación (liberación de aromas y sabores), cosmética (microcápsulas de sustancias cosméticas y perfumes), y de forma más esporádica en la industria textil. Las ventajas que ofrecen las microcápsulas sobre un proceso convencional pueden resumirse en la protección y enmascaramiento de la sustancia encapsulada frente a medios inestables para su posterior liberación progresiva. Lo cual ha provocado que diferentes sectores industriales basen algunos de sus productos de mayor innovación en estas tecnologías.

Una de las primeras microcápsulas desarrolladas y más extendidas a nivel mundial son los denominados Materiales de Cambio de Fase, en inglés Phase Change Materials, o PCMs. La tecnología de microencapsulación fue utilizada a principios de los años 80 por la agencia espacial de la Nasa, con la finalidad de proteger los instrumentos delicados de las temperaturas extremas, y además estas microcápsulas se integraron al textil para manejar también las características térmicas de la ropa de los astronautas. [21]

En líneas generales, un material absorbe calor durante un proceso de calefacción mientras su temperatura se eleva constantemente. El calor es almacenado en el material y liberado en el ambiente a través de un proceso reverso de enfriamiento. Durante este proceso, la temperatura del material disminuye continuamente. Los PCM

son materiales de almacenamiento de calor latente que tienen una alta temperatura de fusión, las altas densidades de almacenamiento de energía térmica en comparación con los materiales de almacenamiento de calor sensible absorben y liberan calor a una temperatura constante cuando se someten a un proceso de cambio de fase (por ejemplo, líquido-sólido). [22] Al producirse la absorción, y posterior liberación, de calor en condiciones diversas de la temperatura del aire que rodea el entorno, se produce un efecto termorregulador.

El material de cambio de fase más frecuente y conocido es el agua que pasa de líquido a sólido (hielo) y viceversa, a la misma temperatura. El paso de hielo a agua líquida significa aportación de calor, el cual funde produciéndose el cambio de fase. Por el contrario, eliminando calor del agua a 0°C ésta se transforma de nuevo en hielo.



*Figura 15. Esquema de un cambio fase [21]*

El almacenamiento de energía térmica (TES) se puede lograr por enfriamiento, calentamiento, fusión, solidificación, o vaporizar un material, y viceversa, liberando la energía en forma de calor cuando se invierte el proceso. Los métodos TES se clasifican como almacenamiento de calor de energía térmica sensible (SHTES) o almacenamiento de energía térmica de calor latente (LHTES). [23]

Los PCM se pueden dividir en tres grupos principales, basados en los rangos de temperatura en los que ocurre la transición de fase TES: [23]

- PCM de baja temperatura: con temperaturas de transición por debajo de los 15°C, generalmente utilizados en aplicaciones de aire acondicionado e industria alimentaria.

- PCM de temperatura media: son los más populares, con temperaturas de transición de fase en el rango de 15 a 90°C, sus aplicaciones más comunes suelen ser en energía solar, médicas, textil, electrónica, construcción, etc.
- PCM de alta temperatura: con una transición de fase de por encima de 90°C, desarrollado principalmente para aplicaciones industriales y aeroespaciales,

Además estos materiales también se pueden clasificar por su modo de transición de fase: gas-líquido, sólido-gas, sólido líquido y sólido-sistemas sólidos.

Los materiales PCM en aplicaciones textiles suelen emplearse en tejidos para indumentaria, absorbiendo el exceso de calor para almacenarlo y devolverlo cuando la temperatura interior o exterior disminuye, sin que se llegue a mojar el tejido, ya que el líquido se encuentra encapsulado.

Esta tecnología es ahora utilizada para todo tipo de textiles; indumentaria (parkas, chalecos, ropa de esquí y pantalones) y en textiles para el hogar (mantas, colchones y fundas de almohada). Estos textiles han sido diseñados para desempeñar dos funciones: combatir el frío y el recalentamiento, con lo que su efecto es el de termorregulación. [24]

Los PCM deben actuar en torno a la temperatura del cuerpo humano (33°C) y más concretamente a la de los pies (2°C menos), ya que la sensación de frío se experimenta en los pies y en las manos (extremidades), antes de que el cuerpo humano empiece a perder calor. Procuran mantener el microclima cercano a la piel a una temperatura próxima a la del cuerpo (30-31°C para el pie). La sensación de confort varía de una persona a otra y también según la parte del cuerpo, si bien se considera que se sitúa en el intervalo 29°-35°C. Se pierde confort cuando la temperatura se aproxima a los 40°C, y por otro lado, por debajo de los 20°C se empieza a perder destreza y movilidad.

La mayoría de los PCMs comunes que se aplican al textil son de n-parafina, los cuales son ceras que a una temperatura ( $T_m$ ) de 36-18°C, presentan diversas temperaturas tanto de cambio de fase como de cristalización ( $T_c$ ), dependiendo del número de carbonos que presenta cada estructura. Estas ceras no se pueden incorporar directamente a los textiles debido a que se derriten fácilmente, por tanto, necesitan de un microencapsulado que lo proteja. El microencapsulado implica envolver los PCMs con unas finas y resistentes cubiertas de polímero de modo que se produce el cambio de estado sin problema.

Las microcápsulas suelen tener paredes de menos de 1  $\mu\text{m}$  y un diámetro de 20-40  $\mu\text{m}$ , con una cantidad de PCM del 80-85%. El pequeño tamaño de las cápsulas proporciona un área superficial relativamente grande para el traspaso térmico, de esta forma el PCM reacciona a los cambios de temperatura de forma rápida. [25]

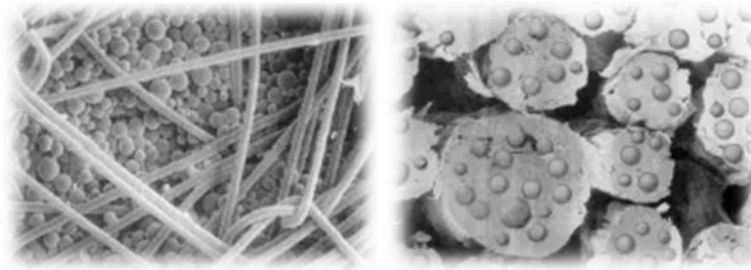
Se han constatado los siguientes beneficios en los tejidos a base de fibras con microcápsulas:

- Efecto refrigerante (por absorción del calor del cuerpo humano).

- Efecto aislante (el PCM actúa reduciendo la pérdida de calor corporal).
- Efecto termo-regulador. Mantiene la temperatura constante (absorbe y libera en función de las variaciones entre la temperatura externa e interna).

La eficiencia y duración de estos efectos depende de la capacidad termal de las microcápsulas PCM y de la estructura del tejido.

El inconveniente que presenta esta tecnología proviene cuando aplicas las microcápsulas por procesos de acabados (la fijación a la fibra es baja, y por lo tanto se pierde en los lavados). Por ello se estudió un nuevo método de incorporación de estas microcápsulas, el cual consiste en inyectarlas en el interior de la fibra sintética, entre un 5 -10%, el proceso utiliza principalmente fibras bicomponentes. De esta manera el PCM es permanentemente bloqueado dentro de la fibra; no hay cambios en el procesado de la fibra, y ésta puede mantener sus características técnicas y textiles normales. [25] Tal y como se observa en las fotografías realizadas en un SEM que se muestran en la figura 16.



*Figura 16. Recubrimiento de microcápsulas de PCM (a) y microcápsulas de PCM embebidas en las fibras (b) [26]*

Las aplicaciones más inmediatas de este tipo de tecnología en los textiles, se presenta en las prendas deportivas, las cuales tienen que proporcionar un equilibrio entre el calor generado por el cuerpo mientras se practica una actividad física y el calor liberado al ambiente. Las prendas deportivas comunes no satisfacen siempre este requisito. El calor generado por el cuerpo durante una actividad física intensa a menudo no es liberado al ambiente en la cantidad necesaria, y como resultado genera una situación de estrés térmico. Por otra parte, durante los períodos de descanso entre actividades se genera menos calor por el cuerpo humano [25]. Si se mantiene la misma liberación de calor, es probable que se den casos de leve hipotermia.

Actualmente, son muchas las aplicaciones de los PCMS. En este sentido, existen algunas prendas comerciales que poseen microcápsulas-PCM, como por ejemplo la marca registrada OUTLAST®, que ayuda a prevenir ese tipo de incomodidades. Son múltiples los posibles campos de aplicación de la fibra Outlast. Entre otros se pueden citar prendas exteriores, ropa de cama, calzado, usos militares, prendas de trabajo protectoras, asientos, etc. [26].



#### I.1.4.4 - TEXTILES ELECTROACTIVOS

Otro ejemplo de los textiles inteligentes los encontramos en los textiles electroactivos, los cuales son aquéllos que experimentan cambios en sus propiedades físicas ante la presencia o aplicación de un campo eléctrico. Algunos de los polímeros electroactivos más empleados son polianilinas, los polipirroles y los politiofenos, capaces de conducir la electricidad, y reconocer un estímulo eléctrico externo que puede ser observado por el cambio en sus propiedades inherentes tales como conductividad, volumen, color, etc., del propio material. [27]

Los polímeros electro-activos pueden clasificarse como iónicos y eléctricos atendiendo al tipo de mecanismos que gobierna la respuesta mecánica frente al estímulo externo. Comparados con los materiales inteligentes convencionales, como las aleaciones con memoria de forma, estos pueden desarrollar varios grados de deformación (de 10 a 300%), con baja histéresis, a altas densidades de energías disponibles. [28]

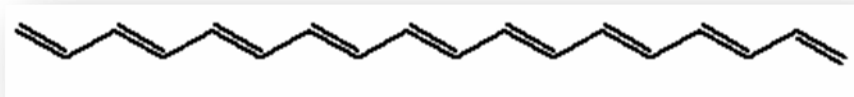
##### *I.1.4.4.1 Polímeros conductores*

Cabe profundizar en este tipo de materiales, pues son de gran importancia para el desarrollo de los textiles inteligentes, no sólo para los textiles inteligentes activos, sino para el futuro desarrollo de la textrónica.

Y esto se debe a que los polímeros conductores presentados en forma de fibra son, junto con otras alternativas, una excelente opción textil para el diseño de líneas de conducción de la señal eléctrica hacia el sistema procesador de la señal, como se verá en apartados sucesivos (véase el apartado [I.1.5.- Textiles inteligentes por la integración tecnologías: textrónica](#)).

Una característica importante de los materiales poliméricos tradicionales es su incapacidad para conducir la electricidad, razón por la cual se les conoce como materiales aislantes. De hecho, esta propiedad de los polímeros es un requisito en muchas de sus aplicaciones.

Sin embargo, en 1977, a raíz de la investigación dirigida por el doctor Hideki Shirakawa (en el Instituto Tecnológico de Tokio), se obtuvo por primera vez un polímero con una conductividad eléctrica, el poliacetileno, mil millones de veces mayor que la esperada y comparable a la de los metales orgánicos, y cuya composición química se representa en la figura 17. [29]



*Figura 17. Estructura química del acetileno [29]*

El motivo para este resultado fue que dicho estudiante agregó mil veces más catalizador (yodo) que el requerido en las especificaciones, lo cual generó cambios sorprendentes en la estructura del polímero. Por este descubrimiento, Shirakawa, MacDiarmid y Heeger ganaron el Premio Nobel de química en el año 2000. Los primeros polímeros conductores (PC) no eran procesables ni estables en el aire, pero gracias al descubrimiento de su conductividad, las investigaciones en este campo se han incrementado notablemente en los últimos años. Hoy en día, los PC son procesables como polvos, películas o fibras en una gran variedad de disolventes.

Tal y como ocurre con los semiconductores, los polímeros pueden ser dopados mediante la adición de pequeñas cantidades de ciertos átomos que modifican sus propiedades físicas. El dopaje se ha empleado en diversos polímeros, como las polianilinas, polipirroles y politiofenos, logrando nuevamente un aumento considerable de la conductividad eléctrica. A continuación, en la figura 18 se muestran la estructura química de estos polímeros conductores.

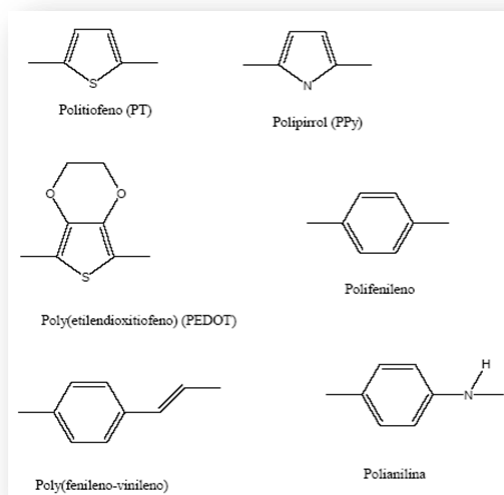


Figura 18. Estructura química de los polímeros conductores más comunes [29]

El fenómeno de la conducción eléctrica implica el movimiento de partículas con carga eléctrica, normalmente electrones, en el interior de un material, cuando sobre él se aplica un campo eléctrico. En un polímero, no conductor, los electrones de valencia están formando enlaces químicos entre los átomos y prácticamente no tienen libertad de movimiento. Esta visión tan simple permite comprender por qué la gran mayoría de polímeros son, en condiciones normales, aislantes eléctricos. Desde el punto de vista de la Teoría de Bandas, teoría que hoy en día explica mejor el comportamiento eléctrico de los materiales, las propiedades eléctricas de una sustancia vienen determinadas por su estructura de bandas. Y más concretamente, por la diferencia de energía que existe entre su banda de valencia (formada por los orbitales que contienen los electrones de mayor energía) y su banda de conducción (constituida por los orbitales vacíos de menor energía).

En los polímeros convencionales, la diferencia de energía entre ambas bandas (“band gap”) es grande, en general mayor que 2.0 eV. Cuando a temperaturas normales se

aplica un campo eléctrico sobre el polímero, la energía adicional que adquieren sus electrones no es suficiente como para que éstos puedan pasar de la banda de valencia a la banda de conducción. En consecuencia, los electrones no pueden moverse libremente por el interior del material. En este caso el polímero mantiene su propiedad intrínseca aislante.

Los polímeros conductores más comunes presentan una distribución alterna de enlaces carbono-carbono simple y doble a lo largo de sus moléculas. Este hecho permite una deslocalización considerable de los electrones de valencia a lo largo del sistema  $\pi$  de la cadena polimérica. Sin embargo, esta deslocalización no suele ser suficiente como para que el material sea conductor. El polímero neutro con estas características puede convertirse en conductor si se hace reaccionar con un agente oxidante (o con uno reductor).

El proceso que tiene lugar es una reacción redox entre las cadenas poliméricas y los aceptores (o los dadores) de electrones. En el lenguaje de la física del estado sólido, el proceso se denomina dopado, por analogía con la síntesis de semiconductores extrínsecos inorgánicos: la utilización de un agente oxidante corresponde a un dopado de tipo p, mientras que el uso de un agente reductor implica un dopado de tipo n. En consecuencia, un criterio a tener en cuenta en la selección de un polímero con posibilidades conductoras es su facilidad para oxidarse o reducirse. La utilización de polímeros heterocíclicos, como los politiofenos, permite trabajar con materiales de bajo potencial de ionización (fácil oxidación) y/ o alta afinidad electrónica (fácil reducción).

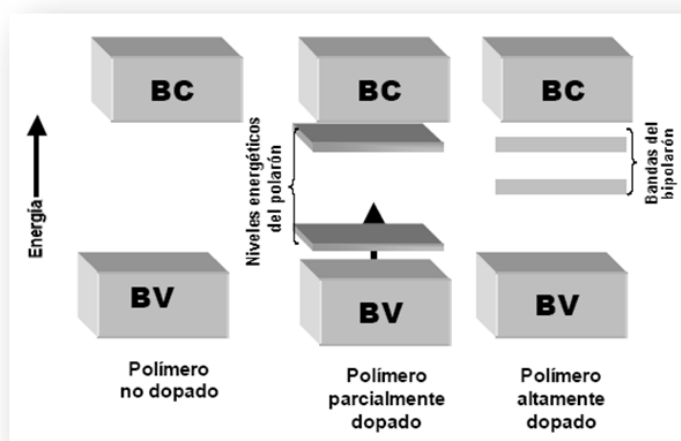


Figura 19 Conductividad de los polímeros explicada mediante la teoría de bandas [30]

Desde el punto de vista de la Teoría de Bandas, ver figura 19, la oxidación o la reducción de las moléculas poliméricas causa la aparición de estados electrónicos situados en el band gap, que facilitan el proceso de conducción. En el caso de la oxidación, la eliminación de un electrón de la cadena polimérica hace que el último orbital de la banda de valencia (denominado HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital) aumente de energía, a la vez que el orbital de conducción de menor energía (denominado LUMO: Lowest Unoccupied Molecular Orbital) se estabiliza.

Como ya se ha señalado anteriormente, el polipirrol es un polímero conductor, sintetizado por oxidación electroquímica del pirrol. Si cada monómero de pirrol pierde 2 electrones, el polímero no es conductor, tal y como se observa en la figura I10. El polímero se vuelve conductor por oxidación posterior. [30]

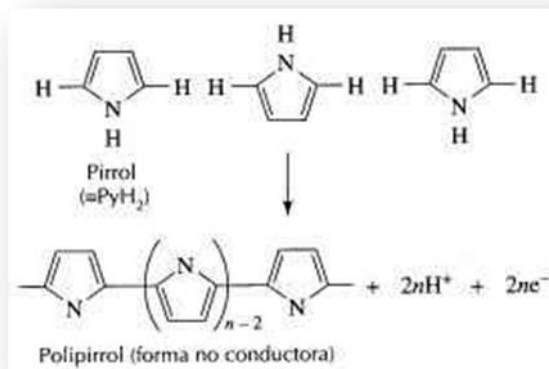


Figura I10. Forma no conductora del polipirrol [30]

Los polímeros conductores se pueden dividir principalmente en dos categorías: [31]

- Por un lado, los polímeros intrínsecamente conductores, en los que la estructura electrónica de estos polímeros es la responsable de su conductividad.
- Y por otro lado, los polímeros conductores por la adición de cargas conductoras.

Las aplicaciones generales de los polímeros conductores a día de hoy son muy numerosas y variadas. Entre ellas podemos citar: baterías orgánicas (baterías recargables de bajo peso), visores electrocrómicos, sensores químicos, diodos emisores de luz (LED), antiestáticos, emisores de interferencias electromagnéticas, bloqueadores de radares, aditivos anticorrosivos y membranas para la depuración de aguas residuales.

Sin embargo, sus aplicaciones más espectaculares se encuentran en el campo de la biomedicina y de la biotecnología. En este contexto destaca el diseño de dispositivos analíticos con interacciones específicas y selectivas: músculos y nervios artificiales (biomecánica), sensores para el reconocimiento de moléculas (biosensores) y sistemas liberadores de fármacos (farmacología). [32]

Tal y como se verá en el apartado [1.3.1.4. Fibras poliméricas intrínsecamente conductoras](#), los polímeros conductores tienen muchas aplicaciones en el sector textil, pues las fibras obtenidas a partir de este tipo de polímeros hacen posible la elaboración de tejidos antiestáticos, electroactivos [33] para aplicaciones en ropa, alfombras, tapicerías, tejidos para el hogar, indumentaria de protección, etc. [34], así como la obtención de textiles que incorporan elementos electrónicos con diferentes

finalidades. Por ejemplo, en la actualidad, ya se han desarrollado materiales inteligentes (sensores) basados en hilos monofilamentos elásticos (Lycra©) recubiertos con polianilinas conductoras, para relacionar el grado de estiramiento del hilo en función del grado de conductividad eléctrica fruto de esta elongación del hilo, y su desarrollo posterior como sensores aplicados en textiles inteligentes, en concreto en este caso, para medir el ángulo de apertura y cierre del codo, [35]. Este tipo de estudios se encuentra relacionado con el objeto del presente trabajo de investigación.

#### 1.1.4.4.2. - Materiales piezoeléctricos

Dentro de los materiales electroactivos se encuentran los materiales piezoeléctricos, los cuales poseen la característica que ante un proceso de deformación del material se induce una polarización eléctrica que es capaz de crear una diferencia de potencial eléctrico, este efecto se denomina “efecto piezoeléctrico directo”. Por otra parte, también se puede dar el efecto inverso, en el que ante la presencia de un campo eléctrico exterior el material se deforma y lo hace proporcionalmente al valor del campo eléctrico (efecto piezoeléctrico inverso), tal y como se representa en la figura I11. [2]

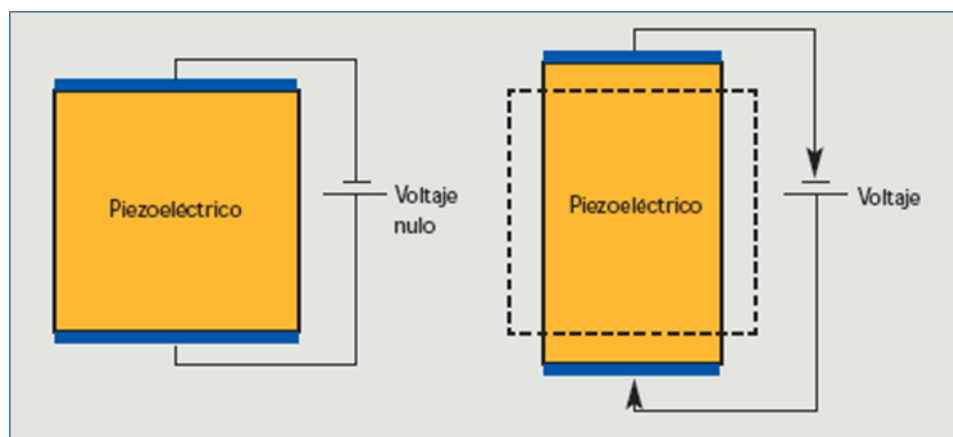


Figura I11. Representación del efecto piezoeléctrico [2]

En este punto, es importante resaltar, que el especial comportamiento de este tipo de materiales inteligentes también presenta una relación directa con la investigación llevada a cabo en la presente tesis doctoral.

Este tipo de materiales, en definitiva, pueden actuar, a priori, como cuantificadores o sensores de la deformación elástica que se produce en todo textil cuando este es sometido a un esfuerzo de tracción (estiramiento). Para ello cabrá estudiar a fondo los principios de funcionamiento de estos materiales inteligentes, para determinar de qué manera se puede diseñar y desarrollar un textil inteligente que aproveche el fenómeno y que sea de utilidad en algún campo de aplicación concreto.

En ese sentido, en el apartado I.2.1.- Piezoelectricidad para el desarrollo de materiales sensibles por deformación elástica, se expone una mayor información de este tipo de

materiales inteligentes, sus fundamentos técnicos y sus principales aplicaciones, sobre los que, se fundamentará a posteriori esta investigación llevada a cabo.

En la industria textil los materiales electroactivos, por sí mismos, integrados en el textil sin una electrónica asociada no tienen mucho sentido ya que no pueden actuar, por lo que donde mayor interés suscitan son en los denominados de tercera generación, a través de la textrónica. A partir de esta integración de materiales electroactivos y electrónica, se pueden obtener un gran abanico de nuevos tejidos inteligentes con nuevas funcionalidades y valor añadido.

Los textiles electroactivos se consideran como los promotores del progreso en este campo, poseen una gran importancia en algunos campos de la medicina, tales como monitorización, telemedicina, etc. Por lo que actualmente, se encuentran muchos y muy variados los grupos de investigación que están trabajando en la elaboración de dispositivos EAP (Electroactive Polimers). [36]

A título de ejemplo, dentro de los EAP, el  $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$  (BNT) se considera como uno de los materiales más prometedores para la sustitución del plomo (Pb) como material piezoeléctrico debido a su alta temperatura de Curie ( $T_c = 320^\circ\text{C}$ ). [37]

Además investigadores chinos, han desarrollado nuevos sistemas de materiales a base de  $(\text{K}, \text{Na})\text{NbO}_3$  (KNN) con gran piezoelectricidad, estos materiales están libres de plomo, y se han obtenido mediante el diseño de los nuevos límites de fase, constituidos en fases romboédricas y tetragonal. [38]

#### I.1.5.- Textiles inteligentes por la integración de tecnologías: textrónica.

El desarrollo de este apartado se fundamenta en la rama de la ciencia que ha venido a denominarse como textrónica, y que se define como la disciplina científica que surge de las conexiones sinérgicas entre la ciencia textil, la electrónica y la informática, [39].

Se considera actualmente como **la máxima evolución de los textiles inteligentes**, tal y como ha sido señalado al inicio del presente trabajo, y un gran campo de investigación de prometedores resultados. La textrónica permite a los textiles, ante un estímulo, actuar de manera diversa, compleja y planificada, más allá de las funciones propias, decorativas o de protección, e incluso más allá de aquellas que son capaces de realizar los textiles inteligentes activos de segunda generación.

Esto permite, a título de ejemplo, que se diseñen sistemas especiales de control automático y que se desarrolle, por ejemplo, un hipotético textil que permita mejorar la salud y bienestar de las personas usuarias, tales como podría ser la prevención de patologías y monitorización de variables fisiológicas, que puedan a su vez realizar la supervisión activa del estado del paciente, e incluso, llegado el caso, conectarse con un centro de asistencia o emergencia telemática, o incluso directamente, administrar un medicamento, por citar una muestra de las grandes posibilidades que se abren a este tipo de desarrollos.

### I.1.5.1 - SENSORES PARA SISTEMAS TEXTRÓNICOS.

Los sensores textiles suponen la base de la textrónica, por ello su desarrollo abre un amplio abanico de posibilidades en este campo.

Un sensor es un convertidor que mide una cualidad o fenómeno físicos (como la energía, velocidad, aceleración, tamaño, cantidad, etc.) y la convierte en una señal que puede ser leída por un lector y procesador, el cual suele ser un instrumento electrónico.

Los sensores pueden ser de muy distinta naturaleza, como materiales piezoeléctricos, materiales magnéticos, diodos, termopares, especies químicas, materiales conductores, etc., dependiendo de la magnitud física que se quiera medir.

Pero, sin embargo, existen todavía a día de hoy varias limitaciones a considerar, principalmente en lo que respecta a su viabilidad industrial, ya que las tecnologías de producción y fabricación textil convencionales no están adaptadas para procesar estos desarrollos en mucho de los casos. Y obviamente, independientemente de las propiedades inherentes que presentan, de sus principios de funcionamiento o de otras variables, este dispositivo sensor, a integrar en una estructura textil, ha de ser capaz de transformar o convertir un estímulo de entrada (por ejemplo, una energía mecánica; presión), en otra diferente a la salida (eléctrica), y muchas veces con la suficiente sensibilidad para que se llegue a cuantificar y disponga de la reproducibilidad y robustez necesaria.

En base a ello, los sensores se pueden clasificar en:

➤ *Sensores de parámetros del cuerpo humano:*

- Señales cardiológicas
- Temperatura
- Respiración
- Movimientos del cuerpo
- Posición del cuerpo
- Sudor
- Corriente eléctrica
- Agentes químicos
- Agentes biológicos
- Presión
- Sensores acústicos
- Propiedades de la piel

➤ *Sensores del entorno:*

- Temperatura
- Movimientos

- Biológica
- Química
- Campos electromagnéticos
- Agua/humedad
- Radiación
- Posición
- Presión
- Sonido

➤ *Sensores del estado de las condiciones del propio textil*

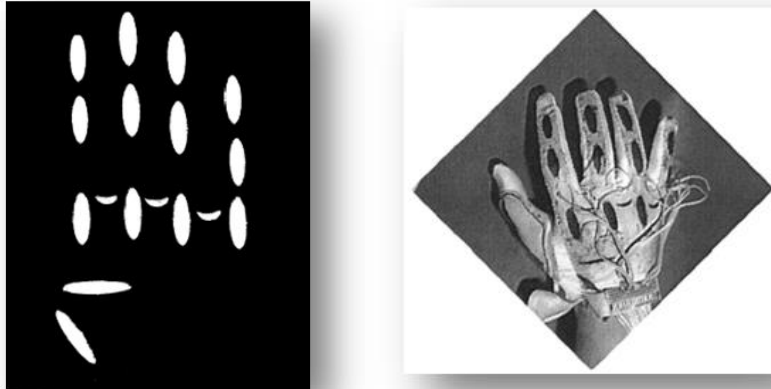
- Temperatura
- Humedad
- Elasticidad
- Desgaste

Desde el descubrimiento de los polímeros conductores, las posibilidades que ofrecen los textiles inteligentes de tercera generación son cada vez mayores, incrementándose notablemente, y con nuevas aplicaciones constantemente. Estos materiales ofrecen varias ventajas con respecto a los metales y a los conductores inorgánicos: ligereza, elasticidad, resistencia, y flexibilidad, entre otras. Estas características los hacen idóneos para aplicaciones en sensores transportables. Es por ello, que en este sentido, son muchos los desarrollos de sensores basados en polímeros conductores que se están llevando a cabo en los últimos años. A título de ejemplo, se ha desarrollado un sensor capaz de detectar la variación de presión y humedad, mediante un cambio en su resistencia específica. Este sensor está formado por fibras de poliamida impregnadas con una disolución PEDOT-PSS. Estos sensores se podrían aplicar en tejidos de elevada área superficial. [40]

Un coste adecuado, peso ligero, portabilidad y la flexibilidad son los requisitos que condicionan la fabricación de sensores para integrarlos en el textil. La tecnología de los semiconductores orgánicos parece superar estos requisitos.

Otro ejemplo de sensor con características llevables que ha sido desarrollado en los últimos años permite la medida de la forma, la detección de la postura, y el gesto del cuerpo humano [41]. Para ello han desarrollado un prototipo de guante capaz de detectar la posición y el movimiento de los dedos respecto a la palma tal y como se observa en la siguiente figura 112.





*Figura 112. a) Ubicación de los sensores en el guante; b) guante con los sensores integrados. [42]*

Para conseguir sensorizar el guante, se cubrieron las fibras convencionales de lycra/algodón con un polímero conductor, el polipirrol, controlando el proceso de deposición del polímero de forma muy rigurosa.

Otro ejemplo lo encontramos en los investigadores polacos de este trabajo de investigación, [42], los cuales han desarrollado un artículo con dos tipos de sensores de temperatura flexibles, hechos de nanoestructuras por materiales compuestos a base de carbono, fabricados por un método de serigrafía de bajo costo.

De nuevo autores polacos, en este otro, [43], utilizan grafeno y nanotubos de carbono para introducir propiedades de detección química en materiales textiles por medio de un método de serigrafía.

La integración de materiales poliméricos electroactivos para sensorizar los textiles, puede permitir el desarrollo de nuevos artículos destinados a diferentes usos, por ejemplo: realidad virtual, ergonomía, telemedicina, deportes, y aplicaciones militares.

En la actualidad, el desarrollo de la informática y las tecnologías de comunicación ha posibilitado también que los textiles inteligentes se encuentren más al alcance de los usuarios. La gran mayoría de personas en países desarrollados disponen de un dispositivo inteligente que puede permitir a través de una APP interactuar con un producto textil inteligente. Un ejemplo es la patente [44], la cual se ha desarrollado una camiseta inteligente capaz de medir frecuencia respiratoria y temperatura, y donde se procesa y controla en tiempo real estas mediciones fisiológicas, pudiéndose procesar de forma digital a través de una aplicación informática desarrollada de forma específica.

Es por ello, y a modo de resumen, que la tecnología basada en los materiales conductores textiles, el desarrollo de la microelectrónica, y los avances e integración de la informática y las tecnologías de comunicación son los elementos que se están posibilitando que la tectrónica presente cada vez más mayor interés para la industria como para los consumidores y usuarios.

### 1.1.5.2. RESTO DE COMPONENTES DE UN SISTEMA TEXTRÓNICO.

Específicamente, en este apartado, se describen el resto de elementos mínimos estructurales que ha de reunir un sistema textrónico, para poder registrar el estímulo que ha detectado el sensor y, posteriormente ejecutar acciones de respuesta en función del citado estímulo, o simplemente mostrarlo. Un sistema textrónico está integrado, además del propio sensor de naturaleza textil, por una serie de elementos de naturaleza electrónica e informática que siguen la siguiente distribución mostrada en la figura 113.

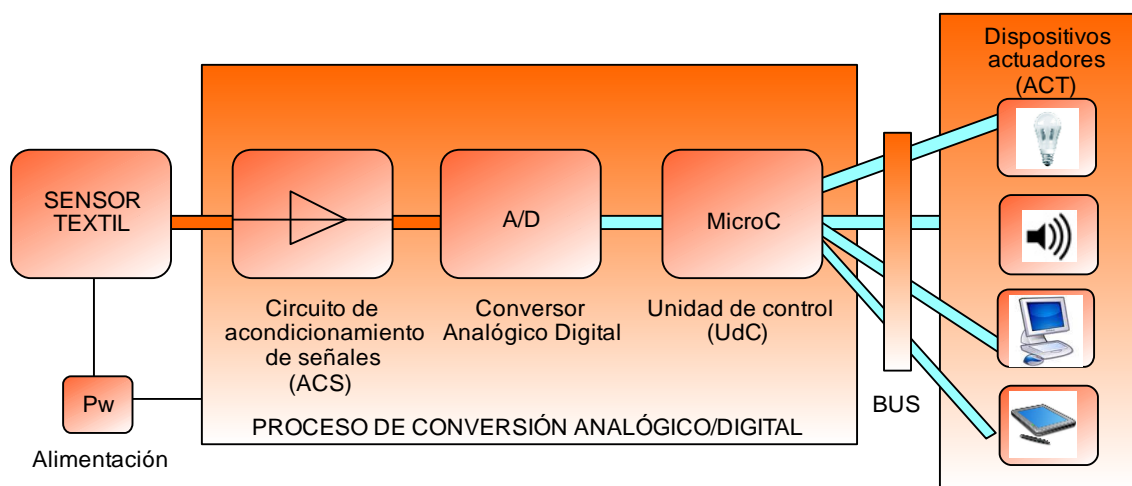


Figura 113. Elementos que integran un sistema textrónico

Seguidamente se identifican todos los elementos que lo integran y las funciones que cada uno de ellos tiene asignadas en el mismo.

#### 1.1.5.2.1. Conexiones entre el dispositivo textil y el resto del sistema

En primer lugar, es una consideración indispensable que el sensor textil esté de alguna forma interconectado con el resto del sistema, y ésta debe ser de forma que permita transmitir la energía eléctrica al siguiente módulo del sistema asegurando la calidad y eficiencia en la conexión. Se trata, por tanto, de un apartado de gran importancia, y por ello han de explorarse tres aspectos diferenciados pero que están íntimamente interrelacionados: (1) la conducción interna de la electricidad hasta los conectores, (2) los métodos de interconexión entre las líneas internas de conexión entre sí, y entre éstas y el siguiente sistema, y (3) los propios conectores, también llamados formas de conexión terminal, que, finalmente, comunican el textil con el resto del sistema. Los analizamos a continuación con mayor grado de detalle: [45]

(1) **Conducción interna de la electricidad:** en este sentido, la estructura textil debe integrar líneas conductoras de conexión eléctrica entre las distintas áreas en las que el sensor textil tiene localizada su actuación y conducir la energía eléctrica a través de la superficie del textil hasta el elemento que conecta con el exterior (conectores) o el sistema procesador.

Abarcan aquellas estructuras y tecnologías que se pueden utilizar en el textil para integrar en su interior estos canales de conducción de la electricidad, y para ello fundamentalmente se suele emplear en la estructura del tejido algún tipo de hilado conductor. Estos hilados se pueden integrar de diversa manera: mediante el propio proceso de tejeduría (a la plana o de punto), o cosidos o bordados al tejido.

La forma más sencilla de incorporar un hilado conductor es mediante tejeduría a la plana de un ligamento sencillo, pues dependiendo de la flexibilidad del hilado, soportará un mayor o menor doblado. También puede insertarse mediante tejeduría de punto, pero en este caso, al tenerse que formar un bucle muy pronunciado durante la inserción del hilo, el rango de fibras a utilizar se reduce pero, a cambio, se obtiene, si se desea, un tejido con una mayor flexibilidad relativa, frente a un tejido a la plana.

Otra forma de introducción de estos hilados conductores que se suele emplear, es mediante un cosido al tejido para crear un canal que puede recorrer el tejido, potencialmente, de una manera más configurable y flexible a comparación de cuando el hilo conductor va tejido. Estos novedosos procesos se denominan e-bordado.

(2) **Interconexión eléctrica:** es necesario definir cuáles son los procedimientos que existen para acometer una interconexión eléctrica en las dos situaciones que se pueden dar en un textil: I) entre un hilo conductor y otro hilo conductor o II) cuando un hilo conductor alcanza al conector (conexión terminal). Los puntos de unión son críticos para conseguir una buena conexión, pues una interconexión inadecuada es causa de un contacto incompleto y una resistencia eléctrica no-uniforme en estos puntos de unión. Las conexiones eléctricas son posibles mediante una soldadura, bordado o una unión adhesiva.

Los puntos de soldadura entre los dos medios conductores (entre hilos conductores y los conectores) pueden realizarse, entre otras técnicas, mediante soldadura por estañado (en la que el metal de base no se funde), y soldadura blanda, en la que el material de base sí que se funde y se introduce en la articulación. Estos tipos de unión ofrecen una conductividad y resistencia adecuada para aquellos puntos de unión que han de ser permanentes, pero presenta como inconveniente la potencial degradación o incluso rotura cuando el punto de unión se somete a procesos repetidos de doblado y flexión.

Las interconexiones también pueden realizarse mediante un bordado. Este procedimiento es recomendable en la definición de puntos de unión que han de estar sometidos a elevados procesos de doblado, presentan mayor resistencia. Además permite enmascarar los elementos no textiles mediante un motivo o diseño textil. Una desventaja que se deriva de ellos es un descenso de elasticidad dimensional. Además, si las suturas se desenganchan o el bordado no es muy robusto, la estabilidad de la conexión se ve comprometida.

Finalmente, una alternativa a los anteriores son los adhesivos conductores, que ofrecen una alta conductividad, elevada durabilidad y son moderadamente flexibles. Se trata de una alternativa que es actualmente objeto de mayores investigaciones y que presenta muchas ventajas y posibilidades en el campo de los textiles inteligentes.

(3) **Conectores:** son las formas de conexión terminal y son los que finalmente transmiten la señal al exterior del textil, lo que se denomina “respuesta” del textil inteligente- Estos conectores deben ser especialmente diseñados para tal efecto y en función de su aplicación. Han de ser lo suficientemente fuertes y duraderos para el entorno de aplicación y, además, permitir su fácil conexión y desconexión. Es por ello que determinadas fornituras metálicas, tradicionalmente usadas en el sector textil para abrochar o enganchar tejidos son muy útiles para también proporcionar una muy buena conexión.

Una de las alternativas de mayor uso son los broches de presión, que se conocen en electrónica por ser una de las formas más usadas hasta el momento de conexión, siendo además una de la más barata y funcional. Mediante este método, una de las caras se sujeta al textil (a sus hilados conductores mediante una forma de interconexión como una soldadura) y la otra cara se sujeta al dispositivo electrónico. Su mayor ventaja es la facilidad de enganche y desenganche, pero la sucesiva repetición de estas acciones puede dar lugar a la reducción paulatina de la conductividad en los puntos de conexión.

Se están trabajando en distintas alternativas, como el cable textil USB que propone la construcción de un conector bajo el estándar USB y que debe ser flexible y confortable para que pueda estar integrado en los artículos textiles. También se están proponiendo alternativas que conceptualmente son incluso más robustas, en este caso en forma de hebillas, lo cual proporciona una forma de conexión segura, y, a la vez, sencilla de conectar/desconectar. En la figura I14 encontramos dos ejemplos convencionales de estos tipos de conectores textiles. [45]



Figura I14. Conectores textiles: cable textil USB y hebillas [45]

#### *1.1.5.2.2. Circuito de acondicionamiento de señales (ACS).*

Las señales que el sensor es capaz de transmitir no pueden, por su calidad, ser interpretadas directamente por un conversor Analógico / Digital (A/D), ya que presentan una elevada cantidad de ruido, pudiéndose ser muy débiles o no interpretables, entre otras. Se precisa de una fase intermedia de acondicionamiento, que corre a cargo del dispositivo electrónico que nos ocupa para que el sistema de conversión A/D pueda medir la señal de manera eficaz y con precisión. En el apartado

[I.1.5.3.1. Procesos de acondicionamiento de las señales](#) se tratan en detalle todos los procesos de acondicionamiento que realizan los dispositivos ACS.

#### *I.1.5.2.3. Conversor Analógico Digital (CAD o A/D)*

Un convertidor analógico-digital es un dispositivo que convierte una señal física continua a un número digital, que representa la amplitud de la cantidad de señal. La conversión implica la cuantificación de la señal de entrada, por lo que introduce una pequeña cantidad de error.

Estas conversiones se realizan no de manera puntual, sino que se realizan de manera periódica, esto es, se realiza el muestreo de la señal de entrada. El resultado es una secuencia de dígitos que resultan de convertir una señal analógica continua en tiempo y en amplitud, en una señal digital de tiempo y amplitud discreta.

La señal de salida, digital, se puede codificar de maneras diversas, pero comúnmente se convierte a un número binario que es proporcional a señal de la entrada.

#### *I.1.5.2.4. Unidad de control (UdC)*

La unidad de control está conectada por sus puertos de entrada al conversor A/D y por los puertos de salida de este último. Puede estar integrada por un microprocesador o un cualquier dispositivo computacional capaz de interpretar las señales de salida del conversor A/D, que son digitales. Y de forma paralela, se debe procesar y enviar una orden de salida a un periférico (dispositivo externo) para que éste permita recoger y procesar la información.

La unidad de control ha de ser programada en función de las señales de entrada y de las órdenes que deba ejecutar: el actuador.

Una unidad de control puede estar integrada simplemente por un microcontrolador programado para interpretar las señales digitales que le trasmite el sensor, por ejemplo un sensor de presión, a través de sistema y actuar consecuentemente según las órdenes que hayan sido incorporadas en su programa. Estas órdenes se transmiten por los puertos de salida correspondientes a cualquier periférico que esté conectado él.

En este caso concreto, y relacionado con el contexto del presente trabajo, la unidad de control ha de poder conocer la intensidad de la presión ejercida, así como ha de ser capaz de poder identificar en qué parte del tejido se está ejerciendo presión. Obviamente tales capacidades dependerán, por un lado, de la construcción del propio sensor como, por otro, del diseño del conjunto del sistema.

#### *I.1.5.2.5. Buses y puertos de comunicaciones*

Un bus de comunicaciones es un sistema que trasfiere los datos, que están en formato binario, desde el puerto de un microcontrolador al puerto de un PC, desde un PC a

otro, o por el interior del PC (aunque este último aspecto queda fuera del alcance de este trabajo).

Existe, en informática, una gran cantidad de alternativas en este sentido, algunas no tan conocidas, como los buses PCI, ISA, I<sup>2</sup>C, RS-232 o los ya más conocidos como USB, FireWire, Ethernet.

Los anteriormente expuestos son, todos ellos, buses comunicaciones alámbricos, precisan de la presencia de cables para la transmisión de la información, sin embargo, en la actualidad también cabe considerar otro tipo de interfaces de comunicaciones de tipo inalámbrico que ponen en comunicación los propios microcontroladores con otros periféricos discretos, ya sean móviles o estáticos, utilizando como medio de transmisión el aire, haciendo uso del espectro de radiofrecuencia o RF, que es la porción menos energética del espectro electromagnético y que está situada entre unos 3 kHz y unos 300 GHz. Ejemplos en este sentido los encontramos en el estándar Bluetooth, IrBus, Wireless (por infrarrojos, también llamado IrDA), zigbee, o la familia de estándares IEEE 802.xx. En el apartado [1.1.5.4 Arquitecturas de red para texttrónica](#) se trata con mayor detalle las diversas estructuras en red para la transmisión externa de la información, para enlazar esta información con otros sistemas.

#### *1.1.5.2.6. Dispositivos externos actuadores para textiles*

Un actuador externo es el sistema que emite la respuesta en función de la señal que recibe de la unidad de control. Las respuestas que emite el actuador se pueden clasificar principalmente en: térmica, eléctrica, mecánica, acústica, química, biológica u óptica.

Desde el punto de vista de su naturaleza, estos dispositivos externos pueden ser de diversa índole, pero, en general se pueden clasificar en dos grupos: analógicos y discretos (pertenecientes a la electrónica digital), dependiendo de la forma en que estos interpretan la información.

Entre los dispositivos analógicos más comunes podemos encontrar desde un simple enchufe a una bombilla, un led, un amplificador de sonido, etc.

Las unidades de control se asocian a estos dispositivos externos analógicos a través del puerto de salida. La información que estos dispositivos externos son capaces de interpretar es del tipo analógica, por lo que la unidad de control ha de encargarse de realizar la conversión inversa, digital-analógico, transmitiendo voltajes capaces de ser interpretados por estos dispositivos.

Los dispositivos discretos, por su parte, pueden interpretar directamente la señal (datos binarios) para procesarla atendiendo a un fin específico, por ejemplo un PC o un dispositivo móvil con un software concreto que ejecute una orden cuando recibe los estímulos del sensor.

La conexión entre los microcontroladores y los dispositivos discretos tales como PC, terminales móviles u otros se realiza mediante el llamado bus de comunicaciones que puede ser de diversa índole.

En los escenarios más sencillos, puede perseguirse, únicamente, el almacenamiento y/o visualización de la información recopilada. Pero una vez recopilada toda la información, pueden emprenderse tareas más complejas derivadas del tratamiento de los datos, hasta el punto de interpretar y extraer conclusiones de los resultados obtenidos y actuar en consecuencia.

Estos dispositivos, sin embargo, pueden a su vez, tener el rol de actuadores con un nivel de complejidad más elaborado y realizar así otro tipo de tareas a partir del análisis de los datos: como por ejemplo y en relación a la presente tesis, la localización e intensidad de la presión en una franja determinada del tejido inteligente.

En este sentido, la respuesta final ante el estímulo ejercido sobre el sensor (la presión) dependerá no sólo de la correcta incorporación de los elementos que componen el conjunto, sino también del propósito a alcanzar, de forma que será necesario diseñar en su conjunto el sistema completo y optimizarlo, y no solo quedarse a un primer nivel de cómo desarrollar el sensor.

### I.1.5.3. PROCESOS INTERNOS DE TRASFORMACIÓN DE LA INFORMACIÓN.

Tras analizar la estructura que define, idealmente, un sistema textónico, a continuación se exponen los diversos procesos de transformación que sufre la señal, desde su emisión por el dispositivo sensor, hasta su transformación final en un estímulo o actuación.

#### *I.1.5.3.1. Procesos de acondicionamiento de las señales.*

La señal de origen, transmitida por el sensor, ha de sufrir un proceso previo de acondicionamiento para que pueda ser interpretado correctamente por el conversor A/D, por ello, dependiendo de la calidad de esta señal, puede ser sometida a diversos tipos de procesos de acondicionamiento [46]:

**Amplificación:** los amplificadores incrementan el nivel del voltaje para una mejor conversión analógico-digital, aumentando, así la resolución y la sensibilidad. Además, cuanto más cerca del sensor, se realice el proceso de amplificación de la señal, menos se verá esta señal afectada por el ruido ambiental, debido al incremento que se efectúa en la propia señal, produciéndose en descenso del ratio señal/ruido.

**Atenuación:** es el proceso inverso a la amplificación y es necesario implementarla cuando los voltajes, analógicos, susceptibles de ser digitalizados superan el rango que es capaz de interpretar un conversor A/D. Este proceso de acondicionamiento disminuye la amplitud de la señal de entrada de modo que la señal acondicionada está dentro del rango ADC. La atenuación es normalmente necesaria, únicamente, en la medición de voltajes que superiores a 10 V.

**Aislamiento:** su función es transmitir la señal desde la fuente al sistema de conversión A/D sin la utilización de una conexión física (por ejemplo mediante un transformador) para rechazar tensiones elevadas y sobretensiones o, en general, evitar

perturbaciones, dejando aislado el resto del sistema frente a posibles fenómenos que potencialmente afecten negativamente tanto a la medición como al propio sistema de interpretación de señales. El aislamiento puede ser; de tipo magnético, que transforma un campo eléctrico en uno magnético; de tipo óptico, que toma una señal eléctrica y la modula en una señal que se codifica mediante la transmisión de señales lumínicas (codificación óptica) o, incluso; de tipo capacitivo.

**Filtrado:** los filtros rechazan el ruido no deseado dentro de un determinado rango de frecuencias. A menudo, los filtros se utilizan para bloquear el ruido de alta frecuencia en las mediciones eléctricas, tales como 60 Hz. Otro uso común para el filtrado es prevenir el llamado problema que se da cuando, en el muestreo de las de señales de alta frecuencia, dos señales sinusoides puedan coincidir, pese a ser señales diferentes. Estas problemáticas se pueden evitar mediante el uso de un filtro.

**Excitación (fuente de alimentación):** en función del tipo de sensor a desarrollar (en los sensores de presión del tipo piezoresistivos, por ejemplo), potencialmente puede ser necesaria la utilización de una fuente de corriente externa o excitación. Ocurre en otros tipos de sensores, como los acelerómetros, o los termistores y detectores de temperatura por variación de su resistividad (sensores RTDs). En estos sensores, su resistividad varía en función de la temperatura, lo cual puede ser determinado mediante la cuantificación de la variación del voltaje resultante frente al aplicado, que es conocido y constante.

**Linealización:** consiste en encontrar la aproximación lineal de una función en un punto dado y es necesaria cuando los sensores producen señales de tensión que no están linealmente relacionadas con la medición física. Mediante la linealización se interpreta la señal del sensor, ya sea mediante un acondicionamiento de la señal o a través de software. Los termopares son el ejemplo clásico de un sensor que requiere de linealización.

**Terminación de los conectores puente:** se suele producir en los puntos de conexión, pérdida de señal, se hace indispensable una regulación y ajuste de la propia señal, por ejemplo, en resistores, y cuando es necesaria una alta resolución. Es debido a la formación de resistencias que impiden y distorsionan esta señal. Un ejemplo es cuando hay que detectar cambios de pequeño voltaje a través de un resistor activo.

#### *1.1.5.3.2. Proceso de conversión de la señal analógica en su forma digital*

Al proceso de acondicionamiento de la señal original le siguen una serie de subprocesos que conducen a la transformación de esta misma señal continua (voltaje), a una señal discreta. Al final se obtendrá un equivalente digital, más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas. A continuación se detallan estos subprocesos a los que son sometidas las señales analógicas para ser convertidas en digitales:

**Muestreo:** consiste en tomar muestras de la señal analógica a una frecuencia o tasa de muestreo constante para, en una fase posterior, poder ser cuantificadas (proceso de cuantificación). La frecuencia de muestreo, ( $f$ ) define el número de muestras por



unidad de tiempo (generalmente segundos) tomadas de una señal continua para hacer una señal discreta. Su unidad es el hertzio (Hz).

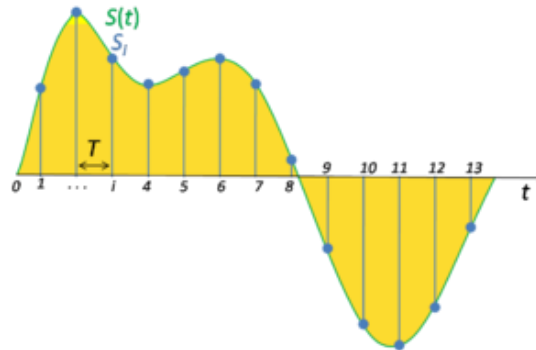


Figura I15. Representación de un muestreo de señal

El proceso de muestreo digital se realiza siguiendo los principios del teorema de Nyquist-Shannon, que es la base de la representación discreta de una señal continua en banda limitada.

Desde el punto de vista del teorema, las muestras discretas de una señal son valores exactos que aún no han sufrido redondeo o truncamiento alguno sobre una precisión determinada, esto es, aún no han sido cuantificadas (fase posterior del proceso de conversión). El teorema demuestra que es matemáticamente posible la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras, siempre que la señal esté limitada en banda, y siempre que la tasa de muestreo sea superior al doble de su ancho de banda. En la gráfica de la figura I15 se representa la línea verde la señal continua, y el muestreo (valor discreto) se representan mediante líneas azules verticales.

**Cuantificación y codificación:** supone la conversión de una sucesión de muestras de amplitud continua en una sucesión de valores discretos. Aunque se trata de dos subprocesos diferenciados, ambos están vinculados entre sí, por ello se tratan en este trabajo de manera conjunta.

Durante la cuantificación se mide el nivel de tensión de cada una de las muestras obtenidas en el proceso de muestreo, y se les atribuye un valor finito (discreto) de amplitud, seleccionado por aproximación dentro de un margen de niveles previamente fijado (llamado resolución digital). Si el nivel de tensión obtenido no coincide exactamente con ninguno, se toma como valor el inferior más próximo.

Por lo tanto, la **cuantificación** implica la realización de un redondeo con una precisión que dependerá de la llamada resolución digital que se determine en cada caso en el proceso de codificación. El tipo más común de cuantificación se conoce como cuantificación escalar.

En este momento, la señal analógica (continua y que por lo tanto puede tomar cualquier valor) se convierte en una señal digital en la que los valores que están preestablecidos, son finitos. Estos valores numéricos discretos que componen la muestra, no obstante, todavía no se traducen a un sistema binario.

Finalmente, la **codificación** consiste en la traducción de los valores de tensión eléctrica analógicos que ya han sido cuantificados (ponderados) al sistema binario, mediante códigos preestablecidos. La señal analógica va a quedar transformada en un tren de impulsos de señal digital (sucesión de ceros y unos). Esta traducción es el último de los procesos que tiene lugar durante la conversión analógica-digital. El resultado es un sistema binario que está basado en el álgebra de Boole. Tal y como se observa en la figura I16.

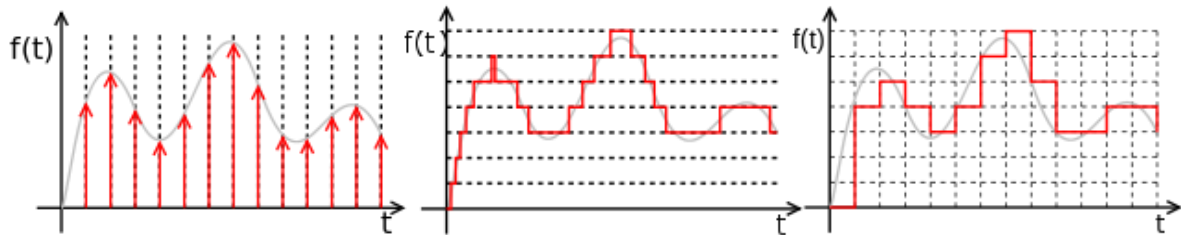


Figura I16. A) Cuantificación y codificación. Muestreo digital (señal discreta): tiempo discreto, valores continuos. B) Señal cuantificada: tiempo continuo, valores discretos. C) Señal digital (muestreo, cuantificado): tiempo discreto, valores discretos

En este sentido, es importante prestar mayor atención a un parámetro de gran relevancia que interviene en los sistemas de conversión A/D: la ya mencionada resolución, la cual, como ya se indicó, definirá el tipo de redondeo realizado, y por tanto determinará la precisión de la señal digital equivalente con respecto a la original.

Y esto es así porque la resolución viene determinada por la longitud de la palabra digital (número de bits), es decir por las agrupación de ceros y unos con que se va componiendo (codificando) la señal, dado que en su definición se utiliza el código binario ( $2^n$ ), es decir que 1 bit equivale a 2 posibilidades: 1 o 0.

Desde el punto de vista de la precisión del muestreo, cuanto mayor es el número de bits, mayor es la precisión. Por ello se suelen utilizar las potencias de 8, 10, 16 o 24 bits, esto es 256, 1024, 65.536 y 16.777.216 posibilidades.

Por ejemplo si se desea convertir una muestra analógica de entre 0 y 5 voltios con una resolución (o longitud de palabra) de 8 bits, se dispondrá una un rango de valores finito comprendido entre 0 y 5, a intervalos de 19.5mv:

$$\text{Resolución} = \text{valor analógico} / (2^8) = 5 \text{ V} / 256 = 0.0195\text{v}$$

#### I.1.5.4 ARQUITECTURAS DE RED PARA TEXTRÓNICA.

Las diversas formas en que los sistemas tetrónicos se pueden comunicar con el exterior constituyen otro de los factores básicos para el desarrollo de la tetrónica. En este apartado se realiza una aproximación a las mismas.

#### 1.1.5.4.1. Redes inalámbricas

Para la transmisión de la información se pueden utilizar tecnologías inalámbricas para simplificar las conexiones entre los componentes electrónicos. Dependiendo del espacio cubierto por las redes de comunicación se utilizan las siguientes denominaciones:

**BAN (Body Area Network).** Red de área corporal que se utiliza para la interconexión de dispositivos, sensores y equipos que se llevan sobre el cuerpo o en las ropas u objetos de uso personal. Su rango de alcance es de alrededor de 1 m.

**PAN (Personal Area Network).** Red de área personal que se utiliza para facilitar la comunicación con dispositivos periféricos situados en un entorno de unos 10 m.

**LAN (Local Area Network).** Red de área local para acceso nómada o móvil a redes corporativas e Internet dentro de un edificio o en áreas limitadas a unos pocos centenares de metros.

**WAN (Wide Area Networks).** Red de área extendida Incluye redes públicas o privadas de alcance global que facilitan el acceso y el encaminado a redes fijas o móviles con total movilidad y garantía de nivel de calidad de servicio.

Y para expresar la referencia explícita a redes inalámbricas se utilizan respectivamente las expresiones WBAN (Wireless BAN); WPAN (Wireless PAN); WLAN (Wireless LAN) y WWAN (Wireless WAN). En la siguiente figura I17 se muestra el modelo general de tipos de redes inalámbricas atendiendo a su alcance de cobertura. En base a un orden creciente se clasifican en: WBAN (Wireless Body Area Networks); WPAN (Wireless Personal Area Networks); WLAN (Wireless Local Area Networks), y WWAN (Wireless Wide Area Networks).

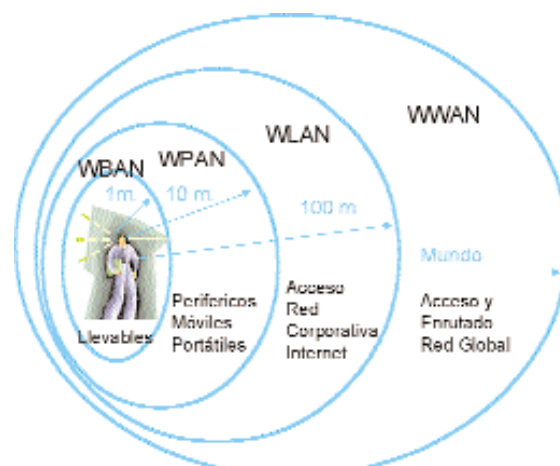


Figura I17: Modelo general de tipos de redes inalámbricas atendiendo a su alcance de cobertura

#### *1.1.5.4.2. Redes para sistemas llevables.*

Uno de los elementos básicos para conseguir materializar el concepto de sistemas "llevables" (de "wearables" en inglés) son formas de interconexión y de comunicación de datos entre los diferentes dispositivos que lo componen (WBAN o BAN) con el exterior (WPAN, WLAN, WWAN).

A continuación se exponen los requisitos más relevantes que han de considerarse para la correcta integración de un sistema textrónico en un entorno de uso real que cada vez está más saturado de dispositivos:

- Compatibilidad con el contacto con las personas y con los elementos de vestuario y uso personal.
- Dimensiones, peso y consumo de energía los más reducidos posibles.
- Fiabilidad, robustez y durabilidad compatibles con las condiciones de vida normal, ausencia de necesidad de mantenimiento.
- Multiplicidad de componentes a interconectar.
- Comunicación inalámbrica con el medio, interoperación con otras redes, acceso a Internet.
- Ancho de banda.
- Compatibilidad electromagnética.
- Seguridad.
- Identificación segura del usuario.
- Coste.

#### *1.1.5.4.3. Tecnologías de redes para comunicación externa*

Las comunicaciones entre la red llevable y el entorno exterior descansan en tecnologías inalámbricas. Hay que considerar una variedad de posibilidades. Entre ellas se encuentran:

- Redes de área local inalámbricas (WLAN) fijas y reconfigurables (MESH).
- Redes de comunicaciones móviles celulares (GSM; GPRS; UMTS, 4G)
- Sistemas de buscapersonas bidireccionales (Paging)
- Redes de Área Metropolitana Inalámbricas (WMAN)

No existe una solución única ideal. La optimización en cada caso depende de los requisitos de la aplicación específica, escenarios de uso y disponibilidad tecnológica y de los operadores de servicios de telecomunicación.

Hay que tener en cuenta las comunicaciones basadas en satélite y las soluciones basadas en nodos situados en aviones y aerostatos. La conexión a Internet es clave para la conectividad exterior de los sistemas. La conexión a Internet está detrás de las tipologías de arquitecturas para interconexión de los diferentes tipos de redes inalámbricas y los subsistemas de los diferentes tipos de aplicación.

#### *1.1.5.4.4. Redes personales para la comunicación sobre el cuerpo*

Las redes de área personal tipo **Bluetooth**, se diseñaron inicialmente para la conexión entre ordenadores y sus periféricos, Posteriormente se popularizó para la interconexión con teléfonos no inteligentes. Actualmente está presente tanto en smartphones y tabletas, como en sensores y todo tipo de dispositivos. Funciona a corta distancia de la persona y evita el engorro de los múltiples cables de interconexión que se necesitan. Su última especificación, Bluetooth 5.0, de 2016, es más eficiente tanto en el tratamiento de los datos, como en el consumo de energía, así como en el rango de cobertura.

Por otro lado, la tecnología **ZigBee** es una alternativa muy competitiva para la telextrónica frente al estándar Bluetooth. ZigBee es el nombre de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo. Está basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Es una de las más indicadas para telextrónica debido a sus características propias, que lo diferencian de otras tecnologías:

- Su bajo consumo.
- Su topología de red en malla.
- Su fácil integración (se pueden fabricar nodos con muy poca electrónica).

Aunque actualmente el uso de bluetooth está mucho más expandido. Una red personal depende en su estructura y funciones del tipo de usuario y el entorno. Es diferente dependiendo del ámbito de aplicación de la telextrónica, pues a título de ejemplo, no pueden llegar a ser los mismos requerimientos para un paciente (telextrónica para el campo de la medicina) que para profesionales (telextrónica aplicada al ámbito de la defensa o la protección personal).

#### **1.1.5.5. LIMITACIONES EN LOS SISTEMAS TEXTRONICOS**

Tras la exposición de los elementos que integran un sistema telextrónico, en donde ha habido aproximaciones puntuales a sus limitaciones científico-técnicas, cabe profundizar en aquellos requerimientos esenciales que deben poseer estos elementos

textrónicos, los cuales muchas veces presentan limitaciones importantes difíciles de solventar, es por ello, que es una línea de investigación que se está trabajando en los últimos años de forma relevante. A continuación se exponen los ámbitos más significativos en torno a los sistemas textrónicos que presentan mayor potencial de mejora y que se consideran a día de hoy objeto de estudio para su desarrollo y optimización [47].

#### *1.1.5.5.1. Confortabilidad*

Dado que la textrónica es una disciplina muy incipiente, su grado de desarrollo actual es aun limitado, lo cual afecta a su grado de integración entre electrónica y textil, de forma que suele ocurrir que cuanto mayor complejidad presenta la electrónica más se perjudica la confortabilidad de la prenda textil. Esto condiciona de manera concluyente el diseño de los textiles inteligentes y al grado de integración en la estructura textil de los elementos electrónicos, tal y como se ha expuesto anteriormente. En todo caso, en los actuales niveles de desarrollo, toda integración de microelectrónica deriva, en mayor o menor medida, en un descenso de la confortabilidad del textil, sobre todo en las prendas portables, pues tienden a ser elementos intrusivos.

Una de las problemáticas más frecuentes fruto de la integración de componentes electrónicos en el textil, es la disminución de la propiedad de la transpirabilidad, principalmente también por la integración de fibras conductoras, de carácter hidrofóbicas. Este inconveniente puede atenuarse recubriendo las fibras conductoras con convencionales de naturaleza celulósica (“core-spun”) o tratar de atenuar el contacto con la piel diseñando estructuras de ligamentos que encierren estas fibras y mejoren la sensación. En todo caso, estos hilados deben de estar siempre ocultos, no sólo por el factor estético, sino porque la integración de este tipo de fibras cambia el tacto o la mano del tejido, así como su rigidez, elasticidad o caída.

Además, y de manera evidente, todo circuito que se integre en el textil derivará en una merma de la confortabilidad por ser elementos extraños e inesperados para el usuario. La integración de circuitos impresos en la propia estructura del textil ya sea mediante estampación digital, impresión textil u otras tecnologías, como el llamado e-bordado de PCB (circuitos impresos) que ofrece BERNINA International AG, compañía líder en el sector, es una alternativa a considerar en este sentido. [48].

Actualmente, se han desarrollado nuevas líneas de transmisión textil, gracias a la flexibilidad de los materiales utilizados para su construcción, estos materiales pueden ser elementos de un sistema textrónico incorporados en prendas inteligentes para mejorar considerablemente la comodidad de su uso. [49]

#### *1.1.5.5.2. Limitado rango de sensores*

En términos generales a pesar de que existe un gran rango de fibras y materiales de aplicación textil que actúan como sensores químicos, ópticos, eléctricos, o mecánicos, no existen en la actualidad materiales textiles que puedan actuar como sensores en todos los campos, como por ejemplo, en el ámbito de la acústica, el magnetismo o el ámbito de detección por contaminación nuclear. Por lo que consecuentemente se

requiere la integración de componentes microelectrónicos que ejerzan esta función, con la consecuente pérdida de confortabilidad asociada a tal integración. Las mejores opciones de sensores pasan, por tanto, en un textil que disponga de naturaleza fibrosa u otras alternativas pertenecientes a la tecnología textil (recubrimientos, estampaciones de pigmentos, etc.). La ciencia de los polímeros es una de las vías para dar solución a tales retos en el futuro.

#### *1.1.5.5.3. Suministro eléctrico*

Una problemática más, asociada al diseño de sistemas textónicos deriva de la necesidad generalizada de incorporar una fuente de alimentación eléctrica, cuyo requerimiento se salva, normalmente, mediante la incorporación al textil de baterías. Sin embargo, el diseño del textil inteligente ha de tener como premisa el ahorro energético para hacer viable el sistema, para incrementar su autonomía, o para, simplemente, minimizar las dimensiones de la batería a incorporar.

Actualmente las baterías y acumuladores de energía, comparativamente con las magnitudes de tamaño utilizadas en la microelectrónica y nanoelectrónica, son los elementos más pesados y voluminosos de los dispositivos electrónicos. Esta situación es extrapolable a la textónica, con el agravante de que en este caso el factor confortabilidad es esencial en un “wearable”.

Actualmente ha avanzado mucho esta disciplina y podemos encontrar en el mercado todo tipo de baterías de gran potencia, flexibles, con diseños personalizables, etc. Aun así, se están explorando nuevas fuentes de energía, como termogeneradores, piezogeneradores, elementos fotovoltaicos que puedan ser utilizados en construcciones textiles, sin embargo, presentan valores muy pequeños de capacidad y corriente máxima, no aplicables a sistemas que integren conexiones inalámbricas.

Las llamadas baterías textiles de ion-litio con una gran área de carga de masa es otras de las alternativas que está siendo objeto de investigación, estos desarrollos han sido fabricados a partir de fibras de poliéster en una dispersión que contiene nanotubos de carbono (CNT) [50]. También se exploran conceptos más cercanos a la técnica textil convencional, como el recubrimiento con el polímero PEDOT, poli-(3,4-etilendioxitiofeno): poli (estireno sulfónico), que, depositado entre dos tejidos de poliamida recubierta con plata, dan como resultado una batería textil polimérica simple que permite hasta 5 ciclos de carga y descarga. [51]. Otro desarrollo en este sentido se basa en las propiedades piezoeléctricas del polímero PVDF, Polivinildifenilo, que aplicado como recubrimiento en la base de un calzado, es capaz de almacenar la energía eléctrica producida como consecuencia de la presión ejercida mientras el usuario camina, eso sí con una eficiencia muy baja. [52]. Además se ha desarrollado una unidad de potencia portátil mediante la integración de un textil adaptado (TENG-cloth) y una batería de ion-litio flexibles (LIB), en tejidos de poliéster revestidos de níquel [53]. En otro artículo se sintetiza un ánodo-libre de nanopartículas de  $Fe_2N$  ( $Fe_2N$  NPs) integrado en el textil como un ánodo de alta transformación independiente para baterías de Ion-Litio. [54].

#### *1.1.5.5.4. Exposición a condiciones del entorno*

Por otro lado hay que tener en cuenta, que los textiles, a lo largo de su vida útil van a ser sometidos a extremas condiciones de utilización en su uso cotidiano. Los sistemas texturónicos han de poderse llevar puestos en muchos casos, y potencialmente estarán sometidos a condiciones climáticas extremadamente diversas, las cuales afectarán al sistema electrónico integrado. La lluvia o las temperaturas elevadas, son dos elementos representativos de este tipo de limitaciones que han de ser salvados si es posible mediante la introducción de sistemas de protección (impermeabilización, por ejemplo), si el textil se prevé que esté expuesto a tales condiciones. Sin embargo, en la mayoría de ocasiones no es posible o no se prevé tal consideración. No hay que olvidar que los textiles con electrónica integrada son objeto de investigaciones en entornos de laboratorio y no han sido, de forma generalizada, ampliamente explotados ni industrialmente ni tampoco comercialmente.

#### *1.1.5.5.5. Condiciones de uso y procesos de mantenimiento*

Además de todo lo anteriormente expuesto, cabe señalar que la propia concepción de uso convencionalmente aplicable a un producto textil tradicional implica limitaciones muy importantes para un sistema texturónico.

Las condiciones de uso y mantenimiento del textil inciden en que estos han de estar diseñados para soportar tratamientos de uso en los que van a ser sometidos a esfuerzos mecánicos extremos, ya sean puntuales o repetitivos. Además, estos textiles han de ser sometidos, por norma general dependiendo de la aplicación, a un número mínimo de procesos de lavado que, dependiendo de cuál sea esta aplicación, puede llegar a ser de entre 30 y 50 ciclos de lavado (o en ocasiones muchos más).

Por lo tanto, en líneas generales, el propio textil y su electrónica integrada ha de ser resistente y disponer de una serie de requerimientos mecánicos de muy diversa índole (tracciones, rozamientos, flexiones, compresiones, etc...) y de la agresión química de diversos agentes abrasivos (pH, hipoclorito sódico, detergentes, etc.) con la acción de la temperaturas elevadas y en disoluciones acuosas.

Las soluciones que se formulan ante los procesos de lavado pasan por diseñar un método sencillo para desconectar y retirar la parte electrónica integrada en el textil para que éste pueda ser sometido a estos procesos. Sin embargo, aquellas partes que no pueden ser retiradas (conexiones, interconexiones o hilos conductores) tienden a degradarse por la acción de la abrasión química y mecánica del proceso, por lo que fruto de ello pueden llegar a acusar un descenso de su conductividad, que se debe, en ocasiones a la rotura de fibras por la acción mecánica ejercida, o a procesos de degradación química.

#### *1.1.5.5.6. Conexiones y conductividad.*

Los puntos de unión son elementos críticos para conseguir una buena conexión. Una conexión defectuosa es causa de una conducción eléctrica no lineal ni uniforme. Por



ello, además de lo referido en el párrafo anterior, cabe hacer la distinción específica de los problemas que afectan a la baja estabilidad mecánica, ya mencionada, de los puntos de unión entre las fibras conductoras y los componentes electrónicos. En el futuro estos puntos han de ser optimizados y mejorados. [55]

En lo que se refiere a los hilados conductores, cabe referir que en ocasiones, y para salvar el anteriormente referido problema de la confortabilidad, se recurre a hilados compuestos por mezclas de fibras (cortadas o no) en las que se combinan materiales conductores (fibras metálicas) con materias textiles no conductoras. En estos hilados es crítica la composición de la mezcla para conseguir un hilado conductor, hasta dar con un equilibrio entre confortabilidad (flexibilidad) y conductividad.

Las distancias relativas entre el sensor y los conectores que transfieren la electricidad al conector o el circuito de acondicionamiento de la señal han de permitir la conducción en todo el recorrido y que la señal llegue en condiciones de ser interpretada, además no debe de sufrir cortes derivadas de la propia deformación del textil por su uso.

Una mala conexión o conductividad, supone la aparición de interferencias o ruido en la señal, lo cual repercute directamente en la sensibilidad del dispositivo inteligente, disminuyéndola de forma significativa. Otras consideraciones que afectan a las conexiones han sido tratadas en el apartado [1.1.5.2.1. Conexiones entre el dispositivo textil y el resto del sistema.](#)

#### *1.1.5.5.7. Estandarización*

A pesar de que la comunidad científica se encuentra en pleno proceso de investigación de esta rama interdisciplinar de la ciencia, actualmente uno de los problemas principales para el desarrollo sostenible de los denominados e-textiles (textiles inteligentes) en el futuro es la falta de una estandarización y normativa comúnmente aceptada por todos.

No existen métodos estandarizados de ensayo ni han sido formuladas las especificaciones y requerimientos mínimos que han de reunir los e-textiles para ser considerados como tal. Los métodos convencionales de ensayo en el ámbito textil son una buena base de trabajo si se toman en consideración las especificidades de uso y funcionamiento de estos textiles.

En el futuro deben de ser definidas normas, requisitos y protocolos, de manera que se cubra las propiedades multidisciplinarias de los e-textiles que se derivan de tres áreas: el textil, la electrónica y la informática. Por ello es necesario intensificar el trabajo colaborativo entre estos tres campos. [56]

En este sentido, es también importante resaltar que el proponente de la presente tesis doctoral forma parte de varios grupos de trabajo de la Comisión Europea, a través del programa de la ESOs (European Standard Organizations), y en representación a AENOR, está presente en el CEN y CENELEC, para dar respuesta, entre otros temas de interés, al proceso de normalización y definición de requisitos y protocolos de actuación relacionados con los “topics” vinculados a textiles inteligentes y textrónica. De forma que, a modo de resumen, se hace especial hincapié en los esfuerzos de

normalización y estandarización a aplicar y desarrollar que hace referencia a la presencia de componentes electrónicos dentro del textil.

#### *1.1.5.5.8. Limitaciones no exclusivamente científico-técnicas*

Existen otros factores a considerar, aparte de las propiamente referidas y que son el objeto del trabajo que nos ocupa, y que hacen referencia a las que van más allá de las propiamente limitaciones científico-técnicas. Efectivamente, el desarrollo de un sistema sensor textil puede llegar a ser viable desde el punto de vista técnico, e incluso podría salvar, con el tiempo, las anteriormente descritas limitaciones e incluso también, con el tiempo podrá ser producido en serie en las industrias textiles si se tiene presente esta premisa en todo momento y se logran integrar eficientemente la electrónica en sus fases de concepción y diseño, y más aún, se podrá elaborar a un coste de fabricación moderado, debido a la continuada reducción de los costos de los componentes electrónicos (además de la propia economía de escala).

Sin embargo, aún resta por salvar la importante limitación que deriva del soporte posterior a la comercialización que ha de tenerse en consideración en este tipo de textiles y para los que en estos momentos todavía no está preparada la industria textil, ni sus canales de venta: reparaciones, mantenimiento de software, recambios, etc. Para ello cabe desarrollar todo un nuevo modelo de negocio en torno a los e-textiles, como las redes de valor añadido para la prestación de servicios relacionados con los textiles inteligentes [57], u otras opciones que aún está en proceso de investigación.

#### *1.1.5.6. ÁMBITOS DE APLICACIÓN DE LA TEXTRÓNICA.*

Tal y como ya se ha explicitado, la incorporación de sensores y actuadores en el textil permite desarrollar textiles inteligentes, los cuales, dependiendo de este binomio [sensor-actuador] podrán ser de utilidad en determinados campos de aplicación.

En la actualidad, el grado de soluciones ya competitivas y de mercado son muy incipientes, aunque existe una gran tendencia a nivel de investigación en esta disciplina debido a la evolución tecnológica y las grandes expectativas de futuro, dirigidas a cuantiosos ámbitos de aplicación diferentes. Por tal motivo es del todo imposible acotar los campos en los que los textiles inteligentes son y serán de aplicación, pues resultaría del todo incompleto. En todo caso, en este apartado se exponen los ejemplos más representativos y 7 de los más importantes ámbitos de aplicación que con más frecuencia se están orientando estas investigaciones. Algunos de ellos todavía se quedan en el ámbito conceptual, a la espera de un mayor desarrollo de la técnica y la ciencia. Otros, sin embargo, han salido de investigaciones realizadas a escala piloto en el laboratorio, y que ya han tenido una escalabilidad a nivel industrial y llegan incluso a encontrarse en el mercado.

##### *1.1.5.6.1. Salud*

Los productos de textil para indumentaria y para el hogar, tales como las prendas interiores, la ropa de cama o los colchones pueden incorporar una amplia variedad de sensores médicos y dispositivos de control que continuamente registren el estado fisiológico de los sujetos de riesgo. La información que registran estos sensores se

puede guardar y descargar off-line o transmitir en tiempo real entre los distintos sistemas [actuadores].

Algunos ejemplos en este contexto incluyen textiles inteligentes capaces de medir parámetros esenciales (incluyendo movimiento, presión y humedad) permitiendo prevenir y controlar una amplia variedad de problemas de salud.

Un ejemplo a este respecto es el producto desarrollado por la firma belga Verhaert y la Universidad de Bruselas. Se trata del producto comercial denominado Mamagoose, y que consiste en un pijama para bebés que puede transmitir una señal de alarma si el bebé deja de respirar (muerte súbita) [58]. Se muestra en la figura 118.



*Figura 118: "Mamagoose", pijama que puede transmitir una señal de alarma si el bebé deja de respirar. [58]*

Esta prenda incluye cinco sensores que vigilan continuamente el estado de los bebés durante su sueño. Tres de esos sensores comprueban los latidos del corazón del bebé y otros dos sensores comprueban su respiración, enviando los datos al sistema de control que se encarga de procesarlos y emitir una señal de alarma en caso necesario. Estos sensores están integrados en la prenda y no están en contacto directo con el cuerpo del bebé, con lo cual es mucho más cómodo que los dispositivos médicos de monitorización que existen actualmente.

Otro ejemplo comercial en este campo de aplicación es el producto LifeShirt, el cual se representa en la figura 119. Ha sido desarrollado por la empresa Vivonoetics [59], una compañía estadounidense que dedica su actividad al ámbito sanitario a través del desarrollo de productos inteligentes y plataformas que monitorizan las constantes biológicas (sensores, dispositivos y software para usos médicos).



*Figura 119: LifeShirt, para medición de constantes vitales [59]*

LifeShirt se define como un sistema de monitorización global de las constantes vitales. Se compone de una prenda que debe estar en contacto directo con la piel. Contiene sensores, pero estos están pegados al textil, no están integrados en él. Un módulo electrónico recoge los datos que se envían al centro de monitorización, en donde son procesados e interpretados por personal especializado. Los datos no se envían en tiempo real. Han de ser descargados desde el módulo electrónico al ordenador. Las señales que se recogen son respiración, ritmo cardiaco, electroencefalografía (EEG) y electrooculografía (EOG) utilizando un gorro adicional, saturación de oxígeno en sangre (utilizando el accesorio que contiene el sensor), la presión arterial y la temperatura.

#### *1.1.5.6.2. Confort*

El confort es una sensación que produce bienestar y comodidad al usuario. El sector textil es un ámbito de investigación muy dinámico, destacando el llamado confort

térmico que busca que el textil dote al usuario de una temperatura corporal adecuada, independientemente de la temperatura de su entorno exterior.

En líneas generales, los desarrollos de textiles inteligentes tienden a incorporar hilados u otras estructuras electrónicas y conductoras, que les permite generar calor y controlar el confort térmico de la prenda.

Bajo estas premisas, y diversas variaciones estructurales han sido desarrolladas un abanico importante de prendas calefactables, destacando aquellas que actúan sobre las extremidades (guantes, y calcetines), zonas por las que el cuerpo humano pierde calor y donde se produce la primera sensación de frío.

Pero los textiles inteligentes no se limitan a aportar funcionalidades únicamente en el ámbito del confort térmico. En un sentido más amplio se pueden desarrollar textiles con capacidades avanzadas que mejoren el confort del usuario de forma que se adapten físicamente a la forma y condiciones de cada momento, el denominado confort ergonómico, donde el estudio biomecánico del usuario es la parte esencial de este tipo de desarrollos.

Uno de los mejores ejemplos de mejora en la comodidad gracias a la electrónica es una invención australiana: el sujetador inteligente. Wallace et al., de la Universidad de Wollongong, han desarrollado un sujetador que cambia sus propiedades de respuesta en función del movimiento del pecho. Este sujetador proporciona una mayor ayuda a las mujeres activas cuando están en acción [60].

El sujetador inteligente aprieta y afloja sus correas de forma automática, o adopta una disposición más rígida o relajada de sus copas para restringir el movimiento del pecho, previniendo el dolor y la caída del pecho. En definitiva, se adapta a la biomecánica y función específica del usuario en cada momento y tipo de movimiento.

Para su fabricación se han utilizado tejidos recubiertos de polímeros. El tejido puede alterar su elasticidad en respuesta a la información sobre cuanta tensión hay en la tela.



*Figura 120: sujetador que se adapta a la biomecánica del usuario [60]*

### *1.1.5.6.3. Automoción*

Otro de los campos de aplicación, donde la sensorización presenta un papel relevante, es el área de la automoción. El primer ejemplo en este sentido guarda relación con asientos térmicos para automóviles. Se componen de mallas de tejido a la plana que son capaces de generar calor por resistencia, y que pueden ser fabricadas de hilos conductores de fibra de carbono. Estas mallas, que se encuentran laminadas entre capas de tejidos convencionales, incorporan electrodos que son los que suministrar la energía necesaria para generar calor a su través.

Otro ejemplo característico, son los productos textiles que actúan como sistemas de detección del ocupante de un asiento. Se encuentran integrados en la tapicería y son usados como sensores en asientos de coches para detectar la presencia, tamaño y/o peso del ocupante para, por ejemplo, asegurar el correcto despliegue del airbag o para ajustar la posición del asiento de forma automática (memoria del asiento).

Uno de los ejemplos de aplicaciones en el sector del automóvil es el proyecto europeo SEAT en el que el Centro de Investigación AITEX ha liderado a través del desarrollo del proyecto en su parte textil y que consiste en crear "UN ASIENTO SMART". Un asiento, para aviones de clase económica destinado a vuelos transoceánicos o de larga duración, que integra toda una serie de sensores activos y pasivos capaces de dotar al usuario del asiento de confort físico, confort, mental y posibilidades de entretenimiento. Y de entre los muchos desarrollos que componen este proyecto, destaca el sensor de presión a través de un sistema conductor capacitivo [61].

#### *1.1.5.6.4. Hogar y domótica.*

Cuando se habla de un sistema domótico se habla estrictamente de la gestión y control de las principales funciones del hogar.

La integración de los textiles para el hogar en este entorno es inherente a su propia naturaleza, pues están diseñados para integrarse en él como elementos funcionales y decorativos. Es por ello que los textiles inteligentes para el hogar juegan con la ventaja del desarrollo que han sufrido en los últimos años los elementos y sistemas domóticos. Por ello son idóneos para actuar embebidos en el propio sistema textil.

En este contexto los textiles inteligentes ejercen un papel de intermediación (interfaz) entre el usuario y el sistema domótico, de una forma más transparente y familiar para él (al ser un textil, un elemento que no es no intrusivo en el hogar). Los textiles inteligentes pueden, por lo tanto, actuar en cualquiera de las funciones propias de la domótica y que a continuación se enuncian:

**Control de los cerramientos para el ahorro energético:** el control de puertas, ventanas, toldos para el ahorro energético es una de las principales aplicaciones de los textiles inteligentes para la domótica, ya que, a distancia, pueden controlar y programar los distintos automatismos para que traten de ahorrar energía en función de unas determinadas condiciones ambientales.

Además, para gente con discapacidades físicas la automatización puede ayudar al usuario tanto abrir como cerrar las puertas y ventanas de forma individual a través del sistema de domótica. Se pueden abrir y cerrar para crear corrientes de aire para la ventilación natural, pueden ser programadas para seguridad, por fuego, humo o gas. También pueden ser controladas las cerraduras, con cerraduras electrónicas de forma local y remota.

**Climatización:** conexión/desconexión, programación horaria, según presencia de personas en el hogar o de forma manual, zonificación, niveles de temperatura preprogramados, control puntual del sistema...

**Iluminación:** regulada en función del nivel de luminosidad del ambiente, evitando su encendido innecesario o adaptándola a las necesidades del usuario, activada en función de la presencia de personas en la estancia, activación de la iluminación según otros eventos, por ejemplo al pulsar el mando a distancia del garaje la iluminación exterior de acceso y el del garaje se puede encenderse por un tiempo limitado para poder tener un acceso seguro y confortable.

**Seguridad:** alarmas de intrusión, alarmas técnicas (incendio, humo, agua, gas, fallo de suministro eléctrico, fallo de línea telefónica, etc.), alarmas personales (SOS y teleasistencia, gestión de riesgos del hogar), Video Vigilancia. Los sistemas de seguridad pueden ser conectados a una Central Receptora de Alarmas (CRA) o ser manejado por el mismo usuario.

En este sentido, existe una patente en concreto, donde es inventor el proponente, la cual trata de un desarrollo de una alfombra inteligente compuesta por tres capas (alfombra tufting con látex conductor, material aislante, y rafia de polipropileno con látex conductor) que actúa como sensor de detección de personas, y entre las muchas aplicaciones, destaca en domótica, como elemento activo para encender por ejemplo una luz o cualquier otro dispositivo, e incluso como elemento de seguridad para detectar intrusiones en el hogar. [62]

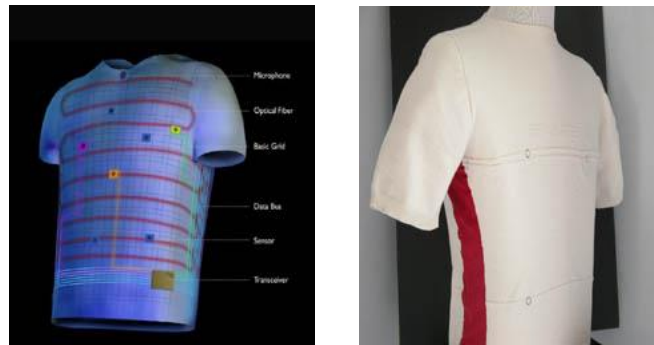
#### *1.1.5.6.5. Defensa y protección personal*

Al igual que ocurre para en el campo de la medicina, los textiles inteligentes son de gran utilidad para el ámbito militar y de la protección personal, puesto que permiten, de manera no intrusiva, monitorizar y prevenir de riesgos al usuario, en este caso, en entornos de alto riesgo.

En la actualidad se trabaja en amplio rango de posibilidades, basados, por ejemplo, en integración de sensores de presencia de gases o sustancias tóxicas, incluso radiación. También se trabaja en el geoposicionamiento y localización de trabajadores o militares, integrando sistemas GPS u otros en el textil.

Una de las invenciones más representativas fue desarrollada hace más de una década [63], denominado "Wearable Motherboard Smart Shirt", el cual estuvo durante un tiempo comercializado al público general por la compañía Sensatex.

Se trata de una prenda electro-óptica financiada por la "Defense Advanced Research Projects Agency" (DARPA) y desarrollada en el Instituto de Tecnología de Georgia. El desarrollo incluyó una infraestructura avanzada para gestión de datos y comunicación. La integración de estos dos componentes proporcionaba una red extremadamente versátil para detectar, monitorizar y procesar información. Ver figura I21.



*Figura I21: Wearable Motherboard Smart Shirt. Prenda inteligente [63]*

Este desarrollo sentó las bases y abrió las posibilidades a la investigación de un amplio rango de productos.

En el ámbito de la protección personal, encontramos el proyecto INFINITEX, liderado por la empresa ITURRI, con 29 líneas de investigación en el ámbito de los textiles inteligentes, y donde se encuentra los tejidos de protección, orientado fundamentalmente al sector militar, que requiere protección frente amenazas y elementos de detección. Entre las funcionalidades en este sector de aplicación se encuentran: los tejidos calefactables, sensorica, lumínica, dispensación de sustancias activas, extraligereza con altas prestaciones mecánicas, integración de circuitos eléctricos, y camuflaje adaptativo [64].

#### *1.1.5.6.6. Deporte y calidad de vida*

En este ámbito, los textiles inteligentes aportan principalmente información de parámetros relacionados con la práctica del deporte, seguridad al usuario y la mejora del rendimiento de la actividad deportiva.

Por ejemplo, la compañía Burton [65], introdujo en su catálogo de productos de hace unas temporadas una línea de productos para la nieve que integraban funcionalidades de comunicación inalámbrica en cuatro modalidades: Motorola, (conectaba cualquier teléfono móvil con Bluetooth); iPod (integraba un teclado flexible en la chaqueta para el control del dispositivo de Apple, que se alojaba en un bolsillo delantero específico para mantenerlo seguro); MP3 (similar al anterior pero compatible con cualquier dispositivo reproductor mp3); y Push-to-Talk (integraba un sistema de comunicación PPT bidireccional), según se muestra en la figura I22.



*Figura I22: Textil para la nieve con distintas funcionalidades inteligentes integradas [65]*

También destacar, el reciente proyecto de investigación sport@future, donde participan 9 empresas del sector deportivo en España de reconocido prestigio internacional, una de ellas el grupo Morón de la Rioja, y donde todas ellas se unen para desarrollar soluciones inteligentes en el textil para aplicaciones deportivas, que mejoraran el rendimiento, el confort y la protección de los deportistas del futuro. [66]

Esta área también incluye los textiles inteligentes que disponen de la funcionalidad para informar y entretener al usuario, así como elementos que permiten mejorar el rendimiento del deportista o la persona que practica el deporte. Además, relacionado con el punto [1.1.5.6.1. Salud](#), podemos encontrar también textiles inteligentes destinados, por un lado, a la prevención de lesiones deportivas y por otro, a la rehabilitación de lesiones con el objeto de reducir el tiempo de recuperación del deportista.

Otras de las aplicaciones que más demanda tiene en la actualidad, y que se encuentra relacionada con este tipo de desarrollos, son los que están vinculados con la calidad de vida de las personas a través del desarrollo de las nuevas tecnologías de comunicación y conectividad entre las mismas, fruto también del avance en redes sociales y servicios de teleasistencia. En este sentido, en base a la infraestructura ya desarrollada (“smart devices”), y los servicios que se han originado alrededor de ellos (plataformas on-line), los textiles inteligentes han encontrado un hueco importante para sensorizar parámetros, tratarlos y actuar en consecuencia. La inteligencia artificial y el big data representa una gran oportunidad de futuro para los textiles inteligentes de cara a los próximos años, ya sea a corto, medio y largo plazo.

Un ejemplo es el proyecto Alfred, a través del cual se ha desarrollado toda una oferta de servicios personalizados de atención a personas mayores, donde la camiseta inteligente que mide temperatura, frecuencia cardiaca, pulso y acelerometría, permite disponer de la información de estos parámetros fisiológicos de un usuario en el mismo momento y desde cualquier punto del planeta para otra persona, a través de Internet y la APP desarrollada. [67]



## **I.2.- Textiles sensores de la deformación elástica**

En este primer apartado de la introducción se ha realizado una revisión de los comportamientos inteligentes más importantes así como se ha tratado los aspectos más relevantes de la integración de sistemas electrónicos-informáticos en substratos textiles para ofrecer comportamientos inteligentes.

Se han descrito las características de los actuales textiles inteligentes, sus campos de aplicación y sus limitaciones, atendiendo principalmente a los requerimientos específicos de los materiales textiles que intrínsecamente presenten este comportamiento inteligente.

En base a la experiencia y a la información recabada en este primer apartado, de forma concreta, se ha detectado un campo de investigación de gran interés que hace referencia a los materiales inteligentes piezoeléctricos que, aplicados a un textil, a priori podrían actuar como sensores del grado de deformación elástica que pueda sufrir este textil cuando es sometido a un esfuerzo de tracción (estiramiento o alargamiento).

En este sentido, la deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo. Los textiles disponen de un comportamiento denominado deformación elástica, en el que el cuerpo, en este caso el textil, recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.

En este segundo apartado de la introducción, por tanto, nos vamos a centrar en los aspectos relacionados con los textiles con capacidad para detectar la deformación elástica que experimentan cuando se ejerce una fuerza de tracción sobre ellos. Estos textiles sensores de la deformación elástica objeto de investigación se fundamentan en los denominados materiales inteligentes piezoeléctricos.

### I.2.1.- Piezoelectricidad para el desarrollo de materiales sensibles por deformación elástica

#### I.2.1.1. DEFINICIÓN DE PIEZOELECTRICIDAD

Determinados materiales producen cargas eléctricas en su superficie como resultado de la aplicación de una tensión mecánica, siendo las cargas inducidas proporcionales a la tensión mecánica aplicada. A este fenómeno se le llama piezoelectricidad. [68]

Es una propiedad reversible, siendo el efecto piezoeléctrico inverso a la propiedad por la cual en un material se produce una deformación cuando le es aplicado un campo eléctrico. El término "piezoeléctrico" procede del griego "piezo o piezein", y significa apretar o presión y, por tanto, se utiliza para expresar "electricidad producida por una presión".

### I.2.1.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL DESCUBRIMIENTO

Esta propiedad fue descubierta en 1880 por los hermanos Pierre y Jaques Curie. Combinando sus conocimientos acerca de la piroelectricidad y del comportamiento de las estructuras cristalinas, los hermanos Curie demostraron por primera vez el efecto piezo-eléctrico utilizando cristales de turmalina, cuarzo, topacio, caña de azúcar y sal de Rochelle. En sus experimentaciones demostraron que el cuarzo y la sal de Rochelle presentaban capacidades piezoeléctricas [69].

Durante las siguientes décadas, tras el descubrimiento de los hermanos Curie, se inician numerosos trabajos que perseguían definir los principios cristalográficos del efecto. Cabe destacar la contribución significativa de Lord Kelvin, que en 1893 presenta los modelos sobre los que se fundamentan la teoría moderna de la piezoelectricidad. Al trabajo de Kelvin, le seguirán otros, realizados en los años siguientes por distintos autores, que también contribuirán al estudio del fenómeno [49]. Sin embargo, en los años que preceden al 1910, el fenómeno de la piezoelectricidad asiste a una época oscura, en términos de avances científicos significativos, debido a su compleja descripción y, sobre todo, a la ausencia de aplicaciones prácticas en las que utilizar el fenómeno. En esos años, la piezoelectricidad permanecerá en los laboratorios, como uno de tantos otros fenómenos que son explorados, pero que aguardan a que todo su potencial pueda ser objeto de aprovechamiento pleno.

Será la Primera Guerra Mundial la que impulse la aparición de la primera aplicación práctica en forma de dispositivos piezoeléctricos: el desarrollo del sonar, que surge por la necesidad de detectar submarinos.

Este uso inicial de la piezoelectricidad en el sonar creó un interés internacional en el desarrollo de otros dispositivos piezoeléctricos, lo que condujo a que en las siguientes décadas, se exploraran y desarrollaran nuevos materiales piezoeléctricos y nuevas aplicaciones para tales materiales.

Ya durante la Segunda Guerra Mundial, grupos de investigación de Estados Unidos, Rusia y Japón descubrieron un nuevo tipo de materiales artificiales, los materiales ferroeléctricos, los cuales presentaban constantes piezoeléctricas mucho más elevadas que los materiales piezoeléctricos naturales.

En los años siguientes, en Estados Unidos se continúa investigando y son las empresas las que impulsan tales investigaciones, en base a los desarrollos alcanzados durante la guerra. Los cristales de cuarzo serían los primeros materiales piezoeléctricos naturales que fueron explotados comercialmente, aunque todavía estaban siendo usados en las aplicaciones de sonar.

Tales intensas investigaciones condujeron al desarrollo de titanato de bario y titanato zirconato de plomo, dos materiales que disponían de propiedades piezoeléctricas muy específicas adecuadas para aplicaciones particulares.

Sin embargo, y pese a que las investigaciones conducen a nuevos materiales con mayores prestaciones, y pese a la madurez de procesos productivos, capaces de satisfacer una demanda más alta, no se logra que el mercado estadounidense crezca

al mismo ritmo de estos logros, debido fundamentalmente, a los intereses que se derivaban del aprovechamiento económico de la explotación de las patentes. Por el contrario, en Japón, en base a una estrategia común de compartir información, lo cual les permitió superar colectivamente problemas tecnológicos y productivos, se pudieron generar nuevos avances en este campo dirigidos a nuevos mercados.

Los desarrollos japoneses más importantes incluyen nuevos diseños de filtros piezocerámicos para radios y televisores, zumbadores piezoeléctricos, audio-transductores que se pueden conectar directamente a los circuitos o encendedores piezoeléctricos, que generan chispas para pequeños sistemas de encendido (encendedores de cocinas de gas) por la compresión de discos cerámicos.

Por su parte, los transductores ultrasónicos que transmiten ondas de sonido por el aire habían existido desde hacía bastante tiempo, pero vieron su principal uso comercial en los primeros mandos a distancia de televisión.

En la actualidad, esos transductores se están ensamblando en varios modelos de coche como dispositivos de detección de objetos, ayudando al conductor a medir la distancia existente entre la parte trasera del coche y cualquier objeto que se encuentre en su trayecto.

### 1.2.1.3. PRINCIPIOS DEL FENÓMENO: MODELO FÍSICO DE ACTUACIÓN

Seguidamente se muestra un modelo molecular simple del efecto piezoeléctrico que explica la generación de una carga eléctrica como resultado de la aplicación de una fuerza sobre un material.

En la figura I23 se muestra una molécula con carga eléctrica neutra. Antes de someter este material a una cierta tensión externa, los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas de cada molécula coinciden. Por lo tanto, a pesar de tener cargas negativas y positivas en el exterior, el efecto global y espacial queda neutralizado. Como resultado de esta distribución equitativa de las cargas la molécula es eléctricamente neutra.

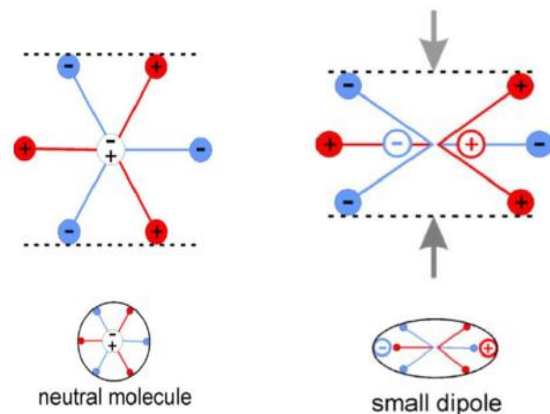


Figura I23: Molécula neutra [70]

Figura I24: Molécula piezoeléctrica: dipolos pequeños [70]

Cuando se ejerce cierta presión sobre el material, su estructura reticular interna puede ser deformada, provocando la separación de los centros positivos y negativos de las moléculas y la generación de dipolos pequeños (figura I24).

Los polos enfrentados, en el interior de los materiales, son mutuamente cancelados y aparece una distribución de una carga vinculadas en la superficie del material (figura I25). Es decir, el material se polariza. Esta polarización genera un campo eléctrico, el

cual se puede utilizar para transformar la energía mecánica utilizada en la deformación del material en energía eléctrica [70].

En la figura I25 se muestra una representación esquemática del efecto piezoeléctrico directo. A este material se le aplican tensiones externas y se sitúan dos electrodos sobre la superficie que tienen cargas vinculadas y opuestas. Estos electrodos están conectados a un circuito externo a través de un cable a galvanómetro. Cuando se ejerce tensión en el material piezoeléctrico, aparece en la superficie del cristal en contacto con los electrodos, una densidad de carga vinculada.

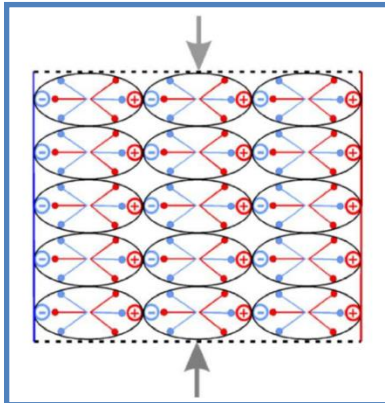


Figura I25: Material piezoeléctrico: comportamiento [70]

Esta polarización genera un campo eléctrico que promueve el flujo de las cargas libres existentes en el conductor. En función de su signo, las cargas libres se mueven hacia los extremos donde las cargas vinculadas generadas por la polarización del cristal son de signo opuesto. Este flujo de cargas libres se mantendrá hasta que las cargas libres neutralicen el efecto de polarización. Cuando se para de ejercer tensión en el cristal, la polarización desaparecerá, y el flujo de cargas libres se detendrá, al regresar a la condición de reposo inicial.

#### I.2.1.4. RELACIÓN ENTRE PRESIÓN Y SEÑAL ELÉCTRICA. CONSTANTE DE CARGA PIEZOELÉCTRICA Y CONSTANTE DE VOLTAJE PIEZOELÉCTRICO.

La magnitud de la tensión inducida ( $x$ ) surge por la acción de un campo eléctrico  $E$  sobre un material, siendo la constante de carga piezoeléctrica relaciona la tensión inducida a un material ( $x$ ) cuando se le aplica un campo eléctrico ( $E$ ), y es representada por la siguiente ecuación:

$$x = dE$$

donde  $d$  es, por tanto, un indicador importante de la idoneidad de un material en aplicaciones para actuadores.

Por su parte, la constante de voltaje piezoeléctrico ( $g$ ) vincula el campo eléctrico inducido ( $E$ ) por una tensión externa ( $X$ ):

$$E = gX$$

#### I.2.1.5. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA

La piezoelectricidad es el efecto combinado del comportamiento eléctrico del material,

$$D = \varepsilon E$$

[En donde  $D$  es la densidad de flujo eléctrico,  $\varepsilon$  es la permitividad y  $E$  es la intensidad de campo eléctrico]

y la Ley de elasticidad de Hooke

$$S=sT$$

[en donde S es la deformación y T es la tensión]

Estas ecuaciones pueden combinarse en una ecuación que considera la relación entre carga y deformación:

$$\begin{aligned} \{S\} &= [s^E] \{T\} + [d^t] \{E\} \\ \{D\} &= [d] \{T\} + [\epsilon^T] \{E\} \end{aligned}$$

donde d representa las constantes piezoeléctricas del material, y el superíndice E indica que la magnitud está medida bajo campo eléctrico constante o cero, y el superíndice t señala que se trata de una forma traspuesta de matriz. Esto se puede expresar en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

### 1.2.1.6. MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

El estudio del fenómeno desde su descubrimiento ha ido dando lugar a un considerable número de materiales que presentan este comportamiento, los cuales se enuncian a continuación:

#### 1.2.1.6.1. Cristales de origen natural.

Un cristal es un sólido homogéneo que presenta una estructura interna ordenada de sus partículas reticulares, sean átomos, iones o moléculas. En este apartado se enuncian aquellos de los que se conoce su comportamiento piezoeléctrico y que son de origen natural, de forma que no han sido obtenidos en procesos de síntesis en laboratorios.

**Sal de Seignette o Sal de la Rochelle** ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ): es un cristal ferroeléctrico que tiene un gran efecto piezoeléctrico, y que lo hace especialmente indicado para dispositivos acústicos vibratoriales muy sensibles.

**Cuarzo:** presenta un fuerte efecto piezoeléctrico perpendicular a su eje.

**Turmalina:** designa un grupo de minerales naturales de silicato de fórmula general  $\text{XY}_3\text{Z}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$  en la que X puede ser Na o Ca; Pueden ser sustituciones de monovalentes, cationes divalentes, trivalentes o tetravalente (Li, Mg, Mn, Fe, Al, etc.), y Z puede ser ocupado por Al, Mg, Cr,  $\text{Fe}^{3+}$ , Fe.

**Berlinita ( $\text{AlPO}_4$ ):** Ortofosfato de aluminio es un cristal rómbico compuesto de sodio fosfato y sal de aluminio.

**Topacio:** su estructura cristalina se basa en monocapas de aniones de oxígeno que se alternan con monocapas de hierro. Un tercio de los sitios octaédricos disponibles se llenan con Al y una doceava parte de los sitios tetraédricos con Si. Los oxígenos están coordinados por un enlace Si y dos átomos de Al, y el flúor por dos átomos de Al.

**Hueso:** el hueso seco presenta algunas propiedades piezoeléctricas debido a los cristales de apatita. Generalmente se considera que el efecto piezoeléctrico como sensor de la fuerza biológica.

#### *1.2.1.6.2. Cristales sintéticos.*

A continuación se recogen los cristales que no son de origen natural y que disponen de comportamiento piezoeléctrico.

**Ortofosfato de galio ( $\text{GaPO}_4$ , GP).** GP es cristal incoloro que cristaliza en un sistema cristalino trigonal que es similar al cuarzo debido a que los átomos de silicio se sustituyen de manera alternada por galio y fósforo. Es puramente piezoeléctrico (sin descarga piroeléctrica) y tiene excelentes propiedades a altas temperaturas de hasta  $970^\circ\text{C}$ , y una excelente estabilidad de muchas constantes físicas.

**Silicato lantano de galio (Lanthanum gallium silicate/Langasite ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ , LGS).** LGS es un material piezoeléctrico similar al cuarzo.

#### *1.2.1.6.3. Cerámicas*

Un grupo importante de materiales piezoeléctricos son las cerámicas piezoeléctricas. Se trata de materiales policristalinos con estructura cristalina de perovskita; una estructura tetragonal/romboédrica muy similar a un cubo. Tienen la fórmula general  $\text{A}_2 + \text{B}_1 + \text{O}_{2-3}$ , en la que A representa un ion metálico divalente grande, como por ejemplo bario, plomo o estroncio y B denota un ion de metal tetravalente tal como titanio, circonio, etc [71].

Por encima de la llamada temperatura de Curie, estos cristales presentan simetría cúbica simple. La celda elemental de la cual se muestra la figura I26a). Esta estructura es centrosimétrica, con posiciones de carga positiva y negativa coincidente, por lo que no hay dipolos presentes. Pero por debajo del punto de Curie, sin embargo, los cristales forman una simetría tetragonal en la que las posiciones con carga positiva y negativa ya no coinciden, como se puede apreciar en la figura I26b), por lo que en este caso cada célula elemental tiene incorporado un dipolo eléctrico que puede ser invertido, que también se activa para ciertas direcciones permitidas cuando se le aplica un campo eléctrico:

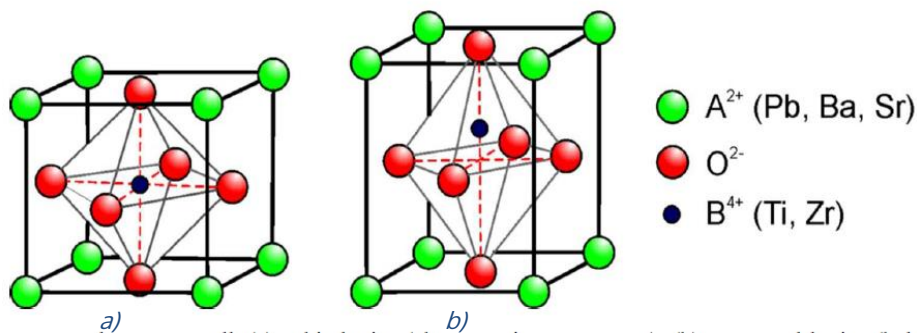


Figura I26: Estructura cúbica de los materiales cerámicos; a) y b). [71]

**Titanato zirconato de plomo ((Pb [Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>] O<sub>3</sub> 0<x<1)):** más comúnmente conocido como "PZT", es la cerámica piezoeléctrica de uso más común hoy en día. El PZT es una solución sólida binaria de PbZrO<sub>3</sub>, un antiferroeléctrico (estructura ortorrómbica) y PbTiO<sub>3</sub>, un ferroeléctrico (estructura de perovskita tetragonal). El PZT tiene una estructura de tipo perovskita con iones Ti<sup>4+</sup> y Zr<sup>4+</sup> que ocupan el sitio B al azar. A altas temperaturas el PZT tiene la estructura de la perovskita cúbica, que es paraeléctrica. Al enfriar por debajo de la temperatura de Curie, la estructura sufre una fase de transición para formar un fase tetragonal o romboédrica ferroeléctrica. Ver figura I26 a), b) y c).

**Titanato zirconato lantano de plomo ((Pb<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>)(Zr<sub>1-y</sub>Ti<sub>y</sub>)<sub>1-x/4</sub> O<sub>3</sub> VB 0.25x O<sub>3</sub>, PLZT):** esta larga fórmula supone que los iones La<sup>3+</sup> van a la posición A y las vacantes (VB) se forman en la posición para mantener el equilibrio de carga. PLZT es una cerámica ferroeléctrica transparente formada por el dopaje de iones La<sup>3+</sup> en las posiciones A del titanato zirconato de plomo (PZT).

**Las cerámicas PLZT tienen la misma estructura perovskita que el BaTiO<sub>3</sub> y el PTZ.** La naturaleza transparente del PLZT ha propiciado su uso en aplicaciones electro-ópticas. Titanato de bario (BaTiO<sub>3</sub>, BT): BT fue la primera cerámica piezoeléctrica descubierta. Tiene las cinco fases de un sólido, que son las siguientes, enumeradas de alta a baja temperatura: estructura hexagonal, cúbica, tetragonal, ortorrómbica cristal, y romboédrica. Todas las estructuras presentan el efecto ferroeléctrico excepto la cúbica. BT tiene una fase cúbica que es paraeléctrica por encima de su punto de Curie, de aproximadamente 130 °C. En el intervalo de temperatura de 130 °C a 0 °C se presenta fase tetragonal ferroeléctrica. La polarización es espontánea a lo largo de una de las direcciones de la estructura cúbica original. Ya entre 0 °C y -90 °C se produce la fase ortorrómbica ferroeléctrica. Y al disminuir la temperatura por debajo de

-90 °C la transición de la fase ortorrómbica a la ferroeléctrica romboédrica conduce a la polarización a lo largo de una de las direcciones del cubo.

**Titanato de plomo (PbTiO<sub>3</sub>, PT):** material ferroeléctrico bien conocido con una estructura perovskita que presenta una alta temperatura de Curie (490° C). Al disminuir la temperatura a través del punto de Curie se produce la transición desde la fase cúbica paraeléctrica a la fase tetragonal ferroeléctrica.

**Niobato de litio (LiNbO<sub>3</sub>) y tantalato (LiTaO<sub>3</sub>):** Tienen una estructura muy similar entre sí, que es en realidad una variante de la estructura de perovskita mucho más restrictiva. El LiNbO<sub>3</sub> y LiTaO<sub>3</sub> son ferroeléctricos, y muy estables con puntos de Curie muy altos, 1210°C y 620°C para LiNbO<sub>3</sub> y LiTaO<sub>3</sub> respectivamente.

#### *1.2.1.6.4. Piezocerámicas sin plomo*

En los últimos tiempos, existe una creciente preocupación al respecto de la toxicidad en todo producto que contenga plomo, y que ha impulsado como resultado la inclusión de esta sustancia en las legislaciones y directivas que regulan y restringen las sustancias peligrosas. Como solución a esta problemática, ha tenido lugar un resurgimiento en el desarrollo de materiales piezoeléctricos sin plomo en su composición.

**Niobato de potasio sódico (KNN).** Descubierta en 2004, dispone de propiedades similares a las cerámicas PZT, siendo su temperatura de Curie también más alta. En la actualidad, se ha seguido investigando este material y sus propiedades piezoeléctricas, creando un nuevo material con propiedades mejoradas. [72]

**Bismuto de ferrita (BiFeO<sub>3</sub>, comúnmente BFO).** Es uno de los más prometedores materiales piezoeléctricos sin plomo por presentar propiedades multiferroicas a temperatura ambiente [73].

#### *1.2.1.6.5. Polímeros. PVDF*

Existe un polímero que dispone de esta propiedad y que está siendo objeto de un gran número investigaciones, se trata del Fluoruro de polivinilideno (PVDF). El PVDF presenta una piezoelectricidad varias veces mayor que la del cuarzo. A diferencia de la cerámica, en donde la estructura cristalina del material es la que crea el efecto piezoeléctrico, en los polímeros, las moléculas de cadena larga, que están entrelazadas, se atraen y se repelen entre sí cuando se aplica un campo eléctrico [74].

#### 1.2.2. Revisión de sensores textiles de la deformación elástica.

En el apartado anterior sirvió para acotar la investigación al fenómeno piezoeléctrico, que se definió como aquél que fundamentará el estudio de un textil sensor de la deformación elástica.



Previamente a entrar en mayores consideraciones experimentales, cabe hacer una revisión de las líneas de investigación y desarrollos precedentes que giren en torno a las áreas de conocimiento similares a la que nos ocupa para conocer el grado de novedad de la investigación propuesta y, por tanto, de su propia idoneidad o no.

Por ello, tras realizar una revisión del fenómeno de la piezoelectricidad, llegados a este punto, cabe realizar un repaso de las diversas vías que persiguen el desarrollo de textiles capaces de detectar la presión que se ejerce sobre él mismo. Seguidamente se muestran las diversas posibilidades que actualmente existen en este sentido y que han sido clasificados en función de la capacidad y método de detectar la presión que se ejerce sobre el elemento textil.

#### 1.2.2.1. SENSORES TEXTILES POR LA DEPOSICIÓN DE FILMS POLIMÉRICOS

La laminación de films poliméricos piezoeléctricos en sustratos textiles es actualmente una línea de investigación que presente interés para muchas de las aplicaciones de los textiles inteligentes. El objeto es que el sistema formado disponga de capacidades de sensor de presión/deformación elástica. Una de las vías de estudio en este sentido se fundamenta en la posibilidad de utilizar films de PVDF que han demostrado sus elevadas capacidades piezoeléctricas cuando son sometidos a grandes esfuerzos y ostentan una flexibilidad y bajo módulo elástico superior frente a las piezocerámicas [75, 76, 77] y otros materiales piezoeléctricos. Existen precedentes en la utilización de films para el ámbito médico como sensores de prevención de riesgos en el ámbito de la salud [78]. Alternativas a los films con propiedades piezoeléctricas de polímeros PVDF son las empleadas con los materiales no poliméricos, [79]. Ninguno de los estudios citados con anterioridad, consideraba la opción de su aplicación sobre sustratos textiles, en la actualidad, sí que se ha desarrollado un tejido, con films de PVDF y films de polímero, que tiene capacidad piezoeléctrica. [80]

#### 1.2.2.2. SENSORES TEXTILES POR RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL

Esta vía de investigación se basa en la utilización de sustratos textiles constituidos por hilados convencionales (sin propiedades conductoras específicas) que son sometidos a procesos de recubrimiento de diversa naturaleza, de tal manera que es la aplicación de esta segunda técnica la que dota al conjunto de la funcionalidad de sensor de presión.

Un desarrollo importante en este sentido [81] se fundamenta en un tejido con propiedades elásticas en su composición, debido al elastano que contienen sus hilados, y que recubrimos con un polímero intrínsecamente conductor (ICP por sus siglas en inglés), en concreto se trata del polipirrol (PPy). Sin embargo, a pesar de que se consigue comprobar que este tejido es capaz de actuar como sensor, puesto que se observan incrementos de resistencia eléctrica en función del incremento de la deformación (y con límites de hasta el 50% de deformación), también el análisis de los resultados de este trabajo resalta la pérdida de elasticidad del conjunto al aplicar el recubrimiento y someterse a los determinados esfuerzos de fatiga, el cual va deteriorando el acabado aplicado sobre el tejido, y se va cuarteando conforme

aplicamos repetidas veces la deformación elástica, por lo que se va perdiendo su conductividad y su funcionalidad. Por lo que no puede considerarse como un sensor robusto y que puede ser utilizado en aplicaciones donde es necesaria una gran reproducibilidad y repetitividad en los resultados.

Otro de los trabajos consultados, se centra en un sensor de deformación piezoeléctrico completamente textil, que consta de hilos de fibra de dos componentes PVDF y HDPE, recubiertos con polímeros conductores, poly(3,4-ethylene dioxythiophene)-poly(styrene sulfonate), como electrodo exterior, [82], el cual también presenta el mismo problema de repetitividad y durabilidad de la funcionalidad.

Una variación del planteamiento anterior, [83], se centra en recubrir una espuma de poliuretano con PPy, la cual es mucho más elástica y resistente, dotando a la espuma de propiedades conductoras, sin perjuicio de alterar la sensibilidad a la presión de la espuma original. Este material, que gracias a su estructura tridimensional es adecuado como sensor para ser incorporado en prendas para ámbitos como el deporte o médicos (control de la presión de los pies de pacientes con Diabetes Mellitus). También puede ser aplicado en el futuro al desarrollo de componentes electrónicos que se lleven en la ropa, pues con ellos podrán fabricarse condensadores o resistencias. Aun así, aunque las propiedades de repetitividad son mejores que los desarrollos anteriores, sigue teniendo el principal inconveniente de la durabilidad cuando es sometido a esfuerzos de presión continuados.

### I.2.2.3. SENSORES TEXTILES CON ELEMENTOS CAPACITIVOS

Otra de las variantes para conseguir este tipo de sensor, es intentar replicar el funcionamiento de un condensador, mediante el desarrollo de una tricapa donde la capa superior e inferior debe ser conductora y la intermedia aislante. En este diseño las dos superficies conductoras que lo componen son, generalmente, dos capas de tejidos que, de alguna manera u otra, tienen, obviamente, propiedades de conducción eléctrica. El medio dieléctrico o aislante del condensador que emula es, en el caso de este tipo de sensores, otra capa de material de naturaleza textil, en este caso, no conductor o una espuma.

En este tipo de desarrollos, cuando se ejerce una presión sobre su superficie, al reducirse la distancia entre las placas conductoras, las cuales se aproximan entre sí, se produce una diferencia en la capacidad del sistema con respecto al estado inicial, variación que puede ser cuantificada, actuando, por tanto como sensor de presión.

En base a estos principios de funcionamiento diversos son los productos desarrollados, [84, 85] más o menos precisos, eficaces, funcionales, elaborados o complejos, siendo alguno de ellos, como el desarrollo de una alfombra que detecta la presión ejercida sobre ella [62] mediante un sistema capacitivo, que une dos tejidos (uno de tufting y el otro rafia de polipropileno) utilizando un látex conductor, y separados por una espuma aislante que hace de dieléctrico, y que además es capaz de ser fabricado a gran escala en sistemas de producción textil convencionales.

En este sentido, de nuevo, es importante resaltar que en esta patente de invención [62] ha sido el presente proponente de esta tesis doctoral. Es un ejemplo de un

desarrollo de un sistema capacitivo capaz de detectar la presencia de una persona u objeto que se esté situado sobre él.

Alguna otra referencia [86] propone un sistema textil de una única superficie en el que se introduce hilados conductores de forma perpendicular, formando una matriz separados por un material elástico dieléctrico y se proponen varias alternativas de construcción. Este sistema detecta la presión ejercida por la diferencia de capacidad que se registra en el interior de la matriz. Este desarrollo es capaz de medir pequeñas presiones y también ser expuesto a grandes impactos.

Destaca también la propuesta [87] en donde se describe una novedosa fibra conductora que, por su constitución basada en secuencias de capas de cientos de fibras conductoras y capas de fibras aislantes, presenta una elevada capacitancia electrónica, para ser usada en textiles electrónicos.

Más reciente aparece un estudio que desarrolla un sensor de presión de alto rendimiento de base textil, compuesto de fibras conductoras con una excelente conductividad eléctrica y estabilidad contra la deformación externa. Para asegurar la conducción de las fibras, éstas han sufrido un proceso de recubrimiento con materiales de goma dieléctricos. [88]

Algunas investigaciones [89, 90, 91] están derivando hacia la detección del movimiento y no de la presión ejercida, áreas muy interesantes pero que queda fuera del objeto de este trabajo.

En base a las capacidades de las fibras conductoras existen desarrollos capacitivos muy interesantes, invenciones como una patente [92] que describe una sábana compuesta de dos capas de tejidos conductores, separadas por una capa no conductora que aísla las anteriores entre sí. Cuando se ejerce una presión sobre las capas conductoras, estas se ponen en contacto y, de esta manera, el sistema detecta que se ha ejercido presión en un punto.

#### 1.2.2.4. SENSORES TEXTILES POR LA UTILIZACIÓN DE FIBRAS CONDUCTORAS

La incorporación de fibras o hilados con capacidades para la conducción eléctrica en la estructura de los ligamentos que constituyen los tejidos es otra alternativa que es también objeto de estudio para la consecución de textiles con capacidad para detectar la presión que sobre ellos se ejerce, y por tanto su deformación elástica. En el [1.3.1.- Fibras textiles conductoras](#) se expondrá información detallada acerca de las fibras conductoras y, por su parte, en el apartado [1.3.2.1. Materiales para textiles conductores: hilos conductores](#) se detallará información acerca de los hilados conductores, y de las propiedades para la conducción eléctrica que tanto unos como otros poseen.

Para ilustrar el potencial de las fibras conductoras para el desarrollo de sensores textiles de la presión/deformación elástica cabe realizar una simple comparativa con la invención descrita anteriormente [92], u otras patentes relacionadas con sistemas capacitivos en capas; [93, 94, 95, 96]. En todas ellas cabe significar la necesidad de tener que recurrir a la construcción de tres capas de tejidos, con las desventajas que

esto supone, en cuanto a viabilidad industrial, costes, rigidez del sistemas, o estabilidad debido a la necesidad de mantener la alineación entre capas, entre otros.

Por ello estos desarrollos iniciales dieron paso a invenciones un tanto más avanzadas. Así, en invenciones posteriores [97], se eliminaron las capas, consiguiendo integrar la función de sensor en el propio ligamento. Se trata de una estructura de ligamento compleja que contiene hilados conductores y no conductores en dos niveles del tejido. En el primer nivel se disponen en paralelo los hilados conductores, y en el segundo nivel se colocan otros hilados conductores, pero en sentido perpendicular a los primeros. Por tanto, forman una estructura de malla, con la importante salvedad de que, por el especial ligamento del tejido, en estos dos niveles no se establece contacto, ya que están aislados entre sí por la concurrencia de otros hilados no conductores que los separan. Cuando se ejerce una presión estos dos niveles conductores del mismo tejido tienden a juntarse, y cuanto mayor sea la presión, mayor será la superficie de contacto, actuando como sensor ante la presión.

Desde estos primeros desarrollos, diversas han sido las invenciones que se describen en diferentes patentes. Todas ellas innovan frente a sus antecesoras, y van un paso más allá en la complejidad de los desarrollos, pero basan su funcionamiento en las capacidades de conducción de determinadas fibras, y en la forma de interacción entre ellas en el contexto de la estructura del tejido que compone la invención.

Singularmente, existe una publicación [98] donde se describe un hilado trenzado que contiene hilados conductores rodeados de hilados aislantes, actuando, en sí mismo, como sensor de presión, de forma similar al modelo de funcionamiento anteriormente expuesto. Pero la sensibilidad es muy baja, así como la reproducibilidad de los resultados.

Desde el punto de vista de los trabajos científicos, es de interés aquellos donde no sólo se describe un tejido sensor de presión con fibras conductoras, sino que se analizan y discuten su capacidad de medida, hasta que nivel puede actuar el sensor, así como la consideración de las propiedades constitutivas del tejido tales como la densidad de trama y urdimbre o composición de la fibra. [99]

Para finalizar este apartado, cabe hacer mención específica, por su importancia futura, a los sensores textiles que se pueden desarrollar a partir de la utilización de polímeros conductores. A este respecto, cabe significar que actualmente se han desarrollado un rango bastante amplio de polímeros intrínsecamente conductores, al respecto de los cuales se ofrece más información en el apartado [1.3.1.4. Fibras poliméricas intrínsecamente conductoras.](#)

Es posible utilizar estos polímeros conductores para desarrollar productos similares a los referidos hasta ahora en este apartado, puesto que podrían ser sustituidos por este tipo de materia prima, con las ventajas textiles inherentes a él y que se derivan de tratarse de una materia polimérica, al igual que las fibras convencionales. Se espera que estos materiales evolucionen para que puedan dar lugar a soluciones textiles novedosas.

#### I.2.2.5. SENSORES TEXTILES POR EL RECUBRIMIENTO DE VELOS DE NANOFIBRAS

El desarrollo relativamente reciente de los nanomateriales obtenidos mediante electrohilatura, tales como nanofibras o nanovelos ofrecen nuevas posibilidades para la construcción de sistemas más eficientes que sus análogos a escala macrométrica. Estas propiedades ventajosas derivan de su pequeño tamaño, que otorga a estos materiales de una muy elevada superficie específica y una gran porosidad, propiedades que encajan perfectamente con los requerimientos que se les exigen a sensores ultra sensitivos. Algunos desarrollos sobre sensores de presión obtenidos hasta la fecha se centran en materiales compuestos basados en estas fibras [100].

En este sentido destaca un desarrollo, en el que se han obtenido, mediante electrohilatura, nanovelos de nanotubos de carbono (CNTs), los cuales actúan como sensores de presión piezoeléctrico con prestaciones mejoradas [101]. En este trabajo se han caracterizado sus propiedades como sensor de presión, y se ha comprobado que sus capacidades se incrementan extraordinariamente debido al alineamiento entre los polos del material desarrollado, derivado de la extremadamente pequeña finura de las nanofibras. La conversión directa e inversa de la energía eléctrica en energía mecánica en los sensores que se proponen en este trabajo puede impulsar la próxima generación de tejidos inteligentes para diversas aplicaciones. Otro estudio presenta sensores de tensión piezoeléctricos flexibles fabricados utilizando nanocables híbridos de fibra de carbono y ZnO, el sensor muestra una alta sensibilidad a la tensión externa. Una de las ventajas de este sensor de deformación es que presenta una respuesta rápida y en tiempo real, [102].

Se espera que este incipiente campo continúe ampliándose, como sugieren otras prometedoras investigaciones [103], que han logrado desarrollar nanofibras intrínsecamente piezoeléctricas mediante polímeros de PVDF para aplicaciones en el almacenamiento de energía.

#### I.2.2.6. SENSORES TEXTILES POR LA UTILIZACIÓN DE FIBRA ÓPTICA

Una novedosa alternativa a las anteriores investigaciones de sensores textiles de presión surge de la utilización de fibra óptica y de la ingeniosa explotación de las propiedades de conducción de la luz que le son intrínsecas a estos materiales.

Estos sensores textiles, basan su funcionamiento en determinar, cuando se ejerce una presión sobre un textil, cómo afecta este suceso, a las propiedades de propagación de la luz a través de la fibra óptica. Estudios previos [104] ponen en evidencias las muchas limitaciones que presentan estos polímeros de fibra óptica utilizados como sensores, tales como su limitada capacidad para deformarse y la no linealidad de sus propiedades fotoflexibles.

Sin embargo, la naturaleza muy rígida de la fibra óptica plástica convencional (POF) condiciona las propiedades flexibles del tejido que lo integra, por lo que, a priori, limita sus capacidades para ser utilizado como sensor de presión.

Sin embargo, actualmente se utiliza una fibra óptica flexible, Geniomer, la cual ha sido fabricada por la empresa Wacker Silicones, que es capaz de salvar este contratiempo [105]. En su ligamento, el tejido objeto de este estudio incorpora filamentos de esta materia, insertados por trama y por urdimbre formando matrices, de tal manera que cuando se ejerce presión sobre la superficie, la sección transversal de la fibra no permanece cilíndrica, sino que se reduce (se achata), haciendo que la luz no se propague eficazmente, y de esta manera el sistema detecta que se ha ejercido presión en un punto.

#### 1.2.2.7. SENSORES TEXTILES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE FIBRAS PIEZOELÉCTRICAS

Indudablemente una de las líneas de trabajo de la que se espera grandes resultados a media que avancen las investigaciones es la que desarrolla fibras piezoeléctricas de manera intrínseca en su constitución que puedan ser hiladas y tejidas, de tal modo que, al menos hipotéticamente, estos textiles, en sí mismos, se comporten como sensores de presión por las variaciones eléctricas que se darán en su composición cuando se ejerza una presión.

Recientemente se ha conseguido producir fibras poliméricas piezoeléctricas bicomponentes con base de fluoruro de polivinilideno (PVDF) [106]. Sin embargo, los resultados desde el punto de vista de sensibilidad no son los esperados, ni comparativos con los que se obtienen con otro tipo de materiales no textiles, como son los intrínsecamente piezoeléctricos, como es el caso de la composición titanato zirconato de plomo (PZT), considerada la cerámica piezoeléctrica de mayor uso actualmente, ya que presente un mayor comportamiento piezoeléctrico que el resto de compuestos ya analizados. Es por ello, que otra área de investigación, son las que van orientadas a incluir en la fibra textil este tipo de materiales. Los principales procedimientos para la obtención de este tipo de fibra piezoeléctrica son tres: extrusión de un polímero en cuya composición se aditiva el PTZ, hilatura sol-gel y un proceso de hilatura en suspensión viscosa [viscous suspension spinning process (VSSP)]. De forma más específica, estas fibras están siendo utilizadas para el desarrollo de composites inteligentes por parte de diversos grupos de investigación que trabajan para su optimización [107-112]. Además un grupo de investigadores han conseguido realizar nanofibras de PZT con muy buenas características piezoeléctricas. [113]

Además de los citados materiales compuestos, también se están desarrollando textiles convencionales que contienen fibras piezoeléctricas y piezoresistivas, y que están diseñados para la confección de ropa. Esta invención [114] presenta tres tipos de fibras: piezoresistivas (formando zonas específicas piezoresistivas en el tejido), fibras conductoras que forman áreas conductoras y las fibras no conductoras, que forman áreas aislantes. El conjunto es capaz de medir la presión que sobre él se ejerce, pero no con muy buenos resultados hasta la fecha a escala piloto debido a la falta de reproducibilidad y repetitividad de los resultados. Otro ejemplo en este sentido se centra en el desarrollo de textiles capaces de detectar el movimiento del usuario mediante un sensor que queda embebido en un hilado piezoresistivo [115]. Y por último, otro ejemplo representativo de las posibilidades de este tipo de materiales se muestra, en un desarrollo donde se obtienen fibras poliméricas bicomponentes piezoeléctricas mediante el proceso de hilatura por fusión de fibras cerámicas [114].

### I.2.2.8. INTEGRACIÓN DE SENSORES EN TECNOLOGÍA TEXTIL

Y por último, existen además, otras alternativas en las que, en mayor o menor medida, interviene la tecnología textil pero en los que la relevancia del tejido y el proceso de investigación sobre el propio tejido soporte, pasan a un segundo nivel. Se trata de desarrollos que engloban todas aquellas soluciones en las que, de una manera u otra, se incorpora un dispositivo sensor electrónico estándar o desarrollado específicamente, que soporta el grueso de la investigación, y su integración en un textil totalmente convencional. Se pueden diferenciar dos grandes categorías. En la primera de ellas se engloban todos desarrollos que buscan dotar de capacidad de sensor de presión mediante la integración de dispositivos sensores localizados y su integración en los hilados textiles [116]. Y la segunda categoría de esta tipología de sensores textiles de presión es aquella que se basa en la integración de dispositivos microelectrónicos en los tejidos [117].

### I.3. Textiles conductores

Tras la exposición inicial acerca de la textrónica (que surge de la confluencia entre textil, electrónica e informática), seguido de un acercamiento de la tecnología y principios de funcionamiento del fenómeno de piezoelectricidad (se producen cargas eléctricas como resultado de la aplicación de una tensión mecánica) y, finalmente, tras la prospección del estado del arte concerniente a los textiles para sensores de presión y deformación elástica (en los que en su mayoría la conducción eléctrica es clave), se llega a la conclusión de la necesidad de, como mínimo, desarrollar un textil con propiedades conductoras, para que éste pueda ser sensible a la presión/deformación elástica. Es por ello que, en este tercer apartado de la introducción, se considera relevante profundizar en el conocimiento sobre conductividad eléctrica en textiles y fibras.

#### I.3.1.- Fibras textiles conductoras.

En este apartado se mostrarán los detalles concernientes a las diversas fibras conductoras existentes en la actualidad, sus tipologías, propiedades y formas de obtención.

##### I.3.1.1.- INTRODUCCIÓN: CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad (o de la aptitud) de un material para dejar pasar (o dejar circular) libremente la corriente eléctrica. La conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material. Los metales son buenos conductores porque tienen una estructura con muchos electrones con vínculos débiles, y esto permite su movimiento. La conductividad también depende de otros factores físicos del propio material, y de la temperatura, [118]:

La conductividad es la inversa de la resistividad; por tanto,  $\sigma=1/\rho$ , y su unidad es el S/m (siemens por metro) o  $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ . Usualmente, la magnitud de la conductividad ( $\sigma$ ) es la proporcionalidad entre el campo eléctrico {E} y la densidad de corriente de conducción {J}:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

En los conductores metálicos, las partículas cargadas son los electrones, los cuales se mueven cuando se aplica una diferencia de potencial (medida en voltios) entre dos puntos separados del material. Ese flujo de las cargas (medido en amperios) es lo que se conoce como “corriente eléctrica”.

En la mayoría de estos materiales la corriente continua es proporcional al voltaje, como determina la ley de Ohm. Existiendo una constante de proporcionalidad entre ambas magnitudes. Dicha constante de proporcionalidad es la conductancia eléctrica, que es inversa a la resistencia eléctrica:

$$I = \frac{V}{R}$$

Los materiales conductores de la electricidad se clasifican en [119]:

- Conductores, de conductividad superior a  $10^3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ .
- Semiconductores, de conductividad entre  $10^{-9}$  a  $10^3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ .
- Aislantes, de conductividad inferior a  $10^{-9} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ .

En la siguiente figura I27 se muestra las propiedades conductoras de los materiales más comunes:

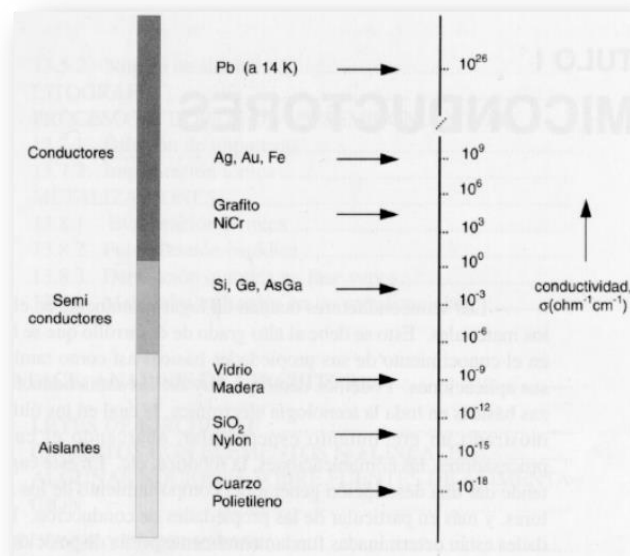


Figura I27: Propiedades de los materiales conductores más comunes [119]



### I.3.1.2. FIBRAS ELÉCTRICAMENTE CONDUCTORAS: GENERALIDADES

En este sentido, en el contexto textil, las fibras eléctricamente conductoras se llevan utilizando desde hace años para dos tipos de aplicaciones industriales: para controlar la electricidad estática y para la protección contra las interferencias electromagnéticas (EMI).

La protección de interferencias es un problema común a los equipos electrónicos, que han de ser aislados para evitarlas. En lo que se refiere a las cargas electrostáticas, éstas son un problema de forma generalizada cuando se producen en las superficies de algunas materias, como, por ejemplo en determinadas fibras sintéticas, debido a la carga electrostática que se produce. Más allá de la incomodidad del usuario, la electricidad estática puede, asimismo, causar chispas que, en atmósferas inflamables, llevan asociado el riesgo de explosión.

Sin embargo, en la actualidad su importancia se ha visto renovada y ampliada, pues son esenciales para el desarrollo de los textiles inteligentes, como se desprende de la exposición de los apartados anteriores.

Las fibras eléctricamente conductoras pueden clasificarse en dos categorías generales, por un lado, las llamadas intrínsecamente conductoras y, por otro, aquellas fibras que, no siendo conductoras por sí mismas, son específicamente tratadas para ganar conductividad. Y dentro de estos dos grandes grupos existen, además diversas tipologías. A continuación se muestran todas las alternativas existentes en este sentido.

### I.3.1.3. FIBRAS INTRÍNSECAMENTE CONDUCTORAS

Las fibras de metal se presentan en forma de filamentos muy finos, con diámetros entre 1 a 80  $\mu\text{m}$ . Estas fibras están formadas de metales puros, principalmente de níquel, acero inoxidable, titanio, aluminio y cobre, [120]. También pueden ser de aleaciones metálicas o de carbono.

Existen diversos métodos para producir fibras eléctricamente conductoras, entre ellos, los más utilizados son el trefilado y la hilatura por fusión.

El trefilado es el procedimiento más utilizado para la obtención de este tipo de fibras. Es una operación en la que se produce la reducción de sección de un alambre o varilla, al hacerlo pasar por estiraje a través hilera. El diámetro inicial del filamento inicial es variable y depende del material. Para el cobre, por ejemplo, el diámetro es normalmente de 8 mm, mientras que para el hierro es de 5 mm. Tras una primera etapa, se somete a estiraje a altas temperaturas (600°-900°) y después se enfrían. [121]

Las fibras metálicas también se pueden producir mediante métodos térmicos basados en su extrusión directa a partir de la masa fundida. El reto de hilatura por fusión de metales frente a la hilatura por fusión del vidrio o los polímeros se debe a que la viscosidad de la masa fundida del metal es 100 veces inferior que la del vidrio o los

polímeros. Y puede ocurrir, por lo tanto, que la masa fundida se fracture y en lugar de fibras únicamente se formen gotas. La producción continua de fibras metálicas por medio de hilatura por fusión se logra mediante un fluido en rotación. En este proceso los metales son sobrecalentados en una atmósfera de gas, alta presión y temperatura. La superficie del líquido se carga con un gas inerte con exceso de presión. Debido a la alta presión el metal en masa pasa a través de los cabezales y, ya en forma de fibra, se sumerge en un baño de enfriamiento. Después el proceso de solidificación se ve acelerado por un movimiento de rotación y por la diferencia de densidad entre el metal y un agente de enfriamiento presente en el baño. Se procede, finalmente a la extracción, ya sea esta de forma continua o discontinua. [122]

Sin embargo, dada la importancia de este tipo de fibras, no dejan de investigarse métodos diversos para su producción, partiendo de premisas muy diversas. Es previsible que este campo de conocimiento continúe expandiéndose pues existe un gran interés acerca de estas fibras, por las amplias posibilidades de aplicación que se les otorgan. [123, 124]

Para finalizar, cabe hacer mención expresa a las fibras de carbono, sobre las cuales se dispone de conocimiento empírico desde hace décadas al respecto de sus capacidades intrínsecamente conductoras [125]. Las fibras de carbono se obtienen tras someter a polímeros como el rayón, poliacrilonitrilo (PAN) y aramidas aromáticas a un tratamiento térmico. Existen en el mercado muchas propuestas comerciales entre las que destacan, la fibra TORAYCA® T300, producida por Toray Industries, Inc., reconocida firma Japonesa líder en este segmento de mercado [126]. Otro ejemplo en este sentido es la SIGRAFIL® C, en la que se utiliza PAN como precursor, producida y distribuida por SGL Group [127].

#### I.3.1.4. FIBRAS POLIMÉRICAS INTRÍNSECAMENTE CONDUCTORAS

En los últimos años han crecido el número de investigaciones concernientes a los llamados polímeros intrínsecamente conductores (ICP), existiendo una extensa literatura al respecto de su síntesis y modos de aplicación.

Los polímeros conductores más importantes en la actualidad, por sus capacidades conductoras (en torno a 10.000 S/cm), son el poliacetileno (PAC), la polianilina (PANI), y el polipirrol (PPY). Y son estos polímeros conductores sobre los que se dispone actualmente una mayor base de conocimiento.

En cuanto a su capacidad para la conducción eléctrica, a continuación se muestra la conductividad relativa de algunos de estos polímeros frente al cobre [128]:

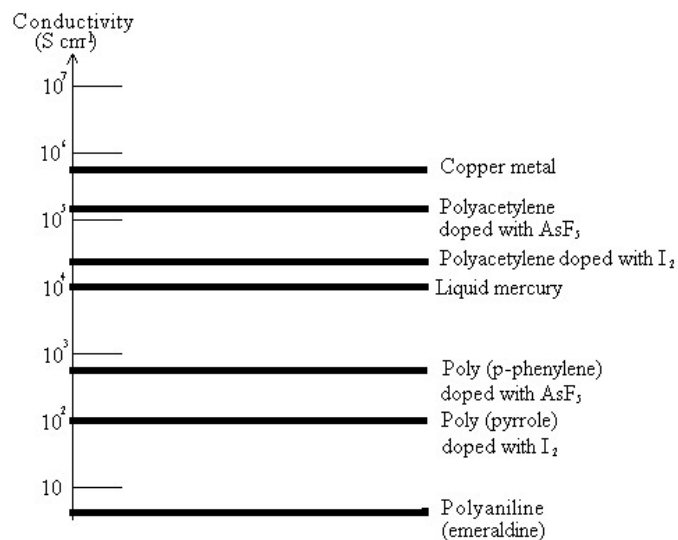


Figura 128: Comparativa conductividad de polímeros frente cobre [128]

Se trata de polímeros, generalmente, no termoplásticos y sus propiedades mecánicas son inferiores a las del resto de polímeros.

Desde el punto de vista estrictamente textil actualmente no han remplazado las fibras conductoras metálicas, pues el nivel de conductividad se encuentra por debajo de éstas. De hecho, actualmente no es común encontrar bibliografía al respecto de la producción de fibras a partir de polímeros intrínsecamente conductores. Por el contrario, este tipo de polímeros está siendo objeto de numerosas investigaciones en el contexto textil mediante su aplicación en forma de recubrimiento de hilados/fibras o tejidos, (que más adelante se explicitan), en forma de films [129], como microfibras [130, 131], que comúnmente se pueden utilizar para la fabricación de tejidos con propiedades electrostáticas, o fibras de polipirrol (PPy) huecas [132].

Por sus grandes posibilidades, es previsible que a corto plazo las investigaciones al respecto de la producción fibras de estos polímeros se vaya incrementando [133]. Por ejemplo, actualmente ya existen procesos de obtención de fibras PEDOT mediante hilatura en húmedo. Además, estas fibras se están fabricando también a través de electrospinning, fabricadas a partir de una disolución de un polímero y un polímero conductor, el polímero conductor utilizado es poli(3,4-etilendioxitiofeno)/poliestireno sulfonato (PEDOT/PSS). [134]

### I.3.1.5. FILAMENTOS CONTINUOS METÁLICOS

De manera alternativa se pueden utilizar filamentos metálicos en la configuración de hilos textiles como material intrínsecamente conductor. Normalmente se trata de monofilamentos, los cuales van recubiertos por fibras textiles convencionales o retorcidos con filamentos convencionales.

Con ello se busca mejorar tanto el aspecto del tejido, como sus propiedades (y evitar pérdidas de conducción eléctrica, al no estar expuesta la fibra conductora al medio exterior). Además, al estar recubiertas se mejora la ductilidad en el proceso de tisaje.

En todo caso, este tipo de propuestas supone, para el producto final, una pérdida de las propiedades textiles inherentes.

La compañía Swiss-Shield® está especializada en la producción de monofilamentos metálicos que se incorporan en hilados base como el algodón, poliéster, poliamidas y aramidas. Los monofilamentos conductores más comunes son de cobre, latón, bronce, plata, oro o aluminio, por ejemplo. [134]

La figura I29 muestra un hilado típico conductor con base de fibras convencionales que envuelven un monofilamento.

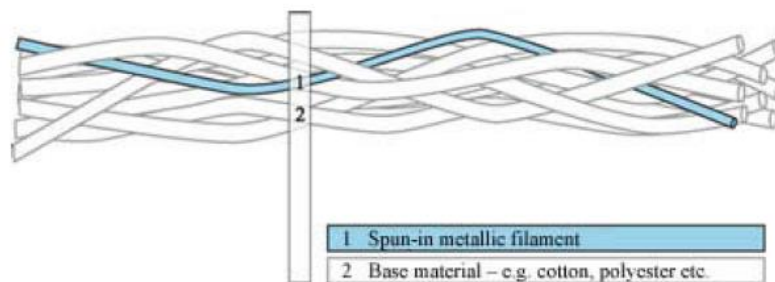


Figura I29: Monofilamento metálico recubierto de fibras/filamentos no conductores [134]

### I.3.1.6. FIBRAS E HILADOS RECUBIERTOS CON MATERIALES CONDUCTORES.

Las anteriormente mencionadas componen el grupo de fibras intrínsecamente conductoras, mientras que las materias que se tratarán tanto en este apartado como en los dos siguientes ([I.3.1.7. Fibras funcionalizadas con partículas conductoras y](#) [I.3.1.8. Otras fibras conductoras: fibras híbridas](#)), disponen de propiedades de conductividad eléctrica porque han recibido un tratamiento o modificación específica que las dota de esta propiedad.

La primera alternativa a la anterior tipología son las fibras convencionales que, mediante algún tipo de tratamiento superficial, han sido recubiertas con una fina capa de un material de naturaleza conductora, que es el que dispone de propiedades para la conducción de la corriente eléctrica.

#### I.3.1.6.1. Fibras recubiertas por metales

Las fibras se pueden recubrir con metales (como el acero o la plata, por ejemplo), sustancias galvánicas o sales metálicas. La ventaja de los recubrimientos es que se pueden aplicar a la mayoría de tipos de fibras y son capaces de proporcionar una buena conductividad sin alterar las características propias del sustrato, como la densidad, la flexibilidad o la caída.

Los recubrimientos pueden ser aplicados a la superficie de fibras, hilos o incluso tejidos, para crear textiles eléctricamente conductores.

Sin embargo, cabe resaltar que tanto la adhesión entre el metal y la fibra como la resistencia a la corrosión puede dar lugar a problemas.

Estos recubrimientos, en el ámbito textil se suelen obtener mediante procesos de deposición no electrolítica, por pulverización catódica, deposición por evaporación, o mediante un recubrimiento del material textil con un polímero conductor.

Muchos son los desarrollos en este sentido, por ejemplo, el centro de investigación alemán TITV Greiz logró en 2003 producir hilos conductivos al recubrir un hilado convencional de poliamida 66 con una capa de metal. Este desarrollo lo registró como ELITEX®. En concreto, usaron para su obtención hilados de Shieldex Nylon 66, que fueron recubiertos con una fina capa de plata, obteniéndose una conductividad específica de en torno a los  $1,2 \times 10^3 \text{ Scm}^{-1}$ . [135]. Sin embargo, su resistividad específica, de  $8,34 \text{ Ohm mm}^2$  por metro, era demasiado baja para conducir la corriente eléctrica, por lo que se introdujo un tratamiento galvánico y electromecánico posterior, añadiendo un nuevo recubrimiento con oro, platino, cobre y plata, pudiéndose utilizar tales hilados como materiales conductores, sensores y actuadores. [136].

Pero este tipo de desarrollos no se han quedado solo en el ámbito científico, sino que ha sido objeto de un gran número de productos que se han lanzado al mercado, por las grandes posibilidades de utilización de este tipo de fibras en entornos industriales (aplicaciones que requieren de propiedades antiestáticas, de protección, etc.).

Así, la compañía Swicofil AG Textile Services está especializada en la producción y comercialización de hilados de poliamida, poliéster, acetato o algodón, o mezclas de ellos, metalizados con aluminio. El primer paso del proceso de recubrimiento, un film de poliéster metalizado con aluminio es lacado con una resina epoxy de protección, para mantener una superficie de aspecto brillante. Para la obtención de diferentes colores se mezclan con la resina las cantidades correspondientes de colorantes complejos metálicos. Posteriormente, el film se corta en pequeños "creps". Estos "creps" se cortan y enrollan en diversos tamaños. Después pasan a un cabezal de corte, y finalmente se recogen en una bobina. En el paso final, este hilado metálico es retorcido, pudiéndose también se pueden recubrir con fibras convencionales mediante procesos como core-spun. [137]

Por su parte, también DuPont ha logrado producir fibras con recubrimiento metálico. Esta compañía, productora de la conocida fibra KEVLAR®, ha modificado el proceso de obtención de esta conocida para-aramida para lograr recubrirla con níquel, plata o cobre, a diferentes finuras de fibra. Este nuevo desarrollo, por lo tanto, presenta una combinación muy versátil de propiedades físicas y eléctricas para un amplio rango de campos de aplicación. Tras su desarrollo, DuPont vendió la tecnología a la firma Micro-Croax Corp., que comercializa estas fibras bajo la marca ARACON®. [138]

Además de los anteriores desarrollos, también destacan en este apartado, por su importancia, tres fibras más:

**SHIELDDEX®** es una fibra de poliamida que está recubierta por plata del 99% de pureza. Es fabricada por la compañía alemana Statex Production & Distribution plc. También ofrece recubrimientos de plata/cobre, plata/cobre/níquel y plata/cobre/latón,

dependiendo de las aplicaciones. Se ofrecen en multitud de finuras, y longitudes, pudiendo ser mezclada con otras fibras naturales o sintéticas [139]

**AmberStrand™**, de Syscom Technology, Inc, que está basada en la conocida Zylon, una fibra de alto módulo y alta tenacidad [140]

**X-Statics™**, de Noble Biomaterials, Inc., un monofilamento o fibra de poliamida, con un recubrimiento permanente de plata por medio de un baño acuoso. Ofrecido en múltiples longitudes de fibra, para ser mezclado con un alto rango de materias [141]

**Thunderon™** de Nihon Sanmo Dyeing Co, cuya fibra base es poliéster, acrílica o poliamida, las cuales son recubiertas con sulfuro de cobre. Puede ser mezclada con fibras largas y se ofrece en un elevado número de colores. Estas fibras presentan una elevada conductividad eléctrica, resistencia a la abrasión y efecto bactericida. [142]

Destacar también otras alternativas a las presentadas, la fibra llamada ELEX®, de Hanil Synthetic fiber Co., Ltd . [143], la SilveR-STAT®, comercializada por R Stat [144] y, por último, la fibra SANSTAT®, que produce la compañía Shakespeare Conductive Fibers LLC. [145]

Y por último, hacer mención a las fibras de celulosa recubiertas de níquel electrolítico con una muy buena conductividad, en base a una perfecta correlación entre la morfología y la conductividad eléctrica del recubrimiento. [146]

#### *1.3.1.6.2. Fibras recubiertas por polímeros conductores*

Como se puede observar el recubrimiento de fibras con metales ha llegado a un buen grado de desarrollo e incluso de explotación comercial. Existen, sin embargo, otras posibilidades, como el recubrimiento mediante polímeros conductores. Sin embargo, actualmente no son una alternativa real al recubrimiento metálico, encontrándose en pleno proceso de investigación desde hace ya mucho tiempo con avances significativos desde el punto de vista científico pero con poca viabilidad comercial fundamentalmente por el elevado precio de las mismas [147, 148]. Aun así, se encuentran ya en el mercado desarrollos muy interesantes como es la seda recubierta por polipirrol (PPy) [149] o hilados de poliéster recubiertos de PEDOT a través de una técnica de deposición por oxidación química (OCDV por sus siglas en inglés) [150], o el caso de un revestimiento de este mismo material PEDOT como una capa de sólido electrolito depositado sobre la estructura de un elastómero de silicona [151].

#### 1.3.1.7. FIBRAS FUNCIONALIZADAS CON PARTÍCULAS CONDUCTORAS

Bajo este epígrafe se expone otra alternativa de fibras que, aun no disponiendo hasta la fecha de naturaleza intrínsecamente conductora, ha sido objeto de estudio en números trabajos para conseguir esta propiedad. En este caso por la aditivación de partículas conductoras al polímero, durante el proceso de extrusión por fusión del polímero termoplástico.

#### *1.3.1.7.1. Proceso aditivación de nanopartículas en fibras termoplásticas.*

En ese sentido, actualmente se está investigando el proceso de aditivación de polímeros con nanopartículas con el fin de inducir nuevas propiedades en la matriz polimérica. En el sector textil, la aditivación de polímeros encuentra aplicación en el desarrollo de fibras multifuncionales, no sólo para el campo que nos ocupa (conductividad eléctrica). De hecho el verdadero potencial de los materiales a escala nanométrica (nanomateriales) radica en el excepcional comportamiento que manifiestan debido a su reducido tamaño.

La aditivación de nanopartículas se realiza, principalmente, en matrices termoplásticas. En ocasiones es posible llevar a cabo la aditivación de la nanopartícula antes de que tenga lugar el proceso de polimerización, sin embargo, el empleo de sistemas de extrusión para llevar a cabo el proceso de aditivación es la metodología más extendida.

La funcionalización de fibras termoplásticas mediante aditivación de nanopartículas comprende, principalmente, dos etapas:

**1ª etapa.** Aditivación de las nanopartículas sobre matrices termoplásticas: PP, PE, PES, PA, PLA, etc.

Los nanomateriales se aditivan de manera muy precisa (dosificador gravimétrico) y se dispersan en el seno de la matriz (interacción nanomaterial-polímero) hasta tener una mezcla homogénea, la cual emerge en forma de filamento fundido. En una segunda etapa es enfriado en un baño de agua y cortado en la paletizadora en forma de granza.

**2ª etapa.** Extrusión de la granza de polímero aditivado con nanomateriales: “melt spinning process”.

Durante el proceso de extrusión han de controlarse toda una serie de parámetros críticos: la temperatura de procesado, la velocidad de giro de los husillos, el torque del par motor o el diseño de los husillos. De igual manera se deben considerar otros aspectos del proceso relacionados con la naturaleza del polímero, tales como su índice de fluidez, su viscosidad, temperatura de salida o la temperatura de degradación.

#### *1.3.1.7.2. Nanopartículas conductoras*

Actualmente es posible aditivar a un polímero en masa toda con una serie de partículas [152]:

**Nanomateriales derivados del silicio:** nanoarcillas y nanocompuestos.

**Nanopartículas poliméricas:** dendrímeros y sistemas de nanoencapsulación inteligentes

**Nanopartículas metálicas y derivadas de éstas:** plata, oro, cobre, titanio, zinc, dióxido de titanio, óxido de zinc, óxido de cerio, etc.

**Nanomateriales derivados del carbono:** De entre todos ellos, son de interés para este trabajo únicamente los últimos, que son capaces de otorgar conductividad al material.

Cabe significar que las fibras aditivadas con nanopartículas metálicas y sus derivados, desde el punto de vista textil, están encontrando aplicaciones en otros ámbitos de utilización alejados de la conducción eléctrica, tales como la salud y la medicina pues, tan sólo por citar un ejemplo, una mínima cantidad de plata otorga propiedades antimicrobianas y, en algunos casos, antifúngicas y antimoho. Esta limitación viene dada por la cantidad máxima del nanocompuesto que puede aceptar un filamento termoplástico sin perder las propiedades inherentes textiles de procesabilidad, resistencia, tenacidad, etc., porcentajes que no suelen superar el 5%, y que no permite al hilo obtener conductividad eléctrica, aunque sí antiestáticas.

Así pues cabe centrar la atención en los mencionados nanomateriales derivados del carbono, pues al aditivosarlos en la matriz polimérica dotan al conjunto de propiedades conductoras. Esta familia de nanomateriales comprende tres alótropos del carbono: los fullerenos, los nanotubos y las nanofibras de carbono.

Los fullerenos son la tercera forma más estable del carbono, tras el grafito y el diamante, y desde su descubrimiento en 1985, sus propiedades químicas y físicas todavía continúan bajo intenso estudio.

El fullereno más conocido es el buckminsterfullereno, un fullereno formado por 60 átomos de carbono (C<sub>60</sub>), en el que ninguno de los pentágonos que lo componen comparte un borde. Su estructura es la de una figura geométrica truncada y se asemeja a un balón de fútbol (domo geodésico), constituido por 20 hexágonos y 12 pentágonos, con un átomo de carbono en cada una de las esquinas de los hexágonos y un enlace a lo largo de cada arista.

En el ámbito de la nanotecnología aplicada al desarrollo de nuevas fibras, sus propiedades más estudiadas son su resistencia térmica y, sobre todo, su superconductividad, para el desarrollo de polímeros electroactivos (reacciones de transferencia electrónica).

Los nanotubos de carbono (CNT), se descubrieron en 1991 y actualmente se investigan y también se están desarrollando las primeras aplicaciones industriales. Son estructuras tubulares cuyo diámetro es del orden del nanómetro y se componen de una o varias láminas de grafito, u otro material, enrolladas sobre sí mismas.

Atendiendo a su tipología estructural, se distinguen los nanotubos monocapa, (conocidos por denominación anglosajona single wall carbon nanotubes, SWCNTs) y los tubos multicapa (multiple wall carbon nanotubes, MWCNT)

Los nanotubos de carbono, además de ser tremendamente resistentes, poseen interesantes propiedades eléctricas. En función de su configuración atómica, los CNT pueden actuar como un semiconductor o como un metal.



Precisamente las primeras aplicaciones de nanotubos de carbono están relacionadas con sus capacidades para conducir la electricidad. En el sector de la automoción, por ejemplo, se han empleado para desarrollar mangueras antiestáticas de combustible, o como aditivos para la formulación de tintas electrónicas.

Electrónicamente, se ha comprobado que los CNTs se comportan como hilos cuánticos ideales monodimensionales con comportamiento aislante, semiconductor o metálico, dependiendo de los parámetros geométricos de los tubos.

Como se puede apreciar, la aditivación de CNTs en polímero en masa es una solución a considerar pero que está sujeta a constantes investigaciones de las que se esperan resultados de gran interés para aplicación en el desarrollo de fibras textiles.

#### I.3.1.8. OTRAS FIBRAS CONDUCTORAS: FIBRAS HIBRIDAS

Finalmente han de ser consideradas también otras configuraciones de fibras conductoras, las llamadas fibras híbridas debido a que presentan una especial morfología en su corte transversal y, además, combinan de manera optimizada materiales conductores y polímeros convencionales, no conductores, por lo que tienden a disponer capacidad de conducción eléctrica sin merma de las propiedades mecánicas de las fibras convencionales.

Señalar, por ejemplo, las No-Shock<sup>TM</sup> de la compañía Monsanto, unas fibras huecas de poliamida o poliéster que en su interior son rellenadas con carbono. Se pueden fabricar en diversas finuras, y longitudes. [154]. La fibra P-140, de Dupont, consiste en un núcleo de carbón negro y una funda protectora de poliamida. [155]. También destacar la fibra Conductrol<sup>TM</sup>, producida por la estadounidense Sterling Fibers, y que combina una fibra acrílica (copolímero poli-acrilonitrilo) rellena de carbón, con una superficie de un polímero inherentemente conductor [156]. Actualmente también se está trabajando en el desarrollo de fibras huecas de óxido de metal, para ello se utilizan fibras solubles en agua, a modo experimental se han probado dos tipos de recubrimientos, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y ZnO. [157]

Como se puede apreciar, el rango de posibilidades de elección de una fibra conductora es extenso, y dependerá, por tanto de las funcionalidades que se busca conseguir y del entorno de utilización en el que el producto a obtener desarrollará su vida útil.

#### I.3.2. Textiles conductores.

Las aplicaciones básicas de los hilos textiles conductores son actualmente desarrollos muy específicos y concretos de productos que necesitan en la mayoría de los casos que se produzca comunicación de la señal eléctrica de un sistema sensor hasta alcanzar el sistema actuador pasando por el procesador de esta señal. Así, los textiles conductores se utilizan de manera generalizada en ámbitos industriales, y/o técnicos, pudiendo ser clasificados en función de sus capacidades para la conductividad eléctrica:

- Para baja conductividad: disipación estática, indumentaria antiestática, cintas conductoras, embalaje, etc.
- Para conductividad intermedia: indumentaria militar y protección electromagnética principalmente.
- Y para elevada conductividad: textrónica, atenuación de radiofrecuencia y microondas, y aplicaciones concretas que requieran de una buena comunicación eléctrica.

El sistema más sencillo y barato de impartir un cierto nivel de conductividad eléctrica a los tejidos es mediante la dotación de algún proceso de recubrimiento capaz de dotar de conductividad a la superficie del textil, ya sea mediante un proceso convencional de acabado por impregnación, por recubrimiento de agentes antiestáticos o por procesos más novedosos como la impregnación de un baño con una dispersión acuosa de PEDOT-PSS. [158], y en general, mediante la aplicación de metales u otros conductores, como los polímeros citados anteriormente, como puede ser PPY. [159]

Sin embargo, este tipo de tratamientos se aplica a la totalidad de la superficie y, aunque existen alternativas novedosas en las que el recubrimiento se realiza de manera selectiva, como la aplicación de tintas electroconductoras mediante procesos de estampación digital, se trata de procesos que no otorgan propiedades de carácter permanente en el tiempo y que presentan aún muchas limitaciones técnicas. Es por ello que, por su eficacia y durabilidad, para la consecución de tejidos conductores se ha consolidado la utilización del amplio rango de fibras conductoras existentes, y que anteriormente ya fueron objeto de análisis.

### I.3.2.1. MATERIALES PARA TEXTILES CONDUCTORES: HILOS CONDUCTORES.

Los hilados fabricados a partir de fibras conductoras son, por tanto, la opción más utilizada en la actualidad para la fabricación de textiles capaces de conducir la electricidad intrínsecamente, de manera selectiva, localizada y, en principio, permanente en el tiempo.

En este sentido, se hace necesario, por tanto, realizar una aproximación a los hilados conductores, su tipología estructural y otras consideraciones concernientes a sus propiedades.

#### *I.3.2.1.1. Definición y estructuras de los hilados conductores*

Se puede definir a un hilado conductor como aquél que de forma inherente dispone no sólo de las propiedades físicas y químicas características de los hilos textiles convencionales (resistencia, torsión, número, etc.), sino que, además, presenta una conductividad con valores superiores a 100 S/cm, generalmente.

Los hilos textiles conductores pueden ser de dos tipos, básicamente, los hilos conductores puros o los hilados compuestos por la mezcla de fibras textiles

conductoras y fibras no conductoras, estas últimas, se incorporan al hilado para mejorar sus propiedades mecánicas.

### 1.3.2.1.2. Hilados conductores puros

Los hilados conductores puros están fabricados de metales y sus aleaciones, y suelen presentarse, generalmente en forma de monofilamento y multifilamentos. Presentan una elevada conductividad relativa, la cual es proporcionada por la naturaleza conductora del metal constituyente. En contrapartida, es la opción más compleja desde el punto de vista del proceso de hilatura, así como en el posterior proceso de tejeduría. Y, obviamente, no presentan las mismas características físico-mecánicas que son propias e inherentes de las materias textiles, tales como el tacto, la resistencia, flexibilidad, y por lo tanto, los tejidos que llevan este tipo de hilos suelen presentar limitaciones en cuanto sus aplicaciones debido a que estos hilos confieren al artículo textil rigidez y poca confortabilidad generalmente.

### 1.3.2.1.3. Hilados conductores mixtos

Por su parte, en lo que se refiere a los hilados que integran mezclas de materias conductoras y no conductoras cabe mencionar que, esta unión de ambas partes es un punto crítico para la consecución de un hilo linealmente conductor en toda su extensión. Además, es necesario conseguir un equilibrio entre la dualidad de este tipo de hilos, ya que, cuanto mayor es su porcentaje de materia conductora, menores serán sus propiedades intrínsecamente textiles, tales como la flexibilidad, confortabilidad, tacto, transpirabilidad, etc.

Este tipo de hilados se presentan en multitud de estructuras, sin embargo, se agrupan en tres clases diferentes, que se describen a continuación.

Hilados de filamentos conductores, generalmente de metal, **enrollados sobre un hilo convencional**. El hilo obtenido se obtiene al aplicar vueltas de torsión a uno o varios monofilamentos de metal alrededor de un hilo convencional no conductor.



Figura 130: hilado conductor (filamento conductor exterior)



Figura 131: hilado conductor (filamento conductor interior)

Filamentos conductores, normalmente de metal, **recubiertos por fibras convencionales**. Se obtiene hilado cuyo núcleo es conductor y en que uno o varios hilados dan vueltas de torsión en torno al hilado conductor. Estos hilos textiles convencionales sirven de recubrimiento, lo aíslan y protegen del exterior (propiedades aislantes), además de inferirle propiedades físicas textiles al conjunto (tensión, flexibilidad, tacto, etc).

Mezcla íntima de fibras (fibra corta). En esta solución **fibras conductoras se mezclan con no conductoras** en los diversos procesos convencionales de obtención de hilado. Para ello previamente las fibras conductoras, principalmente metales y sus aleaciones, se cortan en longitudes que sean compatibles con las

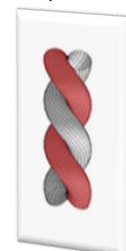


Figura 132: mezcla íntima conductora

longitudes de la materia convencional, y ambas longitudes compatibles con el proceso de hilatura elegido.

Se hilan y el hilado resultante es visualmente similar a un hilo convencional, sólo que dispondrá de propiedades conductoras. Sus propiedades textiles finales también son comparables con las de un hilado convencional.

El proceso de mezclado de fibras durante la hilatura es crítico para conseguir una mezcla uniforme que no comprometa la uniformidad de la conductividad. La conductividad relativa del hilado es directamente proporcional al porcentaje de fibras utilizado en su constitución.

A su vez este hilado puede combinarse con un cabo convencional, para dotar de aun mejores prestaciones textiles al conjunto. La conductividad sólo será efectiva en uno de los dos cabos, lo cual no compromete las propiedades conductoras del hilo, sino que, únicamente ha de tenerse presente en el momento de efectuar las conexiones del textil inteligente.

Desde el punto de vista del desarrollo de la técnica, muchas son las patentes y los trabajos experimentales que conducen a la producción de hilados con buenas propiedades conductoras, bajo alguna de las tres variaciones de los 3 modelos estructurales anteriormente expuestos, alcanzándose resistencias eléctricas que van desde los 0,2 – 5,0 ohms/metro. [160-164]

### I.3.2.2. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE TEXTILES CONDUCTORES

Tras la revisión del estado de la técnica actual acerca de los hilados conductores, y sus diversas formas de presentación, en apartados anteriores, además de estudiar como las fibras otorgan conductividad a estos hilados, resta exponer, finalmente, las diversas opciones existentes para producir un textil con propiedades conductoras debidas a los hilados que integra en su interior.

Un textil podrá ser considerado conductor siempre que sea conductivo desde el punto de vista eléctrico, independientemente de su grado de conductividad, y del número de líneas de transmisión (hilos conductores) que contenga.

Tal y como se mencionó en el punto [1.1.5.- Textiles inteligentes por la integración de tecnologías: textrónica](#), en el que se realizaba una descripción de un e-textil, en la actualidad, la ingeniera textil ofrece cuatro alternativas para la introducción de hilados conductores en un tejido: mediante tisaje de calada, tejeduría de punto, cosidos o por un proceso de bordado.

#### *1.3.2.2.1. Tejeduría de calada de textiles conductores*

La manera más sencilla de incluir hilados conductores en una tela es mediante el proceso de tejeduría de calada.

Los tejidos de calada son los más corrientes y están contruidos por un conjunto de hilos longitudinales que reciben el nombre de urdimbre, que se entrelazan perpendicularmente con otros hilos transversales que reciben el nombre de trama. A cada uno de los elementos del conjunto que forma la urdimbre recibe el nombre de hilo, y por otro lado, a cada uno de los elementos del conjunto que forma la trama recibe el nombre de pasada.

Los tejidos de calada se obtienen en máquinas de tejer, o telares a la plana. Son diversos los sistemas de tejer actuales, siendo cada uno de ellos sensiblemente diferentes. Sin embargo, en lo que respecta al ámbito de conocimiento objeto de este trabajo cabe significar que la diversas son las variables a estudiar para la introducción de hilados conductores en este tipo de procesos. Y todas ellas han de ser cuidadosamente tratadas en un proceso de adaptación del procedimiento de tejeduría para incorporar el hilo conductor.

Los procesos de tejeduría están siempre altamente optimizados y toda actuación que implique un cambio de las materias primas precisa una reingeniería del proceso y estudiar su viabilidad. Sin embargo se puede afirmar que el conjunto del proceso es ampliamente conocido y es compatible actualmente con la gran mayoría de los diversos hilados conductores existentes, requiriendo únicamente la realización de modificaciones y ajustes que o bien son conocidas por el tejedor, o bien el productor de las fibras facilita: tales como la utilización de ensimajes o modificaciones en elementos del telar como el peine o los prealimentadores, entre otros. En términos generales, la introducción de fibras conductoras puede requerir una menor velocidad de trabajo y, por tanto, menor rendimiento, lo que se traduce en unos mayores costes de producción.

Dependiendo del diseño del tejido conductor, los hilados conductores pueden ser introducidos tanto por trama como por urdimbre para formar mallas conductoras, si fuera necesario. Esto supone una ventaja frente a otros tipos de tejeduría, como se verá más adelante. Sin embargo, si únicamente se requiere la conducción en un único sentido y el diseño del tejido lo permite es recomendable dar preferencia a la inserción de hilados conductores por trama, pues el proceso de tejeduría se simplifica y, por tanto, se reducen costes. Llegados a este punto cabe mencionar que existen diversos métodos para insertar la trama, que tradicionalmente sirven para clasificar los diferentes sistemas de tejeduría de calada. Pues bien, todos ellos difieren en su concepción, por lo que el comportamiento de los hilados conductores también será diferente y también ha de ser estudiado, como el resto de factores.

Los hilos y tramas que componen un tejido de calada se entrelazan siguiendo un orden preestablecido según un diseño previo, que se denomina ligamento [165].

En el diseño de textiles conductores el ligamento más utilizado, siempre que el diseño del propio tejido conductor lo permita, es el tafetán, puesto que su construcción representa la estructura más elemental y simple.

Suele ser la más utilizada puesto que, empíricamente, en

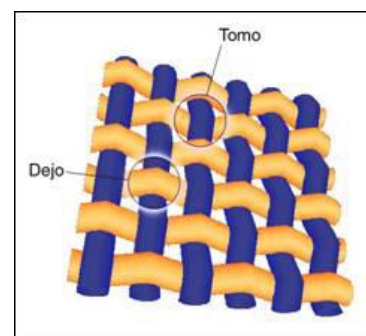


Figura 133: Tejeduría de calada de hilos conductores (azul). Tafetán

este tipo de estructuras no suele producirse desplazamientos laterales de los hilos, conformando por ello la estructura de tejidos más estable de todas.

Evidentemente, los hilados conductores se insertarán, dependiendo del sentido de la conducción que se desee, por trama, por urdimbre, o por ambos (si se desean crear mallas) y utilizando las relaciones de hilos conductores versus hilos no conductores que se deseen para la aplicación a desarrollar (por ejemplo, una relación 3:1 por trama, se interpreta como un hilo de trama conductor por cada 4 pasadas).

Anteriormente ha sido mencionado que el tafetán tiende a ser la estructura de tejidos conductores más utilizada por su estabilidad. Ahora bien, por su tipología dejan al descubierto una gran parte de la superficie de los hilados conductores (el 50%), circunstancia que puede resultar un inconveniente en aquellos tejidos, por su ámbito de utilización (intemperie, rozamientos, etc.) degraden estos hilados. En estos casos (a parte de la búsqueda de la protección mediante otros métodos, como el recubrimiento) la alternativa a considerar es la utilización de ligamentos tales como las sargas o rasos de curso medio, que dejen menos expuesto el hilado conductor. Los inconvenientes de estas configuraciones son, justamente, la menor estabilidad y riesgo de enganchones por el envés del tejido. Es necesario, por tanto la búsqueda de un equilibrio o solución determinada, atendiendo a las necesidades específicas en cada caso, según la funcionalidad y la aplicación.

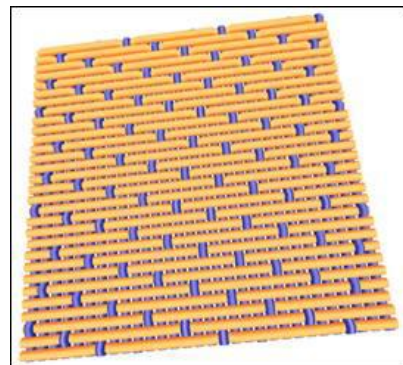


Figura 134: Tejeduría de calada de hilos conductores (azul). Sarga.

#### 1.3.2.2. Tejeduría de punto de textiles conductores

Los tejidos de punto se producen utilizando uno o más hilos que forman series de mallas enlazadas entre sí. Las mallas son bucles de hilo que constituyen las celdas que forman el tejido, y quedan siempre ancladas a otros bucles tejidos anteriormente.

Dependiendo del sistema de alimentación de los hilos utilizado para formar las mallas se distinguen entre: tejidos de punto por trama y tejidos de punto por urdimbre. Estas mallas estarán, por tanto, las unas al lado de las otras. Y se denomina columna al conjunto de mallas que forma sucesivamente una misma aguja en pasadas distintas y encadenadas en sentido vertical.

En las máquinas de punto por trama un mismo hilo alimenta a una misma pasada de mallas. Una propiedad de gran interés para el ámbito de estudio que nos ocupa es el hecho de que hilo sigue siempre la dirección de la pasada:

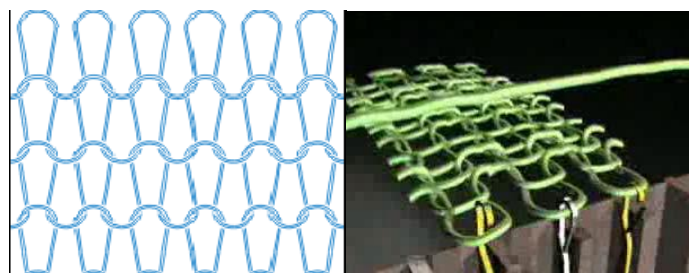
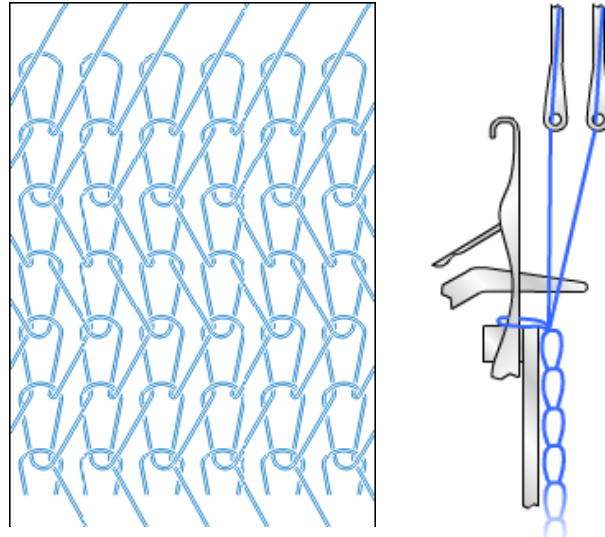


Figura 135: Representación de la tejeduría de punto por trama

Por su parte, en las máquinas de punto por urdimbre cada aguja alimenta un hilo diferente y, en este caso el hilo sigue la dirección de las columnas:



*Figura 136: Representación de la tejeduría de punto por urdimbre*

Como se ha expuesto, la formación del tejido se lleva a cabo porque los hilos forman bucles interconectando unas pasadas con otras (punto por trama) o unas columnas con otras (punto por urdimbre).

Los hilados conductores solamente pueden ser incorporados en estos tejidos en un único sentido: en sentido trama (punto por trama) o urdimbre (punto por urdimbre). Esto se debe al propio proceso que define este tipo de tejidos, pues tienden a formar bucles sobre si mismos en la manera que ha sido expuesta anteriormente.

Este planteamiento de base de la tecnología provoca una limitación evidente en el diseño de tejidos conductores. A pesar de tal circunstancia, no existe limitación en el porcentaje de hilos conductores utilizados, ni en las diferentes variantes estructurales características de este tipo de tejidos.

Sin embargo, los procesos de tejeduría de punto son procedimientos moderadamente más agresivos con los hilos y con sus propiedades mecánicas, de forma que para formar el tejido el hilo se curva de manera muy extrema para producir un bucle muy pronunciado. Esta circunstancia precisa la utilización de hilos muy flexibles, propiedad de la que, por ejemplo, no disponen los hilos metálicos puros o constituidos por altos porcentajes de fibras metálicas.

Comparativamente con los tejidos de calada los llamados tejidos de género de punto son mucho más elásticos, independientemente de las propiedades mecánicas de los hilos utilizados. A un mismo tipo de hilo, los tejidos de punto dispondrán de una mayor elasticidad y grado de recuperación elástica. Y entre los tejidos de punto por trama y

los de urdimbre, tienen a ser más elásticos los primeros, tanto por trama como por urdimbre, aunque las diferencias son más apreciables en sentido trama.

Llegados a este punto es obligado reseñar que esta propiedad, la gran flexibilidad frente a otras soluciones, como se verá más adelante, será fundamental para el desarrollo que es objeto de este trabajo de investigación: un textil sensor de presión.

A esto se le une otra de las ventajas que dispone la tejeduría de punto frente a la de calada, la posibilidad de tejer prendas integrales sin costuras a partir de tejidos tubulares.

#### *1.3.2.2.3. Bordado de textiles conductores (e-broidery)*

El bordado de textiles es un ornamento de hilo realizado con pasadas de aguja, por encima de superficies textiles, generalmente, aunque puede ser aplicado sobre todo soporte flexible, como por ejemplo el papel.

En la industria textil, actualmente el proceso está totalmente automatizado y optimizado, consiguiéndose altos rendimientos. Los bordados se producen de manera industrial mediante máquinas especialmente diseñadas para tal fin, que disponen de múltiples cabezales y agujas. Los bordados se diseñan y administran mediante software, lo cual permite una gran versatilidad y agilidad.



*Figura 137. Bordado de textiles conductores (e-broidery)*

A pesar de que tradicionalmente su función textil ha sido la mera decoración de sustratos, el estado actual de desarrollo de la tecnología permite la utilización de hilados conductores, lo cual abre un amplio potencial para los textiles inteligentes. A este nuevo campo de investigación se le ha llamado e-broidery o e-bordado.

Entre los fabricantes de maquinaria de bordado industrial capaces de realizar e-bordados, destaca ZSK Stickmaschinen GmbH, pues ofrece productos especialmente diseñados para tal fin. [166]

La versatilidad de las máquinas actuales para el diseño libre de los bordados permite la replicación a un soporte enteramente textil de circuitos electrónicos, siendo incluso, por sus propiedades, totalmente comparables a los propios PCB (printed circuit board) convencionales. El e-bordado permite, incluso, el control e integración de hilos con diferentes propiedades eléctricas, por ejemplo, resistencias diferentes. Además, el total control de la altura de la puntada, la variedad de hilados, y combinaciones específicas de hilo y patrón de costuras, sugieren la posibilidad de la sustitución de componentes discretos, tales como condensadores, resistencias, inductores, etc. Ya ha sido posible, por ejemplo fabricar teclados textiles mediante la tecnología de bordado. [167]



A priori no existe limitación en cuanto al rango de hilado conductores que pueden ser utilizados, sin embargo cabe resaltar que son procesos de alta velocidad por lo que los hilos han de disponer de la flexibilidad suficiente para no romper. Por lo que, de nuevo, las propiedades mecánicas de los hilos han de ser equilibradas con las conductoras. Pese a ello, presenta menos problemas de inserción que el resto de procesos expuestos.

Desde el punto de vista de las propiedades del tejido sometido a un e-bordado, tienden a perder flexibilidad y ganar rigidez de manera localizada exclusivamente donde se encuentra el bordado.

#### *1.3.2.2.4. Cosido de hilados conductores.*

Para completar el abanico de posibilidades existentes para la fabricación de tejidos conductores, señalar una última opción a considerar, y que consiste sencillamente en el cosido de hilos conductores para crear líneas de conductividad. De esta manera se formará una traza superficial que se integra perfectamente con el sustrato sobre el que se aplica.

Destacar la sencillez de aplicación como una de las ventajas más evidentes de esta opción, pues, en general, se puede aplicar con maquinaria convencional de coser, con la salvedad ya expresada de requerir de una flexibilidad al hilado. Permite además una gran libertad para la realización de trazados, atravesando, incluso las costuras de las prendas. Es por tanto, el cosido de hilos conductores una posibilidad que no ha de despreciarse en el proceso de ingeniería de un textil inteligente.

#### 1.3.3. Consideraciones finales

En definitiva, existe en el mercado un amplio abanico de hilados conductores, tanto en lo que se refiere a sus capacidades conductoras, como a sus propiedades constitutivas, torsión, finura, cabos, composición etc. La elección del proceso de producción más idóneo y de la materia a utilizar dependerá de la funcionalidad que se desee conseguir y del ámbito de utilización del textil, y será objeto de estudio en cada caso determinar cuál debe ser la elección más adecuada.

Una integración óptima implica la creación de una o varias líneas conductoras fiables en el tejido, las cuales habrán de estar protegidas contra los repetidos ciclos de cambios dimensionales o de abrasión, por ejemplo, que el tejido esté previsto que sufra en el ámbito de utilización al que vaya destinado. Todo ello para asegurar el mantenimiento de la conductividad a largo plazo. También es importante la definición de las recomendaciones de mantenimiento y condiciones de uso del tejido, así como la realización de auditorías preventivas periódicas para la validación de la persistencia de las propiedades conductoras del tejido, si estos van destinados a ámbitos de utilización de riesgo.

Cabe señalar que la resistividad de los hilos varía dependiendo de la tensión a las que están sometidos, siendo, en términos generales, más resistivo cuando no está sometido a tensiones, y más conductor cuando se encuentra integrado en un textil.

En el caso de los textiles conductores para indumentaria, tales como, por ejemplo, camisas, suéteres o pantalones, requieren de propiedades que son determinantes y deben considerarse en el proceso de ingeniería del producto. Propiedades como la elasticidad, la recuperación, tacto o la caída son tan esenciales como la propia conductividad. Por tales razones, las fibras a utilizar deben tener una finura adecuada y telas deben tener un bajo peso por unidad de superficie (por lo general inferior a 300 g/m<sup>2</sup>).

Actualmente, el estado de desarrollo de la tecnología electrónica y de sensorización hace que, en muchas ocasiones, estos requerimientos técnicos textiles, aunque son conocidos, no se tengan en cuenta, y los productos resultantes después de integrar hilos metálicos y dispositivos electrónicos, aunque llegan a ser muy funcionales, hacen inviable el producto desde el punto de vista comercial.

## **II.- Objetivos y Planificación.**



## II.- Objetivos y Planificación.

### II.1.- Objetivos.

Atendiendo al estado del arte realizado, en base a la evolución que han sufrido los textiles inteligentes en la última década, principalmente en lo que respecta al desarrollo de la tecnología por un lado (fuentes de energía, sistemas de comunicación, y aplicaciones digitales y software principalmente), y por otro, los propios materiales textiles, cada vez más funcionales y de más valor añadido, nos encontramos ante una gran oportunidad para que estos textiles puedan ser desarrollados no solo a nivel piloto, sino también a escala industrial y comercial, mucho más cerca del mercado, acompañado también de la mayor demanda, fruto de la propia evolución que está sufriendo el consumidor, cada vez más tecnológico y con mayor necesidad de productos funcionales. Para ello, en base a los desarrollos analizados en este primer capítulo de introducción, la gran mayoría reside en la incorporación e integración de componentes electrónicos dentro de la propia estructura textil, y muchos de éstos son sensores capaces de medir parámetros de entorno como temperatura, humedad, presión, etc. Lo cual no deja de ser una incorporación de productos ya existentes como son los sensores embebidos dentro de una estructura textil, por lo que la tendencia y diferenciación en este sentido se encuentra más en que sea el propio textil el que pueda actuar de sensor, e ir más allá de sola integración de sensores ya comerciales a través de procesos de fijación al textil (como por ejemplo bordado). Es en este punto es donde encontramos el principal valor añadido de estos productos inteligentes y donde además se encuentra el principal reto tecnológico en la actualidad.

En el caso particular de los sensores que midan presión (“piezo”), con un amplio abanico de posibilidades en aplicaciones funcionales y de alto valor añadido, y considerándolo como punto de partida de esta tesis, se ha visto que existen sensores integrados en la propia estructura textil de forma básica y poco diferencial, con muchas limitaciones técnicas y de uso. En este sentido, se encuentran ya hilados y tejidos piezoeléctricos, pero su viabilidad técnica está muy limitada ya que es complicada la integración en estructuras textiles convencionales. Los hilados piezoeléctricos generan una corriente eléctrica cuando se les aplica una presión. Por otro lado, se dificulta también su viabilidad industrial, al ser muy complicada su procesabilidad en la fabricación de hilos y tejidos, y por último, tampoco son viables comercialmente, ya que hay poca disponibilidad y suministro por parte de los proveedores debido al elevado coste de fabricación de los mismos, presentando unos precios elevados, y además, con un rango fibras piezoeléctricas muy limitado.

Por el contrario, como se ha podido comprobar en el estado del arte, las fibras conductoras (susceptibles de otorgar al textil de propiedades piezoresistivas en lugar de las piezoeléctricas) ya se utilizan de manera generalizada en la industria textil y existe una gran variedad de ellas (por ejemplo en aplicaciones donde se requieren propiedades antiestáticas). Y además, los precios son equiparables al de otro tipo de fibras técnicas de uso convencional, siendo por tanto más competitivas. Desde el punto de vista técnico, los hilados piezoresistivos, a diferencia de los piezoeléctricos, no generan una corriente eléctrica cuando se les aplica una presión, sino que actúan

variando su resistividad (aumentando la conductividad) cuando se les aplica un estiramiento. En base a este principio científico-técnico y atendiendo al estado del arte realizado, y la propia experiencia y know-how de la cual se dispone, se define a continuación la hipótesis de partida de este trabajo subdividida a su vez en dos partes relacionadas entre sí pero bien diferenciadas.

#### Hipótesis:

1. Si la variación de resistencia eléctrica de un tejido fabricado con hilo textil conductor con cierta resistencia eléctrica puede variar en función de su deformación por elongación, aplicando para ello una tensión eléctrica a ambos lados de este tejido conductor y un sistema de medida de esta variación de señal eléctrica, y si además, esta variación es capaz de seguir un comportamiento o relación directa entre el nivel de estiramiento del tejido y la variación de resistencia eléctrica, se podría diseñar, desarrollar y optimizar un sensor textil que permita medir el grado de elongación del tejido.

2. Por otro lado, y como consecuencia de la primera hipótesis, si al provocar una deformación por presión en este mismo tejido conductor, con lo cual se está cambiando el grado de elongación en este punto, y si se diseña un tejido con varias bandas conductoras separadas por bandas aislantes, aplicando a su vez una tensión eléctrica y un sistema de medida de la variación de resistencia eléctrica, se podría desarrollar y optimizar un sensor textil capaz de identificar en qué banda se está ejerciendo la presión hasta un nivel de sensibilidad determinada, cuanto mayor sea mejor.

#### Objetivo general:

De esta forma, la investigación llevada a cabo en la presente tesis doctoral supone generar un novedoso conocimiento que permita dar un salto cualitativo en los sensores piezoresistivos, a través del diseño, fabricación y optimización de un sistema compuesto por un tejido que sea utilizado como un sensor de estiramiento y presión y poder, por un lado, relacionar el comportamiento eléctrico en base a la elongación aplicada sobre el mismo, y por otro, en base a esta correlación entre la deformación elástica y la deformación producida al aplicar una presión, el poder detectar la zona donde se está produciendo la misma. Todo ello, bajo la premisa de que sea viable fabricar este sensor desde el punto de vista técnico, industrial y comercial, partiendo para ello de la selección de hilados conductores que dispongan de la suficiente resistencia eléctrica para que puedan ser utilizados como sensores textiles piezoresistivos. Además, debido a que se busca esta correlación entre deformación elástica de un tejido y la variación de resistencia eléctrica, se plantea fabricar un tejido de punto ya que éste presenta un grado de elongación significativamente mayor que un tejido de calada.

De esta forma, el objetivo general que se plantea en esta tesis es el de ***diseñar, desarrollar y optimizar textiles inteligentes sensibles a la deformación tanto por elongación como por presión, que varíen su comportamiento eléctrico fruto de ésta, y así puedan ser utilizados como sensores textiles piezoresistivos.***

En este sentido, son diversas las vías de investigación que pueden llevarse a cabo para desarrollar de manera exitosa textiles inteligentes sensibles a la deformación por elongación y presión. En base a la experiencia y al estado del arte realizado, se acota el trabajo de esta investigación a desarrollar un tejido resistivo eléctricamente capaz de actuar como un sensor piezoresistivo a través del cambio de su resistencia eléctrica fruto de la deformación por elongación y presión, mediante, por un lado, la utilización de hilados resistivos para fabricar tejidos conductores, y por otro, la optimización del banco de medida que permita conseguir captar señales de medida lo suficientemente precisas y sensibles que puedan ser aplicadas en productos inteligentes.

Otro objetivo específico de este sensor textil que se presente desarrollar es que disponga de una alta sensibilidad, lo cual le va conferir un alto valor añadido por un lado y que el salto tecnológico con respecto a las soluciones existentes sea lo suficientemente significativo, por otro. Se pretende que disponga de un alto nivel de sensibilidad que permita al sensor ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones de productos inteligentes. Para ello, va a ser necesario también el diseño y desarrollo de un método de ensayo robusto que permita niveles elevados de sensibilidad, simetría, y repetitividad de las medidas, lo cual va a diferenciar de forma significativa lo que existe actualmente en el mercado.

De esta forma, lo novedoso de esta investigación radica en fabricar un sensor textil piezoresistivo que sea capaz de medir la variación de deformación elástica y de presión de forma robusta y repetitiva. Y que además, sea viable industrialmente. Es por ello que se propone utilizar tecnologías convencionales textiles para la fabricación de estos tejidos.

Para llegar al objetivo último de obtener este sensor, se precisa alcanzar diversos hitos intermedios, que son planteados como objetivos parciales y que han de conducir de manera ordenada a la meta final propuesta, los cuales se detallan a continuación:

1- Por un lado, *Obtener un sistema inteligente formado por tejidos sensibles a la deformación por estiramiento a través de una serie de objetivos específicos:*

- 1.1. Diseñar y desarrollar tejidos de punto formados por hilos textiles conductores que modifiquen su resistividad en función del grado de elongación del tejido.
- 1.2 Definir la estructura del tejido más adecuada que permita parametrizar la relación de la variación de la resistencia eléctrica en función de la deformación elástica del tejido.
- 1.3 Estudiar de forma comparativa la sensibilidad a la deformación elástica en el sentido de las columnas y las filas de estos tejidos.
- 1.4 Estudiar la homogeneidad de las medidas obtenidas de la variación de la tensión eléctrica de un tejido de bandas conductoras y aislantes cuando es sometido a un estiramiento controlado.
- 1.5 Estudiar la simetría de la variación de la tensión eléctrica de un tejido de bandas conductoras y aislantes cuando es sometido a un estiramiento controlado

- 1.6 Establecer y optimizar que esta variación eléctrica es significativa y totalmente reproducible frente a la deformación elástica de forma que pueda actuar como sensor textil.
- 1.7 Diseñar y fabricar un método de ensayo que sea robusto y repetitivo y que permita minimizar al máximo el error fruto de la manipulación de la muestra.
- 1.8 Estudiar la influencia de la deformación plástica del tejido y cómo afecta a la repetitividad de los resultados.
- 1.9 Y diseñar y fabricar un textil inteligente que incorpore el sensor textil desarrollado con una funcionalidad y aplicación concreta.

2- Y por otro, *Obtener un sistema piezoresistivo formado por tejidos sensibles a la deformación por presión a través de los siguientes objetivos específicos:*

- 2.1 Diseñar y desarrollar un tejido de punto por trama conductor de forma que permitan correlacionar la variación de la tensión eléctrica cuando se produce una deformación por presión con medida en dos puntos y la separación de hasta cuatro zonas virtuales.
- 2.2 Diseñar y desarrollar tejidos de punto formados por bandas textiles conductoras que modifiquen su resistividad en función del grado de deformación por presión en cada una de estas bandas.
- 2.3 Estudiar la variación de tensión eléctrica provocado en estas bandas conductoras y diferenciar hasta ocho zonas del tejido independiente e identificar la zona donde se está realizando la deformación por presión en el mismo.
- 2.4 Estudiar la simetría de la variación de la tensión eléctrica de un tejido de bandas conductoras y aislantes cuando es sometido a una presión controlada y estudiar la influencia de la perturbación que produce esta deformación por presión en las zonas cercanas (bandas contiguas y más alejadas).
- 2.5 Establecer y optimizar que esta variación eléctrica es significativa y totalmente reproducible frente a la deformación por presión.
- 2.6 Diseñar y fabricar un sensor textil piezoresistivo que sea robusto y repetitivo y que permita minimizar al máximo el error fruto de la manipulación de la muestra.
- 2.7 Estudiar la influencia de la deformación plástica del tejido en base a la recuperación del tejido a la posición inicial una vez dejamos de aplicar la deformación por presión.
- 2.8 Y por último, estudiar la sensibilidad del sistema piezoresistivo en función del tipo y orden de magnitud de la deformación por presión producida en cada zona.

## **II.2.- Planificación.**

Para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo se han establecido una serie de etapas a desarrollar durante la investigación, la cual se ha dividido principalmente en dos líneas de investigación relacionadas y consecutivas:



Línea de investigación 1: Investigación de un sistema inteligente formado por tejidos sensibles a la deformación por estiramiento. El cual está directamente relacionado con el primero de los objetivos.

Línea de investigación 2: Investigación de un sistema piezoresistivo formado por tejidos sensibles a la deformación por presión. El cual vendrá condicionado en función de los resultados obtenidos en la primera de las líneas de investigación planteadas y está directamente vinculado con el segundo de los objetivos mencionados.

En base a estos dos paquetes de trabajos establecidos, se plantean a continuación las principales fases (F) del trabajo experimental desarrollado así como las tareas (T) de cada una de estas fases.

### **Línea de investigación 1: Tejidos sensibles a la deformación por estiramiento.**

En esta primera línea de investigación se va a llevar a cabo un estudio exhaustivo sobre las variables relacionadas con el comportamiento de los diferentes tejidos conductores, y su relación con la respuesta eléctrica que se produce fruto del estiramiento (elongación) del mismo.

#### **F1: Estudio de la respuesta eléctrica de tejidos inteligentes sometidos a estiramiento.**

Esta primera fase de la tesis doctoral podría considerarse como un conjunto de experiencias previas que van a permitir definir las bases para las posteriores fases, entre otras cosas, permitirá definir el/los tipo(s) de tejido(s) más adecuados para ser utilizados como sensores piezoresistivos.

En base a la tipología de tejidos que se han seleccionado para realizar este primer estudio, las variables que se consideran como hipótesis de partida que podrían influir sobre la variación de la respuesta eléctrica en función del grado de elongación son:

- a) La tipología del hilo.
- b) La estructura del tejido de punto por trama.
- c) Y por último, el sentido donde se aplica la deformación.

Atendiendo a estas variables de estudio planteadas, se puede establecer una correlación directa de esta fase con la consecución de los objetivos específicos referenciados como 1.1., 1.2. y 1.3. En función de estas variables de estudio, se plantean distintas tareas dentro de esta primera fase:

#### ***T1: Sensibilidad a la elongación en el sentido de las filas:***

En esta tarea específica se va a evaluar el comportamiento eléctrico (resistencia eléctrica) en función del tipo de tejido cuando se aplica sobre el mismo un estiramiento horizontal. Se ha utilizado para esta investigación la técnica experimental descrita en

el apartado III.2.3 que hace referencia al banco de pruebas 1 para la medida de la resistencia eléctrica en función del estiramiento que sufre un tejido de punto. En este sentido, principalmente se puede diferenciar la posibilidad de trabajar de forma directa con el tejido conforme lo obtenemos del proceso de fabricación o galga de género de punto por trama que hemos utilizado, o bien por otro lado podemos realizar las medidas cortando el tubo de tejido en el sentido de las columnas obteniéndose en este caso un tejido de punto bidimensional.

*T2: Sensibilidad a la elongación en el sentido de las columnas:*

De igual forma que en la tarea anterior, se va a evaluar el comportamiento eléctrico en función del tipo de tejido de punto de trama para un estiramiento en sentido vertical, es decir, una deformación elástica en el sentido de las columnas, siguiendo los mismos parámetros y variables que se han planteado en la primera tarea.

F2: Diseño de textiles inteligentes como sensores de estiramiento en función de la respuesta eléctrica.

Una vez descritas las bases de la evaluación de la respuesta eléctrica de un tejido inteligente en función del estiramiento, en esta segunda fase se procede a estudiar algunos parámetros que permitan diseñar un sistema de tejido inteligente que ofrezca fiabilidad en la medida y al mismo tiempo, reproducibilidad.

En particular, teniendo en cuenta las limitaciones que se van a encontrar en la primera de las fases, se plantea en ésta mejorarlas a través del desarrollado de un nuevo tejido de género de punto. Así como si es necesario, la mejora del banco de pruebas con la intención de que sean más robustas las medidas realizadas.

En este sentido, se puede decir que esta segunda fase contribuye a la consecución de los objetivos establecidos como 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 y 1.8. Para ello, se plantean tres tareas específicas que contribuyen de forma independiente a los siguientes objetivos: la tarea 3 al objetivo 1.4, la tarea 4 al 1.5 y 1.7, y la tarea 5 a los objetivos 1.6, 1.7 y 1.8. A continuación se describen estas tareas en mayor detalle:

*T3: Estudio de la homogeneidad en las medidas de conducción eléctrica.*

De forma que nos permita en esta tarea comprobar si el tejido conduce de forma uniforme, sin pérdidas o en caso contrario, si se pueden cuantificar y observar cual es el comportamiento de esta disipación de tensión eléctrica, mejorando si es el caso el banco de pruebas, el cual debe ser mucho más robusto. Para ello, se plantearán distintos escenarios con el objeto de conocer este comportamiento vs variables planteadas.

*T4: Estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente al estiramiento.*

A partir de las conclusiones alcanzadas en la fase anterior con respecto a la relación directa sobre el grado de estiramiento de un tejido con la variación de la resistencia eléctrica, y las obtenidas en la tarea anterior, en relación a la homogeneidad de estas medidas, se plantea en esta nueva tarea, determinar la simetría de la respuesta

eléctrica cuando el tejido de punto con conducción se somete a un estiramiento hacia la izquierda y derecha, y de nuevo, en caso de ser necesario, diseñar una variación del banco de ensayos utilizando los resultados preliminares, de forma que nos permita cada vez realizar el estudio de forma más robusta y simétrica.

Se pretende con este análisis observar como varían las propiedades del tejido frente a este estiramiento tanto en un sentido como en otro.

#### *T5: Estudio de la reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente al estiramiento.*

Una vez analizado en la tarea cuatro esta relación de la simetría de la respuesta eléctrica en función del grado de estiramiento de un tejido de punto se plantea en esta nueva tarea estudiar la reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente al estiramiento, siguiendo la misma metodología planteada en cada fase y tarea de ir mejorando en paralelo el tejido y el sistema de medida, que nos permita ir optimizando el tejido e ir ganando precisión en las medidas en función de la repetitividad de éstas y la optimización de los resultados que se vayan obteniendo.

#### F3: Fabricación de un textil inteligente sensible a la deformación por elongación para su utilización como sensor de respiración

Una vez desarrollado y optimizado el textil inteligente capaz de actuar como sensor de estiramiento se plantea en esta nueva fase la integración del mismo en una prenda textil en donde la variación de la deformación elástica presente una funcionalidad específica. Para ello, se plantea integrar este sensor en un body de bebé con el objeto de medir la frecuencia de respiración, lo cual produce un cambio en el volumen abdominal del bebé en función de si se encuentra en una fase de inspiración o expiración, con el propósito de detectar esta variación de la elongación del tejido en cada caso. Esta fase atiende al objetivo específico 1.9, y para su cumplimiento se plantean dos tareas específicas:

#### *T6. Diseño y optimización de la banda textil conductora a integrar en la prenda textil (body de bebé).*

A partir de las conclusiones alcanzadas en la fase anterior, se aplicarán los conocimientos adquiridos con el objeto de diseñar y desarrollar una banda textil conductora que actúe como sensor de deformación elástica que pueda ser integrado en la tarea posterior en un producto y función específica. Para ello, se plantean tres variables experimentales; el porcentaje de hilo conductor a emplear, la longitud que debe tener la banda y el ancho de la misma.

#### *T7. Fabricación del body inteligente incorporando la banda conductora como sensor y los distintos componentes electrónicos para la medida de la respiración.*

Una vez desarrollado el sensor, éste se integrará en el producto final, un body de bebé inteligente capaz de medir la respiración de un bebé durante un tiempo determinado (15 segundos). Para ello, será necesario, además de la integración del sensor, diseñar y desarrollar los distintos componentes que conforman el artículo inteligente; canal de

comunicación de la energía eléctrica (hilos conductores), dispositivo electrónico con el sistema procesador y fuente de alimentación, y las conexiones necesarias, tanto a los extremos del sensor como al sistema electrónico.

### **Línea de investigación 2: Tejidos sensibles a la deformación por presión.**

En esta segunda línea de investigación se plantea realizar un estudio exhaustivo de distintos tejidos de punto que presentan una variación de la conductividad eléctrica en función de su deformación elástica, e incluso llegar a caracterizar y modelizar este comportamiento, por lo que será necesario además estudiar la sensibilidad de estos tejidos a la deformación por presión.

La metodología empleada para este análisis va a ser similar a la empleada en la primera línea, ya que en primer lugar se va a centrar el estudio en evaluar el comportamiento de estos tejidos que permitan de forma selectiva identificar las zonas presionadas, y a continuación se trabajará en la optimización y desarrollo de sistemas más complejos mucho más robustos y reproducibles que permitan identificar presión en diferentes zonas así como a nivel cuantitativo la intensidad de la presión ejercida.

#### **F4: Estudio de la respuesta eléctrica de tejidos inteligentes sometidos a presión.**

Para desarrollar un sistema basado en un tejido elástico y conductor que sea capaz de identificar la zona donde se está realizando una determinada presión debemos de partir de las experiencias realizadas y conclusiones alcanzadas la línea de investigación anterior. Entre ellas, la elección del tejido que presente un mejor comportamiento frente a la variación de resistencia eléctrica así como una mayor sensibilidad al cambio cuando se produce una deformación elástica.

En cuanto al sistema de medida, se debe también plantear un sistema sencillo que se pretende ir optimizando en base a los resultados que se vayan obteniendo. Para cada uno de estos sistemas, se mostrarán las ventajas y limitaciones que ofrecer para ser utilizado como textil inteligente sensible a la presión.

Por este motivo y en relación a los objetivos específicos, en concreto, el objetivo 2.1., se plantea el poder diferenciar hasta cuatro zonas distintas del tejido independientes e identificar la zona donde se está realizado una deformación por presión en el mismo, así como, realizar a nivel cualitativo esta identificación de la zona de presión, e incluso realizar en una primera aproximación el diseño de un sistema que permita cuantificar el nivel de presión que se está ejerciendo en esta zona específica detectada.

Para ello, se plantea una hipótesis de partida y a partir de ésta el escenario óptimo que pueda experimentalmente corroborar esta hipótesis en base a los resultados alcanzados, y a través de la optimización, nueva hipótesis y nuevo escenario, llegaremos al final a cómo debe ser este sensor de presión compuesto por el tejido conductor y el sistema de medida. Las distintas hipótesis y los escenarios se van a ir planteando en las distintas tareas dentro de esta fase como modelos de estudio:

*T8: Modelo 1: Estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.*

En esta tarea se va a desarrollar un primer escenario basado en el sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto, se realizará la previsión de medidas a obtener y su justificación así como los resultados obtenidos y su análisis y discusión. La muestra del tejido de análisis estará compuesta por uno de los tejidos utilizados y optimizados en las fases anteriores, y que mejor se adapte a este sistema sensor en función de su variación de resistividad eléctrica en función de la presión ejercida, la se va a conseguir mediante la colocación de una masa en forma de pesa de una masa determinada. Y además, en el tejido se van definido cuatro zonas diferentes tal y como está planteado.

En este sentido, el número de modelos que se van a desarrollar van a estar en función de los resultados que se vayan obteniendo de forma parcial, y las variables de estudio que se definan. Una de las variables a priori que se considera más relevante dentro del modelo planteado va a ser los puntos de alimentación y medida de la conductividad eléctrica en el sistema desarrollado al respecto.

#### F5: Optimización de textiles inteligentes como sensores de presión.

Tomando los resultados obtenidos no solo en la fase anterior, sino en la primera línea de investigación, se plantea en esta nueva fase, describir y analizar el comportamiento de sistemas piezoeléctricos en base a las directrices y los resultados obtenidos en los puntos anteriores y partiendo del mismo tejido base de punto que se toma de referencia.

Para ello, se pretende utilizar un tejido capaz de diferenciar 8 zonas por deformación por presión en lugar de las hipotéticas 4 zonas que se han utilizado en el punto previo. Además, se pretende que las zonas se encuentren muy bien delimitadas y no existan perturbaciones en los puntos de separación de cada una de ellas. De forma que se busca un sistema piezoresistivo capaz de detectar una deformación por presión lo suficientemente sensible y robusto como para poder repetir un número de veces lo suficientemente representativo, por lo que, va a ser importante también estudiar la repetitividad de las medidas, y en consecuencia, la reproducibilidad. En base a esto, se plantea que el tejido tenga unas bandas muy bien delimitadas, por lo que, debe estar formado por bandas conductoras separadas por bandas aislantes.

De forma, que este banco de pruebas debe ser un sistema sólido que garantice la reproducibilidad y rigurosidad de las medidas que se van a realizar, y que nos permita estudiar una serie de variable, tales como:

- la forma del tejido.
- los puntos de medida.
- los puntos de alimentación.
- los puntos de sujeción.
- la estructura y composición.

Las medidas sobre este sistema se van a realizar con el propósito de estudiar como varía la tensión en los puntos de medida cuando se aplica una cierta presión de forma

controlada en diferentes puntos del tejido, presión que será provocada por una pesa con una masa determinada.

De forma que, las tareas concretas en esta fase son:

*T9: Estudiar la respuesta eléctrica de un sistema sensor de presión en diferentes puntos.*

En esta nueva tarea se va a trabajar en el desarrollo de un sistema reproducible y sólido que nos permita medir de una forma rigurosa, ya no aproximada, la zona donde se realiza una determinada y controlada presión ejercida sobre un tejido, de forma que pueda ser considerado como un sistema piezoeléctrico basado única y exclusivamente en la propiedad conductora que de forma inherente presenta un tejido de punto con distintas bandas conductoras y aislantes consecutivas.

Para ello, se va a utilizar el banco de ensayo optimizado de las fases anteriores, y que en concreto ha sido desarrollado en el estudio de la variación de la resistencia eléctrica en función de la elasticidad, cuyo sistema ha sido validado y optimizado hasta obtener un método de ensayo suficientemente robusto y donde se puede llegar a minimizar al máximo el efecto de deriva que provoca la deformación plástica del tejido, hasta el punto que no llega a ser significativa.

De igual forma, el tejido que se va a utilizar va a ser aquel que mejores resultados haya ofrecido en el estudio de la variación eléctrica en función de la elongación.

En base a esto, la metodología que se va a emplear en esta tarea se va a centrar principalmente en ver como varía la tensión eléctrica en función de una deformación por presión que se ejerce en un punto determinado de cada banda conductora, en base a esto, las variables a analizar son:

- Las medidas de tensión eléctrica en condiciones normales.
- La variación que se produce al aplicar una deformación por presión.
- La tensión eléctrica que se mantiene después de esta variación.
- El tiempo que dura esta variación,
- Y por último, el tiempo en recuperar el valor de tensión después de producir esta deformación.

En base a estas variables de estudio se plantean distintas etapas en función a los distintos escenarios que se van a ir desarrollando.

En concreto esta tarea contribuye a conseguir los objetivos definidos como 2.2 y 2.3.

*T10: Estudiar la influencia de una perturbación sobre zonas cercanas en función respuesta eléctrica de un sistema sensor de presión.*

Al emplearse un sistema sensor compuesto por bandas aislantes y conductoras que están sometidas a una deformación por presión en una de las bandas conductoras, debemos plantearnos también como base de estudio, analizar cómo afecta esta variación de la resistividad eléctrica al resto de zonas conductoras, por ver si existe un efecto perturbación y está variando también en las bandas conductoras contiguas.

Se pretende utilizar el mismo banco de pruebas que en la tarea anterior, pero realizando si se da el caso, las modificaciones oportunas en función de los resultados que se vayan obteniendo.

Para ello, y al igual que en las fases y tareas previas, la metodología planteada se basa en establecer una hipótesis de partida, realizar a continuación la parte experimental de toma medidas, y análisis posterior de los resultados obtenidos y planteamiento de mejoras para definir el siguiente escenario hasta alcanzar los objetivos específicos planteados, los cuales son; 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8.

A modo de resumen, se describe en la siguiente tabla la relación que existe de cada una de las fases y tareas con los objetivos específicos planteados.

*Tabla II.1. Relación de los objetivos específicos con las líneas de investigación, fases y tareas planteadas*

Línea de Investigación	Fase	Tarea	Contribución a los objetivos:
L1	F1	T1	1.1, 1.2 y 1.3
		T2	
	F2	T3	1.4
		T4	1.5 y 1.7
		T5	1.6, 1.7 y 1.8
	F3	T6	1.9
		T7	
L2	F4	T8	2.1
	F5	T9	2.2 y 2.3
		T10	2.4, 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8





### **III.- Experimental.**



### III.- Experimental.

#### III.1.- Materiales.

##### Hilos conductores

El planteamiento de este proyecto, que persigue el desarrollo de un textil inteligente con la capacidad de poder actuar como un sensor piezoresistivo, se fundamenta en el diseño de un tejido inteligente mediante la utilización de fibras conductoras. Por ello, se han seleccionado distintos tipos de hilados conductores con distintas propiedades con el objeto de poder determinar el grado de comportamiento piezoresistivo en base al grado de elasticidad del tejido.

En términos de viabilidad de la investigación, y debido a la gran disponibilidad que existe actualmente en el mercado de hilos conductores, ha sido necesario no acudir a soluciones complejas, sino que se ha buscado basar la investigación en materias primas de fácil acceso y que, si se diera el caso, permitieran facilitar la transferencia de los resultados a las empresas.

Otra de las razones que se han considerado para su elección se debe a que sean hilos conductores mixtos con propiedades conductoras entorno a los  $10^2$  y  $10^5$  ohm/cm<sup>2</sup>, ya que son los que potencialmente son susceptibles de disponer de la propiedad piezoresistiva. Esto es debido principalmente a que se pretende que esta conductividad o resistividad eléctrica cambie en función del grado de elasticidad del tejido, por lo que los hilos seleccionados no podían ser ni buenos conductores ni en el extremo opuesto, antiestáticos, por lo que el rango intermedio es el más óptimo para el estudio. De igual forma, se han seleccionado los dos tipos de posibles hilos conductores en base a su configuración, diferenciando en hilos de mezclas íntimas e hilados de filamento continuo conductor, y de esta forma poder compararlos. En este sentido, los hilos seleccionados han sido tres:

- Hilado 1: Mezcla íntima de fibras 90% algodón /10% acero inoxidable, 50/1c Nm
- Hilado 2: Corespun alma de filamento de plata (10%) recubierto de algodón (90%), 40/2 Nm.
- Hilado 3: Corespun alma de filamento de plata (10%) recubierto de poliéster (90%), 40/2 Nm.

Por lo expuesto anteriormente, se han elegido hilados de las dos tipologías de fabricación más comunes (mezcla íntima y filamento continuo), y a su vez de los filamentos continuos, dos tipos de fibras textiles combinadas con el alma de filamento continuo, una natural y la otra sintética, CO/Acero y PES/Acero respectivamente. Además, éstas son fibras que son muy convencionales en la industria textil, estando presente en la gran mayoría de aplicaciones.

Estos hilos han sido proporcionados por la empresa Encotor.

Podrían haberse seleccionado otras muchas configuraciones de hilados conductores, pero las variables de investigación se hubiesen centrado no tanto en conseguir el sensor textil piezoresistivo sino un enfoque más encaminado a optimizar el tipo de hilo conductor para tejidos conductores eléctricamente.

Estos hilos seleccionados, además de su buena disponibilidad en el mercado a precios competitivos, otra de las características que presentan, es que se pueden procesar desde el punto de vista fabril en los procesos convencionales de tejeduría, tanto plana como de punto, sin apenas adaptaciones en el telar, por lo que pueden ser incorporados sin demasiados problemas en los procesos productivos de fabricación garantizando la viabilidad industrial y comercial del producto resultante.

### Hilos especiales - elastano

Además de los hilos conductores, ha sido necesario en algunos de los desarrollos de tejidos incorporar hilo de elastano de la marca comercial Lycra®, con el objetivo de mejorar las propiedades de elasticidad y recuperación de los tejidos de punto.

El elastano o spandex es una fibra sintética muy conocida por su gran elasticidad. Lycra® es una marca registrada por la empresa Du Pont en 1958 para un tejido hecho con un material sintético con propiedades elásticas del tipo llamado genéricamente spandex o fibras elastoméricas. Sus propiedades más destacadas son su flexibilidad y ligereza. Se trata de un polímero de cadena muy larga, formado por lo menos con un 85% de poliuretano segmentado (Spandex); obteniéndose filamentos continuos que pueden ser multifilamento o monofilamento.

Las características principales del elastano son las siguientes:

- Puede ser estirado hasta un 600% sin que se rompa.
- Se puede estirar gran número de veces y éste volverá a tomar su forma original.
- Ligero, suave, liso y flexible.
- Resistente al sudor, lociones y detergentes.
- No existe problema de electricidad estática

Este hilo ha sido suministrado por la empresa Trademark y su título ha sido de 12 tex.

### Tejidos conductores

A partir de estos hilados conductores se confeccionan tejidos de punto liso con las especificaciones que se enuncian y mediante las llamadas tricotosas rectilíneas, que permiten tejer una prenda entera sin costuras (en forma tubular):

Tabla III.1. Tejidos conductores empleados

REFERENCIA	COMPOSICION (pasadas)	Descripción técnica del tejido
TEJIDO 1	2 x Hilado 1: Mezcla íntima de fibras 90% algodón /10% acero inoxidable	Estos hilos entran de manera alternativa, uno cada vez, repitiéndose esta secuencia a lo largo de todo el tejido, por lo que cada pasada, está formada por un solo hilo distinto tanto al anterior como al posterior, e igual (es el mismo hilo sin haber sido cortado) al de dos pasadas antes y dos pasadas después
TEJIDO 2	1 x Hilado 1: Mezcla íntima de fibras 90% algodón/10% acero inoxidable	El tejido está compuesto por el mismo hilo sin cortar con lo que si se estira del inicio se puede deshacer todo el tejido quedando un ovillo de hilo.
TEJIDO 3	2 x Hilado 2: Corespun alma de filamento de plata, 90% algodón, 10% plata	Estos hilos entran de manera alternativa, uno cada vez, repitiéndose esta secuencia a lo largo de todo el tejido, por lo que cada pasada, está formada por un solo hilo distinto tanto al anterior como al posterior, e igual (es el mismo hilo sin haber sido cortado) al de dos pasadas antes y dos pasadas después.
TEJIDO 4	1 x Hilado 2: Corespun alma de filamento de plata, 90% algodón, 10% plata	El tejido está compuesto por el mismo hilo sin cortar con lo que si se estira del inicio se puede deshacer todo el tejido quedando un ovillo de hilo.
TEJIDO 5	2 x Hilado 3: Corespun alma de filamento de plata, 90% poliéster, 10% plata	Estos hilos entran de manera alternativa, uno cada vez, repitiéndose esta secuencia a lo largo de todo el tejido, por lo que cada pasada, está formada por un solo hilo distinto tanto al anterior como al posterior, e igual (es el mismo hilo sin haber sido cortado).
TEJIDO 6	1 x Hilado 3: Corespun alma de filamento de plata, 90% poliéster, 10% plata	El tejido está compuesto por el mismo hilo sin cortar con lo que si se estira del inicio se puede deshacer todo el tejido quedando un ovillo de hilo.

A partir de los resultados de la parte experimental, y con el fin de conseguir un tejido de punto con mayor elasticidad y a su vez mayor capacidad de recuperación, se fabricaron tejidos de punto por trama con hilos de elastano, en concreto, de Lycra. El diseño de este tejido ha sido el de tejeduría de punto por trama con dos entradas, y alternando bandas aislantes y conductoras eléctricamente. La banda conductora se ha fabricado a partir del hilo de mezcla íntima de algodón 90% y 10% de acero inoxidable, incorporado el elastano en un 10% sobre tejido. Y se alterna con bandas aislantes compuestas por hilos de mezcla íntima algodón e hilos de elastano (10%).

Todos los prototipos de estos tejidos han sido fabricados en los telares circulares que dispone AITEX en sus instalaciones.

### III.2.- Métodos y procedimientos.

En este apartado se describen los procedimientos operativos empleados tanto en la fabricación de hilos y los tejidos como en el diseño y montaje de las diferentes bancadas que se han empleado para realizar la caracterización de las muestras.

### III.2.1.- Fabricación de hilos conductores.

El Acero inoxidable es una aleación de hierro que contiene entre un 0,04 y un 2,25% de carbono al que se le ha añadido una pequeña cantidad de cromo (habitualmente un mínimo de 11%). Las características de este tipo de aceros son:

- Resistencia a la corrosión debida a una delgada película de óxido de cromo que se forma en la superficie del acero.
- Resistencia a la suciedad
- Aspecto brillante.
- Buen comportamiento eléctrico.
- Etc.

La incorporación de acero inoxidable al hilo textil permite su uso como **conductores** de electricidad.

Este tipo de hilado conductor se obtiene básicamente a partir de una mezcla de fibra de algodón con floca de acero inoxidable mediante un proceso de hilatura convencional, teniendo en cuenta, en cada uno de los procesos las dificultades propias de trabajar con acero.



*Figura III1. Etapas de la hilatura convencional.*

A continuación se detallan los procesos seguidos para obtener el hilo mediante hilatura convencional:

▪ **MEZCLADO.**

El primer paso que se debe llevar a cabo, es conseguir un buen mezclado de la fibra de algodón y la floca, para conseguir un hilo con la máxima homogeneidad posible.

▪ **CARDADO.**

El cardado es la etapa en que se obtiene la completa individualización y limpieza de las fibras para finalmente obtener una cinta lo más regular posible.

La operación de cardado la realizan las máquinas denominadas cardas, al tratarse de fibra corta las cardas utilizadas son las *cardas de chapones*.

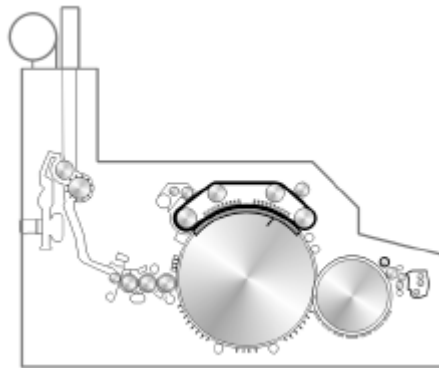


Figura III2: Esquema descriptivo de una carda de chapones

Existen varias etapas a las que ha de someterse la fibra en el proceso de cardado.

En primer lugar, es necesario formar una napa de fibras para alimentar a la carda, las características de la napa de fibras debe ser, grosor constante y gramajes entre 400 y 1200 gr/m. La Napa de fibras se obtiene al pasar las fibras por el **SILO DE ALIMENTACIÓN**, como muestra la figura:



Figura III3. Representación esquemática del silo de alimentación

Una vez obtenida la napa de fibras, esta pasa a través de un cilindro recubierto de guarnición rígida tipo diente de sierra, denominado **CILINDRO ABRIDOR**, cuya misión es la de batir la fibra contra una o dos cuchillas de perfil superior afilado para las impurezas que puedan

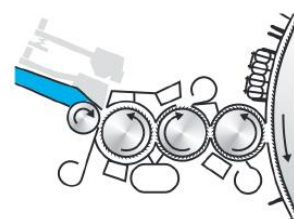
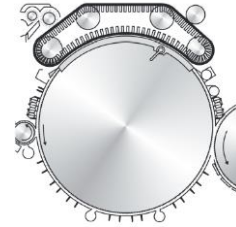


Figura III4. Representación de un cilindro abridor

acompañar a las fibras, así como disgregar al máximo éstas.

Seguidamente se realiza la operación de cardado, mediante un **GRAN TAMBOR (BOTA)**, un cilindro de 1300 mm de diámetro recubierto de guarnición rígida conjuntamente con los **CHAPONES**.

Los chapones son un conjunto de barras, con perfil en forma de T invertida y recubiertos de guarnición del tipo semirrígida acodada.

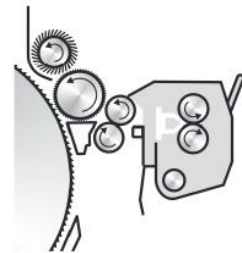


*Figura III5. Representación del gran tambor del cardado*

La velocidad de la bota varía en función del tipo de fibra, al tratarse de fibra cortada de PS/inoxidables la velocidad está entre 200-300 r.p.m.

A continuación se recogen las fibras que lleva la bota, mediante un **CILINDRO PEINADOR**, de forma que las fibras pasan a un mecanismo formador de velos que mediante el giro de cilindros extraen a gran velocidad el velo. Los **MECANISMOS FORMADORES DEL VELO** están constituidos por:

- Cepillo
- Calandras
- Cilindros metálicos
- Cilindro despendedor con guarnición.



*Figura III6. Representación del mecanismo formador de velo*

Finalmente, el velo obtenido pasa a través de un embudo condensador (*centinela* o "*coiler*"), por efecto de dos cilindros absorbedores, convirtiéndose en cinta. A continuación pasa al plegador constituido por dos cilindros estiradores y por un tubo inclinado, que forma parte de la plataforma giratoria, introduciéndose la cinta en un bote rotatorio. La cinta va plegándose describiendo círculos.



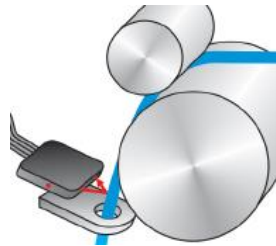
*Figura III7. Fotografía de un embudo condensador*



- **MANUAR.**

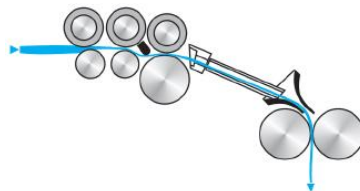
Para mejorar la regularidad de la cinta obtenida en el proceso anterior y obtener cintas con un peso por unidad de longitud lo más regular posible, es necesario realizar operaciones de doblado y posterior estiraje, mediante máquinas destinadas a este fin, que reciben el nombre de manuales.

Para ello, en primer lugar se realiza la alimentación de los manuales con la cinta de los botes obtenidos en el proceso de carda, mediante la **FILETA**, en ella se reúnen de 6 a 8 botes de cintas de carda.



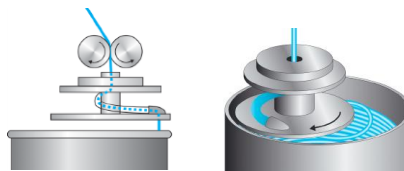
*Figura III8. Representación de una fileta*

Seguidamente la cinta pasa mediante varios cilindros, denominados **TREN DE ESTIRAJE**. Los cilindros inferiores son los motores metálicos y ranurados mientras que los superiores están recubiertos de goma sintética.



*Figura III9. Representación del tren de estiraje*

A la salida del tren estirador hay dos calandras que comprimen la cinta, aumentando la capacidad del bote. La cinta se va plegando en el bote de forma cicloidal.



*Figura III10. Representación de la calandra y el bote de recolección*

- **MECHERA.**

La cinta obtenida en los manuales necesita un proceso de afinado para obtener la mecha, esta es una etapa intermedia entre la cinta y el hilo.



Figura III11. Fotografía de una fileta de alimentación de la mechera

Los botes obtenidos en el manuar se colocan en la **FILETA**, que es la encargada de alimentar la mechera. La fileta está compuesta por cilindros de accionamiento positivo, para que no se produzcan falsos estirados. Cada cinta dispone de paro automático, con la particularidad de que, en la mechera al parar un huso debe parar toda la máquina.

La cinta pasa de forma continua a través de un tren estirador, que adelgaza la cinta al grosor de la mecha deseada. La mechera utiliza trenes de estiraje de 3 ó 4 pares de cilindros, pero, a diferencia de los del manuar, incorpora bandas para controlar las fibras flotantes, situadas habitualmente en la zona del estiraje definitivo.

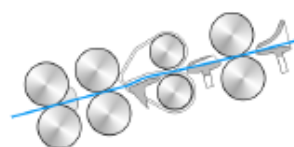


Figura III12. Representación del tren estirador de la mechera

En la mechera la torsión depende de la relación entre el número de vueltas de los husos en un tiempo determinado y la longitud de la mecha producida en el mismo tiempo por el cilindro de entrega del tren estirador.

Para variar el valor de la torsión se actúa modificando la velocidad del tren estirador. Dicha torsión debe ser baja, ya que un exceso de ésta impide el deslizamiento posterior de las fibras en la continua, pero suficiente para impedir el deslizamiento incontrolado de las fibras durante la extracción de la mecha para la alimentación de la continua de hilar.

La mecha, después de pasar por el huso (*aleta*) y haber recibido la torsión, se enrolla sobre el carrete que gira independientemente de la rotación del huso.

La velocidad de plegado es la diferencia de velocidades entre el huso y la bobina. La bobina, además, tiene un movimiento ascendente y descendente para poder plegar la mecha.

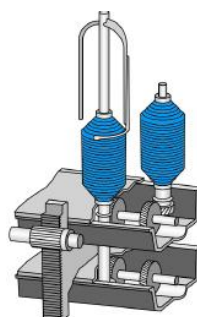
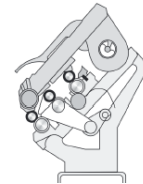


Figura III13. Representación de la bobina de la mecha

### ▪ CONTINUA DE ANILLO.

La última etapa para obtener el hilo es la continua de anillos, en ella la mecha o cinta obtenida en la mechera pasa a través de un FILETA y un TREN DE ESTIRADO, que adelgaza la mecha al grosor del hilo. El tren de estirado está compuesto por:

- 3 cilindros metálicos estriados
- 3 cilindros recubiertos de caucho.
- Brazo de presión
- 2 bolsas (1 superior corta y otra inferior larga)



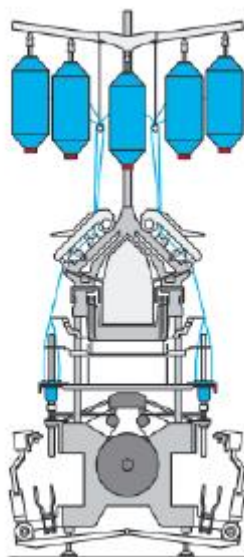
*Figura III14. Tren de estirado e la continua de anillo*

El hilo se enrolla sobre un tubo mediante la acción de los **HUSOS**, debido al movimiento del cursor el hilo adquiere cierta torsión. **El CURSOR** o anillo se mueve por el aro, que le hace de guía, arrastrado por la tensión del hilo provocada por el movimiento del huso. Si el cursor girara a la misma velocidad que lo hace el huso, el hilo no se plegaría, pero como siempre irá retrasado como consecuencia del roce entre cursor y aro y el freno del propio aire, esta diferencia entre ambas velocidades será la que propicia que el hilo se enrolle sobre el soporte.



*Figura III15. Representación del huso en la continua de anillos*

Cada vuelta del cursor provoca una vuelta de torsión en el hilo, pero dado que el cursor no tiene movimiento propio, provoca irregularidades en la torsión, al no girar siempre a la misma velocidad.



*Figura III16. Representación de la continua de anillos*

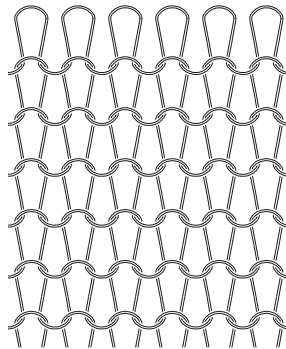
De esta forma se obtiene el hilo conductor de fibra cortada con un porcentaje determinado de acero inoxidable.

### III.2.2.- Fabricación de tejidos conductores.

Los Tejidos de Punto se producen utilizando uno o más hilos que forman series de mallas enlazadas entre sí. Las mallas son bucles de hilo que constituyen las células que forman el tejido, y quedan siempre ancladas a otras tejidas anteriormente.

A partir del hilo conductor, se desarrolla un tejido de punto por trama. La clasificación de los tejidos de punto se hará de acuerdo con el sistema de alimentación empleado al suministrar a las agujas el hilo necesario para formar mallas. En las máquinas de punto por trama con un mismo hilo alimentamos una misma pasada de mallas, mientras que en las máquinas de punto por urdimbre alimentamos cada aguja con un hilo diferente. En este caso, la maquinaria utilizada para desarrollar el tejido conductor ha sido un telar de punto por trama.

En los tejidos de punto por trama o recogida, un mismo hilo alimenta toda una pasada de mallas.



*Figura III17. Representación de la estructura de un tejido de punto*

Las principales características de los tejidos de punto obtenidos por recogida son:

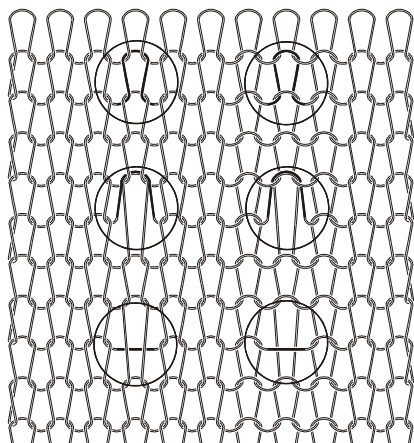
- Un solo hilo alimenta todas las agujas.
- El hilo sigue la dirección de la pasada.
- Las entremallas son horizontales.
- Hay solo tres variantes de malla.
- Los tejidos se desmallan.

La formación de malla es la secuencia de movimientos que necesitan efectuar las agujas para formar mallas. Las mallas se forman haciendo desprender el bucle de hilo que retiene el gancho de una aguja por encima de otro nuevo formado con el hilo recogido por la misma aguja.

Las posibilidades de formación de mallas son:

- Malla de punto. Para obtener una malla la aguja debe efectuar todas las fases del ciclo de formación.

- Malla cargada. Para obtener una malla cargada la malla anteriormente formada deberá permanecer encima de la lengüeta abierta y en esta posición recibir el hilo, éste se acumulará junto a la malla en el gancho de la aguja.



*Figura III18. Representación de la malla cargada*

Para obtener mallas cargadas la aguja ascenderá hasta la posición de media subida, permanecerá en esta posición sin efectuar la fase de máxima subida y en la fase de recogida recibirá el hilo, a partir de aquí completará el resto del ciclo.

- Malla retenida. Para obtener una malla retenida la aguja debe permanecer inmóvil. Para ello no debe efectuar ninguna fase del ciclo de formación. En su gancho está retenida la malla anteriormente formada y el nuevo hilo formará por detrás de la malla una basta característica.

Combinando adecuadamente estas tres posibilidades se obtienen todos los tejidos de punto.

Con respecto a la maquinaria, existen básicamente cuatro tipos de máquinas para fabricar tejidos de punto por trama:

- Tricotosas rectilíneas
- Circulares de gran diámetro
- Circulares de pequeño diámetro
- Telares cotton

Los tejidos de la presente tesis han sido fabricados con circulares de gran diámetro, Estos telares están equipados con agujas de pico fijadas alrededor de una frontura, se alimentan con un solo hilo y para formar las mallas necesitan de la ayuda de unas prensas denominadas mallosas. Este tipo de telares de la tecnología de circulares de gran diámetro, se caracterizan por la obtención de unos tejidos de altísima regularidad y calidad.



*Figura III19. Fotografía de una circular de gran diámetro*

Las máquinas de esta tecnología, como las rectilíneas, están equipadas con agujas de lengüeta. Las agujas están alojadas en sus fonturas y se accionan individualmente. Para formar una pasada de tejido se alimentan todas las agujas con un solo hilo. Esta tecnología se caracteriza por utilizar el movimiento circular para el tisaje, lo que posibilita la introducción de un elevado número de juegos de trabajo alrededor del cilindro de agujas. Cada juego de trabajo teje una pasada en cada vuelta de máquina, y por consiguiente, en una vuelta de máquina se tejen tantas pasadas como juegos tenga la máquina. Las máquinas de mayor diámetro pueden llegar a tejer 96 pasadas por vuelta. Son, por ello, máquinas de gran producción y su mayor inconveniente es tejer en ancho fijo, pues el desperdicio en el corte es elevado. Su producto se utiliza en una amplia gama de sectores, como por ejemplo, prenda interior, tapicería, prenda exterior, tejidos de soporte, imitación de pieles, etc.

Otra de las ventajas, es que permiten incorporar en el tejido distintos tipos de hilos a la vez, incluso hilos especiales, como pueden de ser de elastano, lo cual puede llegar a ser interesante a lo largo de la investigación si en un momento determinado se quiere mejorar la recuperación del tejido.

### III.2.3.- Banco de ensayos para estudio de sensibilidad al estiramiento.

En este apartado se describe el equipamiento utilizado para el ensayo de los materiales anteriormente expuestos, así como los métodos y procedimientos asociados a este equipamiento.

En este sentido, es importante reseñar que no existen métodos estandarizados y normalizados de ensayo, a los que la comunidad científica pueda acogerse en investigaciones como la que nos ocupa.

Es por ello que ha sido necesario desarrollar una metodología ad-hoc, así como una infraestructura de ensayos para realizar las experimentaciones de forma adecuada, y asegurar que éstas son parametrizables y reproducibles en todo momento.

Cabe mencionar que los entornos de investigación que a continuación se detallan surgen de la experiencia de AITEX en esta área de conocimiento, que ha permitido configurar un Laboratorio de Textrónica equipado para la experimentación de investigaciones como la que nos ocupan.

El banco de ensayos, la metodología y procedimientos asociados a él, que a continuación se describen, son los utilizados para alcanzar los objetivos expuestos en la presente tesis, y de esta forma evaluar y caracterizar las muestras desarrolladas. En definitiva, se ha buscado en todo momento cual ha sido el banco de ensayos más idóneo para la medida de tejidos conductores que modifiquen su resistividad eléctrica en función del grado de deformación elástica (elongación).

Por lo expuesto, surge la necesidad de definir un banco de ensayos ideado para el ensayo de tejidos conductores.

Para resolver un primer objetivo planteado, se precisa el estudio del comportamiento de los tejidos conductores cuando estos son sometidos a elongación (estiramiento). La variable a medir, por tanto es la **variación de la respuesta eléctrica que se produce fruto del estiramiento (elongación)**.

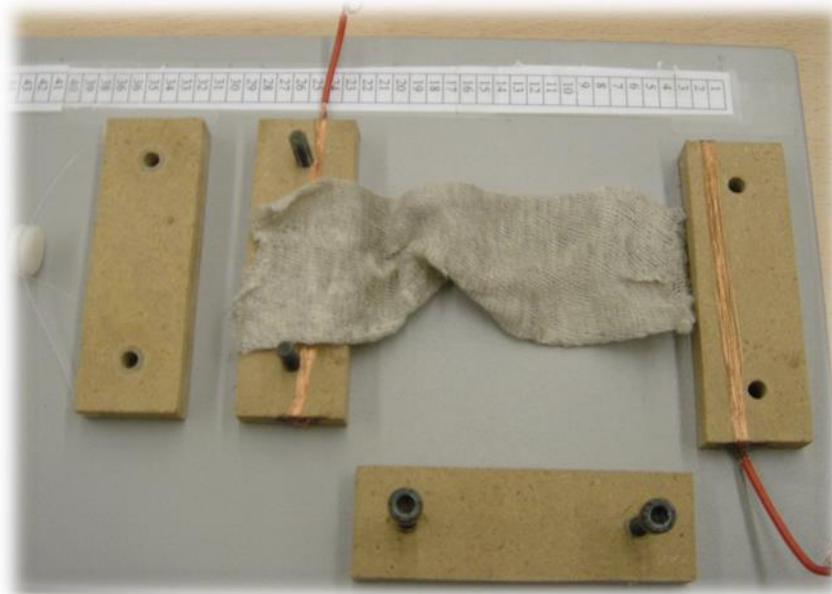
La bancada de ensayo ha sido diseñada, por tanto, para reproducir y controlar la **respuesta eléctrica que se produce sobre estos tejidos en función de la aplicación de una fuerza**.

#### **III.2.3.1. Descripción del primer banco de ensayos para la medida de la variación de la respuesta eléctrica en función de la deformación elástica del tejido.**

Este banco de pruebas está formado principalmente por tres componentes básicos.

Por un lado, un **soporte** que se ha diseñado y fabricado para colocar y sujetar el tejido que va a ser sometido a un estiramiento controlado. Este soporte está formado fundamentalmente por dos pares de piezas de madera que actúan como una especie de pinza de sujeción en los extremos de tejido tubular de género de punto. Estos bloques están representados en la siguiente figura III20.

La principal característica que presentan estas piezas es que los soportes que actúan como fijación del tejido en la parte derecha de esta figura se encuentran anclados a la plataforma de aluminio que actúa como base de todo el sistema de medida. En cambio, los soportes de la parte izquierda son móviles y este segundo conjunto va a ser el encargado de tirar del tejido de punto y producir una elongación de forma controlada.



*Figura III20. Sistema de sujeción del tejido para la medida de la variación de la resistencia*

Como se puede observar en esta figura, para la medida de la distancia de estiramiento que se va a producir sobre el tejido se ha colocado una cinta métrica en el mismo sentido que el sentido de elongación del tejido, y a su vez, en la dirección en la que el soporte móvil se va desplazando hacia la izquierda. Por último, y tal y como se observa en esta figura sobre la superficie superior de las piezas que están en contacto con la plataforma de aluminio se ha dispuesto una lámina de hilos de cobre de aproximadamente 1cm de anchura lo cual nos permite asegurar el contacto con el tejido y un valor de resistencia eléctrica muy por debajo de  $1 \Omega$ , del orden de  $10^{-5} \Omega$ . Estos hilos de cobre están conectados al sistema de alimentación a través cables conductores de electricidad convencionales y al sistema de medida de la resistencia eléctrica, por lo que la función de estos hilos de cobre es doble, por un lado, funcionan como electrodos, y por otro, también dirigen las señales.

Por otro lado, la segunda parte del banco de ensayos está compuesto por un **vaso de precipitados de plástico de 1 litro de capacidad** y que está unido a las piezas de madera móviles que se ha explicado anteriormente a través de un hilo de monofilamento de polipropileno resistente y que ha seleccionado porque se ha comprobado que no va a sufrir ningún cambio de deformación fruto de la fuerza a la que va a ser sometido. En la figura III21 se representa el vaso de precipitados que se ha utilizado en el montaje de este banco de ensayos.





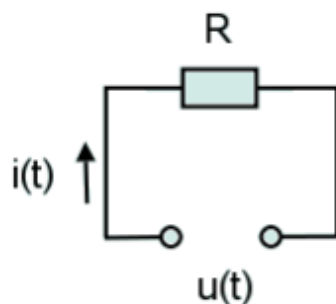
*Figura III21. Vaso de precipitados utilizado para el montaje del banco de ensayos*

En esta figura se puede observar como el vaso de precipitados pende en el vacío a través del hilo de polipropileno en sentido vertical y va a ser el responsable de ejercer las fuerzas de estiramiento sobre los tejidos, que van ir aumentando progresivamente en función de la cantidad de agua que vayamos depositando sobre el vaso. Se va a utilizar también una probeta con la que se calcularán las respectivas cantidades de agua que se irán añadiendo a este vaso de precipitados y que van a provocar el estiramiento de los tejidos.

Finalmente, la última parte del sistema está formado por la fuente de alimentación y un ohmnímetro, la función de los cuales es aplicar la intensidad de corriente que va a atravesar el circuito diseñado y la tensión medible entre sus extremos, relación conocida como ley de Ohm:

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

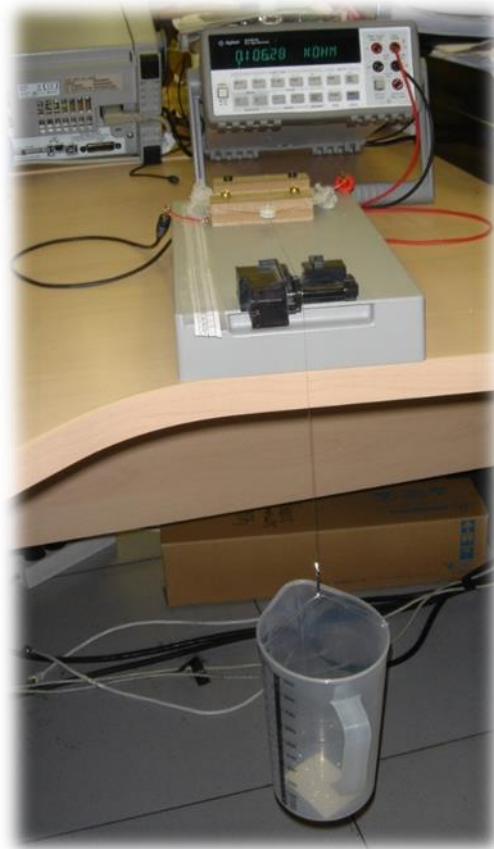
donde  $i(t)$  es la corriente eléctrica que atraviesa la resistencia de valor  $R$  y  $u(t)$  es la diferencia de potencial que se origina. De forma que de forma simple podríamos representar nuestro sistema mediante el dibujo representado en la figura III22.



*Figura III22. Circuito con resistencia*

En el cual la resistencia eléctrica (R) nos va a provocar los tejidos que se van a analizar al impedir el paso de corriente eléctrica.

Con la unión de las tres partes del sistema se conforma el banco de ensayos para la medida de la variación de la resistencia eléctrica en función del grado de elongación que provoca la fuerza que ejerce el vaso de precipitados con agua sobre el propio tejido. En la figura III23 se representa este banco de ensayos.



*Figura III23. Montaje del banco de ensayo de propiedades de sensibilidad de hilados*

En este sentido, el estudio de la variación del comportamiento eléctrico de estos tejidos de punto con respecto al estiramiento de los mismos, se va a centrar en medir la variación de la resistencia eléctrica con respecto a la fuerza de estiramiento que se ejerce sobre éstos a través de este banco de pruebas, y no con respecto a la distancia de recorrido de los tejidos cuando aplicamos estas fuerzas totales.

Para el cálculo de la fuerza de estiramiento que son sometidos los tejidos que se produce al ir incorporando agua al vaso de precipitados se define el siguiente diagrama donde están representadas todas las fuerzas que van a actuar en el sistema.

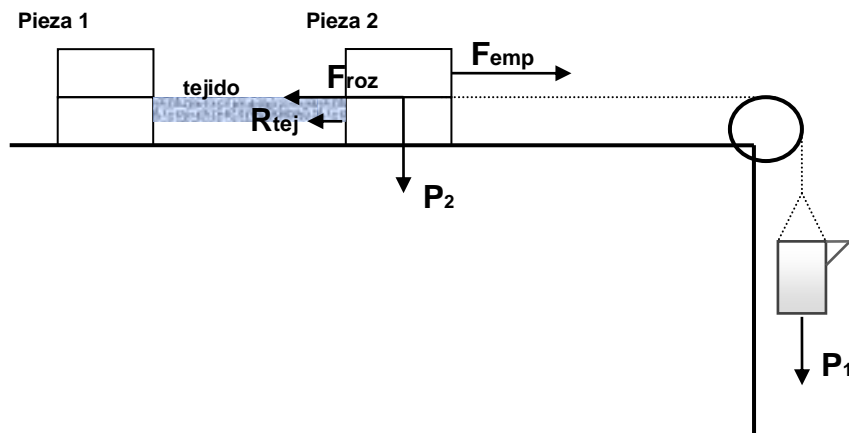


Figura III24. Diagrama de fuerzas responsables del alargamiento de los tejidos en el banco de ensayos.

La fórmula de la fuerza total resultante del movimiento de la pieza 2 responsable de provocar el alargamiento de los tejidos en una superficie plana es la siguiente:

$$F_{\text{total}} = F_{\text{emp}} - F_{\text{roz}} - R_{\text{tej}} \quad (N)$$

Donde,  $F_{\text{emp}}$  es la Fuerza de empuje que es sometida la pieza 2 debido al peso del vaso de precipitados con el agua que estira de la pieza 2 hacia la derecha según se aprecia en la figura III24,  $F_{\text{roz}}$  es la Fuerza de rozamiento dinámico a la que es sometida la pieza 2 en contacto con la superficie de aluminio que se opone al movimiento de la misma, y por último,  $R_{\text{tej}}$  es la resistencia que presenta el tejido al estiramiento.

La Fuerza de empuje es la misma que el peso ( $P_1$ ) que ejerce el vaso de precipitados, con y sin agua, por lo que:

$$F_{\text{emp}} = P_1 = g \cdot M_1 = 9.8 \cdot M_1 \quad (N)$$

Donde,  $g$  es la gravedad que tiene como valor 9.8, aproximadamente constante en toda la superficie de la Tierra, y  $M_1$  es masa total del vaso de precipitados con y sin agua, de forma que;

$$M_1 = M_{\text{vaso precipitados}} + M_{\text{agua añadida}} \quad (kg)$$

y para una densidad del agua de 1kg/l y sabiendo que la  $M_{\text{vaso precipitados}}$  es 0.056 kg,

$$M_1 = 0.056 + V_{\text{agua añadida}} \quad (kg)$$

Por lo que la ecuación resultante del Fuerza de empuje es la siguiente:

$$F_{\text{emp}} = 0.54 + 9.8 \cdot V_{\text{agua añadida}} \quad (N)$$

Por otro lado, la fuerza de rozamiento de un cuerpo, es la fricción que hay entre dos cuerpos, donde ambos se encuentran en movimiento relativo y se deslizan uno sobre otro. La fórmula del rozamiento dinámico es la siguiente:

$$F_{roz} = C_{roz} \cdot N \quad (N)$$

Donde,  $C_{roz}$  es el coeficiente de rozamiento dinámico, el cual depende mayoritariamente del tipo de superficies que entren en contacto y es una constante. En este caso particular de una madera moviéndose a través de una superficie de aluminio este valor es de 0.35. Y  $N$  módulo de la fuerza normal, la cual según la tercera Ley de Newton, se trata de la fuerza perpendicular a la superficie y opuesta al peso ( $P_2$ ), por lo que;

$$N = P_2 = g \cdot M_2 = 9.8 \cdot M_2 \quad (N)$$

Sabiendo que la masa de la pieza 2 es de 0.091 kg, podemos así calcular el valor de la fuerza de rozamiento;  $F_{roz} = 0.31 \text{ N}$

Por último, por lo que respecta a la resistencia que presenta el tejido al estiramiento vamos a considerar que es despreciable frente a los otros dos valores de fuerza, ya que los volúmenes de agua que vamos a incorporar al vaso de precipitados son lo suficientemente grandes como para que el valor de la Fuerza de empuje sea muy superior a esta resistencia, sin llegar al extremo de producir una deformación plástica en el tejido.

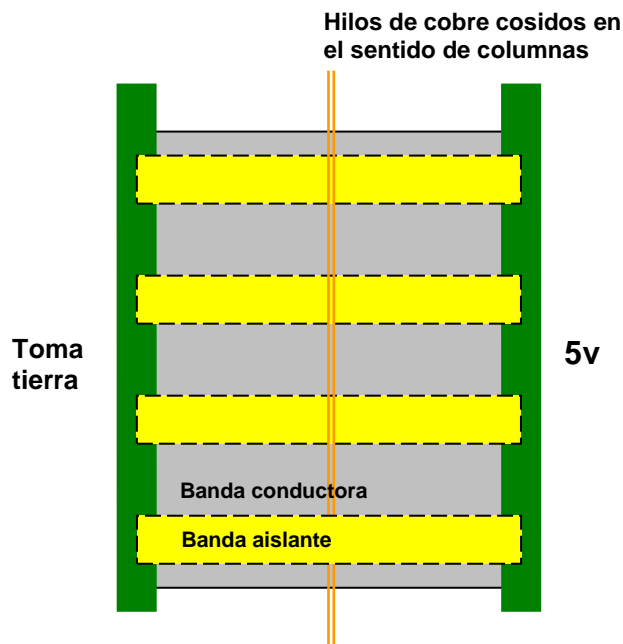
De esta forma, la ecuación va a utilizarse para obtener la Fuerza total queda simplificada a la siguiente:

$$F_{total} = 0.23 + 9.8 \cdot V_{\text{agua añadida}} \quad (N)$$

### **III.2.3.2. Descripción del segundo banco de ensayos para la medida de la variación de la respuesta eléctrica en función de la deformación elástica del tejido.**

Por otra parte y como ya se ha comentado, en lo que respecta al segundo estudio que hace referencia a la optimización de textiles inteligentes como sensores de estiramiento, se ha diseñado y fabricado un segundo banco de ensayos diseñado para realizar el estudio de la homogeneidad de las medidas de conducción eléctrica.

Esta técnica experimental hace referencia al banco de pruebas para la medida de la conductividad eléctrica que se representa mediante la figura III25. Este dispositivo de medida consta principalmente de dos soportes laterales a los cuales se les somete una tensión eléctrica, aplicando un potencial de 5V desde el soporte de la derecha hacia el soporte denominado masa que se encuentra en la izquierda. Estas láminas que se han empleado se han fabricado con una resina epoxi y disponen una banda conductora de cobre sobre cada una de ellas.



*Figura III25. Diagrama del sistema empleado para el estudio y optimización de textiles inteligentes como sensores de estiramiento.*

En primer lugar, existen dos soportes laterales orientado en el sentido perpendicular a las filas del tejido de punto por trama, con una longitud de 40 cm, y se dispone a la base del banco de ensayos que es de aluminio de forma que la banda conductora queda en la parte superior. Sobre estas dos láminas se colocan alienadas láminas más pequeñas de tal forma que la parte conductora de cada una de ellas se encuentra en contacto con las bandas metálicas de los dos soportes principales. Estas láminas quedan ancladas y sujetas mediante tornillos al tejido, de forma que el montaje adopta una estructura de tipo sándwich quedando el tejido completamente fijado sobre las láminas más largas inferiores y las más pequeñas superiores.

Estas piezas están formadas principalmente por 5 tipos diferentes de láminas:

Tipo 1 - Listón lateral. Se va a utilizar como soporte inicial y de sujeción mediante pinza para los laterales del tejido. Tiene una banda conductora que nos permite poder medir todo el lateral del tejido de forma cortocircuitada o bien tener conectado todo un lateral del tejido.

Tipo 2 - Bloque unitario. Mínima pieza de soporte para pinzar el tejido. Consta también de una banda conductora.

Tipo 3 - Bloque unitario conectado. Es una pieza como la anterior, pero el agujero del tornillo está conectado a la banda conductora de manera que a través de él, podemos medir y conectar señales.

Tipo 4 - Bloque doble: Es una pieza como el bloque unitario pero en vez de pinzar con un tornillo lo hace con dos.

Tipo 5 - Bloque doble conectado: Es como el bloque unitario conectado pero pinzando con dos tornillos.

En la siguiente figura III26 están representadas estas láminas que se han utilizado para desarrollar el montaje. En esta figura se ha asignado a cada tipo de lámina un número para la fácil identificación. De igual forma, en la figura III27 se ha realizado una fotografía a estas láminas.

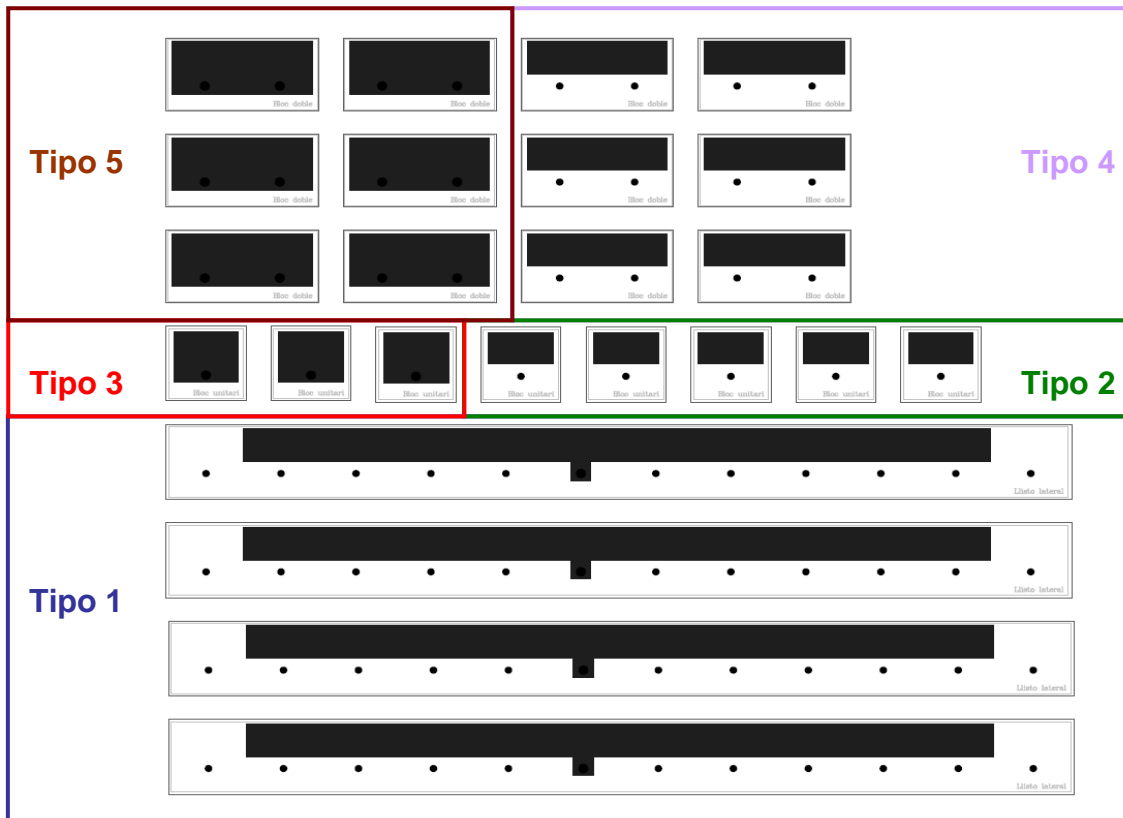
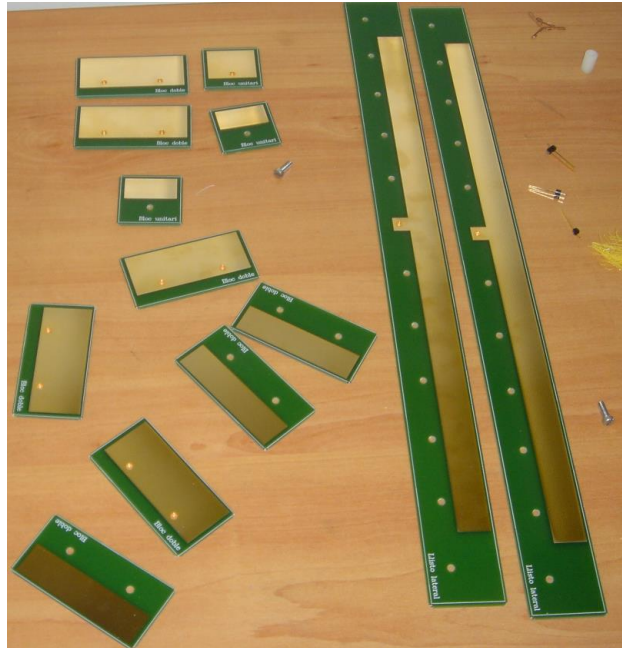


Figura III26. Láminas utilizadas en el banco de ensayos para el estudio de la sensibilidad a la deformación de tejidos de punto.



*Figura III27. Fotografía de las láminas utilizadas en el banco de ensayos para el estudio de la sensibilidad a la deformación de tejidos de punto.*

A partir de estas láminas se realiza el montaje del banco de pruebas para la toma de medidas representado según la siguiente fotografía que se muestra en la figura III28.



*Figura III28. Fotografía del banco de ensayos para el estudio de la sensibilidad a la presión de tejidos de punto.*

Tal y como se ha descrito este banco de pruebas el fundamento del mismo ha sido el ser un sistema sólido que permita garantizar la reproducibilidad y rigurosidad de las medidas que se van a realizar.

Con esta disposición las bandas aislantes y conductoras del tejido quedan dispuestas de forma perpendicular a estos soportes como se puede observar en el diagrama representado en la figura III25. Las láminas centrales presentan movilidad de desplazamiento hacia ambos lados, la de la derecha hacia la derecha y la de la izquierda hacia la izquierda, de forma que se puede producir el efecto de estiramiento.

Como se ha comentado, el tejido queda fijado al soporte y láminas laterales que son fijas, así como quedan también ancladas al tejido a través de las láminas centrales que son las móviles. En base a esto, nos permite estirar la parte del tejido de la parte izquierda y de igual forma la parte derecha y tomar las medidas pertinentes en cada una de estas situaciones, y así analizar como varía la tensión en el punto de medida. Con objeto de producir el estiramiento de las láminas laterales de forma uniforme y constante, incluso poder definir la fuerza de estiramiento producido, a este sistema se incorpora un dinamómetro que a través de un hilo monofilamento de alta tenacidad permite ir produciendo de forma constante el estiramiento.

### III.2.3.3. Descripción del tercer banco de ensayos para el diseño de un textil inteligente sensible a la deformación por elongación

En este nuevo banco de ensayo, se ha diseñado con objeto de medir la variación de resistencia eléctrica que se produce sobre una banda textil conductora, y poder cuantificar el nivel de caída de tensión eléctrica que se produce para determinar el nivel de sensibilidad de esta banda. En la figura III29 se muestra este banco de ensayos en dos posiciones concretas. Por un lado, la fotografía de la izquierda representa el sistema en posición cerrada, es decir, cuando el tejido no está sujeto a ningún estiramiento, y la de la derecha, representa la posición abierta o después de someter el tejido a un estiramiento concreto.

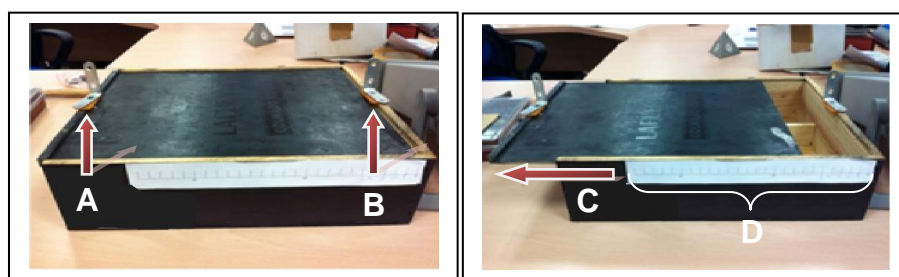


Figura III29. Fotografía del banco de ensayos para el diseño de una banda textil inteligente.

En este nuevo banco de ensayos representamos varios puntos a tener en cuenta:

- Punto A y B (fotografía de la izquierda); representa los puntos de anclaje del tejido o banda textil al banco de ensayos.
- Punto C (fotografía de la derecha); representa el movimiento de apertura del banco de ensayos, el cual, al igual que en banco de ensayos anterior con objeto de que éste sea constante se realiza con un dinamómetro conectado a través de un hilo monofilamento. Además este sistema es capaz de regular la



- fuerza que ejerce sobre el sistema de apertura, la fuerza de estiramiento, la cual va a depender de los resultados obtenidos en las primeras pruebas.
- Punto D (fotografía de la derecha); se ha incorporado una regla de medida con objeto de determinar y cuantificar el grado de estiramiento que se produce sobre el tejido.

#### III.2.4.- Banco de ensayos para estudio de sensibilidad a la presión.

Para el estudio de la sensibilidad a la presión de los tejidos para los que se han determinado un comportamiento de la variación de la conductividad eléctrica en función de la elongación del tejido se han desarrollado de forma sucesiva diferentes bancos de ensayos que se muestran en este apartado de la presente tesis doctoral. Se detalla a su vez la evolución de este banco de ensayos en función de los resultados que se vayan obteniendo con el objeto de optimizar y mejorar los resultados conforme el banco de ensayo se va modificando hacia un sistema más robusto y mucho más reproducible.

El primer banco de ensayo con el que se ha trabajado en esta investigación está compuesto por un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto. Se ha fabricado un marco cuadrado de 10x10 cm de material placa donde se fija el tejido de punto en cada uno de los lados de este marco quedando completamente uniforme y estirado para poder provocar la presión sobre él. Se estira de forma que adopte la forma más simétrica posible así como la distribución resistiva lo más uniforme. Este soporte donde se sujeta el tejido está compuesto por un material aislante, concretamente de sílice, para no interferir en las medidas de conductividad eléctrica, así como para darle la rigidez suficiente como para que no ceda el tejido en los laterales en el momento de aplicar una presión en un punto determinado del tejido.

Paralelamente, el sistema está conectado a un conductímetro que proporciona la medida constante de tensión eléctrica del tejido en diferentes puntos que se van a definir en la metodología de investigación que se plantea en el siguiente apartado de resultados y discusión, de forma que lo más importante a resaltar es que los dos conectores no están fijados a la estructura para poder ir variando los puntos de conexión. En la figura III30 se muestra una fotografía de este primer banco de ensayos donde se definen las cuatro zonas virtuales que se pretenden diferenciar en función de donde provocamos la presión sobre el tejido y que vienen determinadas por los puntos de conexión de los cables del conductímetro.



*Figura III30. Fotografía del banco de ensayos de diagonales cruzadas para el estudio de la sensibilidad a la presión de tejidos de punto.*

En base a los resultados que se obtienen del montaje del banco de ensayos anterior se orienta la investigación a la obtención de un sistema mucho más reproducible y sólido que nos permita medir de forma rigurosa el punto donde se realiza una determinada y controlada presión que se ejerce sobre un tejido, de forma que pueda ser considerado como un sistema piezoeléctrico basado única y exclusivamente en la propiedad conductora del tejido.

Por otro lado, también se utiliza para el estudio de la deformación por presión el mismo banco de ensayo representados en las figuras III25, III26, III27, y III28. A diferencia que ahora al no haber estiramiento del tejido, al producirse la deformación por la presión que ejerce las pesas, las láminas centrales son fijas, no se desplazan a los lados.

### **III.3.- Técnicas experimentales.**

Para poder efectuar lecturas de la elongación instantánea del tejido, se necesita alimentarlo eléctricamente y tomar medidas sobre él desde el punto de variación de resistencia eléctrica para después tratar estos resultados y evaluar comportamientos que nos permita extraer las conclusiones pertinentes.

Como ya se ha explicado, el tejido presenta unas propiedades conductoras y además presenta una cierta resistividad eléctrica, con lo que se puede modelar como una resistencia variable que va cambiando de valor en función de su deformación. Por ello es necesaria una fuente que alimente la franja de tejido conductor a medir, con una corriente constante, para después poder leer la tensión instantánea que cae en este tejido.

Para excitar el tejido, se usa un operacional que tiene la particularidad de poder sacar suficiente corriente a la salida. Se trata del modelo TS924 de ST, que permite donar corriente a pesar de que la impedancia de la etapa siguiente sea baja. El potenciómetro digital es el modelo AD5242 de ANALOG DEVICES. Su valor máximo de impedancia es  $1M\Omega$ , que es el valor máximo que hay en el mercado para estos dispositivos.

Señalar que, a pesar de que excede de los objetivos del presente trabajo experimental, para la adaptación del banco de ensayos, se tuvo que calcular la impedancia máxima que se puede presentar en el tejido, para que el producto de corriente e impedancia máxima no supere en ningún caso el margen dinámico de los operacionales que alimentan el sistema. Sin embargo, por otro lado, es de interés que el margen dinámico sea lo mayor posible, con tal de tener la máxima resolución en las medidas. Se ha de pensar que no es un proceso trivial ya que la impedancia del tejido se ve afectada por otros parámetros, como la temperatura y la humedad, por lo que es importante trabajar siempre en las mismas condiciones de laboratorio ( $20^{\circ}C$  y 50% de humedad relativa). Los ajustes se realizaron para que la tensión del tejido oscilara entre 5 a 0 voltios, intervalo en el cual la señal es representativa durante el estiramiento del tejido.

Por otro lado, el firmware del banco de ensayos está programado por técnicos de AITEX con un lenguaje de programación y dispone de una configuración de librerías (Control SIO, Control bus SPI, Control bus I2C, Control Display gráfico 128x64, Control touch panel, Control bus externo, Control ADCs) que permiten una gran flexibilidad para adecuarse a cada uno de los proyectos que se evalúan. De hecho se tiene creado una gran cantidad de firmware específico para cada dispositivo. En este sentido, el firmware fue acondicionado para el desarrollo de este proyecto.

Y por último, el software que hace referencia a la aplicación que hace un tratamiento y gestión de las medidas de las muestras de los tejidos evaluados. La aplicación está desarrollada en Visual Basic y, en la tipología de proyectos como el que nos ocupa, básicamente se encarga de mostrar en forma de gráfica la evolución de la medida del tejido a nivel temporal.



## **IV.- Resultados y Discusión.**



## **IV.- Resultados y Discusión.**

### **IV.1.- Tejidos sensibles a la deformación por estiramiento.**

#### IV.1.1.- Estudio de la respuesta eléctrica de tejidos inteligentes sometidos a estiramiento.

En este apartado se va a llevar a cabo un estudio exhaustivo sobre los resultados relacionados con el comportamiento de los diferentes tejidos, descritos en la tabla III1 del apartado anterior, en relación a la respuesta eléctrica que se produce fruto del estiramiento (elongación). Este primer apartado de resultados y discusión de la tesis doctoral podría considerarse como un conjunto de experiencias previas que van a permitir definir las bases para posteriores investigaciones y que se comentarán en los próximos subapartados; entre otras cosas, permitirá definir el/los tipo(s) de tejido(s) más adecuados para ser utilizados como sensores piezoresistivos.

En base a la tipología de tejidos que se han seleccionado para realizar este primer estudio las variables que se consideran como hipótesis de partida que podrían influir sobre la variación de la respuesta eléctrica en función del grado de elongación son:

- a) La tipología del hilo; se han seleccionado para ello dos tipos de hilos distintos, por un lado un hilo de fibra cortada conductora y por otro un hilo conductor de core-spun donde el alma es el filamento continuo conductor.
- b) La estructura del tejido de punto por trama; para ello se han definido dos tipos de tejidos de punto, uno de ellos con una sola entrada, siempre es el mismo hilo en cada pasada, y otra de dos entradas, bien sea de forma alternada o bien de forma simultánea.
- c) Por último, el sentido donde se aplica la deformación, diferenciando las dos posibilidades existentes, en el sentido de las columnas o en el de las filas.

Una de las primeras experiencias previas para estudiar la variación de resistencia eléctrica en función de la deformación elástica de una serie de tejidos de punto, ha sido evaluar en que rangos de valores de fuerza de estiramiento nos tenemos que mover para que nos permita estudiar este comportamiento eléctrico. Para ello, y utilizando el banco de ensayos 1, se ha ido vertiendo con la probeta sucesivas cantidades de agua al vaso de precipitados comprendidas entre 10 ml y 1000ml en distintos niveles de escalado, lo cual ha ido provocando el alargamiento de cada tejido analizado en el banco de pruebas. En concreto se ha probado para los tejidos referenciados como 1, 2 y 3, y se ha observado cómo ha ido variando la resistencia eléctrica en este intervalo.

Los resultados obtenidos no se consideran relevantes para incorporarlos en la presente tesis, ya que se trata de una experiencia previa de campo, pero básicamente la principal conclusión al respecto es que entre 0 y 150 ml existen variaciones de resistencia eléctrica significativas, y a partir de 200 ml la tendencia es a mantenerse

constante. De esta forma se han seleccionado como los volúmenes de agua más indicados para realizar los estudios posteriores los siguientes: 0, 25, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 ml de agua. El procedimiento establecido ha sido el de ir añadiendo con la probeta las cantidades de agua pertinentes para conseguir estos volúmenes totales de agua en el vaso de precipitados.

En base a estos volúmenes de agua, y al despejar la variable  $V_{\text{agua añadida}}$ , en litros, en la ecuación que calcula la Fuerza total de estiramiento que se realiza en cualquiera de los tejidos objeto de estudio obtenemos los siguientes valores de Fuerza; 0.23, 0.47, 0.72, 1.21, 1.70, 2.19, 2.68, y 3.17 N, respectivamente.

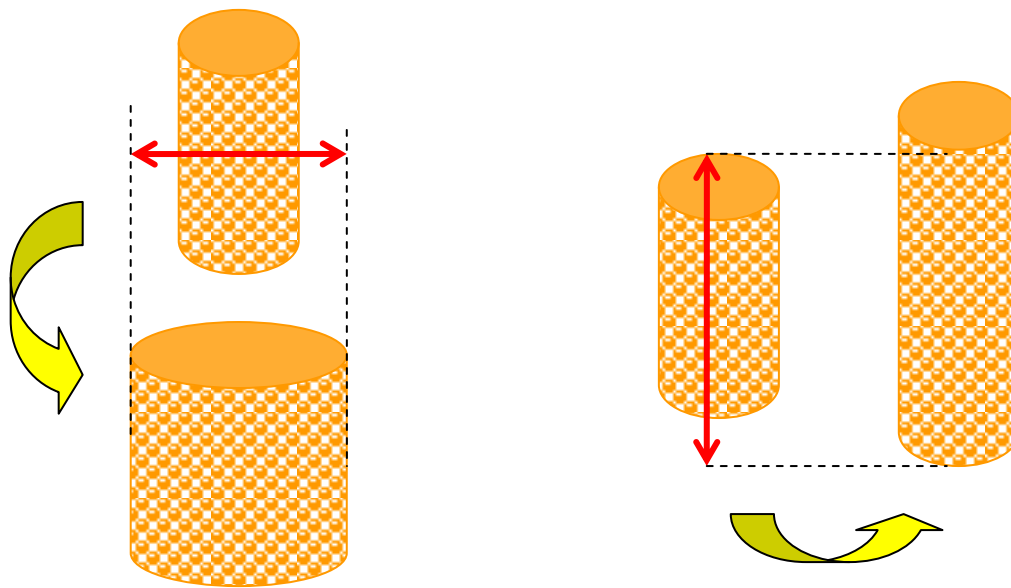
Por otro lado, es también importante resaltar que para determinar este intervalo de estudio se ha hecho una aproximación empírica de los valores de elasticidad máximos permitidos por los tejidos, concretamente para los tejidos de punto por trama en forma tubular referenciados como 1 y 2. Estos valores máximos de elasticidad al aplicar un estiramiento manual se encuentran cerca del 50% en el sentido de las filas, por lo que se ha establecido como la fuerza de estiramiento máxima a aplicar según el método de ensayo en poco más de 3N, y se ha comprobado que se obtiene una elasticidad cercana al 25%. Este criterio donde la deformación elástica máxima del método de análisis se encuentra muy distante de la máxima permitida desde el punto de vista físico, se ha tomado para intentar no provocar en el tejido una deformación plástica que perjudique la reproducibilidad de las medidas, ya que si nos movemos cerca de la máxima elongación permitida por un tejido es más probable que provoquemos una deformación plástica en el propio tejido.

#### IV.1.1.1- SENSIBILIDAD A LA ELONGACIÓN EN EL SENTIDO DE LAS FILAS.

En este apartado se evalúa el comportamiento eléctrico (resistencia eléctrica) en función del tipo de tejido cuando se aplica sobre el mismo un estiramiento horizontal. Se ha utilizado para esta investigación la técnica experimental descrita en el apartado III.2.3 que hace referencia al banco de pruebas 1 para la medida de la resistencia eléctrica en función del estiramiento que sufre un tejido de punto.

Para poder evaluar la variación del valor de resistencia eléctrica en función de la elongación del tejido se han determinado diferentes tipos de medidas en función del sentido de estiramiento en el que se aplica esta elongación sobre el propio tejido, debido a que por la disposición y estructura de los hilos en el tejido de punto el grado de elongación no es igual en un sentido que en otro. Si partimos del tejido en forma tubular que se obtiene mediante el proceso de fabricación de tejeduría de punto por trama empleado se demuestra que la elongación en sentido del eje transversal al tubo, o lo que es lo mismo en sentido de las filas, es mucho mayor que en la misma dirección del eje concéntrico a este tubo al aplicarse una misma tensión en ambos sentidos, o lo que equivale a decir en sentido de las columnas. Esta mayor elongación se representa en la siguiente figura IV1, y a nivel cuantitativo se ha estimado que en el sentido horizontal, filas, esta elongación es 5 veces mayor que en el sentido vertical, columnas, en concreto para este tipo de tejido. Es importante también comentar que los límites del grado de elongación se ha definido en el punto para el cual el tejido es capaz de recuperar el estado inicial una vez se deja de realizar la fuerza de deformación del mismo.



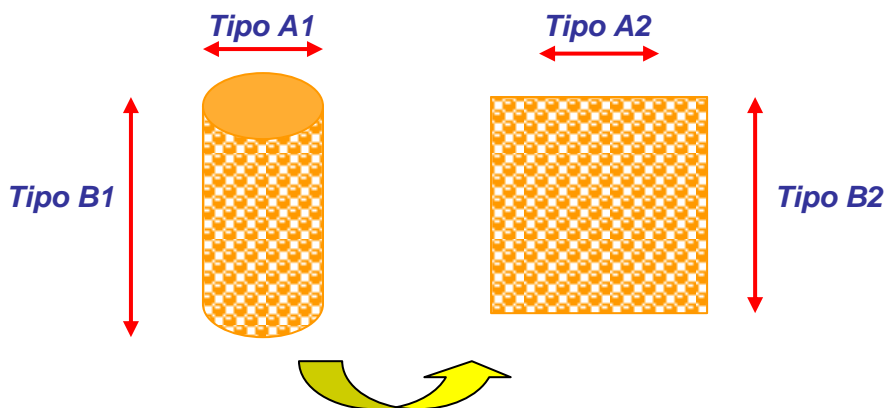


*Elongación sentido de filas (Tipo A)*

*Elongación sentido columnas (Tipo B)*

*Figura IV1. Grado de elongación de un tejido de punto en dirección filas y columnas después de aplicar una misma fuerza de estiramiento sobre ambos. Este primer tejido se referencia como tejido con una elongación producida en sentido filas, y el segundo en sentido columnas.*

Por otra parte, otra de las variables del presente estudio lo encontramos en la propia manipulación del tejido. En este sentido, principalmente se puede diferenciar la posibilidad de trabajar de forma directa con el tejido conforme lo obtenemos del proceso de fabricación o galga de género de punto por trama que hemos utilizado, o bien por otro lado podemos realizar las medidas cortando el tubo de tejido en el sentido de las columnas obteniéndose en este caso un tejido de punto bidimensional (ver figura IV2).



*Figura IV2. Representación del corte que se le realiza al tejido y que nos va a permitir diferenciar entre el comportamiento cortado y sin cortar.*

En el presente apartado, tan solo se va a estudiar la variación de la resistencia eléctrica cuando la elongación en el tejido se produce en el sentido de las filas. De esta forma las fases que se han llevado a cabo son las siguientes:

Fase 1 -.Medida de la resistencia eléctrica en cada uno de los tejidos (de 1 a 6) cortado y provocando una elongación en el sentido de la filas (Tipo A2 según Figura IV2). Para cada uno de los tejidos se realizan tres mediciones completas. El método de ensayo establecido ha sido el siguiente: se toma en primer lugar la medida inicial de resistencia eléctrica, a continuación se va incorporando con la probeta los sucesivos volúmenes de agua ya definidos, y se van tomando las medidas después de cada estiramiento del tejido. Una vez finalizado con el último volumen y tomada la última medida, se vacía el vaso de precipitados, de forma que el tejido regresa a su posición inicial, y se vuelve a repetir el proceso hasta un total de tres ensayos para cada tejido.

Fase 2 - Medida de la resistencia eléctrica en cada uno de los tejidos (de 1 a 6) sin cortar y provocando una elongación en el sentido de las filas (Tipo A1 según Figura IV2), siguiendo el mismo método de ensayo definido en la fase anterior.

Fase 3 – Para el estudio de la reproducibilidad, se ha tomado como referencia las tres mediciones del valor resistivo para cada uno de los tejidos cortados (fase 1) y provocando una elongación en este sentido.

Las tablas IV1, IV2, IV3, IV4, IV5 y IV6 que encontramos a partir de la siguiente página muestran los resultados obtenidos para cada uno de los 6 tejidos (de 1 a 6 de forma respectiva) y diferenciando las tres fases que ya se han mencionado.

Tabla IV1. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 1 y para cada una de las fases propuestas.

**Fase 1 - Tejido 1 (cortado – Tipo A2)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	645	632	592	<b>623</b>	27.6
25	0.47	405	390	351	<b>382</b>	27.9
50	0.72	360	341	289	<b>330</b>	36.8
100	1.21	270	260	250	<b>260</b>	10.0
150	1.70	242	235	216	<b>231</b>	13.5
200	2.19	230	225	205	<b>220</b>	13.2
250	2.68	210	215	217	<b>214</b>	3.6
300	3.17	210	212	208	<b>210</b>	2.0

**Fase 2 - Tejido 1 (sin cortar – Tipo A1)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	97	81	92	<b>90</b>	8.2
25	0.47	91	80	90	<b>87</b>	6.1
50	0.72	80	75	79	<b>78</b>	2.6
100	1.21	70	70	73	<b>71</b>	1.7
150	1.70	68	65	68	<b>67</b>	1.7
200	2.19	65	63	61	<b>63</b>	2.0
250	2.68	63	59	58	<b>60</b>	2.6
300	3.17	60	56	58	<b>58</b>	2.0

**Fase 3 - Tejido 1 (cortado – Tipo A2)**

Para este estudio se van a tomar los resultados obtenidos directamente de cada una de las tres medidas de resistencia eléctrica que aparecen en la Fase 1.

Tabla IV2. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 2 y para cada una de las fases propuestas.

**Fase 1 - Tejido 2 (cortado – Tipo A2)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	535	530	495	<b>520</b>	21,8
25	0.47	414	405	387	<b>402</b>	13,7
50	0.72	395	360	352	<b>369</b>	22,9
100	1.21	315	288	267	<b>290</b>	24,1
150	1.70	265	265	250	<b>260</b>	8,7
200	2.19	240	240	219	<b>233</b>	12,1
250	2.68	220	210	203	<b>211</b>	8,5
300	3.17	215	210	205	<b>210</b>	5,0

**Fase 2 - Tejido 2 (sin cortar – Tipo A1)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	107	114	112	<b>111</b>	3.6
25	0.47	92	101	95	<b>96</b>	4.6
50	0.72	80	85	87	<b>84</b>	3.6
100	1.21	71	77	83	<b>77</b>	6.0
150	1.70	65	67	75	<b>69</b>	5.3
200	2.19	64	63	68	<b>65</b>	2.6
250	2.68	62	60	64	<b>62</b>	2.0
300	3.17	61	61	64	<b>62</b>	1.7

**Fase 3 - Tejido 2 (cortado – Tipo A2)**

Para este estudio se van a tomar los resultados obtenidos directamente de cada una de las tres medidas de resistencia eléctrica que aparecen en la fase 1.

Tabla IV3. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 3 y para la primera fase.

<b>Fase 1 - Tejido 3 (cortado)</b>						
Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	180	130	71	<b>127</b>	54,6
25	0.47	76	40	40	<b>52</b>	20,8
50	0.72	70	55	79	<b>68</b>	12,1
100	1.21	65	64	72	<b>67</b>	4,4
150	1.70	55	50	69	<b>58</b>	9,8
200	2.19	53	56	47	<b>52</b>	4,6
250	2.68	55	40	70	<b>55</b>	15,0
300	3.17	60	48	66	<b>58</b>	9,2

Tabla IV4. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 4 y para la primera fase.

<b>Fase 1 - Tejido 4 (cortado)</b>						
Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	240	280	221	<b>247</b>	30,1
25	0.47	245	320	245	<b>270</b>	43,3
50	0.72	240	320	262	<b>274</b>	41,3
100	1.21	223	312	275	<b>270</b>	44,7
150	1.70	256	367	412	<b>345</b>	80,3
200	2.19	298	360	422	<b>360</b>	62,0
250	2.68	315	350	409	<b>358</b>	47,5
300	3.17	330	365	415	<b>370</b>	42,7

Tabla IV5. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 5 para la primera fase.

**Fase 1 - Tejido 5 (cortado)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	110	110	119	<b>113</b>	5,2
25	0.47	115	102	92	<b>103</b>	11,5
50	0.72	78	50	46	<b>58</b>	17,4
100	1.21	87	65	25	<b>59</b>	31,4
150	1.70	80	71	32	<b>61</b>	25,5
200	2.19	75	70	41	<b>62</b>	18,4
250	2.68	75	63	45	<b>61</b>	15,1
300	3.17	76	61	46	<b>61</b>	15,0

Tabla IV6. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 6 para la primera fase.

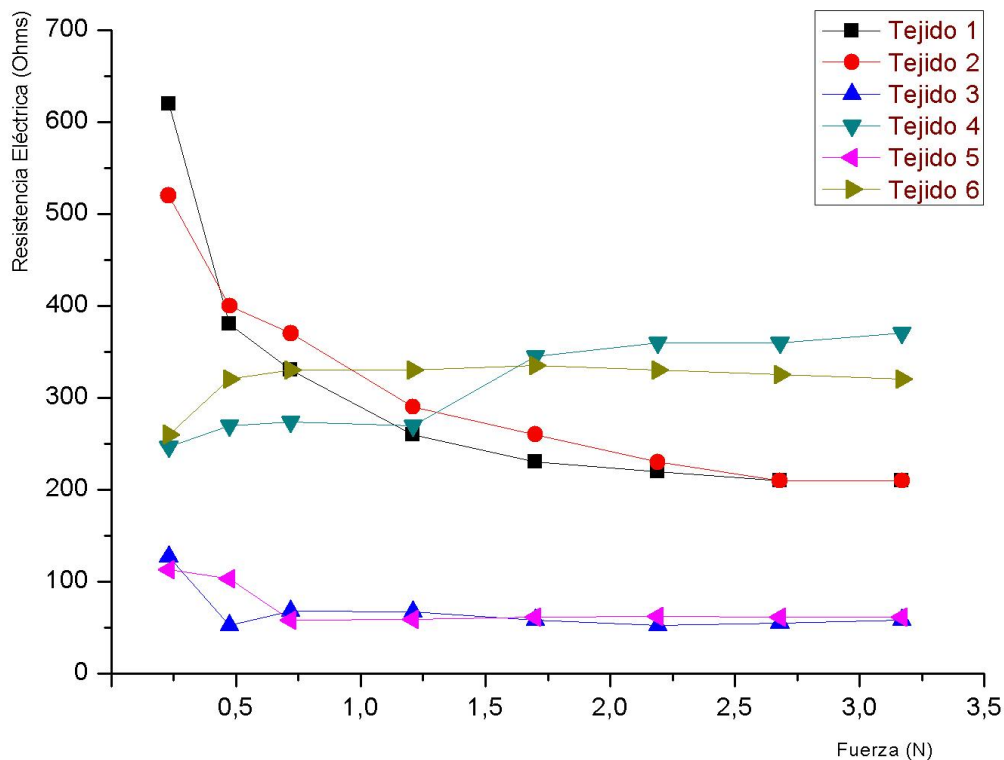
**Fase 1 - Tejido 6 (cortado)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	300	250	230	<b>260</b>	36,1
25	0.47	324	260	379	<b>321</b>	59,6
50	0.72	330	265	395	<b>330</b>	65,0
100	1.21	335	265	399	<b>333</b>	67,0
150	1.70	338	279	388	<b>335</b>	54,6
200	2.19	347	270	373	<b>330</b>	53,6
250	2.68	350	275	350	<b>325</b>	43,3
300	3.17	345	273	354	<b>324</b>	44,4

En base a estos resultados representados, se va a realizar el estudio del conjunto de los tejidos para cada una de las fases de forma independiente.

### Fase 1 (sentido de las filas)

Para estudiar el comportamiento eléctrico en función del grado de elongación de cada uno de los tejidos se procede a la representación gráfica de estos resultados indicados en cada una de las tablas anteriores. En concreto los resultados correspondientes a la media de la medida de la resistencia eléctrica en función de la fuerza responsable del estiramiento y deformación que sufren los seis tejidos.



*Figura IV3. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para cada uno de los tejidos y para la primera fase (sentido filas).*

En esta gráfica, podemos observar que para los tejidos 3, 5 y 6 prácticamente no obtenemos variación de resistencia eléctrica en función del grado de estiramiento del tejido, sino que se mantiene constante. Aunque vemos una pequeña variación al inicio no vamos a considerar que es fruto de la variación de estiramiento del tejido objeto del presente trabajo, por lo que se descarta esta variación inicial. Por otro lado, para el tejido 4 el comportamiento también es constante, salvo una pequeña subida de resistencia eléctrica entre dos valores puntuales de deformación, en concreto la variación que se puede observar al aplicar un fuerza de deformación entre 1 y 2 N, la

cual en principio no va ser considerada como significativa ya que para el resto es prácticamente constante aunque estiremos el tejido.

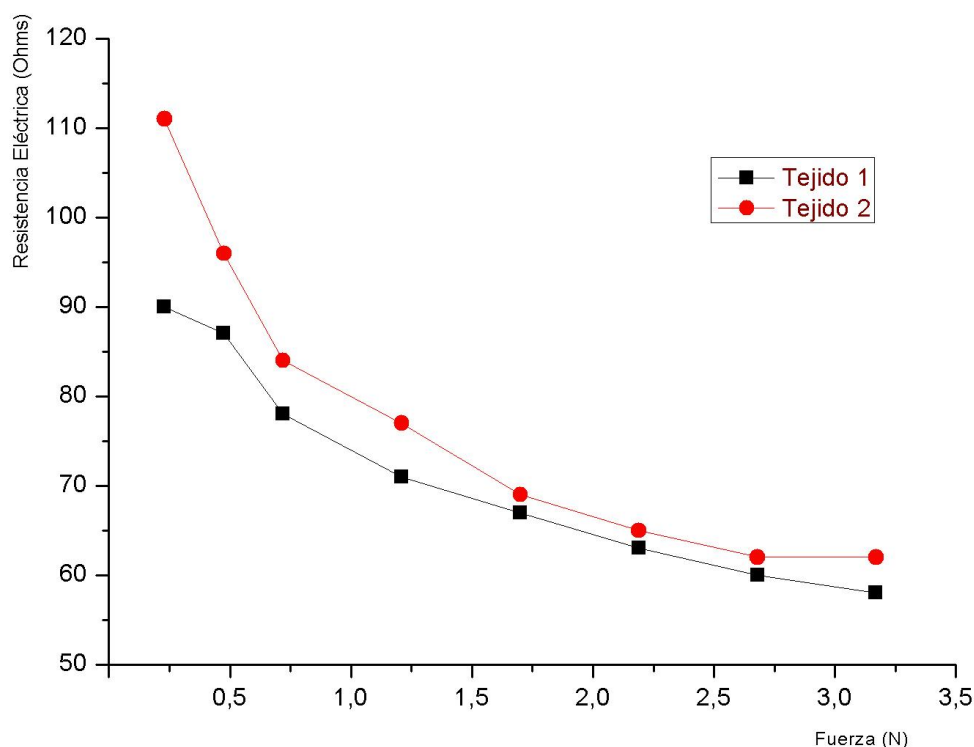
En cambio para el tejido 1 y 2, podemos ver la existencia de un posible comportamiento de la variación del valor resistivo en función del estiramiento que se le produce al tejido, en concreto, conforme aumentamos este estiramiento se produce una disminución de la resistencia eléctrica del tejido, o lo que equivale a decir, debido a la relación inversamente proporcional, un aumento de la conductividad conforme estiramos el tejido.

### Fase 2 (sentido de las filas)

Para este segundo estudio es importante resaltar que los resultados obtenidos para los tejidos 3, 4, 5 y 6 continúan sin apreciarse variación significativa por lo que se puede decir que no sigue ningún tipo de comportamiento y se descartan para posteriores análisis. Es por ello, que no han sido mostrados en estas tablas y tampoco se van a representar gráficamente en el estudio de esta fase. De igual forma para estos tejidos se comprueba que la desviación estándar obtenida es muy elevada, incluso superior a la diferencia que existe entre las medidas.

Por esta razón se representa en la figura IV4 únicamente el comportamiento de la resistencia eléctrica de los tejidos 1 y 2 cuando son sometidos a una elongación en el sentido de las filas de los tejidos sin cortar. Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente gráfico





*Figura IV4. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para los tejidos 1 y 2 y para la segunda fase (sentido de las filas).*

De nuevo podemos apreciar en esta representación gráfica como disminuye de forma exponencial la resistencia eléctrica superficial de los tejidos conforme vamos aumentando la fuerza de deformación elástica, o lo que es lo mismo, conforme aumenta la elongación del tejido. En este sentido, podemos decir que para esta segunda fase al igual que la primera se produce también un aumento de la conductividad eléctrica con respecto estiramos los mismos, en base a un comportamiento exponencial.

### Fase 3

En lo que respecta a la reproducibilidad de las mediciones realizadas a cada tejido, con un total de tres repeticiones por tejido, nos vamos a centrar en los resultados que se detallan en las tablas IV1 a IV6 de la fase 1, es decir, los tejidos cortados. Para ello, en la siguiente figura IV5 se va volver a representar los valores de la media de la primera fase pero representando gráficamente la desviación estándar de cada uno de estos puntos de medida, lo cual no permitirá conocer el grado de reproducibilidad de las medidas realizadas para cada uno de los valores de fuerza de estiramiento aplicados. Por otro lado, en la figura IV6 se presentan las representaciones de las tres repeticiones por separado para poder compararlos visualmente entre sí y poder conocer si siguen o no el mismo comportamiento entre ellos, y además nos permitirá analizar cómo se ve afectado el tejido después de recuperar su posición inicial una vez realizado un estiramiento completo.

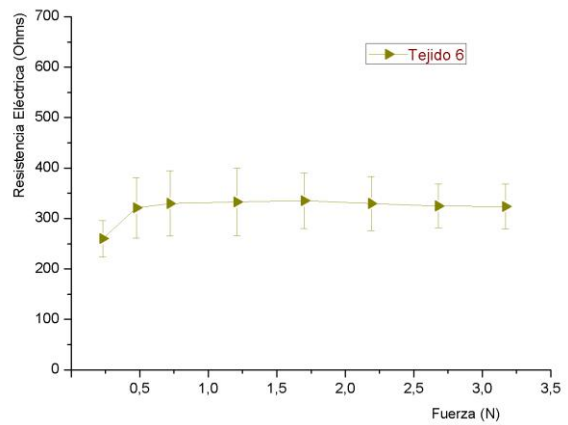
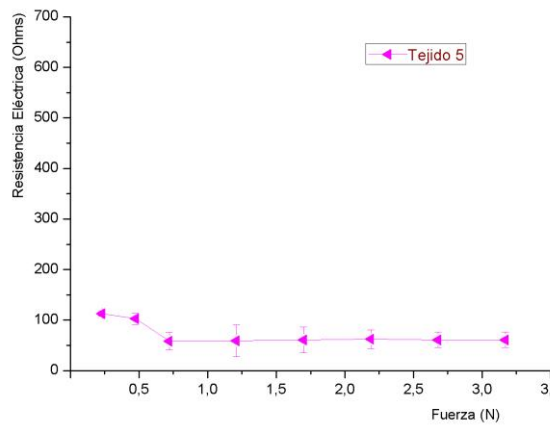
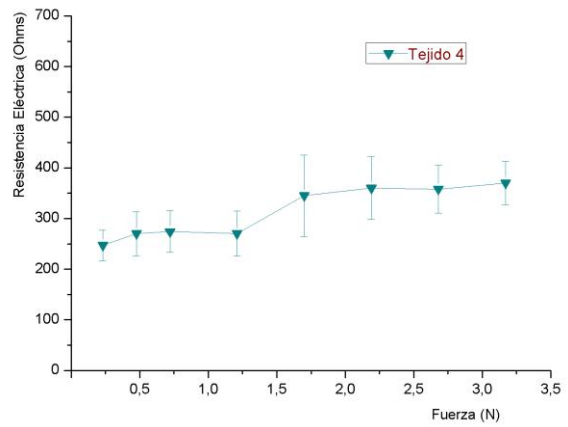
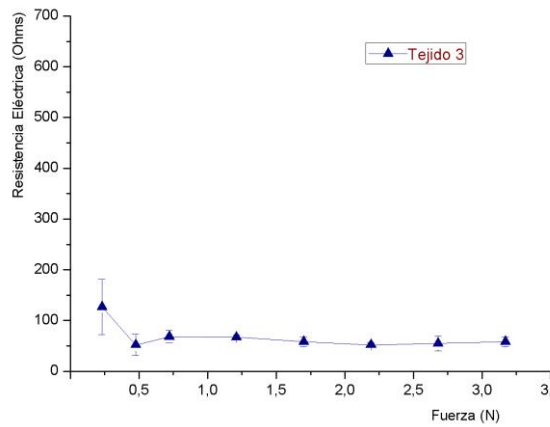
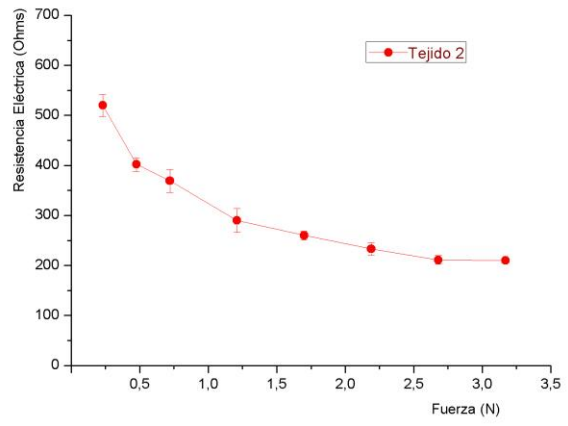
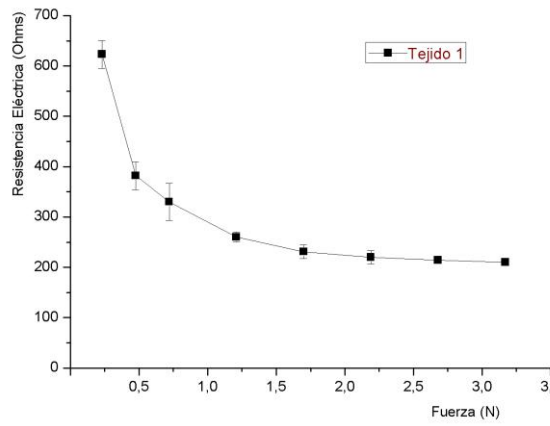


Figura IV5. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y para la primera fase. Representación de la media y desviación estándar de cada tejido.

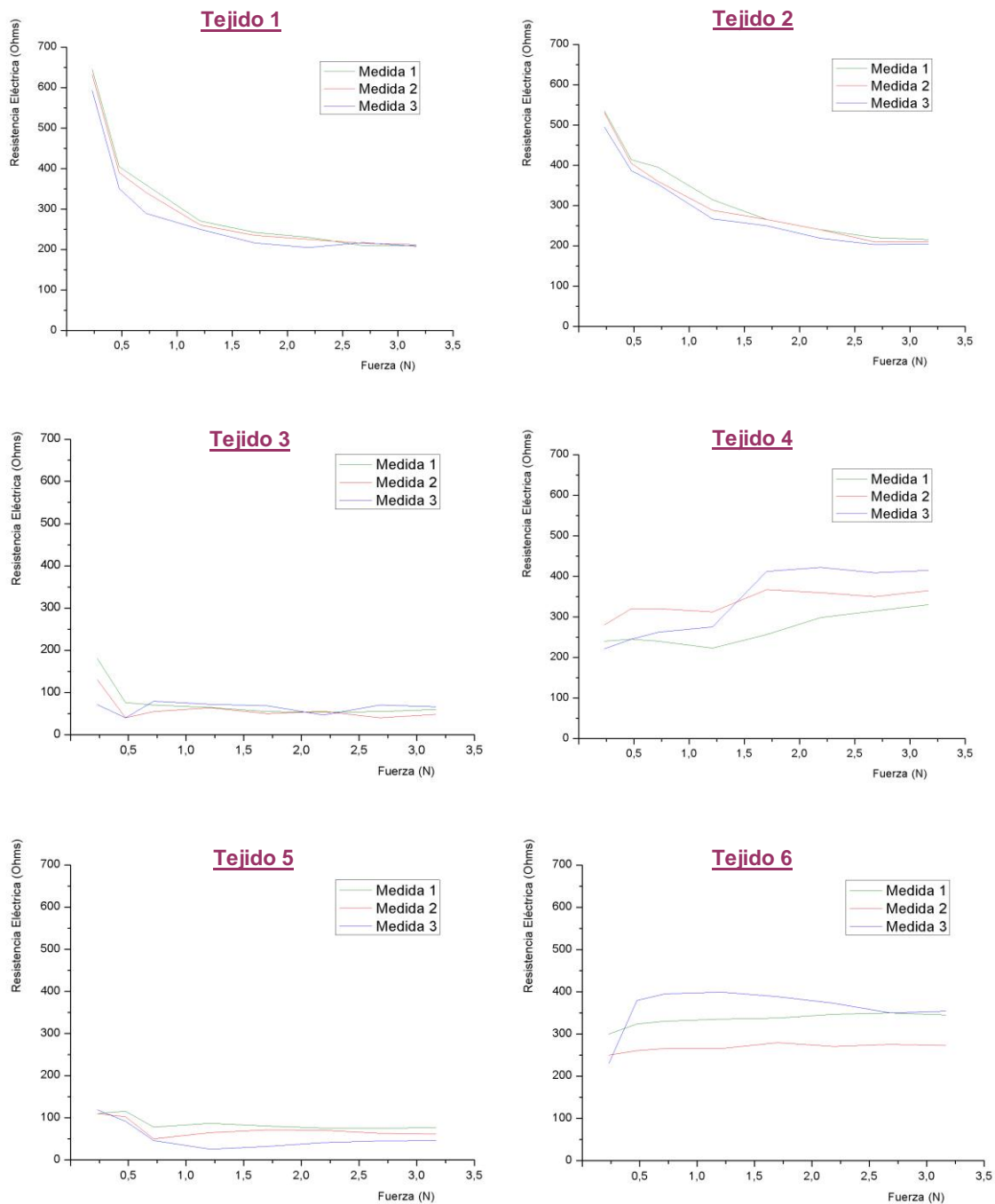


Figura IV.6. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y para la primera fase. Representación de las tres medidas de cada tejido.

Para los tejidos 3, 4, 5 y 6, al analizar las figuras 5 y 6, de nuevo se vuelven a ratificar las conclusiones alcanzadas en la primera y segunda fase de este apartado, con medidas muy poco reproducibles, lo cual quiere decir que cada vez que repetimos la medida se obtiene un valor significativamente diferente. En la siguiente tabla se indican los intervalos de desviación estándar porcentual en los que se mueven cada uno de estos tejidos para la primera fase, donde podemos observar que se tratan de porcentajes de error muy elevados.

*Tabla IV7. Intervalos porcentuales de desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (3, 4, 5 y 6).*

Tejido	$\sigma$ (%) (mínima obtenida)	$\sigma$ (%) (máxima obtenida)	$\sigma$ (%) (media)
3	7 %	43 %	25 %
4	12 %	23 %	18 %
5	5 %	53 %	31 %
6	13 %	20 %	19 %

En esta tabla también se han calculado la media de estos valores porcentuales para poder comprobar que se trata de niveles de desviación elevados para todos los puntos de medida, ya que podría darse el caso que se hubiese cometido un error puntual en el procedimiento de toma de valores y tuviésemos un valor mucho más destacado que el resto.

En cambio y tal y como se observa en las figuras IV5 y IV6 para los tejidos 1 y 2 las medidas son mucho más reproducibles, con unos valores de desviación estándar más bajos, lo cual se traduce en un comportamiento más similar de un mismo tejido después de realizar distintas repeticiones. Si hacemos el mismo análisis que para los otros tejidos obtenemos la siguiente tabla donde se pone de manifiesto que los valores de desviación estándar son relativamente mucho más bajos.

*Tabla IV8. Intervalos porcentuales de desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (1 y 2).*

Tejido	$\sigma$ (%) (mínima obtenida)	$\sigma$ (%) (máxima obtenida)	$\sigma$ (%) (media)
1	1 %	11 %	5 %
2	2 %	8 %	5 %

De igual forma, al analizar la figura IV5 se observa que las representaciones para cada una de ellas no se superponen entre sí. Lo que equivale a decir que el comportamiento es prácticamente el mismo en la medida que repetimos el ensayo. Además, se observa para ambos tejidos que el valor inicial de la resistencia eléctrica va disminuyendo conforme vamos realizando cada repetición de cada medida, es decir, la medida 1 sin deformación es mayor que la medida 2, y esta a su vez que la 3, por

ejemplo, para el tejido 1 y la fase 1, las tres medidas son; 645, 635 y 592  $\Omega$ . Al analizar el método de ensayo que se ha definido, donde una repetición está compuesta por una secuencia completa de estiramiento y luego se deja que vuelva a la posición inicial para empezar la segunda repetición, y así hasta tres, nos encontramos no solo que el tejido no recupera de nuevo su posición inicial al obtener una resistencia eléctrica diferente que en la anterior repetición, sino que está va decreciendo, lo cual es un indicativo a priori que, o bien existe poca robustez en el método de ensayo, o bien el tejido realmente sufre una pequeña deformación plástica.

De igual forma, en el marco de esta tercera fase se puede realizar un segundo análisis basado en el estudio del grado de reproducibilidad de las medidas entre la primera y la segunda fase, o lo que es lo mismo, la diferencia en producir la elongación del tejido cortado y sin cortar respectivamente. Por las razones que ya se han explicado tiene sentido realizar este análisis particular únicamente para el primer y segundo tejido, los cuales sufren una disminución exponencial de su resistencia eléctrica en función del aumento del grado de elongación y cuya variación está sujeta a un comportamiento mucho más reproducible.

Si comparamos los resultados obtenidos para ambas fases observamos que mientras en la primera y considerando solo el tejido 1, la diferencia de resistencia eléctrica pasa de un valor nominal de 620 Ohms hasta los 210 Ohms, es decir, una pérdida de más de 400 Ohms de resistencia eléctrica, en el rango de fuerza de deformación de aproximadamente 3 N. Para la segunda fase, para ese mismo tejido y misma amplitud de estiramiento, esta pérdida se produce de 90 a 58 Ohms, lo que corresponde una diferencia de 32 Ohms. Estos datos nos indican que afecta de forma significativa que el tejido se encuentre cortado o no, Tipo A2 y A1 respectivamente.

De forma evidente, cuando el tejido está cortado el aumento de la conductividad es mucho más significativo que cuando se estudia directamente el tejido en forma tubular. El dato relevante es que esta desigualdad es muy superior al valor que podríamos esperar en un principio ya que la primera desigualdad que salta a la vista entre un tejido y el otro es que cuando el tejido se encuentra en forma tubular se podría considerar como una doble capa de un tejido cortado, por lo que esta analogía esperada debería haber estado en el doble aproximadamente. En cambio, se observa como es de hasta 10 veces más la diferencia de resistencia eléctrica fruto de cortar el tejido doble tubular en un tejido único. La razón de esta diferencia significativa es que cuando el tejido lo ensayamos sin cortar el contacto físico que se establece entre las dos capas facilita de forma considerable el paso de conductividad eléctrica de un sentido al otro, disminuyendo por lo tanto con mucho más peso de lo esperado el valor de la resistencia eléctrica, incluso 10 veces más en lugar del doble. Por ello también, cuando los valores de resistencia eléctrica iniciales son más bajos como pasa en el tejido sin cortar como consecuencia la variación de resistencia eléctrica cuando provocamos el estiramiento son menores que el tejido cortado, por lo que se puede llegar a decir que es menos sensible.

Lo mismo ocurre para el tejido 2, donde la caída de resistencia eléctrica (o aumento de la conductividad) entre la primera y la segunda fase pasa de 310 a 49 Ohms respectivamente.

De esta forma con objeto de poder apreciar mejor la diferencia entre ambas fases, 1 y 2, y comprobar así visualmente la diferencia en el comportamiento a nivel cuantitativo que presenta el tejido cortado y sin cortar, y que nos permita a su vez omitir la pequeña desviación del valor de resistencia eléctrica inicial que ya hemos visto que puede ser debida a una diferente posición de inicio del tejido para cada repetición, o bien por la existencia de una deformación plástica, introducimos un nuevo concepto que es la Resistencia Eléctrica Relativa ( $R_r$ ).

Este valor se corresponde con la diferencia de resistencia eléctrica obtenida para las distintas fuerzas de estiramiento con respecto a la menor resistencia eléctrica que se obtiene cuando se produce un mayor estiramiento, es decir, el último valor de medición obtenido.

Se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$R_r = R_i - R_m$$

Donde  $R_r$  es la Resistencia Relativa,  $R_i$  es la Resistencia eléctrica para cada una de las medida que se obtienen de las distintas fuerzas de deformación aplicadas, y  $R_m$  es la Resistencia eléctrica menor obtenida, normalmente suele ser en la que se produce un mayor estiramiento (una fuerza de 3N aproximadamente).

En este sentido, para los tejidos 1 y 2, calculamos los valores de Resistencia Eléctrica Relativa los cuales representamos en la siguiente tabla IV9.

*Tabla IV9. Cálculo de la resistencia eléctrica relativa para cada uno de los diferentes grados de estiramiento al que es sometido el tejido 1 y 2, y para cada fase.*

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia Eléctrica Relativa( $\Omega$ )			
		Tejido 1 Fase 1	Tejido 1 Fase 2	Tejido 2 Fase 1	Tejido 2 Fase 2
0	0.23	413	32	310	49
25	0.47	172	29	192	34
50	0.72	120	20	159	22
100	1.21	50	13	80	15
150	1.70	21	9	50	7
200	2.19	10	5	23	3
250	2.68	4	2	1	0
300	3.17	0	0	0	0

A continuación, tomando como referencia estos valores de  $R_r$ , representamos la comparación de estos valores (fase 1 vs. fase 2) para cada tejido en la siguiente figura IV7.

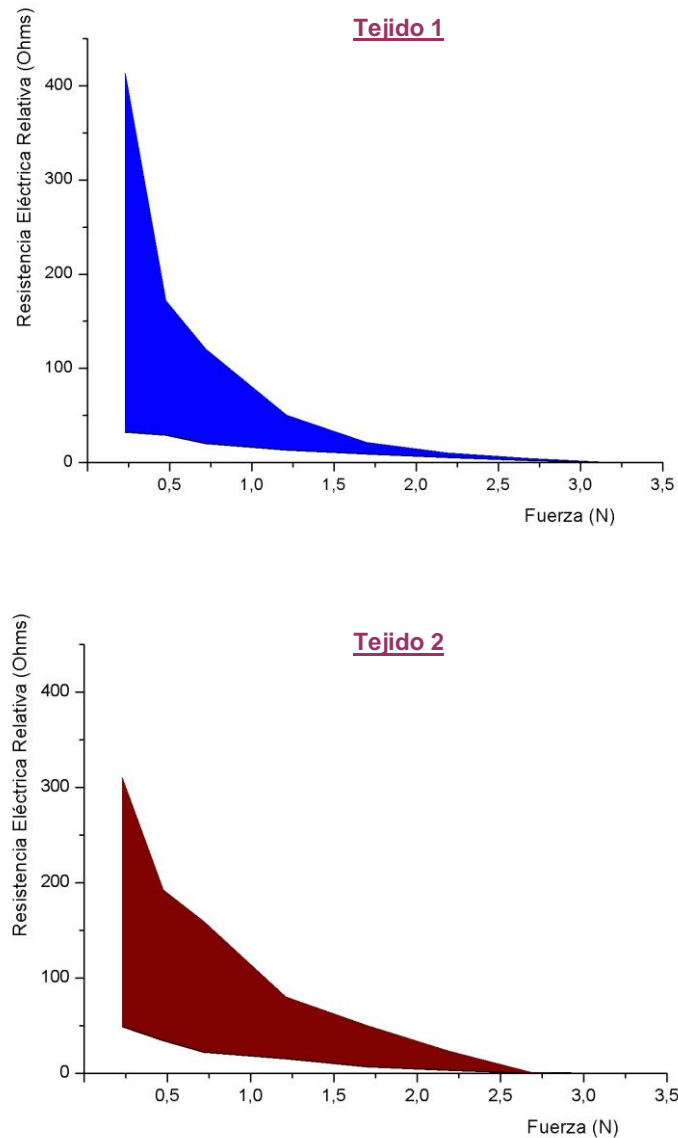


Figura IV7. Representación gráfica de la resistencia eléctrica relativa en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2 comparando la primera y segunda fase.

En base a estas gráficas, se puede observar en líneas generales que los resultados son mucho más reproducibles para la fase 1 que para la 2, lo cual es un indicador que el comportamiento de las muestras analizadas es mucho más reproducible si el tejido se encuentra cortado que si se encuentra sin cortar. Esto es debido fundamentalmente a dos razones; por un lado, que cuando el tejido se encuentra cortado se puede estirar

más mientras que el tejido tubular, el cual presenta una mayor limitación física y con ello una menor capacidad de deformación elástica, y por otro lado, la superficie del tejido cortado en el banco de ensayos es doble con respecto al tubular por lo que los errores fruto de la poca robustez del banco de ensayo son mucho más significativos en el tejido sin cortar. Además, tal y como ya se ha comentado en el tejido sin cortar, tenemos también las interferencias producidas por el contacto que se establece en la doble capa que forma el tejido tubular, favoreciendo el paso de la corriente eléctrica sin tener relación directa con el grado de estiramiento del tejido, lo cual está produciendo un efecto enmascaramiento.

En definitiva, los aspectos más relevantes a resaltar en este apartado según los resultados observados es que los tejidos referenciados como 1 y 2 presentan un comportamiento que se va repitiendo al ir realizando sucesivas medidas de la variación de la resistencia eléctrica del tejido de punto por trama frente a la deformación elástica de los mismos. Esta repetitividad en el comportamiento se produce debido a que los tejidos están formados por hilos conductores de fibra cortada con un 10% de acero inoxidable que se ven sometidos a una variación de su conductividad eléctrica en función del estiramiento producido, en cambio para el resto de tejidos cuyos hilos son de filamentos continuos conductores no se aprecia este comportamiento, manteniéndose prácticamente constante el valor de resistencia eléctrica. Por lo que se descarta seguir trabajando con estos tejidos, centrándose la presente tesis en los tejidos 1 y 2.

En este sentido, podemos decir que a medida que aumenta la elongación o deformación de los tejidos se produce una reducción exponencial de la resistencia eléctrica entre los dos extremos del tejido. Esto es debido fundamentalmente a que se produce una aproximación de los hilos conductores entre sí fruto de este estiramiento del tejido de forma que se favorece la conductividad eléctrica a través de la superficie del tejido. Esto explica también el porqué de que no varíe prácticamente la conductividad en los tejidos 3, 4, 5 y 6, formados con hilos core-spun donde el alma es un filamento conductor la cual se encuentra recubierta de un hilo de algodón, provocando este último un efecto apantallamiento. En este sentido, al producirse este aumento del contacto entre los hilos fruto del estiramiento la parte conductora se encuentra apantallada sin variar a penas la conductividad eléctrica del tejido. Asimismo, de las distintas variables planteadas en la hipótesis inicial, descartamos la influencia de la estructura del tejido de punto en base al tipo de ligamento, es decir, a la forma y al número de hilos diferentes en las pasadas, y tomamos como variable dependiente de la variación de la conductividad eléctrica en función de la deformación elástica tan solo el tipo de hilo, siendo más adecuado el hilo de fibra cortada. A esta conclusión llegamos también al comparar los resultados de los tejidos 1 y 2 entre sí, observando un mismo comportamiento a pesar de presentar valores cuantitativos diferentes. En definitiva, no se ve afectado significativamente el comportamiento de la variación de resistencia eléctrica en función del ligamento del tejido de punto.

Otra de las conclusiones a las que llegamos al comparar las fases 1 y 2, y por consiguiente la diferencia de cortar o no el tejido, es que los valores de resistencia eléctrica son más elevados para la fase 1, es decir tejido cortado, respecto a la fase 2. Esto se produce principalmente debido a que cuando el tejido se encuentra en forma tubular se comporta como un doble tejido cortado uno dispuesto encima del otro, donde además se está produciendo un contacto entre las dos capas, y en



consecuencia entre los hilos de fibra cortada que componen los tejidos, favoreciéndose la conductividad eléctrica, o lo que es lo mismo, disminuyendo de forma significativa la resistencia eléctrica entre un extremo y otro del tejido.

Por último, y como resultado a destacar al realizar el análisis de la fase 3, se encuentra el carácter de reproducibilidad de los resultados en los diferentes tejidos 1 y 2, con respecto a la mayor desviación estándar del resto de tejidos. En este sentido, podemos decir que aunque conocemos de la poca robustez del método de ensayo por la dependencia en la manipulación del tejido a la hora de colocarlo y de la propia medición, se considera que la reproducibilidad de los resultados obtenidos ha sido suficientemente buena como para concluir que los tejidos seleccionados son los apropiados para continuar con el estudio del comportamiento. En este sentido, sí que se ha observado una disminución del valor de la resistencia eléctrica inicial conforme se han ido realizando las sucesivas repeticiones y además de forma progresiva. Lo cual es un indicador que el tejido puede sufrir una pequeña deformación plástica que provoca cambios del valor eléctrico de partida.

En base a las presentes conclusiones, se plantea como continuación de la presente tesis realizar las mismas fases de análisis con el tejido dispuesto en el banco de pruebas en el sentido de las columnas. De esta forma se podrá evaluar cuál es el comportamiento eléctrico que experimenta estos dos tejidos en este sentido, y básicamente si se evita así la deformación plástica que sufre el tejido.

#### IV.1.1.2.- SENSIBILIDAD A LA ELONGACIÓN EN EL SENTIDO DE LAS COLUMNAS.

De igual forma que en el apartado anterior, en este apartado se evalúa el comportamiento eléctrico (resistencia eléctrica) en función del tipo de tejido de punto de trama para un estiramiento en el sentido vertical, es decir, una deformación elástica en el sentido de las columnas, según la técnica experimental descrita en el apartado III.2.3. Entendiendo como estiramiento vertical el que está indicado en la figura IV1 como Tipo B.

Para poder evaluar la variación del valor de resistencia eléctrica en función de la elongación se han determinado diferentes tipos de medidas en función del sentido de estiramiento y de cómo se manipula el tejido, siguiendo la misma metodología que se ha seguido en el sentido de las filas. De esta forma la batería de pruebas que se ha llevado a cabo es la siguiente:

Fase 4 - Medida de la resistencia eléctrica en cada uno de los distintos tipos de tejidos (tejidos 1 y 2) cortados y provocando una elongación en sentido de las columnas. (Tipo B2).

Fase 5 - Medida de la resistencia eléctrica en cada uno de los distintos tipos de tejidos (tejidos 1 y 2) sin cortar y provocando una elongación en sentido de las columnas. (Tipo B1).

Fase 6 - Medida de recuperación del valor resistivo con las medidas sucesivas para cada uno de los tejidos cortados (Fase 4) y provocando una elongación en sentido de las columnas. Reproducibilidad.

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos al realizar una elongación en el sentido de las columnas para cada uno de los tejidos y para las fases 4, 5 y 6. Es importante resaltar en este punto que aunque se han realizado los ensayos para los tejidos del 3 al 6, no se van a representar los resultados ya que a semejanza de la elongación en el sentido de las filas, estos resultados han sido muy dispares sin seguir un comportamiento definido. Por ello en adelante, se ha optado por descartar estos tejidos.

Tabla IV10. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 1 y para cada una de las fases propuestas.

**Fase 4 - Tejido 1 (cortado)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	23.000	20.600	19.400	<b>21.000</b>	1.833
25	0.47	18.000	16.100	15.400	<b>16.500</b>	1.345
50	0.72	11.600	9.800	8.600	<b>10.000</b>	1.510
100	1.21	9.500	9.100	8.400	<b>9.000</b>	557
150	1.70	8.400	8.000	7.600	<b>8.000</b>	400
200	2.19	6.600	6.500	6.100	<b>6.400</b>	265
250	2.68	5.000	5.100	4.000	<b>4.700</b>	608
300	3.17	4.700	4.400	4.100	<b>4.400</b>	300

**Fase 5 - Tejido 1 (sin cortar)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	8.450	9.100	9.450	<b>9.000</b>	507
25	0.47	7.000	7.500	6.800	<b>7.100</b>	361
50	0.72	4.500	4.400	3.700	<b>4.200</b>	436
100	1.21	3.300	3.300	3.000	<b>3.200</b>	173
150	1.70	3.000	3.000	2.700	<b>2.900</b>	173
200	2.19	2.100	2.300	1.900	<b>2.100</b>	200
250	2.68	1.800	1.500	1.500	<b>1.600</b>	173
300	3.17	1.100	1.300	1.500	<b>1.300</b>	200

**Fase 6 - Tejido 1 (cortado)**

Para este estudio se van a tomar los resultados obtenidos directamente de cada una de las tres medidas de resistencia eléctrica que aparecen en la Fase 4.

Tabla IV11. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 2 y para cada una de las fases propuestas.

**Fase 4 - Tejido 2 (cortado)**

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	21.200	20.800	18.000	<b>20.000</b>	1.744
25	0.47	9.800	9.900	10.900	<b>10.000</b>	608
50	0.72	7.000	6.200	6.600	<b>6.600</b>	400
100	1.21	5.700	6.000	5.100	<b>5.600</b>	458
150	1.70	4.600	4.600	4.900	<b>4.700</b>	173
200	2.19	4.500	4.000	3.800	<b>4.100</b>	361
250	2.68	3.200	3.300	3.100	<b>3.200</b>	100
300	3.17	3.000	3.300	2.400	<b>2.900</b>	458

**Fase 5 - Tejido 2 (sin cortar)**

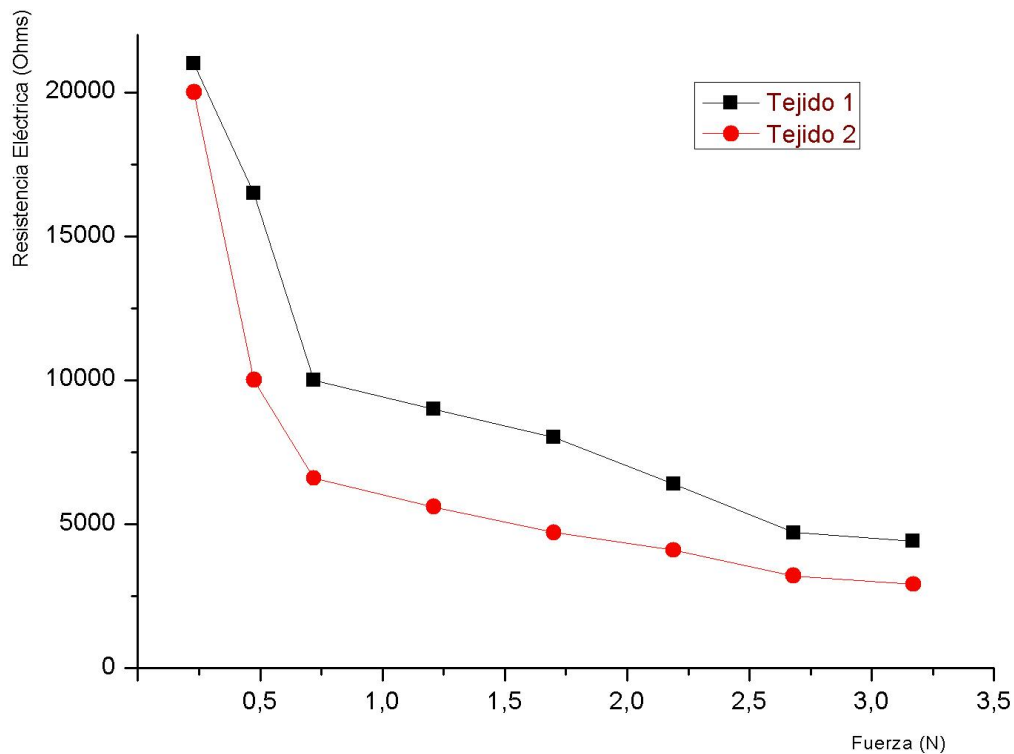
Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
0	0.23	18.800	15.100	14.100	<b>16.000</b>	2.476
25	0.47	12.000	11.200	11.300	<b>11.500</b>	436
50	0.72	8.200	7.300	5.500	<b>7.000</b>	1.375
100	1.21	5.000	4.800	4.000	<b>4.600</b>	529
150	1.70	3.800	3.700	3.600	<b>3.700</b>	100
200	2.19	3.200	3.200	2.600	<b>3.000</b>	346
250	2.68	2.900	3.000	2.500	<b>2.800</b>	265
300	3.17	2.700	2.900	2.500	<b>2.700</b>	200

**Fase 6 - Tejido 1 (cortado)**

Para este estudio se van a tomar los resultados obtenidos directamente de cada una de las tres medidas de resistencia eléctrica que aparecen en la Fase 4.

#### Fase 4

En base a estos resultados, a continuación se procede a la representación gráfica de los resultados correspondientes a resistencia eléctrica en función del grado de estiramiento del tejido.

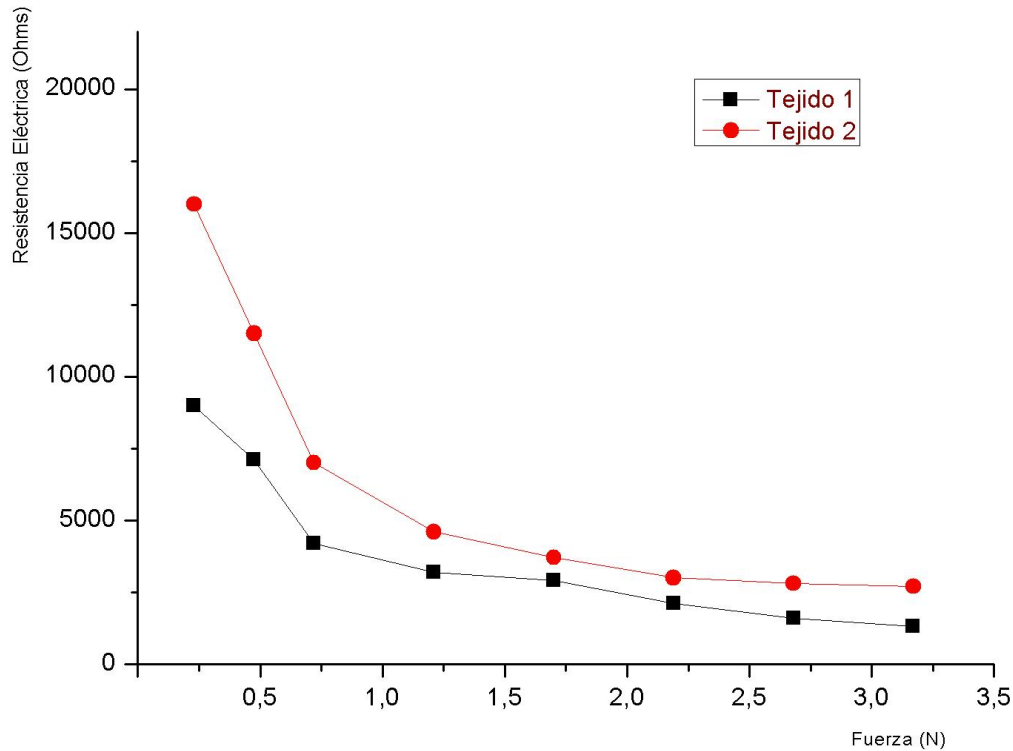


*Figura IV8. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función de la fuerza de deformación elástica que se aplica a cada uno de los tejidos 1 y 2 y para la fase 4 (en sentido de las columnas.)*

De nuevo observamos un comportamiento muy similar al que ocurría al realizar el estiramiento en el sentido de las filas para estos dos tipos de tejidos. Se aprecia un comportamiento de variación exponencial del valor resistivo en función del estiramiento que se le produce al tejido, en concreto, conforme aumentamos la deformación elástica del mismo se produce una disminución de la resistencia eléctrica del tejido, lo que equivale a decir que la conductividad de ambos tejidos aumenta conforme aumenta el estiramiento.

#### Fase 5

En el caso de estudiar los tejidos sin cortar los resultados se representan según la siguiente gráfica;



*Figura IV9. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función de la fuerza de deformación elástica que se aplica a cada uno de los tejidos 1 y 2 y para la fase 5 (en sentido de las columnas).*

De nuevo, podemos comprobar el mismo tipo de comportamiento, para los tejidos 1 y 2 encontramos una variación significativa, disminuyendo la resistencia eléctrica en función del estiramiento del tejido, y otra vez a través de una disminución exponencial.

### Fase 6

En lo que respecta a la reproducibilidad de las medidas, y en base a los resultados que se detallan en la tabla IV10 y IV11 donde se han detallado los valores obtenidos de los dos tejidos de la fase 4, se procede a realizar el estudio de la reproducibilidad de estos ensayos. Para ello, en la figura IV10 se va volver a representar los valores medios en base a la desviación estándar en cada una de estas medias de fuerza de deformación elástica aplicada, lo cual no permitirá conocer el grado de reproducibilidad. Por otro lado, en la figura IV11 se van a representar los gráficos de las tres medidas independientes para cada uno de los tejidos analizados que nos permitirá de forma visual establecer si por separado siguen el mismo comportamiento, y además evaluar si existe una disminución de la deformación elástica cuando estiramos el tejido en el sentido de las columnas.

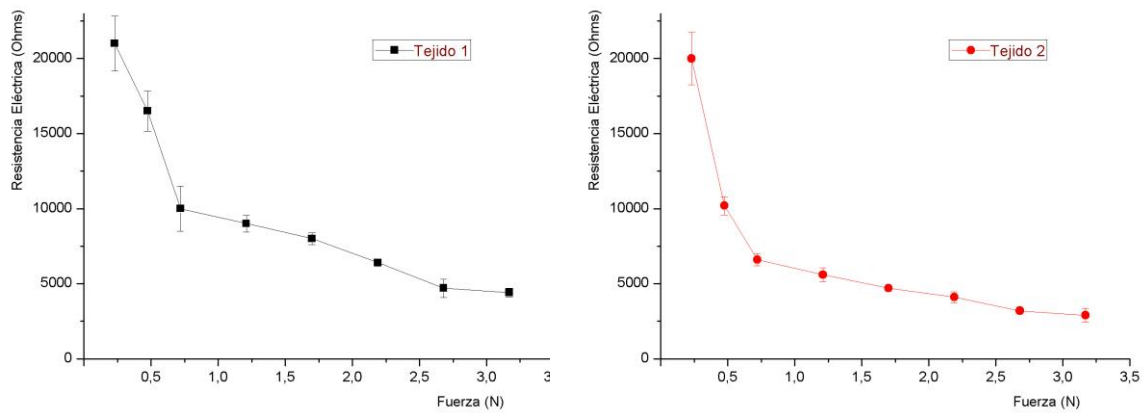


Figura IV10. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2, para la fase 4. Representación de la media y desviación estándar de cada tejido (sentido de las columnas).

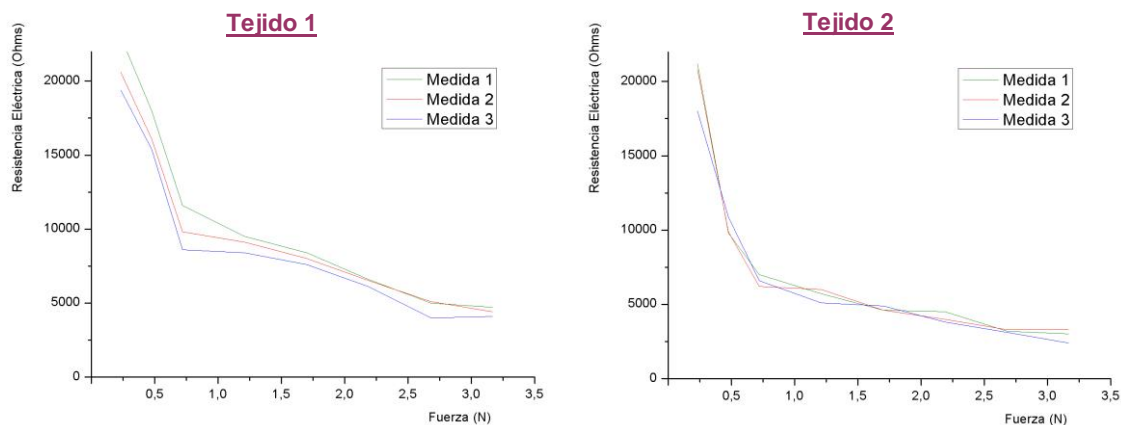


Figura IV11. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2, para la fase 4. Representación de las tres medidas de cada tejido (sentido de las columnas).

Como se observa en estos gráficos para los tejidos 1 y 2 las medidas son significativamente reproducibles, con unos valores de desviación estándar relativamente bajos, lo cual se traduce en un comportamiento más similar de un mismo tejido después de realizar distintas medidas. Lo que es más importante, es que el comportamiento se repite en la medida que repetimos el ensayo.

En la siguiente tabla se indican los intervalos de desviación estándar porcentual en los que se mueven cada uno de estos tejidos para la fase 4, donde podemos observar que se tratan de porcentajes de error relativamente bajos.

Tabla IV12. Intervalos porcentuales de desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (1 y 2).

Tejido	$\sigma$ (%) (mínima obtenida)	$\sigma$ (%) (máxima obtenida)	$\sigma$ (%) (media)
1	4 %	15 %	9 %
2	3 %	16 %	8 %

El dato a destacar es que estos valores de desviación media son prácticamente el doble en el sentido de las columnas que en el sentido de las filas, lo cual equivale a decir que para este método establecido en el banco de ensayo 1, el tejido de punto cuando es expuesto a una deformación elástica en el sentido de las filas se comporta mejor que cuando se realiza en el sentido de las columnas. Esto es debido a que la elasticidad en el sentido de las filas es significativamente mayor que en el sentido de las columnas, por lo que por un lado el error está más presente en el tejido que tiene un comportamiento más rígido, y por otro, puede ser que la deformación plástica tenga más presencia en el tejido menos elástico.

De igual forma, al analizar la figura IV11 se observa que las representaciones para cada una de ellas no se superponen entre sí. Lo que equivale a decir que el comportamiento es prácticamente el mismo en la medida que repetimos el ensayo.

De igual forma, en el marco de la fase 6 se puede realizar un segundo análisis basado en el estudio del grado de reproducibilidad de las medidas entre las fases 4 y 5, o lo que es lo mismo, la diferencia en producir la elongación en sentido de las columnas en el tejido cortado y sin cortar respectivamente.

Al igual que hemos hecho en el sentido de las filas, si comparamos los resultados obtenidos para ambas fases observamos que mientras en la fase 4 y considerando el tejido 1, la diferencia de resistencia eléctrica pasa de valor nominal de 21.000 Ohms hasta los 4.400 Ohms, es decir, una pérdida de más de 16.600 Ohms, para la fase 5 para este mismo tejido y en el mismo rango de estiramiento, esta pérdida se produce de 9.000 a 1.300 Ohms, una diferencia de 7.700 Ohms. Estos datos nos indican que afecta de forma significativa que el tejido se encuentre cortado o no, Tipo B2 y B1 respectivamente. De forma evidente, cuando el tejido está cortado el aumento de la conductividad es mucho más significativo que cuando se estudia directamente como se obtiene del proceso de fabricación. El dato relevante es que esta diferencia es realmente importante y significativa. Lo mismo ocurre para el tejido 2, donde la caída de resistencia eléctrica (o aumento de la conductividad) entre estas dos fases se diferencian de forma significativa entre la el tejido cortado y el tejido sin cortar.

Además, se puede observar de nuevo como si existe una disminución del valor inicial de resistencia eléctrica conforme se repite la secuencia de medidas, fruto de la deformación plástica que sufre el tejido al estirarlo en el sentido de las columnas, al igual como pasaba en el sentido de las filas. Si comparamos los valores de desviación típica para este primer punto de medida, los cuales son:



Tabla IV13. Desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (1 y 2) comparando entre el sentido filas y columnas para un valor inicial de fuerza elástica de 0.23 N.

Tejido	$\sigma$ (%)	$\sigma$ (%)
	(F = 0.23 N)	(F = 0.23 N)
	Filas	Columnas
1	4 %	9 %
2	4 %	9 %

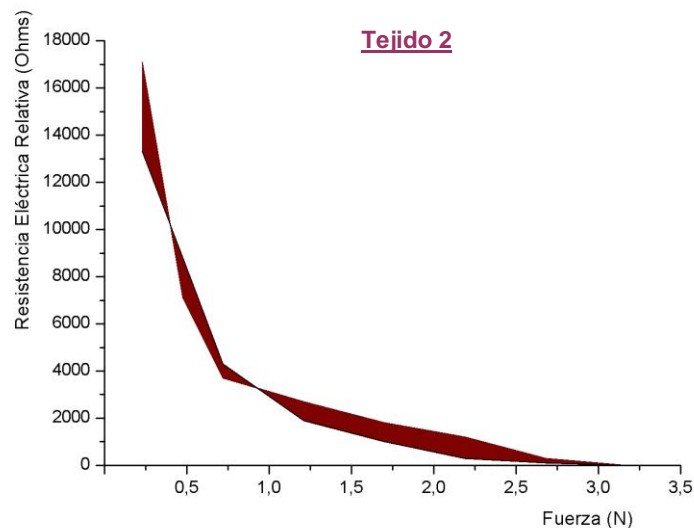
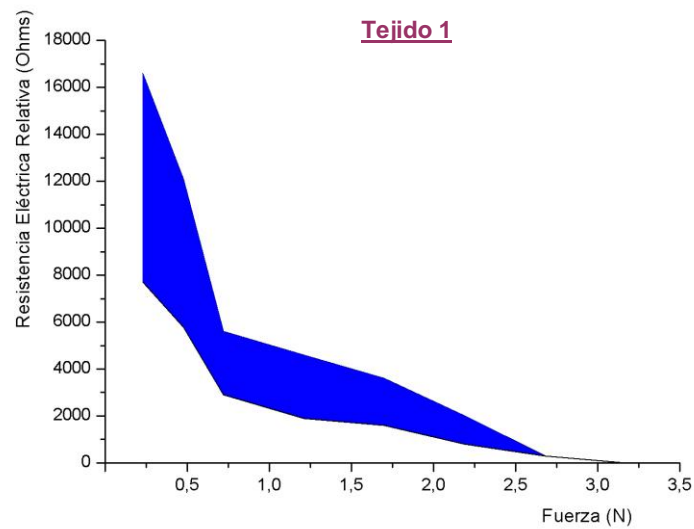
Podemos afirmar que en el sentido de las columnas existe una deformación plástica mayor que en el sentido de las filas, debido a que la variación de los valores de resistencia eléctrica en el punto inicial es mayor en el estiramiento en sentido columnas que en filas.

Para poder analizar los resultados sin este error de deriva de inicio se vuelve a utilizar la Resistencia Eléctrica Relativa. Para los tejidos 1 y 2, calculamos estos valores los cuales representamos en la siguiente tabla IV14.

Tabla IV14. Cálculo de la resistencia eléctrica relativa para cada uno de los diferentes grados de estiramiento al que es sometido el tejido 1 y 2, y para cada fase (sentido columnas).

Volumen de agua (cc)	Fuerza (N)	Resistencia Eléctrica Relativa( $\Omega$ )			
		Tejido 1 Fase 4	Tejido 1 Fase 5	Tejido 2 Fase 4	Tejido 2 Fase 5
0	0.23	16.600	7.700	17.100	13.300
25	0.47	12.100	5.800	7.100	8.800
50	0.72	5.600	2.900	3.700	4.300
100	1.21	4.600	1.900	2.700	1.900
150	1.70	3.600	1.600	1.800	1.000
200	2.19	2.000	800	1.200	300
250	2.68	300	300	300	100
300	3.17	0	0	0	0

Con el objeto de poder apreciar mejor la diferencia entre la fase 4 y 5, y así poder comprobar visualmente la diferencia en el comportamiento a nivel cuantitativo que presenta el tejido cortado y sin cortar, representamos la comparación de estos valores (fase 4 vs. fase 5) para cada tejido, en la siguiente gráfica.



*Figura IV12. Representación gráfica de la resistencia eléctrica relativa en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2 comparando las fases 4 y 5.*

En base a estas representaciones se puede observar que los resultados obtenidos en líneas generales son mucho más reproducibles para la fase 4 que para la 5, lo cual es un indicador que el comportamiento de las muestras analizadas es mucho más reproducible si el tejido se encuentra cortado que si se encuentra sin cortar. Aunque en este caso es más significativo en el caso del tejido 1 más que para el tejido 2, donde es también relevante destacar que apenas existe diferencia entre ambas.

#### IV.1.1.3.- CONCLUSIONES PARCIALES.

En definitiva, los aspectos más relevantes a resaltar en este apartado se basan en que para los tejidos 1 y 2 la variación de la resistencia eléctrica en función de la

deformación elástica de estos tejidos presenta el mismo comportamiento ya sea si la elongación se produce en el sentido de las filas que en el de las columnas. Y esto a su vez se repite ya sea si el tejido está cortado como sin cortar.

Los valores absolutos de resistencia eléctrica a la hora de realizar el estiramiento en un sentido con respecto al otro cambian en dos órdenes de magnitud, pasando de entre 20.000 y 5.000 Ohms en el sentido de las columnas, a 650 y 250 Ohms en el sentido de las filas para los tejidos 1 y 2 respectivamente. Esto equivale a decir que si buscamos el tejido óptimo que disponga de una resistencia eléctrica no muy elevada y que nos permita obtener una variación significativa y lo más reproducible posible con respecto al estiramiento deberemos seleccionar el tejido:

- referenciado como 2; tejido de punto por trama con una sola entrada de un solo hilo de fibra cortada de algodón con mezcla íntima de acero inoxidable (10%). En su defecto, los resultados del tejido 1 no son excluyentes.
- cortado en el sentido de las columnas de forma que obtenemos un tejido bidimensional.
- el estiramiento se debe producir en el sentido de las filas, donde la elongación del mismo es mayor y la reproducibilidad de los resultados mejora de forma empírica, además en la medida que necesitemos tejidos con mayor resistencia eléctrica utilizaremos en el sentido de las columnas, y viceversa para las filas.
- La caída más significativa de resistencia eléctrica se produce al aplicar una fuerza inferior a 1 Newton.

Todas estas consideraciones son importantes si se quiere diseñar y aplicar este sensor para alguna aplicación concreta, como es el caso concreto que veremos más adelante en el último apartado de este trabajo, donde se va a desarrollar un sensor para medir y monitorizar la respiración de un bebé.

Por último, se puede concluir que en base a los resultados experimentales obtenidos se aprecia una pequeña deformación plástica del tejido al someterlo a un esfuerzo máximo de 3N, después de repetir el ensayo tres veces, por lo que por extrapolación afirmamos que el tejido no es apto para ser sometido a esfuerzos prolongados de estiramiento. De igual forma, al analizar el método de ensayo propuesto y la bancada de pruebas podemos decir que es poco robusto. Por lo que para evitar estos problemas adyacentes se plantea una doble solución al respecto:

- por un lado, incorporar en el tejido fibra elástica (elastano) que facilite la recuperación del tejido hasta su estado inicial, reduciendo al máximo a priori el problema de la deformación plástica.
- Y por otro, diseñar un banco de pruebas mucho más robusto que nos permita minimizar al máximo el error fruto de la manipulación de la muestra.

#### IV.1.2.- Diseño de textiles inteligentes como sensores de estiramiento en función de la respuesta eléctrica.

Una vez descritas las bases de la evaluación de la respuesta eléctrica de un tejido inteligente en función del estiramiento, en este apartado se procede a estudiar algunos parámetros que permitan diseñar un sistema de tejido inteligente que ofrezca fiabilidad en la medida y al mismo tiempo, reproducibilidad.

En particular, teniendo en cuenta las limitaciones en cuanto a recuperación observadas en el apartado anterior, se ha desarrollado un nuevo tejido de género de punto compuesto de fibra conductora y elastano como agente de mejora de esta recuperación. Así como se ha mejorado el banco de pruebas con la intención de que sean más robustas las medidas realizadas.

Paralelamente, se parte de un diseño de tejido mucho más complejo en base a las conclusiones alcanzadas en el apartado anterior. Es por ello que este tejido está compuesto por bandas conductoras y aislantes dispuestas alternativamente, en las que las conductoras son una réplica exacta del tejido que mejor se ha comportado en este primer apartado. Es decir, tejido de punto por trama referenciado como 2, cortado en el sentido de las columnas y con un estiramiento en el sentido de las filas.

Además de las bandas conductoras y aislantes y la utilización de elastano, este tejido presenta una serie de hilos de cobre dispuestos de forma perpendicular a las bandas, sentido de las columnas, con el propósito de establecer una línea de conexión entre las distintas bandas conductoras del tejido y tomarlo como referencia a la hora de realizar las medidas. A partir de aquí, se ha llevado a cabo un estudio de viabilidad de aplicar este tejido como sensor de estiramiento.

En este sentido, las hipótesis de partida en las que se van a fundamentar los estudios realizados en este apartado están centradas principalmente en:

1. Por un lado, diseñar un banco de pruebas mucho más robusto donde el tejido presente una menor movilidad y por consiguiente una menor dependencia de la manipulación y disposición del tejido de forma estructural. Esto se consigue diseñando un soporte más sólido y donde los sistemas de fijación del tejido al mismo sean más rígidos y reproducibles.
2. Por otro lado y una vez optimizado este banco de pruebas, evaluar si la incorporación de fibra elástica en el tejido mejora el comportamiento del tejido en lo que respecta a la reproducibilidad de las medidas después de ser sometido el tejido a una deformación elástica.
3. Y por último, el diseño de un tejido en bandas que nos permita realizar un primer avance de lo que podría ser un sensor piezoresistivo capaz de diferenciar la zona donde se está produciendo la deformación.

De esta forma, en base a estas variables que se toman como punto de partida, el presente apartado se ha planteado por un lado como una evaluación de la homogeneidad de las medidas de conducción que afectan directamente a la primera hipótesis, para que a posteriori y en consecuencia a los resultados obtenidos poder

realizar un estudio de simetría de la respuesta eléctrica frente a un estiramiento determinado en base a la segunda hipótesis, y que a su vez siente las bases de cara a realizar una primera aproximación sobre los sensores piezoresistivos.

Por otro lado, y como consecuencia del método instrumental empleado para realizar las medidas tiene más sentido hablar en adelante de conductividad eléctrica y no de resistencia eléctrica como se hizo en el punto anterior de la presente tesis, partiendo de la base que ambas están inversamente relacionadas. Además resaltar que el tejido compuesto por varias bandas conductoras va a presentar pequeñas diferencias en la resistencia eléctrica de cada una de ellas fruto de la distinta distribución estructural de las fibras conductoras en los hilos y a su vez de los hilos en los tejidos, por lo que es más apropiado hablar de conductividad eléctrica del sistema en global en lugar de resistencia eléctrica que es algo más particularizado para cada banda.

Se considera también importante hacer una pequeña reseña al análisis teórico desde el punto de vista electrotécnico aplicado a la estructura de tejido más el banco de ensayos del que disponemos.

En este sentido, y partiendo de que el sistema genera una corriente continua a un determinado voltaje, la representación gráfica de lo que está ocurriendo en este sistema podría ser:

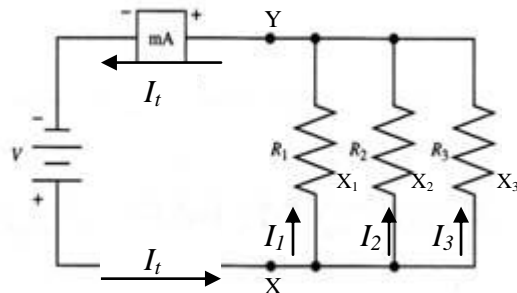


Figura IV13. Diagrama de un circuito eléctrico representativo en paralelo.

Como se puede apreciar, se trata de un circuito en paralelo, donde las tres resistencias equivalen a las tres bandas conductoras del tejido y dado que es un circuito de corriente continua en paralelo la intensidad de corriente que pasa por cada una de estas bandas es menor a la intensidad total, podemos decir que se reparte en función del valor de resistencia eléctrica. En cambio para unos valores de  $R_1 = R_2 = R_3$ , que es el caso de este tejido por su configuración, el potencial debe ser el mismo a la entrada y salida de cada resistencia, en los puntos X e Y, y esta diferencia de potencial equivale a 5V, o lo que en adelante denominaremos tensión eléctrica. Además, en estas condiciones de mismos valores de resistencias, la caída de potencial en un mismo punto simétrico en cada resistencia ( $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ ) debería ser igual, e inferior evidentemente a 5V. Cuanto mayor es la distancia de la resistencia eléctrica recorrida mayor es esta caída, o lo que equivale a decir que menor es el potencial en este punto.

Para asemejarlo más aún al banco de ensayo con el tejido lo representamos de la siguiente forma:

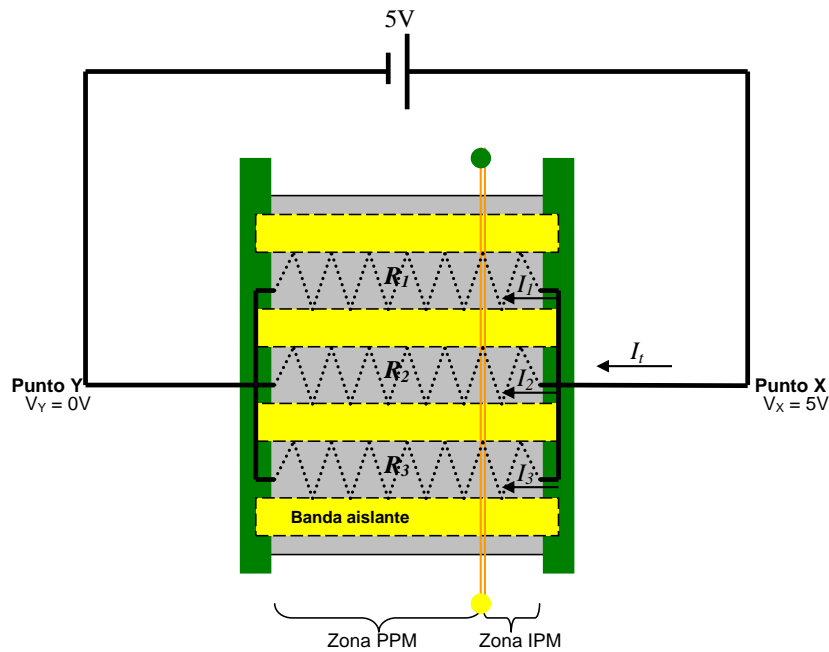


Figura IV14. Diagrama del banco de ensayo con el tejido en paralelo con dos zonas virtuales de estudio (PPM y IPM).

La colocación de un hilo conductor de cobre atravesando el tejido en el sentido de las columnas supone la separación virtual del circuito en paralelo a su vez en otros dos circuitos en paralelo, y la separación de dos zonas claramente diferenciadas que se han denominado como zona PPM (posterior al punto de medida) y IPM (inicial al punto de medida), lo cual nos va a permitir hacer los estudios posteriores en distintos escenarios hipotéticos.

Quedaría representado de la siguiente forma:

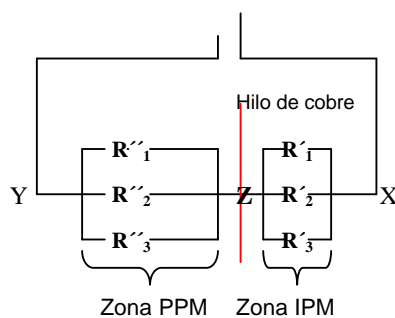


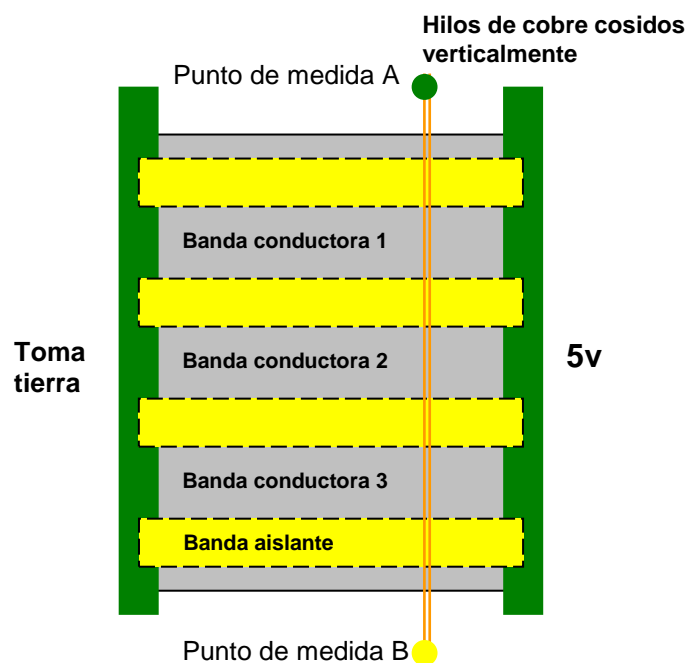
Figura IV15. Diagrama de un circuito eléctrico con resistencias en paralelo.

Se han establecido en esta figura varios puntos donde va a ser importante conocer el potencial en los mismos, el punto X, donde se cumple que la tensión es  $V_X = 5V$ , el punto Y, donde se cumple que  $V_Y = 0V$ , y el punto Z, donde se cumple que  $V_Y < V_Z < V_X$ , es decir,  $0 < V_Z < 5$ .

Y donde,  $R_1 = R'_1 + R''_1$ , y así con  $R_2$  y  $R_3$ .

#### IV.1.2.1.- ESTUDIO DE LA HOMOGENEIDAD EN LAS MEDIDAS DE CONDUCCIÓN ELÉCTRICA.

En este punto se lleva a cabo un estudio de la homogeneidad de las medidas de conducción eléctrica para un tejido de punto por trama y el banco de pruebas representado en la Figura IV16.



*Figura IV16. Diagrama del sistema empleado para el estudio y optimización de textiles inteligentes como sensores de estiramiento.*

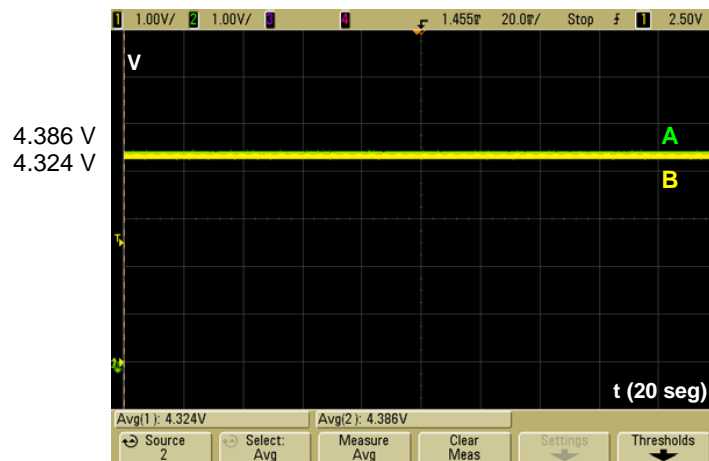
De esta forma, el objetivo de esta medida es comprobar si el tejido conduce de forma uniforme, sin pérdidas o en caso contrario, si se pueden cuantificar y observar cual es el comportamiento de esta disipación de tensión eléctrica. Indicaremos los puntos de medida por un punto de color verde para el punto de medida A y de color amarillo para el punto de medida B tal y como observamos en la figura anterior. Es importante recordar que vamos a medir la conductividad eléctrica con respecto al tiempo por lo que el instrumento de medida utilizado es el osciloscopio con conexión en estos dos puntos de medida.

Para poder llevar a cabo este estudio de homogeneidad que nos permita obtener un sistema de medida mucho más robusto se plantea como método de ensayo el ir colocando placas de cobre (se va a representar en adelante con un rectángulo de color rojo) sobre las distintas partes del tejido y evaluar el comportamiento de la tensión eléctrica en función a los distintos escenarios establecidos. Estas placas de cobre presentan unas dimensiones preestablecidas de 6 cm de largo por 3 cm de

ancho diseñadas en función de las dimensiones de las bandas del tejido, con el propósito de colocarlas entre las distintas bandas conductoras del tejido en un sentido o en otro y creando estos distintos escenarios.

Pero previamente, se quiere comprobar que en este primer escenario inicial el valor del punto de medida A y el punto de medida B sea el mismo. En caso de no ser así, se estudiará que situación deriva este comportamiento.

En la siguiente figura IV17 que es la medida continua de la conductividad eléctrica que se obtiene directamente del instrumento de medida de análisis, se representan los valores de conductividad en ambos puntos de medida. Los valores obtenidos del punto de medida A se representa en el gráfico mediante una línea verde y los del punto de medida B se representa con una línea amarilla, en este caso, debido a que los valores son casi iguales la línea amarilla superpone la verde, por eso visualmente solo podemos apreciar la representación amarilla.



*Figura IV17. Conductividad eléctrica en el tiempo del tejido representado en la figura IV1 obtenida directamente del osciloscopio para el punto de medida A y B.*

Como podemos observar en esta figura los dos puntos de medida A y B tienen prácticamente el mismo valor de medida, 4.38V y 4.32V respectivamente, por lo que podemos ratificar que se encuentran casi en cortocircuito en este estado de reposo en la vertical trazada con los hilos de cobre entre los dos puntos de medida, es decir no existe apenas una pérdida de la tensión eléctrica en esta vertical. Además, es también coherente que los valores de tensión eléctrica en estos dos puntos sean inferiores a 5V, debido a que la corriente eléctrica ya ha recorrido una cierta distancia de las distintas resistencias eléctricas dispuestas en paralelo y por lo tanto la diferencia de potencial entre estos dos puntos es mayor que entre los dos electrodos. También es importante resaltar que la proximidad de esta vertical de medida al electrodo de entrada de tensión permite que esta caída haya sido muy baja de menos de 1V. Si nos fijamos en la Figura IV16 podemos decir que el valor aproximado de  $V_z = 4.3V$ .

Una vez comprobado que realmente el comportamiento es el esperado y que el tejido no presenta disipación de tensión eléctrica de forma no homogénea en este nuevo sistema se van a realizar diferentes estudios que nos permitan hacer una mayor aproximación de este comportamiento en cada una de las bandas. Para ello se van a



crear sobre el mismo tejido de punto en reposo distintos escenarios con las placas de cobre conductoras de forma que al cortocircuitar las bandas de forma independientes podremos comprobar cuál es el comportamiento del sistema con respecto al resto de las bandas.

Escenario 1: Cortocircuito de voltaje de alimentación ( $V_{cc} = 5V$ ) con el punto de medida.

En este primer escenario, se ha colocado la pieza de cobre en la banda conductora 3 del tejido creando un cortocircuito entre el punto de alimentación y el punto de medida B tal y como se representa en el siguiente figura IV18. La pieza de cobre se representa con un rectángulo de color rojo.

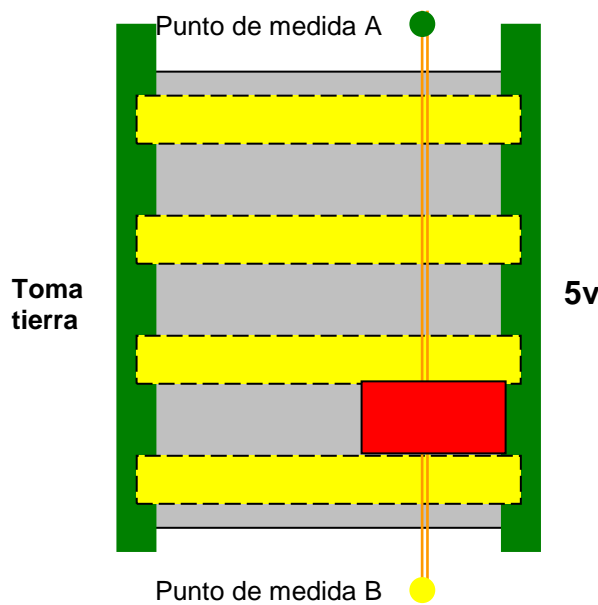


Figura IV18. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 3 con una pieza de cobre.

Esto equivale a decir, según la Figura IV15 que desaparecen las resistencias de la zona denominada como IPM, es decir, las resistencias  $R'_1$ ,  $R'_2$ , y  $R'_3$ , quedando de esta forma un circuito con la siguiente distribución de resistencias en paralelos.

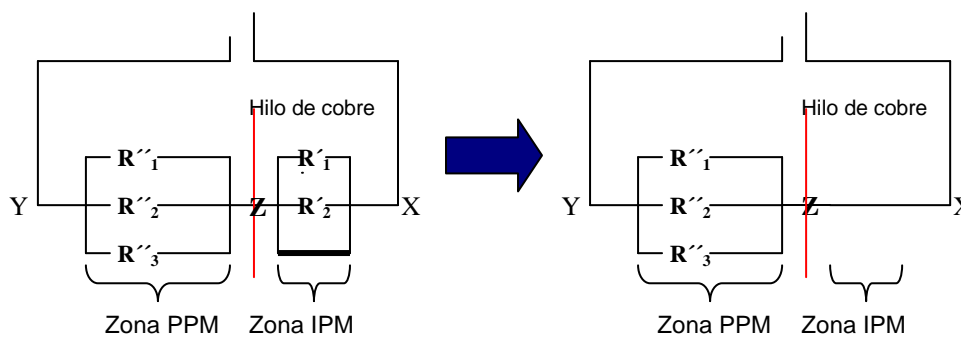


Figura IV19. Diagrama del sistema empleado para el estudio eliminando la  $R'_3$ .

Según esta hipótesis en este escenario se tendría que cumplir que  $V_x = V_z$ , y sabiendo que  $V_x = 5V$ , el valor de  $V_z$  también tendría que ser de 5V.

Los resultados que se obtienen de la representación de los valores de conductividad eléctrica para el punto de medida A y el B se representan en la siguiente figura IV20.



*Figura IV20. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 3 con una pieza de cobre.*

Los resultados de esta gráfica muestran de nuevo que los dos puntos de medida ofrecen el mismo valor e igual a  $V_z = 5V$ , por lo tanto podemos decir que se comporta como un cortocircuito, es decir, que en esta situación de reposo el tejido conduce de forma uniforme, sin pérdidas. Esto se produce porque al colocar la pieza de cobre es como si no existiese resistencia eléctrica desde el sistema de alimentación hasta la vertical del punto de medida, y por lo tanto no se produce caída de tensión entre los puntos X y Z tal y como esperábamos.

A continuación, analizamos si ocurre lo mismo cuando ponemos la pieza de cobre cortocircuitando el punto de medida A, es decir en la banda conductora 1 del tejido de punto, tal y como se representa a continuación en el siguiente figura IV21.

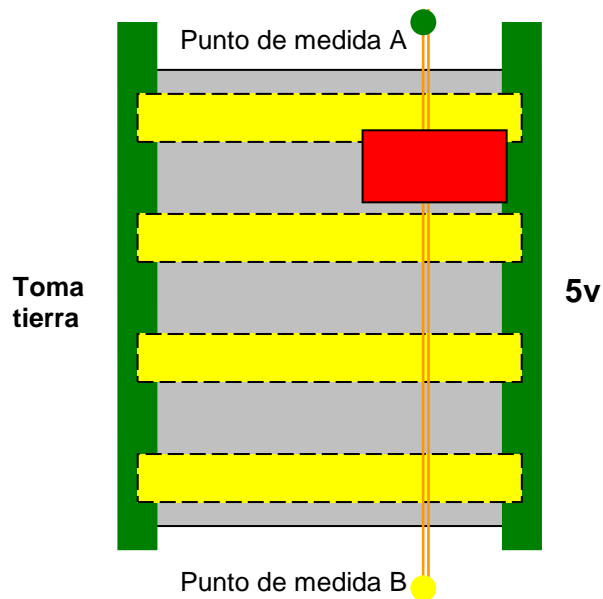


Figura IV21. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 1 con una pieza de cobre.

Los resultados que se obtienen de la representación de los valores de conductividad eléctrica para el punto de medida A y el B se representan en la siguiente figura IV22.



Figura IV22. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 1 con una pieza de cobre.

De igual forma que antes, los resultados de esta gráfica muestran que los valores obtenidos en los dos puntos de medida coinciden y son igual a  $V_Z = 5V$ , por lo tanto podemos decir que se comporta como un cortocircuito al igual que en el caso anterior.

Escenario 2: Cortocircuito de masa con el punto de medida:

Con el propósito de seguir con este estudio de homogeneidad del sistema de medida empleado se procede a tomar las medidas para un segundo escenario donde se va a cortocircuitar un punto de medida con la masa, con el propósito de ver qué diferencia de tensión se crea.

En este segundo escenario, se han colocado tres piezas de cobre en la banda conductora 3 del tejido creando un cortocircuito entre la masa y el hilo de cobre vertical de los puntos de medida tal y como se representa en el siguiente figura IV23.

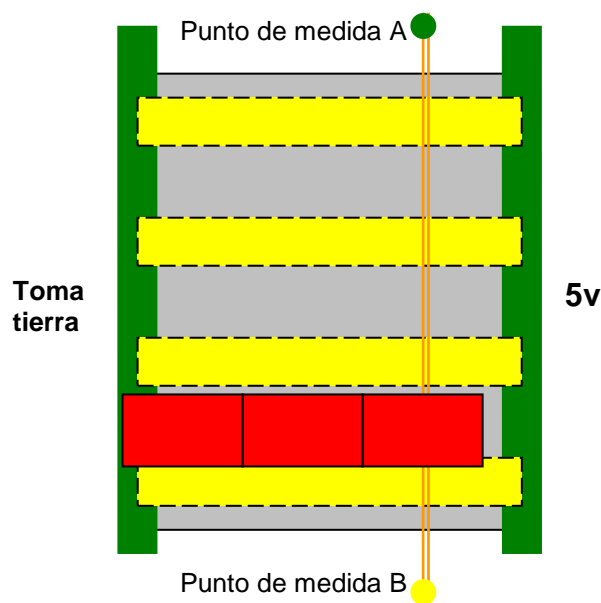


Figura IV23. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 3 con tres piezas de cobre entre la toma de tierra y el punto de medida.

O lo que equivale a decir según la hipótesis de partida que se elimina la caída de tensión entre los puntos Z e Y, tal y como se representa en esta figura:

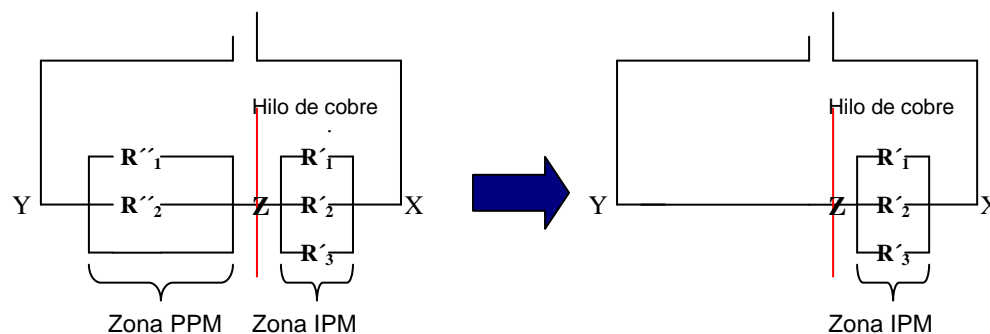
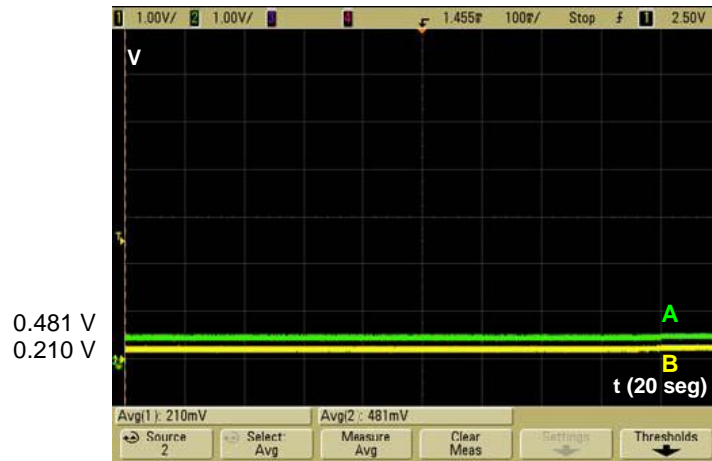


Figura IV24. Diagrama del sistema empleado para el estudio eliminando la  $R''_3$ .

Los resultados que se obtienen de la representación de los valores de conductividad eléctrica para el punto de medida A y el B se representan en el siguiente figura IV25.



*Figura IV25. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 3 con tres piezas de cobre entre la toma de tierra y el punto de medida.*

Como se representa en este gráfico observamos como ambos puntos presentan todavía un valor de tensión eléctrica, lo que equivale a decir que el sistema no está en cortocircuito. Y además apreciamos una diferencia entre los dos puntos de medida A y B, ya que presentan valores de tensión eléctrica distintos, 0.481 V y 0.210 V respectivamente.

De igual forma que se ha realizado anteriormente vamos a observar cual es el comportamiento cuando se produce el cortocircuito entre la masa y el punto de medida A, para ello se han colocado las tres piezas de cobre en la banda conductora 1. La siguiente figura IV26 representa esta situación.

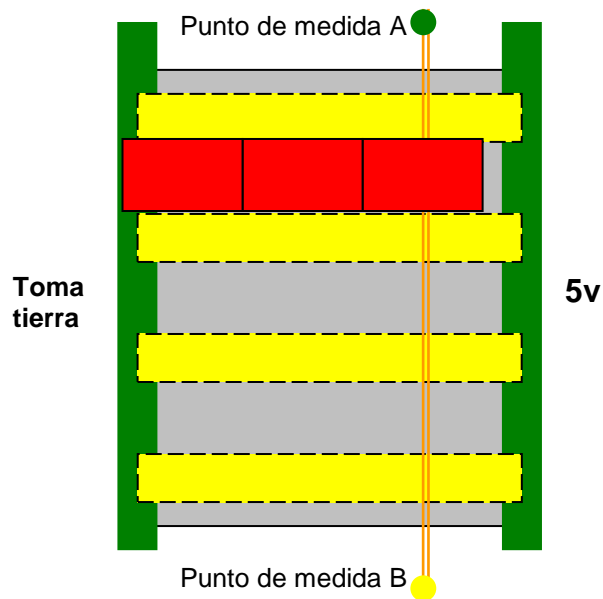


Figura IV26. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 1 con una pieza de cobre entre la toma de tierra y el punto de medida.

Los resultados que se obtienen de la representación de los valores de conductividad eléctrica para el punto de medida A y el B se representan en la siguiente figura IV27.



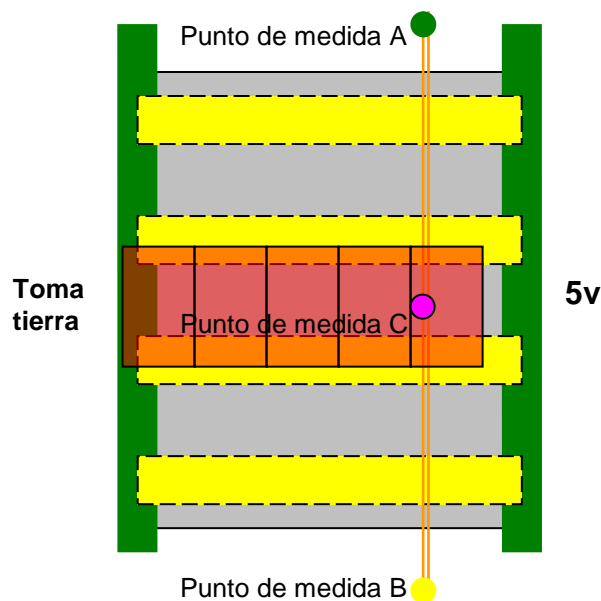
Figura IV27. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 1 con tres piezas de cobre en sentido horizontal entre la toma de tierra y el punto de medida.

De igual forma que en el caso anterior nos encontramos con dos datos a destacar, por un lado que ninguno de los dos puntos presenta un valor de 0v de la masa, 0.497 V y 0.286 V para los puntos de medida A y B respectivamente. Y por otro lado, también se aprecia que la diferencia entre los dos puntos es de 0.210 V, prácticamente la misma que en el caso anterior.

Esto es debido a que el tejido no está dispuesto de forma totalmente simétrica en el banco de pruebas ya que se observa como la tensión en un punto de medida es distinta que la tensión en el otro punto independiente de si el cortocircuito se produce en la primera que en la tercera banda. Por otro lado, es importante también resaltar que este valor residual de tensión eléctrica nos está diciendo que todavía pasa tensión eléctrica por las bandas en las que no se genera el cortocircuito con las placas, y tiene sentido que estos valores sean relativamente pequeños, del orden de décimas de voltio.

Escenario 3: Cortocircuito de masa en la segunda banda con los puntos de medida:

En este apartado, como última actuación para el estudio de la homogeneidad de este banco de ensayo se plantea el realizar un cortocircuito entre la masa y la banda conductora 2 del tejido de punto con el propósito de obtener una idea sobre la diferencia de potencial que se crea entre la banda central y las dos bandas de los extremos (1 y 3). Para ello se ha diseñado un sistema como el que se representa en la siguiente figura IV28.



*Figura IV28. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 2 con varias piezas de cobre y con tres puntos de medida (A, B y C).*

Como novedad en este figura destacar que se va a tomar un tercer punto de medida representado como C, que nos permitirá conocer la tensión existente en el punto intermedio de la vertical, o lo que es equivalente, entre los puntos de medida A y B.

Al igual que en el caso anterior, se elimina la caída de tensión entre los puntos Z e Y, pero ahora debido al cortocircuito que se produce en la banda 2, es decir, desaparece la  $R''_2$ , tal y como se representa en esta figura:

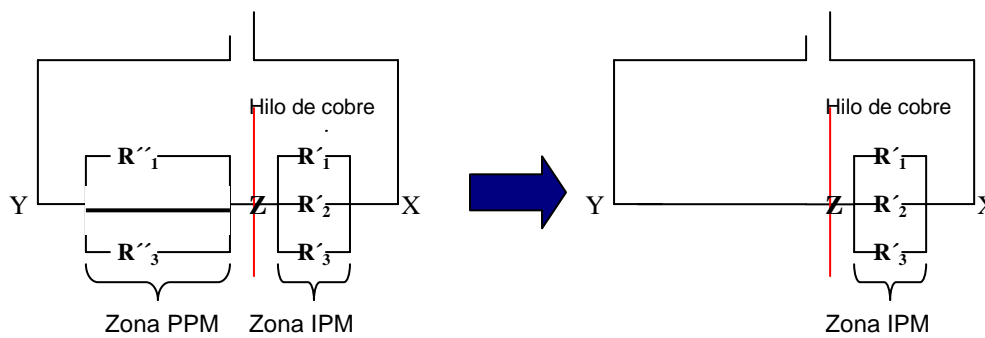


Figura IV29. Diagrama del sistema empleado para el estudio eliminando la  $R''_3$ .

Siguiendo con el esquema representado en esta figura, la diferencia de potencial entre los dos puntos de medida Y y Z, deberían tener un valor de 0v, ya que teóricamente existe un cortocircuito entre ellos.

Los resultados obtenidos de la representación de los valores de conductividad eléctrica para los puntos de medida A, B y C, con líneas verde, amarilla y rosa, respectivamente, se indican a continuación en la siguiente figura IV30.

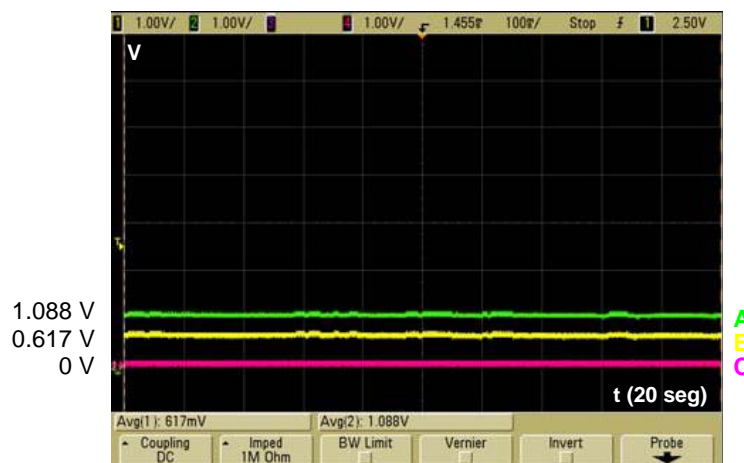


Figura IV30. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A, B y C, y después de cortocircuitar la banda conductora 2 entre la toma de tierra y el punto de medida.

Por un lado, tal y como se esperaba se obtiene un valor de 0 V en el tercer punto de medida, punto de medida C, lo cual equivale a decir que si existe un cortocircuito en este sistema provocado por las piezas de cobre que están dispuestas de forma vertical sobre la banda conductora número 2 del tejido de punto.

Además, en el punto de medida B obtenemos un valor de 1.088 V, mientras que en el punto de medida B el valor diferencial obtenido es de 0.617 V. Por tanto, entre los dos puntos de medida existe una diferencia de 0.48 V.

Esto nos indica que debido a que los valores de tensiones entre los dos puntos de medida son diferentes los valores de resistencia también lo son, es decir, que  $R'_1$  es



distinto de  $R'_2$  y  $R'_3$ , y que a su vez,  $R''_1$  también distinto de  $R''_2$  y  $R''_3$ . La razón de esta diferencia y aunque la masa laminar en el diseño del tejido sea el mismo, es decir, el número de pasadas en el sentido de las filas de hilo conductor sea el mismo entre las distintas bandas, existe una diferente disposición estructural lo que provoca que varíe el valor de conductividad entre una banda a otra, o lo que equivale a decir que presentan distintos niveles de resistencia eléctrica. Lo cual es lógico también ya que una diferencia en el grado de estiramiento entre una banda u otra supone una diferencia en la conductividad eléctrica.

Por otro lado, al tratarse de un circuito con resistencias en paralelo se produce una distribución de la corriente eléctrica en función de los valores de cada una de las resistencias. Y aunque entre el punto X e Y la caída de tensión siempre es de 5 V independientemente de los valores de resistencia, en el punto Z este valor de tensión depende fundamentalmente de donde se realice el cortocircuito y de donde se tome la medida de conductividad, valores de potencia en A distinto a B, y distinto a C.

En base a estos resultados podemos destacar las siguientes conclusiones parciales alcanzadas en este apartado:

- que el banco de ensayos propuesto permite medir los valores de conductividad eléctrica en varios puntos del tejido al disponer en sentido de las columnas una franja muy conductora de hilo de cobre y realizar medidas en puntos concretos de la misma.
- que este banco de ensayos se comporta como un circuito en paralelo donde cada una de las resistencias la componen la banda conductora por donde pasa la corriente eléctrica de un extremo al otro. Y que estos valores de resistencia eléctrica de cada banda son distintos entre sí. Por lo que, podemos conseguir un sistema totalmente simétrico si conseguimos que los valores de potencial en los puntos A, B y C coincidan, lo que equivaldría a decir que  $R_1 = R_2 = R_3$ .
- y por último, que este banco es el adecuado para realizar el análisis de la simetría de la respuesta eléctrica frente al estiramiento, y que los valores de medida se pueden tomar en cualquier punto de la línea vertical conductora.

En base a estas consideraciones, y con el objeto de realizar el estudio de deformación elástica que nos permita evaluar si la incorporación de la fibra elástica de elastano en el tejido ha mejorado el comportamiento de recuperación del tejido, se necesita diseñar un nuevo banco de ensayo mucho más robusto. De esta forma, este nuevo diseño del sistema de medida tiene que permitir que el tejido quede fijado de forma rígida sin tener posibilidad de movimiento y cambio durante la realización del estiramiento y recuperación para la toma de las medidas en un sentido y en otro.

#### IV.1.2.2.- ESTUDIO DE LA SIMETRÍA DE LA RESPUESTA ELÉCTRICA FRENTE AL ESTIRAMIENTO.

Con el objeto de determinar la simetría de la respuesta eléctrica cuando el tejido de punto con tres bandas de conducción se somete a un estiramiento en el sentido de las filas hacia la izquierda y derecha, se ha diseñado una variación del banco de ensayos utilizado en el apartado anterior que nos permitiese realizar este estudio de forma más robusta y simétrica.

Se pretende con este análisis observar como varían las propiedades del tejido frente a este estiramiento tanto en un sentido como en otro, todo ello, a partir de las conclusiones alcanzadas en el apartado IV.1.1. donde se encontró una relación directa sobre el grado de estiramiento de un tejido con la variación de la resistencia eléctrica.

Para ello, se ha montado un sistema tal y como se indica en la figura IV31. En esta figura, y al igual que antes, las bandas de color gris representan las bandas conductoras, mientras que las de color amarillo indican las bandas aislantes. La principal diferencia del sistema respecto al apartado anterior se encuentra que en el centro y en sentido perpendicular al sentido de las filas se ha colocado un soporte fijo anclado a la propia estructura inmóvil del banco de ensayos que recorre el tejido de extremo a extremo, y cuya parte conductora está en contacto con el tejido garantizando una buena conductividad eléctrica.

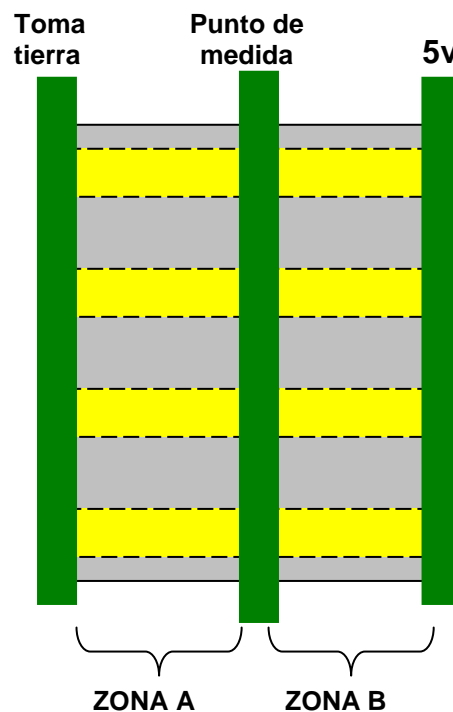


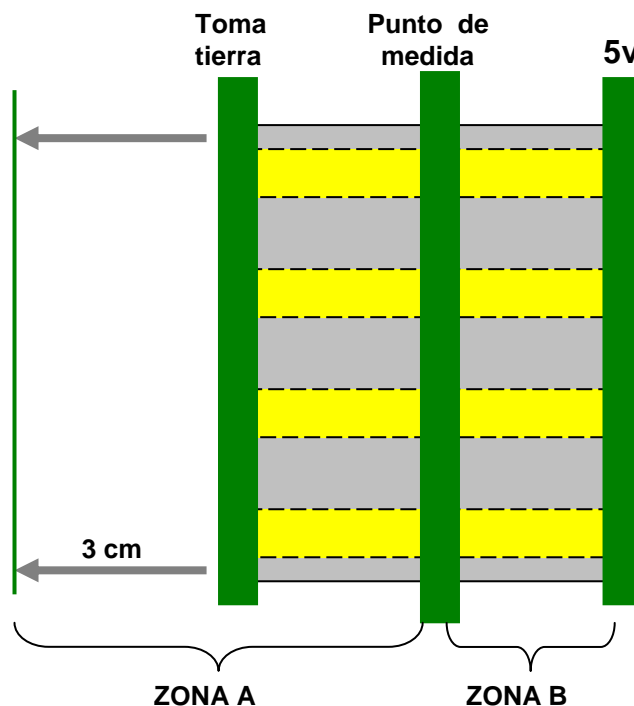
Figura IV31. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente al estiramiento para un tejido compuesto por tres bandas conductoras.

En base a esta disposición, se conecta la masa a uno de los extremos del tejido y se aplica un voltaje de 5 V en la otra lámina del otro extremo tal y como está indicado en esta misma figura, de forma que la lámina central se conecta al punto de medida. De esta forma se establecen dos zonas físicas denominadas A y B.

Con el objeto de obtener resultados de variación de conductividad eléctrica que sean lo suficientemente significativos relacionados directamente con la deformación elástica provocada en el tejido, y por otro lado, no llegar a realizar una deformación plástica sobre el mismo que provocará una falta de repetitividad en las medidas, se ha definido una distancia de estiramiento de 3cm hacia un sentido y de la misma manera hacia el otro. Esta distancia se encuentra significativamente por debajo de la distancia recorrida por el tejido al sufrir el estiramiento en el primer banco de ensayos descrito en el apartado IV.1.1., y donde el recorrido después de la capacidad máxima de agua sobre el vaso de precipitados estaba entorno a los 15cm.

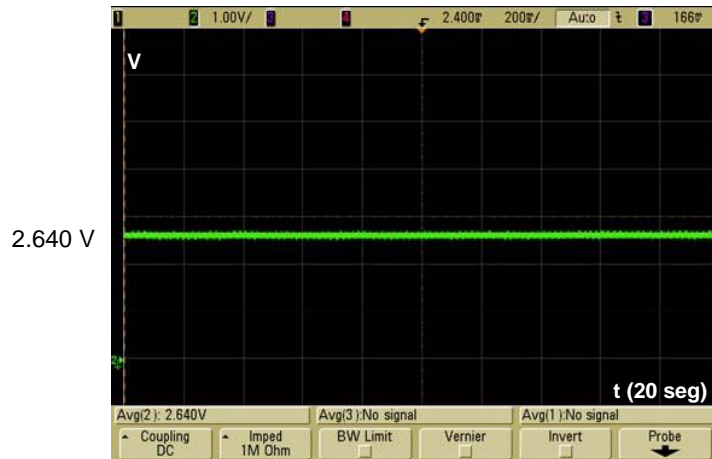
#### A – Deformación elástica hacia la izquierda

En esta fase se somete al tejido a una tensión uniforme de estiramiento desde el extremo izquierdo del sistema hacia la parte izquierda hasta alcanzar una distancia de desplazamiento de 3 cm, o mejor dicho, que la distancia de alargamiento del tejido sea de exactamente 3 cm desde el punto medio, como se muestra en la figura IV32.



*Figura IV32. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente a un estiramiento hacia la izquierda de 3 cm de la zona A.*

En condiciones normales, es decir, previo al alargamiento la tensión que existe en el punto de medida se representa según la siguiente figura IV33.



*Figura IV33. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida previo a la realización del estiramiento.*

Podemos observar que en condiciones normales tenemos una tensión fija de 2.64v, teniendo en cuenta que estamos midiendo aproximadamente en el punto medio del tejido, es una tensión que entra dentro de lo esperado, ya en este punto medio la caída de tensión producida es de aproximadamente la mitad.

El siguiente paso en esta fase tal y como ya se ha indicado se basa en realizar el alargamiento progresivo hacia la izquierda de 3cm. De forma que el procedimiento que se sigue en esta parte de la investigación es el siguiente:

1. Alargamos 3cm hacia la izquierda.
2. Dejamos durante un corto tiempo el tejido estirado en esta distancia prefijada para observar el comportamiento.
3. Por último, se deja que vuelva a la posición inicial.

Durante cada una de estas acciones se realiza la secuencia de medidas correspondiente de forma que obtenemos esta variación de la tensión eléctrica del tejido.

Según lo observado hasta este punto, la hipótesis de partida nos indica que cuando el tejido sufra este alargamiento, la resistencia eléctrica de la zona A va a disminuir, ya que se favorece el contacto entre los hilos conductores. Por lo tanto, al haber una mayor conductividad en esta zona, la caída de tensión será menor, por lo que el valor en la zona de medida debería disminuir también.

En la siguiente figura IV34 se representa la variación de la tensión eléctrica para el primer caso, donde existe un alargamiento hacia la izquierda.



Figura IV34. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la izquierda de 3 cm.

A primera vista se observa claramente la disminución de la tensión conforme se produce la deformación elástica hacia la izquierda tal y como esperábamos a priori.

Cuando dejamos el tejido estirado durante un tiempo determinado según la segunda línea de investigación obtenemos la siguiente figura IV35.



Figura IV35. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la izquierda y mantenerlo estirado.

Podemos observar que la tensión se mantiene constante y con un valor más bajo que el punto de partida, en concreto 0.476 V, lo cual indica que se ha producido un aumento de la conductividad eléctrica en la zona A fruto de este estiramiento provocando una caída de tensión más significativa en el punto de medida, que permanece constante cuando deja de realizarse este estiramiento. Este valor tan próximo a cero, nos indica también que la resistencia eléctrica del tejido en la zona A es muy poca ya que prácticamente el potencial está próximo a cero, y por eso en esta zona se comporta ya casi como un cortocircuito. Lo que equivale a decir que los

cambios del tejido de estar estirado a no estarlo supone desde el punto de vista de comportamiento eléctrico un aumento de su conductividad eléctrica de forma significativa.

Por último, cuando el tejido retorna a la posición original, sin estiramiento, de nuevo se produce un aumento de la tensión hasta un valor de tensión igual que había en el punto de partida. Este aumento es representado en la siguiente figura:



*Figura IV36. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de mantener un estiramiento hacia la izquierda y volver a la posición inicial.*

Es importante resaltar ya en una primera aproximación que el valor de tensión al que vuelve el tejido es diferente que antes de someterlo a la deformación elástica, lo cual puede estar provocado en cierta medida:

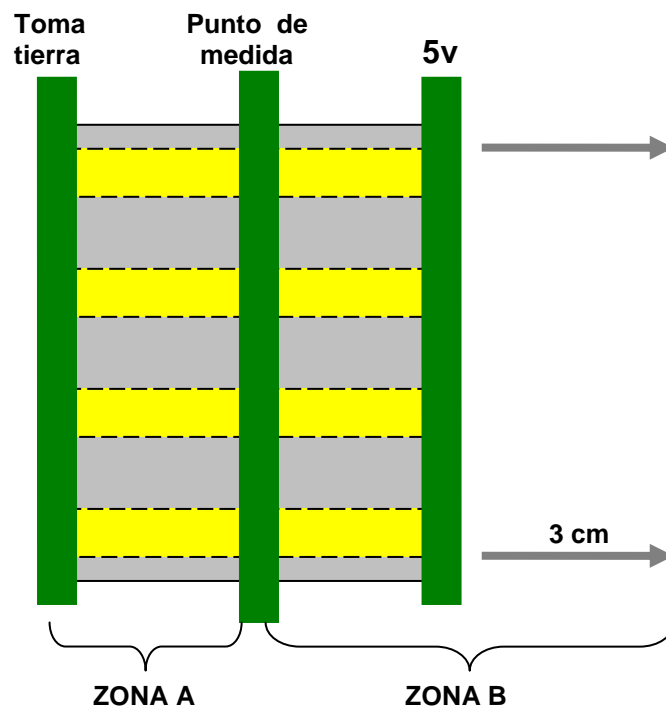
1. Por un lado, por la poca robustez del banco de ensayos ya que produce modificaciones de la posición del tejido sobre el banco mientras se realizan las medidas de estiramiento, lo cual provoca que cuando se produce la recuperación este movimiento derivado de la poca fijación del tejido genera los cambios de conductividad en el punto de medida con respecto al inicio.
2. Por otro lado, porque el tejido sufre un cambio estructural tanto en la zona A como en B al realizar el estiramiento, provocado porque finalmente no ha mejorado como se esperaba la recuperación del tejido al introducir la fibra de elastano.

Aun así, el estudio de la simetría está centrado en las variaciones por lo que no nos afectan en este primer análisis estas desviaciones, pero habrá que tenerlas en cuenta y solucionarlas en el siguiente apartado al realizar el análisis de la reproducibilidad de las medidas.

En base a estas tres medidas dentro de esta línea de actuación de desplazamiento y estiramiento hacia la izquierda, nos demuestra como ya se sabía que la elasticidad o alargamiento del tejido va directamente ligada a su resistencia eléctrica, y que además una variación de 3cm en el tejido provoca casi un cortocircuito en esa zona, y por lo tanto una variación significativa de la caída de tensión en el punto de medida.

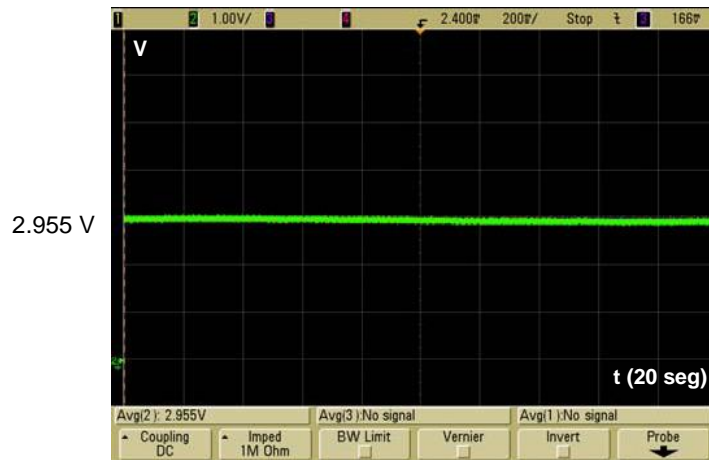
## B – Deformación elástica hacia la derecha

Siguiendo el mismo procedimiento que en la fase anterior se somete el tejido a una tensión uniforme de estiramiento desde la barra derecha del banco de ensayo (lámina de alimentación) hacia la parte derecha hasta alcanzar una distancia de desplazamiento de 3 cm, o mejor dicho, que la distancia de alargamiento del tejido sea de exactamente 3 cm desde el punto medio, como se muestra en la figura IV37.



*Figura IV37. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente a un estiramiento hacia la derecha de 3 cm de la zona A.*

En condiciones normales, es decir, previo al alargamiento la tensión que existe en el punto de medida se representa según la siguiente figura IV38.



*Figura IV38. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida previo a la realización del estiramiento.*

Podemos observar que en condiciones normales tenemos una tensión fija de 2.955 V. Este valor prácticamente se corresponde con el valor final después de la recuperación del tejido una vez estirado hacia la izquierda, aunque difiere como ya se ha explicado de la situación de partida anterior (2.955 V frente a los 2.640 V de la fase anterior), no va a ser influyente esta diferencia debido a que lo que estamos midiendo en estas fases son variaciones, y no tratamiento directo de los valores absolutos.

De igual forma que antes, seguidamente se realiza el alargamiento progresivo hacia la derecha de 3cm. De forma que el procedimiento que se sigue en este parte de la investigación es el siguiente:

1. Alargamos 3cm hacia la derecha.
2. Dejamos durante un corto tiempo el tejido estirado en esta distancia prefijada para observar el comportamiento.
3. Por último, se deja que vuelva a la posición inicial.

Durante cada una de estas acciones se realiza la secuencia de medidas correspondiente de forma que obtenemos representada directamente desde el osciloscopio la variación de la tensión eléctrica del tejido.

Al contrario que en el estiramiento a la izquierda, la hipótesis de partida nos indica que cuando el tejido sufra la deformación elástica hacia la derecha, la resistencia eléctrica en la zona B va a disminuir, ya que se favorece el contacto entre los hilos conductores. Por lo tanto, al haber una mayor conductividad en esta zona, la caída de tensión en esta zona será menor que con respecto a la posición inicial sin deformación, y como consecuencia el valor del potencial eléctrico en el punto de medida aumentará.

En la siguiente figura IV39 se representa la variación de la tensión eléctrica para el primer caso, donde existe un alargamiento hacia la derecha.





Figura IV39. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la derecha de 3 cm.

Tal y como era de esperar se produce un aumento de la tensión eléctrica fruto de esta disminución de la resistencia eléctrica en la zona B al producir el alargamiento.

Cuando dejamos el tejido estirado durante un tiempo determinado según obtenemos la siguiente figura IV40.



Figura IV40. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la derecha y mantenerlo estirado.

Podemos observar que la tensión se mantiene constante y con un valor uniforme mientras mantenemos el estiramiento. Es importante también resaltar que la variación que se observa es muy significativa, ya que la diferencia de caída de tensión observada entre el tejido sin estirar y estirado es de casi el doble, hasta alcanzar un valor cercano a 5 V, es decir, se produce una situación de cortocircuito en la zona B, por lo que el tejido estirado se comporta como un buen conductor.

Por último, cuando el tejido retorna a la disposición original, sin estiramiento, de nuevo se produce la disminución de la tensión hasta un valor de tensión algo superior al de partida. Esta disminución es representada en la figura IV41.



*Figura IV41 Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de mantener un estiramiento hacia la derecha y volver a la posición inicial.*

Aunque no se aprecie en la figura IV41, se observa que la variación de retorno se produce hacia un valor de tensión diferente al de partida, hasta el valor aproximado de 3.2 V, debido a los mismos motivos que ya se han comentado, estiramiento y recuperación y movimiento del tejido en la propia estructura lo que afecta significativamente a la conductividad de las zonas A y B, o bien, fruto de la no recuperación completa del tejido aun habiendo incorporado la fibra elástica.

En base a estas consideraciones, y con el objeto de realizar el estudio de deformación elástica que nos permita evaluar la reproducibilidad de las medidas como consecuencia de la incorporación de la fibra elástica de elastano en el tejido y en consecuencia la mejora del comportamiento de recuperación del tejido, se necesita diseñar un nuevo banco de ensayo mucho más robusto donde se pueda minimizar al máximo el error que está sujeto a la movilidad del tejido debido a la poca fijación del mismo en la propia bancada de pruebas. De esta forma, este nuevo diseño del sistema de medida tiene que permitir que el tejido quede fijado de forma rígida sin tener posibilidad de movimiento y cambio durante la realización del estiramiento y recuperación para la toma de las medidas, sin sufrir desplazamiento en la propia estructura del soporte, sin apenas cambio estructural.

#### IV.1.2.3.- REPRODUCIBILIDAD DE LA RESPUESTA ELÉCTRICA FRENTE AL ESTIRAMIENTO.

Una vez analizado en el apartado anterior esta relación de la simetría de la respuesta eléctrica en función del grado de estiramiento de un tejido de punto se plantea en este nuevo punto estudiar la reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente al estiramiento.

Para ello, se ha desarrollado un nuevo escenario con una adaptación del último banco de ensayo utilizado para el mismo tejido de punto con que se han llevado a cabo los estudios anteriores y que lleva incorporado la fibra de elastano para conferirle una mejor recuperación del mismo. El tejido de punto al igual que en los anteriores está compuesto por bandas conductoras y aislantes, representadas con los colores gris y amarillo respectivamente.

En este nuevo banco de ensayo que está representado en la figura IV18 nos encontramos el tejido sujeto en sus extremos por las láminas conductoras donde se le aplica un voltaje de 5 V de derecha a izquierda. De igual forma que en el anterior, la medida se realiza a través del soporte conductor que atraviesa el tejido en el sentido de las columnas que está situado en la parte central del sistema y que se encuentra fijo sin tener ninguna libertad de movimiento. La novedad de este banco de ensayos está en que el tejido solo tiene capacidad de deformación elástica por uno de los extremos, en concreto por el izquierdo, y no por los dos extremos como en el caso anterior. De forma que en el lado derecho, soporte de alimentación, y la banda de medida se encuentran ancladas a la propia estructura fija del sistema, y por el otro extremo, es donde se va a producir una deformación elástica del tejido totalmente controlada mediante un dinamómetro que tira del soporte de forma constante y controlada para asegurar la repetitividad de las medidas.

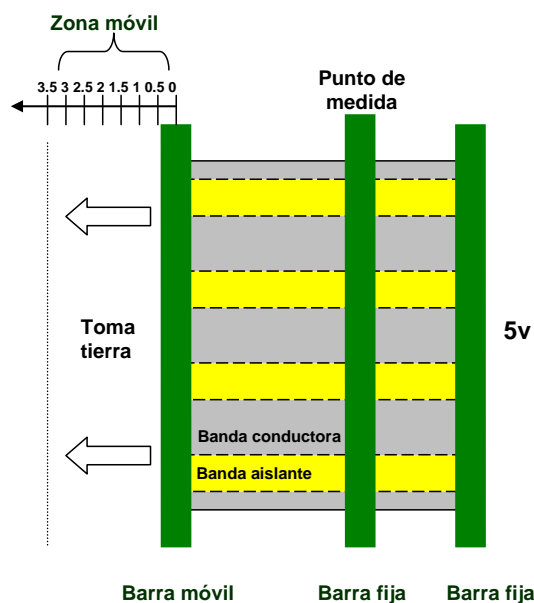


Figura IV42. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente a un estiramiento cuantificado.

La barra móvil se desplaza de forma constante en 0.5 cm desde 0 hasta los 3.5 cm. Lo más importante es quizás que este banco permite deformaciones cortas y controladas tanto de estiramiento como de recuperación, lo cual nos va a permitir estudiar de forma exhaustiva la reproducibilidad.

En base a esto, se han realizado las medidas por nivel de tensión, en la cual se ha definido una posición inicial como la posición 0, en la cual el tejido se encuentra en posición relajada sin ser sometido a ningún tipo de estiramiento, de forma que el valor en este punto es estable. A partir de este punto, se han definido las posiciones sucesivas según la distancia (en cm) al punto 3.5, obteniendo así las posiciones de 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, y 3.5, tal y como se representa en la figura IV42.

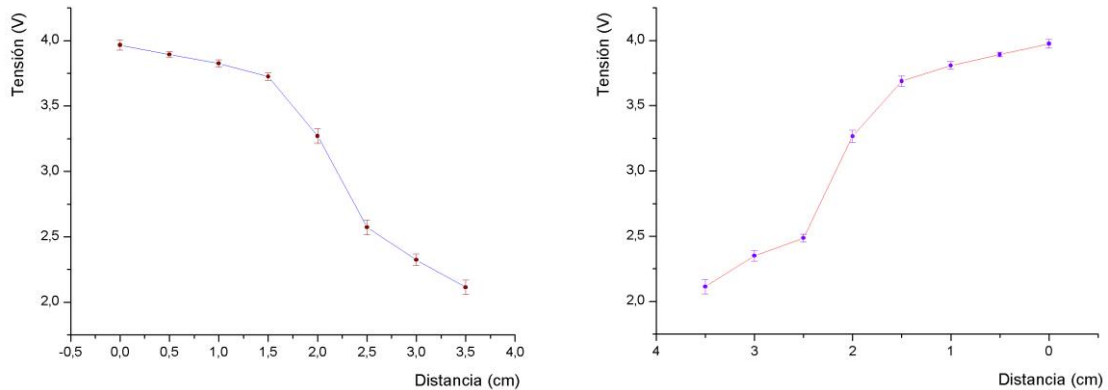
El procedimiento que se ha definido para realizar este estudio ha sido el de realizar hasta diez repeticiones de estiramiento del tejido y recuperación del mismo tomando en cada uno de estas posiciones el valor de tensión eléctrica. La secuencia ha sido la de estiramiento seguido de una recuperación de retorno igual a la de alargamiento y desde ese punto de nuevo estiramiento y así hasta 10 veces.

Los resultados obtenidos se representan en la siguiente tabla IV15.

*Tabla IV15. Valores de tensión eléctrica para el estudio de la reproducibilidad.*

Distancia (cm)	Tensión (V); Medidas de estiramiento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
0	3.90	3.97	3.95	4.01	3.98	3.94	3.92	4.02	3.97	4.00	<b>3.97</b>	0.04
0.5	3.86	3.90	3.88	3.92	3.90	3.88	3.88	3.93	3.89	3.90	<b>3.89</b>	0.02
1	3.81	3.85	3.80	3.87	3.85	3.79	3.80	3.85	3.81	3.82	<b>3.82</b>	0.03
1.5	3.70	3.76	3.72	3.76	3.69	3.70	3.71	3.75	3.70	3.75	<b>3.72</b>	0.03
2	3.22	3.31	3.26	3.30	3.19	3.20	3.25	3.32	3.29	3.36	<b>3.27</b>	0.07
2.5	2.50	2.65	2.56	2.63	2.50	2.52	2.61	2.61	2.53	2.61	<b>2.57</b>	0.06
3	2.29	2.37	2.26	2.35	2.28	2.30	2.38	2.35	2.29	2.36	<b>2.32</b>	0.04
3.5	2.05	2.15	2.11	2.18	2.01	2.10	2.17	2.14	2.07	2.15	<b>2.11</b>	0.06
Distancia (cm)	Tensión (V); Medidas de recuperación											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
3.5	2.05	2.15	2.11	2.18	2.01	2.10	2.17	2.14	2.07	2.15	<b>2.11</b>	0.07
3	2.31	2.40	2.36	2.41	2.31	2.32	2.39	2.37	2.33	2.30	<b>2.35</b>	0.04
2.5	2.45	2.52	2.50	2.51	2.44	2.47	2.49	2.45	2.52	2.51	<b>2.49</b>	0.03
2	3.18	3.25	3.30	3.29	3.25	3.20	3.27	3.30	3.32	3.30	<b>3.27</b>	0.05
1.5	3.65	3.71	3.75	3.75	3.69	3.63	3.70	3.69	3.67	3.64	<b>3.69</b>	0.04
1	3.80	3.83	3.85	3.84	3.79	3.77	3.81	3.83	3.80	3.76	<b>3.81</b>	0.03
0.5	3.89	3.88	3.90	3.90	3.87	3.86	3.92	3.90	3.91	3.89	<b>3.89</b>	0.02
0	3.97	3.95	4.01	3.98	3.94	3.92	4.02	3.97	4.00	3.99	<b>3.98</b>	0.03

Al representar estos valores de tensión eléctrica para la deformación por estiramiento y su posterior recuperación se obtienen las siguientes gráficas.



*Figura IV43. Variación de la tensión eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de estiramiento y recuperación para el estudio de la reproducibilidad.*

Del análisis de estas gráficas y resultados obtenidos se observa que para la deformación elástica del tejido cuando se estira durante 3.5 cm se produce una caída de tensión de 1.85 V de valor medio, lo cual es coherente en base a los resultados obtenidos hasta ahora en los apartados anteriores, como también lo es el hecho que se produzca esta disminución debido a que el estiramiento se está produciendo hacia la izquierda y en consecuencia está aumentando la conductividad eléctrica en la zona que comprende al punto de medida y la zona de estiramiento.

De igual forma si realizamos el análisis contrario al producirse la recuperación del tejido en 3.5 cm se produce de nuevo el aumento de tensión eléctrica con un valor medio de 1.86 V después de realizar 10 medidas sucesivas de estiramiento y recuperación. De nuevo es coherente este aumento derivado del aumento de la resistencia eléctrica en esta zona.

De estas gráficas se aprecia también que entre el estiramiento de 1 cm comprendido entre 1.5 cm y 2.5 cm se produce de forma significativa la caída de tensión, exactamente un valor medio de 1.15 V, lo cual supone el 62% de la disminución de tensión total. Además, se puede comprobar el mismo efecto en la recuperación del tejido, con un aumento en este caso de 1.20 V, un 64% de la recuperación en tan solo un intervalo de 1 cm (un 28% de la distancia total). Estos valores nos indican que en una franja estrecha y específica durante el estiramiento del tejido se produce el paso de contacto entre las fibras conductoras lo que provoca un salto cualitativo relevante de la conductividad del tejido en esa zona. Y viceversa en el caso de la recuperación, coincidiendo incluso esta franja de distancia de recuperación con la de estiramiento.

#### IV.1.2.4.- CONCLUSIONES PARCIALES.

En base a los resultados obtenidos en este apartado, podemos destacar las siguientes conclusiones parciales alcanzadas en este apartado:

En primer lugar, en cuanto al estudio de homogeneidad en las medidas de conductividad eléctrica se ha diseñado un banco de ensayos que permite medir los valores de conductividad eléctrica en varios puntos del tejido al disponer en sentido de las columnas una franja muy conductora de hilo de cobre y realizar medidas en puntos concretos de la misma. Además, éste se comporta como un circuito en paralelo donde cada una de las resistencias la compone la banda conductora por donde pasa la corriente eléctrica de un extremo al otro. Y que estos valores de resistencia eléctrica de cada banda son distintos entre sí. Por lo que, podemos conseguir un sistema totalmente simétrico si conseguimos que los valores de potencial en los puntos A, B y C coincidan, lo que equivaldría a decir que  $R1 = R2 = R3$ .

En segundo lugar, se ha llevado a cabo el estudio de simetría, diferenciando una deformación por elongación a izquierda y derecha, e incorporando fibra elástica de elastano para mejorar la recuperación del tejido, así como la optimización del propio banco de pruebas. De esta forma, este nuevo diseño del sistema de medida tiene permite que el tejido quede fijado de forma rígida sin tener posibilidad de movimiento y cambio durante la realización del estiramiento y recuperación para la toma de las medidas en un sentido y en otro. Los valores obtenidos muestran que la resistencia eléctrica disminuye cuando el estiramiento se produce a la derecha, y aumenta cuando este se produce a la izquierda. En este punto, a pesar la introducción de elastano en el tejido, nos encontramos con valores de recuperación del tejido muy diferentes a los iniciales, lo que nos indica que continúa habiendo una necesidad de optimizar el banco de ensayos para que sea más robusto y permita una recuperación total del tejido.

A continuación y como última parte de este apartado, para la realización del estudio de deformación elástica que nos permita evaluar la reproducibilidad de las medidas se ha optimizado aún más el banco de ensayo mucho más robusto donde se minimiza al máximo el error que está sujeto a la movilidad del tejido debido a la poca fijación del mismo en la propia bancada de pruebas.

En este sentido, en lo que respecta al estudio de la reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente a la deformación elástica podemos decir que el tejido presenta una muy buena repetitividad de las medidas realizadas con los que podemos sacar las siguientes conclusiones parciales al respecto:

- por un lado, que el tejido de punto con la incorporación de la fibra elastano ha mejorado significativamente su comportamiento elástico y su recuperación hasta el valor inicial, ya que para 10 repeticiones realizadas la desviación estándar ha sido muy baja.
- Por otro lado, se observa también de los resultados obtenidos que los valores de inicio del estiramiento o del inicio de cada repetición son muy parecidos y no presentan una tendencia de aumento o de disminución, lo que equivale a decir que en el tejido no se ha producido variación estructural para estas 10 medidas, debido de nuevo al buen comportamiento de recuperación del tejido

elástico empleado y a que el grado de estiramiento (3.5 cm) se estima que está muy por debajo del umbral de deformación plástica del mismo.

- Además, que la caída de tensión significativa se produce en apenas 1 cm, lo cual equivale a decir que existe una zona concreta muy pequeña donde el sensor de estiramiento aumenta su sensibilidad, por lo que podremos utilizarlo en aplicaciones donde se necesite un rango de variación relativamente baja.
- Y por último, además del tejido, es importante también resaltar que esta reproducibilidad de las medidas es fruto también de la robustez del método de medida, al estar el tejido mucho más fijado a la propia estructura lo que minimiza el efecto de deriva que podrían presentar las medidas por el movimiento del mismo sobre los soportes.

En definitiva, atendiendo a estas consideraciones particulares, y en el punto en el que nos encontramos donde se ha llegado a diseñar y validar un tejido capaz de medir la deformación elástica que se produce en un tejido por la propia variación de la respuesta eléctrica, con un nivel de sensibilidad por debajo de un centímetro de estiramiento, se plantea la fabricación de un textil inteligente sensible a la deformación por elongación y su utilización como sensor de respiración.

#### IV.1.3.- Fabricación de un textil inteligente sensible a la deformación por elongación para su utilización como sensor de respiración

En base a los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se ha demostrado que ha sido posible desarrollar un tejido de punto que presenta unas características de resistencia eléctrica específicas, y donde en una franja de estiramiento determinada inferior a 1 cm, es capaz de sufrir una variación significativa de los valores de tensión eléctrica, en concreto, un aumento de su conductividad, pudiendo incluso parametrizar y estandarizar esta variación. En consecuencia, este tejido de punto junto con la fuente de alimentación y medición de señal eléctrica, tal y como se ha representado en los distintos bancos de ensayos desarrollados y optimizados, puede ser empleado en su conjunto como un sensor textil con el objeto de medir variaciones de estiramiento. Él cual, atendiendo a su potencialidad en su aplicación final, se podría considerar como parte de un producto textil inteligente capaz de variables repetitivas de deformación y recuperación. Para ello, se plantea en esta fase desarrollar una banda textil de un determinado espesor que a su vez quede incorporada dentro de la configuración de cualquier otro tejido de punto convencional, para aplicaciones inteligentes donde sea de interés medir la variación del grado de estiramiento del tejido o la prenda.

En este apartado, y a modo de conclusión de esta primera parte del trabajo experimental de la presente tesis doctoral, con el objeto de poner de manifiesto el uso de este sensor textil en alguna aplicación concreta y práctica, se ha planteado el desarrollo de un tejido de punto que se emplea de forma convencional en indumentaria, en concreto un body de bebé, en el que se ha integrado dentro de su propia estructura tejida la banda conductora que actúa como sensor de variación eléctrica fruto del cambio de deformación elástica que se produce en la respiración del bebé. Y así conseguir evaluar el funcionamiento de este sensor desarrollado en una aplicación concreta.

De esta forma, como hipótesis de partida se considera que durante el proceso de inspiración y espiración del bebé se produce un cambio en el perímetro corporal del bebé en la zona del tórax y del abdomen, lo cual si incorporamos una banda del tejido sensor de forma transversal podremos medir el grado de estiramiento al que está sometido esta banda durante la respiración, detectando así la variación de la tensión eléctrica, y en definitiva, conseguiremos monitorizar la respiración del bebé.

##### IV.1.3.1.- ESTUDIO DE LA MEDIDA DE DEFORMACIÓN POR ESTIRAMIENTO EN TORAX O ABDOMEN.

En base al estudio bibliográfico, se determina que la zona más aconsejable para incorporar la banda textil para medir la respiración del bebé es la zona del abdomen [168]. La respiración abdominal en bebés y niños es un proceso natural e instintivo, y en la medida que los niños van creciendo se va haciendo más significativa la respiración torácica. La respiración abdominal en bebés es beneficiosa ya que les permite conseguir más oxígeno que la respiración torácica o de pecho. Además, en un bebé o niño no hay impedimento físico a producirse este tipo de respiración, ya que no hay mucha masa muscular, es más prominente (con lo cual se produce un mayor cambio en el volumen, lo que implica un mayor estiramiento de la banda sensórica), y



fisiológicamente parte de los pulmones se encuentran en la parte media baja (detrás de los riñones), por lo que se favorece la respiración abdominal frente a la torácica.

De esta forma, se plantea el diseño de un body de bebé donde se incorpora la banda textil en la zona abdominal, justo debajo del ombligo, siendo ésta la zona que más variación va a presentar de estiramiento y recuperación durante la fase de inspiración y espiración respectivamente.

#### IV.1.3.2.- DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SENSOR TEXTIL POR DEFORMACIÓN POR ESTIRAMIENTO PARA MEDIDA DE RESPIRACIÓN.

Una vez establecido que la zona más apropiada para detectar los cambios de deformación por estiramiento en un bebé entre 0 y 24 meses es el perímetro abdominal, y además cuantificado el nivel de deformación producido, el cual se encuentra en el intervalo comprendido entre los 2.5 y 7.5 mm de estiramiento, se plantea en este nuevo apartado el desarrollo de la banda sensor textil capaz de detectar y cuantificar esta variación.

Para ello se ha diseñado un nuevo banco de ensayos en base a los resultados obtenidos en los apartados anteriores y que servirá a partir de ahora como herramienta de ensayos para el diseño de un sensor textil por deformación elástica con un nivel de sensibilidad específico, en este caso tal y como se ha comentado debe ser efectivo entorno a los 5 mm de elongación. Este banco de ensayos ha sido descrito en el apartado III.2.3.3. y se muestran fotografías del mismo en la Figura III29.

Tal y como se ha anticipado, la idea de este apartado es diseñar un tejido inteligente capaz de incorporar en un body de bebé y que sea capaz de medir la frecuencia de respiración del mismo atendiendo a la variación de deformación elástica que se produce durante las fases de inspiración y espiración, y que a su vez produzca una variación de resistencia eléctrica de forma constante y reproducible en el tiempo. Para ello, se ha definido que este tejido inteligente debe ser un sensor textil, el cual en base a las experiencias anteriores recogidas en los apartados previos de la presente tesis doctoral, va a ser un tejido de punto, en concreto uno de los que se han utilizado en los primeros capítulos de este trabajo, el tejido de punto por trama con dos entradas de hilo; por un lado, hilo de fibra cortada de algodón con mezcla íntima de acero inoxidable (10%), y la segunda entrada es un hilo de elastano para favorecer la recuperación del mismo. Además, se considera que este tejido debe ser configurado como una banda textil con un espesor y largo a determinar, de forma que esta banda sea integrada en el tejido convencional de la aplicación final; body de bebé, en la zona abdominal de forma transversal.

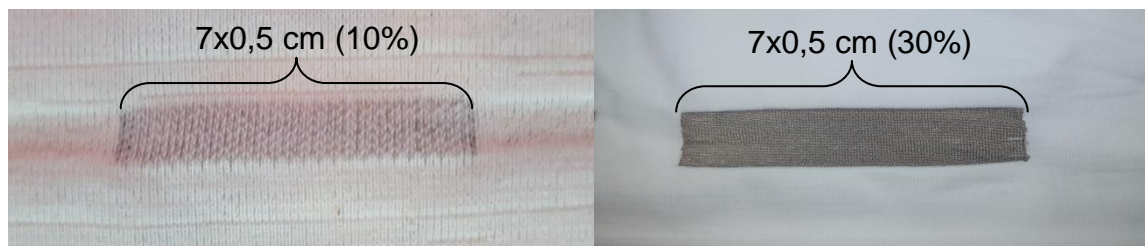
Con objeto de que el sensor sea sensible a la variación de resistencia eléctrica que se produce en el intervalo inferior a 1cm de estiramiento, y en base a los resultados de apartados anteriores se sabe que la resistencia eléctrica de esta banda tiene que estar próxima a  $100\Omega/\text{cm}$ .

En concreto se han seleccionado dos variables de estudio para poder diseñar la banda más apropiada para la aplicación concreta:

- Variable experimental 1: variando el porcentaje metálico de hilo conductor en la banda conductora del tejido. Se consideran dos tipologías de hilo a estudiar, del 10 y 30% de acero inoxidable en la mezcla íntima del hilo conductor, para unos valores fijos de longitud y espesor de la banda conductora en el tejido de punto (se plantea a priori 7 y 0,5 cm respectivamente).
- Variable experimental 2: y una vez seleccionado el porcentaje más óptimo de fibra metálica de hilo conductor, se va a variar el ancho y largo de la banda, teniendo en cuenta la aplicación final (body de bebé): 3, 7 y 11 cm de largo y un ancho comprendido entre 0,5 y 1 cm.

### Variable experimental 1

En la figura IV44 se muestran fotografías de los dos tejidos desarrollados con un 10 y 30% de hilo conductor, los cuales referenciamos como tejido 10% y tejido 30%.



*Figura IV44. Fotografías de los dos tejidos con banda conductora textil referenciados como tejido 10% (izquierda) y tejido 30% (derecha).*

Estos tejidos se colocan y se fijan al banco de ensayos de estiramiento y se miden los valores de variación de resistencia eléctrica en función del estiramiento provocado por la fuerza ejercida por un dinamómetro, entre los dos puntos de medida definidos, que tienen una separación de 7 cm, la cual se va alargando en la medida que se estira el tejido en el banco de ensayos. Siguiendo el método de ensayo del apartado anterior se realiza la medida repetida 10 veces siguiendo este procedimiento:

- 1) Se toma la medida inicial (en reposo).
- 2) Se aplica una fuerza de 0.25 N de forma progresiva tomando la medida hasta los 2N.
- 3) Se recupera el tejido tomando la medida cada 0.25 N en sentido contrario hasta que el tejido vuelve a la posición inicial.
- 4) Se repite el mismo experimento hasta 10 veces.

De esta forma, los resultados obtenidos se representan en la siguiente tabla IV16 para el tejido banda textil con un 10% de hilo conductor.

Tabla IV16. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10%.

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de estiramiento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
<b>0</b>	258	268	270	250	245	252	266	258	239	247	<b>255,3</b>	<b>10,5</b>
<b>0.25</b>	120	145	133	129	121	140	136	122	115	126	<b>128,7</b>	<b>9,7</b>
<b>0.50</b>	59	75	75	80	69	74	85	60	63	77	<b>71,7</b>	<b>8,7</b>
<b>0.75</b>	52	63	70	79	65	70	80	63	60	74	<b>67,6</b>	<b>8,7</b>
<b>1.00</b>	48	61	62	76	67	68	78	65	58	75	<b>65,8</b>	<b>9,2</b>
<b>1.25</b>	47	60	62	70	60	66	77	58	59	73	<b>63,2</b>	<b>8,6</b>
<b>1.50</b>	50	56	60	66	57	53	54	59	55	69	<b>57,9</b>	<b>5,9</b>
<b>1.75</b>	52	58	58	57	55	55	50	53	54	63	<b>55,5</b>	<b>3,7</b>
<b>2.00</b>	48	58	56	59	55	52	48	49	51	64	<b>54,0</b>	<b>5,3</b>

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de recuperación											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
<b>2.00</b>	48	58	56	59	55	52	48	49	51	64	<b>54,0</b>	<b>5,3</b>
<b>1.75</b>	49	63	56	60	53	50	52	48	53	69	<b>55,3</b>	<b>6,8</b>
<b>1.50</b>	49	65	59	63	59	58	55	52	56	72	<b>58,8</b>	<b>6,6</b>
<b>1.25</b>	53	66	63	60	62	60	59	55	60	74	<b>61,2</b>	<b>5,8</b>
<b>1.00</b>	60	70	66	68	62	61	58	61	60	75	<b>64,1</b>	<b>5,4</b>
<b>0.75</b>	65	72	70	76	64	68	73	71	62	78	<b>69,9</b>	<b>5,2</b>
<b>0.50</b>	79	86	71	85	70	73	85	89	69	80	<b>78,7</b>	<b>7,5</b>
<b>0.25</b>	136	140	130	125	138	132	141	115	137	149	<b>134,3</b>	<b>9,4</b>
<b>0</b>	268	270	250	245	252	266	258	239	247	259	<b>255,4</b>	<b>10,5</b>

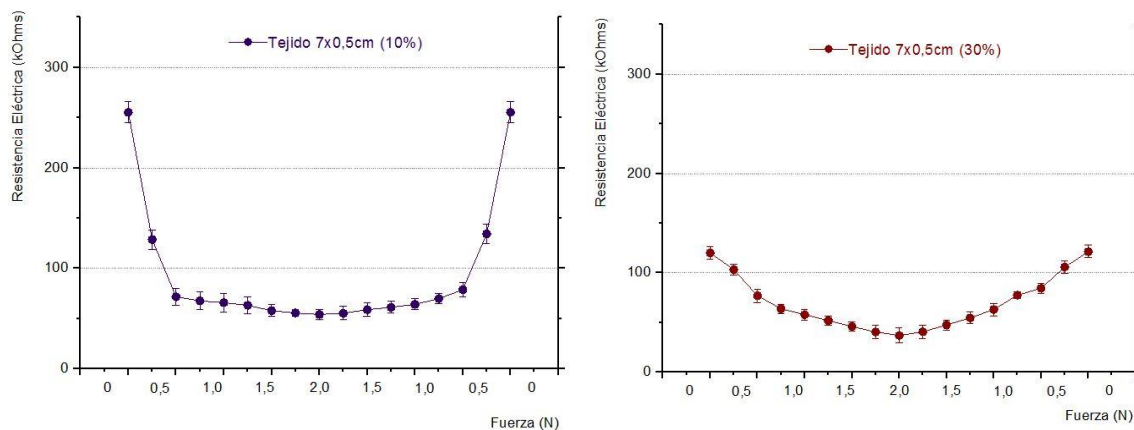
De igual forma, los valores de resistencia eléctrica para el tejido con un 30% de hilo conductor se representan en la tabla IV17.

Tabla IV17. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 30%.

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de estiramiento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
<b>0</b>	115	110	125	123	130	121	116	118	116	126	<b>120,0</b>	<b>6,1</b>
<b>0.25</b>	105	103	113	110	108	98	97	95	101	102	<b>103,2</b>	<b>5,8</b>
<b>0.50</b>	70	72	80	83	71	70	80	71	85	87	<b>76,9</b>	<b>6,8</b>
<b>0.75</b>	63	65	71	68	68	65	58	59	58	63	<b>63,8</b>	<b>4,5</b>
<b>1.00</b>	50	55	63	67	60	63	55	55	52	58	<b>57,8</b>	<b>5,4</b>
<b>1.25</b>	42	50	52	58	55	58	53	50	50	50	<b>51,8</b>	<b>4,7</b>
<b>1.50</b>	39	42	45	48	40	54	52	47	45	47	<b>45,9</b>	<b>4,8</b>
<b>1.75</b>	35	38	35	40	32	54	51	42	37	40	<b>40,4</b>	<b>7,0</b>
<b>2.00</b>	35	30	28	38	30	52	46	40	32	38	<b>36,9</b>	<b>7,6</b>

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de recuperación											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
2.00	35	30	28	38	30	52	46	40	32	38	36,9	7,6
1.75	38	33	34	40	34	55	48	43	39	42	40,6	6,9
1.50	42	45	46	51	45	60	50	47	45	44	47,5	5,2
1.25	50	52	54	59	60	68	51	50	52	50	54,6	5,9
1.00	54	64	60	69	66	74	53	62	63	66	63,1	6,4
0.75	77	78	80	84	78	79	76	73	72	78	77,5	3,4
0.50	80	85	91	95	84	82	79	85	80	83	84,4	5,1
0.25	99	119	105	110	106	104	98	102	110	105	105,8	6,1
0	110	125	123	130	121	116	118	116	126	128	121,3	6,3

Al representar estos valores de resistencia eléctrica, tanto el estiramiento como la recuperación, de ambos tejidos frente a una fuerza constante que se ejerce sobre los mismos en el tiempo, obtenemos las siguientes gráficas:



*Figura IV45. Variación de la resistencia eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de la fuerza estiramiento y recuperación para dos bandas textiles con distinto porcentaje de hilo conductor*

Al analizar estas gráficas, se puede observar que tal y como se esperaba tanto en un tejido como en el otro se produce una reducción de la resistencia eléctrica cuando se produce un estiramiento del tejido, y un aumento cuando el tejido se recupera. Al comparar ambos tejidos, y en base a los requerimientos definidos para el sensor textil que se quiere desarrollar, se considera que el tejido referenciado como 10% cumple mejor con estas necesidades por varios factores que se analizan a continuación.

Entre ambos, el que presenta mayor interés para el presente trabajo, es aquel que el descenso de reducción de la resistencia eléctrica es más significativo, siendo éste el que presenta un 10% de hilo conductor frente al que lleva un 30%. En el primero de ellos se produce un descenso de unos 200 kΩ aproximadamente (pasando de valores de 255 kΩ hasta valores de 54 kΩ aproximadamente). En cambio en el segundo, el

descenso producido es de 120 k $\Omega$  a 37 k $\Omega$ , es decir, 83 k $\Omega$ . Además, es importante también resaltar que este descenso se produce durante los primeros momentos del estiramiento de tejido, en torno a los 0,5N de fuerza producida, lo cual es importante para conseguir que la banda de sensorización pueda actuar en los primeros momentos de estiramiento del tejido. Esta diferencia puede ser debida a que al disponer de un mayor porcentaje de hilo conductor el tejido resultante en estado de reposo dispone de una menor resistencia eléctrica (120 k $\Omega$  frente a 255 k $\Omega$  del tejido 30% frente a 10%), y en estado de deformación elástica los valores son ya más similares (37 k $\Omega$  frente a 54 k $\Omega$  del tejido 30% frente a 10%).

Por otro lado, si analizamos los valores de desviación estándar, tanto en uno como en otro no se aprecian diferencias significativas, y se observa como en ambos casos se pueden considerar como adecuados, lo que significa que los datos presentan una elevada reproducibilidad, y por lo tanto el nuevo banco de ensayos desarrollado para este análisis es lo suficientemente robusto para el fin último para el que está diseñado.

Al igual que en los estudios realizados en apartados anteriores, los valores de recuperación nos indican que el tejido recupera la posición inicial, y no se aprecia a estos niveles de fuerza que se aplica que haya una deformación plástica del tejido.

### Variable experimental 2

Tal y como ya se ha introducido anteriormente en este apartado, otra de las variables que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar un sensor textil capaz de medir el estiramiento de un tejido de punto, es la longitud y ancho de esta banda textil conductora que va a estar incorporada en el propio tejido de punto convencional, y para esta aplicación en concreto; tejido de punto que forma parte de un artículo infantil, body de bebé, el cual lleva integrado en el mismo una banda conductora textil que va a actuar de sensor de respiración.

Para ello, partiendo que esta banda va a estar compuesta del tejido de acero inoxidable al 10% en base a las conclusiones anteriores, se plantea a continuación trabajar en dos variables experimentales; longitud y ancho de la banda.

Para ello, en primer lugar se plantea variar la longitud de la banda manteniendo el ancho de la misma fijo (0,5 cm). Atendiendo a los resultados obtenidos en la variable experimental 1, donde la longitud entre los dos puntos de medida del tejido en la posición de reposo fue de 7 cm (ver Figura IV45 tejido 10%), y considerando que los resultados para esta medida han sido satisfactorios, se plantea trabajar con dos variables adicionales por encima y por debajo de esta longitud con objeto de ver el comportamiento. Es por ello, que se plantean tres longitudes distintas de estudio, a 3, 7 y 11 cm, partiendo de un ancho constante de 0,5 cm.

En la figura IV46 se muestran fotografías de los tres tejidos desarrollados con un 10% de hilo conductor de distinta longitud, los cuales referenciamos como tejido 3cm, tejido 7cm y tejido 11cm.

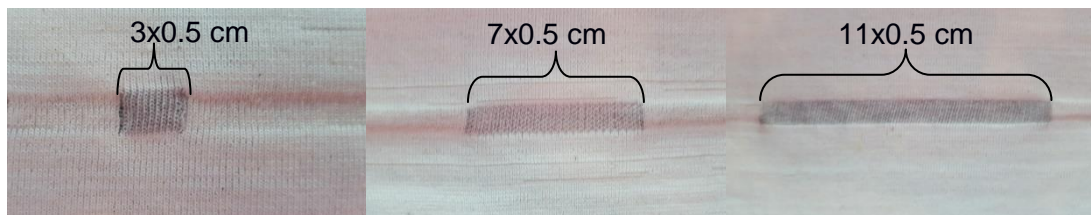


Figura IV46. Fotografías de los tres tejidos con banda conductora textil referenciados como tejido 3x0.5cm (izquierda), tejido 7x0.5cm (en el centro) y tejido 11x0.5cm (derecha).

De igual forma que en la primera variable experimental de este punto, estos tejidos se colocan y se fijan al banco de ensayos de estiramiento y se miden los valores de variación de resistencia eléctrica en función del estiramiento provocado por la fuerza ejercida por un dinamómetro. Siguiendo el método de ensayo del apartado anterior se realiza la medida repetida 10 veces siguiendo este procedimiento:

- 1) Se toma la medida inicial (en reposo).
- 2) Se aplica una fuerza de 0.25 N de forma progresiva tomando la medida hasta los 2N.
- 3) Se recupera el tejido tomando la medida cada 0.25 N en sentido contrario hasta que el tejido vuelve a la posición inicial.
- 4) Se repite el mismo experimento hasta 10 veces.

De esta forma, los resultados obtenidos se representan en la siguiente tabla IV18 para el tejido banda textil con un 10% de hilo conductor y 3cm de longitud de la banda conductora.

Tabla IV18. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10% hilo conductor y 3 cm de longitud de la banda conductora.

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de estiramiento											Media	Desviación
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
<b>0</b>	160	158	149	162	157	146	150	171	152	162	<b>156,7</b>	<b>7,6</b>	
<b>0.25</b>	85	90	100	93	99	85	96	91	95	101	<b>93,5</b>	<b>5,8</b>	
<b>0.50</b>	70	63	76	62	82	68	81	75	80	92	<b>74,9</b>	<b>9,4</b>	
<b>0.75</b>	62	60	65	58	79	68	65	76	76	85	<b>69,4</b>	<b>9,0</b>	
<b>1.00</b>	60	60	68	54	80	64	62	63	68	76	<b>65,5</b>	<b>7,8</b>	
<b>1.25</b>	55	59	60	50	75	62	63	58	60	78	<b>62,0</b>	<b>8,5</b>	
<b>1.50</b>	53	58	58	43	69	57	64	56	58	69	<b>58,5</b>	<b>7,7</b>	
<b>1.75</b>	55	57	57	48	65	55	69	52	59	65	<b>58,2</b>	<b>6,5</b>	
<b>2.00</b>	56	55	53	49	60	49	65	50	58	64	<b>55,9</b>	<b>5,9</b>	

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de recuperación											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
<b>2.00</b>	56	55	53	49	60	49	65	50	58	64	<b>55,9</b>	<b>5,9</b>
<b>1.75</b>	52	60	54	52	61	51	71	51	60	62	<b>57,4</b>	<b>6,5</b>
<b>1.50</b>	60	61	58	56	63	52	73	52	62	67	<b>60,4</b>	<b>6,5</b>
<b>1.25</b>	62	66	60	60	65	55	74	54	60	70	<b>62,6</b>	<b>6,3</b>
<b>1.00</b>	68	71	62	62	62	60	78	60	63	73	<b>65,9</b>	<b>6,2</b>
<b>0.75</b>	75	73	75	70	71	62	82	62	71	79	<b>72</b>	<b>6,4</b>
<b>0.50</b>	80	75	80	72	72	76	86	72	79	84	<b>77,6</b>	<b>5,0</b>
<b>0.25</b>	91	85	92	88	87	94	98	88	85	96	<b>90,4</b>	<b>4,6</b>
<b>0</b>	158	149	162	157	146	150	171	152	162	160	<b>156,7</b>	<b>7,6</b>

De igual forma, los valores de resistencia eléctrica para el tejido con un 10% de hilo conductor y 7 cm de longitud de la banda, son los mismos que se han mostrado anteriormente en la tabla IV16.

Y de igual forma, los valores de resistencia eléctrica para el tejido con un 10% de hilo conductor y 11 cm de longitud de la banda, se representan en la tabla IV19.

*Tabla IV19. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10% y 11 cm de longitud de la banda.*

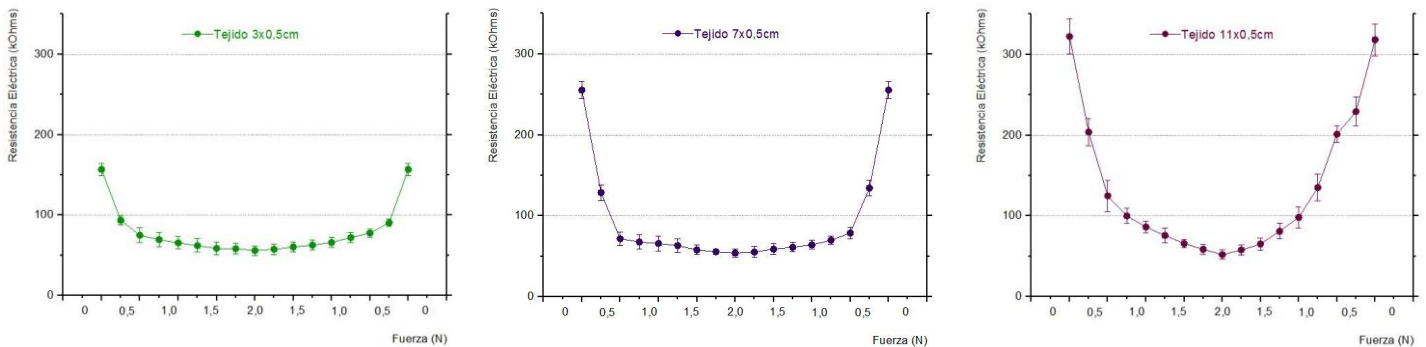
Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de estiramiento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
<b>0</b>	350	340	312	335	306	320	310	354	285	310	<b>322,2</b>	<b>21,9</b>
<b>0.25</b>	185	190	200	198	220	223	230	202	180	211	<b>203,9</b>	<b>16,8</b>
<b>0.50</b>	110	113	121	115	143	153	160	115	106	112	<b>124,8</b>	<b>19,6</b>
<b>0.75</b>	105	95	120	96	90	106	101	100	100	87	<b>100,0</b>	<b>9,3</b>
<b>1.00</b>	75	80	98	90	88	90	85	94	82	80	<b>86,2</b>	<b>7,1</b>
<b>1.25</b>	60	66	72	80	78	85	77	90	79	71	<b>75,8</b>	<b>8,8</b>
<b>1.50</b>	58	59	63	71	68	74	67	70	65	62	<b>65,7</b>	<b>5,3</b>
<b>1.75</b>	53	52	59	65	63	67	54	67	53	53	<b>58,6</b>	<b>6,3</b>
<b>2.00</b>	50	47	58	56	52	59	43	60	47	48	<b>52,0</b>	<b>5,9</b>

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de recuperación											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
<b>2.00</b>	50	47	58	56	52	59	43	60	47	48	<b>52,0</b>	<b>5,9</b>
<b>1.75</b>	54	52	62	65	63	66	50	62	50	55	<b>57,9</b>	<b>6,3</b>
<b>1.50</b>	60	62	65	74	69	80	62	64	54	61	<b>65,1</b>	<b>7,5</b>
<b>1.25</b>	84	92	100	83	77	82	74	70	69	78	<b>80,9</b>	<b>9,6</b>

<b>1.00</b>	90	107	112	106	109	115	88	77	89	88	<b>98,1</b>	<b>13,1</b>
<b>0.75</b>	130	133	145	150	144	157	148	106	120	118	<b>135,1</b>	<b>16,5</b>
<b>0.50</b>	190	198	204	210	200	220	210	188	190	202	<b>201,2</b>	<b>10,3</b>
<b>0.25</b>	202	215	224	238	230	247	254	203	234	245	<b>229,2</b>	<b>18,1</b>
<b>0</b>	340	312	335	306	320	310	354	285	310	310	<b>318,2</b>	<b>19,8</b>

Al representar estos valores de resistencia eléctrica, tanto el estiramiento como la recuperación, de ambos tejidos frente a una fuerza constante que se ejerce sobre los mismos en el tiempo, obtenemos las siguientes gráficas:



*Figura IV47. Variación de la resistencia eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de la fuerza estiramiento y recuperación para dos bandas textiles con hilo conductor 10% y distinta longitud de banda (3, 7 y 11 cm).*

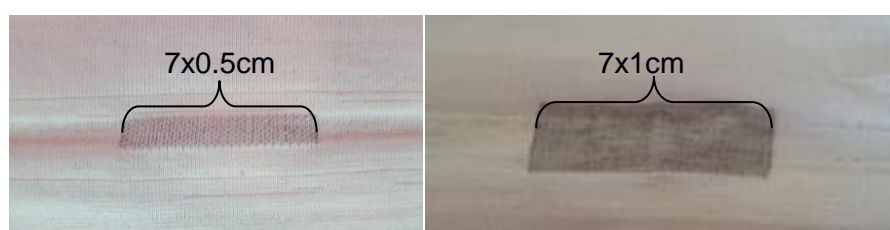
Al analizar estas gráficas, se puede observar en primer lugar que la distancia de la banda conductora no influye en el comportamiento de la variación de resistencia eléctrica, es decir, independientemente de la longitud de la banda existe una disminución de la resistencia eléctrica en los primeros momentos de la deformación elástica y se estabiliza rápidamente, y luego, durante la recuperación se vuelve al punto de partida. Así y todo, tomando un margen de seguridad de unos 100 k $\Omega$  aproximadamente por las desviaciones que se producen en la repetitividad de las medidas, podemos llegar a la conclusión que la distancia más óptima es la de 7 cm. Ya que la banda de 3cm partimos de valores de salida de 150 k $\Omega$  aproximadamente y se estabiliza a unos 60 k $\Omega$ , lo cual se puede considerar como una franja poco segura para un sensor de estas características donde el grado de sensibilidad va a ser determinante. Por otro lado, los valores a 11 cm se consideran como aceptables, pero los descartamos por dos razones principalmente:

- Por un lado, el comportamiento de la banda de 7 cm si observamos la figura IV47 es parecido a una forma en “U”, mientras que la de 11 cm adopta una forma más en “V”, con lo cual, buscando un descenso de la resistencia eléctrica más acuciado cuando aplicamos un pequeña fuerza al principio (para que el sensor detecte en el primer momento de variación de la deformación elástica), es mucho mejor en el de 7 que en el de 11cm.
- Y por otro lado, cuanto más larga sea la banda significa que más cantidad de hilo conductor va a necesitar, lo cual encarecerá el producto. En concreto pasar de 7 a 11 cm, supone un incremento de aproximadamente el 57% de coste debido al mayor consumo de hilo conductor.



De esta forma, entre las tres, seleccionamos la banda de 7 cm para desarrollar el sensor textil.

Tal y como estaba previsto, además de analizar la longitud de la banda, en esta segunda parte, tomando como referencia la longitud de 7cm, vamos a estudiar cómo afecta el comportamiento eléctrico tomando como variable el ancho de la banda textil conductora. Para ello, partiendo de los 0,5 cm de ancho, se ha desarrollado un tejido cuya banda textil conductora es de 1 cm de ancho por 7 cm de longitud, el doble de ancho. En la siguiente figura IV48 podemos observar los dos tejidos desarrollados que vamos a referenciar como tejido 0,5cm y tejido 1cm.



*Figura IV48. Fotografías de los dos tejidos con banda conductora textil referenciados como tejido 7x0.5cm (izquierda) y tejido 7x1cm (derecha).*

De nuevo se repite el mismo procedimiento para la toma de medidas de resistencia eléctrica siguiendo el mismo método de ensayo. De esta forma, los resultados obtenidos se representan en la siguiente tabla IV20 para el tejido banda textil con un 10% de hilo conductor de 7 cm de longitud y 1cm de ancho. Los valores comparativos equivalentes al tejido de 7cm de longitud y 0,5cm de ancho, son los mismos que en el estudio anterior y que se han representado en la tabla IV16.

*Tabla IV20. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10% y 7 cm de longitud y 1 cm de ancho de la banda textil.*

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de estiramiento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
<b>0</b>	270	285	290	275	280	265	255	243	240	238	<b>264,1</b>	<b>19,2</b>
<b>0.25</b>	135	140	141	160	156	150	139	140	155	146	<b>146,2</b>	<b>8,6</b>
<b>0.50</b>	75	80	90	105	98	88	78	96	90	87	<b>88,7</b>	<b>9,4</b>
<b>0.75</b>	60	74	63	75	70	80	75	85	80	69	<b>73,1</b>	<b>7,8</b>
<b>1.00</b>	52	62	60	70	63	73	63	76	76	68	<b>66,3</b>	<b>7,7</b>
<b>1.25</b>	52	69	52	63	60	68	60	66	75	76	<b>64,1</b>	<b>8,4</b>
<b>1.50</b>	50	65	49	60	52	58	59	59	62	65	<b>57,9</b>	<b>5,8</b>
<b>1.75</b>	51	60	47	56	50	58	53	58	59	60	<b>55,2</b>	<b>4,6</b>
<b>2.00</b>	50	53	45	53	52	50	48	48	55	59	<b>51,3</b>	<b>4,0</b>

Fuerza (N)	Resistencia eléctrica (kΩ); Medidas de recuperación											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	Desviación
2.00	50	53	45	53	52	50	48	48	55	59	51,3	4,0
1.75	51	54	50	58	52	48	49	50	50	63	52,5	4,7
1.50	55	59	52	62	55	56	53	49	56	65	56,2	4,7
1.25	60	57	53	69	60	60	59	62	62	70	61,2	5,1
1.00	64	60	52	73	70	61	58	63	63	73	63,7	6,7
0.75	75	70	63	80	78	78	68	70	68	78	72,8	5,7
0.50	80	73	59	85	83	79	75	82	76	85	77,7	7,8
0.25	125	130	128	145	120	128	133	125	120	136	129,0	7,6
0	285	290	275	280	265	255	243	240	238	251	262,2	19,5

Si comparamos gráficamente el comportamiento de la variación de la resistencia eléctrica para los tejidos, el de 0,5 cm de ancho y el de 1 cm de ancho;

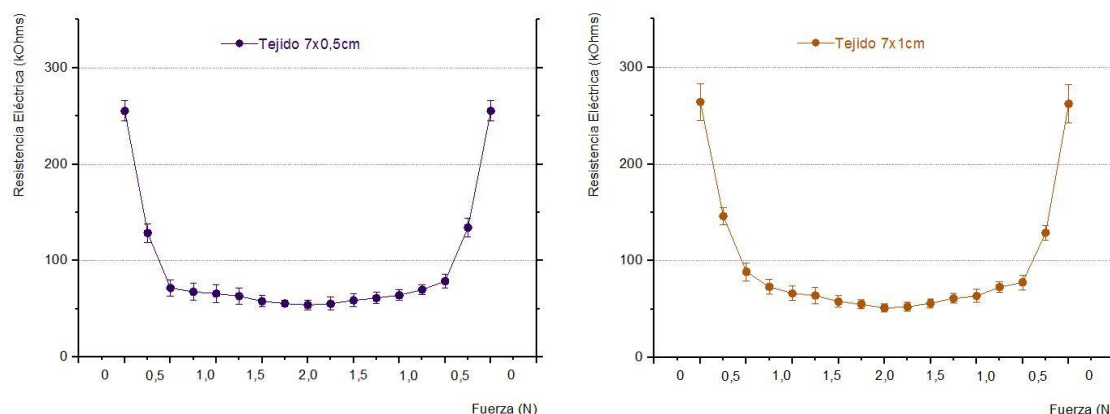


Figura IV49. Variación de la resistencia eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de la fuerza estiramiento y recuperación para dos bandas textiles con hilo conductor 10%, misma longitud de banda (7 cm), y diferente ancho de la banda textil (0,5 y 1 cm).

Al analizar estas gráficas, observamos que la variación del ancho de la banda no influye en el comportamiento eléctrico del tejido cuando se estira y recupera, ni tampoco en las variación de tensión eléctrica (variaciones muy similares por encima de los 150 kΩ), y además se puede apreciar una morfología de ambos gráficos muy similar. Por lo que, se selecciona la de 0,5cm preferiblemente a la de 1cm ya que el tejido resultante necesita de menor cantidad de hilo conductor.

De esta forma, y a modo de resumen de este apartado se concluye que el diseño de la banda textil conductora para incorporar en la configuración del body de bebé debe tener un 10% de fibra metálica, una longitud de 7 cm y un ancho de 0,5 cm.

#### IV.1.3.3.- FABRICACIÓN DE UN BODY DE BEBE CON SENSOR TEXTIL POR DEFORMACIÓN POR ESTIRAMIENTO INTEGRADO Y MONITORIZACIÓN DE LA RESPIRACIÓN.

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior donde se ha diseñado la configuración de la banda textil conductora, ésta se ha integrado en el diseño de una prenda textil, en concreto un body de bebé, con el objeto de poder sensorizar, y en consecuencia, monitorizar la respiración de un bebé. Para la ubicación de esta banda textil en la prenda ha seguido las mismas recomendaciones que se definen en el estudio de investigación para parametrizar y medir el grado de abertura en la zona abdominal de un bebé [168]. Se ha tomado como referencia que el grado de sensibilidad de la banda textil conductora de 7x0,5cm y 10% de hilo conductor va a ser suficiente para poder detectar esta variación del volumen abdominal sobre la fase de respiración, pero para poder conocer si realmente es así, se plantea realizar las pruebas con un sujeto real.

Paralelamente, a nivel de diseño y configuración de la prenda inteligente, se han definido los distintos componentes de conexión con el fin de integrar la parte electrónica con la textil, dándole prioridad a la comodidad y confortabilidad del usuario de la prenda, de forma que se eliminan los elementos no textiles en contacto con la piel y aumentando el nivel de la protección de los elementos evitando que los hilos conductores que realizan las conexiones se deshilachen y se pierda conductividad y alargando la vida útil de todos sus componentes. En base a estas consideraciones previas se lleva a cabo el diseño y fabricación del body de bebé inteligente:

- Por un lado, la banda textil conductora se ha integrado dentro del tejido de punto, utilizando el hilo conductor (10%), con las medidas especificadas en los estudios previos (7x0.5 cm). En la siguiente figura se observa una imagen del body con la banda textil.



*Figura IV50. Fotografías del body de bebe con la banda textil conductora en la zona abdominal.*

- Una vez fabricada la prenda, seguidamente, mediante bordado se ha incorporado canal de comunicación con el componente electrónico y fuente de alimentación. Para ello, se ha empleado un hilo textil conductor que parte de los dos extremos de la banda (electrodos), cuya función es doble; por un lado, llevar la tensión eléctrica que proporciona la fuente en uno de los lados del sensor, y por otro el otro lado, llevar esta señal eléctrica después del paso por el sensor textil (resistencia eléctrica) para medir la variación de tensión eléctrica que ha producido esta resistencia. El hilo textil conductor empleado es

un hilo de cobre con una conductividad alta ( $10^5 \text{ Ohms}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ). En la siguiente figura se muestra como mediante el bordado se garantiza que la conexión en los extremos de la banda sea robusta y con el mayor contacto posible para que la conexión sea adecuada.



*Figura IV51. Fotografías de la conexión del hilo conductor bordado con uno de los extremos del sensor textil*

- A continuación, se ha incorporado a la prenda las conexiones entre el hilo conductor textil y la parte electrónica (procesador) y fuente de alimentación (batería). Para ello se han utilizado botones automáticos macho y hembra, de forma que al ser elementos metálicos permite conducir la corriente eléctrica a través de ellos sin resistencia alguna. Además, de las distintas conexiones posibles, son los que garantizan un mayor uso y durabilidad para la vida útil del artículo, considerándose que al ser una prenda textil que se debe lavar va a ser necesario quitar la parte electrónica. Paralelamente, se ha diseñado y fabricado una caja que incorpora estas conexiones de unión a la prenda y dispone en su interior de la parte electrónica (procesador de señal) y batería de alimentación. En la siguiente figura se puede ver estas conexiones y dispositivo electrónico al que se hace referencia.



*Figura IV52. Fotografías de las conexiones de los elementos electrónicos y fuente de alimentación*

- Por último, se ha diseñado en la prenda una solapa que cubre el dispositivo electrónico, hilos textiles conductores y banda textil sensórica, de forma que protege al usuario de los elementos eléctricos. Se muestra a continuación fotografía de esta solapa, así como fotografía de la prenda final.

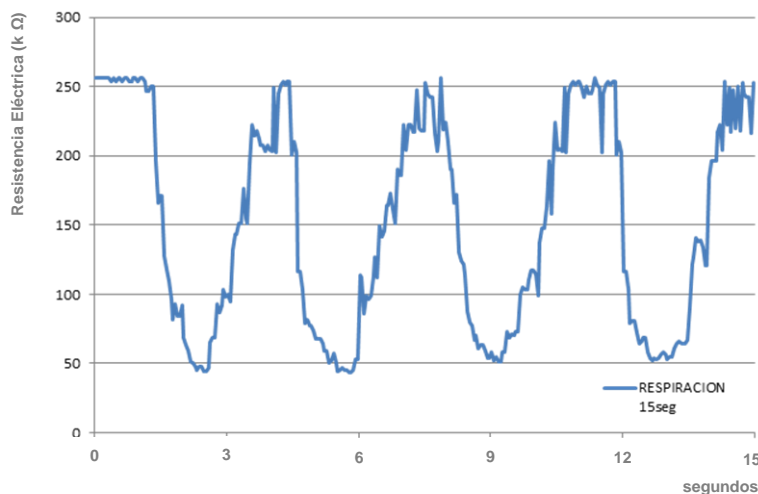


*Figura IV53. Fotografías de la solapa (izquierda) y del prototipo final de body inteligente para la medida de la respiración del bebé.*

Una vez fabricado este prototipo se procedió a la medida de la respiración en un bebé de 2 meses. Tan solo se llevó a cabo una prueba experimental, y en un solo bebé, porque el objetivo de este desarrollo era probar únicamente la funcionalidad de este producto inteligente y el funcionamiento del sensor textil como tal, y no llevar a cabo un proceso de desarrollo de producto y optimización del mismo, lo cual se deja para futuros trabajos de investigación.

La medida del ritmo respiratorio se realiza midiendo la variación de la resistencia eléctrica en función de la variación del grado de elongación (deformación elástica) de la banda sensora textil integrada en la prenda. Esta malla no tiene que estar necesariamente en contacto eléctrico con la piel del sujeto a monitorizar. Para validar el correcto funcionamiento de este sensor se sitúa una prenda ajustada a una parte del cuerpo, de tal forma que se asegure una variación en la elongación del captador de al menos un 5% (inferior a 1cm). Al tratarse de una prueba en un bebé, se coloca el sensor textil en la zona abdominal.

La toma de medida se ha llevado a cabo durante 15 segundos donde se obtiene la variación de resistencia eléctrica en la banda textil conductora. En la siguiente gráfica podemos ver los resultados obtenidos.



*Figura IV54. Variación de la resistencia eléctrica en función del tiempo (15 segundos) de un body de bebé inteligente para la medida de la respiración.*

En definitiva, se comprueba que el sensor textil desarrollado incorporado en una prenda de bebé en la zona del abdomen permite medir la respiración del bebé diferenciando muy bien entre la fase de inspiración y expiración, ofreciendo unos valores de resistencia eléctrica próximos a los 50 k $\Omega$  en la fase de inspiración (elongación de la banda textil), y aumenta hasta los 250 k $\Omega$  en la fase de expiración (recuperación de la banda textil). Por lo que, esta banda textil se puede emplear como un sensor textil integrado dentro de un artículo textil para una aplicación y funcionalidad concreta.

#### IV.1.3.4.- CONCLUSIONES PARCIALES.

Una de las primeras conclusiones que podemos extraer de estas experiencias empíricas es que al diseñar un tejido en bandas conductoras con la finalidad de que actúe como sensor de estiramiento en función de la respuesta eléctrica, éste se comporta como una serie de resistencias en paralelo. En donde si la masa laminar y la disposición de los hilos de estas bandas es la misma se tienen que comportar como resistencias iguales. Del estudio de la homogeneidad en la medidas de conducción eléctrica se deduce que la resistencia eléctrica de estas bandas es diferente debido principalmente a la distinta configuración de puntos de contacto que se establecen entre los distintos hilos conductores entre bandas, lo que representa una diferenciación muy poco significativa de los valores de resistencia eléctrica, lo cual no afecta en un primer momento para el estudio de la respuesta eléctrica en función del estiramiento, ya que se estudia la variación, no los valores absolutos. En cambio, si se tiene en cuenta en el estudio de reproducibilidad.

A continuación, al realizar un estiramiento y proceder al estudio de la simetría de la respuesta eléctrica, se observa una caída o subida de tensión eléctrica dependiendo de si la deformación elástica se ha llevado a cabo a un lado o al otro de la lámina central de donde se ha tomado como la línea de referencia para realizar las medidas. Se observa que esta variación se produce en un intervalo de tiempo muy corto, aproximadamente 2 segundos, y de forma significativa, del orden de los 2 V. En base a estos resultados, se llega a la conclusión que existe un punto de inflexión en el comportamiento del tejido en lo que respecta a la conductividad de estas bandas. A partir de un momento determinado del estiramiento se favorece de forma relevante el contacto directo entre los distintos hilos conductores y aumenta la conductividad de forma considerable, produciéndose una caída o subida de la tensión eléctrica de forma acusada. Es importante también resaltar que el comportamiento es reversible y que donde se observa un aumento, durante la recuperación del tejido la tensión eléctrica disminuye a un valor muy cercano al inicial, y viceversa.

Si nos fijamos en los valores absolutos con el objeto de poder conocer tal y como se había indicado en el apartado anterior si la incorporación de elastano mejora de forma sustancial la capacidad de recuperación del tejido (reduciendo el efecto de la deformación plástica) y en consecuencia la reproducibilidad de las medidas, el cual es un criterio clave a la hora de diseñar un sensor de estas características, es necesario minimizar al máximo el error inducido por el banco de ensayos empleado. En este sentido, a lo largo de los sucesivos estudios empíricos se han ido realizando mejoras del mismo que han permitido obtener valores de recuperación del tejido cada vez más cercanos a los valores iniciales obtenidos antes de realizar el estiramiento. Fundamentalmente, estas mejoras han pasado por reducir al máximo la movilidad del

tejido en el propio sistema de medida, estando cada vez más encastrado a la propia estructura del banco de pruebas. Esta reducción de la libertad de movimiento durante la secuencia de estiramiento y recuperación ha permitido reducir los errores derivados del propio método de ensayo.

Por ello, durante el estudio de la reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente al estiramiento en un sistema de medida bastante robusto, se ha comprobado que la incorporación de la fibra de elastano supone una mejora significativa de la recuperación del tejido a los valores iniciales, con unos datos de desviación muy reducidos. Por lo que sirve también esta experiencia para evidenciar que se produce con estos valores de estiramiento únicamente una deformación elástica sobre el tejido y se descarta la hipótesis o se minimiza al máximo el efecto de la deformación plástica del mismo.

De nuevo, en estas repeticiones de estiramiento y recuperación hacia la izquierda, se observa que la caída de la tensión eléctrica se produce de forma significativa llegando incluso a concretar que se produce a partir de un punto de estirado específico (de 1.5 cm y con una duración de aproximadamente 1 cm de distancia de recorrido del tejido). Lo cual equivale a decir que con pequeñas deformaciones elásticas del tejido se llega a obtener valores muy significativos de respuesta eléctrica, siendo esta conclusión muy interesante para algunas de las posibles aplicaciones que puede tener este sensor textil. Además, se observa de nuevo una caída y aumento de la tensión eléctrica del orden de los 2V, el mismo valor que obteníamos en el estudio previo realizado de la simetría de la respuesta eléctrica.

En este sentido, se ha procedido a diseñar y fabricar una prenda textil que incorporara este sensor textil desarrollado con el fin de probar su funcionalidad en una aplicación concreta. Para ello, se ha diseñado una prenda de bebé con el sensor textil integrado que fuera capaz de medir la respiración del bebé (diferencias entre el proceso de inspiración y expiración). Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios ya que se ha comprobado la viabilidad técnica de este sensor textil en un producto concreto y para una aplicación específica. Se obtiene una respuesta de la señal eléctrica del sensor acorde con el dibujo normal de la medida de otros dispositivos más convencionales (por ejemplo espirómetro).

En definitiva, las principales conclusiones de este apartado son, por un lado, el haber diseñado un tejido capaz de ser utilizado como sensor de estiramiento, relacionando incluso a nivel cuantitativo el grado de deformación del tejido con su valor de conductividad, y por otro lado, el haber puesto a punto un sistema de medida lo suficientemente robusto como para poder reproducir los resultados obtenidos, y probar su funcionalidad en una aplicación concreta (medida de la respiración a partir de un body de bebé inteligente).

La configuración y diseño del tejido dispuesto en bandas conductoras se prevé que puede ayudar en un segundo paso al estudio de este propio tejido y sistema de medida para llegar a obtener un sensor de presión, hasta el punto quizás de poder identificar la zona donde se está ejerciendo la presión. El diseño de un tejido en bandas que nos permita realizar un primer avance de lo que podría ser un sensor piezoresistivo capaz de diferenciar la zona donde se está produciendo la deformación.

## **IV.2.- Tejidos sensibles a la deformación por presión.**

En el apartado anterior se ha realizado un estudio exhaustivo de distintos tejidos de punto que presentan una variación de la conductividad eléctrica en función de su deformación elástica, e incluso se ha podido caracterizar y modelizar para algunos de ellos este comportamiento. En base a esto, en este apartado se va a estudiar la sensibilidad de estos tejidos a la deformación por presión.

La metodología empleada para este análisis va a ser similar a la empleada en el primer apartado, ya que en primer lugar se va a centrar el estudio en evaluar el comportamiento de estos tejidos que permitan de forma selectiva identificar las zonas presionadas, y a continuación se trabajará en la optimización y desarrollo de sistemas más complejos mucho más robustos y reproducibles que permitan identificar presión en diferentes zonas así como a nivel cuantitativo la intensidad de la presión ejercida.

### IV.2.1.- Estudio de la respuesta eléctrica de tejidos inteligentes sometidos a presión.

Para desarrollar un sistema basado en un tejido elástico y conductor que sea capaz de identificar la zona donde se está realizando una determinada presión partimos de las experiencias realizadas y conclusiones alcanzadas en el apartado anterior. Entre ellas, la elección del tejido referenciado como 1, ya que aunque el comportamiento es muy similar al tejido 2 y por ello también sería apropiado para realizar este estudio, este tejido 1 presenta una mayor sensibilidad al cambio de resistencia eléctrica cuando se produce una deformación elástica. Esta selección se fundamenta principalmente debido a que la deformación por presión va a ser muy localizada y muy pequeña al estar provocada por una pesa de poca superficie y masa respectivamente, siendo más apropiado para el estudio el utilizar un tejido que va a ser mucho más sensible a esta deformación de baja intensidad, y en este caso el tejido 1 donde su resistencia eléctrica es mayor.

En cuanto al sistema de medida, se plantea un sistema sencillo que se pretende ir optimizando en base a los resultados que se vayan obteniendo. Para cada uno de estos sistemas, se mostrarán las ventajas y limitaciones que ofrece para ser utilizado como textil inteligente sensible a la presión.

Por este motivo se definen como objetivos específicos de este punto de la presente tesis doctoral los siguientes:

- el poder diferenciar hasta cuatro zonas distintas del tejido independientes e identificar la zona donde se está realizado una deformación por presión en el mismo.
- realizar a nivel cualitativo esta identificación de la zona de presión, e incluso realizar en una primera aproximación el diseño de un sistema que permita cuantificar el nivel de presión que se está ejerciendo en esta zona específica detectada.



### Hipótesis de partida.

Partimos de que el tejido conduce la corriente eléctrica con una cierta resistencia eléctrica cuando es alimentado por uno de sus extremos con un voltaje de corriente continua determinado (5V), y se cierra el circuito por la parte opuesta, apreciándose un comportamiento eléctrico distinto en función del punto en concreto donde se realice la medida y en la zona donde se provoque la deformación por presión, según la figura IV25, referenciadas como zona A y zona B a la izquierda y derecha respectivamente. Y además se ha comprobado que cuando se produce un estiramiento hacia la izquierda se produce una disminución de la conductividad en este punto central de medida y viceversa, en el caso de producir esta deformación elástica hacia la derecha la conductividad eléctrica en este punto aumenta. En base a estos resultados se plantea el utilizar esta variación de tensión eléctrica, aumento y disminución, para poder identificar la zona del tejido donde se está produciendo una determinada presión.

Para ello se van a ir diseñando diferentes escenarios determinados fundamentalmente por las distintas opciones y posibilidades que permite variar sobre el tejido:

1. El punto donde se alimenta el tejido, es decir, por donde entra la corriente eléctrica, que denominaremos como "5V".
2. El punto donde sale la corriente eléctrica y se cierra el circuito eléctrico, que denominaremos como "GND".
3. Y el punto donde se toma la medida, que está compuesto por un punto específico del tejido que denominaremos "tester".

En función de estas distintas configuraciones se plantean los distintos modelos a estudiar.

#### IV.2.1.1.- MODELO 1: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE DIAGONALES CRUZADAS CON MEDIDA EN UN PUNTO.

En este primer apartado se describirá un primer escenario basado en el sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto, se realizará la previsión de medidas a obtener y su justificación así como los resultados obtenidos y su análisis y discusión.

La muestra del tejido de análisis está compuesta por el tejido referenciado como tejido 1 con unas medidas de 10 cm en cada lado. Resaltar también que la deformación (presión) que se consigue en el tejido se ha conseguido mediante la colocación de una masa en forma de pesa de 10 g sobre el mismo.

En este tejido se han definido cuatro zonas diferentes tal y como se observa en el figura IV55.



Figura IV55. Fotografía de este primer sistema empleado para el estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.

Los puntos de medida para este primer escenario están representados en la siguiente figura IV56 donde se indica el punto de la toma de medida representado como Tester. El sentido de aplicación de la corriente eléctrica se encuentra en la dirección que se establece entre el punto representado como +5V y el GND en la misma diagonal. Como se observa dentro de un mismo escenario se han diferenciado las dos variantes que se diferencian tan solo en la distribución de los puntos donde se aplica el voltaje y la toma de medida que son totalmente simétricos, con el objeto de poder comparar el comportamiento entre ambos casos, denominados escenario 1 y escenario 2 respectivamente. Esto se realiza así para establecer líneas hipotéticas de diferenciación de zonas, una por lo que respecta a la diagonal de aplicación de potencial, y la otra es la que forma el sistema de medida según las dos variantes. Al solapar los dos escenarios podemos obtener una separación de comportamiento eléctrico distinto en cuatro zonas del tejido representadas como A, B, C y D.

Aunque tal y como se observa en esta figura la masa laminar en cada una de estas zonas no es la misma debido a que el tejido no se ha colocado sobre este sistema de forma totalmente simétrica, este aspecto no debe influir en principio de los resultados obtenidos porque lo que se va a estudiar es el comportamiento cualitativo, la variación de la tensión eléctrica después de producir una deformación por presión, no siendo importante los valores absolutos obtenidos.

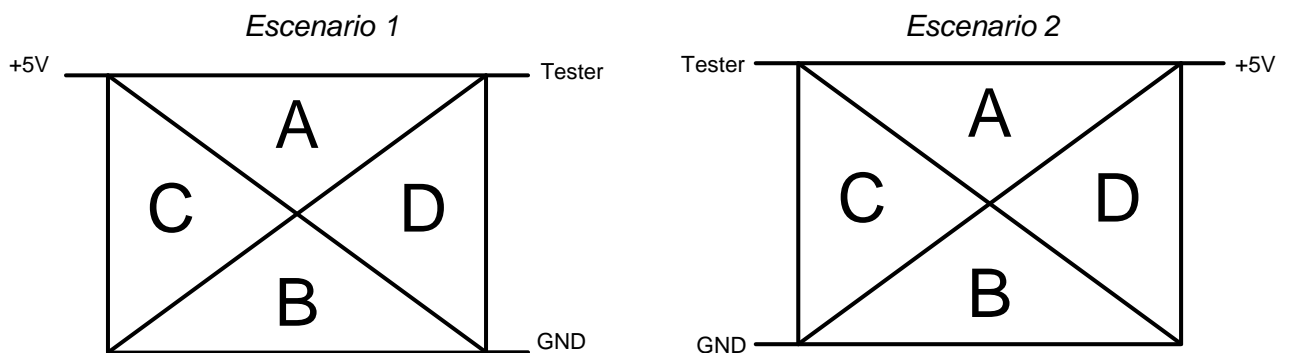


Figura IV56. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto indicando el punto de medida (tester) y los puntos de aplicación de potencial eléctrico.

La secuencia de variables de investigación que se han seleccionado para realizar el análisis del comportamiento de la presión ejercida sobre un tejido es la siguiente:

- 1) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación (SD).
- 2) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona A (DA).
- 3) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación (SD).
- 4) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona B (DB).
- 5) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación (SD).
- 6) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona C (DC).
- 7) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación (SD).
- 8) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona D (DD).

Es importante reseñar el estudio que se va a realizar sobre la reproducibilidad de las medidas, para cada una de estas medidas el procedimiento ha sido el siguiente:

- 1) Se mide el valor de tensión eléctrica sin deformación. (medida SD)
- 2) se coloca la pesa sobre la zona A del tejido donde se provoca la deformación,
- 3) se mide el valor de tensión eléctrica, (medida 1, DA),
- 4) se retira la pesa,
- 5) se coloca de nuevo la pesa en la misma zona A, en un punto lo más aproximado posible al anterior,
- 6) se mide el valor de tensión eléctrica, (medida 2, DA),
- 7) se repite el proceso para obtener la medida 3 DA.

Evidentemente, esta misma secuencia se utiliza para el estudio de la deformación en las zonas B, C y D. De esta forma se van a obtener tres medidas para deformación provocada en uno y otro escenario, mientras que la medida sin deformación solo se realiza una vez por zona de deformación previa colocación de la pesa en las tres repeticiones.

#### Hipótesis del primer modelo

En base al comportamiento que sufre el tejido al estirarlo y la relación que existe de este estiramiento con la variación de la tensión eléctrica que se ha demostrado en el apartado anterior de esta tesis doctoral, y tomando como referencia este primer modelo se detalla en la siguiente tabla IV21 el comportamiento ideal de la variación de la tensión esperada para cada una de las cuatro zonas y para cada variante de este escenario, que nos va a permitir diferenciar las cuatro zonas. En definitiva, lo que se pretende encontrar es un comportamiento distinto para cada una de las zonas de deformación al combinar ambos escenarios.

Tabla IV21. Variación de tensión eléctrica esperada al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.

Zona de deformación	Cálculo diferencial	Comportamiento esperado (Variación de tensión eléctrica)	
		Escenario 1	Escenario 2
A	DA (2) –SD(1)	AUMENTA	AUMENTA
B	DB (4) –SD(3)	DISMINUYE	DISMINUYE
C	DC (6) –SD(5)	AUMENTA	DISMINUYE
D	DD (8) –SD(7)	DISMINUYE	AUMENTA

Esta variación se ha predicho en base a la experiencia del apartado anterior donde la deformación (presión) de un tejido en la parte izquierda de la franja de medida cuando es alimentado el mismo desde la línea que corta perpendicularmente a esta franja de medida, provoca una disminución de la resistencia eléctrica, y por lo tanto un aumento de la conductividad eléctrica. Esto se traduce en que si se produce la deformación en la zona A o C que quedan en la parte izquierda de la línea de medida debería aumentar la tensión eléctrica para el escenario 1, mientras que si la deformación se produce en la zona B o D, como queda a la parte derecha el comportamiento es el opuesto, disminuye la conductividad. En el caso del escenario 2, en la parte izquierda de la línea de medida nos encontramos con las zonas A y D, donde debería aumentar esta tensión eléctrica, y en las zonas B y C, lo opuesto. En base a esto, y al sumar los efectos de los dos escenarios nos encontraríamos con un comportamiento distinto para cada tipo de deformación en cada zona en concreto (aumenta/aumenta ≠ disminuye/disminuye ≠ aumenta/disminuye ≠ disminuye/aumenta), lo cual nos permitiría detectar según los resultados obtenidos la zona específica donde se ha producido esta deformación. Para poder ver este comportamiento más claro se va a representar también esta variación de diferencia de tensión para cada escenario y después de producir la presión en cada zona. La gráfica que se espera según cada uno de estos escenarios propuestos deberá seguir el siguiente comportamiento representado en la figura IV57.

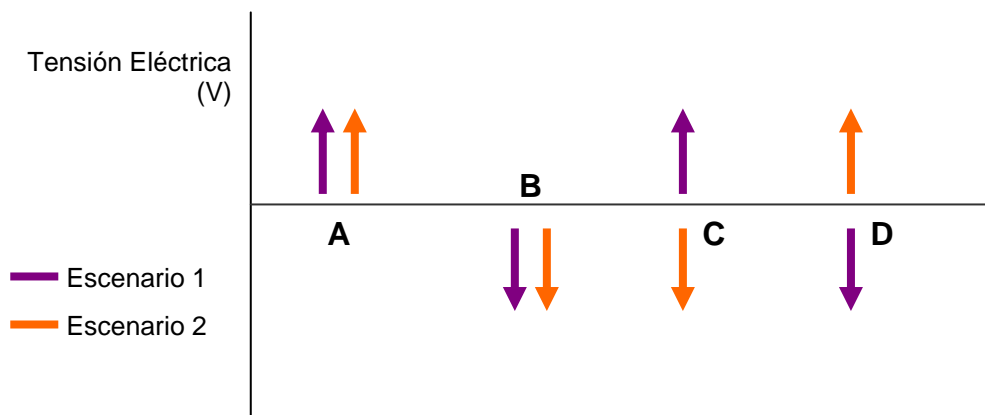


Figura IV57. Representación gráfica de la variación de tensión eléctrica esperada al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.

Por último, como el análisis es únicamente a un nivel cualitativo no nos vamos a fijar en los valores absolutos, sino que se toma como referencia los datos relativos una vez realizada la deformación con respecto a los valores iniciales a dicha deformación. Lo que si se considera importante es que se realice un análisis de la reproducibilidad de las medidas obtenidas para poder evaluar si estas variaciones de tensión son lo suficientemente significativas como para considerarlas como fruto del comportamiento del tejido minimizando la influencia de los errores de deriva producidos por la manipulación del tejido y la poca robustez del sistema.

### Resultados obtenidos

Una vez conocemos el comportamiento hipotético esperado de variación de tensión eléctrica que nos proporcionará una identificación de la zona donde se realiza la presión, analizamos ahora los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios.

Los resultados cuantitativos obtenidos para cada una de estas medidas son los que se representan en las siguientes tablas IV22 y IV23 tanto para uno como para el otro escenario. Evidentemente, esta misma secuencia se utiliza para el estudio de la deformación en las zonas A, B, C y D. De esta forma los resultados obtenidos que se muestran en estas tablas representan tres medidas para la deformación provocada en uno y otro escenario, mientras que la medida sin deformación solo se realiza una vez como ya se ha introducido anteriormente.

*Tabla IV22. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer escenario*

#### **Escenario 1**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD		3.42		<b>3.42</b>	0
2	DA	3.91	3.65	3.24	<b>3.60</b>	0.34
3	SD		3.40		<b>3.40</b>	0
4	DB	3.35	3.32	3.08	<b>3.25</b>	0.15
5	SD		3.58		<b>3.58</b>	0
6	DC	3.52	3.65	3.33	<b>3.50</b>	0.18
7	SD		3.63		<b>3.63</b>	0
8	DD	3.27	3.59	3.85	<b>3.57</b>	0.29

*(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)*

Tabla IV23. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el segundo escenario.

**Escenario 2**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD		4.26		<b>4.26</b>	0
2	DA	4.18	3.86	3.90	<b>3.98</b>	0,17
3	SD		4.39		<b>4.39</b>	0
4	DB	4.17	4.47	3.90	<b>4.18</b>	0,29
5	SD		4.36		<b>4.36</b>	0
6	DC	4.32	4.07	3.88	<b>4.09</b>	0,22
7	SD		4.40		<b>4.40</b>	0
8	DD	4.00	4.35	3.95	<b>4.10</b>	0,22

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

Se observa como la variación de los valores de tensión al producir la deformación por presión es baja debido a dos razones; por un lado, se trata de una pesa con muy poca masa (10 g), lo cual es consecuencia de una muy pequeña deformación en el tejido, y por otro, la también pequeña área de contacto de la base de la pesa es la responsable que esta deformación se produzca en un área muy localizada dentro de la superficie total del tejido, por lo que el efecto también es mínimo.

En base a estos resultados se procede la representación gráfica de los mismos en las siguientes figuras IV58 y IV59, donde en el eje de abscisas encontramos cada una de las deformaciones que se ha realizado en cada una de las zonas, así como los valores cuando el tejido no sufre ninguna deformación al respecto indicado como SD (Sin Deformación). Por otro lado, en el eje de coordenadas se representa los valores absolutos medio de tensión eléctrica que se obtienen en Voltios.

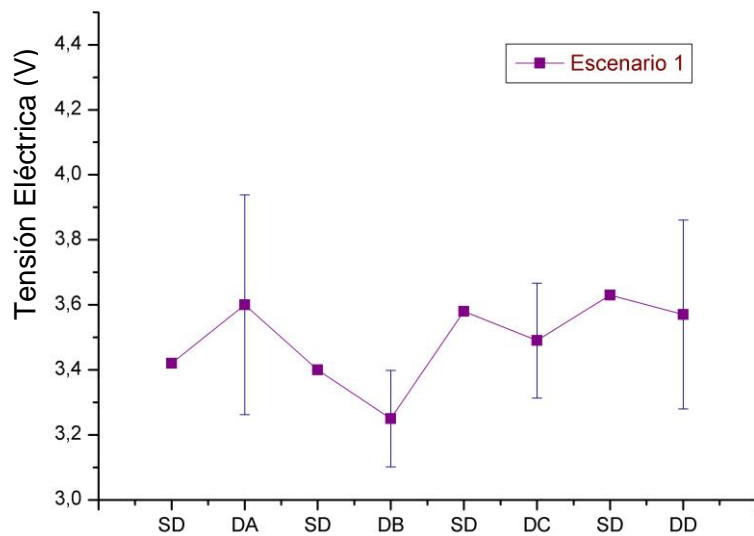


Figura IV58. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer escenario.

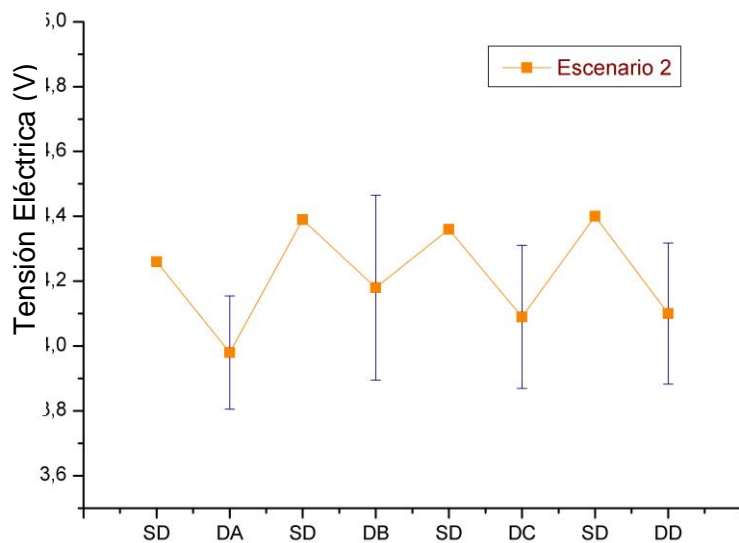


Figura IV59. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el segundo escenario.

En primer lugar podemos comentar de estas gráficas la existencia de una diferencia significativa de tensión eléctrica cuando se produce la deformación en el tejido, aumentando o disminuyendo ésta. Cuando se deja de aplicar la deformación el tejido vuelve a adoptar un valor de resistencia eléctrica específico que varía con respecto al inicial, es decir, como vemos no todos los valores de SD son iguales, lo cual nos indica que el tejido no recupera al valor inicial, quizás esto sea consecuencia de la poca robustez que presenta este primer sistema de medida que hemos diseñado. De todas

formas, esta variación no es importante para el presente análisis, ya que no nos vamos a fijar en los valores absolutos sino únicamente en el comportamiento o tipo de variación que presentan ambos escenarios de forma combinada cuando el tejido es deformado, es decir, si aumenta o disminuye la diferencia de tensión eléctrica cuando se provoca la presión con respecto al valor inicial sin deformación (SD), siempre y cuando estos valores de variación de tensión se consideren como significativos con respecto a los valores iniciales.

Este análisis diferencial de comportamiento se detalla en la tabla IV24, donde para cada uno de los valores de tensión eléctrica al producir cada deformación en el tejido en una zona determinada se le resta el valor de medida que presenta antes de esta deformación. De esta forma nos permitirá conocer la tendencia de su comportamiento, si aumenta o disminuye esta conductividad eléctrica después de producir una presión determinada en una zona de deformación específica.

Con respecto a la reproducibilidad del sistema podemos comprobar como los valores de desviación estándar son relativamente altos, lo cual nos está indicando que las variaciones de tensión eléctrica no son lo suficientemente significativas como para utilizar este modelo como el apropiado para diferencias las zonas donde se provoca la deformación por presión. Esta baja reproducibilidad del sistema a priori no nos va a permitir considerar el valor medio de tensión eléctrica para cada deformación como el valor real de la medida de la conductividad eléctrica en cada zona de deformación específica. Como vemos en ambas figuras el rango de desviación que está representado para cada valor de tensión eléctrica en cada zona de deformación (A, B, C y D) es superior a los valores absolutos de tensión sin deformación, lo cual nos indica que el comportamiento de aumento o disminución de la media con respecto al valor SD no es lo suficientemente representativo en todas las medidas, lo cual quiere decir que al colocar la pesa sobre una misma zona obtenemos valores que están por encima del valor SD y otros por debajo. Aun así analizamos que ha ocurrido con estas variaciones para extraer conclusiones parciales sobre este sistema con la intención de proponer soluciones para mejorarlo.

*Tabla IV24. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.*

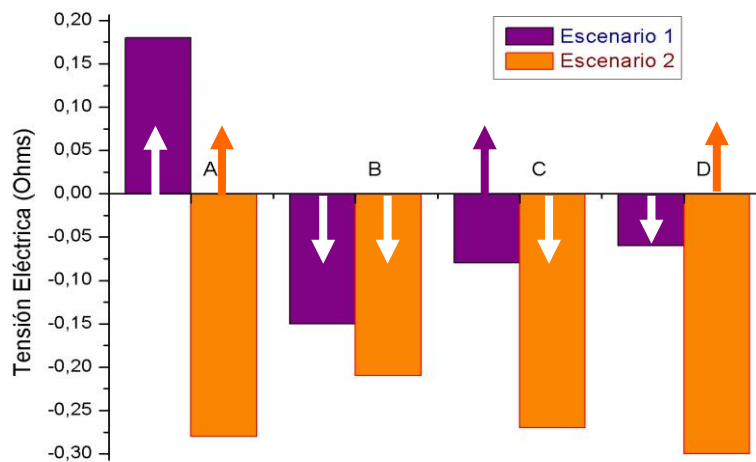
#### **Escenario 1 y 2**

Zona de deformación	Cálculo diferencial	Tensión Eléctrica (V)	
		Escenario 1	Escenario 2
A	DA (2) –SD(1)	<b>0.18</b>	<b>-0.28</b>
B	DB (4) –SD(3)	<b>-0.15</b>	<b>-0.21</b>
C	DC (6) –SD(5)	<b>-0.08</b>	<b>-0.27</b>
D	DD (8) –SD(7)	<b>-0.06</b>	<b>-0.30</b>



En base a este comportamiento y para poder compararlo con el comportamiento hipotético que se ha definido según la tabla y figura IV21 y IV57 respectivamente, se representan estos resultados en la siguiente figura IV60 de forma que podamos estudiar este comportamiento de forma más gráfica. En esta figura se ha representado también el comportamiento que se ha planteado desde un inicio como hipotético con flechas para comprobar la respuesta real del tejido con respecto a lo esperado.

En las columnas se representa el comportamiento obtenido y las flechas indican el esperado según la hipótesis de partida.



*Figura IV60. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer y segundo escenario, y su comparación con el comportamiento hipotético.*

Tal y como esperábamos observamos como este comportamiento no se corresponde con el hipotético que se había definido previamente en muchas de las zonas (para el primer escenario se corresponde en las deformaciones A, B y D, mientras que en el segundo solo lo sigue el B y el C). Vemos como cuando se produce la deformación en la zona A, se produce un aumento de la tensión eléctrica para el escenario 1 que es acorde al comportamiento esperado, mientras que para el escenario 2 se produce una disminución en contra a lo cabía esperar. Para la zona B, para ambos escenarios existe un comportamiento real igual al que se presuponía en un inicio. Para el C, ocurre lo contrario que para la primera zona de deformación, donde si sigue el perfil esperado en el segundo escenario, mientras que para el escenario 1 el comportamiento es el opuesto. Por último, en la zona D, de nuevo ocurre lo mismo que en el A. en definitiva, no se corresponden los resultados obtenidos con los que se esperaban en base a experiencias de apartados anteriores de la presente tesis doctoral.

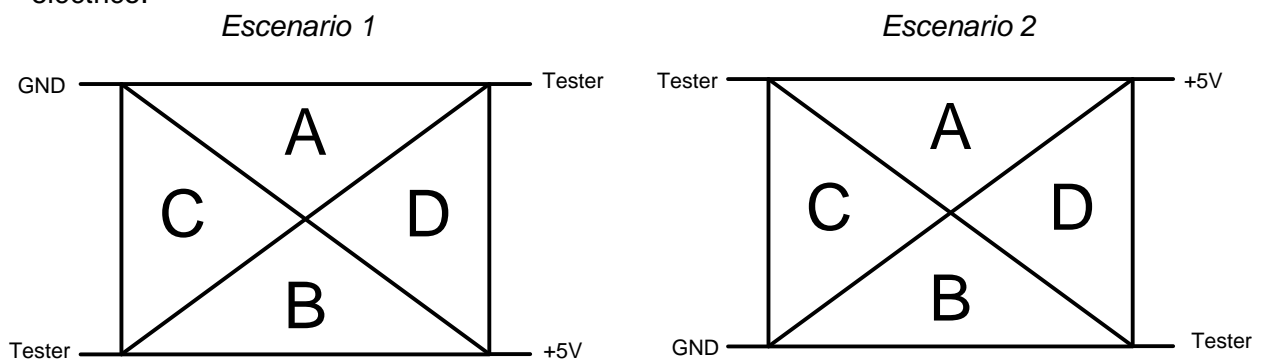
Este distinto comportamiento muestra que este sistema de diagonales cruzadas de medida en un punto no es un sistema válido para identificar de forma selectiva cada una de las zonas.

En este sentido, se plantea un nuevo modelo que se basa en reforzar el punto de medida, por lo que, se va a trabajar el mismo sistema de diagonales cruzadas pero ahora tomando la medida en dos puntos, en este caso los opuestos.

#### IV.2.1.2.- MODELO 2: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE DIAGONALES CRUZADAS CON MEDIDA EN DOS PUNTOS.

En este nuevo modelo vamos a partir del mismo banco de pruebas basado en el mismo tejido que alimentamos con un determinado voltaje en una de las diagonales del mismo. De igual forma que antes, con el objeto de diferenciar cuatro zonas virtuales que presenten a priori distinto comportamiento de tensión eléctrica cuando es sometido a una presión se conecta en la otra diagonal el punto de medida, pero ahora la diferencia se encuentra en que se toman dos puntos de medida, en concreto vamos a medir en las dos puntas opuestas.

Los puntos de medida para este segundo modelo están representados en la siguiente figura IV61 donde se indica el punto de la toma de medida representado como Tester, que en este caso es doble y se toman en cada uno de los extremos de una diagonal para cada una de las variantes. El punto de aplicación de la corriente con un voltaje de 5 V se encuentra entre el punto representado como +5V y denominado como GND el punto de salida de la corriente eléctrica que está conectado al cierre del circuito eléctrico.



*Figura IV61. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos.*

Con el objeto de mejorar la reproducibilidad del sistema debido a los valores tan altos de desviación estándar obtenidos en el primer modelo, se define un nuevo procedimiento de medida que está basado en la toma de medida sin deformación en el momento previo y después de realizar cada una de las diferentes deformaciones en una zona concreta del tejido. Es decir, en vez de tomar el valor de SD y luego tres medidas sucesivas colocando repetidamente la pesa sobre una zona para provocar tres deformaciones diferentes y en consecuencia tres valores distintos, como se ha realizado en el primer modelo, en este caso se estima conveniente después de cada deformación y toma de medida volver a medir el valor de SD. De esta forma, se pretende minimizar al máximo el efecto de deriva que tiene el valor absoluto de medida con respecto a la recuperación del tejido una vez retirada la pesa, que como se ha visto no recupera al valor inicial, y aunque se esté planteando una hipótesis comparativa de comportamiento, es importante intentar minimizar al máximo este

efecto de deriva que es inherente al propio tejido y la poca robustez de la bancada de pruebas.

En base a este nuevo planteamiento, la secuencia que se ha seguido para realizar el análisis del comportamiento de la presión ejercida sobre un tejido es la misma que en el modelo anterior:

- 1) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 2) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona A
- 3) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 4) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona B
- 5) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 6) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona C
- 7) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 8) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona D
- 9) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.

#### Hipótesis del segundo modelo

De igual forma que antes, para este segundo modelo se tiene previsto un comportamiento hipotético de aumentar o disminuir la conductividad eléctrica en un extremo u otro de la zona de medida cuando se produce la deformación por presión en base a la experiencia adquirida en la deformación elástica. Este hipotético comportamiento está representado en la siguiente tabla IV25 para cada una de las cuatro zonas y para cada variante de este escenario. Está basado en la misma hipótesis que el primer modelo pero ahora poniendo otro punto de medida, en el extremo opuesto. De esta forma, se persigue aumentar la sensibilidad del sistema para conseguir una diferenciación por zonas más relevante y significativa.

*Tabla IV25. Variación de tensión eléctrica que se espera obtener al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos.*

Zona de deformación	Cálculo diferencial	Comportamiento esperado (Variación de tensión eléctrica)	
		Escenario 1	Escenario 2
A	DA (2) –SD(1)	DISMINUYE	AUMENTA
B	DB (4) –SD(3)	AUMENTA	DISMINUYE
C	DC (6) –SD(5)	DISMINUYE	DISMINUYE
D	DD (8) –SD(7)	AUMENTA	AUMENTA

#### Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos para cada una de estas medidas son los que se representan en las siguientes tablas IV26 y IV27 para cada uno de los escenarios:

Tabla IV26. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer escenario.

**Escenario 1**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				Desviación estándar
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	
1	SD	2.30	2.39	2.40	<b>2.36</b>	0.06
2	DA	2.72	2.21	2.50	<b>2.48</b>	0.26
3	SD	2.78	2.62	2.61	<b>2.67</b>	0.10
4	DB	2.49	2.75	3.25	<b>2.83</b>	0.39
5	SD	2.62	2.45	2.75	<b>2.61</b>	0.15
6	DC	2.68	2.43	3.10	<b>2.74</b>	0.34
7	SD	2.60	2.55	2.80	<b>2.65</b>	0.13
8	DD	2.62	2.60	2.83	<b>2.68</b>	0.13
9	SD	2.60	2.50	2.78	<b>2.63</b>	0.06

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

Tabla IV27. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el segundo escenario.

**Escenario 2**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				Desviación estándar
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	
1	SD	2.48	2.30	2.30	<b>2.36</b>	0.10
2	DA	2.80	2.61	2.80	<b>2.74</b>	0.11
3	SD	2.35	2.30	2.30	<b>2.32</b>	0.03
4	DB	2.23	2.14	1.50	<b>1.96</b>	0.40
5	SD	2.45	2.50	2.24	<b>2.40</b>	0.14
6	DC	2.65	2.36	2.15	<b>2.39</b>	0.25
7	SD	2.49	2.48	2.62	<b>2.53</b>	0.08
8	DD	2.63	2.30	2.00	<b>2.31</b>	0.32
9	SD	2.48	2.45	2.47	<b>2.47</b>	0.10

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

En base a estos resultados que se representan en las tablas se procede a la representación gráfica de los mismos en las siguientes figuras IV62 y IV63, donde en el eje de abscisas encontramos cada una de las deformaciones que se ha realizado en cada una de las zonas, así como los valores cuando el tejido no sufre ninguna deformación al respecto indicado como SD (Sin Deformación). Por otro lado, en el eje de coordenadas se representa los valores medios absolutos de tensión eléctrica. En estas gráficas se representan también las desviaciones estándar obtenidas al calcular la media de cada una de las medidas, el cual nos va a dar una información relevante en lo que respecta a reproducibilidad de los ensayos.

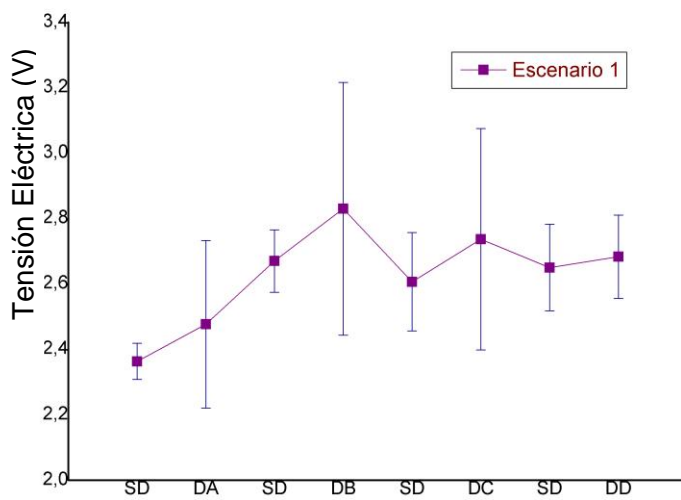


Figura IV62. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer escenario.

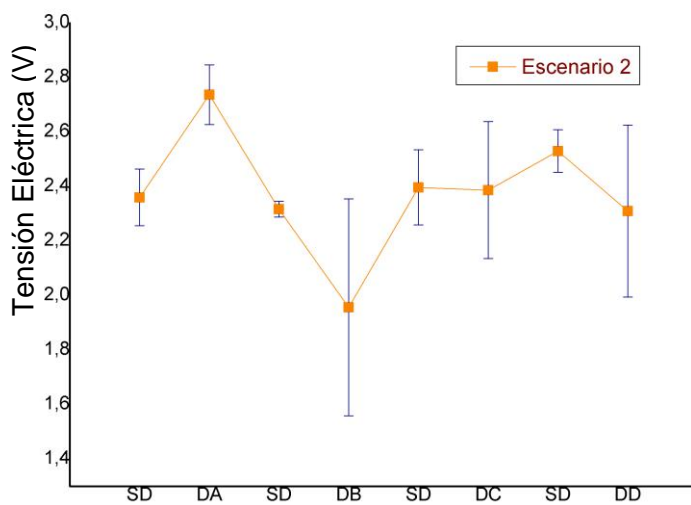


Figura IV63. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el segundo escenario.

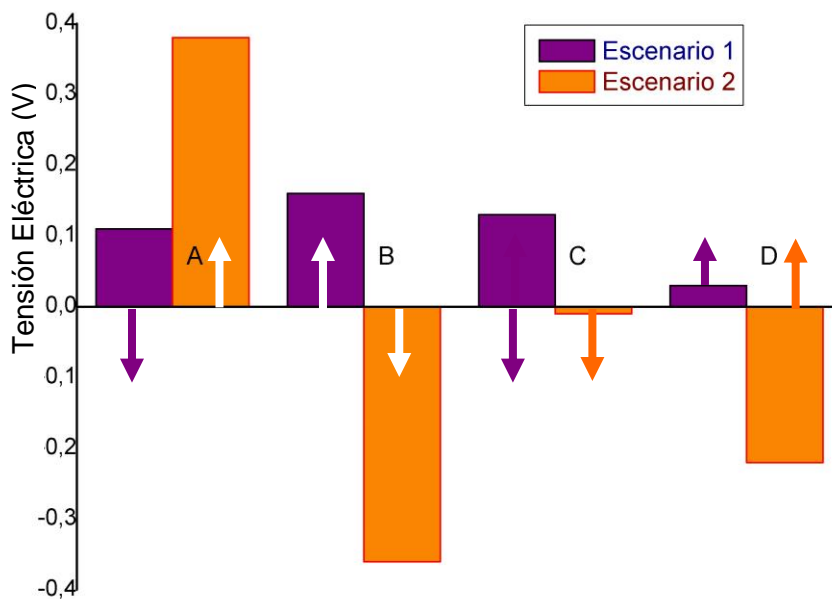
Al analizar el comportamiento que sigue este nuevo sistema y siguiendo con el mismo procedimiento que se ha definido en el punto anterior, se calcula la variación de tensión eléctrica cuando es sometido a una presión en una determinada zona con respecto al valor anterior que se ha obtenido sin deformación. Esta variación se estudia viendo si aumenta o disminuye la tensión eléctrica frente al valor sin deformación y se representa en la siguiente tabla IV28.

*Tabla IV28. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.*

**Escenario 1 y 2**

Zona	Cálculo diferencial	Tensión Eléctrica (V)							
		Escenario 1				Escenario 2			
A	DA (2) –SD(1)	0.42	-0.18	0.10	<b>0.11</b>	0.32	0.31	0.50	<b>0.38</b>
B	DB (4) –SD(3)	-0.29	0.13	0.64	<b>0.16</b>	-0.12	-0.16	-0.80	<b>-0.36</b>
C	DC (6) –SD(5)	0.06	-0.02	0.35	<b>0.13</b>	0.20	-0.14	-0.09	<b>-0.01</b>
D	DD (8) –SD(7)	0.02	0.05	0.03	<b>0.03</b>	0.14	-0.18	-0.62	<b>-0.22</b>

En base a estos resultados y para poder compararlos con el comportamiento hipotético que se ha definido según la tabla IV25, se representan estos resultados en la siguiente figura IV64 de forma que podamos estudiarlo de forma más gráfica. Es importante señalar que tomamos los valores de variación medios. En esta figura se ha representado también el comportamiento que se ha planteado desde un inicio como hipotético con flechas para comprobar la respuesta real del tejido con respecto a lo esperado.



*Figura IV64. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario, y su comparación con el comportamiento hipotético.*

De nuevo para este segundo modelo, este comportamiento no se corresponde con el hipotético que se había definido previamente (para el primer escenario se corresponde en las presiones B y D, mientras que en el segundo se sigue en A, B y C, este último con un valor muy poco significativo). Vemos como cuando se produce la deformación en la zona A, se produce un aumento de la tensión eléctrica para el escenario 1 lo cual no es acorde al comportamiento esperado, mientras que para el escenario 2 se produce un aumento de la tensión acorde con lo que se preveía. Para la zona B y en ambos escenarios existe un comportamiento real igual al que se presuponía en un inicio. Para el C, ocurre lo contrario para el primer escenario, y se mantiene según lo esperado para el segundo, aunque si es cierto que con un valor muy poco representativo. Por último, en la zona D, se corresponden los resultados obtenidos con el primer escenario aunque no es así para el segundo.

En definitiva, se observa de nuevo un distinto comportamiento de lo que ocurre con lo previsto para poder diferenciar las cuatro zonas, por lo que se concluye que los sistemas de diagonales cruzadas de medida en un punto y en dos no son válidos para identificar de forma selectiva cada una de las zonas cuando se produce una presión.

Aun así, sí que se puede extraer como conclusión parcial una vez analizamos ambos modelos que se obtienen unos resultados más ajustados a la hipótesis de partida cuando se toma la medida de dos puntos, lo cual se establece como condición de salida para las siguientes fases.

En lo referente a reproducibilidad del sistema, podemos comentar que las medidas son poco estables y repetitivas tal y como nos indica las desviaciones estándar de ambos

escenarios, lo cual nos continúa indicando que el sistema empleado es poco robusto. Si analizamos concretamente los valores de desviación estándar de los distintos valores de SD de cada punto observamos que también son significativos, por lo que no podemos obviar este efecto de deriva y seguir realizando esta nueva secuencia de medida definida en este segundo modelo frente al primer modelo donde solo había una medida de SD.

Por otra parte, si analizamos como influye la disposición del tejido en este sistema y hacemos un barrido por el borde del mismo para medir los valores de conductividad, nos damos cuenta que estos valores son mayores cuando ésta se realiza en sentido de las filas, lo cual es lógico debido a que existe una mayor densidad de hilo conductor en el sentido de las filas que el de las columnas. La conductividad en este sentido es consecuencia del canal conductor que establece el propio hilo, mientras que en sentido de las columnas viene provocado por los puntos de contactos entre los distintos hilos. En definitiva, este tejido empleado favorece la mayor conductividad eléctrica en un sentido que en otro.

En base a esto, aprovechando esta preferencia y diferencia de un sentido respecto al otro tiene más sentido definir el sistema en las direcciones de las columnas y filas del propio tejido que como hemos hecho en estos dos modelos anteriores basados en diagonales. Por lo que se plantea un nuevo modelo basado en un sistema de mediana con medida en dos puntos.

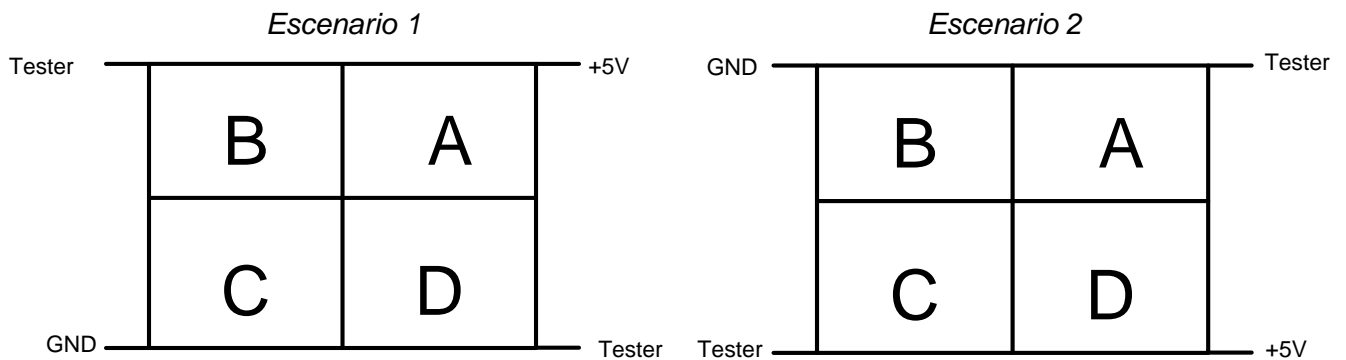
#### IV.2.1.3.- MODELO 3: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE MEDIANAS CON MEDIDA EN DOS PUNTOS.

Teniendo en cuenta que los resultados del apartado anterior nos muestran que la conductividad es más elevada en la dirección de las filas del tejido, se describe un nuevo modelo basado en la división en cuadrantes con el empleo de medianas.

Para este tercer sistema se utiliza el mismo tejido que alimentamos con un determinado voltaje en una de las diagonales del mismo. De igual forma que antes, con el objeto de diferenciar cuatro zonas virtuales que presenten a priori distinto comportamiento de tensión eléctrica cuando es sometido a una deformación por presión se conecta en la otra diagonal el punto de medida, pero ahora la diferencia se encuentra en la distribución de zonas virtual que vamos a realizar para ambos escenarios, que se realiza ya no de forma diagonal sino en cuadrantes simétricos con el punto central del tejido como nexo de unión, por lo que lo único que cambia es que la presión la ejerceremos sobre puntos distintos del tejido en comparación con el escenario anterior comentado en el apartado anterior.

Los puntos de medida para este tercer escenario están representados en la siguiente figura IV65 donde se indica el punto de la toma de medida representado como Tester, que en este caso es doble y se toman en los vértices del tejido dispuestos de forma opuesta con el punto central para cada una de las variantes. El punto de aplicación de corriente se representa de nuevo como +5V y el GND el punto de salida de corriente.





*Figura IV65. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos.*

La secuencia que se ha seguido para realizar el análisis del comportamiento de la presión ejercida sobre un tejido es la misma que en los escenarios anteriores:

- 1) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 2) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona A
- 3) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 4) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona B
- 5) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 6) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona C
- 7) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 8) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona D
- 9) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.

### Hipótesis del tercer modelo

En base a los resultados del modelo anterior planteamos ahora mantener los puntos de alimentación y salida de corriente eléctrica así como los puntos de medida, cambiando ahora el dibujo virtual que hacemos de las cuatro zonas y poder comparar así si existe mayor diferenciación entre ellas. A diferencia de las experiencias anteriores si observamos con detalle estos sistemas veremos cómo es muy complicado predecir ahora un comportamiento hipotético ya que la línea recta que une ambos puntos de medida separa también dos zonas de cada escenario por lo que va a depender de donde realicemos la presión. Aun así, mantenemos la hipótesis inicial de partida de tener cuatro comportamientos o variaciones eléctricas totalmente distintas como consecuencia de realizar una deformación por presión e identificar en cuál de ellas se llevado a cabo esta presión.

### Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos para cada una de estas medidas son los que se representan en la siguiente tabla IV29 y IV30:

Tabla IV29. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos para el primer escenario.

**Escenario 1**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD	2.42	2.85	2.30	<b>2.52</b>	0.29
2	DA	3.88	3.77	2.89	<b>3.51</b>	0.54
3	SD	2.35	2.40	2.20	<b>2.32</b>	0.10
4	DB	2.72	2.82	2.67	<b>2.74</b>	0.08
5	SD	2.21	2.25	2.58	<b>2.35</b>	0.20
6	DC	1.83	1.82	1.80	<b>1.82</b>	0.02
7	SD	2.55	2.48	2.65	<b>2.56</b>	0.09
8	DD	2.50	1.68	2.15	<b>2.11</b>	0.41
9	SD	2.81	2.28	2.78	<b>2.62</b>	0.29

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

Tabla IV30. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos para el segundo escenario

**Escenario 2**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD	2.00	2.18	2.30	<b>2.16</b>	0.15
2	DA	2.22	2.00	2.00	<b>2.07</b>	0.13
3	SD	2.18	2.38	2.31	<b>2.29</b>	0.10
4	DB	1.90	2.00	1.92	<b>1.94</b>	0.05
5	SD	2.21	2.41	2.40	<b>2.34</b>	0.11
6	DC	2.50	2.93	3.00	<b>2.81</b>	0.27
7	SD	2.00	2.45	2.35	<b>2.27</b>	0.24
8	DD	2.62	2.90	2.50	<b>2.67</b>	0.21
9	SD	2.15	2.35	1.87	<b>2.12</b>	0.15

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

Tomando los valores que se detallan en estas tablas se lleva a cabo la representación gráfica de los mismos en las figuras IV66 y IV67, donde en el eje de abscisas se expresa las deformaciones en forma de presión que se han llevado a cabo en cada una de las zonas, así como los valores cuando el tejido no sufre ninguna deformación al respecto indicado como SD (Sin Deformación). Por otro lado, en el eje de coordenadas se representa los valores medios absolutos de tensión eléctrica en Voltios. En estas gráficas se representan también las desviaciones estándar obtenidas al calcular la media de cada una de las medidas, el cual nos va a dar una información relevante en lo que respecta a reproducibilidad de los ensayos.

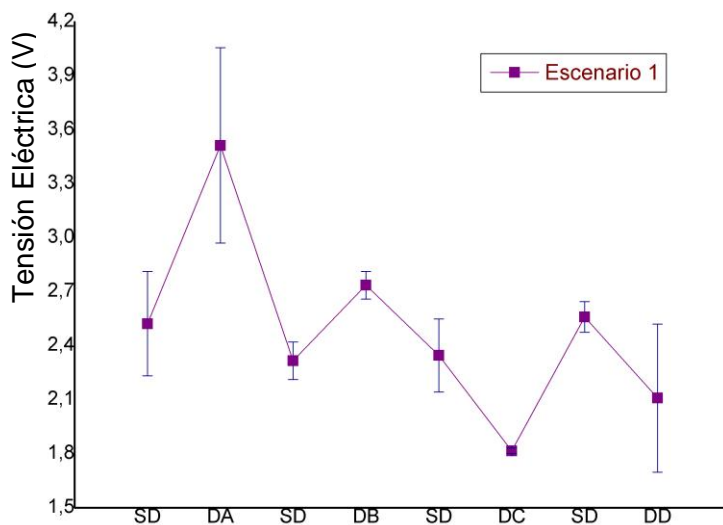


Figura IV66. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos para el primer escenario.

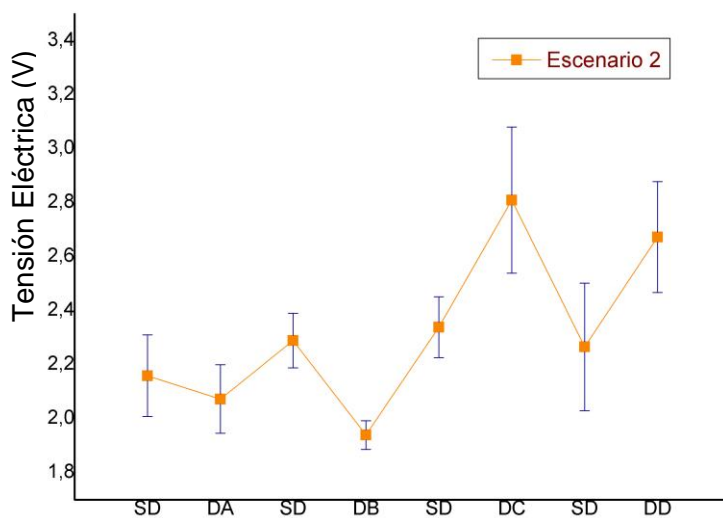


Figura IV67. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos para el segundo escenario.

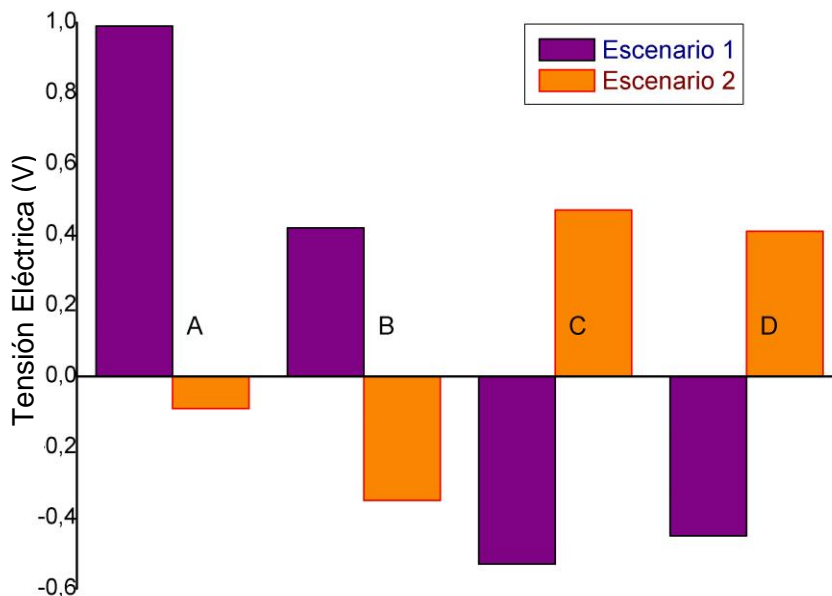
Al analizar el comportamiento que sigue este nuevo sistema y siguiendo con el mismo procedimiento que se ha definido en el punto anterior, se calcula la variación de tensión eléctrica cuando es sometido a una presión en una determinada zona con respecto al valor anterior que se ha obtenido sin deformación. Esta variación se estudia viendo si aumenta o disminuye la tensión eléctrica frente al valor sin deformación y se representa en la siguiente tabla IV31.

*Tabla IV31. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación*

**Escenario 1 y 2**

Zona	Cálculo diferencial	Tensión Eléctrica (V)							
		Escenario 1				Escenario 2			
A	DA (2) –SD(1)	1.46	0.92	0.59	<b>0.99</b>	0.22	-0.18	-0.30	<b>-0.09</b>
B	DB (4) –SD(3)	0.37	0.42	0.47	<b>0.42</b>	-0.28	-0.38	-0.39	<b>-0.35</b>
C	DC (6) –SD(5)	-0.38	-0.43	-0.78	<b>-0.53</b>	0.29	0.52	0.60	<b>0.47</b>
D	DD (8) –SD(7)	-0.05	-0.80	-0.50	<b>-0.45</b>	0.62	0.45	0.15	<b>0.41</b>

En base a este comportamiento y para poder comprobar gráficamente si realmente el comportamiento es distinto, se representan estos resultados en la siguiente figura IV68. Es importante señalar que tomamos los valores de variación medios.



*Figura IV68. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario.*

Si analizamos este gráfico con detalle observaremos en primer lugar que existe dos tipologías de comportamiento, el A y B donde el escenario 1 aumenta su tensión al producir la deformación y donde el escenario 2 la disminuye, por el contrario para C y D el comportamiento es idénticamente opuesto. Por lo que, la conclusión que sacamos de esta fase es que hemos llegado a un modelo donde ya es capaz de separar dos zonas del tejido, la superior e inferior. Aun así, este modelo está sujeto a error tal y como se ha comentado anteriormente ya que la línea que une los puntos de medida separa un misma zona en dos por lo que tendrá comportamientos distintos a uno y otro lado de esta línea divisoria. Para solucionar este problema se planteará un nuevo modelo.

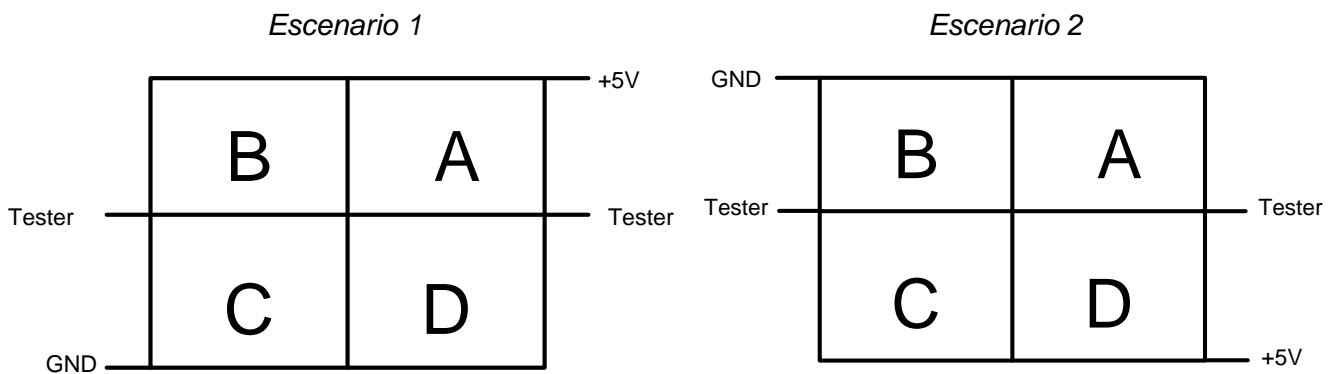
En lo referente a reproducibilidad del sistema, podemos comentar que aunque si hemos conseguido en líneas generales una pequeña mejoría en lo referente a valores más cercanos entre sí, en puntos concretos continúan siendo muy dispares, por lo que no se pueden tomar todavía como reproducibles y valores representativos del comportamiento de variación, lo cual por la experiencia adquirida en el estudio de la deformación elástica del primer apartado solo conseguiremos con un diseño específico de un método de ensayo mucho más robusto. Debido a esta nueva distribución de medida hemos conseguido aumentar de forma cuantitativa el valor de la tensión eléctrica lo cual ha sido la consecuencia que de forma relativa las medidas son más estables y repetitivas.

En base a estos resultados, para poder afinar más con estas medidas y poder llegar a diferenciar las cuatro zonas, se plantea el realizar medidas no solo desde los vértices del tejido sino también desde los puntos centrales de cada uno de los lados, lo cual a priori va a suponer un aumento de la sensibilidad del sistema a la detección de estas zonas, y además, supone también solucionar el problema de la línea de toma de medida que cruza entre un misma zona.

#### IV.2.1.4.- MODELO 4: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE MEDIANAS CON MEDIDA EN DOS PUNTOS CENTRALES.

En base a los resultados obtenidos en el apartado anterior se propone a continuación un nuevo modelo donde la medida se realiza en los extremos de la horizontal que separa la mediana del tejido, en concreto, se trata de un sistema de medianas con medida en los extremos de la mediana horizontal.

Para este cuarto modelo se utiliza de nuevo el tejido de punto referenciado como Tejido 1. Con el objeto de poder diferenciar cuatro zonas virtuales que presenten a priori distinto comportamiento de tensión eléctrica cuando es sometido a una deformación por presión se conecta en la mediana horizontal los dos puntos de medidas, uno a cada extremo. Estos puntos de medida para este cuarto escenario están representados en la siguiente figura IV69 donde se indica el punto de la toma de medida representado como Tester, que en este caso es doble. El punto de aplicación de corriente eléctrica y salida, +5V y GND, respectivamente.



*Figura IV69. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales.*

De nuevo, la secuencia que se ha seguido para realizar el análisis del comportamiento de la presión ejercida sobre un tejido es la misma que en los escenarios anteriores:

- 1) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 2) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona A
- 3) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 4) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona B
- 5) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 6) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona C
- 7) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 8) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona D
- 9) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.

#### Hipótesis del cuarto modelo

La hipótesis de estudio de este cuarto modelo y en base a la experiencia adquirida en los modelos anteriores se fundamenta en un aumento de la tensión por encima de la línea de toma de medida (A y B) para el primer escenario, y justo lo contrario para el segundo. Y por debajo de la línea de toma de medida (C y D) en el primer escenario se debería producir una disminución de la tensión eléctrica y en el segundo el efecto contrario, ya que se ha diseñado un modelo donde los puntos de medida se encuentran no en la diagonal sino en la dirección horizontal del sistema o en el sentido de las filas del tejido. Este hipotético comportamiento está representado en la siguiente tabla IV32 y figura IV70 para cada una de las cuatro zonas y para cada variante que corresponden los dos escenarios.

Si lo representamos observaremos como con este modelo seremos capaces de diferenciar dos zonas bien definidas en el propio tejido:

Tabla IV32. Variación de tensión eléctrica que se espera obtener al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales.

Zona de deformación	Cálculo diferencial	Comportamiento esperado (Variación de tensión eléctrica)	
		Escenario 1	Escenario 2
A	DA (2) –SD(1)	DISMINUYE	AUMENTA
B	DB (4) –SD(3)	AUMENTA	DISMINUYE
C	DC (6) –SD(5)	DISMINUYE	DISMINUYE
D	DD (8) –SD(7)	AUMENTA	AUMENTA

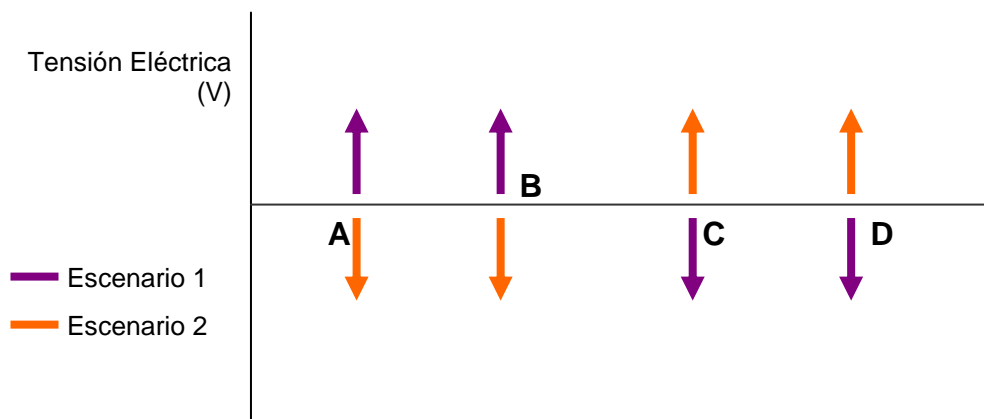


Figura IV70. Representación gráfica de la variación de tensión eléctrica esperada al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales.

### Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos para cada una de estas medidas son los que se representan en las siguientes tablas:

Tabla IV33. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales para el primer escenario.

**Escenario 1**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD	3.82	3.75	3.38	<b>3.65</b>	0.24
2	DA	4.60	4.72	4.61	<b>4.64</b>	0.07
3	SD	3.92	3.35	3.26	<b>3.51</b>	0.36
4	DB	4.48	4.00	4.10	<b>4.19</b>	0.25
5	SD	3.58	3.25	3.35	<b>3.39</b>	0.17
6	DC	1.88	1.92	2.21	<b>2.00</b>	0.18
7	SD	3.91	3.09	3.37	<b>3.46</b>	0.42
8	DD	2.23	2.10	2.45	<b>2.26</b>	0.18
9	SD	3.70	3.40	3.51	<b>3.54</b>	0.15

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

Tabla IV34. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales para el segundo escenario.

**Escenario 2**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD	2.00	2.27	2.00	<b>2.09</b>	0.16
2	DA	1.33	1.39	1.95	<b>1.56</b>	0.34
3	SD	2.08	2.12	2.00	<b>2.07</b>	0.06
4	DB	1.20	0.68	0.93	<b>0.94</b>	0.26
5	SD	2.28	1.88	2.29	<b>2.15</b>	0.23
6	DC	3.71	2.90	2.59	<b>3.07</b>	0.58
7	SD	1.90	2.24	1.96	<b>2.03</b>	0.18
8	DD	3.98	3.92	2.93	<b>3.61</b>	0.59
9	SD	2.19	2.00	1.84	<b>2.01</b>	0.18

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)



Tomando los valores que se detallan en estas tablas se lleva a cabo la representación gráfica de los mismos en las figuras IV71 y IV72, donde en el eje de abscisas se expresa las deformaciones en forma de presión que se han llevado a cabo en cada una de las zonas, así como los valores cuando el tejido no sufre ninguna deformación al respecto indicado como SD (Sin Deformación). Por otro lado, en el eje de coordenadas se representa los valores medios absolutos de tensión eléctrica. En estas gráficas se representan también las desviaciones estándar obtenidas al calcular la media de cada una de las medidas, el cual nos va a dar una información relevante en lo que respecta a reproducibilidad de los ensayos.

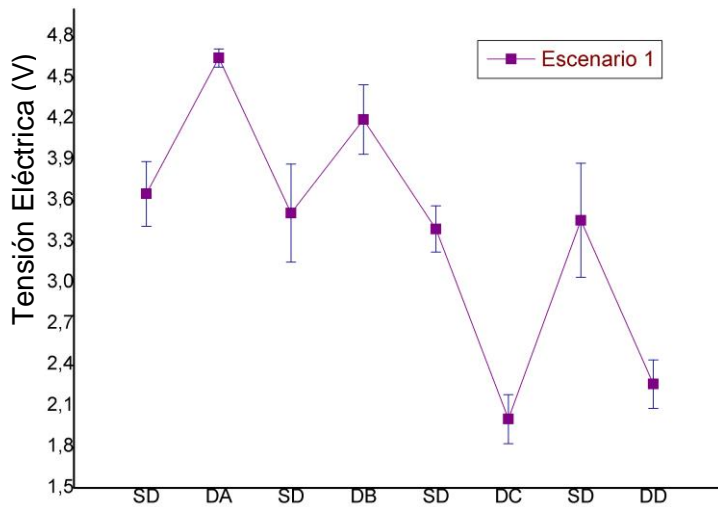


Figura IV71. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos centrados para el primer escenario.

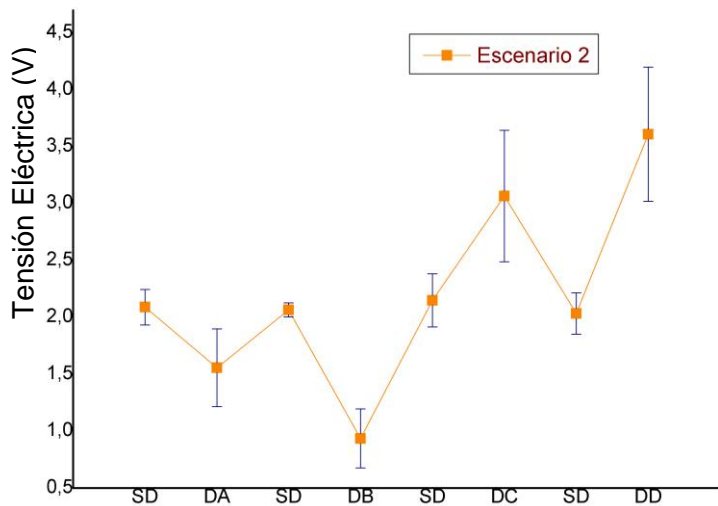


Figura IV72. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos centrales para el segundo escenario.

Al analizar el comportamiento que sigue este nuevo sistema y siguiendo con el mismo procedimiento que se ha definido en el punto anterior, se calcula la variación de tensión eléctrica cuando es sometido a una presión en una determinada zona con respecto al valor anterior que se ha obtenido sin deformación. Esta variación se estudia viendo si aumenta o disminuye la tensión eléctrica frente al valor sin deformación y se representa en la siguiente tabla IV35.

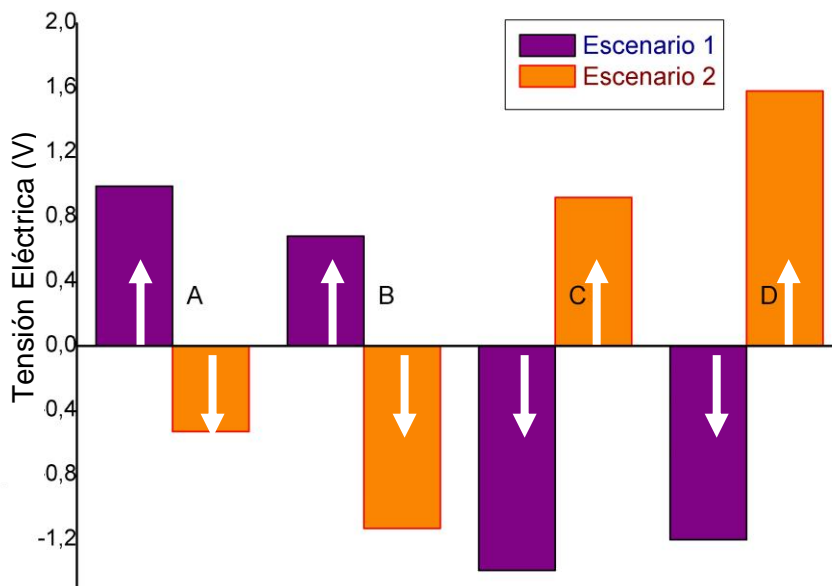
*Tabla IV35. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrados para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.*

**Escenario 1 y 2**

Zona	Cálculo diferencial	Tensión Eléctrica (V)							
		Escenario 1				Escenario 2			
A	DA (2) –SD(1)	0.78	0.97	1.23	<b>0.99</b>	-0.67	-0.88	-0.05	<b>-0.53</b>
B	DB (4) –SD(3)	0.56	0.65	0.84	<b>0.68</b>	-0.88	-1.44	-1.07	<b>-1.13</b>
C	DC (6) –SD(5)	-1.70	-1.33	-1.14	<b>-1.39</b>	1.43	1.02	0.30	<b>0.92</b>
D	DD (8) –SD(7)	-1.68	-0.99	-0.92	<b>-1.20</b>	2.08	1.68	0.97	<b>1.58</b>

En base a este comportamiento y para poder comprobar gráficamente si realmente el comportamiento es distinto, se representan estos resultados en la siguiente figura IV73. Es importante señalar que tomamos los valores de variación medios.

Las columnas representan los resultados obtenidos y las flechas la hipótesis de partida.



*Figura IV73. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos centradas para el primer y segundo escenario.*

En lo que respecta al comportamiento de variación eléctrica de este nuevo modelo se observa como realmente se produce esta diferenciación de dos zonas del tejido, ya que observamos que este comportamiento es idéntico al modelo anterior, pero ahora hemos eliminado el error que provocaba el disponer de la toma de medida en diagonal cruzando y dividiendo algunas de las zonas establecidas. En este modelo, nos encontramos con dos tipologías de comportamiento, el A y B donde el escenario 1 aumenta su tensión al producir la deformación y donde el escenario 2 la disminuye, por el contrario para C y D el comportamiento es idénticamente el opuesto.

En lo referente a reproducibilidad del sistema, podemos comentar que se aprecia también una mejora sustancial en la reproducibilidad del modelo, ya que presenta en general valores de desviación estándar inferiores, y además éstos se encuentran ya en valores aceptables como para considerar este modelo como representativo. Por lo tanto, se ha conseguido con este nuevo modelo mejorar la sensibilidad y reproducibilidad del sistema,

Aun así, aunque se consigue diferenciar las dos zonas del tejido, superior e inferior, seguimos sin poder diferenciar las cuatro que nos habíamos puesto como objetivo.

En base a esto, una de las conclusiones parciales que podemos extraer de estos resultados y junto a los obtenidos en apartados anteriores es que podemos concretar que el comportamiento es cuantitativamente mejor cuando se produce la medida en el sentido horizontal del sistema o en el sentido de las columnas del tejido por su disposición de hilos conductores que cuando las medidas se realizan en diagonal.

De igual forma, este último escenario nos permite separar el tejido en dos zonas siendo la mediana horizontal la línea virtual que separa estas zonas. De forma que

para poder separar cuatro zonas deberíamos ir a un sistema con dos tejidos superpuestos pero con distinta orientación, es decir, dispuestos de forma perpendicular. El problema que encontraremos a priori en esta nueva disposición es que no se tienen que tocar ambos tejidos para no provocar ningún cortocircuito.

#### IV.2.1.5.- MODELO 5: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA DE DOBLE MALLADO CON AISLANTE.

Este modelo servirá de base para la elaboración de modelos más complejos que permitan trabajar con más puntos y son sistemas de presión en zona múltiple.

Tal y como ya se ha introducido en el último párrafo del apartado anterior, y en base a los resultados que se han ido obteniendo en cada uno de los apartados anteriores de este punto, el sistema sensible a la presión en un punto para identificar una de las cuatro zonas de un tejido de punto debería a priori estar compuesto por un montaje de dos tejidos dispuestos de forma perpendicular. Esto es debido a que para cada uno de los tejidos se han diferenciado claramente dos zonas que están divididas por la mediana horizontal.

##### Hipótesis del quinto modelo

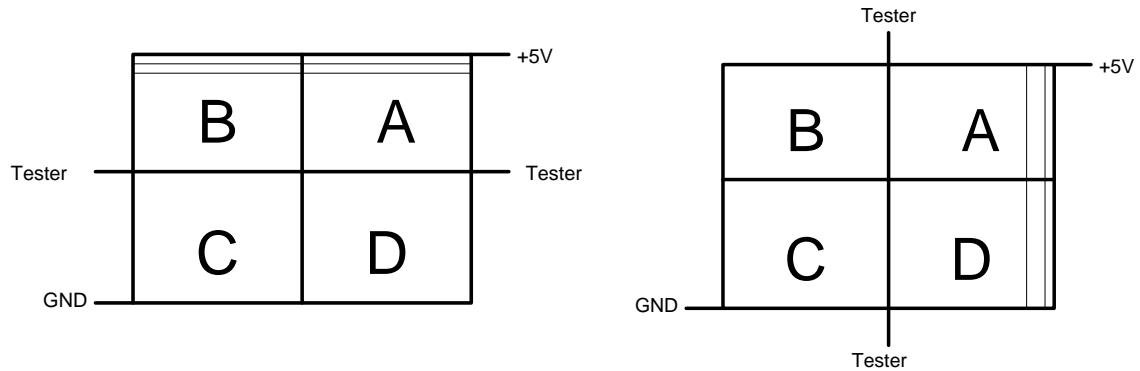
La hipótesis que se toma de partida está basada en la misma que en los modelos anteriores al ir incorporando en cada uno de ellos mejoras significativas que nos ha permitido por un lado estudiar el comportamiento del tejido en zonas y por otro ir reduciendo la dispersión de las medidas. En este punto, se plantea como hipótesis de este quinto modelo el superponer los tejidos del modelo anterior de forma perpendicular uno de otro. De esta forma, para uno de los tejidos la mediana virtual de separación pasaría a estar en sentido vertical, por lo que el sistema quedaría formado por dos líneas virtuales de separación de zonas que cruzan justo en el punto central del tejido provocando una separación en cuatro zonas.

##### Resultados obtenidos

Sin necesidad de entrar en más detalle, en una primera medida colocando los tejidos cruzados y en contacto uno sobre el otro los resultados obtenidos no nos ha permitido de nuevo diferenciar el tejido en estas cuatro zonas según lo esperado, debido a la existencia de cortocircuito entre las dos capas que impide que tengan el mismo comportamiento que si tomamos las medidas por separado. Básicamente, este contacto entre capas imposibilita que se sumen los efectos cruzados tal y como se había propuesto de salida, sin poder diferenciar las zonas en cuestión.

Para solucionar este problema, la solución que se ha empleado ha sido la de colocar entre las dos capas de tejido una delgada lámina de un material aislante (espuma de poliuretano) de pocos milímetros de espesor y que además permita la deformación y recuperación del tejido cuando se le aplica una presión.

De esta forma, para este nuevo sistema un poco más complejo los puntos donde se alimenta el tejido son los mismos, mientras que los puntos de medida cambian en función de la capa de tejido. En la figura IV74 podemos observar de forma gráfica como quedaría el montaje, una vez más, para cada una de las variantes.



*Figura IV74. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante.*

De nuevo, la secuencia que se ha seguido para realizar el análisis del comportamiento de la presión ejercida sobre un tejido es la misma que en los escenarios anteriores:

- 1) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 2) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona A
- 3) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 4) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona B
- 5) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 6) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona C
- 7) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.
- 8) Medida de la tensión provocando una deformación en la zona D
- 9) Medida de la tensión sin provocar ninguna deformación.

Los resultados obtenidos para cada una de estas medidas son los que se representan en las siguientes tablas:

Tabla IV36. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el primer escenario.

**Escenario 1**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD	2.00	2.63	2.37	<b>2.33</b>	0.32
2	DA	2.75	3.00	2.91	<b>2.89</b>	0.13
3	SD	1.80	2.20	2.40	<b>2.13</b>	0.31
4	DB	2.74	3.02	3.00	<b>2.92</b>	0.16
5	SD	1.72	2.21	1.78	<b>1.90</b>	0.27
6	DC	0.80	1.00	0.82	<b>0.87</b>	0.11
7	SD	2.00	2.43	2.45	<b>2.29</b>	0.25
8	DD	1.03	1.05	1.50	<b>1.19</b>	0.27
9	SD	2.53	2.47	2.59	<b>2.53</b>	0.06

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

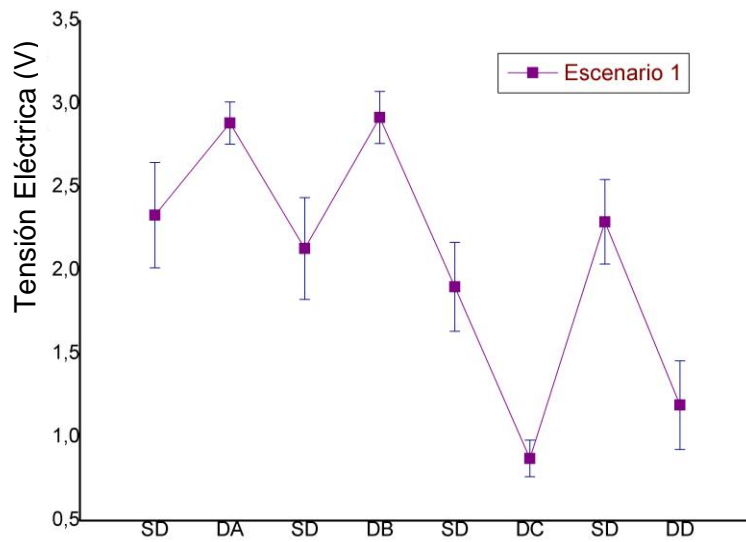
Tabla IV37. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el segundo escenario.

**Escenario 2**

Secuencia	Deformación	Tensión Eléctrica (V)				
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Desviación estándar
1	SD	3.00	2.78	2.29	<b>2.69</b>	0.36
2	DA	1.70	1.66	1.29	<b>1.55</b>	0.23
3	SD	2.58	2.75	2.50	<b>2.61</b>	0.13
4	DB	3.51	3.68	3.91	<b>3.70</b>	0.20
5	SD	2.79	2.33	2.78	<b>2.63</b>	0.26
6	DC	3.46	3.47	3.36	<b>3.43</b>	0.06
7	SD	2.95	2.94	2.18	<b>2.69</b>	0.44
8	DD	1.86	1.47	1.69	<b>1.67</b>	0.20
9	SD	2.97	2.45	2.74	<b>2.72</b>	0.26

(SD= Sin deformación, DA= Deformación en la zona A, DB= Deformación en la zona B, DC= Deformación en la zona C, DD= Deformación en la zona D)

Tomando los valores que se detallan en estas tablas se lleva a cabo la representación gráfica de los mismos en las figuras IV75 y IV76, donde en el eje de abscisas se expresa las deformaciones en forma de presión que se han llevado a cabo en cada una de las zonas, así como los valores cuando el tejido no sufre ninguna deformación al respecto indicado como SD (Sin Deformación). Por otro lado, en el eje de coordenadas se representa los valores medios absolutos de tensión eléctrica. En estas gráficas se representan también las desviaciones estándar obtenidas al calcular la media de cada una de las medidas, el cual nos va a dar una información relevante en lo que respecta a reproducibilidad de los ensayos.



*Figura IV75. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el primer escenario.*

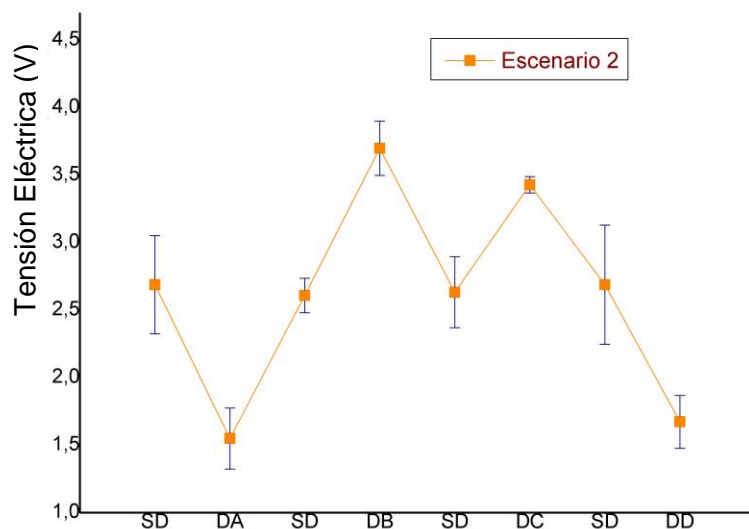


Figura IV76. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el segundo escenario.

Al analizar el comportamiento que sigue este nuevo sistema y siguiendo con el mismo procedimiento que se ha definido en los puntos anteriores, se calcula la variación de tensión eléctrica cuando es sometido a una presión en una determinada zona con respecto al valor anterior que se ha obtenido sin deformación. Esta variación se estudia viendo si aumenta o disminuye la tensión eléctrica frente al valor sin deformación y se representa en la siguiente tabla IV38.

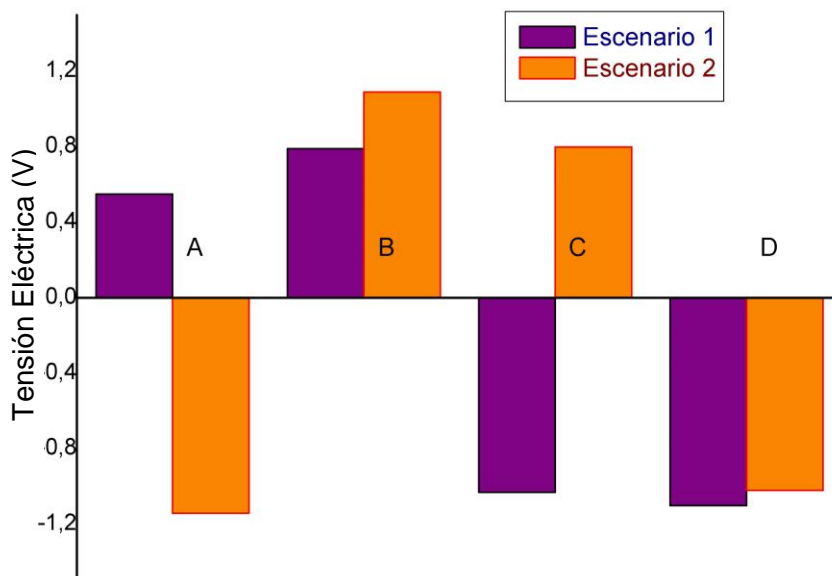
Tabla IV38. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.

#### Escenario 1 y 2

Zona	Cálculo diferencial	Tensión Eléctrica (V)							
		Escenario 1				Escenario 2			
A	DA (2) –SD(1)	0.75	0.37	0.54	0.55	-1.30	-1.12	-1.00	-1.14
B	DB (4) –SD(3)	0.94	0.82	0.60	0.79	0.93	0.93	1.41	1.09
C	DC (6) –SD(5)	-0.92	-1.21	-0.96	-1.03	0.67	1.14	0.58	0.80
D	DD (8) –SD(7)	-0.97	-1.38	-0.95	-1.10	-1.09	-1.47	-0.49	-1.02

Al analizar el comportamiento que sigue esta tabla en este nuevo escenario vemos representado en la siguiente figura IV77 como va aumentando o disminuyendo la tensión eléctrica cuando es sometido a una presión en una zona determinada para cada una de los dos escenarios que se han sometido a estudio para este último modelo.





*Figura IV77. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el primer y segundo escenario.*

Al observar esta gráfica y esta última tabla de resultados vemos que finalmente se ha conseguido un comportamiento distinto de la suma de las dos variantes para cada una de las zonas tal y como esperábamos, por lo que ahora sí que se puede decir que se produce una diferenciación e identificación específica de la zona donde se está realizando una deformación por presión. Este sensor de presión está compuesto por un sistema complejo compuesto de dos tejidos de punto superpuestos en las dos direcciones y no en contacto, y que a su vez son conductores conectados a un circuito eléctrico en puntos concretos de entrada, salida y medida de la corriente eléctrica, y en base a la relación existente del lugar o área donde se realiza la presión con la variación de la conductividad eléctrica de este tejido de punto.

De nuevo los valores de desviación estándar nos indican la misma tendencia que se había obtenido en el módulo anterior, donde se puede considerar que las medidas son suficientemente significativas y repetitivas.

Este sensor está diseñado para identificar la zona donde se está ejerciendo la presión si diferenciamos este sistema en cuatro zonas distintas, pero solo a nivel de detección cualitativa, no podemos cuantificar el valor de presión que se está ejerciendo en concreto, aunque no es objeto de la presente tesis.

#### IV.2.1.6.- CONCLUSIONES PARCIALES.

En base a los resultados parciales obtenidos en este apartado se observa, como una de las principales conclusiones, que en una primera aproximación un tejido elástico y conductor con una cierta resistencia eléctrica puede actuar como sensor piezoresistivo al depositar en un punto concreto una pequeña masa capaz de provocar una

deformación elástica, y que a su vez se comprueba que ésta es la causante de una variación de la tensión eléctrica en un sentido o en otro.

Los distintos modelos que se han ido empleando han permitido ir obteniendo una mayor información y conocimiento de cómo influye sobre el tejido los puntos de entrada y salida de la corriente eléctrica que circula a través del circuito eléctrico diseñado, así como de igual forma los de medida de la tensión eléctrica. Como en función de la hipótesis de partida planteada se han ido cambiando éstos puntos de entrada, salida y medida, que han servido en función de los resultados de variación el poder ir dibujando de forma virtual una distinción de zonas capaces de asociar un tipo de comportamiento de la variación de la tensión eléctrica cuando se realiza la presión en esta zona, manteniéndose a priori independiente del resto. Para valora este comportamiento se ha ido tomando como punto de partida los resultados obtenidos en los puntos anteriores de esta tesis doctoral de aumento o disminución de la tensión eléctrica a un extremo o al otro de línea que une los dos puntos de medida.

Otra de las conclusiones de este punto radica en que se ha definido un modelo a medida y totalmente reproducible basado en un sistema de conectores de entrada y salida de la corriente eléctrica y con puntos de medida centrados, y no en los vértices, que es capaz de diferenciar dos zonas concretas del tejido, la superior e inferior, en la medida que aplicamos una pequeña deformación por presión en cualquier de estas dos zonas virtuales. Este modelo está basado en un sistema de medida que se ha ido optimizando en cada una de las distintas experiencias con una doble finalidad; por un lado, planteando en cada modelo dos escenarios se ha conseguido una diferenciación de los resultados obtenidos en ambos, y por otro, el ir reduciendo el error de estos resultados de forma que se iba garantizando que el sistema iba siendo cada vez más robusto y los resultados más concluyentes.

Los resultados cuando los puntos de medida se encuentran en la parte central si se comparan cuando se encuentran en los vértices, modelos 3 y 4 respectivamente, nos permite diferenciar con una mayor exactitud las dos zonas de presión definidas en el tejido, y de esta forma también minimizamos el error tal y como se aprecia en los valores de desviación estándar.

En definitiva, tomando esta diferenciación de dos zonas en un tejido de punto capaz de actuar como sensor piezoresistivo, y al superponerlos de forma perpendicular evitando el contacto entre ellos mediante la colocación de un aislante, se concluye que hemos sido capaces de diseñar un sistema robusto capaz de diferenciar hasta cuatro zonas virtuales del tejido con distinto comportamiento eléctrico en cada una de ellas si aplicamos una presión controlada en cualquiera de estas cuatro zonas, tomando eso sí como referencia dos hipotéticos escenarios.

La optimización del sistema con las sucesivas mejoras que se han ido aplicando en base a las modificaciones del propio diseño de conexiones y puntos de medida, ha permitido también obtener un sistema relativamente complejo lo suficientemente robusto como para que sea totalmente reproducible a la hora de identificar la zona donde se está aplicando la presión en concreto, y además, para valores de deformación por presión relativamente pequeños, lo que pone de manifiesto la elevada sensibilidad del propio sensor. En este sentido, si comparamos los valores de tensión eléctrica obtenidos al no producir deformación (SD), lo cual se observa de forma muy

representativa en las distintas gráficas que hemos analizado en cada uno de los modelos planteados, podemos concluir que para los últimos modelos, especialmente el 4 y el 5, estos valores son mucho más semejantes que lo obtenidos por ejemplo en el 1, debido fundamentalmente a la reproducibilidad de las medidas lo que provoca que haya una menor dispersión de las mismas. Esta tendencia es también un indicativo de este proceso de optimización que se ha ido siguiendo en lo que respecta al sistema o sensor piezoresistivo.

Aun así, este sistema se puede decir que presenta una doble limitación al respecto:

- por un lado, no es posible con este sistema preliminar y modelo que es capaz de actuar como sensor piezoresistivo permitiendo identificar zonas de presión, llegar a cuantificar el nivel de presión que se está ejerciendo, ya que se ha centrado en este punto el estudio de las variaciones de tensión eléctrica al producir las deformaciones en una zona concreta, sin entrar a realizar valoraciones de los valores absolutos de los resultados que se iban obteniendo.
- Y por otro, al tratarse de zonas virtuales no están definidas las líneas reales que separan cada una de las zonas, y no se ha estudiado que ocurriría en el caso de producir la presión cerca de estas líneas de separación de zonas. Probablemente se presupone que conforme la presión se va acercando a estas zonas el sistema va a perder sensibilidad y los resultados ya no son tan significativos como ocurre en los puntos más alejados. Por lo que, subiría los valores de desviación estándar de las medidas y en consecuencia el error relativo de una forma pronunciada, perdiendo también en este sentido robustez del propio sistema debido a la baja reproducibilidad.

#### IV.2.2.- Optimización de textiles inteligentes como sensores de presión.

En este apartado se va a describir y analizar el comportamiento de sistemas piezoeléctricos en base a las directrices y los resultados obtenidos en los puntos anteriores y partiendo del mismo tejido base de punto que se toma de referencia.

En primer lugar, se pretende utilizar un tejido capaz de diferenciar 6 zonas por deformación por presión en lugar de las hipotéticas 4 zonas que se han utilizado en el punto previo. Además, se pretende que las zonas se encuentren muy bien delimitadas y no existan perturbaciones en los puntos de separación de cada una de ellas. De forma que se busca un sistema piezoresistivo capaz de detectar una deformación por presión lo suficientemente sensible y robusto como para poder repetir un número de veces lo suficientemente representativo, por lo que, va a ser importante también estudiar la repetitividad de las medidas, y en consecuencia, la reproducibilidad.

Tal y como se ha descrito este banco de pruebas debe ser un sistema sólido que garantice la reproducibilidad y rigurosidad de las medidas que se van a realizar, y que nos permita estudiar una serie de variables modificando una serie de parámetros, de forma que se pueda ir variando de forma sencilla:

- la forma del tejido.
- los puntos de medida.
- los puntos de alimentación.
- los puntos de sujeción.
- la estructura y composición.

Las medidas sobre este sistema se van a realizar con el propósito de estudiar como varia la tensión en los puntos de medida cuando se aplica una cierta presión de forma controlada en diferentes puntos del tejido

Además, otro de los inconvenientes que se han identificado es que la fuente de tensión utilizada es demasiado capacitiva, lo cual es responsable de que al encender y apagar el sistema se genera una acumulación de tensión que hace que el tejido no tenga un valor de partida real y uniforme.

Para solucionar este problema se plantea el desconectar el cable eléctrico de la fuente antes de encender y apagarla, de esta forma se minimiza al máximo el efecto nocivo que provoca la tensión capacitiva de la fuente y directamente el valor de medida es el correcto sin necesidad de ajuste.

#### IV.2.2.1.- RESPUESTA DEL UN SISTEMA SENSOR DE PRESIÓN EN DIFERENTES PUNTOS.

El objetivo final de este punto es el de desarrollar un sistema reproducible y sólido que nos permita medir de forma rigurosa la zona donde se realiza una determinada y controlada presión ejercida sobre un tejido, de forma que pueda ser considerado como un sistema piezoeléctrico basado única y exclusivamente en la propiedad conductora que de forma inherente presenta un tejido de punto.

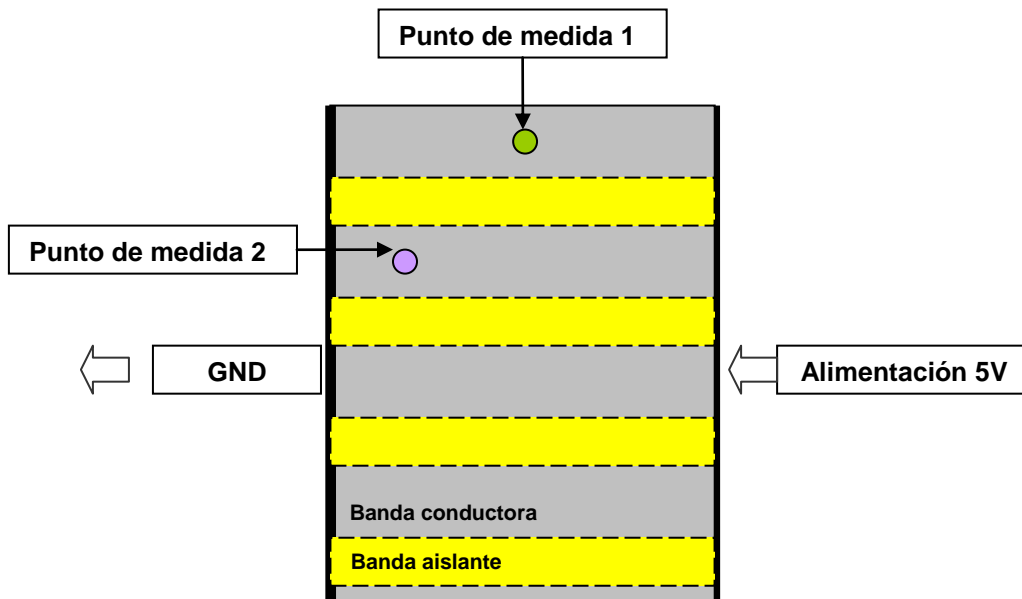
Para la presente fase de la investigación se ha utilizado el mismo banco de ensayo que ha sido desarrollado en el estudio de la variación de la resistencia eléctrica en función de la elasticidad, cuyo sistema ha sido validado y optimizado hasta obtener un método de ensayo suficientemente robusto y donde se puede llegar a minimizar al máximo el efecto de deriva que provoca la deformación plástica del tejido, hasta el punto que no llega a ser significativa.

Básicamente consta de un sistema que nos permite repetir el propio montaje tantas veces como sea necesario sin alterar ninguna variable del sistema de medida. De esta forma el banco de pruebas que se ha montado para la toma de medidas es el que aparece referenciado en la figura III28.

El tejido utilizado es el mismo tejido de punto que se ha utilizado en el estudio de la variación eléctrica en función de la elongación, con la diferencia que presenta cuatro bandas conductoras alternadas con bandas aislantes.

Tal y como ya se ha comprobado este tejido presenta una resistividad eléctrica que varía al ejercer una cierta elongación, o lo que es lo mismo una deformación elástica. La principal novedad en este apartado es que esta deformación no va a ser producida por un estiramiento prolongado del propio tejido, sino al producir una deformación por presión en cualquiera de las bandas conductoras. La hipótesis de partida nos dice que al producirse esta deformación por presión se está produciendo a su vez una deformación elástica del propio tejido, aunque en un punto específico del tejido, por lo que se debe producir también una variación de la tensión eléctrica tal y como se ha comprobado en el apartado anterior.

En la siguiente figura IV78 se representa de forma gráfica el montaje que se ha utilizado donde encontramos el tejido que está distribuido en distintas zonas, se detalla los puntos donde se alimenta el sistema con un voltaje específico y se indica también los puntos de medida que se toman como referencia.



*Figura IV78. Diagrama de un sistema complejo de un tejido de distintas zonas conductoras aplicando una corriente continua de 5V entre ambos extremos y con dos puntos de medida.*

La disposición del tejido así como los puntos de alimentación de corriente eléctrica se han definido en base a los resultados obtenidos en el estudio de variación eléctrica con respecto a la deformación elástica.

Se considera también importante hacer una pequeña reseña al análisis teórico desde el punto de vista electrotécnico aplicado a la estructura de tejido compuesto por cuatro bandas conductoras junto con el banco de ensayos empleado.

Para ello, y partiendo de que el sistema genera una corriente continua a un determinado voltaje, 5V, la representación gráfica de lo que está ocurriendo en este sistema se representa en la figura IV79.

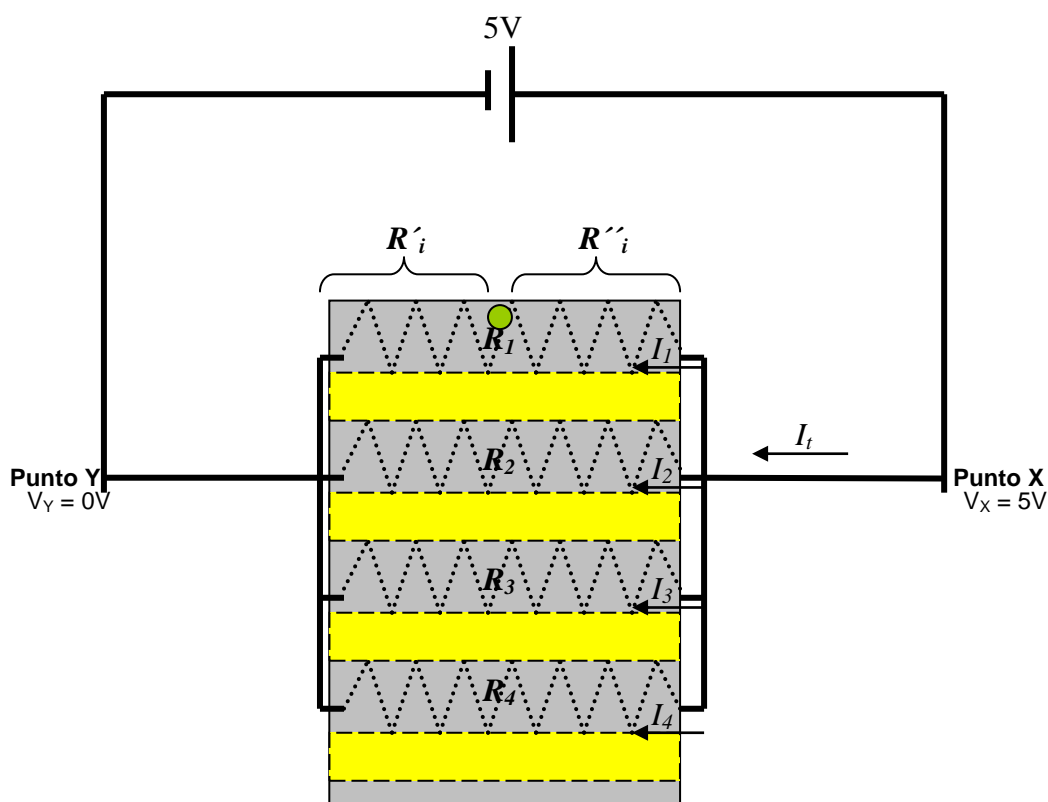


Figura IV79. Diagrama representativo del banco de ensayo con el tejido con cuatro resistencias en paralelo.

Como se puede apreciar, se trata de un circuito en paralelo, donde las cuatro resistencias equivalen a las cuatro bandas conductoras del tejido y dado que es un circuito de corriente continua en paralelo la intensidad de corriente que pasa por cada una de estas bandas es menor a la intensidad total, podemos decir que se reparte en función del valor de resistencia eléctrica. En cambio para unos valores de  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , que es el caso de este tejido por su configuración, el potencial debe ser el mismo a la entrada y salida de cada resistencia, en los puntos X e Y, y esta diferencia de potencial equivale a 5V, o lo que en adelante denominaremos tensión eléctrica. Además, en estas condiciones de mismos valores de resistencias, la caída de potencial en un mismo punto simétrico en cada resistencia ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$ ) debería ser igual, e inferior evidentemente a 5V. Cuanto mayor es la distancia de la resistencia eléctrica recorrida mayor es esta caída, o lo que equivale a decir que menor es el potencial en este punto.

Se han establecido en esta figura varios puntos donde va a ser importante conocer el potencial en los mismos, el punto X, donde se cumple que la tensión es  $V_X = 5V$ , el punto Y, donde se cumple que  $V_Y = 0V$ , y los distintos puntos que se vayan a tomar como puntos de medida (PM), donde independientemente de donde lo coloquemos y en que banda se va a cumplir que  $V_Y < V_{PM} < V_X$ , es decir,  $0 < V_{PM} < 5$ .

En concreto, para estos dos primeros puntos de medida; el primero de ellos, que denominamos 1, de forma aproximada lo colocamos en el centro de la primera de las

bandas conductoras, es decir, a la misma distancia de la entrada y la salida de la corriente eléctrica, en donde se prevé según la experiencia que la tensión eléctrica caiga aproximadamente a la mitad en este punto ( $V_{PM1} \approx 2.5V$ ), y el otro, referenciado como 2, lo situamos mucho más cerca del punto de salida de la corriente eléctrica en la segunda de las bandas conductoras, en donde, prácticamente la tensión eléctrica debe ser nula al estar muy próxima de la salida (GND), por lo que se espera que  $V_{PM2} \approx 0V$ .

Tomando como referencia este primer punto de medida, el cual está centrado se tiene que cumplir también que, para  $i=1$ ,  $R'_1 \approx R''_1$  en condiciones normales. En el momento que produzcamos una deformación en cualquiera de las dos partes, derecha o izquierda, de este punto de medida, como se producirá un cambio de la conductividad del mismo se espera también que  $R'_1 \neq R''_1$ , por lo que el valor de  $V_{PM1}$  será muy distinto a 2.5V, subirá o bajará en función del valor relativo de la resistencia eléctrica a la derecha o la izquierda. La experiencia de los apartados anteriores nos dice que si la deformación se produce a la derecha del punto de medida, el valor de  $V_{PM1}$  subirá fruto del descenso del valor de  $R''_1$ , y la situación contraria, si se produce la deformación a la izquierda, el valor esperado de  $V_{PM1}$  descenderá fruto de la disminución del valor de  $R'_1$ .

En base a esto, la metodología que se va a emplear en este estudio se va a centrar principalmente en ver como varía la tensión eléctrica en función de una deformación por presión que se ejerce en un punto determinado de una banda conductora, en base a esto, las variables a analizar son:

- Las medidas de tensión eléctrica en condiciones normales.
- La variación que se produce al aplicar una deformación por presión.
- La tensión eléctrica que se mantiene después de esta variación.
- El tiempo que dura esta variación,
- El tiempo en recuperar el valor de tensión después de producir esta deformación.
- Y por último, se pretende también analizar la influencia que una banda presenta con respecto a su contigua cuando una de éstas es sometida a una deformación por presión.

En base a estas variables de estudio se plantean distintas etapas en función a los distintos escenarios que se van a ir desarrollando.

### Etapa 1: Escenario Previo.

En primer lugar, y previo al primer escenario, se ha tomado la medida del sistema en posición neutra, cuando el tejido se encuentra con una distribución uniforme en toda su superficie y aún no se le ha aplicado ninguna presión en ninguna zona del tejido.

Los resultados obtenidos se representan en la siguiente figura IV80. En esta figura se representa la variación de tensión eléctrica que se obtiene en los puntos de medida frente al tiempo, de esta forma podemos ver si la medida es estable o cambia, y por otro lado, cuando vayamos probando los distintos escenarios podremos ir viendo cómo



se comporta ésta en función de la deformación por presión. La señal de color verde corresponde al punto de medida 1, y la señal de color lila, al punto 2.



Figura IV80. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema.

Tal y como esperábamos, observamos en esta figura que para uno de los valores, en concreto el que se obtiene en el punto de medida 1 el valor de tensión eléctrica es de aproximadamente 2.7V (2.689V). Este valor es el esperado a priori, ya que al estar centrado el punto de medida y disponer de un sistema simétrico, el valor de tensión cae aproximadamente a la mitad del voltaje aplicado, 5V, siendo por tanto este valor cercano a 2.5V. En cambio, para el otro punto de medida situado en la segunda banda conductora, el punto 2, se obtiene un valor cercano a cero, al haberse producido una mayor caída de la tensión eléctrica, y es por eso que el resultado es de 0.291V, se dispone de un punto de medida mucho más alejado del punto de entrada de la tensión eléctrica y muy cercano a la salida.

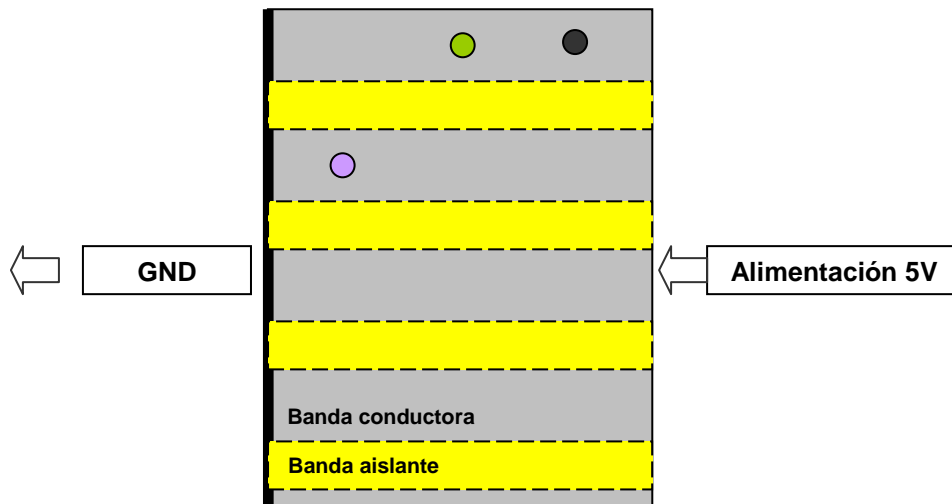
### Etapa 2: Escenario 1.

Para este primer escenario, con el objeto de provocar la deformación por presión se ha colocado en la primera banda conductora una pequeña pesa con un masa de 10g, la cual dispone de una base circular de 1cm de diámetro, lo que equivale a un área superficial de 0,78 cm<sup>2</sup>, por lo tanto, la presión que está ejerciendo esta pesa se puede calcular a partir de la siguiente fórmula;

$$P \text{ (Pa)} = \frac{F_{\text{peso}} \text{ (N)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{M \text{ (kg)} * g \text{ (m/s}^2\text{)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = 1.256 \text{ Pa}$$

Es importante reseñar que a la base de la pesa se le ha colocado un adhesivo aislante ya que al ser metálica podría producir interferencias en contacto con el tejido conductor.

En el siguiente diagrama representado en la figura IV81 se representa la colocación de esta pesa mediante un punto negro circular.



*Figura IV81. Diagrama de un sistema complejo con dos puntos de medida después de poner una pesa de 10 gramos en el lado derecho de la primera banda conductora.*

*-. Hipótesis del primer escenario*

Como hipótesis de partida, al aplicar una deformación por presión sobre esta zona del tejido, y al igual que pasaba cuando la deformación era elástica, se debe producir una mejora estructural de los puntos de contacto de los hilos conductores que componen la banda conductora del tejido aumentando así la conductividad en este punto, y al producirse en la parte derecha del punto de medida, se espera que se produzca un aumento de la tensión eléctrica en el punto de medida 1, el mismo en el que se produce la deformación. Por otro lado, no podemos predecir qué puede pasar en el punto de medida 2, al estar más alejado y en una banda diferente de donde se está aplicando la deformación por presión.

*-. Resultados obtenidos*

Empíricamente, al realizar las medidas en ambos puntos indicados obtenemos la siguiente representación de la conductividad eléctrica en función del tiempo tal y como se detalla en la figura IV82.



Figura IV82. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al colocar una pesa de 10 g en un lado de la primera banda conductora.

En esta figura podemos observar la variación de tensión que se produce en el punto de medida 1 (color verde). Tal y como se esperaba se produce un aumento de la tensión eléctrica fruto de este aumento de la conductividad en la parte derecha del punto de medida al producirse la deformación por presión en la zona representada, o lo que equivale a decir que el valor de  $R'_1$  ha disminuido, por lo que  $R''_1 > R'_1$ , y con ello se pierde menos tensión eléctrica hasta llegar al punto de medida.

Al analizar los valores absolutos se observa que se produce una subida de la señal de unos 114 mV en aproximadamente 3 segundos, lo cual no es muy significativa al suponer una variación del 4.2%. Se puede apreciar también que el valor se estabiliza rápidamente y la nueva señal se mantiene constante con el tiempo.

Para realizar el análisis de esta deformación por presión que se efectúa en la primera banda conductora y evaluar su influencia sobre la segunda banda nos fijamos en el punto de medida 2. Como vemos, se aprecia una pequeña variación de la señal de aproximadamente 0.012V, lo equivale a poco más del 4.5%. De esta forma, se puede decir que si existe una influencia de la señal al producir una deformación por presión en las bandas contiguas, aunque esta sea poco significativa.

En la medida queremos que la medida tomada sea más significativa para que el error tenga menor peso sobre estos valores deberemos de incrementar la deformación por presión que aplicamos.

Asimismo, cuando retiramos el peso el sistema vuelve a perder tensión eléctrica fruto de la desaparición de la deformación por presión y consecuente recuperación del tejido. Los valores obtenidos se representan en la siguiente tabla IV39 resumen para este primer escenario.

Tabla IV39. Resultados del estudio del comportamiento de una deformación por presión producida por un peso de 10 g en la parte derecha de la primera banda conductora con dos puntos de medida.

Punto de medida	Tensión Eléctrica (V)		
	Sin deformación por presión	Al aplicar la deformación por presión	Posterior a la deformación por presión
1	2.689	2.803	2.695
2	0.291	0.304	0.292

Se observa que esta recuperación del tejido no supone volver a los valores iniciales de tensión eléctrica, aunque se mantienen en valores cercanos, debido a que el tejido no recupera su posición desde el punto de vista estructural inicial. Aun así, no vamos a detenernos en realizar este análisis con detenimiento debido a que lo que buscamos son más las variaciones desde el punto de vista cualitativo que la propia valoración de estos valores absolutos o el comportamiento cuantitativo.

En base a estos resultados podemos concretar que la utilización de un peso de esta masa no se considera suficiente para provocar una variación de tensión eléctrica que sea significativa como para poder determinar un comportamiento definido del tejido. El hecho de que esta medida no vuelva a su estado inicial después de retirar el peso es también un claro indicador que debemos buscar variaciones más significativas que nos permitan minimizar este efecto al máximo para que no sea representativo y no influya de forma determinante en este comportamiento.

### Etapa 3: Escenario 2.

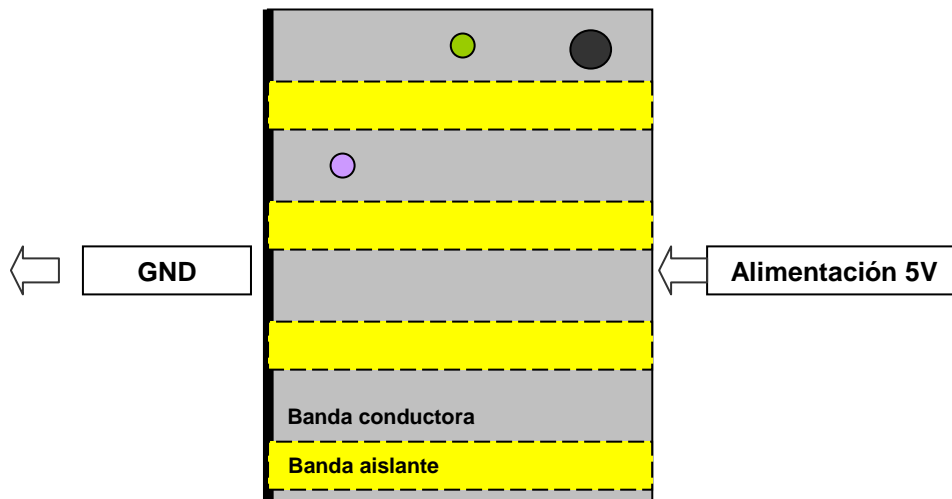
Para intentar solucionar este problema se plantea un segundo escenario, igual que el anterior en lo que respecta al banco de pruebas, pero aplicamos un peso con una masa cinco veces superior a la primera, es decir, la masa que aplicamos ahora es de 50 gramos. Y la colocamos exactamente en el mismo punto que el escenario anterior, en la primera de las bandas conductoras, a la parte derecha del punto de medida 1:

Para el cálculo de presión que está ejerciendo esta nueva pesa hay que tener en cuenta que además del incremento de la masa, el área superficial de la base es también mayor, de 1,5 cm de diámetro, lo que equivale a un área superficial de 1,76 cm<sup>2</sup>, por lo tanto, la presión que está ejerciendo esta pesa se puede calcular a partir de la siguiente fórmula;

$$P \text{ (Pa)} = \frac{F_{\text{peso}} \text{ (N)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{M \text{ (kg)} * g \text{ (m/s}^2\text{)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = 2.773 \text{ Pa}$$

Como se puede apreciar, el aumento en cinco veces de la masa de la pesa responsable de ejercer la presión no supone multiplicar ésta por cinco, ya que el área superficial donde se está aplicando esta presión también cambia.

En el siguiente diagrama representado en la figura IV83 se representa la colocación de esta pesa mediante un punto negro circular.



*Figura IV83. Diagrama de un sistema complejo con dos puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la primera banda conductora.*

#### *-. Hipótesis del segundo escenario*

Al igual que la hipótesis planteada en el primer escenario, al aplicar una deformación por presión sobre esta zona del tejido, se espera que se produzca un aumento de tensión en el punto de medida 1, que está situado en la misma banda conductora que se produce la deformación. Se espera también que este aumento de la presión ejercida con respecto al primer escenario produzca una mayor variación de la tensión eléctrica.

Por otro lado, y en base a la experiencia del primer escenario podemos predecir que para el punto de medida 2, también se va a producir un aumento de tensión pero mucho menor que en el punto de medida 1, debido a que es un punto que se encuentra en una banda diferente y además éste está más alejado de donde se está aplicando la deformación por presión.

#### *-. Resultados obtenidos*

Los resultados obtenidos para este escenario se representan en la siguiente figura IV84.



Figura IV84. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al colocar una pesa de 50 g en un lado de la primera banda conductora.

Tal y como esperábamos en el momento de aplicar el peso con mayor masa, y como consecuencia del aumento de la deformación por presión producida sobre el sistema, se produce una subida de tensión mucho más considerable, concretamente de 1.312V. Un valor que consideramos que ya es mucho más significativo ya que representa una variación del 47% frente al 4% del escenario anterior.

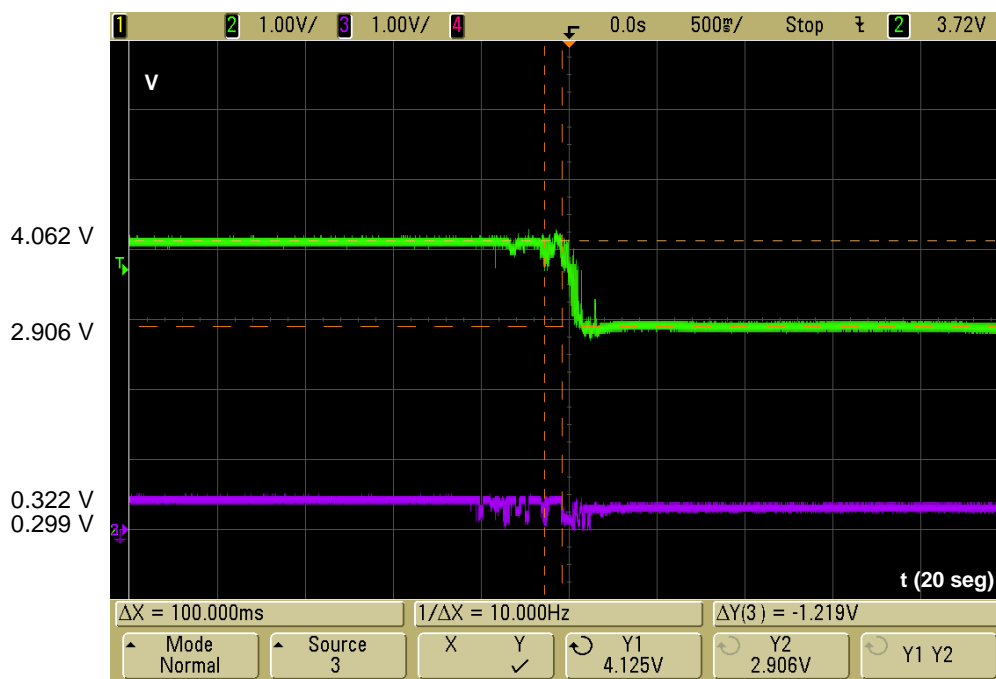
Es también importante resaltar, que el aumento de la presión ejercida en 2.2 veces más, es decir hemos pasado de ejercer una presión de 1.256 Pa en el primer escenario a 2.773 Pa en el segundo, no supone aumentar esta variación de tensión eléctrica en esta magnitud, ya que pasa de 0.114V a 1.312V de uno a otro escenario. Esto se debe, tal y como se ha podido comprobar en el estudio del comportamiento de la variación eléctrica de este tipo de tejidos en función de la deformación por estiramiento, que esta variación no es lineal, sino exponencial, de ahí que cuando aumentamos la deformación, en este caso por presión, en 2.2 veces se produce un cambio en la variación eléctrica del orden de 11.5 veces.

Con respecto al tiempo necesario para producir esta variación y estabilizarse, se observa que estamos de nuevo cerca de los 2 segundos, un tiempo que consideramos aceptable, y lo más importante, es que se produce una estabilización de la señal sin sufrir fluctuaciones posteriores a la deformación.

En el análisis del punto de medida 2, se vuelve a constatar que si existe de nuevo una influencia entre la banda que sufre directamente la deformación por presión con respecto a la banda adyacente, en concreto de un 9%. Debido al aumento de la presión que se ejerce sobre el tejido, es lógico que aumente también la variación en este segundo punto de medida y por consiguiente exista un mayor efecto que podemos denominar interferencia. Pero al comparar las variaciones de estos dos

puntos de medida en ambos escenarios, podemos evidenciar que mientras que en el primer escenario en el punto de medida 1, que se corresponde con el punto de señal, la variación es del 4%, y en el punto de medida 2 que se corresponde con el punto de interferencia, también es del 4%, para el segundo escenario estos incrementos se encuentran en el orden del 47% y 9% respectivamente. Lo que equivale a decir que este segundo escenario es mucho más significativo y el ruido interfiere menos en la señal que en el primero.

De igual forma que para el primer escenario, procedemos ahora a retirar el peso para ver cómo se comporta el tejido. El resultado de este hecho lo encontramos en la siguiente figura IV85.



*Figura IV85. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al retirar la pesa de 50 g colocada en la primera banda conductora.*

Se observa en esta figura, tal y como esperábamos, que cuando retiramos el peso el sistema vuelve a perder tensión eléctrica fruto de la desaparición de la deformación por presión y consecuente recuperación del tejido, en un tiempo relativamente corto, y de nuevo la señal se estabiliza manteniéndose constante.

Todos los valores obtenidos en este segundo escenario se representan en la siguiente tabla IV40 resumen.

*Tabla IV40. Resultados del estudio del comportamiento de una deformación por presión producida por un peso de 50 g en la parte derecha de la primera banda conductora con dos puntos de medida.*

Punto de medida	Tensión Eléctrica (V)		
	<i>Sin deformación por presión</i>	<i>Al aplicar la deformación por presión</i>	<i>Posterior a la deformación por presión</i>
<b>1</b>	2.750	4.062	2.906
<b>2</b>	0.295	0.322	0.299

Se observa que esta recuperación del tejido no supone volver a los valores iniciales de tensión eléctrica, aunque como ya se ha comentado no va a ser objeto de estudio.

En base a estos resultados podemos concretar que la utilización de un peso de masa superior se considera suficiente para provocar una variación de tensión eléctrica que sea significativa y representativa como para poder determinar un comportamiento definido del tejido que es sometido a una deformación por presión.

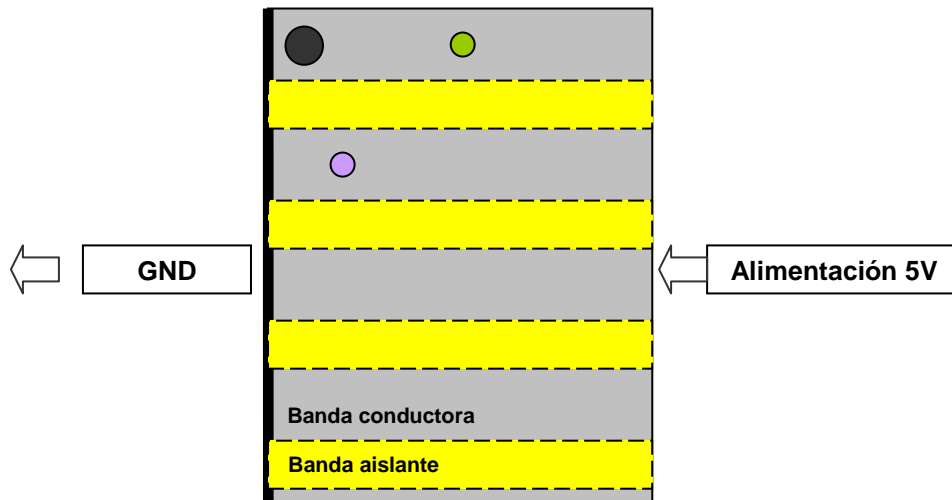
En base a esta metodología y resultados obtenidos, se plantea a continuación el ver qué ocurre si este peso lo colocamos a la parte izquierda de los puntos de medida.

#### *Etapas 4: Escenario 3.*

Tomando como referencia los resultados obtenidos en el segundo escenario se plantea a continuación estudiar el comportamiento cuando la deformación por presión se produce en la parte izquierda de los dos puntos de medida. En este sentido, es importante resaltar que vamos a obviar el hecho de realizar esta deformación con la pesa de 10 gramos, y pasamos directamente a utilizar la de 50 gramos, ya que hemos obtenido mejores resultados.

Por lo que, en este tercer escenario nos centramos fundamentalmente en la colocación de dos pesas en la parte izquierda tal y como se indica en la siguiente figura IV86.





*Figura IV86. Diagrama de un sistema complejo con dos puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado izquierdo de la primera banda conductora.*

*-. Hipótesis del tercer escenario*

Como es evidente, la hipótesis que planteamos en esta fase se centra en una disminución de la tensión eléctrica con respecto a la inicial cuando se coloca la pesa. Esto se debe a que al producirse en este caso el aumento de la conductividad en este punto, situado en la parte izquierda del punto de medida, se espera que se produzca una disminución de la tensión en el punto de medida 1.

*-. Resultados obtenidos*

Al realizar las medidas en ambos puntos indicados obtenemos la siguiente representación de la conductividad eléctrica en función del tiempo tal y como se detalla en la figura IV87.

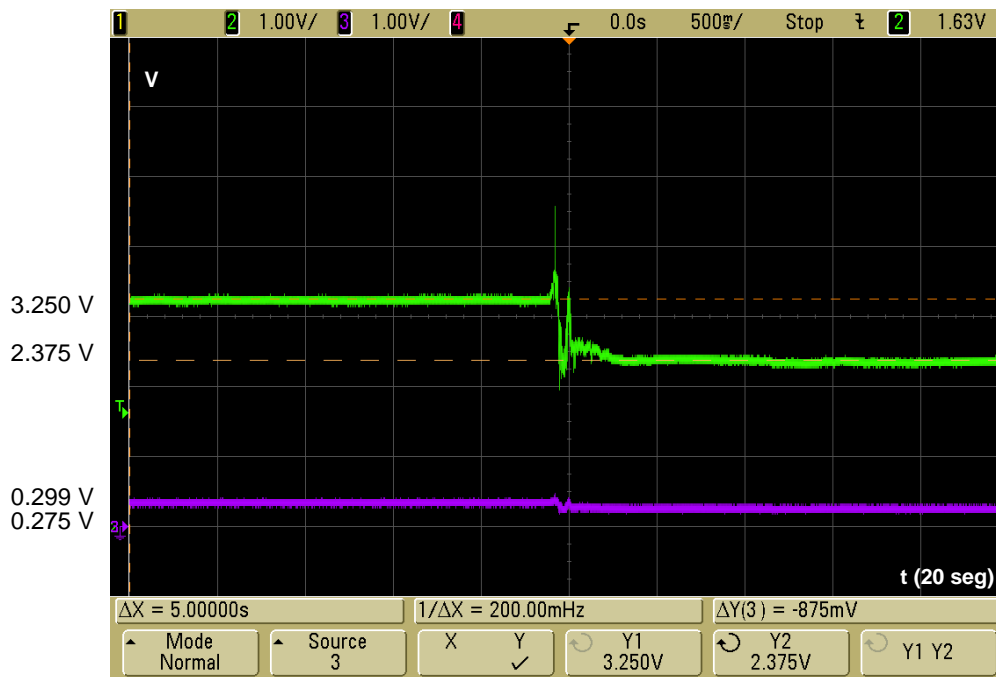


Figura IV87. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al colocar una pesa de 50 g en el lado izquierdo de la primera banda conductora.

Tal y como se esperaba se produce una disminución de la tensión eléctrica fruto de este aumento de la conductividad en la parte izquierda del punto de medida al producirse la deformación por presión, o lo que equivale a decir que el valor de  $R'_1$  ha disminuido, por lo que  $R'_1 < R''_1$  y con ello se pierde más tensión eléctrica hasta llegar al punto de medida.

Al analizar los valores absolutos se observa que se produce una disminución de la señal de unos 875 mV en aproximadamente 3 segundos, lo cual supone una variación del 27%. Se puede apreciar también que el valor se estabiliza rápidamente y la nueva señal se mantiene constante con el tiempo.

Por otro lado, es importante reseñar que no es comparable este valor con respecto a la variación observada en el segundo escenario para este primer punto de medida, ya que la deformación por presión producida en la parte izquierda no es simétrica con respecto a la producida en la parte derecha, no se encuentra a la misma distancia del punto de medida, por lo que el comportamiento del tejido es distinto. En base a esto, y desde un punto de vista más cuantitativo no van a ser comparados al no haberse considerado la simetría de la deformación en uno y otro lado, ya que no es el objeto de este estudio.

Al fijarnos en el punto de medida 2 y evaluar su influencia sobre la segunda banda, observamos como se aprecia una pequeña variación de la señal de aproximadamente 0.024V, lo equivale a al 8% de variación. De esta forma, se puede decir de nuevo existe una influencia de la señal al producir una deformación por presión en las bandas contiguas, aunque esta sea poco significativa. Esta perturbación es mayor en este escenario, un 8% frente a un 24%, con respecto al 9% frente al 47% del segundo escenario, debido fundamentalmente que está más cerca la zona donde se produce la

deformación del punto de medida 2 en este tercer escenario que en el segundo, el cual está mucho más alejado, por lo que es razonable que la influencia relativa sea mayor.

Asimismo, cuando retiramos el peso el sistema vuelve a aumentar la tensión eléctrica fruto de la desaparición de la deformación por presión y consecuente recuperación del tejido. El resultado de este hecho lo encontramos en la siguiente figura IV88.

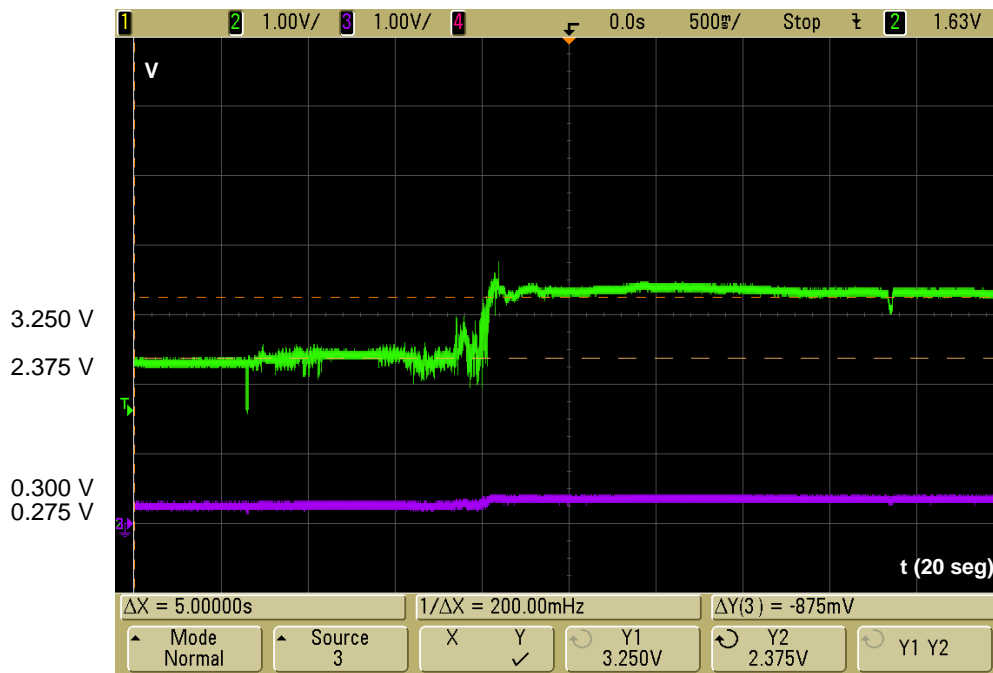


Figura IV88. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al retirar la pesa de 50 g en el lado izquierdo de la primera banda conductora.

De nuevo el sistema retoma en este caso exactamente para el punto de medida 1 el valor inicial sin deformación, por lo que el comportamiento es reversible desde el punto de vista cualitativo, aunque no sea objeto de este estudio. Los valores obtenidos se representan en la siguiente tabla IV41 resumen para este tercer escenario.

Tabla IV41. Resultados del estudio del comportamiento de una deformación por presión producida por un peso de 50 g en la parte izquierda de la primera banda conductora con dos puntos de medida.

Punto de medida	Tensión Eléctrica (V)		
	Sin deformación por presión	Al aplicar la deformación por presión	Posterior a la deformación por presión
1	3.250	2.375	3.250
2	0.299	0.275	0.300

En definitiva, del análisis de estas cuatro fases y estos tres escenarios, una de las primeras conclusiones parciales que se puede extraer es la obtención de un sistema piezoresistivo capaz de detectar una deformación por presión de forma significativa.

En este caso el tejido ya no presenta unas zonas de detección virtuales como pasaba en el punto anterior, sino estas zonas son ya reales y están diferenciadas por las bandas conductoras y bandas aislantes. Además, en un misma banda en función de donde coloquemos el punto de medida y en que parte de éste ejerzamos la deformación por presión se podrá diferenciar hasta dos zonas de separación de la banda conductora en función de si esta tensión eléctrica aumenta o disminuye.

En lo que respecta a la sensibilidad del sensor piezoresistivo diseñado comentar que es necesario ejercer una presión sobre el tejido lo suficientemente elevada, del orden de los 2 y 3 kPa, para que éste sea capaz de detectar la variación de tensión eléctrica que se produce, y de esta forma, que esta presión ejercida sea lo bastante significativa como para que no interfieran los errores más importantes que son principalmente dos; la falta de robustez del sistema y la carencia que sufre el tejido durante la recuperación del mismo una vez eliminada la deformación por presión hasta volver al punto de inicial.

En lo que respecta al tiempo necesario para producir el cambio de tensión eléctrica una vez producida la deformación por presión, comentar que se considera relativamente corto ya que suele estar cercano a los 3 segundos, desde el momento que se coloca la pesa sobre la zona hasta que se obtiene una señal estabilizada y con un valor constante. Y en este sentido, el proceso en cuanto al comportamiento y tiempo de recuperación necesario es totalmente reversible, no así si analizamos valores absolutos, ya que observamos que la recuperación no se produce hasta el punto de partida.

#### IV.2.2.2.- RESPUESTA DE UN SISTEMA SENSOR CON BANDAS AISLANTES. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE UNA PERTURBACIÓN SOBRE LAS ZONAS CERCANAS.

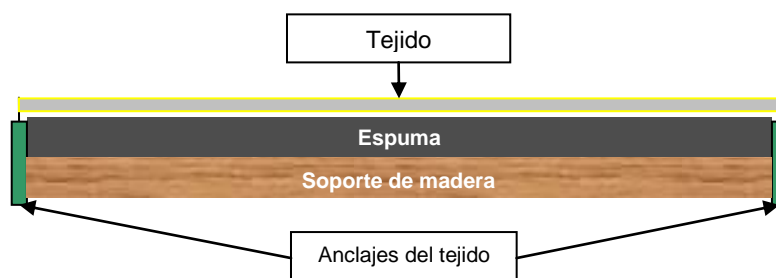
De los resultados y conclusiones alcanzadas en el punto anterior, se proponen a continuación una serie de modificaciones y mejoras sobre el sistema de medida para conseguir como fin último el obtener un sensor piezoresistivo basado única y exclusivamente en la propiedad conductora de un tejido de punto que actúe como un sistema totalmente reproducible y que nos permita medir de forma rigurosa el punto donde se realiza una determinada y controlada presión ejercida sobre el propio tejido.

Y por otro lado, y más concretamente en base a las experiencias anteriores, poder diferenciar las distintas zonas del tejido, y no solo dos como en el caso anterior. En este sentido y para conseguir este objetivo, va a ser necesario centrar el objeto de la investigación en mejorar el sistema de medida de forma que podamos minimizar al máximo el error que está sujeto a la falta de recuperación del propio tejido, y por otro la perturbación en las bandas adyacentes al provocar una deformación por presión en una banda.

Para la presente fase de la investigación se ha tomado como referencia el mismo banco de pruebas que en el apartado anterior, pero realizando una serie de modificaciones al respecto. Básicamente éstas han sido:

- por un lado, fijar mejor el tejido a la propia estructura para que tenga mucha menos libertad de movimiento, y favorecer así la reproducibilidad de las medidas.
- y por otro, colocar una espuma de poliuretano de 1 cm de espesor entre el tejido y el soporte de madera para favorecer la recuperación al estado inicial.

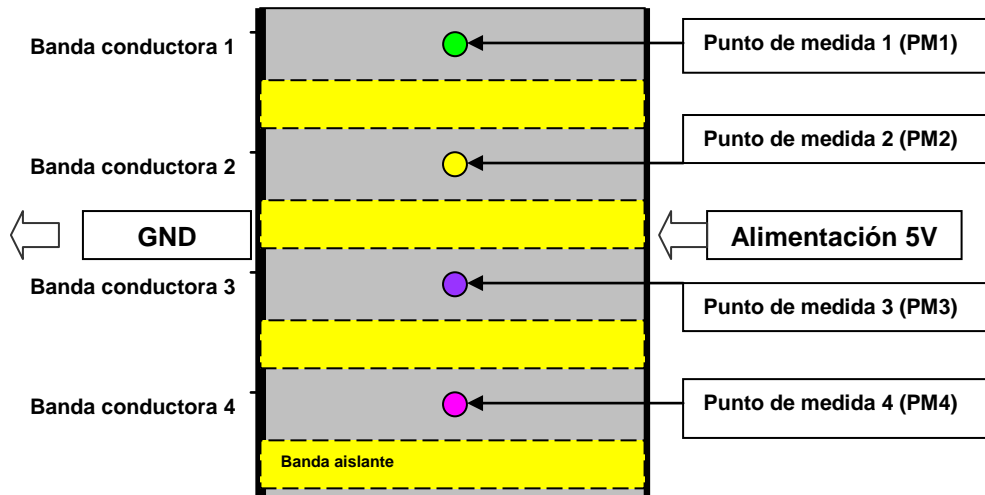
Tal y como se representa en la siguiente figura IV89 donde se aprecian de forma visual estas dos mejoras aplicadas sobre el sistema.



*Figura IV89. Representación visual del nuevo sistema de medida visto desde una perspectiva lateral.*

Por otro lado, y como ya se ha comentado, otro de los problemas que presenta este sistema es que no está preparado para diferenciar más de dos zonas del tejido. Para solucionarlo se plantea un sistema con varios puntos de medida, en concreto van a ser 4 los puntos de medida. En base a determinadas pruebas preliminares que se han

realizado se ha concretado que los puntos de medida deben de estar en la zona central de cada una de las bandas conductoras, tal y como está representado en la siguiente figura IV90.



*Figura IV90. Diagrama de un sistema complejo de un tejido de cuatro bandas conductoras aplicando una corriente continua de 5V entre ambos extremos y con un punto de medida en cada banda.*

Los puntos de medida 1 y 4 son fijos y forman parte de la propia estructura del banco de ensayos, por lo que a priori los resultados que se van a obtener van a ser mucho más fiables y repetitivos que en los otros dos puntos de medidas, 2 y 3, cuya toma de medida es móvil, pudiendo sufrir pequeñas variaciones.

De nuevo, en este punto es apropiado realizar un análisis teórico desde una perspectiva electrotécnica aplicado a la estructura de tejido compuesto por cuatro bandas conductoras junto con el banco de ensayos empleado.

Para ello, y partiendo de que el sistema genera una corriente continua a un determinado voltaje, 5V, la representación gráfica de lo que está ocurriendo en este sistema es la misma que se representa en la figura IV79, pero a continuación los puntos de medida van a ser cuatro, por lo que tendremos valores de  $V_{PM1}$ ,  $V_{PM2}$ ,  $V_{PM3}$  y  $V_{PM4}$ .

Se han establecido en esta figura varios puntos donde va a ser importante conocer el potencial en los mismos, el punto X, donde se cumple que la tensión eléctrica es  $V_X = 5V$ , el punto Y, donde se cumple que  $V_Y = 0V$ , y los distintos puntos que se vayan a tomar como puntos de medida (PM), donde independientemente de donde lo coloquemos y en que banda se va a cumplir que  $V_Y < V_{PM} < V_X$ , es decir,  $0 < V_{PM} < 5$ .

Al estar colocados estos puntos de medida de forma aproximada en el centro de cada una de las bandas conductoras, a la misma distancia prácticamente de la entrada y la salida de la corriente eléctrica, se espera que la tensión eléctrica caiga aproximadamente a la mitad en este punto ( $V_{PM1} \approx V_{PM2} \approx V_{PM3} \approx V_{PM4} \approx 2.5V$ ).

Tomando como referencia estos cuatro puntos de medida, que hemos dicho que van a estar centrados, se tiene que cumplir que, para  $i=1, 2, 3$  y  $4$ ,  $R'_i \approx R''_i$  en condiciones normales. En el momento que produzcamos una deformación en cualquiera de las dos partes, derecha o izquierda, de cualquier punto de medida, por ejemplo para un  $i=1$ , se producirá un cambio de la conductividad del mismo por lo que se espera también que  $R'_1 \neq R''_1$ , por lo que el valor de  $V_{PM1}$  será muy distinto a  $2.5V$ , subirá o bajará en función del valor relativo de la resistencia eléctrica a la derecha o la izquierda. En este sentido, se espera también que varíe los valores del resto de resistencias eléctricas del resto de bandas, debido a esta perturbación, por lo que como consecuencia los valores de  $V_{PM2}$ ,  $V_{PM3}$ , y  $V_{PM4}$ , también se verán afectados de distinta forma.

Además, para provocar la deformación por presión, nos basamos en las conclusiones del sistema que se han definido en el punto anterior, por lo que se va a utilizar la pesa de  $50g$  y no la de  $10g$ , ya que se ha demostrado que con esta mayor masa los resultados son más significativos debido a que el error relativo es mucho menor.

En base a este sistema con las mejoras comentadas, se pretende a continuación medir las variaciones producidas en los diferentes puntos de medida cuando aplicamos la deformación por presión al tejido de forma puntual, así como estudiar la influencia de la perturbación que provoca esta deformación en el resto de bandas. Debido a la modificación del banco de pruebas, a priori no podemos saber cómo va a afectar la influencia de la deformación por presión en la banda aplicada con respecto a las otras, si va a aumentar o disminuir con respecto a los resultados obtenidos en el anterior apartado. De esta forma, se va a evaluar la influencia de esta perturbación producida principalmente en las bandas cercanas al tejido, así como se verá también si afecta o no al resto de las zonas más alejadas.

Por último, y con el propósito de comprobar la segunda de las mejoras realizadas sobre el sistema que está basado en la colocación de una espuma que favorezca la recuperación del tejido, se pretende también hacer un estudio de la reproducibilidad de las medidas en tres estados; previo a la deformación por presión, durante la deformación y posterior a la deformación. El procedimiento que se ha definido en este caso está basado en la experiencia realizada en el punto IV.1.2.3, donde se ha definido un modelo de estudio de la reproducibilidad de las medidas obtenidas al provocar una deformación por estiramiento, y donde se realizaban hasta diez repeticiones de estiramiento del tejido y recuperación del mismo tomando en cada uno de estas posiciones el valor de tensión eléctrica.

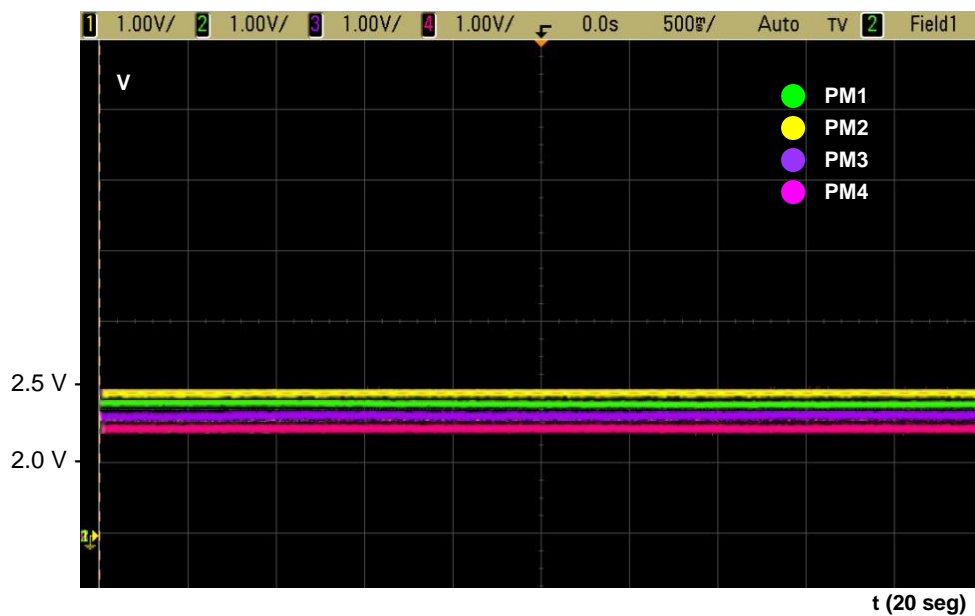
En definitiva, la metodología que se propone es la misma que se está utilizando en los distintos apartados de la presente tesis doctoral, de forma que en primer lugar se mide el valor en cada punto de medida previo a la deformación por presión, se coloca la pesa en una de las bandas conductoras a uno de los lados del punto de medida para producir esta deformación y se toman los valores en cada punto de medida, una vez estabilizados, se retira la pesa y se vuelve a tomar estos valores una vez es constante de nuevo. Esta acción se repite hasta 10 veces para obtener los diez valores de tensión eléctrica en los cuatro puntos de medida. Esta secuencia se repite para cada una de las cuatro bandas, y para cada uno de los dos lados de cada banda, a izquierda y derecha.

En resumen, esta es la secuencia que se va a seguir para estos distintos casos:

- Caso previo: Sin Deformación (SD).
- Caso 1: Deformación por presión a la derecha del PM1.
- Caso 2: Deformación por presión a la derecha del PM2.
- Caso 3: Deformación por presión a la derecha del PM3.
- Caso 4: Deformación por presión a la derecha del PM4.
- Caso 5: Deformación por presión a la izquierda en los cuatro puntos de medida.

*Caso Previo: Sin Deformación (SD).*

Si medimos directamente antes de poner en marcha la fuente de alimentación al sistema y evidentemente previo a la colocación de los pesos las tensiones en los puntos de medida son nulas. En el momento que conectamos la fuente de alimentación a 5V obtenemos ya una señal en el osciloscopio, la cual es representada en la figura IV91.



*Figura IV91. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo previo a producir una deformación por presión.*

Los colores que se representan en esta figura se corresponden con cada uno de los puntos de medida según la siguiente distribución:

- Punto de medida 1- Verde
- Punto de medida 2- Amarillo
- Punto de medida 3- Lila
- Punto de medida 4- Rosa

Los resultados obtenidos están expuestos en la siguiente tabla IV42:



Tabla IV42. Resultados de la tensión eléctrica en los puntos de medida previo a la deformación por presión

Punto de medida	Tensión Eléctrica (V)
	<i>Sin deformación por presión</i>
1	2.400
2	2.460
3	2.340
4	2.270

Como observamos estos valores obtenidos en los distintos puntos de medida tienden a valores medios del valor total de voltaje aplicado, lo cual nos indica que no está cortocircuitado (sería así si obtuviésemos algún valor muy cercano a 5V). En concreto se tratan todos ellos de valores cercanos a 2.5V, la mayoría de ellos por debajo de éste. La diferencia establecida entre estos valores, aunque es pequeña, nos permite hacer dos consideraciones:

- Por un lado, si comparamos entre bandas conductoras, que los valores de  $R_i$  son distintos entre sí, al no ser exactamente simétricas las bandas conductoras unas con otras, en lo que respecta a conductividad eléctrica.
- Y por otro lado, si comparamos en una misma banda, que los valores de  $R'_i$  y  $R''_i$  son distintos, lo que puede ser debido a que el punto de medida no se encuentre equidistante de un lado al otro, lo cual se descarta debido a que los puntos de medida se han colocado justo en el centro de cada banda utilizando una regla métrica, o bien que exista una disposición estructural del tejido diferente en un lado respecto al otro, lo que es más probable.

En este sentido, haciendo un especial análisis a los valores numéricos obtenidos para cada punto de medida vemos que en la parte derecha del tejido la caída de tensión se sitúa en valores ligeramente superiores a 2.5V, mientras que la parte izquierda se quedan todos ellos por debajo. O lo que equivale a decir que en las cuatro bandas  $R'_i < R''_i$ .

#### Caso 1: Deformación por presión a la derecha del PM1.

##### -. Hipótesis del primer caso:

Tal y como ya se conoce por las experiencias de los apartados anteriores, al poner la pesa al lado derecho del punto de medida, la tensión eléctrica de ésta debería de subir, y el resto de bandas también estarán influenciadas por esta perturbación.

Para este primer escenario se propone la colocación del peso de 50g en la banda referenciada como número 1 en la parte derecha de punto de medida tal y como aparece representado en la figura IV92.

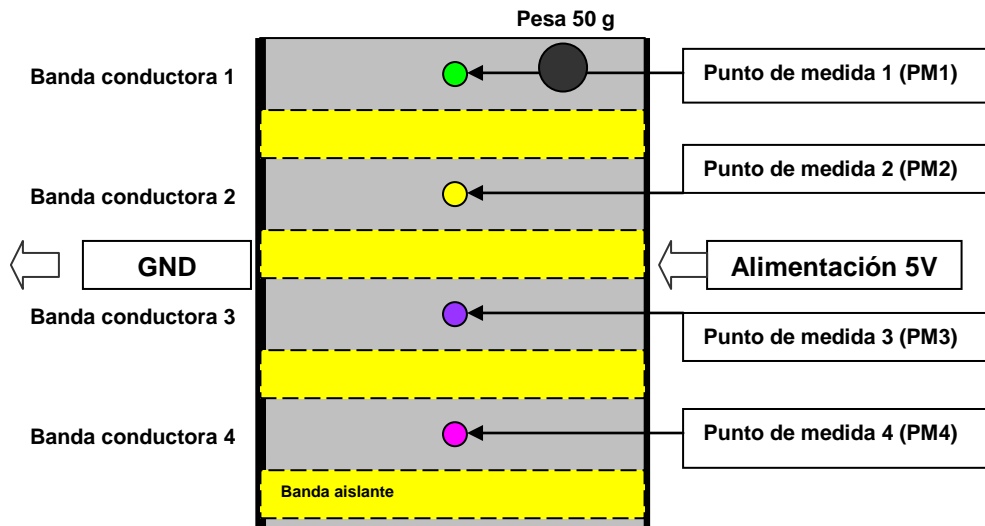


Figura IV92. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la primera banda conductora.

-. Resultados obtenidos:

Los resultados obtenidos se representan en la figura IV93.



Figura IV93. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo una producida la deformación por presión en la banda conductora 1.

En esta figura observamos a primera vista una variación significativa de la línea amarilla que corresponde como es evidente con el punto de medida 1, que se corresponde con la zona donde se ha colocado la pesa, y en consecuencia donde se produce la deformación por presión. Pero vemos como también esta deformación afecta básicamente a los puntos de medida 2 y 3 (bandas conductoras 2 y 3). Una vez colocadas las pesas el sistema sufre esta variación y se estabiliza rápidamente en los nuevos valores. Comprobamos que la línea amarilla mantiene un valor más alto de conductividad fruto de esta deformación directa, pero afecta a sus bandas vecinas de forma proporcional bajando la señal, es decir, el aumento de esta conductividad eléctrica se produce en detrimento del resto de bandas donde disminuye el peso específico de valor de conductividad. También encontramos una relación directa en esta deformación, cuanto la banda se encuentra más cerca más le afecta esta deformación.

De igual forma es también importante resaltar que la banda más alejada no se ve afectada por esta perturbación, ya que su valor se mantiene prácticamente constante.

A continuación, y siguiendo con el procedimiento retiramos las pesas del sistema y estudiamos cual es el comportamiento del sistema. Los resultados se detallan en la figura IV94.



*Figura IV94. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en el momento de la recuperación al eliminar la deformación por presión en la banda conductora 1.*

Se observa como el sistema vuelve de nuevo a la posición inicial tal y como esperamos. De forma más significativa la primera banda que ha sido en la que hemos producido la deformación por presión y la que se ha visto más afectada recupera los valores aproximados de la señal de partida, el mismo orden de colores que al inicio (amarillo-verde-lila-rosa). Aunque para poder comprobar la reproducibilidad del sistema y tal y como ya se ha introducido es necesario realizar medidas repetitivas sobre cada uno de los casos planteados. Por lo que la secuencia realizada ha consistido en la toma de los valores previo a la deformación por presión en la primera

banda conductora, una segunda toma después de producir esta deformación estabilizado éste, y por último, un tercer valor después de retirar el peso y dejar unos segundos hasta que se alcanza de nuevo un resultado constante en el tiempo. Este proceso se ha repetido hasta diez veces.

En este sentido, a nivel cuantitativo, los valores de la tensión eléctrica que se han tomado en los distintos puntos de medidas se representan en las siguientes tablas:

*Tabla IV43. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1.*

PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2.400	2.312	2.423	2.516	2.471	2.612	2.820	2.615	2.813	3.002	<b>2.598</b>	<b>0.220</b>
DP	2.850	2.810	2.950	2.914	2.980	3.018	3.216	3.160	3.350	3.420	<b>3.067</b>	<b>0.210</b>
SD-B	2.312	2.423	2.516	2.471	2.612	2.820	2.615	2.813	3.002	3.120	<b>2.670</b>	<b>0.261</b>
Variación % Deformación	18,8	21,5	21,7	15,8	20,6	15,5	14,0	20,8	19,1	13,9	<b>18,2</b>	<b>3,1</b>
Variación % A-B	3,7	4,8	3,8	1,8	5,7	8,0	7,3	7,6	6,7	3,9	<b>5.4</b>	<b>1,9</b>

*Tabla IV44. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1.*

PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,460	2,505	2,488	2,522	2,492	2,604	2,577	2,584	2,650	3,002	<b>2,588</b>	<b>0,157</b>
DP	2,590	2,653	2,610	2,664	2,720	2,695	2,688	2,798	2,830	3,420	<b>2,767</b>	<b>0,241</b>
SD-B	2,505	2,488	2,522	2,492	2,604	2,577	2,584	2,650	2,703	3,120	<b>2,625</b>	<b>0,188</b>
Variación % Deformación	5,3	5,9	4,9	5,6	9,1	3,5	4,3	8,3	6,8	13,9	<b>6,8</b>	<b>3,0</b>
Variación % A-B	1,8	0,7	1,4	1,2	4,5	1,0	0,3	2,6	2,0	3,9	<b>1,9</b>	<b>1,4</b>

*Tabla IV45. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1.*

PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,340	2,311	2,336	2,315	2,308	2,320	2,332	2,359	2,365	2,379	<b>2,337</b>	<b>0,024</b>
DP	2,397	2,388	2,390	2,375	2,362	2,391	2,423	2,411	2,409	2,405	<b>2,395</b>	<b>0,018</b>
SD-B	2,311	2,336	2,315	2,308	2,320	2,332	2,359	2,365	2,379	2,352	<b>2,338</b>	<b>0,025</b>
Variación % Deformación	2,4	3,3	2,3	2,6	2,3	3,1	3,9	2,2	1,9	1,1	<b>2,5</b>	<b>0,8</b>
Variación % A-B	1,2	1,1	0,9	0,3	0,5	0,5	1,2	0,3	0,6	1,1	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>

Tabla IV46. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1.

PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,270	2,275	2,277	2,284	2,283	2,289	2,289	2,285	2,295	2,298	<b>2,285</b>	<b>0,009</b>
DP	2,275	2,278	2,289	2,284	2,291	2,296	2,292	2,297	2,301	2,308	<b>2,291</b>	<b>0,010</b>
SD-B	2,275	2,277	2,284	2,283	2,289	2,289	2,285	2,295	2,298	2,305	<b>2,288</b>	<b>0,009</b>
Variación % Deformación	0,2	0,1	0,5	0,0	0,4	0,3	0,1	0,5	0,3	0,4	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,2	0,1	0,3	0,0	0,3	0,0	0,2	0,4	0,1	0,3	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>

Previo al análisis de los resultados obtenidos en este primer caso, se detalla a continuación que representa cada una de las filas que aparecen en estas tablas:

- SD-A; son los valores de tensión eléctrica Sin Deformación por presión, previo a la colocación de la pesa de 50g.
- DP; hace referencia a los valores de tensión eléctrica cuando se produce la Deformación por Presión.
- SD-B; son los valores de tensión eléctrica Sin Deformación, una vez se ha retirado la pesa que la provoca.
- Variación % Deformación; hace referencia a la variación porcentual entre los valores DP y los valores SD-A, es decir, la variación en tantos por cien que se produce al provocar la deformación por presión sobre el valor de tensión eléctrica. Este dato nos va a servir para comparar las distintas bandas entre sí, y ver cómo afecta la deformación que se produce en la misma banda que el punto de medida, y cómo influye en el resto.
- y por último, la Variación % A-B; se refiere a la comparación del valor después de retirar la pesa y dejar de hacer la deformación con respecto al valor inicial previo a la realización de la misma. Este dato nos va a servir para ver la recuperación del sistema, y se evaluará conjuntamente con el estudio de la reproducibilidad (desviación estándar).

En base a estas consideraciones, se puede realizar un doble análisis de los resultados obtenidos y representados en estas tablas.

Por un lado, observamos que queda claramente definida la banda conductora donde estamos provocando la deformación por presión, ya que los valores de variación para el punto de medida 1 está entorno al 18,2%, tomando el valor medio, mientras que el resto de puntos de medidas, 2, 3 y 4, estas variaciones porcentuales son de 6,8, 2,5 y 0,3 %, respectivamente. Es importante resaltar que esta disminución prolongada de la variación en las bandas se debe al aumento de la distancia desde el punto donde se realiza la deformación a las respectivas bandas. En este sentido, podemos decir, como

es coherente, que la banda que se encuentra más influenciada por esta deformación es la banda contigua a la primera banda, en este caso la segunda. De igual forma pasa con la tercera banda, también influenciada por esta deformación, pero en mucha menor medida. Y por último, la cuarta podemos decir que no está sujeta a la influencia de la deformación producida en la banda 1, por lo que no le afecta.

Si nos fijamos ahora, en estos valores absolutos de variación, comprobaremos que debido al cambio del banco de ensayos y la incorporación de elementos de mayor sujeción del tejido limitando así sus grados de libertad, éste ha perdido sensibilidad como sensor piezoresistivo, por lo que mientras en el apartado anterior veíamos que la pesa de 50g era capaz de provocar una variación de casi el 50% (incrementos superiores a 1 Voltio), ahora se ha rebajado hasta cerca del 20% (el incremento se ha reducido a 0,468 V). La experiencia nos dice que para incrementos de este orden la variación de las bandas adyacentes es más significativa que cuando la deformación realizada es mayor y por lo tanto conseguimos una mayor variación. Aun así, para los sucesivos casos planteados de deformación realizada en la parte derecha del punto de medida se seguirá utilizando la pesa de 50g.

Por otro lado, en lo que respecta a la reproducibilidad de los valores y la capacidad de recuperación del tejido después de la deformación, vamos a analizar solo los resultados de la tabla IV43, que son los obtenidos en el punto de medida donde se le aplica la deformación, en este caso en el punto y banda 1.

El porcentaje de variación entre A y B, es de 5,4%, lo cual es un indicador que la recuperación del tejido todavía no es la apropiada, al ser una variación elevada con respecto a la variación porcentual producida de la deformación (18,2%), vemos que es muy significativa. Es decir, el error sujeto a la no recuperación del estado inicial del tejido es todavía demasiado elevado para utilizar este sistema como sensor piezoresistivo en la parte derecha de la banda 1.

De igual forma, si analizamos la desviación estándar obtenida (0,2 V), de la realización de las distintas repeticiones de las medidas, observamos que es elevada al compararla con los valores absolutos de variación que se consiguen con y sin deformación, que como se ha comentado está entorno al 0,5 V. Por lo que es de nuevo un indicador de este elevado error y como consecuencia la poca reproducibilidad de las medidas, muy necesario cuando la aplicación del sistema va a ser un sensor piezoresistivo que tiene que actuar de forma continuada en la detección de presión.

De esta forma, manteniendo las mismas variables de estudio, planteamos un segundo caso pero ahora realizando la deformación por presión en el resto de las bandas conductoras piezoresistivas.

### *Caso 2: Deformación por presión a la derecha del PM2.*

En este segundo caso procedemos de igual forma que en el anterior pero ahora colocando el peso sobre la segunda banda de la parte derecha del punto de medida referenciado como 2 tal y como se indica en la figura IV95.

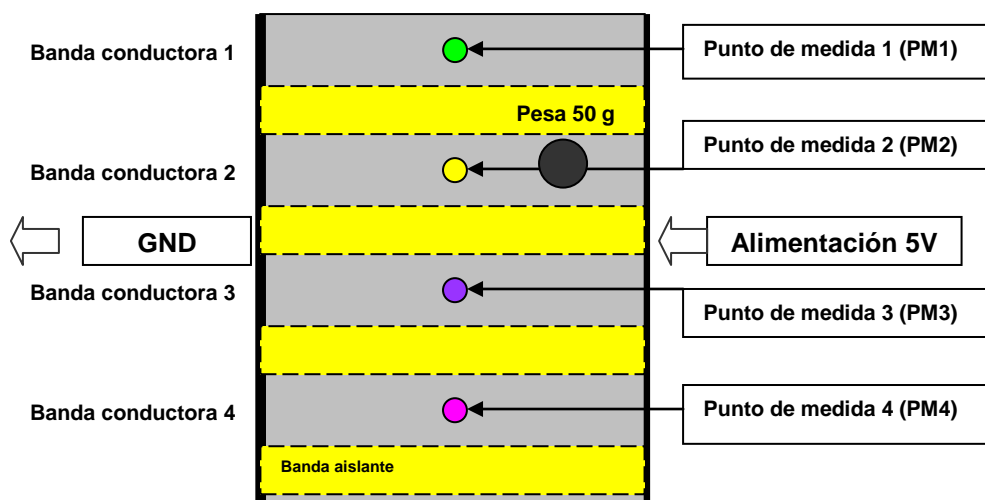


Figura IV95. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la segunda banda conductora.

-. Hipótesis del segundo caso:

Según los resultados obtenidos en el primer caso podemos imaginar un comportamiento idéntico en este segundo escenario, tan solo que en este caso la señal que se prevé va a variar de forma más significativa va a ser el que pertenece a la banda 2.

-. Resultados obtenidos:

En este sentido, en las siguientes tablas se detallan los resultados obtenidos para los cuatro puntos de medida y para cada uno de los distintos momentos en los que se realiza la toma de medidas y su repetitividad hasta 10 veces:

Tabla IV47. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,965	2,815	2,827	2,890	2,945	2,999	3,112	3,025	2,915	2,826	<b>2,932</b>	<b>0,097</b>
DP	3,125	3,001	2,952	3,010	3,119	3,253	3,308	3,204	3,015	3,101	<b>3,109</b>	<b>0,118</b>
SD-B	2,816	2,827	2,890	2,945	2,999	3,112	3,025	2,915	2,826	2,974	<b>2,933</b>	<b>0,097</b>
Variación % Deformación	5,4	6,6	4,4	4,2	5,9	8,5	6,3	5,9	3,4	9,7	<b>6,0</b>	<b>1,9</b>
Variación % A-B	5,0	0,4	2,2	1,9	1,8	3,8	2,8	3,6	3,1	5,2	<b>3,0</b>	<b>1,5</b>

Tabla IV48. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

PM2	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,725	2,799	2,865	2,915	2,845	2,710	2,813	3,000	3,120	3,002	<b>2,879</b>	<b>0,131</b>
DP	3,156	3,201	3,357	3,422	3,251	3,015	3,298	3,551	3,508	3,520	<b>3,328</b>	<b>0,176</b>
SD-B	2,799	2,865	2,915	2,845	2,710	2,813	3,000	3,120	2,967	3,120	<b>2,915</b>	<b>0,136</b>
Variación % Deformación	15,8	14,4	17,2	17,4	14,3	11,3	17,2	18,4	12,4	17,3	<b>15,6</b>	<b>2,4</b>
Variación % A-B	2,7	2,4	1,7	2,4	4,7	3,8	6,6	4,0	4,9	3,9	<b>3,7</b>	<b>1,5</b>

Tabla IV49. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

PM3	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,452	2,412	2,488	2,510	2,556	2,600	2,625	2,714	2,654	2,717	<b>2,573</b>	<b>0,107</b>
DP	2,620	2,605	2,665	2,681	2,694	2,759	2,806	2,815	2,823	2,901	<b>2,737</b>	<b>0,098</b>
SD-B	2,412	2,488	2,510	2,556	2,600	2,625	2,714	2,654	2,717	2,810	<b>2,609</b>	<b>0,121</b>
Variación % Deformación	6,9	8,0	7,1	6,8	5,4	6,1	6,9	3,7	6,4	6,8	<b>6,4</b>	<b>1,2</b>
Variación % A-B	1,6	3,2	0,9	1,8	1,7	1,0	3,4	2,2	2,4	3,4	<b>2,2</b>	<b>0,9</b>

Tabla IV50. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

PM4	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,505	2,550	2,589	2,612	2,641	2,604	2,569	2,642	2,717	2,719	<b>2,615</b>	<b>0,068</b>
DP	2,560	2,614	2,702	2,715	2,707	2,698	2,739	2,802	2,804	2,778	<b>2,712</b>	<b>0,078</b>
SD-B	2,550	2,589	2,612	2,641	2,604	2,569	2,642	2,717	2,719	2,703	<b>2,635</b>	<b>0,061</b>
Variación % Deformación	2,2	2,5	4,4	3,9	2,5	3,6	6,6	6,1	3,2	2,2	<b>3,7</b>	<b>1,6</b>
Variación % A-B	1,8	1,5	0,9	1,1	1,4	1,3	2,8	2,8	0,1	0,6	<b>1,4</b>	<b>0,9</b>

De igual forma que antes, el análisis de estos resultados lo basamos en estudiar por un lado, la influencia de la banda donde se produce la deformación con el resto de bandas, y por otro, en la repetitividad de estos valores con objeto de poder observar la recuperación del tejido una vez dejamos de aplicar esta deformación.



De nuevo, podemos observar cómo queda claramente identificada la banda conductora donde estamos provocando la deformación por presión, la banda 2, ya que los valores de variación para el punto de medida 2 está entorno al 16%, muy similar al caso 1 donde éste era del 18%: Para el resto de puntos de medida, 1, 3 y 4, estas variaciones porcentuales son de 6, 6,4 y 3,7 %, respectivamente. Porcentajes de variación, muy inferiores debido a que se produce un cambio de banda y por lo tanto aumenta la distancia. Como vemos, para las dos bandas contiguas a la banda 2, la variación que se produce se encuentra en los mismos niveles, sobre el 6%, y que además coincide con esta variación de la banda 2 sobre la 1 en el primer caso, donde esta variación era del 6,8%. Por lo tanto, con estos datos, podemos decir que la perturbación ocasionada en las bandas adyacentes a la banda donde se produce la perturbación produce una variación de la señal del orden del 6%.

De igual forma pasa con la segunda banda más alejada, en este caso es la banda 4, y en el primer caso era la banda 3, los porcentajes de variación han sido de 3,7% y 2,5%. Vuelve a estar en un mismo rango de variación, aunque en este caso y en principio al ser más acuciadas las diferencias nos esperaremos a los próximos casos para observar si existe alguna tendencia de este comportamiento, y poder tener resultados más concluyentes.

Si nos fijamos ahora, en estos valores absolutos porcentuales de variación, podemos de nuevo decir que al comparar los resultados entre las bandas, obtenemos valores diferenciados pero no tan significativos como pasaba en el apartado anterior, donde la diferencia entre la variación de la banda donde se produce la deformación con respecto a las otras ha disminuido, incluso y aunque muy poco esta disminución se produce también en este caso respecto al anterior, de 18 pasa a 15.

Otro dato a considerar es que en este caso no existe ninguna banda que no está sujeta a la perturbación como era el caso anterior con la banda 4, ya que las tres bandas que no sufren la deformación de forma directa son cercanas a la banda 2.

Por otro lado, en lo que respecta a la reproducibilidad de los valores y la capacidad de recuperación del tejido después de la deformación, vamos a analizar solo los resultados de la tabla IV48, que son los obtenidos en el punto de medida donde se le aplica la deformación, en este caso en el punto y banda 2.

El porcentaje de variación entre A y B, es de 3,7%, lo cual es un indicador que la recuperación del tejido todavía no es la apropiada, aunque si es cierto que este valor es inferior al caso 1 (5,4%), pero consideramos que todavía tiene un peso significativo sobre la variación porcentual producida por la propia deformación (15,6. Es decir, el error sujeto a la no recuperación del estado inicial del tejido es todavía demasiado elevado para utilizar este sistema como sensor piezoresistivo en la parte derecha de la banda 2.

De igual forma, si analizamos la desviación estándar obtenida (entre 0,1 y 0,2 V), de la realización de las distintas repeticiones de las medidas, observamos que es elevada al compararla con los valores absolutos de variación que se consiguen con y sin deformación, que es de 0,449 V. Por lo que tenemos de nuevo poca reproducibilidad de las medidas, muy necesario cuando la aplicación del sistema va a ser un sensor piezoresistivo que tiene que actuar de forma continuada en la detección de presión. En

este sentido, comentar también que se observa una ligera disminución de los valores de desviación estándar en este caso con respecto al caso anterior, pero no lo suficiente.

### Caso 3: Deformación por presión a la derecha del PM3.

En este tercer caso seguimos la misma metodología pero colocando el peso sobre la tercera banda de la parte derecha del punto de medida referenciado como 3 tal y como se indica en la figura IV96.

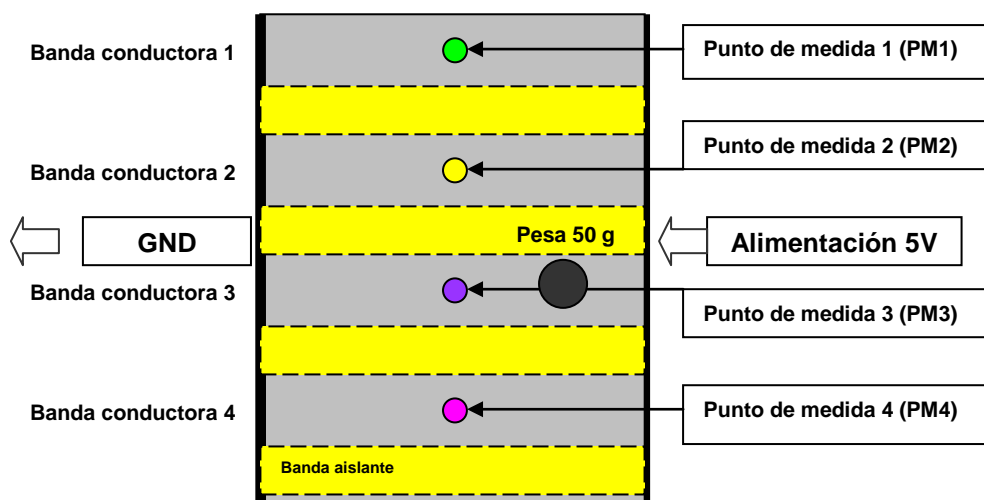


Figura IV96. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la tercera banda conductora.

#### -. Hipótesis del tercer caso:

Lo que se prevé en este tercer caso son resultados muy similares a los obtenidos en el caso anterior ya que éste, al igual que el segundo, presenta dos bandas contiguas a la banda donde se aplica la deformación, y una más alejada. En este caso las bandas adyacentes son la 2 y la 4, mientras que en caso anterior eran la 1 y la 3, y por otro lado, la banda más alejada es la 1, mientras que el segundo caso fue 4.

#### -. Resultados obtenidos:

Se detallan a continuación los resultados obtenidos para los cuatro puntos de medida y las 10 repeticiones en cada uno:

Tabla IV51. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

PM1	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,442	2,403	2,400	2,455	2,510	2,578	2,601	2,615	2,671	2,660	<b>2,534</b>	<b>0,104</b>
DP	2,497	2,458	2,494	2,526	2,605	2,689	2,662	2,715	2,705	2,701	<b>2,605</b>	<b>0,102</b>
SD-B	2,403	2,400	2,455	2,510	2,578	2,601	2,615	2,671	2,660	2,685	<b>2,558</b>	<b>0,109</b>
Variación % Deformación	2,3	2,3	3,9	2,9	3,8	4,3	2,3	3,8	1,3	1,5	<b>2,8</b>	<b>1,1</b>
Variación % A-B	1,6	0,1	2,3	2,2	2,7	0,9	0,5	2,1	0,4	0,9	<b>1,4</b>	<b>0,9</b>

Tabla IV52. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

PM2	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,695	2,715	2,706	2,684	2,611	2,700	2,752	2,778	2,817	2,903	<b>2,736</b>	<b>0,081</b>
DP	2,906	2,910	2,852	2,789	2,812	2,903	2,916	2,975	3,025	3,205	<b>2,929</b>	<b>0,119</b>
SD-B	2,715	2,706	2,684	2,611	2,700	2,752	2,778	2,817	2,903	2,910	<b>2,758</b>	<b>0,096</b>
Variación % Deformación	7,8	7,2	5,4	3,9	7,7	7,5	6,0	7,1	7,4	10,4	<b>7,0</b>	<b>1,7</b>
Variación % A-B	0,7	0,3	0,8	2,7	3,4	1,9	0,9	1,4	3,1	0,2	<b>1,6</b>	<b>1,2</b>

Tabla IV53. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

PM3	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,552	2,652	2,722	2,689	2,801	2,745	2,815	2,862	2,901	2,880	<b>2,762</b>	<b>0,111</b>
DP	3,021	3,115	3,236	3,256	3,369	3,300	3,315	3,405	3,333	3,450	<b>3,280</b>	<b>0,131</b>
SD-B	2,652	2,722	2,689	2,801	2,745	2,815	2,862	2,901	2,880	3,004	<b>2,807</b>	<b>0,108</b>
Variación % Deformación	18,4	17,5	18,9	21,1	20,3	20,2	17,8	19,0	14,9	19,8	<b>18,8</b>	<b>1,8</b>
Variación % A-B	3,9	2,6	1,2	4,2	2,0	2,6	1,7	1,4	0,7	4,3	<b>2,5</b>	<b>1,3</b>

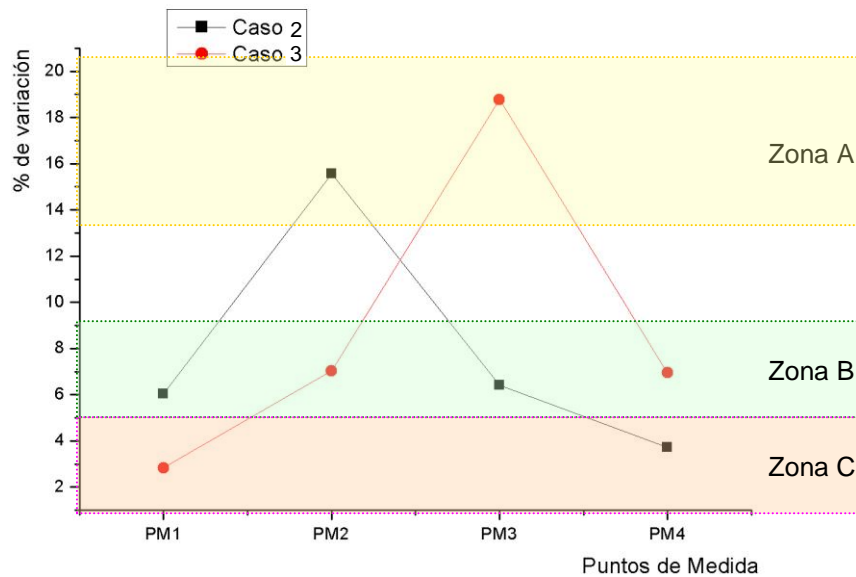
Tabla IV54. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,721	2,700	2,589	2,663	2,706	2,795	2,805	2,924	2,995	2,990	<b>2,789</b>	<b>0,140</b>
DP	2,920	2,956	2,774	2,852	2,925	2,910	3,012	3,152	3,152	3,162	<b>2,982</b>	<b>0,135</b>
SD-B	2,700	2,685	2,663	2,706	2,795	2,805	2,924	2,995	2,990	2,971	<b>2,823</b>	<b>0,135</b>
Variación % Deformación	7,3	9,5	7,1	7,1	8,1	4,1	7,4	7,8	5,2	5,8	<b>6,9</b>	<b>1,5</b>
Variación % A-B	0,8	0,6	2,9	1,6	3,3	0,4	4,2	2,4	0,2	0,6	<b>1,7</b>	<b>1,4</b>

De nuevo se observa cómo queda claramente identificada la banda conductora donde estamos provocando la deformación por presión, la banda 3, ya que los valores de variación para el punto de medida 3 presentan un 18,8% de variación, muy similar al caso 1 donde éste era del 18%: Para el resto de puntos de medida, 1, 2 y 4, estas variaciones porcentuales son de 2,8, 7,0 y 6,9 %, respectivamente. Porcentajes de variación acordes a la experiencia de los anteriores casos y con valores coherentes con este comportamiento si tenemos en cuenta la distancia entre los puntos de medida y el punto donde aplicamos la deformación por presión. Como vemos, para las dos bandas contiguas a la banda 3, la variación que se produce se encuentra en los mismos niveles, 7% y 6,9%, y que además coincide con los porcentajes de variación de los casos anteriores para las bandas adyacentes.

De igual forma pasa con la segunda banda más alejada, en este caso es la banda 1, con un valor de 2,8%, similares a los porcentajes de variación de 3,7% y 2,5% de los casos predecesores.

Es importante resaltar que este caso y el segundo son muy parecidos al realizar la deformación por presión en la tercera banda y en la segunda respectivamente, de forma que ambos disponen de dos bandas contiguas a la que realizamos la deformación y otra más alejada. En este sentido, podemos hacer una comparación de los porcentajes de variación obtenidos con respecto a los distintos puntos de medida. Esta relación se representa en la siguiente figura IV97:



*Figura IV97. Representación gráfica de casos simétricos (2 y 3) de los porcentajes de variación con respecto a los puntos de medida.*

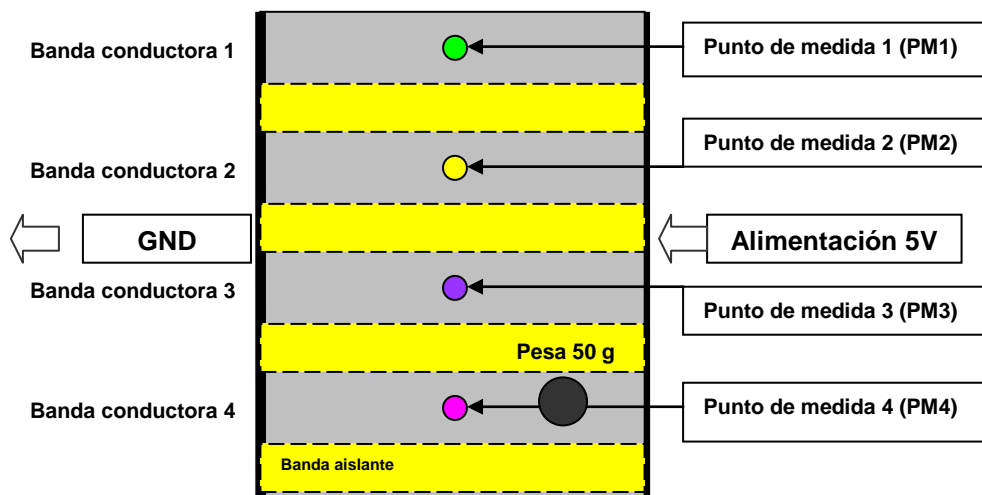
Esta figura nos muestra tres zonas, denominadas A, B y C, que abarcan los porcentajes de variación en la banda donde se produce la deformación (zona A), con porcentajes de variación más altos. La zona B, que representa los porcentajes de variación de las cuatro bandas adyacentes a la que colocamos el peso, tanto del caso 2 como del 3. Y por último, la C, representa las dos bandas más alejadas en estos dos casos. Los intervalos o amplitudes de estas zonas están de forma aproximada adecuados a los valores de desviación estándar obtenidos para cada variación porcentual, que va desde 1 a 3. Como era de estar, el comportamiento del caso 2 es simétrico al del caso 3.

Por otro lado, en lo que respecta a la reproducibilidad de los valores y la capacidad de recuperación del tejido después de la deformación, al analizar los resultados de la tabla IV53, observamos que el porcentaje de variación entre A y B, es de 2,5%, muy significativa de nuevo como pasa en los casos anteriores.

De igual forma, si analizamos la desviación estándar obtenida (valores cercanos a 0,1 V), comprobamos de nuevo que al compararlo con los valores absolutos de variación que se consiguen con y sin deformación, que es de 0,518 V, nos encontramos poca reproducibilidad de las medidas. En este sentido, comentar también que al igual que en el caso anterior se mantiene una ligera disminución de los valores de desviación estándar en este caso con respecto al primer caso, pero todavía muy significativa.

*Caso 4: Deformación por presión a la derecha del PM4.*

Por último, en este cuarto caso colocamos la pesa en la cuarta banda conductora a la derecha del punto de medida referenciado como 4, tal y como se indica en la figura IV98.



*Figura IV98. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la cuarta banda conductora.*

*-. Hipótesis del cuarto caso:*

Siguiendo con la metodología establecida, en esta cuarta banda se prevé un comportamiento muy similar al primer caso, por lo que la variación en cada una de las bandas irá disminuyendo de forma significativa hasta alcanzar la primera donde ésta será prácticamente nula.

*-. Resultados obtenidos:*

Los resultados obtenidos para este cuarto caso se representan en las siguientes cuatro tablas, una para cada punto de medida.

*Tabla IV55. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.*

PM1	Tensión Eléctrica (V)											Media	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
SD-A	2,789	2,770	2,771	2,789	2,805	2,804	2,810	2,815	2,817	2,820	<b>2,799</b>	<b>0,018</b>	
DP	2,805	2,785	2,800	2,809	2,813	2,819	2,821	2,817	2,830	2,833	<b>2,813</b>	<b>0,014</b>	
SD-B	2,770	2,771	2,789	2,805	2,804	2,810	2,815	2,817	2,820	2,826	<b>2,803</b>	<b>0,020</b>	
Variación % Deformación	0,6	0,5	1,0	0,7	0,3	0,5	0,4	0,1	0,5	0,5	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	
Variación % A-B	0,7	0,0	0,6	0,6	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	

Tabla IV56. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.

PM2	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,501	2,542	2,540	2,568	2,588	2,590	2,599	2,613	2,652	2,701	<b>2,589</b>	<b>0,058</b>
DP	2,598	2,621	2,625	2,659	2,672	2,691	2,695	2,710	2,755	2,787	<b>2,681</b>	<b>0,060</b>
SD-B	2,542	2,540	2,568	2,588	2,590	2,599	2,613	2,652	2,701	2,723	<b>2,612</b>	<b>0,062</b>
Variación % Deformación	3,9	3,1	3,3	3,5	3,2	3,9	3,7	3,7	3,9	3,2	<b>3,6</b>	<b>0,3</b>
Variación % A-B	1,6	0,3	0,8	2,7	0,1	0,3	0,5	1,5	1,8	0,8	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>

Tabla IV57. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.

PM3	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,699	2,652	2,694	2,726	2,755	2,777	2,805	2,810	2,802	2,813	<b>2,753</b>	<b>0,058</b>
DP	2,887	2,850	2,901	2,921	2,936	2,995	3,020	3,007	3,023	3,056	<b>2,960</b>	<b>0,069</b>
SD-B	2,652	2,694	2,726	2,755	2,777	2,805	2,810	2,802	2,813	2,847	<b>2,768</b>	<b>0,061</b>
Variación % Deformación	7,0	7,5	7,7	7,2	6,6	7,9	7,7	7,0	7,9	8,6	<b>7,5</b>	<b>0,6</b>
Variación % A-B	1,7	1,6	1,2	1,1	2,0	1,0	0,2	0,3	0,7	1,2	<b>1,1</b>	<b>0,6</b>

Tabla IV58. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.

PM4	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,452	2,503	2,498	2,523	2,689	2,604	2,666	2,687	2,701	2,694	<b>2,602</b>	<b>0,098</b>
DP	2,888	2,925	3,010	3,122	3,075	3,105	3,124	3,155	3,160	3,197	<b>3,076</b>	<b>0,103</b>
SD-B	2,503	2,498	2,523	2,689	2,604	2,666	2,687	2,701	2,694	2,706	<b>2,627</b>	<b>0,087</b>
Variación % Deformación	17,8	16,9	20,5	23,7	14,4	19,2	17,2	17,4	17,0	18,7	<b>18,3</b>	<b>2,5</b>
Variación % A-B	0,8	0,6	1,0	6,6	3,2	2,4	0,8	0,5	0,2	0,6	<b>1,7</b>	<b>1,9</b>

Al igual que en los tres casos anteriores se observa cómo queda claramente identificada la banda conductora donde estamos provocando la deformación por presión, la banda 4, ya que los valores de variación para el punto de medida 4 presentan un 18,3%. Para el resto de puntos de medida, 3, 2 y 1, estas variaciones porcentuales son de 7,5, 3,5 y 0,5%, respectivamente. Porcentajes de variación

acordes a la experiencia de los anteriores casos, especialmente en el uno, el cual es simétrico y con valores coherentes con este comportamiento si tenemos en cuenta la distancia entre los puntos de medida y el punto donde aplicamos la deformación por presión.

En este sentido, y de igual forma que en el caso anterior, si comparamos este caso con el primero nos encontramos que a priori debe ser muy parecido, ya que ambos tienen 3 bandas con distintas distancias a la banda responsable de la deformación, en el caso 1, la 2 es la contigua, luego la 3 más alejada y por último la 4, y en el caso 4, la situación es completamente a la inversa. Esta comparativa se representa en la siguiente figura IV99:

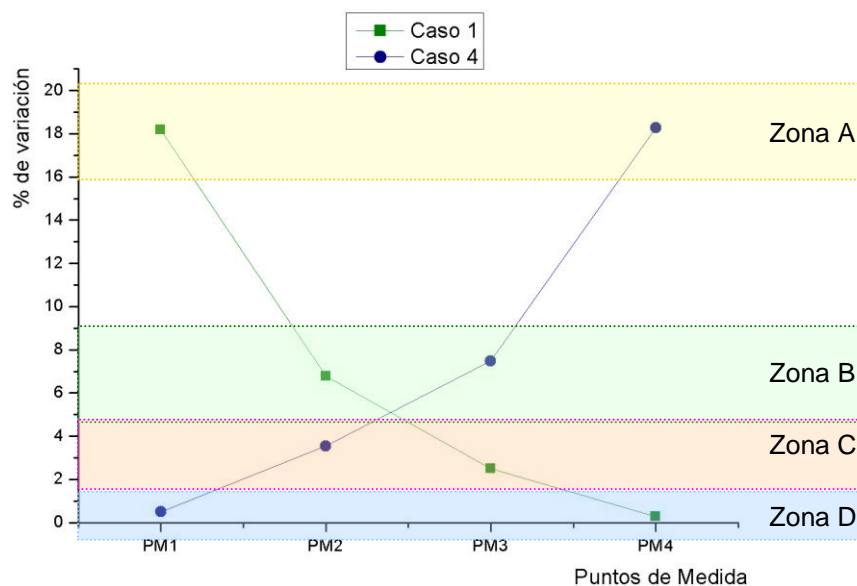


Figura IV99. Representación gráfica de casos simétricos (1 y 4) de los porcentajes de variación con respecto a los puntos de medida.

Esta figura nos muestra hasta cuatro zonas, denominadas A, B, C y D, que abarcan los porcentajes de variación en la banda donde se produce la deformación (zona A), y de la B a la D, desde la banda contigua hasta la banda más alejada. Como de nuevo era de esperar, el comportamiento del caso 1 es simétrico al del caso 4 pero alternando los puntos de medida.

Lo más importante es que las variaciones de la zona A se encuentra en un intervalo cercano en el 18%, para los cuatro casos. En la zona B las bandas adyacentes a la de deformación con un intervalo oscilando entre el 6 y el 8%. La segunda banda más alejada, entre el 2 y 4%, y por último, si se da el caso y existe una tercera banda más alejada apenas aparece perturbación de la señal, al considerarse esta variación prácticamente nula.

Finalmente, en lo que respecta a la reproducibilidad de los valores y la capacidad de recuperación del tejido después de la deformación, al analizar los resultados de la tabla IV58, observamos que el porcentaje de variación entre A y B, es de 1,7%. Que



junto con los valores de desviación estándar (valores muy cercanos a 0,1 V), observamos como este error todavía es muy significativo como pasaba en los tres casos anteriores.

*-. Conclusiones parciales de los cuatro primeros casos.*

Para realizar el análisis de forma conjunta de los cuatro casos expuestos, que equivalen a realizar de la deformación por presión en la parte derecha del punto de medida de las cuatro bandas conductoras, se pueden extraer de forma concluyente una serie de consideraciones al respecto. Para ello, vamos a representar a modo de resumen en la siguiente tabla IV59 los valores medios de variación porcentual de tensión eléctrica en cada banda y para cada caso:

*Tabla IV59. Resumen de los valores medios porcentuales de la variación de tensión eléctrica al producir la deformación por presión de 2.773 Pa en la parte derecha de los puntos de medida.*

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$
PM1	18,2	3,1	6,0	1,9	2,8	1,1	0,5	0,3
PM2	6,8	3	15,6	2,4	7,0	1,7	3,6	0,3
PM3	2,5	0,8	6,4	1,2	18,8	1,8	7,5	0,6
PM4	0,3	0,2	3,7	1,6	6,9	1,5	18,3	2,5

En base a estos resultados obtenidos, una de las primeras conclusiones al respecto es que la perturbación ocasionada en las bandas adyacentes a la propia banda donde se realiza la deformación presenta un valor de interferencia bastante significativo, de forma que esta influencia es demasiado elevada como para considerar este sistema capaz de detectar la presión ejercida de forma individual e independiente en una banda conductora.

Básicamente, se tratan de variaciones de tensión eléctrica en las bandas contiguas excesivamente altas en comparación con las obtenidas en la propia banda donde se aplica la deformación por presión. Se trata de muy poca diferencia en los valores de variación entre la banda de deformación y el resto, entre 7 y 12 puntos porcentuales. Pero además, si a esta escasa diferencia le sumamos que los valores de desviación de estos resultados están en torno a  $\pm 3\%$  en lo que respecta a la banda de deformación y  $\pm 2\%$  en la banda más próxima a ésta, esta diferencia todavía se reduce más, pudiendo llegar incluso a prácticamente solaparse, y en consecuencia no llegar a identificar si se trata de una banda de deformación o de perturbación.

Y por otro lado, que los valores de reproducibilidad y recuperación del tejido una vez eliminada la deformación no son suficientemente apropiados como para poder decir que el sistema piezoresistivo es robusto de forma que nos permita repetir un número de veces el ensayo y obtener valores fiables y repetitivos.

En base a estas conclusiones, se plantea solucionar estos inconvenientes de forma secuencial, empezando con la primera de ellas. Para ello, se propone utilizar una pesa de una mayor masa que sea capaz de producir una mayor deformación por presión, y en consecuencia, una mayor variación de la señal con y sin deformación. De esta forma, aunque la perturbación en las bandas contiguas también va a ser mayor, la variación relativa de la señal va a darnos con total seguridad unos valores más significativos y más diferenciados de la banda responsable con respecto a las bandas más próximas a ésta.

Se pretende conseguir, en valores absolutos, variaciones de tensión eléctrica del orden de 1 Voltio, y no como hasta ahora que han oscilado los 0,5 V. Para ello, la solución más inmediata va a ser utilizar una pesa de 100g de forma que se genere esta deformación por presión de forma más significativa.

Con esta nueva variable que se ha introducido, y siguiendo con el fin último que es obtener un sistema capaz de diferenciar de forma independiente hasta ocho zonas distintas del sistema en base a su deformación por presión, se plantean ahora los nuevos casos con este nuevo peso, realizando estas deformaciones en la parte izquierda de los puntos de medida, siguiendo el mismo procedimiento que en los cuatro casos anteriores: La única diferencia es que se va a colocar el peso en la parte izquierda de los puntos de medida, por lo que el comportamiento esperado, en cuanto a la tendencia de aumento o disminución de la tensión eléctrica, cambiará.

#### *Caso 5: Deformación por presión a la izquierda en los cuatro puntos de medida.*

A diferencia del estudio del comportamiento de la deformación por presión en la parte derecha, en este nuevo caso, se va a hacer el análisis de forma conjunta en los cuatro puntos de forma secuencial, desde 1 a 4, en este orden.

Otra diferencia sobre los casos anteriores, y tal y como ya se ha introducido, va a ser el aplicar un peso de mayor masa, en concreto de 100 gramos. Y lo colocamos de forma aproximada en el mismo punto en la parte derecha que en la parte izquierda, de forma que este comportamiento sea el equivalente y totalmente comparable con la deformación a la izquierda ya realizado.

Para el cálculo de presión que está ejerciendo esta nueva pesa hay que tener en cuenta que además del incremento de la masa, el área superficial de la base es también mayor, de 1,75 cm de diámetro, lo que equivale a un área superficial de 2,40 cm<sup>2</sup>, por lo tanto, la presión que está ejerciendo esta pesa se puede calcular a partir de la siguiente fórmula;

$$P \text{ (Pa)} = \frac{F_{\text{peso}} \text{ (N)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = \frac{M \text{ (kg)} * g \text{ (m/s}^2\text{)}}{A \text{ (m}^2\text{)}} = 4.075 \text{ Pa}$$

Como se puede apreciar, el aumento del doble de la masa de la pesa no supone el doblar también la presión que ejerce ésta sobre el tejido sino que fruto del aumento también del área superficial, repercute en un incremento de casi 1,5 veces la presión. Veremos la linealidad que se establece entre este aumento de la presión ejercida con

respecto a la variación de tensión eléctrica que se produce, es decir, si pasamos de una variación de 0,5 V a 0,75 V (0,5x1,5).

En la figura IV70 queda representado la secuencia de deformaciones por presión que vamos a realizar en cada banda, desde la 1 a la 4, siguiendo la misma metodología establecida en los casos anteriores de 10 repeticiones que nos permitirá también hacer el estudio de reproducibilidad. Cada una de estas medidas en cada banda vendrá representado por las referencias; caso 5-1 (C5-1), caso 5-2 (C5-2), caso 5-3 (C5-3), y caso 5-4 (C5-4), que equivale a cada una de las bandas conductoras, de 1 a 4, respectivamente.

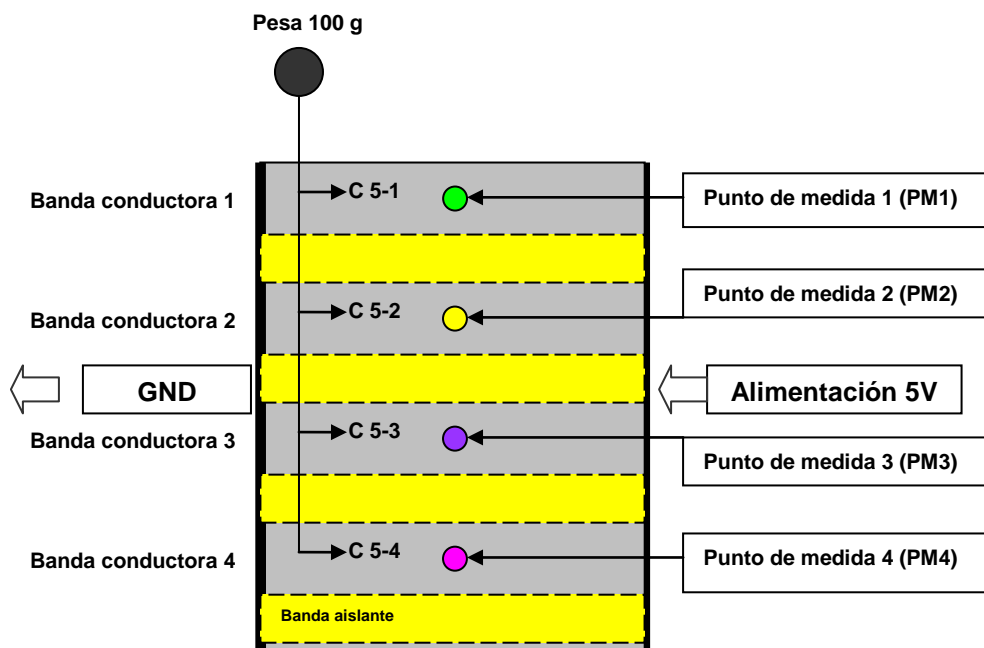


Figura IV100. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 100 gramos en el lado izquierdo de las cuatro banda conductoras de forma secuencial.

-. Hipótesis del quinto caso:

En base a la experiencia, se prevé que debido a que la deformación se realiza en la parte izquierda del punto de medida, se va a producir una caída de tensión eléctrica. Además, debido a que se ha aumentado la presión con respecto a los casos anteriores esta variación en valor absoluto va a ser mayor, como la influencia en las bandas contiguas, aunque se espera que de forma relativa con respecto a la banda donde se produce la deformación esta perturbación sea significativamente menor, y por lo tanto se pretende así que la señal que ocasiona la deformación sea mucho más independiente de la perturbación que ocasiona en el resto que en los casos anteriores.

-. Resultados obtenidos:

Los resultados obtenidos se representan en las siguientes tablas, donde para cada deformación en una banda en concreto se han obtenido los valores, hasta 10 repeticiones, de los cuatro puntos de medida, y así pasando esta deformación de por las cuatro bandas.

Tabla IV60. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1

Caso 5-1 PM1	Tensión Eléctrica (V)											Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
SD-A	2,658	2,495	2,475	2,504	2,462	2,366	2,300	2,222	2,310	2,301	<b>2,409</b>	<b>0,132</b>	
DP	1,730	1,502	1,609	1,675	1,725	1,407	1,440	1,323	1,556	1,589	<b>1,556</b>	<b>0,137</b>	
SD-B	2,495	2,475	2,504	2,462	2,366	2,300	2,222	2,310	2,301	2,125	<b>2,356</b>	<b>0,128</b>	
Variación % Deformación	34,9	39,8	35,0	33,1	29,9	40,5	37,4	40,5	32,6	30,9	<b>35,5</b>	<b>3,9</b>	
Variación % A-B	6,1	0,8	1,2	1,7	3,9	2,8	3,4	4,0	0,4	7,6	<b>3,2</b>	<b>2,3</b>	

Tabla IV61. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1.

Caso 5-1 PM2	Tensión Eléctrica (V)											Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
SD-A	2,523	2,506	2,496	2,398	2,254	2,198	2,235	2,206	2,178	2,156	<b>2,315</b>	<b>0,149</b>	
DP	2,320	2,301	2,251	2,146	2,062	2,008	1,974	1,908	1,992	1,977	<b>2,094</b>	<b>0,150</b>	
SD-B	2,506	2,496	2,398	2,254	2,198	2,235	2,206	2,178	2,156	2,161	<b>2,279</b>	<b>0,136</b>	
Variación % Deformación	8,0	8,2	9,8	10,5	8,5	8,6	11,7	13,5	8,5	8,3	<b>9,6</b>	<b>1,8</b>	
Variación % A-B	0,7	0,4	3,9	6,0	2,5	1,7	1,3	1,3	1,0	0,2	<b>1,9</b>	<b>1,8</b>	

Tabla IV62. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1.

Caso 5-1 PM3	Tensión Eléctrica (V)											Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
SD-A	2,596	2,566	2,524	2,513	2,525	2,511	2,498	2,463	2,455	2,421	<b>2,507</b>	<b>0,052</b>	
DP	2,481	2,402	2,420	2,402	2,410	2,410	2,359	2,320	2,360	2,310	<b>2,387</b>	<b>0,051</b>	
SD-B	2,566	2,524	2,513	2,525	2,511	2,498	2,463	2,455	2,421	2,405	<b>2,488</b>	<b>0,051</b>	
Variación % Deformación	4,4	6,4	4,1	4,4	4,6	4,0	5,6	5,8	3,9	4,6	<b>4,8</b>	<b>0,8</b>	
Variación % A-B	1,2	1,6	0,4	0,5	0,6	0,5	1,4	0,3	1,4	0,7	<b>0,9</b>	<b>0,5</b>	

Tabla IV63. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1.

Caso 5-1 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,378	2,380	2,360	2,326	2,313	2,300	2,299	2,287	2,280	2,269	<b>2,319</b>	<b>0,041</b>
DP	2,319	2,351	2,311	2,290	2,275	2,256	2,260	2,241	2,233	2,229	<b>2,277</b>	<b>0,041</b>
SD-B	2,380	2,360	2,326	2,313	2,300	2,299	2,287	2,280	2,269	2,250	<b>2,306</b>	<b>0,040</b>
Variación % Deformación	2,5	1,2	2,1	1,5	1,6	1,9	1,7	2,0	2,1	1,8	<b>1,8</b>	<b>0,3</b>
Variación % A-B	0,1	0,8	1,4	0,6	0,6	0,0	0,2	0,3	0,5	0,8	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>

Tabla IV64. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

Caso 5-2 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,873	2,791	2,712	2,701	2,715	2,688	2,650	2,644	2,620	2,605	<b>2,700</b>	<b>0,082</b>
DP	2,650	2,525	2,485	2,479	2,522	2,474	2,411	2,390	2,369	2,395	<b>2,470</b>	<b>0,084</b>
SD-B	2,791	2,712	2,701	2,715	2,688	2,650	2,644	2,620	2,605	2,622	<b>2,675</b>	<b>0,057</b>
Variación % Deformación	7,8	9,5	8,4	8,2	7,1	8,0	9,0	9,6	9,6	8,1	<b>8,5</b>	<b>0,9</b>
Variación % A-B	2,9	2,8	0,4	0,5	1,0	1,4	0,2	0,9	0,6	0,7	<b>1,1</b>	<b>0,9</b>

Tabla IV65. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

Caso 5-2 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	3,005	2,995	2,945	2,952	2,922	2,878	2,809	2,771	2,700	2,725	<b>2,870</b>	<b>0,112</b>
DP	2,152	2,103	2,060	2,013	2,056	1,952	1,974	1,889	1,796	1,878	<b>1,987</b>	<b>0,111</b>
SD-B	2,995	2,945	2,952	2,922	2,878	2,809	2,771	2,700	2,725	2,713	<b>2,841</b>	<b>0,111</b>
Variación % Deformación	28,4	29,8	30,1	31,8	29,6	32,2	29,7	31,8	33,5	31,1	<b>30,8</b>	<b>1,5</b>
Variación % A-B	0,3	1,7	0,2	1,0	1,5	2,4	1,4	2,6	0,9	0,4	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>

Tabla IV66. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

Caso 5-2 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,398	2,355	2,340	2,364	2,399	2,410	2,360	2,329	2,306	2,274	<b>2,354</b>	<b>0,043</b>
DP	2,179	2,155	2,121	2,157	2,210	2,201	2,166	2,102	2,132	2,084	<b>2,151</b>	<b>0,041</b>
SD-B	2,355	2,340	2,364	2,399	2,410	2,360	2,329	2,306	2,274	2,256	<b>2,339</b>	<b>0,050</b>
Variación % Deformación	9,1	8,5	9,4	8,8	7,9	8,7	8,2	9,7	7,5	8,4	<b>8,6</b>	<b>0,7</b>
Variación % A-B	1,8	0,6	1,0	1,5	0,5	2,1	1,3	1,0	1,4	0,8	<b>1,2</b>	<b>0,5</b>

Tabla IV67. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.

Caso 5-2 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,622	2,601	2,569	2,545	2,523	2,510	2,511	2,489	2,477	2,470	<b>2,532</b>	<b>0,052</b>
DP	2,515	2,487	2,451	2,462	2,411	2,425	2,413	2,394	2,386	2,392	<b>2,434</b>	<b>0,044</b>
SD-B	2,601	2,569	2,545	2,523	2,510	2,511	2,489	2,477	2,470	2,459	<b>2,515</b>	<b>0,045</b>
Variación % Deformación	4,1	4,4	4,6	3,3	4,4	3,4	3,9	3,8	3,7	3,2	<b>3,9</b>	<b>0,5</b>
Variación % A-B	0,8	1,2	0,9	0,9	0,5	0,0	0,9	0,5	0,3	0,4	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>

Tabla IV68. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

Caso 5-3 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,669	2,650	2,642	2,624	2,613	2,587	2,575	2,580	2,556	2,515	<b>2,601</b>	<b>0,047</b>
DP	2,570	2,581	2,550	2,543	2,515	2,502	2,508	2,498	2,476	2,452	<b>2,520</b>	<b>0,041</b>
SD-B	2,650	2,642	2,624	2,613	2,587	2,575	2,580	2,556	2,515	2,497	<b>2,584</b>	<b>0,051</b>
Variación % Deformación	3,7	2,6	3,5	3,1	3,8	3,3	2,6	3,2	3,1	2,5	<b>3,1</b>	<b>0,5</b>
Variación % A-B	0,7	0,3	0,7	0,4	1,0	0,5	0,2	0,9	1,6	0,7	0,7	0,4

Tabla IV69. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

Caso 5-3 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,741	2,730	2,711	2,700	2,688	2,706	2,705	2,641	2,609	2,579	<b>2,681</b>	<b>0,053</b>
DP	2,520	2,493	2,455	2,450	2,427	2,450	2,419	2,420	2,402	2,398	<b>2,443</b>	<b>0,039</b>
SD-B	2,730	2,711	2,700	2,688	2,706	2,705	2,641	2,609	2,579	2,553	<b>2,662</b>	<b>0,062</b>
Variación % Deformación	8,1	8,7	9,4	9,3	9,7	9,5	10,6	8,4	7,9	7,0	<b>8,9</b>	<b>1,0</b>
Variación % A-B	0,4	0,7	0,4	0,4	0,7	0,0	2,4	1,2	1,1	1,0	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>

Tabla IV70. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

Caso 5-3 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,780	2,810	2,792	2,750	2,684	2,675	2,623	2,658	2,613	2,705	<b>2,709</b>	<b>0,071</b>
DP	1,998	1,985	1,856	1,846	1,620	1,597	1,701	1,756	1,805	1,815	<b>1,798</b>	<b>0,135</b>
SD-B	2,811	2,792	2,750	2,684	2,675	2,623	2,658	2,613	2,705	2,752	<b>2,706</b>	<b>0,068</b>
Variación % Deformación	28,1	29,4	33,5	32,9	39,6	40,3	35,2	33,9	30,9	32,9	<b>33,7</b>	<b>3,9</b>
Variación % A-B	1,1	0,6	1,5	2,4	0,3	1,9	1,3	1,7	3,5	1,7	<b>1,6</b>	<b>0,9</b>

Tabla IV71. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.

Caso 5-3 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,952	2,941	2,926	2,910	2,888	2,845	2,811	2,819	2,806	2,810	<b>2,871</b>	<b>0,059</b>
DP	2,765	2,715	2,709	2,701	2,671	2,650	2,614	2,598	2,577	2,556	<b>2,656</b>	<b>0,068</b>
SD-B	2,941	2,926	2,910	2,888	2,845	2,811	2,819	2,806	2,810	2,852	<b>2,861</b>	<b>0,052</b>
Variación % Deformación	6,3	7,7	7,4	7,2	7,5	6,9	7,0	7,8	8,2	9,0	<b>7,5</b>	<b>0,8</b>
Variación % A-B	0,4	0,5	0,5	0,8	1,5	1,2	0,3	0,5	0,1	1,5	<b>0,7</b>	<b>0,5</b>

Tabla IV72. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.

Caso 5-4 PM1	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,320	2,315	2,306	2,301	2,295	2,290	2,289	2,296	2,288	2,274	<b>2,297</b>	<b>0,014</b>
DP	2,271	2,280	2,284	2,266	2,253	2,245	2,235	2,248	2,226	2,220	<b>2,253</b>	<b>0,022</b>
SD-B	2,315	2,306	2,301	2,295	2,290	2,289	2,296	2,288	2,274	2,263	<b>2,292</b>	<b>0,015</b>
Variación % Deformación	2,1	1,5	1,0	1,5	1,8	2,0	2,4	2,1	2,7	2,4	<b>1,9</b>	<b>0,5</b>
Variación % A-B	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,0	0,3	0,3	0,6	0,5	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV73. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4

Caso 5-4 PM2	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,412	2,401	2,395	2,315	2,306	2,269	2,258	2,267	2,206	2,200	<b>2,303</b>	<b>0,078</b>
DP	2,326	2,315	2,286	2,239	2,225	2,183	2,193	2,195	2,128	2,113	<b>2,220</b>	<b>0,073</b>
SD-B	2,401	2,395	2,315	2,306	2,269	2,258	2,267	2,260	2,200	2,184	<b>2,286</b>	<b>0,072</b>
Variación % Deformación	3,6	3,6	4,6	3,3	3,5	3,8	2,9	3,2	3,5	4,0	<b>3,6</b>	<b>0,6</b>
Variación % A-B	0,5	0,2	3,3	0,4	1,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,7	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>

Tabla VI74. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.

Caso 5-4 PM3	Tensión Eléctrica (V)											Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media	
SD-A	2,754	2,749	2,720	2,687	2,623	2,590	2,561	2,555	2,500	2,473	<b>2,621</b>	<b>0,102</b>
DP	2,502	2,560	2,505	2,489	2,466	2,387	2,316	2,323	2,249	2,230	<b>2,403</b>	<b>0,117</b>
SD-B	2,749	2,720	2,687	2,623	2,590	2,561	2,555	2,500	2,473	2,475	<b>2,593</b>	<b>0,100</b>
Variación % Deformación	9,2	6,9	7,9	7,4	6,0	7,8	9,6	9,1	10,0	9,8	<b>8,4</b>	<b>1,4</b>
Variación % A-B	0,2	1,1	1,2	2,4	1,3	1,1	0,2	2,2	1,1	0,1	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>



Tabla IV75. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.

Caso 5-4 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,789	2,693	2,666	2,609	2,634	2,578	2,568	2,550	2,541	2,444	<b>2,607</b>	<b>0,095</b>
DP	1,684	1,743	1,757	1,680	1,715	1,655	1,590	1,578	1,505	1,496	<b>1,640</b>	<b>0,094</b>
SD-B	2,693	2,666	2,609	2,634	2,578	2,568	2,550	2,541	2,444	2,354	<b>2,564</b>	<b>0,102</b>
Variación % Deformación	39,6	35,3	34,1	35,6	34,9	35,8	38,1	38,1	40,8	38,8	<b>37,1</b>	<b>2,3</b>
Variación % A-B	3,4	1,0	2,1	1,0	2,1	0,4	0,7	0,4	3,8	3,7	<b>1,9</b>	<b>1,4</b>

En base a estos resultados obtenidos se van a hacer diferentes análisis que nos permitan estudiar el comportamiento del sensor piezoresistivo en las cuatro zonas de la parte izquierda y su reproducibilidad, así como también se va a comparar éste con el de la parte derecha ya comentado en los casos anteriores.

En primer lugar, y al igual que se ha hecho en la parte derecha se va a hacer el análisis de las variaciones sufridas en cada una de las bandas al provocar la deformación por presión. Para ello, se extraen los resultados de variaciones de tensión por deformación en cada punto de medida y para cada una de las deformaciones provocadas en las respectivas bandas. En la siguiente tabla IV76 se representan estos valores medios y sus desviaciones.

Tabla IV76. Resumen de los valores medios porcentuales de la variación de tensión eléctrica al producir la deformación por presión de 4.075 Pa en la parte izquierda de los puntos de medida.

	C5-1		C5-2		C5-3		C5-4	
	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$
PM1	<b>35,5</b>	3,9	<b>8,5</b>	0,9	<b>3,1</b>	0,5	<b>1,9</b>	0,5
PM2	<b>9,6</b>	1,8	<b>30,8</b>	1,5	<b>8,9</b>	1	<b>3,6</b>	0,6
PM3	<b>4,8</b>	0,8	<b>8,6</b>	0,7	<b>33,7</b>	3,9	<b>8,4</b>	1,4
PM4	<b>1,8</b>	0,3	<b>3,9</b>	0,5	<b>7,5</b>	0,8	<b>37,1</b>	2,3

En base a estos resultados, se aprecia como era de esperar un aumento significativo de la variación porcentual en los puntos de medida donde se está aplicando la deformación, los valores representados en azul en esta tabla, entre el 30 y el 40%. Además, la perturbación en las bandas contiguas también ha crecido por el mismo motivo, se está aplicando una mayor presión (de 1,5 veces más) para provocar la deformación. Lo más importante y a resaltar, es que ambos crecimientos no se han producido con la misma intensidad, por lo que la variación de tensión provocada por la deformación por presión es mucho mayor en la banda que se está produciendo en

aquellas que se encuentran alrededor. O lo que es lo mismo, equivale a decir que ha aumentado la sensibilidad del sensor piezoresistivo.

Para poder estudiar esta mejora de la sensibilidad del sistema con más detalle, a continuación vamos a representar gráficamente estos valores de variaciones medias porcentuales. Es importante resaltar que en esta gráfica de posicionamiento de estas variaciones tanto el eje de abscisas como el de coordenadas es el mismo, la variación porcentual. Y que además, el tamaño de estas esferas que representan cada uno de los valores de variación está en función de la desviación estándar que presenta cada valor. De forma que, por ejemplo, para el caso 5-1 y PM1 donde el valor medio porcentual de variación ha sido de 35,5 con una desviación estándar de 3,9, equivale a decir que puede ir desde 31,6% hasta los 39,4%. La forma de representarlo gráficamente ha sido esféricamente donde el centro de la esfera representa el valor medio y el tamaño de la misma depende del valor de desviación estándar, o lo que equivale a decir que el diámetro de ésta es este valor de dispersión.

Para poder hacer el estudio entre la presión ejercida con la pesa de 100 gramos y la utilizada en los cuatro casos anteriores, de 50 gramos, vamos a representar también gráficamente los valores porcentuales medios de estos cuatro casos y que están expuestos en la tabla que aparece en las conclusiones parciales después del cuarto caso; con la referencia tabla IV59. De esta forma obtenemos las siguientes figuras:

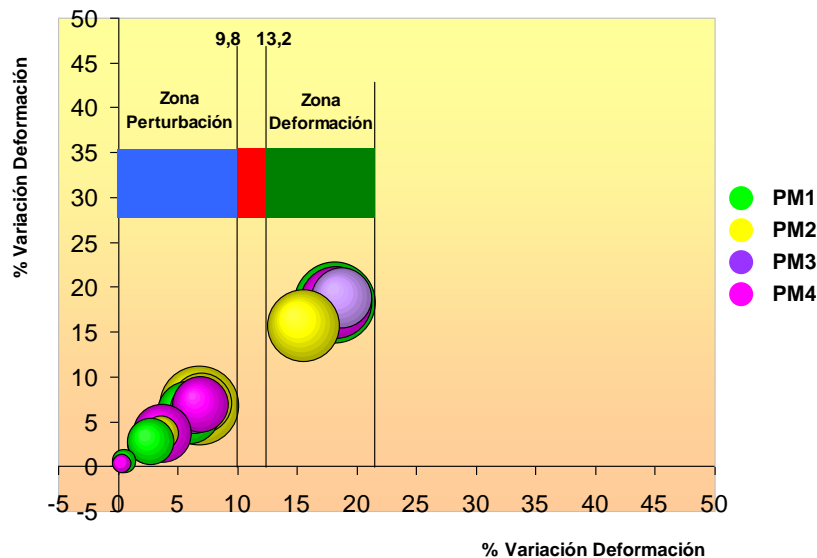


Figura IV101. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida y los cuatro primeros casos si la deformación por presión aplicada es de 2.773 Pa.

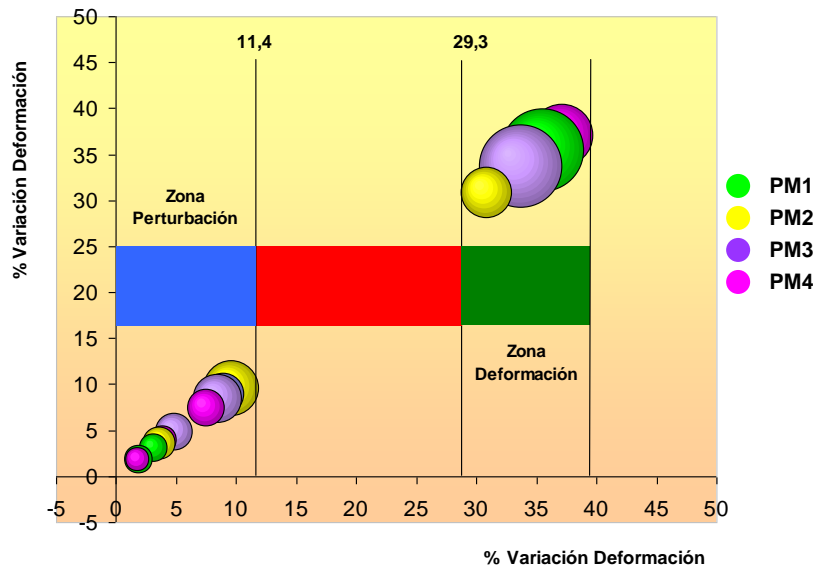


Figura IV102. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida y el quinto caso si la deformación por presión aplicada es de 4.075 Pa.

En base a estas figuras, podemos hacer varias consideraciones al respecto.

En primer lugar, en ambas se aprecia claramente la diferenciación de dos zonas de variación de forma muy significativa para el diseño de un sensor piezoresistivo. La zona de deformación con valores comprendidos entre 13 y 21% de variación de la tensión eléctrica cuando la presión que ejercemos es del orden de los 2,7 kPa aproximadamente, y 29 y 40% cuando esta presión es mayor, del orden de 4 kPa. Estos valores de variación los encontramos cuando la deformación la aplicamos en la misma banda donde se encuentra el punto de medida que está detectando estos cambios de tensión eléctrica, por esta razón la denominamos zona de deformación.

Por otro lado, los valores medios de variación comprendidos entre 0 y 11% para ambas intensidades de presión, equivalen al efecto interferencia que provoca dicha deformación en las bandas contiguas. De modo que cuanto mayor es el porcentaje de variación equivale a decir que nos encontramos en una banda más próxima de donde se está aplicando la deformación de forma directa. Es por ello, que denominamos esta área en la gráfica la zona de perturbación.

En este sentido, al comparar ambas gráficas es relevante considerar que para una deformación por presión de 4 kPa el sensor piezoresistivo está mucho menos influenciado por las bandas adyacentes que para 2,7 kPa, ya que la variación en la zona de deformación está más alejada de la de perturbación. Es por ello, que entre la zona de deformación y la zona de perturbación se genera un espacio de diferenciación, representado de color rojo en ambas figuras, que nos da el margen que se establece entre la detección de la señal y el ruido que ésta ocasiona en las bandas más próximas. Podemos observar que para una mayor deformación por presión aumenta esta zona que podemos decir que podría ser de seguridad y nos permite diferenciar en mayor medida las dos tipologías de señales.

Como primera conclusión al respecto, podemos decir que la presión que provoca la pesa de 100 gramos es mucho más significativa ya que la señal de detección es relativamente mucho mayor que el efecto de perturbación que produce en las bandas contiguas, en comparación con la de 50 gramos, para este sistema piezoresistivo.

Por último, en lo que respecta a la reproducibilidad de las medidas, y al igual que pasaba en los cuatro primeros casos con la deformación producida a la derecha, estos valores de desviación siguen siendo muy significativos. En este sentido, podemos hacer un doble análisis al respecto:

- por una parte, el estudio de la recuperación del tejido a la posición inicial una vez dejamos de aplicar la deformación por presión. En este sentido, los valores medios porcentuales de recuperación de la señal, considerando de nuevo solo los PM donde se aplica la deformación, oscilan entre el 1 y el 3% dependiendo de la banda donde apliques la deformación. Valores más aceptables que los encontrados al aplicar una deformación menor (casos de 1 al 4), donde llegaban a superar el 5%.
- y por otra parte, si analizamos los valores de tensión eléctrica sin deformación una vez retiramos la pesa (SD-B) de la banda donde realizamos la deformación observamos que en líneas generales estos van disminuyendo a lo largo que realizamos las repeticiones. En la siguiente tabla IV77 podemos encontrar estos valores.

*Tabla IV77. Resultados de la tensión eléctrica en cada punto de medida después (SD-B) de producir la deformación en la banda conductora donde se realiza la presión.*

SD-B	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Caso 5-1 PM1	2,495	2,475	2,504	2,462	2,366	2,300	2,222	2,310	2,301	2,125	<b>2,356</b>	<b>0,128</b>
Caso 5-2 PM2	2,995	2,945	2,952	2,922	2,878	2,809	2,771	2,700	2,725	2,713	<b>2,841</b>	<b>0,111</b>
Caso 5-3 PM3	2,811	2,792	2,750	2,684	2,675	2,623	2,658	2,613	2,705	2,752	<b>2,706</b>	<b>0,068</b>
Caso 5-4 PM4	2,693	2,666	2,609	2,634	2,578	2,568	2,550	2,541	2,444	2,354	<b>2,564</b>	<b>0,102</b>

Si representamos gráficamente estos valores de tensión eléctrica de forma secuencial obtenemos la siguiente figura IV103.

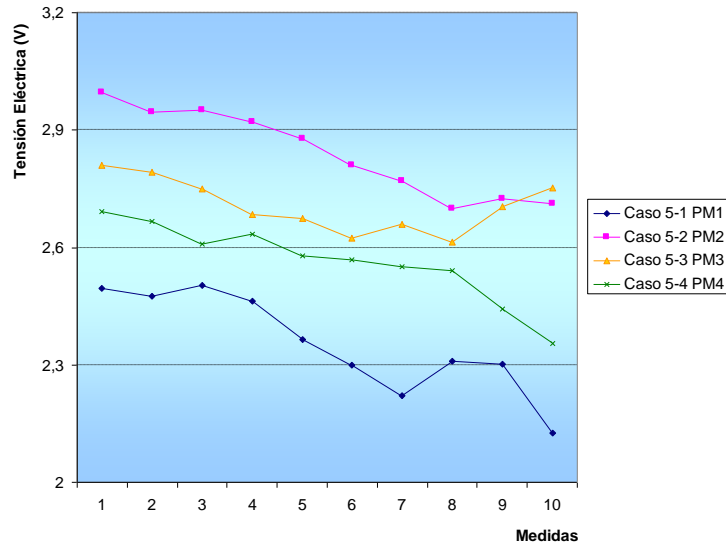


Figura IV103. Representación gráfica de los valores de tensión eléctrica en cada punto de medida después de producir la deformación por presión (SD-B (izquierda)).

El análisis de esta gráfica nos indica que existe una ligera tendencia de reducción del valor de tensión eléctrica conforme vamos procediendo a realizar las distintas repeticiones de colocar y quitar la pesa. Lo cual nos indica de forma clara que existe un error de deriva que viene provocado por la carencia del sistema en la recuperación hasta su estado inicial. Lo que es un problema grave para el objeto de la presente tesis, ya que no nos permite desarrollar un sensor piezoresistivo que sea duradero en el tiempo, debido al deterioro progresivo de la propia señal. Al analizar la causa de esta disminución paulatina de la señal, la interpretación que se puede hacer es que la capa intermedia de gomaespuma presenta una fatiga inherente por la propia deformación que se va aplicando en cada repetición. Es decir, cuando retiramos la pesa este material no vuelve a su posición inicial, por lo que el valor de tensión eléctrica del tejido también es distinto.

Para ello, se plantea reducir de forma considerable este efecto, y para ello se plantea sustituir esta espuma por otra de menor espesor, 0,5 cm, y con un mayor valor de recuperación que permita reducir al máximo esta variabilidad, produciéndose así una uniformidad de la deformación ocasionada por presión al aplicar la pesa.

#### IV.2.2.3.- RESPUESTA DE UN SISTEMA COMPLEJO CON AISLANTE Y SUBSTRATO DE ESPUMA PARA INDIVIDUALIZAR LAS RESPUESTAS.

Tal y como ya se ha introducido en el apartado anterior, se van a proponer a continuación una serie de mejoras y modificaciones sobre el sistema de medida para conseguir por un lado el objetivo final de la presente tesis doctoral que no es otro que el definir un sistema totalmente reproducible que nos permita medir de forma rigurosa el punto donde se realiza una determinada y controlada presión ejercida sobre un tejido, de forma que pueda ser considerado como un sistema piezoeléctrico basado única y exclusivamente en la propiedad conductora de un tejido de punto.

Para este nuevo punto se ha realizado una pequeña modificación sobre el banco de pruebas que consiste en la utilización de una espuma de poliuretano de inferior grosor y mayor capacidad de recuperación, colocada entre el soporte de madera y el tejido, con el objetivo de mejorar la reproducibilidad del tejido al favorecer la recuperación del mismo al estado inicial.

Los puntos de medida van a ser los mismos que en el apartado anterior, en concreto son 4, los cuales están situados en cada una de las bandas de la franja vertical central del tejido, provocando de esta forma una separación virtual del tejido en dos áreas, parte derecha e izquierda, que nos permite obtener variaciones distintas de tensión eléctrica en función de si la presión sobre el tejido la ejercemos en una parte o en la otra. En este sentido, y también siguiendo el mismo modelo que en el punto anterior, los puntos de medida 1 y 4 se encuentran fijados a la estructura de todo el sistema, por lo que sus resultados a priori serán más fiables, mientras que los puntos de medida 2 y 3 son móviles, es decir, se realizan directamente por el operario con un tester, por lo que en cada medida el punto exacto de medición va variando. De esta forma, visto desde arriba nos sirve la misma imagen de la figura IV90 para representar como queda compuesto este sistema, y la misma figura IV89 visto desde una perspectiva lateral, aunque reduciendo el espesor de la espuma.

Por otro lado, en relación a la presión que debemos ejercer sobre el tejido mediante la colocación de pesas, al cambiar el sistema y utilizar una espuma diferente en contacto con el tejido vuelve a ser una incógnita, por lo que tendremos que estudiar a priori el nivel de presión que tenemos que aplicar sobre el tejido para que nos aseguren unos datos lo suficientemente significativos para que puedan ser tratados con garantías, y donde una vez más el ruido que ocasiona en las bandas contiguas sea mínimo.

En este sentido, planteamos una serie de pruebas que nos permitirá realizar el estudio de reproducibilidad con este nuevo banco de ensayos siguiendo la misma metodología que en el punto anterior. Se detalla a continuación estas pruebas a realizar:

- Prueba preliminar: medida de la presión por deformación a aplicar sobre el sistema.
- Prueba Final: Estudio de reproducibilidad al producir una deformación por presión en la parte derecha e izquierda en los cuatro PM.

*Prueba preliminar: medida de la presión por deformación a aplicar sobre el sistema.*

Tal y como ya se ha comentado el objeto de estas pruebas preliminares es saber de forma precisa la presión que tenemos que ejercer en las bandas conductoras para que la variación de tensión eléctrica sea lo suficientemente significativa y representativa, y donde de forma relativa esté menos influenciada por la perturbación que se ocasiona en las bandas contiguas. En definitiva, estamos evaluando la sensibilidad del sistema piezoresistivo.

Para este estudio de sensibilidad, partimos de las experiencias anteriores donde hemos ido aumentando la presión ejercida a medida que se han ido modificando las condiciones del banco de ensayos. En este sentido, se propone realizar un estudio preliminar con varias pesas de distinta masa tomando como referencia la de 100 g, que es la utilizada en los casos anteriores. Previsiblemente al colocar la espuma debajo del tejido, se espera que ésta ofrezca una pequeña resistencia a la deformación del tejido, por lo que vamos a probar también con un peso de mayor masa que nos permita vencer esta resistencia, en concreto de 150 g.

Estos pesos se colocan en la parte izquierda del punto de medida 1 en la banda conductora 1 y se miden los valores de tensión eléctrica en cada una de las bandas para comparar variaciones antes y después de producir la deformación. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla IV78.

*Tabla IV78. Resultados de la tensión eléctrica previa a (SD-A) y durante (DP) la deformación por presión en la banda conductora 1 para dos presiones distintas.*

	1 pesa de M= 100 g y A=2.40 cm <sup>2</sup> (P = 4.075 Pa)				1 pesa de M= 150 g y A=3.14 cm <sup>2</sup> (P = 4.679 Pa)			
	SD-A (V)	DP (V)	Variación (V)	%	SD-A (V)	DP (V)	Variación (V)	%
PM1	2.856	2.150	<b>0.706</b>	<b>24,7</b>	2.830	1.887	<b>0.943</b>	<b>33,3</b>
PM2	2.796	2.751	<b>0.045</b>	<b>1,6</b>	2.722	2.664	<b>0.058</b>	<b>2,1</b>
PM3	2.450	2.448	<b>0.002</b>	<b>0,1</b>	2.480	2.475	<b>0.005</b>	<b>0,2</b>
PM4	2.633	2.632	<b>0.001</b>	<b>0,0</b>	2.697	2.692	<b>0.005</b>	<b>0,2</b>

Estos resultados nos muestran, en primer lugar y tal y como habíamos previsto, que la modificación del banco de ensayos a través de la colocación de la espuma produce una disminución de la variación de la tensión eléctrica, ya que para una pesa de 100 g ahora el porcentaje de variación está entorno al 25%, mientras que en el sistema de medida anterior superaba el 30%. Estos valores de variación se consiguen ahora ampliando la presión ejercida, es decir, cuando producimos la deformación por presión con una pesa de 150 g.

En segundo lugar, y como dato a destacar de este estudio preliminar, lo obtenemos en la señal de perturbación en las bandas contiguas que ocasiona la deformación por presión, que como vemos y comparamos con los casos anteriores, se ha reducido de

forma muy significativa. En este sentido, se puede obtener una doble conclusión al respecto:

- que aunque la variación sea menor, podemos seguir utilizando la pesa de 100g para provocar la presión siendo esta señal muy representativa debido a que disminuye el efecto interferencia en las bandas más próximas, por lo que se mantiene un espacio de seguridad suficiente como para utilizar esta presión en concreto.

- y que la colocación de la espuma supone mejorar la robustez del banco de ensayos ya que como se ha comentado disminuye el efecto propagación de la variación en las bandas adyacentes a la cual se somete la deformación. En las próximas pruebas planteadas a continuación estudiaremos como afecta a la reproducibilidad de las medidas.

*Prueba Final: Estudio de reproducibilidad al producir una deformación por presión en la parte derecha e izquierda en los cuatro PM.*

Siguiendo con la misma secuencia que en los casos anteriores se realizan las medidas de los valores de tensión eléctrica, antes, durante y después de realizar la deformación por presión. Estas medidas se repiten hasta 10 veces para cada de deformación en cada una de las cuatro bandas conductoras, colocando la pesa responsable de ésta en la parte derecha de los puntos de medida, y luego repitiendo el mismo proceso pero en la parte izquierda, lo que equivale a decir que se va a producir un aumento y disminución del valor de la tensión eléctrica respectivamente.

Los resultados obtenidos para estas medidas para cada punto de medida y cada deformación en cada banda cuando esta se produce en la parte derecha se representan en las siguientes tablas:

*Tabla IV79. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora (derecha).*

Prueba d-1 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,520	2,542	2,512	2,505	2,505	2,508	2,499	2,500	2,492	2,488	<b>2,507</b>	<b>0,015</b>
DP	3,201	3,198	3,180	3,175	3,181	3,176	3,170	3,165	3,133	3,120	<b>3,170</b>	<b>0,026</b>
SD-B	2,542	2,512	2,505	2,505	2,508	2,499	2,500	2,492	2,488	2,490	<b>2,504</b>	<b>0,016</b>
Variación % Deformación	27,0	25,8	26,6	26,7	27,0	26,6	26,9	26,6	25,7	25,4	<b>26,4</b>	<b>0,5</b>
Variación % A-B	0,9	1,2	-0,3	0,0	0,1	0,4	0,0	0,3	0,2	0,1	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>



Tabla IV80. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (derecha).

Prueba d-1 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,462	2,470	2,477	2,485	2,482	2,480	2,481	2,473	2,466	2,466	<b>2,474</b>	<b>0,008</b>
DP	2,501	2,498	2,508	2,510	2,511	2,513	2,510	2,497	2,500	2,502	<b>2,505</b>	<b>0,006</b>
SD-B	2,470	2,477	2,485	2,482	2,480	2,481	2,473	2,466	2,466	2,473	<b>2,475</b>	<b>0,007</b>
Variación % Deformación	1,6	1,1	1,3	1,0	1,2	1,3	1,2	1,0	1,4	1,5	<b>1,2</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	<b>0,0</b>	<b>0,3</b>

Tabla IV81. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (derecha).

Prueba d-1 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,620	2,619	2,618	2,615	2,616	2,610	2,609	2,610	2,611	2,608	<b>2,614</b>	<b>0,005</b>
DP	2,629	2,625	2,625	2,621	2,623	2,618	2,615	2,614	2,613	2,615	<b>2,620</b>	<b>0,006</b>
SD-B	2,619	2,618	2,615	2,616	2,610	2,609	2,610	2,611	2,608	2,607	<b>2,612</b>	<b>0,004</b>
Variación % Deformación	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV82. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (derecha).

Prueba d-1 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,390	2,390	2,388	2,389	2,387	2,390	2,390	2,389	2,390	2,389	<b>2,389</b>	<b>0,001</b>
DP	2,390	2,392	2,388	2,390	2,391	2,391	2,392	2,390	2,391	2,389	<b>2,390</b>	<b>0,001</b>
SD-B	2,390	2,388	2,389	2,387	2,390	2,390	2,389	2,390	2,389	2,390	<b>2,389</b>	<b>0,001</b>
Variación % Deformación	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV83. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).

Prueba d-2 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,788	2,790	2,777	2,783	2,790	2,796	2,791	2,800	2,806	2,804	<b>2,793</b>	<b>0,009</b>
DP	2,830	2,822	2,809	2,813	2,820	2,829	2,830	2,832	2,842	2,850	<b>2,828</b>	<b>0,012</b>
SD-B	2,790	2,777	2,783	2,790	2,796	2,791	2,800	2,806	2,804	2,810	<b>2,795</b>	<b>0,010</b>
Variación % Deformación	1,5	1,1	1,2	1,1	1,1	1,2	1,4	1,1	1,3	1,6	<b>1,3</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,1	0,5	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV84. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).

Prueba d-2 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,920	2,936	2,945	2,989	2,972	2,998	2,995	3,009	2,975	2,985	<b>2,972</b>	<b>0,029</b>
DP	3,659	3,666	3,670	3,742	3,725	3,762	3,750	3,770	3,726	3,749	<b>3,722</b>	<b>0,042</b>
SD-B	2,936	2,945	2,989	2,972	2,998	2,995	3,009	2,975	2,985	2,980	<b>2,978</b>	<b>0,023</b>
Variación % Deformación	25,3	24,9	24,6	25,2	25,3	25,5	25,2	25,3	25,2	25,6	<b>25,2</b>	<b>0,3</b>
Variación % A-B	0,5	0,3	1,5	0,6	0,9	0,1	0,5	1,1	0,3	0,2	<b>0,2</b>	<b>0,7</b>

Tabla IV85. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).

Prueba d-2 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,506	2,501	2,496	2,499	2,503	2,510	2,512	2,515	2,518	2,518	<b>2,508</b>	<b>0,008</b>
DP	2,536	2,533	2,526	2,530	2,548	2,555	2,553	2,551	2,560	2,560	<b>2,545</b>	<b>0,013</b>
SD-B	2,501	2,496	2,499	2,503	2,510	2,512	2,515	2,518	2,518	2,519	<b>2,509</b>	<b>0,009</b>
Variación % Deformación	1,2	1,3	1,2	1,2	1,8	1,8	1,6	1,4	1,7	1,7	<b>1,5</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV86. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).

Prueba d-2 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,426	2,428	2,430	2,431	2,432	2,429	2,427	2,429	2,430	2,429	<b>2,429</b>	<b>0,002</b>
DP	2,433	2,435	2,439	2,439	2,438	2,437	2,436	2,440	2,436	2,435	<b>2,437</b>	<b>0,002</b>
SD-B	2,428	2,430	2,431	2,432	2,429	2,427	2,429	2,430	2,429	2,430	<b>2,430</b>	<b>0,001</b>
Variación % Deformación	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV87. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).

Prueba d-3 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,612	2,615	2,614	2,614	2,619	2,620	2,621	2,622	2,620	2,621	<b>2,618</b>	<b>0,004</b>
DP	2,620	2,620	2,621	2,625	2,628	2,629	2,627	2,628	2,625	2,626	<b>2,625</b>	<b>0,003</b>
SD-B	2,615	2,614	2,614	2,619	2,620	2,621	2,622	2,620	2,621	2,623	<b>2,619</b>	<b>0,003</b>
Variación % Deformación	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	<b>0,3</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV88. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).

Prueba d-3 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,756	2,760	2,763	2,759	2,755	2,756	2,750	2,756	2,760	2,759	<b>2,757</b>	<b>0,004</b>
DP	2,785	2,789	2,788	2,785	2,788	2,791	2,795	2,788	2,789	2,790	<b>2,789</b>	<b>0,003</b>
SD-B	2,760	2,763	2,759	2,755	2,756	2,750	2,756	2,760	2,759	2,759	<b>2,758</b>	<b>0,004</b>
Variación % Deformación	1,1	1,1	0,9	0,9	1,2	1,3	1,6	1,2	1,1	1,1	<b>1,1</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV89. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).

Prueba d-3 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,534	2,550	2,542	2,555	2,582	2,581	2,571	2,580	2,564	2,542	<b>2,560</b>	<b>0,018</b>
DP	3,235	3,245	3,240	3,275	3,277	3,263	3,260	3,274	3,260	3,251	<b>3,258</b>	<b>0,015</b>
SD-B	2,550	2,542	2,555	2,582	2,581	2,571	2,580	2,564	2,542	2,547	<b>2,561</b>	<b>0,016</b>
Variación % Deformación	27,7	27,3	27,5	28,2	26,9	26,4	26,8	26,9	27,1	27,9	<b>27,3</b>	<b>0,5</b>
Variación % A-B	0,6	0,3	0,5	1,1	0,0	0,4	0,4	0,6	0,9	0,2	<b>0,1</b>	<b>0,6</b>

Tabla IV90. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).

Prueba d-3 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,395	2,392	2,390	2,391	2,396	2,399	2,400	2,402	2,410	2,408	<b>2,398</b>	<b>0,007</b>
DP	2,425	2,421	2,429	2,419	2,426	2,430	2,433	2,444	2,453	2,455	<b>2,434</b>	<b>0,013</b>
SD-B	2,392	2,390	2,391	2,396	2,399	2,400	2,402	2,410	2,408	2,413	<b>2,400</b>	<b>0,008</b>
Variación % Deformación	1,3	1,2	1,6	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	1,8	2,0	<b>1,5</b>	<b>0,3</b>
Variación % A-B	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,3	0,1	0,2	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV91. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).

Prueba d-4 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,545	2,546	2,548	2,547	2,548	2,551	2,552	2,553	2,554	2,554	<b>2,550</b>	<b>0,003</b>
DP	2,546	2,548	2,549	2,547	2,550	2,553	2,553	2,553	2,556	2,555	<b>2,551</b>	<b>0,003</b>
SD-B	2,546	2,548	2,547	2,548	2,551	2,552	2,553	2,554	2,554	2,555	<b>2,551</b>	<b>0,003</b>
Variación % Deformación	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV92. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).

Prueba d-4 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,613	2,615	2,617	2,619	2,620	2,625	2,623	2,624	2,626	2,629	<b>2,621</b>	<b>0,005</b>
DP	2,622	2,620	2,622	2,625	2,626	2,630	2,631	2,633	2,630	2,634	<b>2,627</b>	<b>0,005</b>
SD-B	2,615	2,617	2,619	2,620	2,625	2,623	2,624	2,626	2,629	2,630	<b>2,623</b>	<b>0,005</b>
Variación % Deformación	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,1	0,1	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV93. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).

Prueba d-4 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,630	2,645	2,642	2,651	2,653	2,659	2,662	2,674	2,677	2,675	<b>2,657</b>	<b>0,016</b>
DP	2,705	2,698	2,710	2,711	2,706	2,713	2,702	2,706	2,710	2,716	<b>2,708</b>	<b>0,005</b>
SD-B	2,645	2,642	2,651	2,653	2,659	2,662	2,674	2,677	2,675	2,680	<b>2,662</b>	<b>0,014</b>
Variación % Deformación	2,9	2,0	2,6	2,3	2,0	2,0	1,5	1,2	1,2	1,5	<b>1,9</b>	<b>0,6</b>
Variación % A-B	0,6	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1	0,2	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV94. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).

Prueba d-4 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,522	2,540	2,600	2,609	2,612	2,605	2,568	2,578	2,589	2,580	<b>2,580</b>	<b>0,030</b>
DP	3,095	3,099	3,165	3,183	3,209	3,197	3,203	3,210	3,225	3,207	<b>3,179</b>	<b>0,046</b>
SD-B	2,540	2,600	2,609	2,612	2,605	2,568	2,578	2,589	2,580	2,591	<b>2,587</b>	<b>0,022</b>
Variación % Deformación	22,7	22,0	21,7	22,0	22,9	22,7	24,7	24,5	24,6	24,3	<b>23,2</b>	<b>1,2</b>
Variación % A-B	0,7	2,4	0,3	0,1	0,3	1,4	0,4	0,4	0,3	0,4	<b>0,0</b>	<b>1,0</b>

Y los resultados al colocar la pesa en la parte izquierda de los puntos de medida son:

Tabla IV95. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora (izquierda).

Prueba i-1 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,862	2,851	2,846	2,853	2,865	2,860	2,840	2,832	2,825	2,816	<b>2,845</b>	<b>0,016</b>
DP	2,092	2,086	2,089	2,096	2,106	2,110	2,083	2,097	2,101	2,109	<b>2,097</b>	<b>0,010</b>
SD-B	2,851	2,846	2,853	2,865	2,860	2,840	2,832	2,825	2,816	2,822	<b>2,841</b>	<b>0,017</b>
Variación % Deformación	26,9	26,8	26,6	26,5	26,5	26,2	26,7	26,0	25,6	25,1	<b>26,3</b>	<b>0,6</b>
Variación % A-B	0,4	0,2	0,2	0,4	0,2	0,7	0,3	0,2	0,3	0,2	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV96. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (izquierda).

Prueba i-1 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,511	2,513	2,509	2,510	2,513	2,501	2,500	2,497	2,490	2,484	<b>2,503</b>	<b>0,010</b>
DP	2,460	2,456	2,466	2,469	2,460	2,451	2,456	2,448	2,439	2,437	<b>2,454</b>	<b>0,011</b>
SD-B	2,513	2,509	2,510	2,513	2,501	2,500	2,497	2,490	2,484	2,480	<b>2,500</b>	<b>0,012</b>
Variación % Deformación	2,0	2,3	1,7	1,6	2,1	2,0	1,8	2,0	2,0	1,9	<b>1,9</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,1	0,2	0,0	0,1	0,5	0,0	0,1	0,3	0,2	0,2	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV97. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (izquierda).

Prueba i-1 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,720	2,716	2,713	2,710	2,711	2,708	2,706	2,703	2,700	2,699	<b>2,709</b>	<b>0,007</b>
DP	2,715	2,712	2,709	2,711	2,705	2,701	2,701	2,694	2,695	2,696	<b>2,704</b>	<b>0,008</b>
SD-B	2,716	2,713	2,710	2,711	2,708	2,706	2,703	2,700	2,699	2,696	<b>2,706</b>	<b>0,007</b>
Variación % Deformación	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV98. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (izquierda).

Prueba i-1 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,634	2,633	2,632	2,630	2,629	2,625	2,624	2,623	2,621	2,619	<b>2,627</b>	<b>0,005</b>
DP	2,634	2,632	2,630	2,627	2,625	2,626	2,624	2,622	2,619	2,618	<b>2,626</b>	<b>0,005</b>
SD-B	2,633	2,632	2,630	2,629	2,625	2,624	2,623	2,621	2,620	2,618	<b>2,626</b>	<b>0,005</b>
Variación % Deformación	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>

Tabla IV99. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).

Prueba i-2 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,623	2,618	2,620	2,619	2,619	2,615	2,610	2,611	2,608	2,610	<b>2,615</b>	<b>0,005</b>
DP	2,587	2,590	2,593	2,584	2,580	2,581	2,577	2,575	2,569	2,559	<b>2,580</b>	<b>0,010</b>
SD-B	2,618	2,620	2,619	2,619	2,615	2,610	2,611	2,608	2,610	2,603	<b>2,613</b>	<b>0,006</b>
Variación % Deformación	1,4	1,1	1,0	1,3	1,5	1,3	1,3	1,4	1,5	2,0	<b>1,4</b>	<b>0,6</b>
Variación % A-B	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,3	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV100. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).

Prueba i-2 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,452	2,436	2,416	2,410	2,416	2,417	2,410	2,406	2,410	2,401	<b>2,417</b>	<b>0,015</b>
DP	1,810	1,821	1,809	1,803	1,798	1,799	1,795	1,784	1,803	1,800	<b>1,802</b>	<b>0,010</b>
SD-B	2,436	2,416	2,410	2,416	2,417	2,410	2,406	2,410	2,401	2,396	<b>2,412</b>	<b>0,011</b>
Variación % Deformación	26,2	25,2	25,1	25,2	25,6	25,6	25,5	25,9	25,2	25,0	<b>25,5</b>	<b>0,4</b>
Variación % A-B	0,7	0,8	0,2	0,2	0,0	0,3	0,2	0,2	0,4	0,2	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>

Tabla IV101. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).

Prueba i-2 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,678	2,670	2,669	2,665	2,666	2,661	2,670	2,659	2,655	2,640	<b>2,663</b>	<b>0,010</b>
DP	2,645	2,640	2,642	2,630	2,632	2,633	2,628	2,618	2,613	2,606	<b>2,629</b>	<b>0,013</b>
SD-B	2,670	2,669	2,665	2,666	2,661	2,670	2,659	2,655	2,640	2,645	<b>2,660</b>	<b>0,011</b>
Variación % Deformación	1,2	1,1	1,0	1,3	1,3	1,1	1,6	1,5	1,6	1,3	<b>1,3</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,3	0,0	0,1	0,0	0,2	0,3	0,4	0,2	0,6	0,2	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV102. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).

Prueba i-2 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,523	2,520	2,521	2,519	2,517	2,518	2,518	2,516	2,514	2,511	<b>2,518</b>	<b>0,003</b>
DP	2,520	2,521	2,516	2,515	2,513	2,517	2,515	2,513	2,510	2,509	<b>2,515</b>	<b>0,004</b>
SD-B	2,520	2,521	2,519	2,517	2,518	2,518	2,516	2,514	2,511	2,509	<b>2,516</b>	<b>0,004</b>
Variación % Deformación	0,1	0,0	0,2	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV103. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).

Prueba i-3 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,620	2,619	2,618	2,618	2,616	2,613	2,613	2,610	2,609	2,603	<b>2,614</b>	<b>0,005</b>
DP	2,612	2,613	2,612	2,615	2,613	2,610	2,609	2,605	2,608	2,600	<b>2,610</b>	<b>0,004</b>
SD-B	2,619	2,618	2,618	2,616	2,613	2,613	2,610	2,609	2,603	2,601	<b>2,612</b>	<b>0,006</b>
Variación % Deformación	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,0	0,1	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,1	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>



Tabla IV104. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).

Prueba i-3 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,597	2,595	2,588	2,589	2,596	2,593	2,597	2,593	2,603	2,601	<b>2,595</b>	<b>0,005</b>
DP	2,536	2,530	2,541	2,547	2,544	2,550	2,545	2,552	2,549	2,560	<b>2,545</b>	<b>0,008</b>
SD-B	2,595	2,588	2,589	2,596	2,593	2,597	2,593	2,603	2,601	2,600	<b>2,596</b>	<b>0,005</b>
Variación % Deformación	2,3	2,5	1,8	1,6	2,0	1,7	2,0	1,6	2,1	1,6	<b>1,9</b>	<b>0,3</b>
Variación % A-B	0,1	0,3	0,0	0,3	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1	0,0	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV105. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).

Prueba i-3 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,410	2,402	2,408	2,423	2,413	2,411	2,406	2,391	2,390	2,397	<b>2,405</b>	<b>0,010</b>
DP	1,771	1,780	1,781	1,792	1,799	1,803	1,778	1,784	1,796	1,800	<b>1,788</b>	<b>0,011</b>
SD-B	2,402	2,408	2,423	2,413	2,411	2,406	2,391	2,390	2,397	2,390	<b>2,403</b>	<b>0,011</b>
Variación % Deformación	26,5	25,9	26,0	26,0	25,4	25,2	26,1	25,4	24,9	24,9	<b>25,6</b>	<b>0,6</b>
Variación % A-B	0,3	0,2	0,6	0,4	0,1	0,2	0,6	0,0	0,3	0,3	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>

Tabla IV106. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).

Prueba i-3 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,785	2,788	2,779	2,774	2,780	2,776	2,770	2,767	2,755	2,749	<b>2,772</b>	<b>0,012</b>
DP	2,763	2,760	2,751	2,746	2,753	2,743	2,738	2,726	2,718	2,706	<b>2,740</b>	<b>0,019</b>
SD-B	2,788	2,779	2,774	2,780	2,776	2,770	2,767	2,755	2,749	2,738	<b>2,768</b>	<b>0,016</b>
Variación % Deformación	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,5	1,3	1,6	<b>1,2</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,4	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV107. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).

Prueba i-4 PM1	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,740	2,741	2,740	2,739	2,739	2,736	2,738	2,735	2,735	2,734	<b>2,738</b>	<b>0,002</b>
DP	2,738	2,737	2,739	2,739	2,735	2,738	2,730	2,732	2,731	2,728	<b>2,735</b>	<b>0,004</b>
SD-B	2,741	2,740	2,739	2,739	2,736	2,738	2,735	2,735	2,734	2,728	<b>2,737</b>	<b>0,004</b>
Variación % Deformación	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,3	0,1	0,1	0,2	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV108. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).

Prueba i-4 PM2	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,621	2,619	2,618	2,616	2,614	2,611	2,610	2,602	2,600	2,596	<b>2,611</b>	<b>0,009</b>
DP	2,618	2,615	2,616	2,613	2,610	2,605	2,602	2,596	2,591	2,590	<b>2,606</b>	<b>0,010</b>
SD-B	2,619	2,618	2,616	2,614	2,611	2,610	2,602	2,600	2,596	2,595	<b>2,608</b>	<b>0,009</b>
Variación % Deformación	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
Variación % A-B	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,1	0,2	0,0	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

Tabla IV109. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).

Prueba i-4 PM3	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,369	2,366	2,350	2,354	2,349	2,345	2,340	2,344	2,344	2,338	<b>2,350</b>	<b>0,010</b>
DP	2,320	2,315	2,306	2,303	2,300	2,297	2,294	2,286	2,291	2,290	<b>2,300</b>	<b>0,011</b>
SD-B	2,366	2,350	2,354	2,349	2,345	2,340	2,344	2,344	2,338	2,230	<b>2,336</b>	<b>0,038</b>
Variación % Deformación	2,1	2,2	1,9	2,2	2,1	2,0	2,0	2,5	2,3	2,1	<b>2,1</b>	<b>0,2</b>
Variación % A-B	0,1	0,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,3	4,6	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>

Tabla IV110. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).

Prueba i-4 PM4	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SD-A	2,506	2,500	2,498	2,490	2,488	2,493	2,509	2,502	2,485	2,487	<b>2,496</b>	<b>0,008</b>
DP	1,852	1,856	1,851	1,845	1,836	1,839	1,845	1,833	1,829	1,830	<b>1,842</b>	<b>0,010</b>
SD-B	2,500	2,498	2,490	2,488	2,493	2,509	2,502	2,485	2,487	2,490	<b>2,494</b>	<b>0,008</b>
Variación % Deformación	26,1	25,8	25,9	25,9	26,2	26,2	26,5	26,7	26,4	26,4	<b>26,2</b>	<b>0,3</b>
Variación % A-B	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,6	0,3	0,7	0,1	0,1	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>

De estos resultados obtenidos se pueden extraer diferentes consideraciones que nos permitan estudiar el comportamiento del sensor piezoresistivo en las cuatro zonas de la parte izquierda y derecha, y su reproducibilidad.

En primer lugar, se va a hacer el análisis de las variaciones sufridas en cada una de las bandas al provocar la deformación por presión, tanto izquierda como derecha. Para ello, se extraen los resultados de variaciones de tensión por deformación en cada punto de medida y para cada una de las deformaciones provocadas en las respectivas bandas. En la siguiente tabla IV111 se representan estos valores medios y sus desviaciones.

Tabla IV111. Resumen de los valores medios porcentuales de la variación de tensión eléctrica al producir la deformación por presión en la parte izquierda y derecha de los puntos de medida.

Derecha	PM1		PM2		PM3		PM4	
	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$
d-1	<b>26,4</b>	0,5	<b>1,2</b>	0,2	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,0</b>	0,1
d-2	<b>1,3</b>	0,2	<b>25,2</b>	0,3	<b>1,5</b>	0,2	<b>0,3</b>	0,1
d-3	<b>0,3</b>	0,1	<b>1,1</b>	0,2	<b>27,3</b>	0,5	<b>1,5</b>	0,3
d-4	<b>0,0</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>1,9</b>	0,6	<b>23,2</b>	1,2
<b>Izquierda</b>								
	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$	%	$\sigma$
i-1	<b>26,3</b>	0,6	<b>1,9</b>	0,2	<b>0,2</b>	0,1	<b>0,0</b>	0,1
i-2	<b>1,4</b>	0,6	<b>25,5</b>	0,4	<b>1,3</b>	0,2	<b>0,1</b>	0,1
i-3	<b>0,2</b>	0,1	<b>1,9</b>	0,3	<b>25,6</b>	0,6	<b>1,2</b>	0,2
i-4	<b>0,1</b>	0,1	<b>0,2</b>	0,1	<b>2,1</b>	0,2	<b>26,2</b>	0,3

En base a estos resultados, se aprecia como era de esperar un aumento significativo de la variación porcentual en los puntos de medida donde se está aplicando la deformación, los valores representados en azul en esta tabla, en concreto esta variación está alrededor del 25%. Además, la perturbación en las bandas contiguas, a diferencia de los casos anteriores, ha decrecido con respecto a la variación producida en la banda que ejercemos la presión. Por lo que una de las primeras conclusiones que podemos extraer es que ha aumentado la sensibilidad del sensor piezoresistivo.

Para poder estudiar esta mejora de la sensibilidad del sistema con más detalle, a continuación representamos gráficamente estos valores de variaciones medias porcentuales, y obtenemos la representación de las figuras IV104 y IV105 que corresponden a la derecha e izquierda respectivamente.

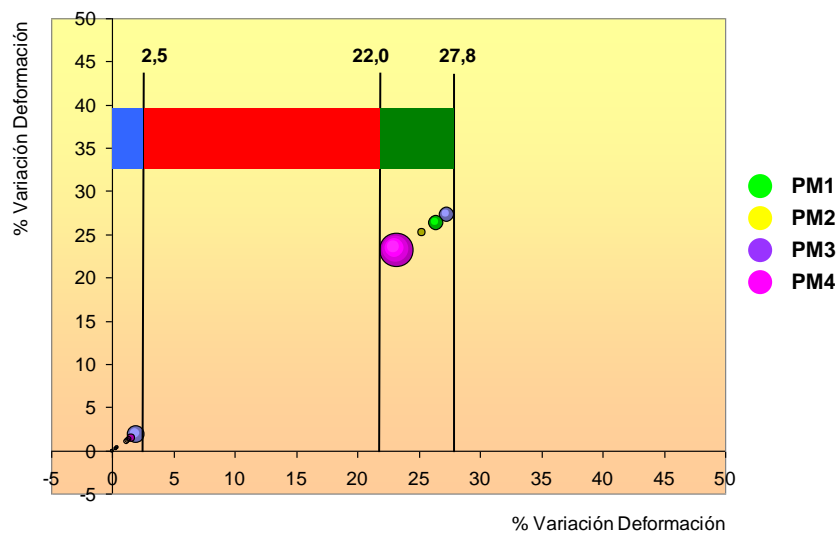


Figura IV104. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida en la derecha.

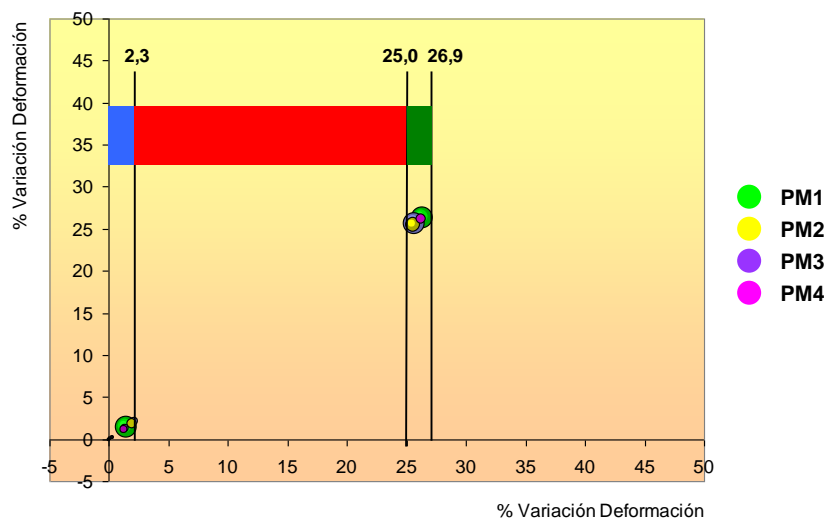


Figura IV105. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida en la izquierda.

En base al análisis de estas figuras podemos observar que tanto el comportamiento en la parte derecha como en la izquierda en este sensor piezoresistivo es muy similar y obtenemos una zona de seguridad (banda roja) muy significativa, lo cual equivale a decir que la perturbación de las bandas adyacentes ha disminuido aún más que en los casos anteriores. Es importante también resaltar que los valores porcentuales de la variación de la deformación, y por lo tanto la definición de las distintas zonas, es también muy parecido, ya que la zona de perturbación se limita a un valor cercano a 2,5%, la zona de seguridad se encuentra comprendida entre éste valor y los 22-25%, y por último, la zona de deformación alcanza hasta los 27%.

Si comparamos estos resultados con la figura IV102 podemos hacer varias consideraciones al respecto.

En primer lugar, que tanto la zona de perturbación como la de deformación se han estrechado, lo que significa que los valores entre las distintas bandas son más próximos entre sí, por lo que hemos mejorado en cuanto a la precisión de los resultados.

En segundo lugar, observamos también que el tamaño de los esferas son mucho menores, lo que equivale a decir que los valores de desviación estándar son más pequeños, es decir, los valores obtenidos son mucho más reproducibles, evidenciándose así que el sistema de medición es mucho más robusto después de las mejoras que hemos introducido.

En este sentido, en lo que respecta a la reproducibilidad de las medidas, volvemos a realizar un doble análisis:

- por una parte, el estudio de la recuperación del tejido a la posición inicial una vez dejamos de aplicar la deformación por presión. En este sentido, los valores medios porcentuales de recuperación de la señal, considerando de nuevo solo los PM donde se aplica la deformación, oscilan entre el 0 y el 1% dependiendo de la banda donde se aplique la deformación. Valores mucho más aceptables que los encontrados con el anterior sistema, que oscilaban entre 1 y 3%, y los anteriores a éstos donde se llegaba a superar el 5%.
  
- Y por otra, si observamos los valores absolutos de tensión eléctrica una vez dejamos de realizar la deformación por presión, y atendiendo solo a los valores de las deformaciones causadas en la parte izquierda, éstos se resumen en la siguiente tabla IV112.

Tabla IV112. Resultados de la tensión eléctrica en cada punto de medida después (SD-B) de producir la deformación en la banda conductora donde se realiza la presión (izquierda)

SD-B Izquierda	Tensión Eléctrica (V)										Media	Desviación estándar ( $\sigma$ )
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Prueba i-1 PM1	2,851	2,846	2,853	2,865	2,860	2,840	2,832	2,825	2,816	2,822	<b>2,841</b>	<b>0,017</b>
Prueba i-2 PM2	2,436	2,416	2,410	2,416	2,417	2,410	2,406	2,410	2,401	2,396	<b>2,412</b>	<b>0,011</b>
Prueba i-3 PM3	2,402	2,408	2,423	2,413	2,411	2,406	2,391	2,390	2,397	2,390	<b>2,403</b>	<b>0,011</b>
Prueba i-1 PM1	2,500	2,498	2,490	2,488	2,493	2,509	2,502	2,485	2,487	2,490	<b>2,494</b>	<b>0,008</b>

Si representamos gráficamente estos valores de tensión eléctrica de forma secuencial obtenemos la siguiente figura IV106.

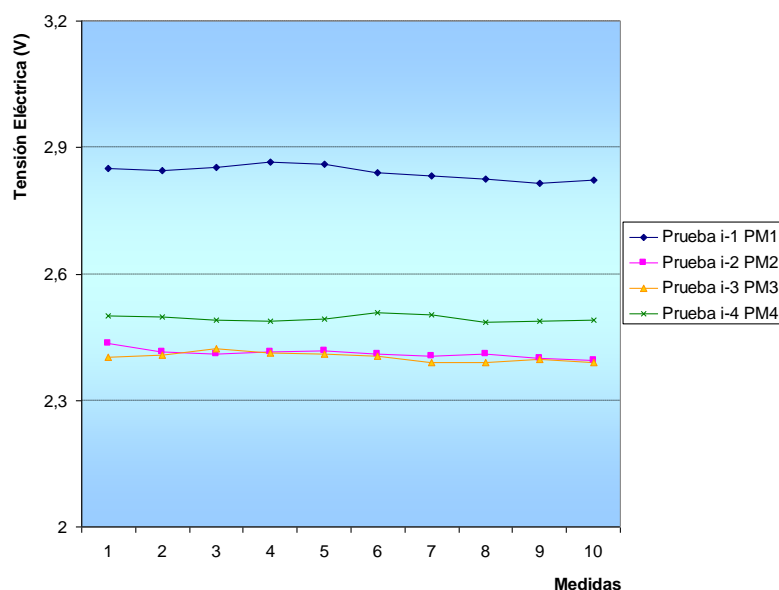


Figura IV106. Representación gráfica de los valores de tensión eléctrica en cada punto de medida después de producir la deformación por presión (SD-B (izquierda)).

En este punto, del análisis de esta gráfica, observamos que se mantienen constantes los valores tensión eléctrica conforme realizamos las sucesivas deformaciones por presión, por lo que la recuperación del tejido con la nueva espuma funciona mucho mejor que con la anterior, donde se observaba una fatiga del mismo. De esta forma, conforme vamos procediendo a realizar las distintas repeticiones de colocar y quitar la pesa, el sistema no sufre alteración y los valores son mucho más constantes.

Las conclusiones parciales de este apartado es que, en primer lugar, hemos sido capaces de diferenciar hasta ocho zonas independientes entre ellas, y hemos

conseguido evitar las interferencias en los canales adyacentes del que estábamos midiendo.

Este hecho es debido al cambio de material que hemos puesto como apoyo del tejido, en esta ocasión hemos usado una espuma más dura, que ha dotado al sistema de mayor robustez tal y como se ha apreciado en los resultados obtenidos.

#### IV.2.2.4.- CONCLUSIONES PARCIALES

Tomando como referencia los tejidos de bandas conductoras y aislantes desarrollados y optimizados en la primera línea de investigación, así como el mismo banco de muestras, se ha estudiado la variación de tensión eléctrica provocado en estas bandas conductoras de este tejido diferenciando hasta ocho zonas del tejido independiente (tomando la zona central de las 4 bandas conductoras como el eje de separación entre las bandas conductoras) e identificar la zona donde se está realizando la deformación por presión en el mismo. Tal y como ya se ha comprobado en esta primera línea, este tejido presenta una resistividad eléctrica que varía al ejercer una cierta elongación, o lo que es lo mismo una deformación elástica. La principal novedad en este apartado ha sido que esta deformación no la ha producido un estiramiento prolongado del propio tejido, sino una presión ejercida sobre cualquiera de las bandas conductoras. Los resultados alcanzados muestran que al producirse esta deformación por presión se está produciendo a su vez una deformación elástica del propio tejido, aunque en un punto específico del tejido, por lo que se debe producir también una variación de la tensión eléctrica que debemos identificar.

En primer lugar, se ha llevado a cabo un estudio de sensibilidad, para ello se ha probado provocar la deformación por presión con una pesa de 10 g sobre una de las bandas conductoras, lo que equivale a ejercer una presión de 1.25 Kilopascales. De los resultados obtenidos se concluye que aunque se produce una variación de la tensión eléctrica en esa banda, no es lo suficientemente significativa para poder desarrollar un sensor textil que sea reproducible. De esta forma, se ha incrementado la masa de la pesa a 50g, lo equivale a 2.73 kPa. Para esta presión concreta, se concluye que la medida es significativa y que el textil conductor es capaz de identificar la presencia de una presión que se está ejerciendo sobre ella.

Seguidamente, al pasar al sistema de cuatro bandas separadas por un eje central (puntos de medida), lo que equivale a ocho zonas de detección, ha sido necesario realizar un estudio de la influencia de la tensión eléctrica en las bandas adyacentes a la banda en la que se ejerce la presión en un punto, utilizando la pesa de 50g. Las conclusiones de este estudio muestran que se ven influenciadas y que la perturbación ocasionada en las bandas adyacentes a la propia banda donde se realiza la deformación presenta un valor de interferencia bastante significativo, de forma que esta influencia es demasiado elevada como para considerar este sistema capaz de detectar la presión ejercida de forma individual e independiente en una banda conductora. Básicamente, se tratan de variaciones de tensión eléctrica en las bandas contiguas excesivamente altas en comparación con las obtenidas en la propia banda donde se aplica la deformación por presión. Se trata de muy poca diferencia en los valores de variación entre la banda de deformación y el resto, entre 7 y 12 puntos porcentuales. Pero además, si a esta escasa diferencia le sumamos que los valores de

desviación de estos resultados están en torno a  $\pm 3\%$  en lo que respecta a la banda de deformación y  $\pm 2\%$  en la banda más próxima a ésta, esta diferencia todavía se reduce más, pudiendo llegar incluso a prácticamente solaparse, y en consecuencia no llegar a identificar si se trata de una banda de deformación o de perturbación. Y por otro lado, que los valores de reproducibilidad y recuperación del tejido una vez eliminada la deformación no son suficientemente apropiados como para poder decir que el sistema piezoresistivo es robusto de forma que nos permita repetir un número de veces el ensayo y obtener valores fiables y repetitivos.

En base a estos resultados, se ha optado por incrementar una vez más la presión ejercida, y para ello se ha utilizado una pesa de una masa de 100g, lo que supone realizar un presión localizada de aproximadamente 4 kPa. De esta forma, en valores absolutos se consiguen variaciones de tensión eléctrica del orden de 1 Voltio, en comparación de la pesa de 50g que estaban por debajo de los 0,5 V.

Como primera conclusión al respecto, se ha comprobado, tal y como se esperaba, que la presión que provoca la pesa de 100 gramos es mucho más significativa ya que la señal de detección es relativamente mucho mayor que el efecto de perturbación que produce en las bandas contiguas, en comparación con la de 50 gramos, para este sistema piezoresistivo. Y por otro lado, en lo que respecta a la reproducibilidad de las medidas, los valores de desviación siguen siendo muy significativos. Lo cual es un indicativo que la recuperación del tejido a la posición inicial no está siendo la deseada, por lo que ha existido una ligera tendencia de reducción del valor de tensión eléctrica conforme se va procediendo a realizar las distintas repeticiones de colocar y quitar la pesa, existiendo de esta forma un error de deriva que viene provocado por la carencia del sistema en la recuperación hasta su estado inicial. Lo que a priori era una limitación importante para el objeto de la presente tesis, ya que no nos permite desarrollar un sensor piezoresistivo que sea duradero en el tiempo, debido al deterioro progresivo de la propia señal.

Para solucionar este inconveniente, se optó por cambiar la espuma que se encuentra de soporte del tejido, buscando un mayor grado de recuperación y fatiga. Con esta nueva espuma se repitió el estudio, tanto en la parte derecha en las cuatro zonas, como en la parte izquierda en las otras cuatro zonas. Los resultados obtenidos muestran que tanto la zona de perturbación como la de deformación se han estrechado, lo que significa que los valores entre las distintas bandas son más próximos entre sí, por lo que hemos mejorado en cuanto a la precisión de los resultados. Por otro lado, se observa también que el tamaño de las esferas (reproducibilidad) es mucho menor, lo que equivale a decir que los valores de desviación estándar son más pequeños, es decir, los valores obtenidos son mucho más reproducibles, evidenciándose así que el sistema de medición es mucho más robusto después de las mejoras que se han introducido. Y por último, si observamos los valores absolutos de tensión eléctrica una vez dejamos de realizar la deformación por presión, y atendiendo solo a los valores de las deformaciones causadas en la parte izquierda, éstos se mantienen constantes, es decir el sistema es lo suficientemente robusto como para ser utilizado repetidas veces, en principio un número elevado, por lo que no existe deformación plástica del sistema por el uso repetitivo.



En definitiva, se ha desarrollado un sistema compuesto de un textil inteligente de ocho zonas que es homogéneo, simétrico, reproducible y robusto en el tiempo, que sea capaz de identificar la zona donde se está realizando una determinada presión (de aproximadamente 4 kPa) fruto del cambio de tensión eléctrica que produce la deformación elástica provoca dicha presión.



## **V.- Conclusiones y futuros trabajos.**



## **V.- Conclusiones y futuros trabajos.**

### **V.1.- Conclusiones finales.**

La investigación llevada a cabo en la presente tesis doctoral ha supuesto un salto cualitativo en el desarrollo de textiles inteligentes, y concreto, en los que hacen referencia a los sensores piezoresistivos. De forma general, se puede concluir que se ha desarrollado un sistema compuesto por un tejido de punto que puede ser utilizado como un sensor de estiramiento y un sensor de presión en base a la relación existente entre el comportamiento eléctrico y la deformación elástica y la que provoca una presión en una zona determinada respectivamente.

Se ha validado la hipótesis de partida, en donde la variación de resistencia eléctrica de un tejido conductor con cierto nivel de resistividad es capaz de seguir un comportamiento o relación directa entre el nivel de estiramiento del tejido y la variación de resistencia eléctrica, de forma que se puede diseñar, desarrollar y optimizar un sensor textil que permita medir el grado de elongación del tejido. Y por otro lado, y como consecuencia de la primera hipótesis validada, se ha comprobado también que un tejido con varias bandas conductoras separadas por bandas aislantes, y donde se le aplica a su vez una tensión eléctrica y un sistema de medida de la variación de resistencia eléctrica, se puede emplear como un sensor textil capaz de identificar en qué banda se está ejerciendo la presión hasta un nivel de sensibilidad determinada y de forma reproducible.

En base a los trabajos realizados, se puede concluir que se ha obtenido un novedoso textil inteligente, capaz de actuar como sensor sensible a la deformación por elongación y presión, mediante la utilización de hilados conductores integrados en un tejido de punto formando una banda textil conductora que actúa como sensor piezoresistivo al modificarse su resistencia eléctrica en relación al grado de deformación elástica. Por lo que, se ha conseguido y alcanzado el objetivo general planteado en un inicio.

En cuanto a la parte experimental, se ha diferenciado dos líneas de investigación atendiendo a los dos objetivos parciales planteados (objetivos 1 y 2).

En el primero de ellos, se ha conseguido desarrollar un sensor textil capaz de medir la deformación elástica de un tejido en función de su variación de resistencia eléctrica que provoca esta deformación. Para ello, en primer lugar, se ha estudiado el uso de hilados conductores basados en fibra corta a partir de una mezcla íntima con fibras metálicas, analizando su comportamiento y comparándolo con el uso de filamento continuo. En este sentido, se ha comprobado que los hilados conductores de fibra cortada (en un 10% de acero inoxidable) presentan un comportamiento que se va repitiendo al ir realizando sucesivas medidas de la variación de la resistencia eléctrica del tejido de punto por trama frente a la deformación elástica de los mismos. En este sentido, podemos decir que a medida que aumenta la elongación o deformación de los tejidos se produce una reducción exponencial de la resistencia eléctrica entre los dos extremos del tejido. Esto es debido fundamentalmente a que se produce una aproximación de los hilos conductores entre sí fruto de este estiramiento del tejido de forma que se favorece la conductividad eléctrica a través de la superficie del tejido. En

cambio en los hilos conductores de filamento continuo se mantiene constante el valor de resistencia eléctrica. De esta forma se ha conseguido el objetivo específico 1.1.

A partir de estos hilos textiles conductores seleccionados, se ha definido y optimizado la estructura del tejido de punto por trama más adecuada que permite parametrizar la relación de la variación de la resistencia eléctrica en función de la deformación elástica del tejido, de forma que se ha conseguido el objetivo específico 1.2. Para ello, se ha estudiado de forma comparativa la sensibilidad a la deformación elástica en el sentido de las columnas y las filas de estos tejidos. En este aspecto, se ha concluido que la variación de la resistencia eléctrica en función de la deformación elástica de estos tejidos presenta el mismo comportamiento ya sea si la elongación se produce en el sentido de las filas que en el de las columnas. Y esto a su vez se repite ya sea si el tejido está cortado como sin cortar. Los valores absolutos de resistencia eléctrica a la hora de realizar el estiramiento en un sentido con respecto al otro cambian en dos órdenes de magnitud en el sentido de las columnas con respecto a las filas. Por lo tanto, el empleo de uno u otro va a depender del grado de sensibilidad que vayamos a necesitar del sensor. Por lo que, también se ha alcanzado el objetivo específico 1.3.

De forma paralela, se ha estudiado el grado de homogeneidad de las medidas obtenidas, así como la simetría de la variación de la tensión eléctrica. En cuanto a la homogeneidad, se ha comprobado que el tejido conduce de forma uniforme, sin pérdidas, he incluso se ha podido cuantificar la caída de tensión de forma lineal. Este estudio ha permitido a su vez desarrollar y optimizar el sistema de medida, cada vez mucho más robusto y fiable, y así se concluye que el objetivo específico 1.4 también se ha conseguido.

A continuación, el estudio de simetría ha permitido comprobar la propia simetría del tejido, y se ha diseñado un tejido de punto con tres bandas de conducción sometido a un estiramiento en el sentido de las filas en los dos sentidos, lo cual también ha permitido evolucionar el banco de ensayos hasta la obtención de unos resultados más reproducibles y simétricos. En cuanto a la reproducibilidad de los resultados, ha sido una variable de estudio que ha permitido, por un lado, mejorar el banco de ensayo, y por otro, incorporar en el tejido hilo de elastano de forma que con el propósito de conferirle una mejor recuperación del tejido sensor. En este sentido, se ha cumplido con los objetivos específicos 1.5. y 1.6. respectivamente.

Siguiendo con el plan de trabajo establecido se ha conseguido también en esta primera línea de investigación diseñar un banco de ensayos que permita medir los valores de conductividad eléctrica en varios puntos del tejido y realizar medidas en puntos concretos de la misma. Y además, que este sistema (banco de muestras y tejido desarrollado) sea totalmente simétrico y homogéneo. Por lo que se cumple con el objetivo específico 1.7.

Siguiendo con el siguiente objetivo específico, 1.8, se ha conseguido minimizar la deformación plástica del tejido mediante la incorporación del hilo de elastano en la propia banda conductora, lo que mejora significativamente su comportamiento elástico y su recuperación hasta el valor inicial, ya que para 10 repeticiones realizadas la desviación estándar ha sido muy baja en todos los casos.

Además, la caída de tensión más significativa se produce en el primer tramo del estiramiento (por debajo de 1cm), lo cual equivale a decir que existe una zona concreta muy pequeña donde el sensor de estiramiento aumenta su sensibilidad, por lo que podremos utilizarlo en aplicaciones donde se necesite un rango de variación relativamente baja.

De forma que se establece que esta variación eléctrica es significativa y totalmente reproducible frente a la deformación elástica de forma que pueda actuar como sensor textil. En definitiva y a modo de conclusión de esta primera línea de investigación se ha obtenido un sistema inteligente formado por tejidos sensibles a la deformación por estiramiento, cumpliendo con los objetivos específicos definidos en un inicio.

Con el fin de aplicar este sensor en una aplicación y funcionalidad concreta, tal y como se había planteado en el objetivo 1.9, se ha desarrollado un body de bebé inteligente capaz de medir la respiración de un bebé integrando un sensor textil capaz de diferenciar entre la etapa de inspiración y expiración, al disponer el tejido en la zona del abdomen diferente nivel de deformación elástica. En este sentido, los resultados han sido satisfactorios, ya que se ha desarrollado y optimizado esta prenda con el sensor textil junto con el resto de componentes necesarios, y se ha validado su funcionalidad obteniéndose una representación gráfica de la frecuencia de respiración del bebé, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo.

Por otro lado, en base a los resultados obtenidos en la primera línea de investigación en la segunda de ellas, se ha desarrollado un sensor textil que actúa como un sistema piezoresistivo formado por tejidos sensibles a la deformación por presión en un punto concreto.

Para ello, se ha partido del diseño y desarrollo de un tejido de punto por trama conductor de forma que permitiera correlacionar la variación de la tensión eléctrica cuando se produce una deformación por presión con medida en dos puntos y la separación de hasta cuatro zonas virtuales, consiguiendo así los objetivos específicos planteados como 2.1 y 2.2. En una primera aproximación se ha obtenido un tejido elástico y conductor con una cierta resistencia eléctrica puede actuar como sensor piezoresistivo al depositar en un punto concreto una pequeña masa capaz de provocar una deformación elástica, y que a su vez se comprueba que ésta es la causante de una variación de la tensión eléctrica en un sentido o en otro. Los distintos modelos que se han ido empleando han permitido ir obteniendo una mayor información y conocimiento de cómo influye sobre el tejido los puntos de entrada y salida de la corriente eléctrica que circula a través del circuito eléctrico diseñado, así como de igual forma los de medida de la tensión eléctrica. Otra de las conclusiones de este punto radica en que se ha definido un modelo a medida y totalmente reproducible basado en un sistema de conectores de entrada y salida de la corriente eléctrica y con puntos de medida centrados, y no en los vértices, que es capaz de diferenciar dos zonas concretas del tejido, la superior e inferior, en la medida que aplicamos una pequeña deformación por presión en cualquier de estas dos zonas virtuales. Este modelo está basado en un sistema de medida que se ha ido optimizando en cada una de las distintas experiencias con una doble finalidad; por un lado, planteando en cada modelo dos escenarios se ha conseguido una diferenciación de los resultados obtenidos en ambos, y por otro, el ir reduciendo el error de estos resultados de forma que se iba garantizando que el sistema iba siendo cada vez más robusto y los resultados más

concluyentes. En definitiva, tomando esta diferenciación de dos zonas en un tejido de punto capaz de actuar como sensor piezoresistivo, y al superponerlos de forma perpendicular evitando el contacto entre ellos mediante la colocación de un aislante, se concluye que se ha diseñado un sistema robusto capaz de diferenciar hasta cuatro zonas virtuales del tejido con distinto comportamiento eléctrico en cada una de ellas si aplicamos una presión controlada en cualquiera de estas cuatro zonas.

A continuación, se ha estudiado la variación de tensión eléctrica provocado en estas bandas conductoras de este tejido diferenciando hasta ocho zonas del tejido independiente e identificar la zona donde se está realizando la deformación por presión en el mismo, por lo que se cumple con el objetivo específico 2.3. Todo ello, fruto de la propiedad inherente de este tejido que presenta una resistividad eléctrica que varía al ejercer una cierta elongación, o lo que es lo mismo una deformación elástica. Una deformación que viene provocada por la presión que se ejerce de forma controlada sobre cualquiera de las bandas conductoras. Los resultados alcanzados muestran que al producirse esta deformación por presión se está produciendo a su vez una deformación elástica del propio tejido, aunque en un punto específico del tejido.

Se ha llevado a cabo un estudio de sensibilidad, con el fin de optimizar el nivel de presión a ejercer sobre el sensor textil capaz de ser detectado. Este sensor textil se ha diseñado a través de un sistema de cuatro bandas conductoras separadas por bandas aislante y por un eje central (puntos de medida), lo que equivale a ocho zonas de detección. Los resultados obtenidos muestran un buen nivel de sensibilidad para una presión entorno a los 2 kPa.

De forma paralela, se ha llevado a cabo un estudio de la influencia de la tensión eléctrica en las bandas adyacentes a la banda en la que se ejerce la presión en un punto, tal y como se había planteado en el objetivo específico 2.4. Las conclusiones de este estudio muestran que se ven influenciadas y que la perturbación ocasionada en las bandas adyacentes a la propia banda donde se realiza la deformación presenta un valor de interferencia bastante significativo, de forma que se ha tenido que optimizar el nivel de sensibilidad, pasando de 2 a 4 kPa el nivel de presión a ejercer. Para este nivel de presión, ya no es significativa la perturbación de las bandas contiguas, y por lo tanto no existe interferencia de las mismas para poder identificar en qué punto se está produciendo la presión.

Por último, se ha observado también que el sistema de medida, no permite obtener niveles de recuperación (una vez dejamos de ejercer la presión) iguales a los iniciales, lo cual limita de forma significativa la reproducibilidad del sensor para usos repetitivos y prolongados en el tiempo. De esta forma, se ha optado por utilizar una espuma (que se encuentra de soporte del tejido) con mayor grado de recuperación, resiliencia y fatiga. Los resultados obtenidos muestran que se ha mejorado significativamente en cuanto a la precisión de los resultados por un lado, y en la propia recuperación, volviendo a los valores iniciales, lo cual permite concluir que también se ha conseguido alcanzar el objetivo 2.5. Siendo de esta forma el sistema lo suficientemente robusto como para ser utilizado repetidas veces, en principio un número elevado, por lo que no existe deformación plástica del sistema por el uso repetitivo.

En definitiva, se ha desarrollado un sistema compuesto de un textil inteligente de ocho zonas que es homogéneo, simétrico, reproducible y robusto en el tiempo, que sea



capaz de identificar la zona donde se está realizando una determinada presión (de aproximadamente 4 kPa) fruto del cambio de tensión eléctrica que produce la deformación elástica provoca dicha presión, y sin que llegue a valores de deformación donde interviene la deformación plástica, cumpliendo así con el objetivo específico 2.6., 2.7 y 2.8.

Por lo que para esta segunda línea de investigación, se han conseguido tanto el objetivo general del proyecto, como los diferentes objetivos parciales y específicos propuestos basados en desarrollar un sistema que permite cuantificar el nivel de presión que se está ejerciendo en una zona específica.

Se trata de un tejido capaz de diferenciar 8 zonas por deformación muy bien delimitadas y donde no existen perturbaciones en los puntos de separación de cada una de ellas (bandas conductoras de tejido de punto con hilo de fibra cortada con un 10% de acero inoxidable separadas por bandas aislantes), lo suficientemente sensible y robusto como para poder repetir un número de veces lo suficientemente representativo y repetitivo. Para ello, además ha sido necesario diseñar y validar un banco de pruebas sólido que garantiza esta reproducibilidad y rigurosidad, y que contempla las especificaciones técnicas de:

- el tipo y la forma de colocación del tejido.
- donde realizar los puntos de medida.
- en qué puntos debe alimentarse eléctricamente el sistema.
- cómo es la estructura de los puntos de sujeción del tejido.
- Y el instrumental de análisis y procesamiento de datos.

De esta forma los resultados obtenidos y conclusiones alcanzadas han permitido alcanzar los objetivos generales y específicos planteados en un inicio.

## **V.2.- Futuros trabajos.**

En cuanto a los futuros trabajos a realizar a partir de los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral se dividen en diferentes líneas de actuación.

- Por un lado, al igual que se ha hecho en la primera línea de investigación, en la cual se ha validado el sensor textil para la deformación elástica para una funcionalidad concreta y un producto/aplicación determinada (body de bebé con banda textil conductora para medir la respiración del bebé), se pretende validar el sensor de presión para un funcionalidad y aplicación específica. Para ello, se ha seleccionado realizar un colchón que lleve integrado en su tejido exterior este sistema de sensorización, ampliando el número de zonas de presión principalmente. La función de este sistema es medir el movimiento del usuario mientras duerme (denominado actigrafía), ya que éste es un parámetro que está relacionado con la calidad del sueño y la sensación de confort. [169]. Por ello, en la medida que se disponga de un sensor textil integrado en el colchón dividido en diferentes zonas de presión, podremos relacionar para una persona; cuál es su calidad de sueño mientras duerme. En el caso de desarrollar una funda de colchón, la funcionalidad podría estar orientada a determinar; cual es el mejor colchón en el que podríamos descansar buscando

la relación con nuestra calidad de sueño y ergonomía. Y por otro lado, analizando las aplicaciones más médicas, podría utilizarse en colchones de hospital o geriátricos para gente encamada que presenta exposiciones prolongadas en la cama y que en consecuencia es más propensa a que aparezcan úlceras por presión. Un sistema inteligente de estas características permitiría identificar las zonas de mayor presión y exposición prolongada para prevenir la aparición de estas úlceras.

Actualmente, este proyecto se encuentra iniciado, y se dispone ya de los primeros resultados a nivel de prototipos físicos.

- Por otro lado, otra de las acciones a estudiar a raíz de ese trabajo doctoral, una vez analizada la viabilidad técnica del sensor textil en sus dos versiones, se va a llevar a cabo el estudio de viabilidad industrial atendiendo a los parámetros que hay que tener en cuenta para la fabricación a mayor escala. En base a la experiencia de trabajos realizados en este sentido, se dispone de las suficientes garantías como para considerar el sensor como un producto viable desde el punto de vista industrial. Por un lado, porque se ha empleado tecnología de dimensiones industriales; tejeduría de punto por trama. Y por otro, porque los materiales empleados son materiales que se encuentran fácilmente en el mercado en cuanto a disponibilidad y versatilidad de proveedores, ya sea los elementos textiles como los elementos electrónicos que deben ir incorporados al sensor. Y desde el punto de vista comercial, también se va a realizar un análisis de costos de fabricación, para sacar el escandallo preliminar de fabricación de estos sensores, independientemente de la funcionalidad y aplicación que vaya orientado. Este punto se considera relevante ya que a la hora de seleccionar un producto concreto con este valor añadido que pueda proporcionar el textil inteligente, va a ser necesario conocer el escandallo de fabricación de la banda textil (ya sea por deformación elástica o por deformación por presión) que deberá sumarse al conjunto de los costes de fabricación del artículo o prenda final.
- Y por último, otro de los aspectos que se pretenden poner en marcha, es lo que hace referencia a la certificación y homologación de estos textiles inteligentes. Aunque va a depender de la aplicación final (producto), ya que no va a ser igual fabricar un colchón inteligente que un body inteligente en cuanto a normativa y certificación de producto, y a su vez, dentro de una misma categoría de producto, no va a ser lo mismo si va orientado al canal tradicional (ej. colchón para el hogar), que al mercado sanitario (ej. colchón para hospital), en donde los requerimientos legales y de certificación también son diferentes. Aun así, independientemente de la funcionalidad y producto a desarrollar, se va a estudiar la normativa y aplicación que afecta a un textil inteligente por el mero hecho de llevar componentes electrónicos, los cuales obligan a que disponga del marcado CE. A priori, algunas de las directivas y ensayos a tener en cuenta sobre este tipo de productos son:
  - Directiva de radio. Equipos radioeléctricos y equipos terminales de telecomunicación y reconocimiento mutuo de su conformidad (RTTE). Debido a la transmisión de datos
  - Directiva de baja tensión (LVD)

- Compatibilidad electromagnética (EMC)
- Materiales sin sustancias peligrosas. Restricción uso de sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrodomésticos (ROHS)

En definitiva, y a modo de cierre del presente trabajo, las líneas de actuación a poner en marcha a partir de ahora están muy encaminadas a buscarle una aplicación práctica y útil a todo el trabajo desarrollado en la presente tesis doctoral, y que además del amplio conocimiento generado en un campo todavía incipiente y con un elevado potencial, pueda ser aplicado a nivel industrial y poder llevar a cabo la transferencia de conocimiento al sector industrial o empresarial.



## **VI.- Referencias Bibliográficas.**



## VI.- Referencias Bibliográficas

- [1] S. K. Mangal, Ashwani Kumar. Geometric parameter optimization of magneto-rheological damper using design of experiment technique. Mangal and Kumar International Journal of Mechanical and Materials Engineering 10:4. DOI 10.1186/s40712-015-0031-1. (2015)
- [2] Rosa Ruiz, Alberto Carnicero, Oscar López, *Materiales I*, Anales de mecánica y electricidad, vol 80, 40-46. (2003)
- [3] Rosa Ruiz, alberto Carnicero, oscar López, *Materiales II*, Anales de mecánica y electricidad. (2004)
- [4] P. Stenton, <http://smartextiles.co.uk/overview/application/computing/>
- [5] Lina Matellanes, J.M<sup>a</sup> Cuevas, Raquel Clemente, *Plásticos universales*, 85. (2003)
- [6] Anna Boczkowska, Marcin Leonowicz, *Intelligent Materials for intelligent textiles*; fibres & Textiles, vol 14, 59. (2006)
- [7] Hamid Esmaeilzades, Maxime rivardm Ezatollah Arzi, François Légaré, Alireza Hassani. *Smart textile plasmonic fiber dew sensors*. Optics Express, Vol. 23, Issue 11, pp. 14981-14992. (2015)
- [8] M.K. Singh, Pakistan Textile Journal, available online, <http://www.ptj.com.pk/Web%202004/08-2004/Smart%20Textiles.html>.
- [9] Mitsuhiro Ebara, Yohei Kotsuchibashi, Koichiro Uto, Takao Aoyagi, Young-Jin Kim, Ravin Narain, Naokazu Idota, John M. Hoffman. *Shape-memory materials*. Smart Biomaterials. NIMS Monographs, pp. 285-373. (2014)
- [10] Andre Tabash-Matamoros, Bárbara González-Rolón. *Desarrollo de acople con memoria de forma*. Tecnología en marcha. Vol. 26, nº 3. (2013)
- [11] p. Petalis, N. Markis, G.C. Psarras, *Investigation of the phase transformation behaviour of constrained shape memory alloy wires*, J. Therm. Anal. Cal, 84, (2006).
- [12] S. Modal, J.L. Hu, *Water vapour permeability of cotton fabrics coated with shape memory polyurethane*, Carbohydrate polymers, 282-287. (2007)
- [13] <https://vimeo.com/131447146> (2016)

- [14] M.A. Chowdhury, M. Joshi, B.S. Butola. *Photochromic and thermochromic colorants in textile applications*. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, Volume 9, Issue 1. (2014)
- [15] Guo-cheng Yang, Jian Gong, *Preparation and photochromic properties of ultra-fine H3PW11MoO40/PVA fibre mats*, Journal of Physics. (2004).
- [16] Junbiao Wu, Chunyao Tao, Yi Li, Jiyang Li, Jihong Yu. *Methyl viologen-templated zinc gallophosphate zeolitic material with dual photo-/thermochromic and tuneable photovoltaic activity*. Chemical Science, Issue 5. (2015)
- [17] A. Seeboth, Chun Yin, J. Kriwanek, *Thermochromic Polyolefin Foils*, Journal of Applied Polymer Science, vol 96, 1789-1792. (2005)
- [18] J.M. Leger, A.L Holt, S. A. Carter, *Reversible Thermochromic effects in poly(phenylene vinylene)-based polymers*, Applied Physics letters, vol 88, (2006).
- [19] Hung-Jen Chen, Lan-Hui Huang, *An investigation of the design potential of thermochromic home textiles used with electric heating techniques*. Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, article ID 151573. (2014)
- [20] Yoshimitsu Sagara, Toshiki Mutai, Isao Yoshikawa, Koji Araki, *Material design for Piezochromic luminescence: Hydrogen-bond-directed assemblies of a pyrene derivative*, J. Am. Chem. Soc, vol 129, 1520-1521. (2007)
- [21] Ashton House, *Application of microencapsulation in textile*, International Journal of Pharmaceutics, vol 242, 55-62. (2002)
- [22] R.K. Sharma, P. Ganesan, V.V. Tyagi, H.S.C. Metselaar, S.C. Sandaran. *Energy conversion and management* 95, 193-228. (2015)
- [23] Kinga Pielichowska, Krzysztof Pielichowski. *Phase change materials for thermal energy storage*. Progress in Materials Science, vol. 65, pp. 67-123. (2014)
- [24] W. Bendkowska, J. Tysiak, L. Grabowski, *Int J. Clothing Science and Technology*, 17 (3-4), 209-214. (2005)
- [25] Nihal Sarier, Emel Onder, *The manufacture of microencapsulated phase change materials suitable for the design of thermally enhanced fabrics*, Thermochimica Acta, vol 452, 149-160. (2007)



- [26] <http://www.outlast.com/es/ambitos-de-aplicacion/> (2017)
- [27] Marc in het Pahuís. *Carbon nanotubes: enhancing the polymer building blocks for intelligent materials*, J. Mater. Chem. (2006)
- [28] A. González Jiménez, L. Jiménez Romasanta, G. Cabrera Alvino, P. Bernal-Ortega, J. López Valentín, R. verdejo Márquez. *Elastómeros dieléctricos para su uso como actuadores o músculos artificiales*. Revista de Plásticos Modernos, Vol. 109, nº 698. (2015)
- [29] Richard. C. Foitzik, Akif Kaynak, Frederick M. Pfeffer, *Application of soluble poly(3-alkylpyrrole) polymers on textiles*, Synthetic Metals, vol 156, 637-642. (2006)
- [30] Xianping Jiang, Dominic Tessier *Biosability of electrically conductive polyester fabrics: An in vitro study*, Wiley Periodicals. (2002)
- [31] Hua Deng, Lin Lin, Mizhi Ji, Shuangmei Zhang, Mingbo Yang, Qiang Fu. *Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials*. Progress in Polymer Science. Vol. 39, pp. 627-655. (2014)
- [32] Sumusu Hara, Tetsuji Zama, Wataru Takashima, Keiichi Kaneto, *Artificial muscles based on polypyrrole actuators with large strain and stress induced electrically*, Polymer Journal, vol 36, 151-161. (2003)
- [33] J. Parthenios, G.C. Psarras, C. Galiotis, *Adaptive composites incorporating shape memory alloy wires. Part 2: developed of internal recovery stresses as a function of activation temperature*, Elsevier. (2001)
- [34] Akif Kaynak, Rafael Beltran, *Effect of synthesis parameter on the electrical conductivity of polypyrrole-coated poly(ethylene terephthalate) fabrics*, Polymer International, vol 52, 1021-1026. (2003)
- [35] Muthukumar, N.; Thilagavathi, G.; Kannaian, T., *Analysis of piezoresistive behavior of polyaniline-coated nylon Lycra fabrics for elbow angle measurement*, Journal of the textile institute, vol 108, nº 2, 233-238. (2017)
- [36] Federico Carpi, Daniello de Rossi, *Electroactive polymer-based devices for e-textiles in biomedicine*. (2005)
- [37] Dengwei Hu, Kotaro Mori, Xingang Kong, Kazunari Shinagawa, Satoshi Wada, Qi Feng. *Fabrication of [1 0 0]-oriented bismuth sodium titanate ceramics with small grain size and high density for piezoelectric materials*. Journal of the European Ceramic Society, Vol. 34, pp. 1169-1180. (2014)

- [38] Jiagang Wu, Dingquan Xiao, Jianguo Zhu. *Potassium-Sodium niobate lead-free piezoelectric materials: past, present, and future of phase boundaries*. Chemical Reviews, Vol. 115, Issue 7, pp. 2559-2595. (2015)
- [39] Janusz Zieba, Michal Frydrysiak, *Textronics- Electrical and electronic textiles. Sensors for breathing frequency measurement*, Fibres&Textiles, vol 14. (2006)
- [40] Walid A. Daould, John H. Xin, Yau S. Szeto, *Polyethylenedioxithiophene coating for humidity, temperature and strain sensing polyamide fibers*, Sensors and actuators, vol 109, 329-333. (2005)
- [41] Soyoun Jung, Taeksoo Ji, Vijay K.Varadan, *Point-of-care temperature and respiration monitoring sensors for smart fabric applications*. Smart Materials and Structures. (2006)
- [42] S. Walczak, M. Sibinski. *Flexible, textronic temperature sensors, based on carbon nanostructures*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. Vol. 62m Issue 4. (2014)
- [43] Ewa Skrzetuska, Michal Puchalski, Izabella Krucinska. *Chemically driven printed textile sensors based on graphene and carbon nanotubes*. Sensors. Vol. 19, Issue 9, pp. 16816-16828. (2014)
- [44] CN20161183775 20160329 Lai Dandan; Wang Faming, *Wearable intelligent garment for monitoring human physiological sign parameters in real time*. (2016)
- [45] Minyoung Suh. *E-Textiles For Wearability: Review Of Integration Technologies*. Textile World. (<http://www.textileworld.com>). (2010)
- [46] National Instruments, (<http://www.ni.com>) (2012)
- [47] Krzysztof Gniotek, Izabela Krucińska. *The Basic Problems of Textronics*. Fibres & Textiles in Eastern Europe. Vol. 12, No. 1 (45). (2004)
- [48] Burcak Karaguzel, *Printing Conductive Inks on Nonwovens: Challenges and Opportunities*. (2006)
- [49] Jacek Lesnikowski, Magdalena Tokarska. *Modeling of selected electric properties of textile signal lines using neural networks*. Textile Research Journal 84(3):290-302. (2014)

- [50] Liangbing Hu , Fabio La Mantia , Hui Wu , Xing Xie , James McDonough , Mauro Pasta, and Yi Cui. *Lithium-Ion Textile Batteries with Large Areal Mass Loading*. *Advanced Energy Materials*. (2011)
- [51] R. Bhattacharya, M. M. de Kok, and J. Zhou, *Rechargeable electronic textile battery*. *Organic Electronics and Photonics*, Volume 2. Issue 12. (2009)
- [52] D. Fourie. *Shoe-Mounted PVDF Piezoelectric Transducer for Energy Harvesting*. Project supported by the National Science Foundation under the REU 0552885 and 0515930 programs. (2005)
- [53] Xiong Pu, Linxuan Li, Huanqiao Song, Chunhua Du, Zhengfu Zhao, Chunyan Jiang, Guozhong Cao, Weiguo Hu, Zhong Lin Wang. *A self-charging power unit by integration of a textile triboelectric nanogenerator and a flexible lithium-ion battery for wearable electronics*. *Advanced Materials*, Vol. 27, Issue 15, pp. 2472-2478. (2015)
- [54] Muhammad-Sadeeq Balogun, Minghao Yu, Yongcghao Huang, Cheng Li, Pingping Fang, Yi Liu, Xihong Lu, Yexiang Tong. *Binder-free Fe<sub>2</sub>N nanoparticles on carbon textile with high power density as novel anode for high-performance flexible lithium ion batteries*. *Nano Energy*. Vol. 11, pp. 348-355. (2015)
- [55] Diana Marculescu, Radu Marculescu, Nicholas H. Zamora, Phillip Stanley-Marbell Pradeep K. Khosla, Sungmee Park, Sundaresan Jayaraman, Stefan Jung, Christl Lauterbach, Werner Weber, Tünde Kirstein, Didier Cottet, Janusz Grzyb, Gerhard Tröster, Mark Jones, Tom Martin, Zahi Nakad, *Electronic Textiles: A Platform for Pervasive Computing*. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, n° 12, 1995-2018. (2007)
- [56] Martijn ten Bhömer, Oscar Tomico, Kristi Kuusk, Maaïke Kleinsmann, Stephan Wensveen. *Designing Smart Textile Services through value networks, team mental models and shared ownership*. (2012)
- [57] Minyoung Suh. *E-Textiles for Wearability: Review on Electrical and Mechanical Properties*. *Textile World*. (<http://www.textileworld.com>) (2007)
- [58] [http://www.verhaert.com/cms/images/stories/pdf\\_in\\_text/verhaert\\_mamagoose.pdf](http://www.verhaert.com/cms/images/stories/pdf_in_text/verhaert_mamagoose.pdf)
- [59] <http://vivonoetics.com/products/sensors/lifeshirt>
- [60] <http://www.uow.edu.au>
- [61] Proyecto SEAT, <http://aitex.es/es/noticias/165-actualidad-aitex/649-aitex-amplia-su-campo-de-investigacion-en-automocion>

- [62] Cambra, V., Gisbert, J., Escudero, F., Luengo, S., *Carpet with presence detector*. WO 2007/125133 A1, (2007)
- [63] K. M. Sungmee Park and S. Jayaraman. *The wearable motherboard: a framework for personalized mobile information processing (PMIP)*. In Design Automation Conference, (2002)
- [64] Proyecto Infnitex, <http://www.iturri.com/es/que-hacemos/innovacion/infnitex>
- [65] [www.burton.com](http://www.burton.com)
- [66] Proyecto Sport@future, [http://www.grupomoron.com/comunicacion/detalle\\_noticias.php?not=22](http://www.grupomoron.com/comunicacion/detalle_noticias.php?not=22)
- [67] <http://alfred.eu/> (2017)
- [68] Kenji Uchino, *Handbook of advanced ceramics*. Capítulo 4. Pag.107-118. (2003)
- [69] J. Curie, P. Curie, *Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 91, 294–5. (1880).
- [70] A. Arnau, *Piezoelectric transducers and applications*. Springer-Verlag. Berlin- Heidelberg. (2008)
- [71] Y. Saito, H. Takao, T. Tani, T. Nonoyama, K. Takatori, T. Homma, T. Nagaya, M. Nakamura, *Lead-free piezoceramics*, Nature 432, 81-87. (2004)
- [72] Jiagang Wu, Xiaopeng Wang, Xiaojing Cheng, Ting Zeng, Binyu Zhang, Dingquan Xiao, Jianguo Zhu, Xiaojie Lou. *New potassium-sodium lead-free piezoceramic: Giant-d vs. sintering temperature*. Journal of Applied Physics. Vol. 115, Issue 11. (2014)
- [73] J. Wang, J. B. Neaton, H. Zheng, V. Nagarajan, S. B. Ogale, B. Liu, D. Viehland, V. Vaithyanathan, D. G. Schlom, U. V. Waghmare, N. A. Spaldin, K. M. Rabe, M. Wuttig, R. Ramesh, *Epitaxial BiFeO3 Multiferroic Thin Film Heterostructures*, Science 299. 1719– 1722. (2003)
- [74] Vinogradov, M. Schwartz, *Piezoelectricity in Polymers*, Encyclopedia of Smart Materials, Volumes 1- 2, John Wiley & Sons. 780-792. (2002)

- [75] Sivapalan Baskaran, Xiangtong He, John Y. Fu., *Gradient scaling phenomenon of piezoelectricity in non-piezoelectric polyvinylidene fluoride films*. (2011)
- [76] A.V. Shirinov, W.K. Schomburg, *Pressure sensor from a PVDF film*,. *Sensors and Actuators A: Physical* Volume 142, Issue 1, 10 March, Pages 48–55. (2008)
- [77] Yong Wang, Kailiang Ren, Q. M. Zhanga, *Direct piezoelectric response of piezopolymer polyvinylidene fluoride under high mechanical strain and stress*, , *Applied Physics Letters* 91, 222905. (2007)
- [78] Luo, H. and Hanagud, S, *PVDF Film Sensor and Its Applications in Damage Detection*. *J. Aerosp. Eng.*, 12(1), 23–30. (1999)
- [79] David V. Taylor and Dragan Damjanovic, *Piezoelectric properties of rhombohedral Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> thin films with (100), (111), and “random” crystallographic orientation*. *Applied Physics Letters*. Volume: 76 Issue:12. (2000)
- [80] Yongho Ahn, Seunghwan Song, Kwang-Seok Yun. *Woven flexible textile structure for wearable power-generating tactile sensor array*. *Smart Materials and Structures*. Vol. 24, Issue 7. (2015)
- [81] Kim H.K.<sup>1</sup>, Kim M.S.<sup>1</sup>, Chun S.Y., Park Y.H., Jeon B.S.; Lee J.Y., Hong Y.K., Joo J., Kim S.H. *Characteristics of electrically conducting polymer-coated textiles*, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, Volume 405, Number 1, Volume 405/2003 , pp. 161-169(9). (2003)
- [82] Maria Akerfedit, Erik Nilsson, Philip Gillgard, Pernilla Walkernstrom. *Textile piezoelectric sensors –melt spun bi- component poly (vinylidene fluoride) fibres with conductive cores and ply (3,4-ethylene dioxythiophene) –poly (styrene sulfonate) coating as the outer electrode*. *Fashion and Textiles*, 1:13. (2014)
- [83] S. Bradya, K.T. Laua, W. Megillb, G.G. Wallacec, D. Diamonda, *The Development and Characterisation of Conducting Polymeric-based Sensing Devices*. *Synthetic Metals*. Volume 154, Issues 1–3, 22 September, Pages 25–28. (2005)
- [84] Meyer, Jan (CH), Troester, Gerhard (CH), Kirstein, Tuende (CH), *Textile pressure sensor*. European Patent Application EP1605240. (2005)
- [85] Meyer, J. (Dept. of Inf. Technol. & Electr. Eng., Swiss Fed. Inst. of Technol. Zurich, Switzerland) Arnrich, B.; Schumm, J.; Troster, G. *Design*

*and Modeling of a Textile Pressure Sensor for Sitting Posture Classification*, *Sensors Journal*, IEEE, Vol: 10, n° 8, 1391-98. (2010)

- [86] Sergio, M.; Manaresi, N.; Tartagni, M.; Guerrieri, R. ; Canegallo, R., *A textile based capacitive pressure sensor*, *Sensors; Proceedings of IEEE*. (2002)
- [87] Jian Feng Gu, *Soft capacitor fibers using conductive polymers for electronic textiles* *Smart Materials and Structures*, Volume 19 Number 11. (2010)
- [88] Jaehong Lee, Hyukho Kwon, Jungmok Seo, Sera shin, Ja Hoon Koo, Changhyun Pang, Seungbae Son, Jae Hyung Kim, Yong Hoon Jang, Dae Eun Kim, Taeyoon Lee. *Conductive fiber-based ultrasensitive textile pressure sensor for wearable electronics*. *Advanced Materials*. Vol. 27, Issue 15, pp. 2433-2439 (2015)
- [89] Holleccek, T. (Wearable Comput. Lab., ETH Zurich, Switzerland) Rüegg , A.; Harms, H. ; Tröster, G., *Textile pressure sensors for sports applications*, *Sensors*, IEEE (2010)
- [90] Merritt, C.R. (Dept. of Electr. & Comput. Eng., North Carolina State Univ.), Raleigh, NC; Nagle, H.T.; Grant, E , *Textile-Based Capacitive Sensors for Respiration Monitoring*. *Sensors Journal*, IEEE Volume: 9, Issue: 1 Page(s): 71- 78. (2009)
- [91] Cheng J., Amft O., Lukowicz, P., *Active Capacitive Sensing: Exploring a New Wearable Sensing Modality for Activity Recognition*, 2010. *Pervasive, LNCS 6030*, pp. 319–336. (2010)
- [92] Manaresi N., Tartagni M., Monnier J., Guerrieri R., *Textile-like capacitive pressure sensor and method of mapping the pressure exerted at points of a surface of a flexible and pliable object, particularly of a sail*., Patente: US2002121146. (2012)
- [93] Ridao M., Garcia D., Escudero J., Castells T., *Torsion and/or Tension and/or Pressure Textile Sensor*. Patente: 2040053. (2004)
- [94] Lilienfeld-Toal, H., Asfour J., *Pressure Sensor*, Pub. No.: WO/2007/059971. (2007)
- [95] Marmaropoulos G., Vu Giang T., *A Pressure Activated Interface*. Pub. No: 1020060026910. (2006)

- [96] Deflin, E., Weill, A., Bonfiglio, J., Athimon-Pillard, B., *Flexible Textile Structure for Producing Electric Switches*. Pub. No Wo/2003/050832 (2003)
- [97] Swallow S., Peta-Thomson A., *Conductive pressure sensitive textile*. US 7365031. (2001)
- [98] Sandbach D., Walkington, S., *Linear Pressure Sensor*. Pub. No.: Wo/2005/073685. (2005)
- [99] Long-Fei Li, *Design and Analysis of Parallel Woven Structure-Based Flexible Resistive Pressure Sensor*. Bioinformatics and Biomedical Engineering ICBBE 2009. 3<sup>rd</sup> International Conference on. (2009)
- [100] Cédric C., Vladan K., Maryline L., Claude D. Design and Development of a Flexible Strain Sensor for Textile Structures Based on a Conductive Polymer Composite. *Sensors* 2007, 7, 473-492. (2007)
- [101] Laxminarayana K., Jalil N. *Functional Nanotube-based Textiles: Pathway to Next Generation Fabrics with Enhanced Sensing Capabilities*. *Textile Research Journal* September vol. 75 no. 9 670-680. (2005)
- [102] Liao, QL., Mohr, M., Zhang, XH., Zhang, Z., Zhang, Y. *Carbon fiber-ZnO nanowire hybrid structures for flexible and adaptable strain sensors*. *Nanoscale*, Vol. 5, Issue 4, pp. 12350-12355. (2013)
- [103] Chieh Ch., Van H. Tran, Junbo W., Yiin-Kuen Fuh, Liwei L. *Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency*. *Nanoletters*, [pubs.acs.org/NanoLett]. (2010)
- [104] Kiesel S., Peters K., Hassan T., Kowalsky M., *Behaviour of intrinsic polymer optical fibre sensor for large-strain applications*. *Measurement Science and Technology*. 18 (2007) 3144–3154. (2007)
- [105] Rothmaier M., Phi Luong, Minh, Clemens, F., *Textile Pressure Sensor Made of Flexible Plastic Optical Fibers*. *Sensors*, 8, 4318-4329. (2008)
- [106] Lund, A (Lund, Anja); Jonasson, C (Jonasson, Christian); Johansson, C (Johansson, Christer); Haagensen, D (Haagensen, Daniel); Hagstrom, B (Hagstrom, Bengt) *Piezoelectric polymeric bicomponent fibers produced by melt spinning*: *Journal of Applied Polymer Science* Volume: 126 Issue: 2 Pages: 490-500. (2012)
- [107] L. J. Nelson. *Smart piezoelectric fibre composites*. *Materials Science and Technology* November 2002 Vol. 18. (2002)

- [108] C R Bowen; R Stevens; L J Nelson; A C Dent; G Dolman; B Su; T W Button; M G Cain; M Stewart; *Manufacture and characterization of high activity piezoelectric fibres*. Smart Materials and Structures. Volume 15 Number 2. (2006)
- [109] Bohn N., Gabbert U., *Optimization of piezoelectric fiber distribution in composite smart materials-* PAMM, - Volume 4, Issue 1, pages 302–303, December. (2004)
- [110] L M Swallow; J K Luo; E Siores; I Patel; D Dodds; *A piezoelectric fibre composite based energy harvesting device for potential wearable applications*., Smart Materials and Structures. Volume 17. Number 2. (2008)
- [111] Y. Sapsathiarn; T. Senjuntichai; R. K. N. D. Rajapakse. *Electromechanical load transfer from a fiber in a 1–3 piezocomposite with an imperfect*. Composites Part B-engineering - Compos Part B-Eng, vol. 39, no. 7, pp. 1114-1124. (2008)
- [112] M. Martinez; A. Artemev. *Finite element analysis of broken fiber effects on the performance of active fiber composites*. Composite Structures. Compos Struct, vol. 88, no. 3, pp. 491-496. (2009)
- [113] Ji Sun Yun, Chun Kil Park, Jeong Ho Cho, Jong-Hoo Paik, Young Hun Jeong, Joong-Hee Nam, Kyung-Ran Hwang. *The effect of PVP contents on the fiber morphology and piezoelectric characteristics of PZT prepared by electrospinning*. Materials Letters, Vol. 137, pp. 178-181. 2014
- [114] Cannard, F., Vuillerme, N., Payan, Y., Diot, Br., *Device intended for measuring pressure from a flexible, foldable, and/or extendable object made of a textile material and comprising a measurement device*. Patent. No.: WO/2012/101374. (2012)
- [115] Ching-Tang H., Chien-Lung S., Chien-Fa T., Shuo-Hung C, *A wearable yarn-based piezoresistive sensor*. Sensors and Actuators A: Physical. Volume 141, Issue 2, 15 February, Pages 396–403. (2008)
- [116] Mattmann C., Amft O., Harms H., Tröster G., *Recognizing Upper Body Postures using Textile Strain Sensors*. ETH Zurich, Wearable Computing Lab. (2007)
- [117] Glaser R., Lauterbach Ch., Savio D., Schnell M., Karadal C., Weber W., Kornely S. Stöhr1 A., *Smart Carpet: A Textile-based Large-area Sensor Network*, (2004)
- [118] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com) ; Definición de la Conductividad Eléctrica.



- [119] Teoría Electromagnética, Séptima Edición, William H. Hayt - John A. Buck, Mc Graw Hill
- [120] Lou, Ching-Wen; Lin, Lin, Ting An.; Chen, An-Pang, Lin, Jia-Horng. *Stainless steel/polyester woven fabrics and copper/polyester woven fabrics: Manufacturing techniques and electromagnetic shielding effectiveness*, Journal of Industrial Textiles, Volumen: 46 nº 1, 214-236. (2016)
- [121] Mac, T., Houis, S., Gries, T. *Metal Fibers*. 1st Issue, Technical Textiles, Volume 47, March. (2004)
- [122] *Clevertex. Development of a strategic Master Plan for the transformation of the traditional textile and clothing into a knowledge driven industrial sector*. Report. [http://cordis.europa.eu/result/rcn/51052\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/51052_en.html) (2014)
- [123] D. E. Khanin, K. N. Koshkin and K. Kh. Urusov, *Technology for obtaining fibers by the method of extraction from stationary melted drop*,. Inorganic Materials: Applied Research. (2011)
- [124] Takahashi, T., Ishihara M., Okuzaki H., Wangyu L., Zhixin Z., Donglan M. *Production of long metalfibers using a combined method of microsaw turning and pulling*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 142, Issue 2, (2003)
- [125] Owston, C.N., *Electrical properties of single carbon fibres*. J. Phys. D: Appl. Phys. 3 1615. (1970)
- [126] Toray Industries, Inc.. <http://www.toraycfa.com/> (2012)
- [127] SGL Group. <http://www.sglgroup.com/> (2012)
- [128] Valentova, H (Valentova, H.); Stejskal, J (Stejskal, J.). *Mechanical properties of polyaniline*. Synthetic Metals Volume: 160 Issue: 7-8 Pages: 832-834. (2010)
- [129] Takano, T., Masunaga H., Fujiwara A., Okuzaki H., Sasaki T., *PEDOT Nanocrystal in Highly Conductive PEDOT:PSS Polymer Films*,. Macromolecules Volume: 45 Issue: 9 Pages: 3859-3865 (2012)
- [130] Takahashi T., Ishihara M., Okuzaki H., *Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate) microfibers*,. Synthetic Metals, Volume: 152 Issue: 1-3 (2005)

- [131] Okuzaki, H., Harashima Y., Yan H., *Highly conductive PEDOT/PSS microfibers fabricated by wet-spinning and dip-treatment in ethylene glycolcrofibers*. European Polymer Journal 45: 256-261. (2009)
- [132] Tian T., Deng JJ., Xie, ZY., Zhao, YJ., Feng, ZQ., Kang, XJ., Gu ZZ., *1,3Polypyrrole hollow fiber for solid phase extraction*. Analyst Volume: 137 Issue: 8 Pages: 1846-1852. (2012)
- [133] Scheibner W., Feuste, M., Moehring U., Hofmann J., Linz T., *Textile electrical connecting cables*. Narrow Fabric and Braiding Industry, Volume 40, Number 3, pp. 76-78, B167. (2003)
- [134] Prasit Pisesweerayos, Somsak Dangtip, Pitt Supaphol, Toemsak Srihirin. *Electrically conductive ultrafine fibers of PVA-PEDOT/PSS and PVA-AgNPs by Means of Electrospinning*. Advanced Materials Research. Vol. 1033-1034. (2014).
- [135] [www.swiss-shield.ch](http://www.swiss-shield.ch).
- [136] Gimpel S., Moehring U., Muller H., Neudeck A., Scheibner W., *The galvanic and electrochemical modification of textiles*,. Band- und Flechtindustrie, Volume 40, Number 4, pp. 115-121, B168. (2003)
- [137] Swicofil AG Textile Services, <http://www.swicofil.com/metallicyarn.html>
- [138] Aracon Fibres by Dupont, <http://araconfiber.com/>
- [139] Shieldex Statex, [http://www.shieldextrading.net/yarn\\_and\\_filler.html](http://www.shieldextrading.net/yarn_and_filler.html)
- [140] Syscom Technology Inc., <http://www.metalcladfibers.com/amberstrand-fiber/>
- [141] X-Static, <http://www.x-staticperformance.com/>
- [142] Thunderon, <http://www.gordonbrush.com/>
- [143] Hanil Synthetic fiber Co., Ltd, [http://www.hanilsf.co.kr/eng/textile/textile\\_03e.asp](http://www.hanilsf.co.kr/eng/textile/textile_03e.asp).
- [144] Stat, <http://www.r-stat.fr/>
- [145] Shakespeare Conductive Fibers LLC. <http://www.resistat.com> .
- [146] P. Sittisart, M. M. Hyland, M. A. Hodgson, C. Nguyen, A. Fernyhough. *Preparation and characterization of electroless nickel-coated cellulose*

*fibres*. Wood Science and Technology, Vol. 48, Issue 4, pp. 841-853. (2014)

- [147] Bao YH., Nicholson PS., *Conductive, polypyrrole coating on mulhite/alumina fibers for electrophoretic deposition of oxide matrices*. Journal of the American Ceramic Society, Vol.87, No.9, 1767-1770, (2004)
- [148] Kaynak A., Wang L., Hurren C., Wang, X., *Characterization of conductive polypyrrole coated wool yarns*. Fibers and polymers, vol. 3, no. 1, pp. 24-30. (2002)
- [149] Boschi A., Arosio C., Cucchi I., Bertini F., Catellani M., Freddi, G., *Properties and performance of polypyrrole (PPy)-coated silk fibers*. Fibers and Polymers. Volume 9, Number 6, 698-707. (2008)
- [150] Bashir T., Skrifvars M., Persson N., *Synthesis of high performance, conductive PEDOTcoated polyester yarns by OCVD technique*. Polymers for Advanced Technologies. Volume 23, Issue 3, pages 611–617. (2012)
- [151] Takahiro Yamashita, Seiichi Takamatsu, Koji Miyake, Toshihiro Itoh. *Fabrication and evaluation of a conductive polymer coated elastomer contact structure for woven electronic textile*. Sensor and Actuators A: Physical. Vol. 195, pp. 213-218. (2013)
- [152] Pascual J. *Textos Asignatura Nanotecnología y Fibras Técnicas*. Master Universitario en Innovación Tecnológica y Textiles Técnicos de AITEX-CEU. (2012)
- [154] Handbook of Fiber Finish Technology, Philip E. Slade, ISBN 0-8247-0048-1, página 277. (1997)
- [155] DuDont.. <http://www.dpp-europe.com>. (2017).
- [156] Sterling Fibers. <http://www.sterlingfibers.com> (2017)
- [157] Celebioglu, A., Vempati, S., Ozgit-Akgun, C. Biyikli, N., Uyar, T. *Water-soluble non-polymeric electrospun cyclodextrin nanofiber template for the synthesis of metal oxide tubes by atomic layer deposition*. RSC Advances Vol. 4, Issue 106, pp. 61698-61705. (2014)
- [158] Ding YJ.; Invernale MA.; Sotzing, GA., *Conductivity Trends of PEDOT-PSS Impregnated Fabric and the Effect of Conductivity on Electrochromic Textile*, Acs Applied Materials & Interfaces 2 (6): 1588-1593. (2010)

- [159] Junpu Wang, Pu Xue, Xiaoming Tao, Tongxi Yu. *Strain sensing behavior and its mechanisms of electrically conductive PPY-coated fabric*. Advanced engineering Materials. Vol. 16, Issue 5, pp. 565-570. (2014)
- [160] Verstraeten S., Pavlinec J., Speleers P., *Electrically conductive yarn comprising metal fibers*. US Patents No. 6.957.525, para N.V. Bekaert S.A. (2005)
- [161] Dhawan A., Ghosh T., Seyam A., *Fiber-Based Electrical and Optical Devices and Systems*. *Textile Progress*. 36, 1 - 84. (2005)
- [162] Cottet D., Grzyb J., Kirstein T., Troster G., *Electrical characterization of textile transmission lines*. *Advanced Packaging*, 26, Issue: 2 Page(s): 182-190. (2003)
- [163] Watson D.L., *Electrically Yarn*. U.S. Patent N° 5.927.060 para N.V. Bekaert S.A. (1999)
- [164] Wei Zhang, Yee Yuan Tan, Chengwei Wu, S.Ravi P. Silva. *Self-assembly of single walled carbon nanotubes onto cotton to make conductive yarn*. *Particuology*. Vol. 10, Issue 4. Pp 517-521. (2012)
- [165] AITEX, Curso de Tisaje, del Aula Virtual, [www.aulatextil.com](http://www.aulatextil.com) (2017)
- [166] ZSK Stickmaschinen GmbH.. <http://zsk.de/documentation.html> (2017)
- [167] Post R. et al., *E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing*. *IBM Systems Journal*, Vol 39, Nos 3&4. (2000)
- [168] <http://www.simple-remedies.com/childrens-health/abdominal-breathing-in-infants.html>
- [169] I. García de Gurtubay. *Estudios diagnósticos en patología del sueño*. Servicio de Neurofisiología Clínica. Hospital Virgen del Camino. Pamplona. Anales del Sistema Sanitario de Navarra. Versión impresa ISSN 1137-6627. Anales Sis San Navarra vol.30 supl.1 Pamplona. (2007)

## **VII.- Apéndices.**



## VII.- Apéndices

### VII.1.- Listado de Figuras.

*Figura I1. Estructura inteligente [1]*

*Figura I2. Representación de las componentes de un sistema inteligente*

*Figura I3 Representación esquemática del efecto memoria de forma. [11]*

*Figura I4. Representación esquemática del efecto memoria de forma*

*Figura I5. Esquema de un cambio fase [21]*

*Figura I6. Recubrimiento de microcápsulas de PCM (a) y microcápsulas de PCM embebidas en las fibras (b) [26]*

*Figura I7. Estructura química del acetileno [29]*

*Figura I8. Estructura química de los polímeros conductores más comunes [29]*

*Figura I9 Conductividad de los polímeros explicada mediante la teoría de bandas [30]*

*Figura I10. Forma no conductora del polipirrol [30]*

*Figura I11. Representación del efecto piezoeléctrico [2]*

*Figura I12. a) Ubicación de los sensores en el guante; b) guante con los sensores integrados. [42]*

*Figura I13. Elementos que integran un sistema textrónico*

*Figura I14. Conectores textiles: cable textil USB y hebillas [45]*

*Figura I15. Representación de un muestreo de señal*

*Figura I16. A).Cuantificación y codificación. Muestreo digital (señal discreta): tiempo discreto, valores continuos. B) Señal cuantificada: tiempo continuo, valores discretos. C) Señal digital (muestreo, cuantificado): tiempo discreto, valores discretos*

*Figura I17: Modelo general de tipos de redes inalámbricas atendiendo a su alcance de cobertura*

*Figura I18: "Mamagoose", pijama que puede transmitir una señal de alarma si el bebé deja de respirar. [58]*

*Figura I19: LifeShirt, para medición de constantes vitales [59]*

*Figura I20: sujetador que se adapta a la biomecánica del usuario [60]*

*Figura I21: Wearable Motherboard Smart Shirt. Prenda inteligente [63]*

*Figura I22: Textil para la nieve con distintas funcionalidades inteligentes integradas [65]*

*Figura I23: Molécula neutra [70]*

*Figura I24: Molécula piezoeléctrica: dipolos pequeños [70]*

*Figura I25: Material piezoeléctrico: comportamiento [70]*

*Figura I26: Estructura cúbica de los materiales cerámicos; a) y b). [71]*

*Figura I27: Propiedades de los materiales conductores más comunes [119]*

*Figura I28: Comparativa conductividad de polímeros frente cobre [128]*

*Figura I29: Monofilamento metálico recubierto de fibras/filamentos no conductores [134]*

*Figura I30: hilado conductor (filamento conductor exterior)*

*Figura I31: hilado conductor (filamento conductor interior)*

*Figura I32: mezcla íntima conductora*

*Figura I33: Tejeduría de calada de hilos conductores (azul). Tafetán*

*Figura I34: Tejeduría de calada de hilos conductores (azul). Sarga.*

*Figura I35: Representación de la tejeduría de punto por trama*

*Figura I36: Representación de la tejeduría de punto por urdimbre*

*Figura I37. Bordado de textiles conductores (e-broidery)*

*Figura III1. Etapas de la hilatura convencional.*

*Figura III2: Esquema descriptivo de una carda de chapones*

*Figura III3. Representación esquemática del silo de alimentación*

*Figura III4. Representación de un cilindro abridor*

*Figura III5. Representación del gran tambor del cardado*

*Figura III6. Representación del mecanismo formador de velo*

*Figura III7. Fotografía de un embudo condensador*

*Figura III8. Representación de una fileta*

*Figura III9. Representación del tren de estiraje*

*Figura III10. Representación de la calandra y el bote de recolección*

*Figura III11. Fotografía de una fileta de alimentación de la mechera*

*Figura III12. Representación del tren estirador de la mechera*

*Figura III13. Representación de la bobina de la mecha*

*Figura III14. Tren de estirado e la continua de anillo*

*Figura III15. Representación del huso en la continua de anillos*

*Figura III16. Representación de la continua de anillos*

*Figura III17. Representación de la estructura de un tejido de punto*

*Figura III18. Representación de la malla cargada*

*Figura III19. Fotografía de una circular de gran diámetro*

*Figura III20. Sistema de sujeción del tejido para la medida de la variación de la resistencia*

*Figura III21. Vaso de precipitados utilizado para el montaje del banco de ensayos*

*Figura III22. Circuito con resistencia*



- Figura III23. Montaje del banco de ensayo de propiedades de sensibilidad de hilados*
- Figura III24. Diagrama de fuerzas responsables del alargamiento de los tejidos en el banco de ensayos.*
- Figura III25. Diagrama del sistema empleado para el estudio y optimización de textiles inteligentes como sensores de estiramiento.*
- Figura III26. Láminas utilizadas en el banco de ensayos para el estudio de la sensibilidad a la deformación de tejidos de punto.*
- Figura III27. Fotografía de las láminas utilizadas en el banco de ensayos para el estudio de la sensibilidad a la deformación de tejidos de punto.*
- Figura III28. Fotografía del banco de ensayos para el estudio de la sensibilidad a la presión de tejidos de punto.*
- Figura III29. Fotografía del banco de ensayos para el diseño de una banda textil inteligente.*
- Figura III30. Fotografía del banco de ensayos de diagonales cruzadas para el estudio de la sensibilidad a la presión de tejidos de punto.*
- Figura IV1. Grado de elongación de un tejido de punto en dirección filas y columnas después de aplicar una misma fuerza de estiramiento sobre ambos. Este primer tejido se referencia como tejido con una elongación producida en sentido filas, y el segundo en sentido columnas.*
- Figura IV2. Representación del corte que se le realiza al tejido y que nos va a permitir diferenciar entre el comportamiento cortado y sin cortar.*
- Figura IV3. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para cada uno de los tejidos y para la primera fase (sentido filas).*
- Figura IV4. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para los tejidos 1 y 2 y para la segunda fase (sentido de las filas).*
- Figura IV5. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y para la primera fase. Representación de la media y desviación estándar de cada tejido.*
- Figura IV6. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 y para la primera fase. Representación de las tres medidas de cada tejido.*
- Figura IV7. Representación gráfica de la resistencia eléctrica relativa en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2 comparando la primera y segunda fase.*

- Figura IV8. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función de la fuerza de deformación elástica que se aplica a cada uno de los tejidos 1 y 2 y para la fase 4 (en sentido de las columnas).)*
- Figura IV9. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función de la fuerza de deformación elástica que se aplica a cada uno de los tejidos 1 y 2 y para la fase 5 (en sentido de las columnas).*
- Figura IV10. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2, para la fase 4. Representación de la media y desviación estándar de cada tejido (sentido de las columnas).*
- Figura IV11. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2, para la fase 4. Representación de las tres medidas de cada tejido (sentido de las columnas).*
- Figura IV12. Representación gráfica de la resistencia eléctrica relativa en función del grado de elongación para el estudio de reproducibilidad de los tejidos 1 y 2 comparando las fases 4 y 5.*
- Figura IV13. Diagrama de un circuito eléctrico representativo en paralelo.*
- Figura IV14. Diagrama del banco de ensayo con el tejido en paralelo con dos zonas virtuales de estudio (PPM y IPM).*
- Figura IV15. Diagrama de un circuito eléctrico con resistencias en paralelo.*
- Figura IV16. Diagrama del sistema empleado para el estudio y optimización de textiles inteligentes como sensores de estiramiento.*
- Figura IV17. Conductividad eléctrica en el tiempo del tejido representado en la figura IV1 obtenida directamente del osciloscopio para el punto de medida A y B.*
- Figura IV18. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 3 con una pieza de cobre.*
- Figura IV19. Diagrama del sistema empleado para el estudio eliminando la  $R'_3$ .*
- Figura IV20. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 3 con una pieza de cobre.*
- Figura IV21. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 1 con una pieza de cobre.*
- Figura IV22. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 1 con una pieza de cobre.*
- Figura IV23. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 3 con tres piezas de cobre entre la toma de tierra y el punto de medida.*
- Figura IV24. Diagrama del sistema empleado para el estudio eliminando la  $R''_3$ .*

- Figura IV25. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 3 con tres piezas de cobre entre la toma de tierra y el punto de medida.*
- Figura IV26. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 1 con una pieza de cobre entre la toma de tierra y el punto de medida.*
- Figura IV27. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A y B, y después de cortocircuitar la banda conductora 1 con tres piezas de cobre en sentido horizontal entre la toma de tierra y el punto de medida.*
- Figura IV28. Diagrama del sistema empleado para el estudio cortocircuitando la banda conductora 2 con varias piezas de cobre y con tres puntos de medida (A, B y C).*
- Figura IV29. Diagrama del sistema empleado para el estudio eliminando la  $R''_3$ .*
- Figura IV30. Conductividad eléctrica en el tiempo para el punto de medida A, B y C, y después de cortocircuitar la banda conductora 2 entre la toma de tierra y el punto de medida.*
- Figura IV31. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente al estiramiento para un tejido compuesto por tres bandas conductoras.*
- Figura IV32. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente a un estiramiento hacia la izquierda de 3 cm de la zona A.*
- Figura IV33. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida previo a la realización del estiramiento.*
- Figura IV34. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la izquierda de 3 cm.*
- Figura IV35. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la izquierda y mantenerlo estirado.*
- Figura IV36. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de mantener un estiramiento hacia la izquierda y volver a la posición inicial.*
- Figura IV37. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la simetría de la respuesta eléctrica frente a un estiramiento hacia la derecha de 3 cm de la zona A.*
- Figura IV38. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida previo a la realización del estiramiento.*
- Figura IV39. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la derecha de 3 cm.*
- Figura IV40. Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de realizar un estiramiento hacia la derecha y mantenerlo estirado.*

- Figura IV41 Conductividad eléctrica en el tiempo obtenido en el punto de medida después de mantener un estiramiento hacia la derecha y volver a la posición inicial.*
- Figura IV42. Diagrama del nuevo sistema empleado para el estudio de la reproducibilidad de la respuesta eléctrica frente a un estiramiento cuantificado.*
- Figura IV43. Variación de la tensión eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de estiramiento y recuperación para el estudio de la reproducibilidad.*
- Figura IV44. Fotografías de los dos tejidos con banda conductora textil referenciados como tejido 10% (izquierda) y tejido 30% (derecha).*
- Figura IV45. Variación de la resistencia eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de la fuerza estiramiento y recuperación para dos bandas textiles con distinto porcentaje de hilo conductor.*
- Figura IV46. Fotografías de los tres tejidos con banda conductora textil referenciados como tejido 3x0,5cm (izquierda), tejido 7x0,5cm (en el centro) y tejido 11x0,5cm (derecha).*
- Figura IV47. Variación de la resistencia eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de la fuerza estiramiento y recuperación para dos bandas textiles con hilo conductor 10% y distinta longitud de banda (3, 7 y 11 cm).*
- Figura IV48. Fotografías de los dos tejidos con banda conductora textil referenciados como tejido 7x0,5cm (izquierda) y tejido 7x1cm (derecha).*
- Figura IV49. Variación de la resistencia eléctrica en función de una deformación elástica y su posterior recuperación en función de la distancia de la fuerza estiramiento y recuperación para dos bandas textiles con hilo conductor 10%, misma longitud de banda (7 cm), y diferente ancho de la banda textil (0,5 y 1 cm).*
- Figura IV50. Fotografías del body de bebe con la banda textil conductora en la zona abdominal*
- Figura IV51. Fotografías de la conexión del hilo conductor bordado con uno de los extremos del sensor textil*
- Figura IV52. Fotografías de las conexiones de los elementos electrónicos y fuente de alimentación.*
- Figura IV53. Fotografías de la solapa (izquierda) y del prototipo final de body inteligente para la medida de la respiración del bebé.*
- Figura IV54. Variación de la resistencia eléctrica en función del tiempo (15 segundos) de un body de bebé inteligente para la medida de la respiración.*

- Figura IV55. Fotografía de este primer sistema empleado para el estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.*
- Figura IV56. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto indicando el punto de medida (tester) y los puntos de aplicación de potencial eléctrico.*
- Figura IV57. Representación gráfica de la variación de tensión eléctrica esperada al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.*
- Figura IV58. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer escenario.*
- Figura IV59. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el segundo escenario.*
- Figura IV60. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer y segundo escenario, y su comparación con el comportamiento hipotético.*
- Figura IV61. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos.*
- Figura IV62. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer escenario.*
- Figura IV63. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el segundo escenario.*
- Figura IV64. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario, y su comparación con el comportamiento hipotético.*
- Figura IV65. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos.*
- Figura IV66. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos para el primer escenario.*
- Figura IV67. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos para el segundo escenario.*
- Figura IV68. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario.*
- Figura IV69. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales.*

- Figura IV70. Representación gráfica de la variación de tensión eléctrica esperada al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales*
- Figura IV71. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos centrados para el primer escenario.*
- Figura IV72. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos centrales para el segundo escenario.*
- Figura IV73. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales medianas con medida en dos puntos centradas para el primer y segundo escenario.*
- Figura IV74. Modelo representativo para el estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante.*
- Figura IV75. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el primer escenario.*
- Figura IV76. Resultados representados gráficamente del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el segundo escenario.*
- Figura IV77. Representación gráfica del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el primer y segundo escenario.*
- Figura IV78. Diagrama de un sistema complejo de un tejido de distintas zonas conductoras aplicando una corriente continua de 5V entre ambos extremos y con dos puntos de medida.*
- Figura IV79. Diagrama representativo del banco de ensayo con el tejido con cuatro resistencias en paralelo.*
- Figura IV80. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema.*
- Figura IV81. Diagrama de un sistema complejo con dos puntos de medida después de poner una pesa de 10 gramos en el lado derecho de la primera banda conductora.*
- Figura IV82. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al colocar una pesa de 10 g en un lado de la primera banda conductora.*
- Figura IV83. Diagrama de un sistema complejo con dos puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la primera banda conductora.*
- Figura IV84. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al colocar una pesa de 50 g en un lado de la primera banda conductora.*

- Figura IV85. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al retirar la pesa de 50 g colocada en la primera banda conductora.*
- Figura IV86. Diagrama de un sistema complejo con dos puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado izquierdo de la primera banda conductora.*
- Figura IV87. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al colocar una pesa de 50 g en el lado izquierdo de la primera banda conductora.*
- Figura IV88. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en los dos puntos del sistema al retirar la pesa de 50 g en el lado izquierdo de la primera banda conductora.*
- Figura IV89. Representación visual del nuevo sistema de medida visto desde una perspectiva lateral.*
- Figura IV90. Diagrama de un sistema complejo de un tejido de cuatro bandas conductoras aplicando una corriente continua de 5V entre ambos extremos y con un punto de medida en cada banda.*
- Figura IV91. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo previo a producir una deformación por presión.*
- Figura IV92. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la primera banda conductora.*
- Figura IV93. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo una producida la deformación por presión en la banda conductora 1.*
- Figura IV94. Resultados de la tensión eléctrica con respecto al tiempo en el momento de la recuperación al eliminar la deformación por presión en la banda conductora 1.*
- Figura IV95. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la segunda banda conductora.*
- Figura IV96. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la tercera banda conductora.*
- Figura IV97. Representación gráfica de casos simétricos (2 y 3) de los porcentajes de variación con respecto a los puntos de medida.*
- Figura IV98. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 50 gramos en el lado derecho de la cuarta banda conductora.*
- Figura IV99. Representación gráfica de casos simétricos (1 y 4) de los porcentajes de variación con respecto a los puntos de medida.*

*Figura IV100. Diagrama de un sistema complejo con cuatro puntos de medida después de poner una pesa de 100 gramos en el lado izquierdo de las cuatro banda conductoras de forma secuencial.*

*Figura IV101. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida y los cuatro primeros casos si la deformación por presión aplicada es de 2.773 Pa.*

*Figura IV102. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida y el quinto caso si la deformación por presión aplicada es de 4.075 Pa.*

*Figura IV103. Representación gráfica de los valores de tensión eléctrica en cada punto de medida después de producir la deformación por presión (SD-B (izquierda)).*

*Figura IV104. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida en la derecha.*

*Figura IV105. Representación gráfica de la variación porcentual de la tensión eléctrica para los cuatro puntos de medida en la izquierda.*

*Figura IV106. Representación gráfica de los valores de tensión eléctrica en cada punto de medida después de producir la deformación por presión (SD-B (izquierda)).*

## **VII.2.- Listado de Tablas.**

*Tabla I1. Cambios de color asociados polímeros conductores*

*Tabla II1. Relación de los objetivos específicos con las líneas de investigación, fases y tareas planteadas*

*Tabla III1. Tejidos conductores empleados*

*Tabla IV1. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 1 y para cada una de las fases propuestas.*

*Tabla IV2. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 2 y para cada una de las fases propuestas*

*Tabla IV3. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 3 y para la primera fase*

*Tabla IV4. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 4 y para la primera fase*

*Tabla IV5. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 5 para la primera fase*

*Tabla IV6. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 6 para la primera fase*

*Tabla IV7. Intervalos porcentuales de desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (3, 4, 5 y 6).*



- Tabla IV8. Intervalos porcentuales de desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (1 y 2).*
- Tabla IV9. Cálculo de la resistencia eléctrica relativa para cada uno de los diferentes grados de estiramiento al que es sometido el tejido 1 y 2, y para cada fase*
- Tabla IV10. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 1 y para cada una de las fases propuestas.*
- Tabla IV11. Resultados de la batería de ensayos de resistencia eléctrica en función del grado de elongación para el tejido 2 y para cada una de las fases propuestas.*
- Tabla IV12. Intervalos porcentuales de desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (1 y 2).*
- Tabla IV13. Desviación típica de las medidas realizadas para cada tejido (1 y 2) comparando entre el sentido filas y columnas para un valor inicial de fuerza elástica de 0.23 N*
- Tabla IV14. Cálculo de la resistencia eléctrica relativa para cada uno de los diferentes grados de estiramiento al que es sometido el tejido 1 y 2, y para cada fase (sentido columnas).*
- Tabla IV15. Valores de tensión eléctrica para el estudio de la reproducibilidad.*
- Tabla IV16. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10%.*
- Tabla IV17. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 30%.*
- Tabla IV18. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10% hilo conductor y 3 cm de longitud de la banda conductora.*
- Tabla IV19. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10% y 11 cm de longitud de la banda.*
- Tabla IV20. Valores de resistencia eléctrica para el diseño de un sensor para el tejido 10% y 7 cm de longitud y 1 cm de ancho de la banda textil.*
- Tabla IV21. Variación de tensión eléctrica esperada al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto.*
- Tabla IV22. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer escenario*
- Tabla IV23. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el segundo escenario.*
- Tabla IV24. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en un punto para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.*

- Tabla IV25. Variación de tensión eléctrica que se espera obtener al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos*
- Tabla IV26. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer escenario.*
- Tabla IV27. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el segundo escenario.*
- Tabla IV28. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de diagonales cruzadas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.*
- Tabla IV29. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos para el primer escenario.*
- Tabla IV30. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos para el segundo escenario*
- Tabla IV31. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación*
- Tabla IV32. Variación de tensión eléctrica que se espera obtener al producir la deformación en cada zona y para cada escenario para un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales.*
- Tabla IV33. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales para el primer escenario*
- Tabla IV34. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrales para el segundo escenario*
- Tabla IV35. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de medianas con medida en dos puntos centrados para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.*
- Tabla IV36. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el primer escenario*
- Tabla IV37. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de doble mallado con aislante para el segundo escenario.*
- Tabla IV38. Resultados del estudio del comportamiento de un sistema de de doble mallado con aislante para el primer y segundo escenario. Variación de tensión eléctrica entre el valor obtenido al provocar la deformación con respecto a la medida sin deformación.*
- Tabla IV39. Resultados del estudio del comportamiento de una deformación por presión producida por un peso de 10 g en la parte derecha de la primera banda conductora con dos puntos de medida*

- Tabla IV40. Resultados del estudio del comportamiento de una deformación por presión producida por un peso de 50 g en la parte derecha de la primera banda conductora con dos puntos de medida.*
- Tabla IV41. Resultados del estudio del comportamiento de una deformación por presión producida por un peso de 50 g en la parte izquierda de la primera banda conductora con dos puntos de medida.*
- Tabla IV42. Resultados de la tensión eléctrica en los puntos de medida previo a la deformación por presión*
- Tabla IV43. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV44. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV45. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV46. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SDA), durante (DP) y después (SDB) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV47. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2*
- Tabla IV48. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2*
- Tabla IV49. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2*
- Tabla IV50. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2*
- Tabla IV51. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3*
- Tabla IV52. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3*
- Tabla IV53. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3*

- Tabla IV54. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3*
- Tabla IV55. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4*
- Tabla IV56. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4*
- Tabla IV57. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4*
- Tabla IV58. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4*
- Tabla IV59. Resumen de los valores medios porcentuales de la variación de tensión eléctrica al producir la deformación por presión de 2.773 Pa en la parte derecha de los puntos de medida*
- Tabla IV60. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV61. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV62. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV63. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1*
- Tabla IV64. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2*
- Tabla IV65. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2*
- Tabla IV66. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2.*

- Tabla IV67. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2*
- Tabla IV68. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3*
- Tabla IV69. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3.*
- Tabla IV70. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3*
- Tabla IV71. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3*
- Tabla IV72. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4*
- Tabla IV73. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4*
- Tabla VI74. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4*
- Tabla IV75. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4.*
- Tabla IV76. Resumen de los valores medios porcentuales de la variación de tensión eléctrica al producir la deformación por presión de 4.075 Pa en la parte izquierda de los puntos de medida.*
- Tabla IV77. Resultados de la tensión eléctrica en cada punto de medida después (SD-B) de producir la deformación en la banda conductora donde se realiza la presión*
- Tabla IV78. Resultados de la tensión eléctrica previa a (SD-A) y durante (DP) la deformación por presión en la banda conductora 1 para dos presiones distintas*
- Tabla IV79. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora (derecha).*

- Tabla IV80. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (derecha).*
- Tabla IV81. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (derecha).*
- Tabla IV82. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (derecha).*
- Tabla IV83. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).*
- Tabla IV84. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).*
- Tabla IV85. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).*
- Tabla IV86. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (derecha).*
- Tabla IV87. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).*
- Tabla IV88. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).*
- Tabla IV89. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).*
- Tabla IV90. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (derecha).*
- Tabla IV91. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).*
- Tabla IV92. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).*

- Tabla IV93. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).*
- Tabla IV94. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (derecha).*
- Tabla IV95. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora (izquierda).*
- Tabla IV96. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (izquierda).*
- Tabla IV97. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (izquierda).*
- Tabla IV98. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 1 (izquierda).*
- Tabla IV99. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).*
- Tabla IV100. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).*
- Tabla IV101. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).*
- Tabla IV102. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 2 (izquierda).*
- Tabla IV103. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).*
- Tabla IV104. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).*
- Tabla IV105. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).*

- Tabla IV106. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 3 (izquierda).*
- Tabla IV107. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 1 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).*
- Tabla IV108. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 2 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).*
- Tabla IV109. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 3 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).*
- Tabla IV110. Resultados de la tensión eléctrica en el punto de medida 4 previo (SD-A), durante (DP) y después (SD-B) de producir la deformación por presión en la banda conductora 4 (izquierda).*
- Tabla IV111. Resumen de los valores medios porcentuales de la variación de tensión eléctrica al producir la deformación por presión en la parte izquierda y derecha de los puntos de medida*
- Tabla IV112. Resultados de la tensión eléctrica en cada punto de medida después (SD-B) de producir la deformación en la banda conductora donde se realiza la presión (izquierda)*



