

# ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SENSOR RESISTIVO TEXTIL EN 3D PARA MEDIR LA RESPIRACIÓN



Máster en Ingeniería de tecnología Industrial

María Cappuyns Jordán

Director del TFM: Ignacio Gil Gali

Convocatòria ordinària 2021/2022



## Índice

<b>1.</b>	<b>Introducción</b> .....	7
1.1	Objetivo .....	7
1.2	Alcance .....	7
1.3	Especificaciones básicas .....	8
1.4	Background.....	8
<b>2.</b>	<b>Sensores resistivos existentes en tejidos</b> .....	10
2.1	Antecedentes y estado del arte .....	10
2.1.1	Sensores Capacitivos .....	11
2.1.2	Sensores Resistivos .....	13
2.1.3	Sensores Wearables .....	19
2.2	Sensores wearables en el mundo en 2022 .....	20
<b>3.</b>	<b>Aplicaciones Wearables</b> .....	23
3.1	Riesgos.....	25
3.2	Ventajas .....	25
3.3	Inconvenientes .....	26
<b>4.</b>	<b>Materiales y configuración de fabricación</b> .....	28
4.1	Bordado con hilos conductores .....	29
4.2	Bordado de contactos.....	32
<b>5.</b>	<b>Desarrollo del diseño y la fabricación del dispositivo</b> .....	33
5.1	Componentes .....	33
5.2	Microcontrolador Arduino .....	34
5.3	Alimentación Arduino .....	35
5.4	Cálculos y código .....	35
5.5	Almacenamiento y muestra de datos .....	39
<b>6.</b>	<b>Fabricación del sensor</b> .....	41
<b>7.</b>	<b>Medición de las prestaciones del sensor en el tejido</b> .....	47
7.1	Estudio previo.....	47
7.2	Mediciones Sensor.....	50
<b>8.</b>	<b>Presupuesto</b> .....	57
8.1	Costes Directos .....	57
8.2	Costes Indirectos .....	57
<b>9.</b>	<b>Implicaciones medioambientales</b> .....	58
<b>10.</b>	<b>Planificación</b> .....	59
<b>11.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	62

<b>12. Recomendaciones</b> .....	63
<b>13. Bibliografía</b> .....	64
<b>14. Normativa</b> .....	67

## Índice de Figuras

Figura 1. Funcionamiento sensor .....	10
Figura 2. Sensor capacitivo [18] .....	11
Figura 3. Sensor de humedad de suelo capacitivo.....	12
Figura 4. Comparativa pantalla táctil resistiva vs capacitiva.....	12
Figura 5. Sensor resistivo de presión .....	13
Figura 6. Sensor piezoresistivo.....	13
Figura 7. Medidor de tensión resistivo .....	14
Figura 8. Detector de temperatura resistivo.....	14
Figura 9. Sensor basado en textiles para monitorear la respiración [11] .....	15
Figura 10. Prototipo de una camiseta textrónica para medir la frecuencia respiratoria. [2] .....	16
Figura 11. Sensor digital en forma de cinturón abrochado entre el pecho y la cintura. [3] .....	16
Figura 12. a) Representación esquemática del sensor de deformación en forma de U con las dimensiones relativas. b) Sensores de tensión serigrafados integrados en la tira textil.....	17
Figura 13. Arquitectura de las capas que forman el sensor y el circuito del sensor táctil.[28] ..	18
Figura 14. Trenzado del hilo conductor. [29] .....	18
Figura 15. Sensor Wearable integrado en la ropa.....	19
Figura 16. Tejido inteligente Jacquard [34].....	21
Figura 17. Touchless [34].....	22
Figura 18. Traje de baño inteligente. [34] .....	22
Figura 19. . Ejemplos comerciales de sensores wearables [34] .....	24
Figura 20. Textil conductor.....	28
Figura 21. Bordado con hilo conductor.....	29
Figura 22. Máquina de coser.....	30
Figura 23. Snap Buttons .....	32
Figura 24. Sensor laboratorio de la UPC .....	32
Figura 25. Cable macho-macho.....	33
Figura 26. Placa de prototipado .....	33
Figura 27. Resistencia de 10kΩ calculada con el código de colores .....	34
Figura 28. Arduino Nano 33 IoT .....	34
Figura 29. Divisor de tensión.....	36
Figura 30. Configuración de la placa y el puerto en Arduino .....	37
Figura 31. Multímetro digital laboratorio UPC.....	37
Figura 32. Montaje para medir una resistencia a partir de otra conocida .....	38
Figura 33. Código para calcular el valor de una resistencia a partir de otra conocida .....	38
Figura 34. Cálculo de la resistencia desconocida .....	39
Figura 35. Programa PLX-DAQ.....	39
Figura 36. Programa PLX-DAQ en funcionamiento .....	40
Figura 37. Shieldex Conductive Yarn [30].....	41
Figura 38. Ejemplo cinta elástica.....	42
Figura 39. Máquina de coser SINGER.....	42

Figura 40. Tipo de bordados máquina de coser.....	42
Figura 41. Pruebas con la máquina de coser.....	42
Figura 42. Sensor 1 tejido con máquina.....	43
Figura 43. Sensor 2 tejido con máquina.....	43
Figura 44. Diseño sensor de temperatura [32] .....	43
Figura 45. Sensor 3 cosido a mano. Idea diseño [32].....	44
Figura 46. Pruebas sensor 2 .....	44
Figura 47. Tercer sensor con snap buttons .....	45
Figura 48. Cálculo de la resistencia con el Multímetro .....	45
Figura 49. Sensor preparado para colocarlo sobre un individuo .....	46
Figura 50. Diseño sensor definitivo .....	46
Figura 51. Sensor textil de un estudio previo [31] .....	48
Figura 52. Montaje para realizar las mediciones .....	48
Figura 53. Gráfico $\Delta L - \Delta R$ del sensor de prueba.....	49
Figura 54. Gráfica $\Delta L - \Delta R$ del sensor de prueba elaborada en el artículo [32].....	49
Figura 55. Medición sensor en reposo .....	51
Figura 56. Gráfico teórico $\Delta L - \Delta R$ .....	52
Figura 57. Resistencia pinzas cocodrilo.....	52
Figura 58. Gráfico Resistencia sensor en función de su longitud.....	53
Figura 59. Gráfico $\% \Delta R$ del sensor durante 4s .....	53
Figura 60. Sensor colocado en un individuo .....	54
Figura 61. Gráfico respiración 3-4-3.....	55
Figura 62. Gráfico respiración 1-1 .....	56
Figura 63. Diagrama de Gantt .....	60
Figura 64. Dependencia tareas.....	61

## Índice de Tablas

Tabla 1. Diferentes patrones de respiración y sus causas. [36] .....	9
Tabla 2. Resumen datos técnicos Shieldex .....	41
Tabla 3. Valores teóricos sensor .....	51
Tabla 4. Costes directos .....	57
Tabla 5. Planificación tareas.....	59
Tabla 6. Prestaciones sensor .....	62

## Resumen

Este trabajo consiste en el estudio, diseño, fabricación y medición de un sensor resistivo tridimensional en tejido plegable. Es un proyecto de investigación sobre el desarrollo de este tipo novedoso de sensores y sus aplicaciones centrándose en la medición de la respiración.

Se incluyen estudios sobre los sensores y la tecnología Wearable a nivel general. Para después explicar la parte principal del proyecto que es el desarrollo, diseño y optimización del sensor para posteriormente hacer las mediciones y comprobaciones para estudiar su comportamiento y posibles usos.

## Abstract

This work consists in the study, design, manufacture and measurement of a three-dimensional resistive sensor in folding fabric. It is a research project based on the development of this new type of sensor and its applications, focusing on the measurement of respiration.

Studies on sensors and Wearable technology are included at a general level in order to explain the main part of the project, which is the development, design and optimization of the sensor to later carry out measurements and checks to study its behavior and possible uses.

## Declaración de honor:

I declare that,

the work in this Master's degree Thesis is completely my own work, no part of this Master's degree Thesis is taken from other people's work without giving them credit, all references have been clearly cited.

I understand that an infringement of this declaration leaves me subject to the foreseen disciplinary actions by *The Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH*.

María Cappuyns Jordán

Student Name

Signature

22/06/2022

Date

Title of the Thesis:

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN SENSOR RESISTIVO TEXTIL EN 3D PARA MEDIR LA RESPIRACIÓN

## 1. Introducció

### 1.1 Objectiu

El principal objectiu de este treball es estudiar, dissenyar, fabricar i fer les mesures de un sensor resistiu tridimensional que vagi integrat en el textil i ademés se pugui doblegar. El sensor mesurarà la respiració en temps real a través de la variació de la resistència que experimente. Se farà un estudi sobre els sensors wearables i se programarà una placa amb Arduino per poder fer les mesures amb el sensor.

### 1.2 Alcance

En este apartat se inclouen les tasques que se realitzaran i les que, depenen del temps disponible i de com se vagi desenvolupant el projecte, se farán o no.

- Estudi de els sensors wearables actuals 2D/3D: se investigarà tot lo relacionat amb este tipus de sensors en la actualitat.
- Antecedents de els sensors wearables: se estudiarán los precedents de estos sensores, en especial de tipus resistiu i capacitiu.
- Aplicacions wearables: se explicarán los diferentes usos de los sensores wearables en la actualitat.
- Materials i configuració de fabricació de un sensor resistiu 3D en teixit: se estudiarán los diferentes materials i configuracions per fabricar el sensor i se escollirà la més adequada.
- Optimització del sensor 3D resistiu: després de la tasca anterior se procedirà a la optimització per que compleixi tots los requisits.
- Fabricació del sensor
- Mesura de les prestacions del sensor en el teixit.
- Programació amb Arduino: es una de las tareas principales i se prioritzarà frente a la fabricació del sensor. Consiste en estudiar com funciona Arduino i aplicar esos conocimientos en programar la placa.
- Mesures i simulacions: se realitzaran pruebas en el laboratorio para comprobar el funcionamiento del sensor i la placa, también se estudiarán las gráficas obtenidas con los valores de la resistencia.
- Programar la placa per que vagi per Bluetooth (opcional, si se dispone de temps)



- Análisis de los costes.
- Implicaciones ambientales.

### 1.3 Especificaciones básicas

A continuación se muestra una lista de requisitos y restricciones que el resultado final ha de tener en cuenta de manera obligatoria.

También algunas especificaciones que marcan el desarrollo del proyecto.

- Sensor resistivo
- Sensor tridimensional
- El sensor ha de ir plenamente integrado en textil
- El sensor debe ser bordado
- El tejido ha de ser elástico
- El sensor se debe poder doblar
- El sensor ha de medir la respiración
- Se ha de programar con Arduino

### 1.4 Background

En los últimos años, el sector textil ha empezado a apostar por la innovación y los nuevos productos con funcionalidades novedosas. Los sensores convencionales a menudo causan problemas como la irritación de la piel o problemas con los cables. Por ello, cada vez más, se están produciendo muchos tejidos inteligentes que pueden detectar y reaccionar a cambios o estímulos ambientales, mecánicos, térmicos, etc.

En varios sectores se está desarrollando rápidamente este tipo de tejidos como son el sector militar por ejemplo en condiciones de temperatura extrema o camuflaje, el sector deportivo y el sector salud entre otros. [7]

Dentro de los tejidos inteligentes están los sensores integrados en textiles, estos detectan estímulos, los analizan y proporcionan una respuesta. Pueden monitorear varias funciones vitales como la respiración, la temperatura o el ritmo cardíaco.

Recientemente, se ha demostrado que los sensores de deformación resistiva son adecuados para realizar dispositivos portátiles, discretos, fiables y de bajo coste para medir la respiración. En este proyecto nos centraremos en los sensores textiles que miden la respiración.

En el sector salud, vemos que la frecuencia respiratoria es un signo vital importante, es un parámetro fundamental para el seguimiento de los pacientes que salen de una operación y para patologías relacionadas con los trastornos del sueño. Las técnicas habituales para medir la frecuencia respiratoria a día de hoy son incómodas para el paciente y no son adecuadas si se quiere monitorizar la respiración de manera continua. Por ello, los sensores inteligentes que permiten la monitorización en tiempo real de parámetros clínicos, son prometedores para la prevención y el tratamiento de las enfermedades respiratorias.

Como vemos en la Tabla 1, existen varios patrones de respiración dependiendo de distintas situaciones o enfermedades.

<b>Breathing Patterns</b>	<b>Description</b>	<b>Causes</b>
Eupnea	Quiet breathing or resting respiratory rate	Normal breathing
Apnea	Absence of breathing	Diabetes, Heart failure, cardiomyopathy
Hypopnea	Shallow breathing or an abnormally low respiratory rate	Anxiety, Asthma, Pneumonia, Shock, Pulmonary Edema
Hyperpnea	Increased rate and depth of breathing	Emotional stress, Diabetic ketoacidosis

Tabla 1. Diferentes patrones de respiración y sus causas. [36]

Durante los últimos 10 años, se han propuesto diferentes enfoques para el monitoreo de la respiración. Por ejemplo, el uso de la ropa médica portátil para monitorear la actividad respiratoria para la atención médica. Se ha iniciado un amplio esfuerzo de investigación para el desarrollo de dispositivos médicos portátiles, como el proyecto VTAMN en Francia, el proyecto WEALTHY en Europa y life shirt en Estados Unidos. [3]

Este estudio se enfocará en diseñar un sensor resistivo textil que mida la respiración mediante el registro de los movimientos de la pared torácica durante los ciclos de respiración.

Hay diferentes técnicas para implantar este tipo de sensores y hacer las mediciones como son:

- Las variaciones de capacidad eléctrica entre dos hilos conductores integrados en una prenda elástica se emplean para obtener el patrón respiratorio [5].
- Tecnología de radar, que registran la temperatura mediante termistores junto a la boca/nariz [6].
- La técnica de oscilación forzada

En este estudio se usará un sensor hecho con hilo conductor.

## 2. Sensores resistivos existentes en tejidos

En este apartado se explicarán los sensores wearables tanto en 2D como en 3D, centrándonos en los de tipo resistivo y capacitivo. Sus antecedentes y su situación actual a nivel mundial.

### 2.1 Antecedentes y estado del arte

Un sensor es un dispositivo que transforma una magnitud física en una magnitud eléctrica (Fig.1). El sensor debe poseer una interfaz con el tejido de forma que no interfiera en éste, debe de minimizar la energía extraída y ser lo menos invasivo posible. [10]

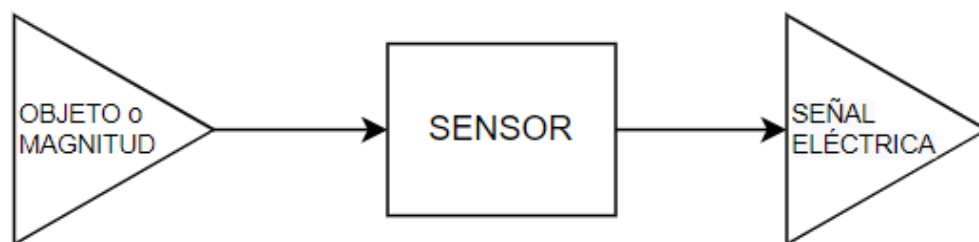


Figura 1. Funcionamiento sensor

El primer sensor inteligente nació como una solución al problema de compensación de temperatura en los elementos estaban realimentados y conectados a un inversor para crear un oscilador. La frecuencia de salida era proporcional a la constante de tiempo RC, y por tanto, a la presión. Tiempo después Toyota Research presentó otro sensor de presión similar. [13]

El primer sensor de temperatura reglado de la historia se atribuye a Daniel Gabriel Fahrenheit. La siguiente generación la introdujo Honeywell en los años 80. La presentó en dos aplicaciones: una para el control de procesos (ST3000), y otra para aplicaciones aeroespaciales. La mayoría de los libros de historia mencionan 1873 como el año en que Maxwell formuló la teoría de las ondas electromagnéticas; 1887 como el año en que Hertz descubrió las ondas de radio; y 1894 el año en que Tesla demostró en público que las transmisiones de radio eran viables. [14]

En la década actual se ha multiplicado el desarrollo de sensores integrados aplicables en el ámbito industrial, desarrollados por investigadores y académicos, aunque su precio, al ser elevado, ha hecho que se centren en arquitectura simple y mejorar los procesos de integración. [13]

Los sensores se pueden clasificar en distintos tipos según las características[15]

- Según aporte de energía
  - Moduladores: precisan una fuente externa de alimentación.
  - Generadores: toman únicamente la energía del medio donde miden.
- Según la señal de salida
  - Analógicos: la salida varía de forma continua. Normalmente la información está en la amplitud. Cuando la información está en la frecuencia se denominan “cuasi-digitales”.
  - Digitales: la salida varía en pasos discretos.
- Según el modo de funcionamiento
  - Deflexión: la magnitud medida genera un efecto físico (deflexión).
  - Comparación: se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto opuesto al generado por la magnitud medida.
- Según la relación entrada-salida: orden cero, 1er orden, 2º orden
- Según el principio físico: resistivo, capacitivo, inductivo, termoelectrico, piezoeléctrico, ...
- Según la magnitud medida: temperatura, presión, aceleración, pH ...

### 2.1.1 Sensores Capacitivos

Los sensores capacitivos son un tipo de sensor eléctrico (KAS) que reaccionan ante metales y no metales que al aproximarse a la superficie activa sobrepasan una determinada capacidad. La distancia de conexión respecto a un determinado material es tanto directamente proporcional a su constante dieléctrica.

Este tipo de sensor está diseñado para la medición sin contacto de desplazamiento, distancia y posición, así como para medición de espesores. Vemos un ejemplo en la Figura 2.



Figura 2. Sensor capacitivo [18]

Debido a su alta estabilidad de señal y resolución, este tipo de sensores de desplazamiento capacitivos se aplican en tareas de medición industrial y laboratorios.

El funcionamiento visto de forma teórica dice que el sensor está formado por un oscilador cuya capacidad la forman un electrodo interno (parte del propio sensor) y otro externo (constituido por una pieza conectada a masa).

Estos sensores se emplean para la identificación de objetos, para funciones contadoras y para toda clase de control de nivel de carga de materiales sólidos o líquidos (Fig. 3). También son utilizados para muchos dispositivos con pantalla táctil, como teléfonos móviles o computadoras. [18]



Figura 3. Sensor de humedad de suelo capacitivo

Para entender bien la diferencia entre los sensores resistivos y los capacitivos, se explicará un ejemplo. Las pantallas táctiles que hoy en día se utilizan para numerosas aplicaciones, pueden ser resistivas o capacitivas. La diferencia entre ambas es que la resistiva depende de la presión mecánica del dedo/lápiz y en cambio la pantalla táctil capacitiva aprovecha el hecho de que el cuerpo humano es conductor de la electricidad (Fig. 4).

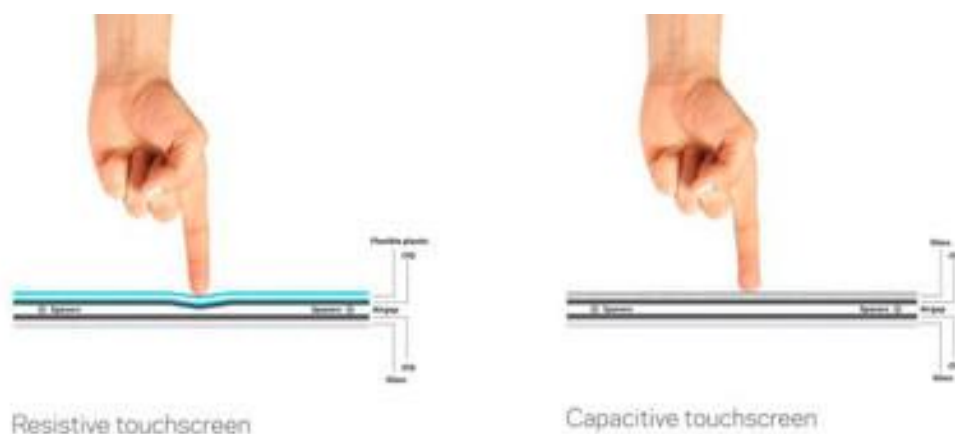


Figura 4. Comparativa pantalla táctil resistiva vs capacitiva.

### 2.1.2 Sensores Resistivos

El sensor resistivo es un tipo de dispositivo que convierte cantidades físicas (desplazamiento, deformación, fuerza, aceleración, humedad, temperatura, etc.) en valores de resistencia. Es decir, el principio físico de funcionamiento es la variación de la resistencia eléctrica. Vemos un ejemplo de este tipo de sensores en la Figura 3.



Figura 5. Sensor resistivo de presión

Principalmente existen los sensores de deformación resistiva, algunos tipos son el de deformación por resistencia, el piezoresistivo (Fig. 4), el de resistencia térmica, el sensible al calor, sensible al gas y a la humedad.

El medidor de deformación en el sensor tiene un efecto de deformación del metal, es decir, deformación mecánica bajo la acción de una fuerza externa y en consecuencia el valor de resistencia cambia.

Tipos de galgas extensométricas de resistencia [16]:

- Metal: alambre, papel de aluminio y película.
- Semiconductor: alta sensibilidad (seda y papel de aluminio) y pequeños efectos laterales.



Figura 6. Sensor piezoresistivo

Los sensores resistivos están basados en la variación de la resistencia eléctrica (Fig. 5), casi cualquier magnitud física puede provocar un cambio de resistencia, son los más numerosos, son sensores moduladores, se necesita una fuente de energía externa y la temperatura afecta a la resistencia y por tanto supone una interferencia.



Figura 7. Medidor de tensión resistivo

Según la variable física que hace variar la resistencia se clasifican en [17]:

- Potenciómetros
- Galgas extensométricas
- Detectores de temperatura resistivos (Fig.6)
- Termistores
- Magnetorresistencias
- Fotorresistencias
- Higrómetros resistivos
- Detectores de gases.



Figura 8. Detector de temperatura resistivo

A continuación se explican 6 estudios sobre sensores resistivos con aplicaciones parecidas a las del sensor que se fabrica en este proyecto. Esta información que se ha recopilado, se utilizará para después fabricar el sensor.

### 1. 'Disappearing Sensor'-Textile Based Sensor for Monitoring Breathing. [1]

En este estudio se desarrollaron sensores textiles para el monitoreo remoto de la respiración. El sensor realizado era ponible, lavable y cómodo. Se utilizó una silicona conductora y un sustrato textil elástico y con buena recuperabilidad, hecho que garantizaba buena sensibilidad del sensor. Se simuló ciclos de respiración en diferentes personas, diferentes ejercicios y

posiciones distintas del cuerpo. El circuito eléctrico construido registraba el cambio de la resistencia del sensor junto con su deformación mecánica.

La geometría de este sensor se observa en la Figura 9, se recubrieron dos correas y se colocaron estos dos sensores en un prototipo de camiseta.

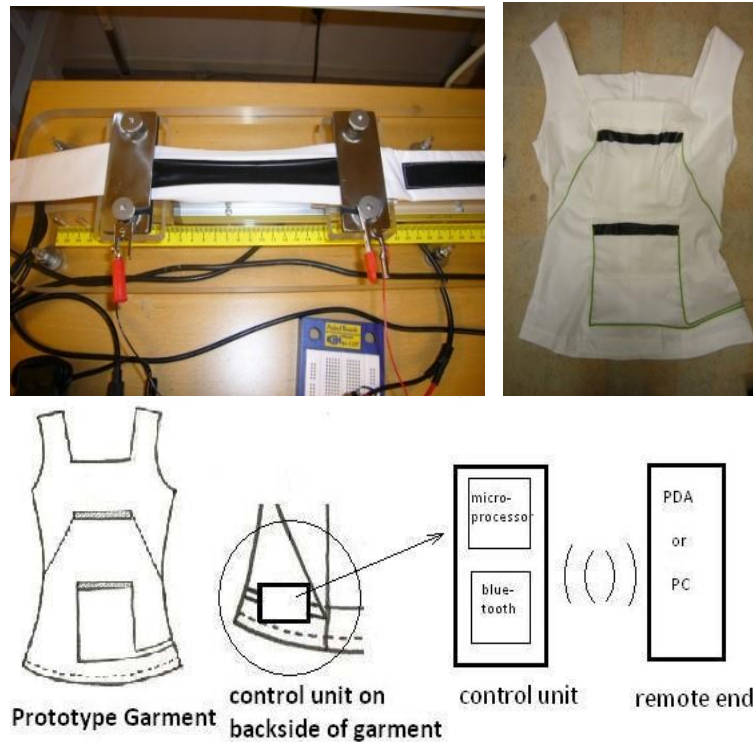


Figura 9. Sensor basado en textiles para monitorear la respiración [11]

Los resultados del estudio demostraron que los sensores recubiertos con hilo conductor permiten construir un sistema de *prenda portátil simple*, que mide y monitorea la respiración.

## 2. Textronic clothing with resistance textile sensor to monitoring frequency of human breathing. [2]

En este artículo se presentan materiales electroconductores textiles que pueden usarse para construir camisetas tetrónicas sensoriales para medir la frecuencia respiratoria. Es un método para medir la resistencia del punto de contacto y la línea de contacto de dos hilos conductores

En la Figura 10 vemos el prototipo de la camiseta que se realizó con el fin de medir la frecuencia respiratoria.





Figura 10. Prototipo de una camiseta tetrónica para medir la frecuencia respiratoria. [2]

La investigación realizada demostró que el ángulo de dos hilos influye en la resistencia de sus puntos de contacto; la identificación de ese fenómeno es de gran importancia en el diseño de un sensor textil.

En este estudio se habla bastante sobre la respiración y se han utilizado los conceptos para aplicarlos en apartados posteriores del trabajo.

### 3. Textiles Digital Sensors for Detecting Breathing Frequency. [3]

En este estudio también se realizó un sensor textil cuyo objetivo era monitorizar la frecuencia respiratoria. Este sensor estaba integrado en un prototipo de cinturón de un traje de monitoreo, este traje también incluía la electrónica (Fig. 11). Es un sensor muy flexible y con una resistencia alta a los procesos de lavado y deformaciones.



Figura 11. Sensor digital en forma de cinturón abrochado entre el pecho y la cintura. [3]

El diseño de ahorro de energía es una característica en este sensor porque la energía solo se consume cuando las fibras conductoras electrónicas entran en contacto entre sí. Se puede utilizar durante mucho tiempo.

#### 4. Assessing the role of textiles in the performance of wearable screen-printed strain sensors for breathing rate monitoring. [4]

A diferencia de los otros 3 estudios nombrados, en este la serigrafía fue seleccionada como técnica de fabricación. Se realizaron sensores de deformación resistiva serigrafiados portátiles. La serigrafía es económicamente viable, fácilmente escalable y compatible con la producción en línea de las industrias textiles, lo que permite la transferencia tecnológica del prototipo a la producción industrial.

En este estudio, se compara el rendimiento de los sensores de tensión portátiles serigrafiados en textiles diferentes. Con las pruebas electromecánicas se resaltó la importancia de evaluar el comportamiento mecánico del material empleado en la fase de diseño del sensor (Fig. 12).

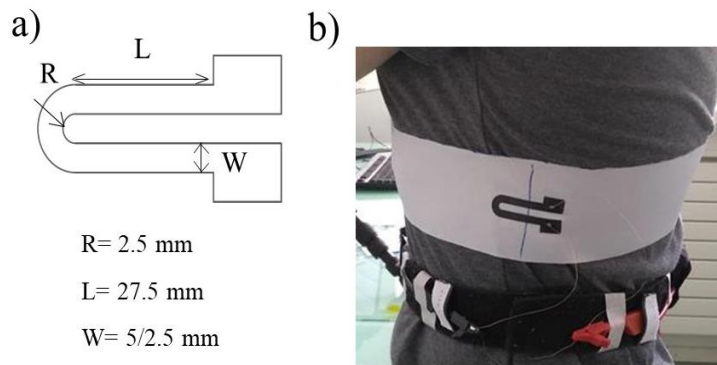


Figura 12. a) Representación esquemática del sensor de deformación en forma de U con las dimensiones relativas. b) Sensores de tensión serigrafiados integrados en la tira textil.

Se caracterizaron dos textiles comerciales diferentes, comúnmente utilizados para la fabricación de camisetas de ciclismo, y los resultados informados permitieron identificar la combinación textil-sensor de mejor rendimiento, que también se probó con éxito en un sujeto humano.

#### 5. Fabrication and Comparative Study on Sensing Characteristics of Soft Textile-Layered Tactile Sensors. [28]

En este trabajo los sensores están contruidos con una tela piezorresistiva altamente estirable y 2 tipos distintos de material conductor. El tejido piezorresistivo está intercalado entre las dos capas de material conductor (Fig. 13). Al entrar en contacto con una fuerza externa, el tejido piezorresistivo se comprime, lo que provoca una disminución de la resistencia en el punto de contacto, lo que permite que la señal pase entre las dos capas conductoras. Los resultados han demostrado que el valor del voltaje de salida aumenta y disminuye monótonamente con el estímulo mecánico aplicado.

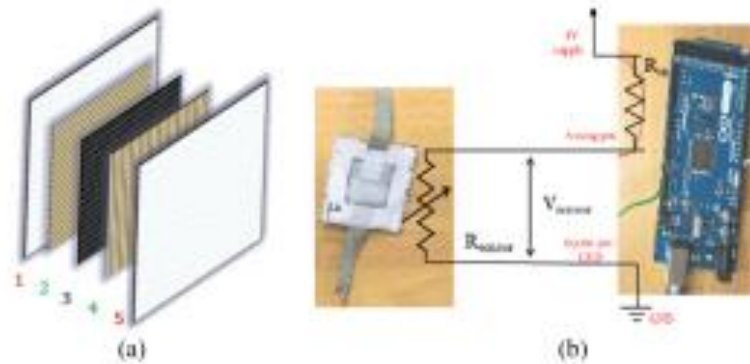


Figura 13. Arquitectura de las capas que forman el sensor y el circuito del sensor táctil.[28]

## 6. Stretchable and Compliant Textile Strain Sensors. [29]

En este artículo se utiliza un proceso diferente a los anteriores, el trenzado (Fig. 14). El trenzado es un proceso altamente productivo y automatizado y las propiedades del sensor resultante pueden mejorarse. Además, las trenzas se pueden procesar más a textiles complejos.

En el proceso de fabricación se utilizaron diferentes materiales base hecho que hacía variar la densidad del trenzado así como la composición de los hilos conductores en el trenzado. Con las muestras producidas se llevaron a cabo experimentos de caracterización electromecánica para analizar las propiedades de los sensores.

Se vio que tanto la densidad del trenzado como el material base tienen una enorme influencia en las características del sensor.

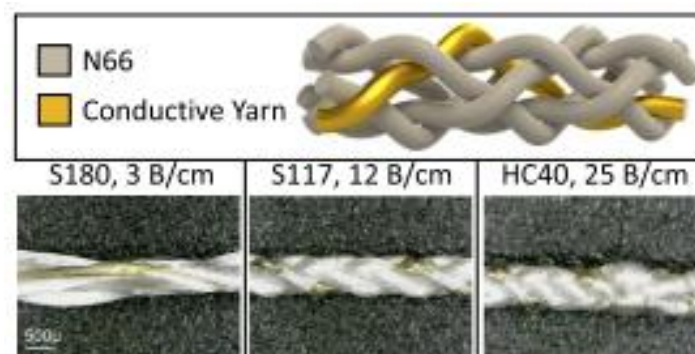


Figura 14. Trenzado del hilo conductor. [29]

### 2.1.3 Sensores Wearables

Dentro de los sensores, los wearables son aquellos que se pueden incorporar a la vestimenta. Es decir, dispositivos electrónicos inteligentes incorporados a la vestimenta o usados corporalmente

Los sensores textiles captan señales fisiológicas y mecánicas, son capaces de convertir estímulos mecánicos, químicos, ópticos, entre otros, a señales eléctricas como en voltaje, intensidad o resistencia.

Se ha escogido este tipo porque es una opción ideal para dispositivos portátiles ya que son flexibles, ligeros y se pueden llevar de multitud de formas. Los sensores textiles perciben y procesan información, actúan y acumulan o generan energía, dependiendo de eso, tendrán diferentes aplicaciones.

La ropa provee la mejor plataforma para estos sensores ya que permite que estén alrededor del cuerpo y de forma próxima, por tanto, estas prendas al estar en espacios cerca del cuerpo humano, son capaces de monitorizar variables como tensión, presión, temperatura, desplazamiento, humedad, etc. (Fig. 15). Y pueden ser utilizados en diversos campos como la rehabilitación, deporte, seguridad, entre muchos más.



Figura 15. Sensor Wearable integrado en la ropa

## 2.2 Sensores wearables en el mundo en 2022

Gracias a la pandemia causada por el COVID-19, los wearables se convirtieron en una herramienta de seguimiento, control y lucha contra la propagación de la enfermedad en todo el mundo. Según un estudio reciente de ABI Research, el número de wearables enviados en todo el mundo en 2020 aumentó a 259,63 millones, de los cuales 112,15 millones corresponden a rastreadores deportivos, de fitness y de bienestar y 74,30 millones a smartwatches. Como su utilidad y sus nuevas funciones están en continuo crecimiento, se prevé que la tendencia al creciente continúe. [12]

A pesar de la introducción de las redes 5G como característica premium, muchos tipos de dispositivos del sector de los wearables y accesorios no se conectarán completamente por sí mismos, sino que seguirán necesitando estar atados a un smartphone o a un hub. De hecho, la tasa de conexión 5G de los wearables y accesorios seguirá siendo baja, de alrededor del 0,6% en 2026, y estará relacionada principalmente con sectores como los smartwatches y los auriculares. "La alta recopilación de datos y la baja eficiencia energética serán los puntos fuertes de estos gadgets inteligentes, lo que elevará la demanda y aumentará su popularidad, sobre todo en el sector sanitario", Lovino. Como resultado, este tipo de tecnología podría transformarse, ya que los gadgets se reducen al tiempo que adquieren nuevas capacidades.

"Aunque es probable que el 5G aparezca en un mayor número de smartwatches en 2023, se espera que el volumen siga siendo bajo, con 3,55 millones para 2026, mientras que el 4G seguirá representando el mayor volumen, con 45,4 millones de envíos y una CAGR del 31,7% para esta etapa", ha destacado la analista de ABI Research.[12]

Los sensores inteligentes diseñados eran incompatibles hasta que se decidió definir una norma que permitiera su interconexión: La norma IEEE-P1451 (Transducer to Microprocessor Interface), la cual fija las directivas de los sensores inteligentes, así como la comunicación con el bus digital.

La norma generaliza el concepto de sensor inteligente al de Transductor Inteligente, todos montados sobre una red común y con la información necesaria para saber en cualquier momento quien es sensor y quien es actuador, y que propiedades tiene cada uno.

Hay varios dispositivos, sensores y actuadores, de diversos fabricantes, con diversas tecnologías. Algunos pueden ser más complejos que otros, pero comparten los requerimientos mínimos de identificación, direccionalidad y comunicación. Esta comunicación interactiva

permitirá saber qué tipo de transductor es el dispositivo (sensor o actuador), cuál es su función (sensor de presión, caudal, etc.), posibilidades, ubicación y fabricante. Así podrán realizarse enlaces online de identificación, corrección de parámetros, optimización del proceso, y un amplio etcétera de posibilidades. [13]

Existen varios ejemplos de ropa inteligente en el mercado como es la camiseta que cambia de color dentro de un estadio de fútbol, la “Solar Jacket” de Tommy Hilfiger que permite cargar la batería de los aparatos que llevemos a través de la energía solar, la chaqueta Commuter confeccionada en un tipo de tejido inteligente llamado Jacquard lanzada por Levi’s y Google que permite conectar nuestro smartphone a través de Bluetooth (Fig. 16).



Figura 16. Tejido inteligente Jacquard [34]

Otro ejemplo son los calcetines inteligentes de Sensoria que permiten monitorear los pasos y almacenan información sobre varios parámetros como el tiempo, la distancia, la velocidad, la posición del pie, etc. Seguimos con el brasier OMbra de OMsignal, que es capaz de monitorear la frecuencia cardíaca y respiratoria durante el entrenamiento. También existen unos pantalones para realizar yoga Nadi X de Wearable X, que notifican al usuario cuando su pose de yoga es incorrecta mediante una vibración en las partes del cuerpo que necesiten un ajuste de postura.

También está el traje inteligente de Samsung que mediante tecnología NFC, los usuarios pueden utilizar el teléfono móvil sin tener contacto con él.

A continuación vemos en la Figura 17 un ejemplo de un traje moderno que responde a las necesidades de negocio.



Figura 17. Touchless [34]

El siguiente ejemplo (Fig. 18) muestra un traje de baño inteligente diseñado por la compañía Spinali Design. Éste, tiene un sensor removible que monitorea el tiempo que se está tomando el sol con el fin de avisar al usuario cuando debe dejar de hacerlo para evitar daños en su piel.



Figura 18. Traje de baño inteligente. [34]

Como estos, hay múltiples ejemplos de tecnología wearable y como se comentaba, no para de crecer la cantidad de productos en el mercado que incluye este tipo de tecnología.

### 3. Aplicaciones Wearables

Los wearables son uno de los últimos hitos de la revolución tecnológica y cada vez aumenta más el número de aplicaciones o usos que se les puede dar. Pueden registrar infinidad de cosas y facilitar también la comunicación con el entorno.

Existen múltiples tipos de wearables: gafas, lentillas, relojes, ropa electrónica, bandas de pelo, gorras, joyas, auriculares, cascos, cinturones, zapatos, guantes, exoesqueletos, etc.

*“Los 'wearables' son el resultado de la evolución tecnológica alcanzada con la miniaturización de los componentes.” [20]*

Hay varios términos que se usan como sinónimos de tecnología Wearable en los tejidos [21]:

- **Soft Circuits:** circuitos blandos. Hace referencia al uso de materiales flexibles, como hilos y fibras conductoras, para crear circuitos y sensores como parte de la ropa.
- **E-Sewing:** cosido electrónico, concretamente, se refiere al proceso de fabricación de los circuitos en la ropa mediante hilos conductores en lugar de hilos textiles.

En la actualidad las aplicaciones wearables están en auge, en el ámbito industrial, militar, deportivo y médico sobre todo. También se pueden aplicar tanto en adultos, bebés, animales y tanto en el ámbito personal como el corporativo.

Algunos ejemplos de aplicaciones concretas son: la atención a personas mayores, el transporte, las finanzas, los juegos, la música, la biomedicina, la educación, el apoyo a la discapacidad, la investigación científica, la seguridad, estudios sociales y un extenso etc.

Las aplicaciones más importantes que tienen mayor impacto social son las siguientes [23]:

- **Seguridad pública y personal:** A diferencia de la creencia de que los wearables pueden perjudicar la privacidad de las personas, éstos pueden proporcionar mayor seguridad a la sociedad.
- **Negocios:** Las empresas pueden utilizar la tecnología Wearable para nuevas estrategias innovadoras. Es obvio por ejemplo que ya no son necesarias las reuniones presenciales. También pueden conceder al usuario todo tipo de servicios sin olvidar ningún tipo de información.
- **Investigación:** Esta tecnología ofrece muchas oportunidades a las compañías dentro de la investigación de mercados. Los investigadores utilizan algunas técnicas de seguimiento ocular en los experimentos de laboratorio. Existen numerosos métodos para adquirir datos y así estudiar aspectos diversos con el fin de entender un problema y tomar decisiones que es en eso en lo que se basa la investigación.



- **Producció:** En la producció i la logística se poden utilitzar aquests aparells per ajudar a les treballadores en els processos d'aprenentatge i treball, ajudar a les repartidores a prendre les rutes més adequades, no perdre cap producte.
- **Ventes:** Tant minoristes com majoristes se poden veure beneficiats per aquest tipus de sistemes on les compres poden ser carregades directament a través d'internet en dispositius que les empleades poden portar a sobre, el que es tradueix en rapidesa tant en la ordre com en la resposta.
- **Turismo:** Poder visitar llocs sense necessitat de sortir de casa, localitzar llocs d'interès a través de funcions de direcció i GPS, trobar allotjament...
- **Personas con visibilidad reducida:** Els dispositius per a persones cegues i sordes poden arribar a ser els seus ulls o oïdes respectivament.
- **Salud y bienestar:** Els wearables tenen una gran capacitat de guardar i analitzar dades. Proporcionen informació tant de salut com de benestar. Poden ajudar en la recollida de diagnòstics, avisos instantanis a les autoritats sanitàries, elements d'ajuda dins dels propis centres sanitaris...
- **Entretenimiento:** Per exemple videojocs, hi ha ulls de realitat virtual per poder jugar com si et trobaràs dins del propi joc. També s'utilitzen sensors de moviment integrats en aquests dispositius per a que únicament utilitzis el teu cos sense necessitat de perifèrics.



Figura 19. . Ejemplos comerciales de sensores wearables [34]

### 3.1 Riesgos

Aproximar tanto la tecnología al ser humano tiene sus riesgos. Como cualquier dispositivo con conexión a internet estos dispositivos son susceptibles de ser hackeados. Todo dispositivo tecnológico tiene vulnerabilidades de seguridad. Ello hace de los dispositivos wearables un verdadero riesgo para las organizaciones y la seguridad personal y privacidad de los usuarios.

Los principales riesgos son los siguientes:

- Geolocalización exacta y patrones de movimiento conocidos.
- Seguridad de los servidores del fabricante. Al descubierto los datos personales.
- Conexiones poco seguras. Los wearables necesitan internet de algún modo para poder comunicar los datos que recopilan. Normalmente están conectados al móvil vía Bluetooth, pero también pueden conectarse al Wifi.
- Riesgos legales dependiendo de la legislación del país.
- Políticas de privacidad pobre o nula. Hay que asegurarse de qué información se va a almacenar, dónde y cómo, así como con quien se van a compartir y con qué fin.
- Espionaje. Estos dispositivos cuentan con numerosos sensores que recogen datos como nuestra ubicación GPS o estado de salud.

### 3.2 Ventajas

A continuación se explicarán las principales ventajas de estos dispositivos:

- El objetivo natural de los wearables es mejora de la calidad de vida del usuario. No solo tiene aplicación en el mercado de consumo, también en el ámbito médico.
- Almacenamiento de información. Se almacena información, se transmite y procesa, a tiempo real o no con otras redes y dispositivos.
- Baja radiación. Al ser dispositivos pequeños, normalmente emiten menor radiación que otros dispositivos portátiles.
- Aplicación a múltiples campos.
- Dispositivos multisensores. La medición de muchos tipos de parámetros simultáneamente hace que sea posible obtener en tiempo real una gran cantidad de información., que mediante el postprocesado adecuado facilita la obtención de diversas conclusiones sobre los datos medidos.
- Bajo peso, en general no suponen una molestia al usuario en cuanto al peso añadido, lo que supone una ventaja frente a tabletas y teléfonos inteligentes.

- Combinable con la moda, esta tecnología se integra con la ropa y complementos. Está diseñada para llevarla puesta.
- Alto grado de configuración . Permiten al usuario la parametrización casi total del dispositivo, seleccionando qué funcionalidades quiere activar y cómo medir y presentar los datos.

### 3.3 Inconvenientes

Sin embargo, existen algunos inconvenientes inherentes a esta tecnología, aunque algunos se irán minimizando a medida que se vayan haciendo mejoras.

- Rechazo a la tecnología. Factor típico causado por el recelo por desconocimiento y el rechazo al cambio.
- Connotaciones psicológicas y sociales. Derivadas del concepto de “siempre encendido, siempre conectado” inherente a estos dispositivos, y al hecho de que recopilen multitud de información.
- Privacidad. Muchos usuarios no se fían de a dónde pueden ir los datos recopilados y qué se hace con ellos.
- Dependencia tecnológica. Rechazo del usuario a la adicción al uso del dispositivo y a la deshumanización que supone estar monitorizado permanentemente.
- Falta de confianza. Si la información obtenida o procesada es incompleta o incorrecta (falta de precisión de los datos), el usuario desconfía del uso del dispositivo.
- Falta de utilidad. En ocasiones el usuario no acepta una tecnología o funcionalidades por resultarle innecesaria en su vida diaria.
- Falta de constancia. El uso ocasional de un dispositivo cuando éste está pensado para un uso continuo, hace que el usuario perciba que no es fiable o que no lo necesita.
- Precio elevado. Algunas tecnologías y dispositivos son aún demasiado caros para alcanzar de forma masiva a un público de consumo.
- Duración y carga de la batería. A pesar del pequeño tamaño y el pequeño consumo, para ciertos dispositivos la duración de la batería es inferior a la deseable para resultar práctico.
- Emisión de calor. Algunos dispositivos se calientan con un uso prolongado, limitando su durabilidad y practicidad.

Respecto a los sensores del sector salud:

- Ubicación especial del sensor, muchas veces incómodo, o que requiere de un procesamiento de señal complejo que impacta severamente la vida útil de la batería.
- No tienen una precisión comparable a las obtenidas por métodos obstructivos (espirometría y capnografía), incluso en experimentos en reposo [23]

## 4. Materiales y configuración de fabricación

El objetivo del trabajo es hacer un sensor resistivo tridimensional que vaya integrado en el textil y además se pueda doblar. Por tanto, en este apartado se estudiará el material y la configuración necesaria para fabricarlo. En la Figura 21 vemos un ejemplo de un sensor resistivo integrado en un textil.



Figura 20. Textil conductor

Se ha de considerar de qué manera se pueden procesar un material textil. Estos materiales inteligentes se incorporan en la estructura textil por diferentes tecnologías. Por ejemplo, el bordado, la costura, no tejido textil, tejido, tejiendo, haciendo un giro, trenzado, revestimiento/laminación, impresión y tratamientos químicos. Actualmente los sensores pueden medir casi todo: presión, tensión, temperatura, humedad...

Por lo general, la señal de salida de estos sensores no es apta para su lectura directa y a veces tampoco para su procesado, por lo que se usa un circuito de acondicionamiento, como por ejemplo un puente de Wheatstone, amplificadores y filtros electrónicos que adaptan la señal a los niveles apropiados para el resto de los circuitos.

Se utilizará un tejido elástico para aportar más flexibilidad y permitir que el sensor se estire sin problema. Los Sensores de estiramiento reaccionan a las deformaciones y se utilizan para sensorizar y monitorizar el cuerpo, mientras el textil está en contacto con la piel en una gran área del cuerpo. Estos sensores pueden utilizarse para determinar: la frecuencia cardíaca, la respiración, el movimiento y la presión sanguínea.

Para que un tejido sea conductivo es necesario que tenga algún componente que sea conductivo, por ejemplo con hilos o alambres, con partículas depositadas por encima del tejido, recubrimientos, o también puede estar bañando en algún material conductor.

A principios del S.XXI se empleaba un método que consistía en integrar hilos conductores/fibras metálicas en el tejido. El problema era que la integración de los hilos conductores en una estructura era complejo y no uniforme. Los movimientos de doblado, extensión y torsión que se producían en los tejidos podían producir roturas y en consecuencia fallos con el sistema.

Este tejido debe ser cómodo de llevar y suave en contacto en vez de duro y rígido. Por ese motivo, no se busca un tejido completamente conductor sino solo una parte donde irá el sensor. [19]

#### 4.1 Bordado con hilos conductores

Para conseguir que una zona del tejido sea conductora se utilizarán hilos metálicos (Fig. 22). Este tipo de bordado no es un proceso normal ya que no es el uso natural de estos hilos y por esa causa, no tienen las características de un hilo de bordar hecho con fibras textiles.



Figura 21. Bordado con hilo conductor

Uno de los problemas de trabajar con estos hilos es la dificultad que supone pasarlos a través o alrededor de puntos metálicos como el ojo de la aguja, por tanto, cuando la máquina de coser trabaja a altas velocidades hay mucha fricción superficial (Fig. 23). Esta resistencia superficial causa tensiones en los hilos superiores y puede provocar que se rompan o deshilachen.

Otro problema es que estos puntos de contacto suelen tener un radio de curvatura bajo y por tanto, la presión entre las superficies de contacto es mayor. Afecta a los hilos metálicos ya que este tipo de hilos suelen mantener su forma cuando se deforma.



Figura 22. Màquina de coser

También hay que vigilar con los cortocircuitos, son peligrosos. Se pueden producir cuando dos hilos por los que pasa corriente, se tocan y se supone que no iban a hacerlo.

Gracias a estudios anteriores de otras experiencias con este tipo de bordado, existen varios conocimientos sobre los diferentes tipos de hilos conductores y su capacidad de ser cosidos. Estos hilos deben tener las siguientes propiedades mecánicas [19]:

- Alta resistencia a la tensión (~580 - 1200 cN) o tenacidad (2.25 a 4.5 cN/dtex).
- Moderado % de elongación en el punto de ruptura (entre 12-30%).
- Negador por debajo de ~400 (~440 dtex).
- Características de la superficie relativamente suaves.
- Alta flexibilidad y resistencia a la cizalla y a la deformación permanente bajo doblado.

Además, se han establecido algunas reglas [19]:

- Los hilos hilados o hilos de filamentos, estén o no trenzados, de fibras de 100% acero inoxidable no pueden ser cosidos con aguja ni con bobina. De la misma forma ocurre con los hilos hechos de 100% fibra de carbono.
- Los filamentos hechos de fibras poliméricas (nylon) y cables de cobre recubiertos de plata (normalmente ~30  $\mu\text{m}$  de diámetro) no son aptos para coser con aguja y difícil con la bobina.
- Los cables de metal (Cu, Ag o Au) no son aptos para coser.
- Hilo hilado de acero inoxidable puede ser apto para el bordaje como hilo superior si el porcentaje de fibras de acero inoxidable es muy bajo ( $\leq 20$  %).

Con bobina, los hilos hilados pueden ser procesados incluso si tienen alto contenido en fibra (70% acero inoxidable y 30% Kevlar).

- Los filamentos retorcidos de nylon y tres hebras continuas de acero inoxidable no son aptos para coser a máquina con aguja, pero si con bobina.
- Los hilos hechos de fibras de poliéster y un bajo porcentaje de fibras de carbono son aptos para coser con aguja y con bobina. Aun así, las fibras de carbono se rompen fácilmente durante el procesamiento y uso, lo cual luego reduce la débil conductividad y pueden ser dañinos para los sistemas electrónicos ya que las fibras rotas flotan alrededor por el aire. En el interior de 26 los ordenadores u otros sistemas electrónicos robustos pueden provocar cortocircuitos.
- Los hilos conductores entorchados no son aptos para coser como hilo superior ya que la lámina de metal que los envuelve se atasca en el ojo de la aguja. Algunas pueden ser aptas para coser con bobina pero normalmente son bastante gruesas, lo que las hace ineficientes en el carrete.
- Algunos hilos de filamentos hechos de fibras poliméricas recubiertos de metal son aptos para coser como hilo superior o inferior. Algunos de estos incluso muestran buena conductividad (por debajo de algunas décimas de  $\Omega/m$ ).

Los hilos conductores que se basan en mezclar fibras conductoras con fibras no conductoras solo son aptos para bordar si la proporción de fibras conductoras es baja. Esto implica una alta resistencia la cual es poco atractiva ya que limita la aplicabilidad de la tecnología.

En conclusión, los hilos hechos de fibras poliméricas recubiertas de metal son los únicos que pueden ser utilizados para bordar a máquina y ofrecer conductividad. En general, se podrían resumir diciendo que cuanto más alto es el porcentaje de material conductor, menos adecuado es el hilo para coser. De este modo, existe siempre un equilibrio entre conductividad y costurabilidad.



#### 4.2 Bordado de contactos

Se podría haber usado el mismo hilo cableado para hacer los contactos con un módulo electrónico. Mediante un nudo con un hilo conductor se crearía una conexión mecánica y eléctrica. Sin embargo, dado que la elección de este hilo también es crucial para la durabilidad del nudo, ya que pueden romperse bajo estrés, se ha optado por la opción de utilizar remaches (Snap Buttons) para hacer los contactos. En la Figura 24 se observa a que nos referimos.



Figura 23. Snap Buttons

La característica básica común de cualquier contacto bordado es que tanto el hilo como la placa electrónica, sean eléctricamente conductivas en la superficie. El mecanismo de hacer un remache hace que el hilo y la placa electrónica tengan un contacto físico y eléctrico. A continuación vemos en la Figura 25 un ejemplo práctico que se asemeja a la estructura del sensor que se quiere realizar



Figura 24. Sensor laboratorio de la UPC

## 5. Desarrollo del diseño y la fabricación del dispositivo

Dentro de este apartado se exponen cada una de las pautas y pasos seguidos para el desarrollo del dispositivo. Así como la justificación de los elementos seleccionados para la fabricación del mismo.

### 5.1 Componentes

Cables macho-macho (Fig. 26): para realizar el enlace entre los componentes dentro de la placa.

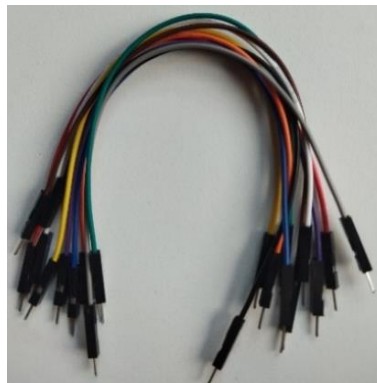


Figura 25. Cable macho-macho

El cable macho-macho se utiliza frecuentemente en la placa de prototipado haciendo posible la conexión de dos elementos introducidos en dicha tabla. Se conoce como macho-macho debido al fragmento que sobresale de los extremos del cable.

Placa de prototipado (Fig. 27): tamaño pequeño y sin necesidad de soldadura. Cuenta con 400 puntos de conexión y sus dimensiones son 83x52x9mm

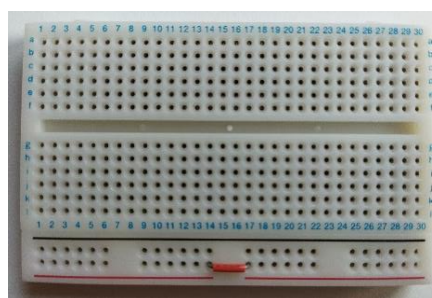


Figura 26. Placa de prototipado

Esta placa sirve para hacer montajes de prototipos de circuitos electrónicos. Es sencilla de utilizar ya que los componentes simplemente se "pinchan" sobre la placa, sin necesidad de hacer soldaduras. La placa tiene una serie de orificios en los que se introducen los terminales (patas) de los componentes.

Resistencias: Se utilizan varias resistencias de valores al principio desconocidos pero que se calculó su valor tanto con el tester del laboratorio como con el código de colores de las resistencias (Fig. 28). Estas resistencias son de test y se utilizan para verificar el comportamiento del sistema de medida.

Las resistencias disponibles eran dos de 10kΩ, una de 12kΩ y otra de 2kΩ.

Cantidad de bandas  
 4 Bandas  5 Bandas  6 Bandas

Parámetros de la resistencia

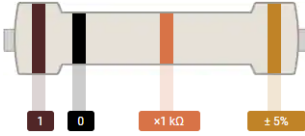
1.ª banda de color  
 Marrón 1

2.ª banda de color  
 Negro 0

Multiplicador  
 Naranja ×1 kΩ

Tolerancia  
 Oro ± 5%

Salida



Valor de la resistencia  
**10k Ohms 5%**

Figura 27. Resistencia de 10kΩ calculada con el código de colores

## 5.2 Microcontrolador Arduino

Para el procesamiento de datos es necesario el uso de un microcontrolador, éste recogerá los datos y los almacenará, con ellos podrá analizar distintas variables que se quieren medir. Por ello, se ha utilizado un microprocesador de Arduino, en concreto el Nano 33 IoT (Fig. 29) ya que cuenta con las características apropiadas para el desarrollo del proyecto.

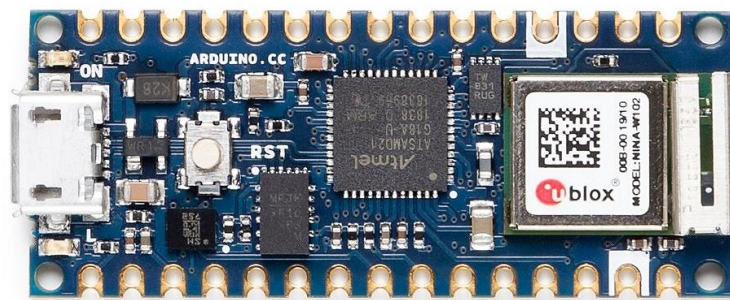


Figura 28. Arduino Nano 33 IoT

“El autómata programable está basado en un microcontrolador SAMD21D de 32 bits y un chip de baja potencia que opera en el rango de 2.4GHz, cuenta con catorce pines digitales y ocho pines analógicos. **Trabaja a una tensión de funcionamiento de 3.3 V.** Además, el dispositivo integra conexión Wifi para el enlace con el Internet de las cosas. Aunque no existe una

definición única de lo que califica como un dispositivo IoT, estas tecnologías generalmente se caracterizan por su ubicua conectividad de red, intercambio de datos, monitoreo remoto e interacción entre ellos y / o humanos.” [8]

Una característica importante es el tamaño de la placa. Es muy útil ya que el proyecto requiere dimensiones reducidas.

La placa contiene [11]:

- Un microcontrolador ATmega328P con la configuración de “sistema mínimo”.
- Una interfaz USB-Serie que permite reprogramar el microcontrolador desde un ordenador utilizando el software Arduino IDE.
- Dos zócalos de pines que permiten conectar los pines de entrada/salida a sensores, actuadores y un largo etc.

En lo anexos adjuntados en la entrega del proyecto se incluye toda la información de la placa.

### 5.3 Alimentación Arduino

Como el Nano 33 IoT no tiene conector de batería, ni cargador, se cargará usando el pin 5V. Éste proporciona 5V desde la placa cuando se alimenta desde el conector USB. Previamente, para que funcione, se ha acortado el puente VBUS en la parte posterior de la placa.

El led estará encendido cuando se conecte a la entrada de 5V el cable USB.

### 5.4 Cálculos y código

En Arduino existen únicamente dos formas de captar datos del mundo exterior:

- Digital: sus valores pueden ser 0 o 1, dependiendo de si se aplica o no un voltaje al conector que se está leyendo como entrada.
- Analógica: sus valores pueden ser entre 0 y **1023**, dependiendo del voltaje aplicado entre 0 y el voltaje de alimentación de la placa (normalmente 5V, pero en este caso **3.3V**).

En ambos casos hablamos de únicamente una medida de voltaje, este procesador no puede medir resistencias ni intensidades eléctricas. Es por ello que para hacer otro tipo de mediciones con una placa Arduino (y en general cualquier microcontrolador), debemos buscar la forma de transformar el valor medido en un valor de voltaje. Por tanto, aprovechando las

entradas analógicas, se ha medido una resistencia desconocida por comparación con otra de valor previamente conocido. [27]

Otro punto importante son las divisiones. La resolución de la ADC de Arduino es de 10 bits, lo que significa que tiene 1024 divisiones posibles (2 elevado a 10) para un valor de entrada entre 0V y 5V. Por lo tanto si ponemos 5V en un pin analógico, su valor será 1023 (no será 1024, ya que empieza a contar en 0, no en 1); si ponemos 0V en el pin, su valor será 0 y si por ejemplo ponemos 2,5V su valor será 511.

El montaje necesario es un simple divisor de tensión (Fig. 30) entre la resistencia de valor desconocido y nuestra resistencia conocida.

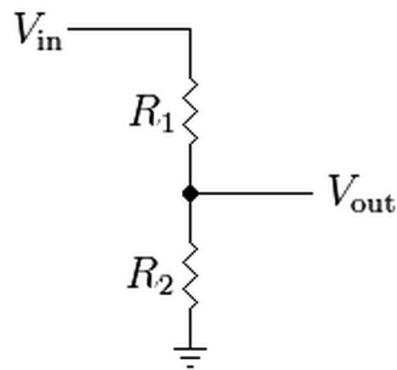


Figura 29. Divisor de tensión

Para calcular la  $V_{out}$  (voltaje de salida del divisor de voltaje), utilizaremos el valor que nos da la lectura analógica de un pin en su valor digital, utilizaremos el pin  $A_0$ .

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1023 \text{ divisiones}} \cdot \text{lectura analógica}(A_0) \quad (1)$$

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (2)$$

Despejando la  $R_1$  o la  $R_2$  encontraríamos la resistencia que nos falta.

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \quad (3)$$

A continuación se indican los pasos para desarrollar el código de Arduino que se ha implementado en este trabajo. Para comenzar a configurar el sistema de medida, es necesario instalar Arduino IDE y configurar la placa y el puerto (Fig. 31).

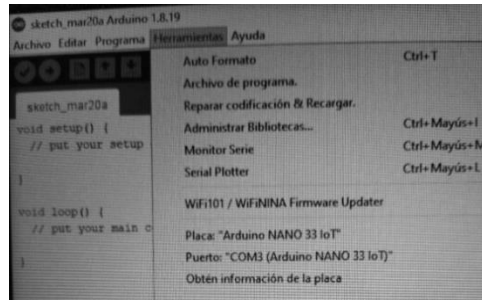


Figura 30. Configuración de la placa y el puerto en Arduino

Una vez configurado, se crea un programa con el fin de leer el valor de una resistencia desconocida, este valor se comprobará con un multímetro (Fig. 32).



Figura 31. Multímetro digital laboratorio UPC

Partiendo de un valor de resistencia conocido, se crea un programa para medir una resistencia a partir de esta otra resistencia de la que ya se conoce el valor y se comprueba de nuevo el resultado con el multímetro.

Se retoca este programa con el fin de medir a tiempo real una resistencia que vaya variando su valor. El objetivo es que pueda leer la resistencia del sensor que se fabrique a tiempo real.

A continuación vemos en la Figura 33 una imagen del circuito eléctrico realizado. Es muy simple, con la ayuda del diagrama de pines de la placa (anexo) y teniendo en cuenta las soldaduras de la placa de prototipado, se conectan dos resistencias en serie, la resistencia con valor conocido se conecta al voltaje de entrada (cable rojo), después se conecta al pin analógico A0 un cable (verde) que mide entre las dos resistencias el voltaje para poder calcular que tensión pasará por la resistencia desconocida y por último la toma a tierra (cable negro).

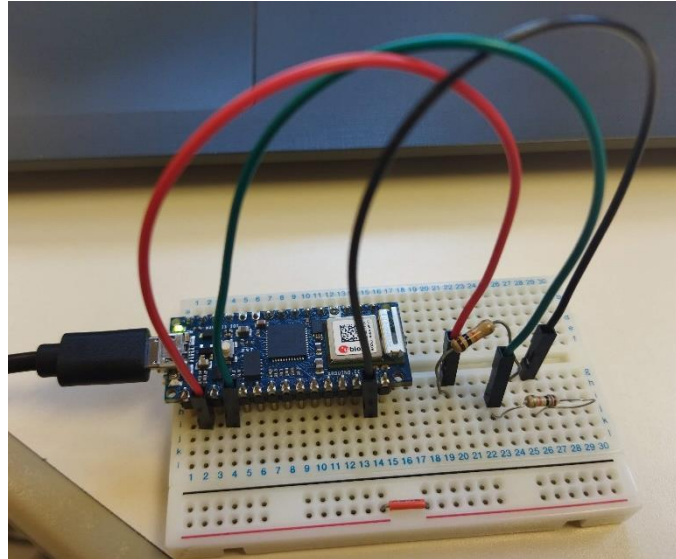


Figura 32. Montaje para medir una resistencia a partir de otra conocida

Seguidamente se muestra el programa definitivo en Arduino

```

/*Medir el valor de una resistencia a partir de una resistencia conocida.
Programa que mide el valor de la tensión de la resistencia desconocida y
aplica la fórmula para calcular el valor de su resistencia.*/

int R1 = 10000; // Valor resistencia conocida, medido tester

//inicio la comunicación de la placa Arduino con el ordenador, solo se ejecuta una vez
void setup() {
  Serial.begin(9600); //9600baudios
  pinMode(A0, INPUT);
  Serial.println("CLEARDATA"); // Limpia datos
  Serial.println("CLEAR SHEET"); //Limpia hoja
  Serial.println("LABEL, Fecha, Hora, Segundos, resistencia");
  Serial.println("RESETTIMER");
}

// Se ejecuta de forma repetida. Calcula la resistencia desconocida en bucle
void loop() {
  double resistencia, aux;
  aux = (float)analogRead(A0)/1023;
  resistencia = aux * (float) R1 / (1 - aux);

  Serial.print("DATA, DATE, TIME, TIMER, ");
  Serial.println(String(resistencia));

  delay(100); // 100ms de espera en cada lectura
}

```

Figura 33. Código para calcular el valor de una resistencia a partir de otra conocida

En el código vemos los cálculos que se muestran en la Figura 34.

```
double resistencia, aux;
aux = (float)analogRead(A0)/1023;
resistencia = aux * (float) R1 / (1 - aux);
```

Figura 34. Cálculo de la resistencia desconocida

Estos cálculos siguen lo descrito en las ecuaciones 1, 2 y 3 pero para simplificar el código se utiliza la variable aux.

$$\text{aux} = \frac{A_0}{1023} \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{\frac{V_{in}}{1023} \cdot A_0 \cdot R_1}{V_{in} - \frac{V_{in}}{1023} \cdot A_0} = \frac{\frac{A_0}{1023} \cdot R_1}{1 - \frac{A_0}{1023}} = \frac{\text{aux} \cdot R_1}{1 - \text{aux}} \quad (5)$$

## 5.5 Almacenamiento y muestra de datos

Para visualizar las medidas de la resistencia a tiempo real obtenidas con Arduino y luego almacenarlas, se utiliza una herramienta llamada Paraleja Data Acquisition (PLX-DAQ) (Fig. 35).

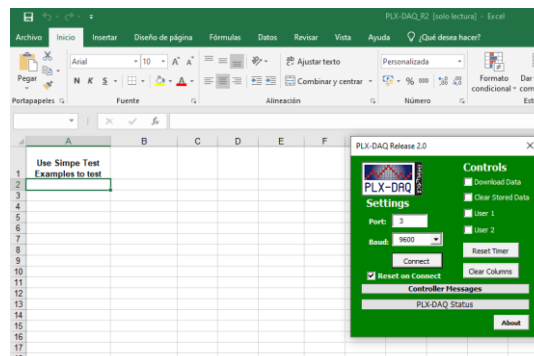


Figura 35. Programa PLX-DAQ

PLX-DAQ es una herramienta complementaria de adquisición de datos de microcontrolador Parallax para Microsoft Excel. Esta herramienta proporciona un fácil análisis de los datos recopilados de cualquiera de los microcontroladores conectados a cualquier sensor y al puerto serie de un PC. PLX-DAQ tiene las siguientes características [35]:

- Traza o grafica datos a medida que llegan en tiempo real usando Microsoft Excel
- Registra hasta 26 columnas de datos.
- Marca los datos en tiempo real (hh:mm:ss) o segundos desde el restablecimiento.
- Lee/escrbe cualquier celda de una hoja de cálculo
- Lee/Establece cualquiera de las 4 casillas de verificación en el control de la interfaz
- Velocidades en baudios de hasta 128K



Antes de empezar a utilizar la herramienta se debe subir el programa en Arduino, también se debe configura el puerto 3 ya que es el mismo que tenemos en Arduino. Una vez el programa empiece a recopilar datos, se pasan al Excel de PLX-DAQ.

En la Figura 36 se observa como los datos que muestra el programa en Arduino son los mismos que se vuelcan en el Excel descrito.

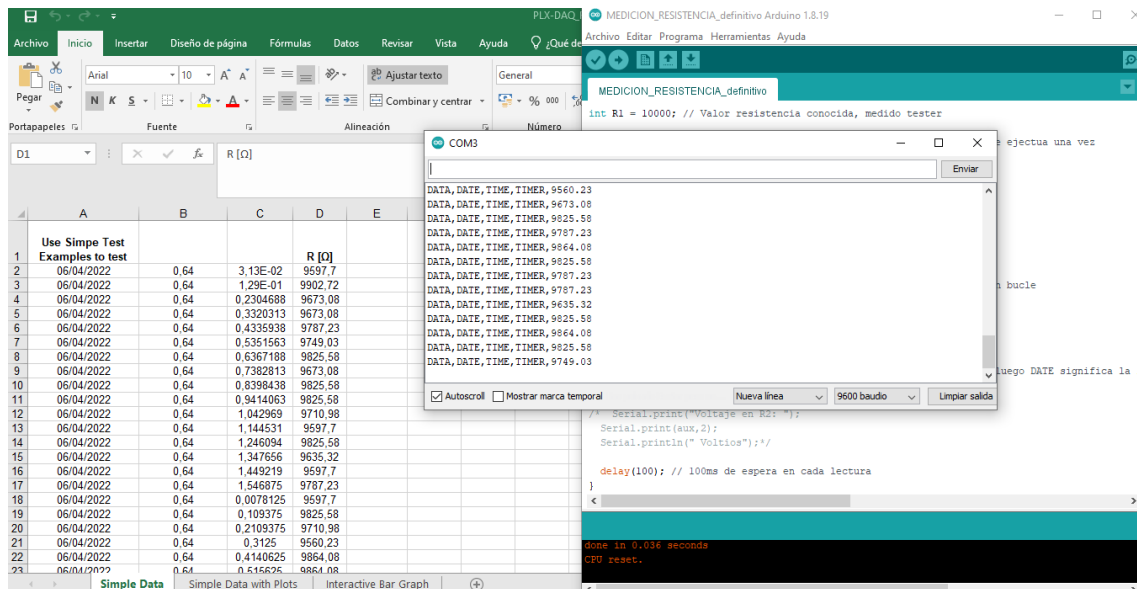


Figura 36. Programa PLX-DAQ en funcionamiento

## 6. Fabricación del sensor

El sensor se fabricará con un hilo conductor sobre en un tejido elástico. El hilo utilizado es el que se proporcionó en el laboratorio y es el Shieldex Conductive Yarn. A continuación vemos en la Figura 37 este hilo.



Figura 37. Shieldex Conductive Yarn [30]

Este tipo de hilo conductor se procesa principalmente en productos que requieren una conductividad extremadamente buena. Estos incluyen conductores textiles, sensores, actuadores, textiles de calefacción e iluminación. Para lograr una resistencia a la tracción aún mayor, este hilo también se retuerce a menudo con otros polímeros. [30]

Datos técnicos:

<b>Tipo</b>	Fibras e hilos: Hilo retorcido
<b>Material</b>	Poliamida / Nylon 6.6
<b>Resistividad Eléctrica</b>	<math>< 300 \Omega/m</math>

Tabla 2. Resumen datos técnicos Shieldex

El tejido elástico utilizado es una goma elástica (Fig. 38) utilizada para cinturillas de pantalón o faldas. Se han utilizado diferentes modelos de cintas elásticas, se diferenciaban por su flexibilidad y ancho de cinta.

Se ha escogido este tipo de tejido para aportar más flexibilidad y permitir que el sensor se estire sin problema.



Figura 38. Ejemplo cinta elástica

Para coser el sensor al tejido se han probado diferentes métodos:

Primero se probó con la máquina de coser tipo SINGER (Fig. 39), como se ve en la Figura 40 tiene varios patrones de bordado. Primero se hicieron pruebas en trozos de tela (Fig. 41) y finalmente se escogió el tipo B de ambos en S ya que el patrón parecía el más adecuado.



Figura 39. Máquina de coser SINGER



Figura 40. Tipo de bordados máquina de coser

El problema de trabajar con la máquina ha sido que, como ya se comentaba en el apartado de hilos conductores, hay mucha fricción superficial, eso provocaba que el hilo se rompiera o deshilara.



Figura 41. Pruebas con la máquina de coser

Se ha probado de coser sensores con distintas geometrías, uno de los objetivos era utilizar el menor hilo posible y así conseguir una mejora respecto a otros sensores ya fabricados para estudios anteriores.

A parte de probar distintas geometrías con más o menos hilo, también se ha probado de coser mientras se estiraba el tejido o sin aplicar tensión sobre éste.

A continuación se muestran en las Figuras 42 y 43 alguno de los resultados obtenidos:



Figura 42. Sensor 1 tejido con máquina



Figura 43. Sensor 2 tejido con máquina

Después de las diferentes pruebas cosiendo a máquina, se probó una geometría de un sensor de temperatura (Fig. 44) basada en el artículo *Inkjet-Printed Flexible Temperature Sensor Based on Silver Nanoparticles Ink* (Qiao Jun Liew , Aiman Sajidah Abd Aziz, Hing Wah Lee, Mai Woon Lee, Huzain Fahmi Hawari, Mohd Haris Md Khir, 2020)



Figura 44. Diseño sensor de temperatura [32]

A pesar de ser la geometría de un sensor de temperatura, se utiliza en el sensor de este proyecto ya que es una geometría compacta y permite implementar una resistencia variable de forma efectiva.

Esta geometría se tuvo que coser a mano dado que con la máquina no se podía. Para asegurar la buena conductividad se pasó el hilo 4 veces y en los extremos se cosió más cantidad de hilo para facilitar luego el contacto con las pinzas cocodrilo. En la Figura 45 se ve el resultado de dicho proceso.

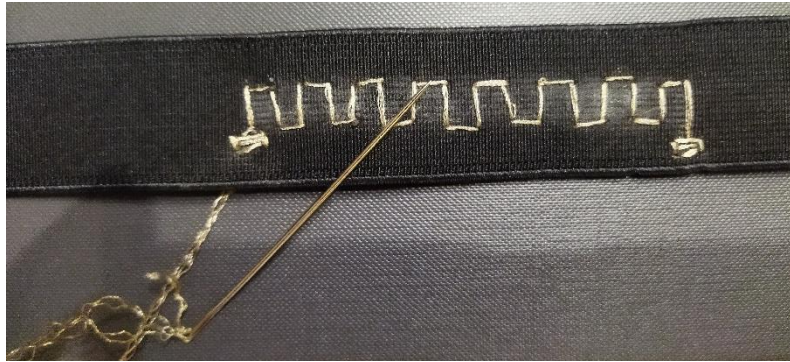


Figura 45. Sensor 3 cosido a mano. Idea diseño [32]

Los tres sensores comentados se probaron con el sistema de medida (Fig. 46), primero sin aplicar tensión y luego estirando el tejido uniaxialmente por los extremos. La intención era verificar que el sensor funcionaba.

Los dos primeros sensores, cosidos a máquina, no resultaron correctos. Seguramente fue debido a que el hilo se rompía y deshilachaba constantemente debido a la velocidad de la máquina que causaba la ya comentada fricción superficial. Aunque se cosió varias veces añadiendo más cantidad de hilo, no daban resultados coherentes.



Figura 46. Pruebas sensor 2

Respecto al tercer sensor, el cosido a mano, se añadieron en los extremos los snap buttons mencionados antes y quedó de la siguiente manera:



Figura 47. Tercer sensor con snap buttons

Se midió la resistencia con el multímetro (Fig.48) y daba valores coherentes. Sin estirar el tejido, con una longitud del sensor de 76mm, teníamos un valor de unos 34 $\Omega$  aproximadamente y cuando se estiraba el tejido hasta una longitud de 125mm, la resistencia aumentaba y su valor oscilaba los 40 $\Omega$ .



Figura 48. Cálculo de la resistencia con el Multímetro

Por tanto, este sensor vemos que funciona correctamente. Como el funcionamiento con esta geometría era el correcto, se cosió otro sensor idéntico a este en un tejido más elástico y en sus extremos se incorporó un cierre para poder abrochar el sensor alrededor del cuerpo. En la Figura 49 se observa el sensor definitivo con el cierre incluido, los snap buttons, y el sensor cosido con la geometría comentada.



Figura 49. Sensor preparado para colocarlo sobre un individuo

En la Fig. 41 se muestra el layout y dimensiones del sensor textil propuesto. Como se ve en el esquema, el sensor sigue un patrón de zigzag de aproximadamente 1mm de grosor, 10mm las barras verticales y 5 mm las laterales. La longitud total del sensor sin aplicar tensión es de 76mm.

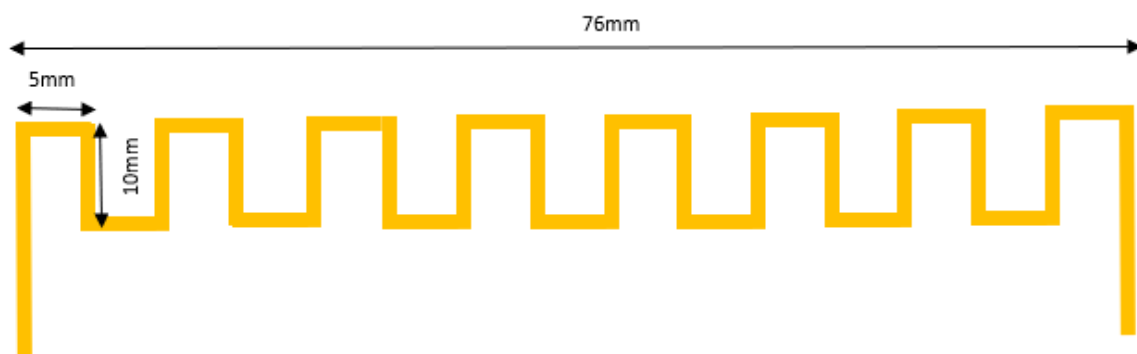


Figura 50. Diseño sensor definitivo

## 7. Medición de las prestaciones del sensor en el tejido

Dado que el objetivo de este trabajo consiste en hacer las mediciones de un sensor resistivo integrado en el textil que mida la respiración a través de la variación de la resistencia, en este apartado se explica el procedimiento realizado para cumplir el objetivo del proyecto.

Para poder calcular la resistencia del sensor se utiliza el sistema explicado en el apartado anterior basado en las dos magnitudes que intervienen en este sensor, la resistencia y la deformación. Este sistema está basado en las ecuaciones siguientes que verifican la relación de la deformación con la resistencia.

$$R_f - R_0 = k(L_f - L_0) \quad (6)$$

$$\Delta R (\%) = \frac{R_f - R_0}{R_0} 100 \quad (7)$$

$$\varepsilon (\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} 100 \quad (8)$$

$R_0$  hace referencia a la resistencia del sensor sin estirar, sin ningún tipo de tensión ejercida.  $L_0$  es la longitud de dicho sensor en ese estado inicial sin estiramiento.  $R_f$  y  $L_f$  son la resistencia y longitud del sensor cuando experimenta un estiramiento. El  $\Delta R$  es el cambio que experimenta la resistencia en consecuencia de la deformación ( $\varepsilon$ ) del sensor.

Con estas ecuaciones se puede calcular el  $\Delta R$  en función de la elongación  $\varepsilon$  y así encontrar la constante elástica  $k$  del sensor.

### 7.1 Estudio previo

Previo a las mediciones del sensor elaborado en este proyecto, se han realizado unas mediciones de otro sensor que ya estaba fabricado en el laboratorio para así comprobar primero que el sistema de medida funcione correctamente en un sensor real (Fig.51). Este sensor es fruto del estudio que dio lugar al artículo *An Alternative Method to Develop Embroidery Textile Strain Sensors* de Marc Martínez-Estrada, Ignacio Gil, Raúl Fernández-García. [31]





Figura 51. Sensor textil de un estudio previo [31]

Para poder medir la resistencia del sensor se realiza el siguiente montaje:

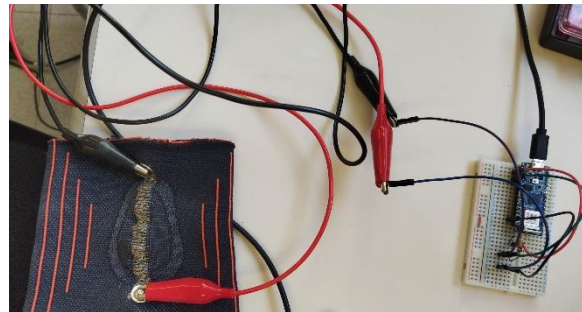


Figura 52. Montaje para realizar las mediciones

Este circuito es como el descrito en el apartado 5.4 solo que en vez de 2 resistencias, hay 1 resistencia de valor conocido ( $10k\Omega$ ) y el sensor. Por tanto, se realizan las conexiones y con el programa que se había preparado en Arduino se calcula la resistencia a tiempo real y de forma continua, con periodos de 100ms.

Los valores obtenidos se vuelcan en un Excel a través del programa PLX-DAQ que permite esa transmisión de datos entre Arduino y Excel de forma simultánea.

Los valores de la resistencia vemos que se mantienen constantes al principio, cuando aún no se aplica ninguna tensión. En el momento en el que se estira de forma uniaxial el tejido, la resistencia aumenta. Por último, cuando se deja estirar la resistencia decrece.

Esto nos indica que cuando la distancia entre los extremos del sensor, es decir, los contactos, aumenta, la resistencia aumenta también. Cuanto más se estira el tejido, más distancia hay y más alto es el valor de la resistencia.

A continuación vemos en la Figura 53 la gráfica generada del incremento de la resistencia respecto al incremento de la longitud.

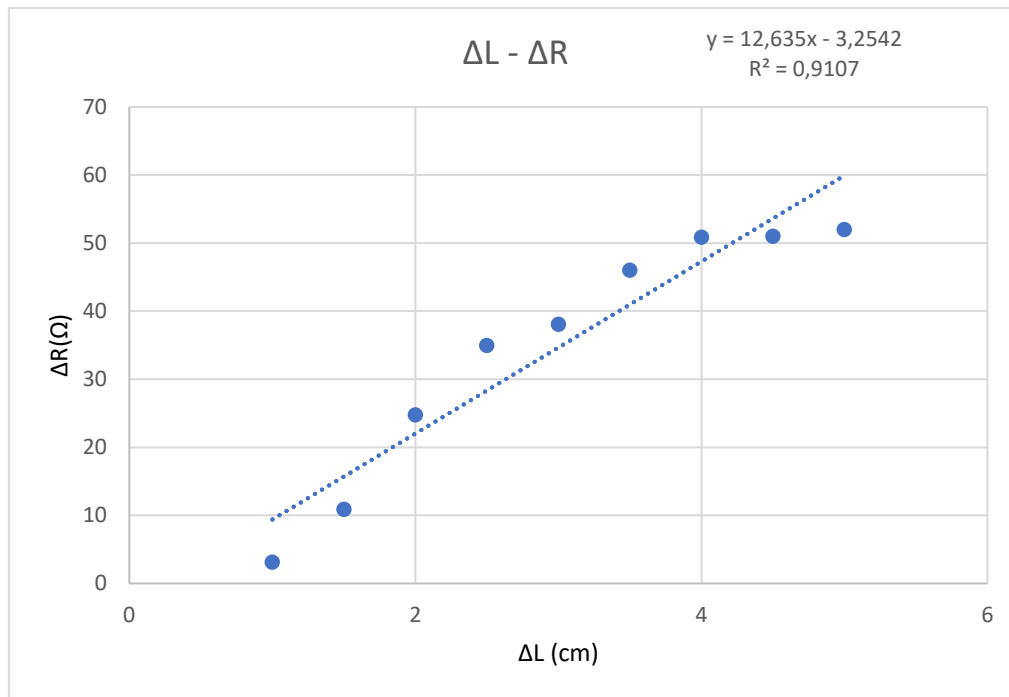


Figura 53. Gráfico  $\Delta L - \Delta R$  del sensor de prueba

Se observa que, tal y como se comentaba, la resistencia aumenta cuando la longitud entre los extremos del sensor también.

Las mediciones se compararán con las del artículo comentado (color azul, antes del lavado) y aproximadamente coinciden, por tanto se concluye que el sistema de medida creado funciona y pasamos a probarlo con el sensor que se ha fabricado.

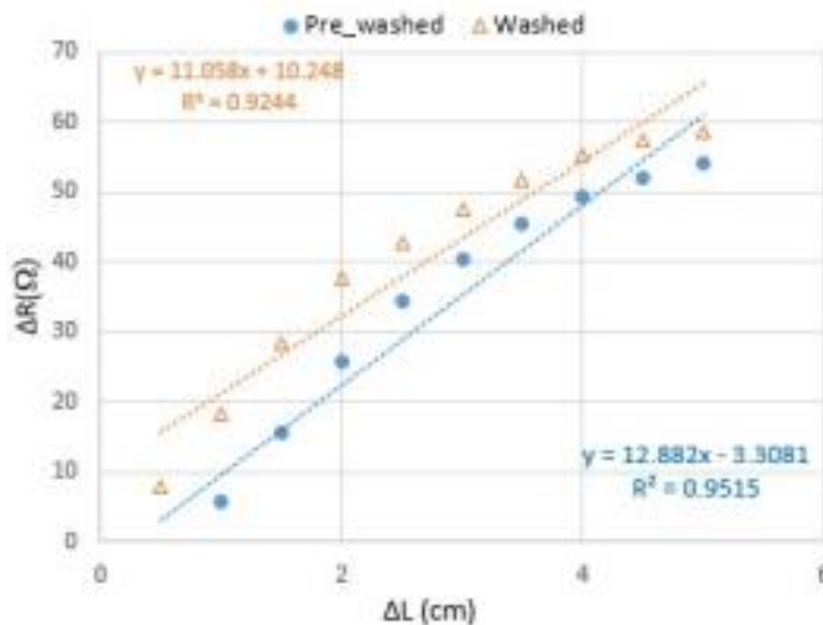


Figura 54. Gráfica  $\Delta L - \Delta R$  del sensor de prueba elaborada en el artículo [32]

## 7.2 Mediciones Sensor

Para entender los datos de la resistencia que se registran, se explicará brevemente el sistema de la respiración.

Entre las dos etapas que conforman la respiración, la interna y externa, nos centraremos en la externa puesto que es la que, con la variación del volumen de la caja torácica, estirará en menor o mayor medida el tejido que contiene el sensor.

La respiración externa consiste en el transporte de oxígeno desde el aire y el transporte de dióxido de carbono fuera del cuerpo.

Entre otros procesos, incluye la ventilación pulmonar y este ocurre como resultado de los movimientos respiratorios de la caja torácica, conocidos como inspiración y espiración.

La inspiración es un proceso activo responsable de contraer el diafragma y por ende aumentar el volumen torácico. Dado que este volumen aumenta más en la dimensión superior-inferior, el sensor se colocará a esa altura para poder medir mejor la respiración humana.

Es importante tener en cuenta que el rango de los movimientos del diafragma varía entre 1,5 cm y 7 cm durante la inspiración profunda y eso implica que la expansión de la caja torácica en el caso de un adulto sano sea de entre 5 y 8 cm. Estos movimientos dependen de muchos factores, como la edad, el sexo, la altura, el peso, la movilidad y elasticidad de las paredes de la caja torácica, la elasticidad del tejido pulmonar, etc. Por tanto, es normal que las medidas varíen según el individuo y la situación que se dé cuando se tomen los datos.

El sensor se ha hecho de tal forma que envuelva todo el cuerpo como una circunferencia ya que es la forma más sencilla de medir la respiración. Previo a las mediciones, se medirá el volumen torácico a nivel de los pezones del individuo.

La frecuencia normal de respiración es de aproximadamente 16 -18 inspiraciones por minuto, de una forma regular y rítmica.

La respiración abdominal (diafragmática) es común para los hombres, mientras que la respiración torácica (torácica) para las mujeres. Por tanto, las medidas se tomarán usando una mujer. [2]

Para realizar las mediciones del sensor a tiempo real, se realizará una toma de datos estirando el sensor con las manos y otra colocando el sensor en el cuerpo.

Por tanto, las primeras medidas se toman colocando el sistema de la siguiente forma:

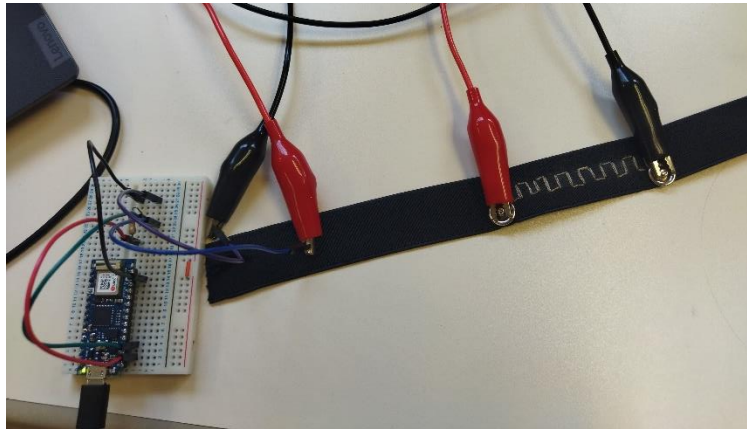


Figura 55. Medición sensor en reposo

Este sensor, como ya se había comentado en la fabricación del sensor, mide 76mm y estirado al máximo 125mm. Con el multímetro vemos que la resistencia cuando el sensor mide 76mm es aproximadamente de 34Ω y cuando se estira hasta medir 125mm, tiene una resistencia de aproximadamente 42Ω. Sustituyendo estos valores en la ecuación 6, obtenemos un valor de k de 0,16327 Ω/mm.

$$R_f - R_0 = k(L_f - L_0) \quad (6)$$

$$k = \frac{42-34}{125-76} = 0,16327 \text{ } \Omega/\text{mm}$$

Por tanto, vemos que este sensor tiene una sensibilidad teórica de 0,1633 Ω/mm La sensibilidad nos indica la mayor o menor variación de la señal de salida por unidad de la magnitud de entrada. Cuanto mayor sea la variación de la señal de salida producida por una variación en la señal de entrada, el sensor es más sensible.

Los valores teóricos con un ΔL de 5mm para cada medida deberían son:

L [mm]	R [Ω]	ΔR [Ω]	ΔL [mm]
76	34,00	0,00	0
81	34,82	0,82	5
86	35,63	1,63	10
91	36,45	2,45	15
96	37,27	3,27	20
101	38,08	4,08	25
106	38,90	4,90	30
111	39,71	5,71	35
116	40,53	6,53	40
121	41,35	7,35	45
125	42,00	8,00	49

Tabla 3. Valores teóricos sensor

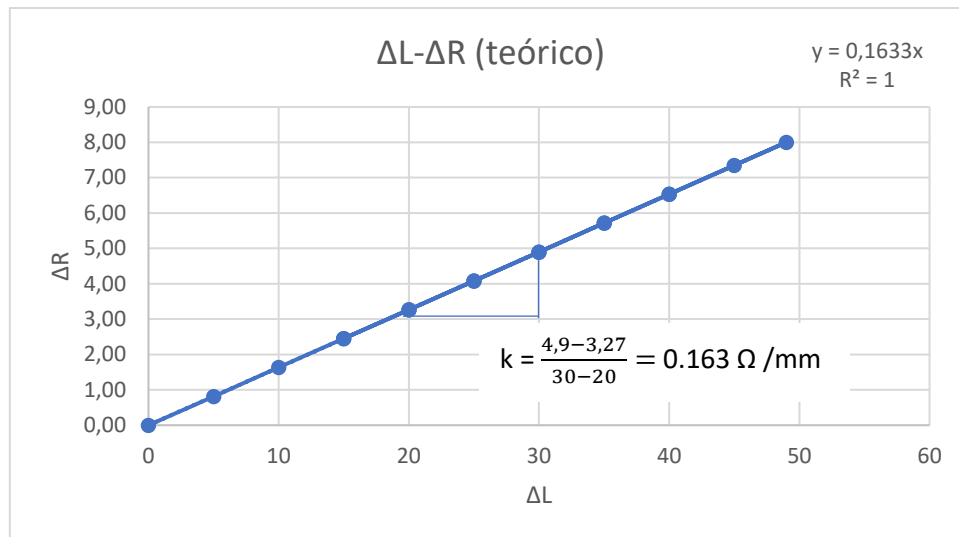


Figura 56. Gráfico teórico  $\Delta L - \Delta R$

En el gráfico de la Figura 56 vemos representados los valores teóricos calculados. Vemos que la sensibilidad corresponde a la pendiente de la recta. Cuanto mayor es la pendiente, mayor es la sensibilidad ya que cuanto mayor es la variación de la resistencia producida por una variación en la longitud del sensor, el sensor es más sensible.

Después del análisis teórico, se procede a obtener los datos del sensor. Dado que la resistencia de las pinzas cocodrilo es muy pequeña (Fig. 57) se considera que prácticamente no afectará de forma importante a la toma de datos del sensor.

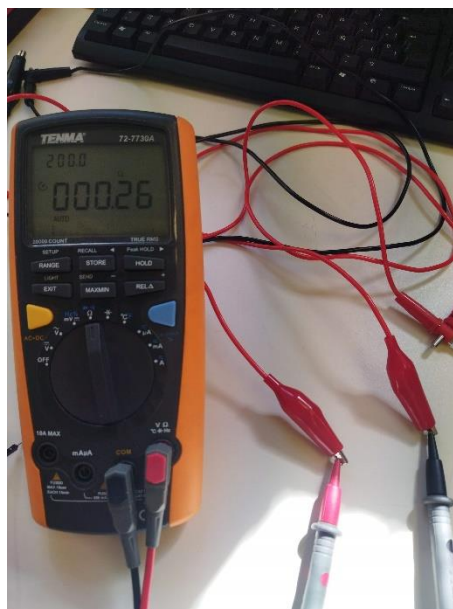


Figura 57. Resistencia pinzas cocodrilo

En la toma de datos a tiempo real del sensor, se obtienen valores cada 100ms. No se dispone de una herramienta para estirar el tejido de forma precisa por lo tanto se estirará manualmente el tejido.

Previo a la representación de los valores registrados, se hace una pequeña limpieza de valores nulos o incoherentes, estos valores seguramente se den por errores con la conexión. Con el multímetro también sucedía.

A continuación vemos las gráficas generadas:

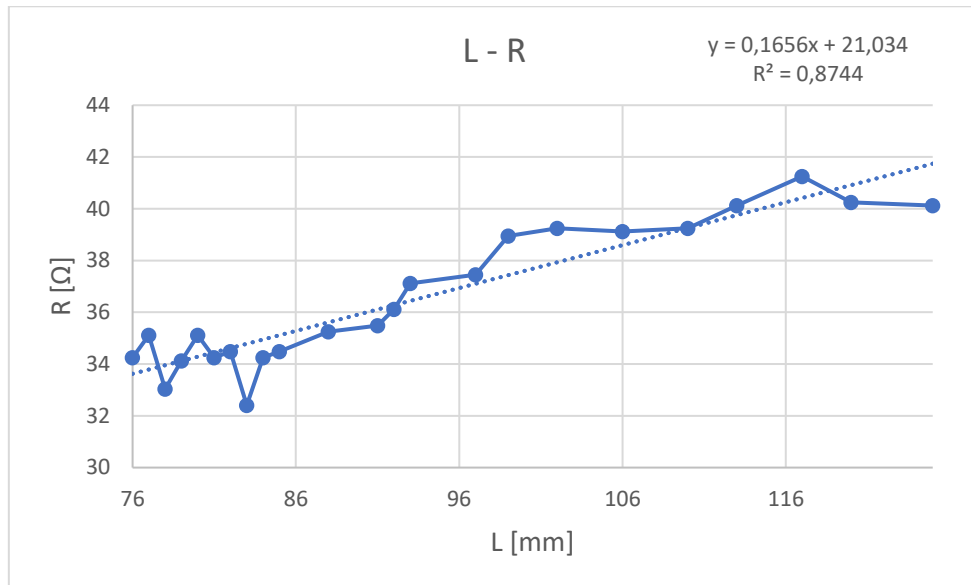


Figura 58. Gráfico Resistencia sensor en función de su longitud

En la Figura 58, vemos que el sensor tiene una sensibilidad de 0,1656. A pesar de las posibles diferencias con los valores teóricos, se observa que la gráfica experimental (Fig.58) y la teórica (Fig. 56) se asemejan. La regresión obtenida experimentalmente, es cercana a 1 y la sensibilidad (pendiente) se parece a la obtenida con el multímetro.

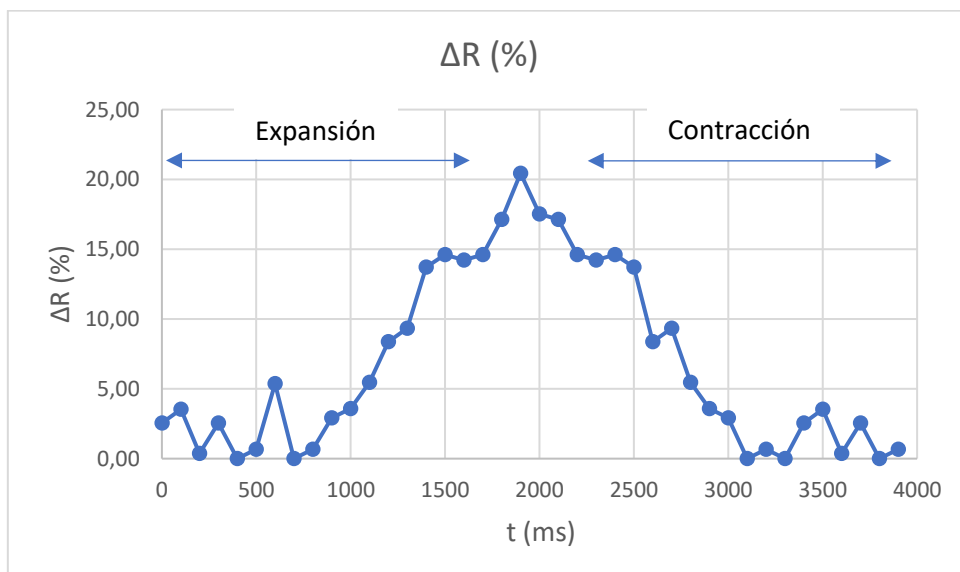
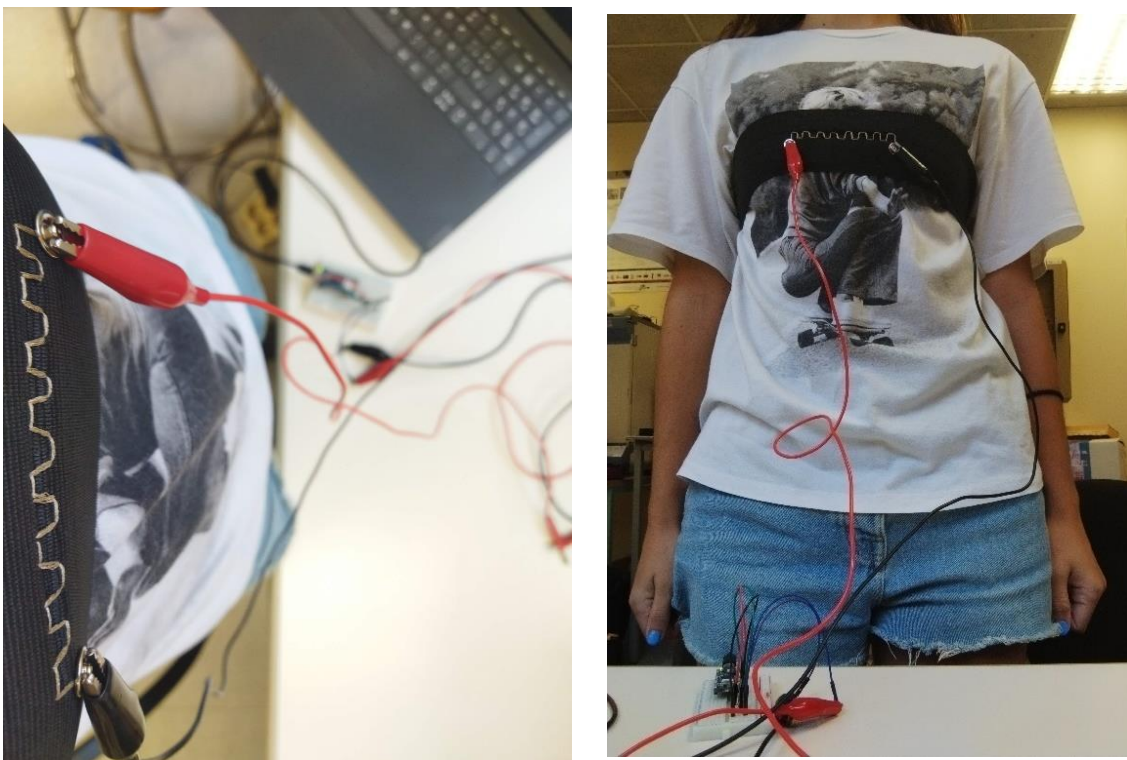


Figura 59. Gráfico % $\Delta R$  del sensor durante 4s

Como ya se había comentado con las medidas del sensor de prueba, en este caso sucede lo mismo. Los valores de la resistencia al principio son constantes ya que aún no se aplica ninguna tensión. En el momento en el que se estira de forma uniaxial el tejido, la resistencia aumenta y cuando se deja estirar la resistencia decrece.

A continuación, el sensor se coloca en el cuerpo de una mujer de edad adulta, en reposo, y de pie, es este caso sobre la misma estudiante (Fig.60). Como se ha comentado, el sensor envuelve todo el cuerpo a la altura del pecho. La longitud total del tejido alrededor del cuerpo donde se coloca el sensor es de 840mm.



*Figura 60. Sensor colocado en un individuo*

Estas medidas se hacen con el fin de obtener unas gráficas en las que se aprecie la expiración e inspiración del individuo y así poder controlar su respiración.

Las medidas se han tomado a tiempo real durante 30 segundos. Como las medidas se toman cada 100ms, esto conlleva 300 medidas. Se intentará mantener ciclos de respiración de 3-4-3, es decir, inspirar durante 3 segundos, retener la respiración durante 4 y exhalar durante 3 segundos.

Después de muchos intentos no se consigue que, al respirar, el movimiento de la caja torácica sea tan elevado y preciso como para obtener unos valores del todo coherentes. El tejido se estira menos de lo esperado y los cambios en la resistencia son pequeños y se mezclan con valores incoherentes debido a las conexiones (dichos valores se eliminan). De todas formas, se presenta a continuación un gráfico con los valores obtenidos.

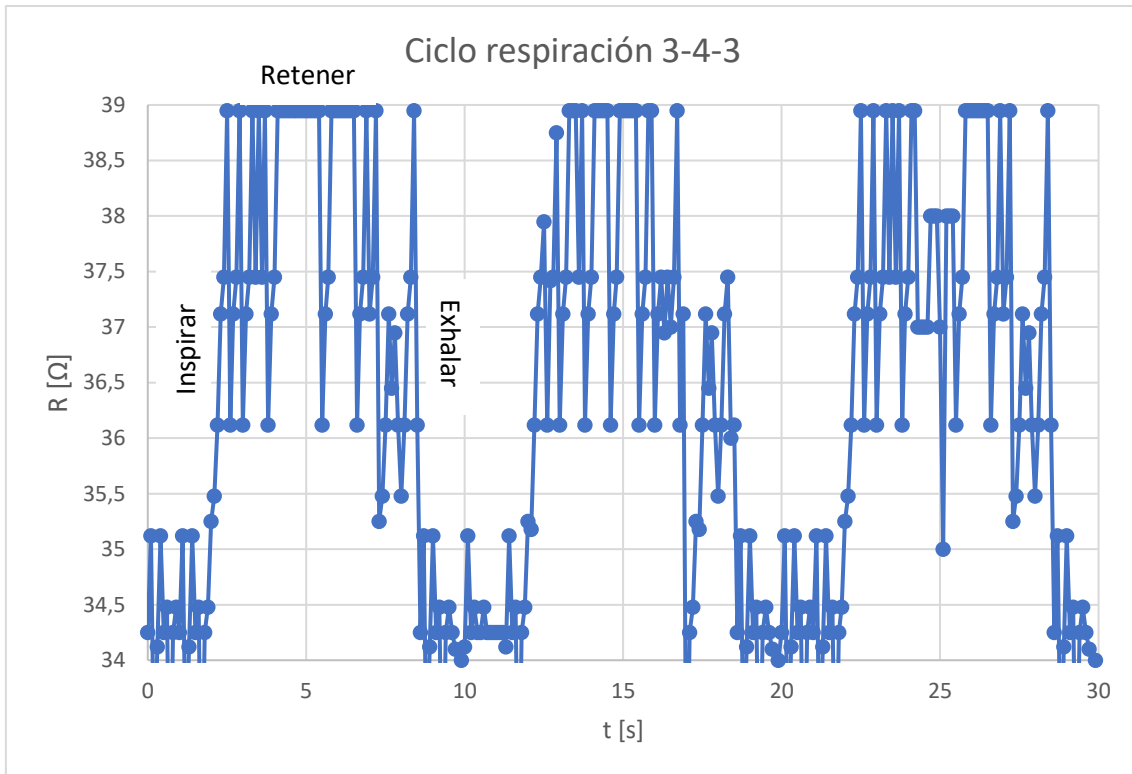


Figura 61. Gráfico respiración 3-4-3

Observamos que no se llega a obtener unos valores de resistencia de 42  $\Omega$  como cuando se estiraba el sensor de forma manual ya que colocando el sensor en el pecho, no se llega a estirar por completo, es decir, no llega a la máxima elongación.

Aunque los datos obtenidos no son del todo exactos, se aprecia el ciclo de la respiración realizado, se puede interpretar el momento en el que se inspira ya que la resistencia va aumentando, el que se retiene la respiración cuando se mantiene aproximadamente un mismo valor de resistencia y cuando se exhala que la resistencia empieza a disminuir hasta los valores iniciales.



A continuació se mostren els valors obtinguts realitzant un altre tipus de cicle de respiració en el que se intentava inspirar i exhalar en períodes curts de 1s.

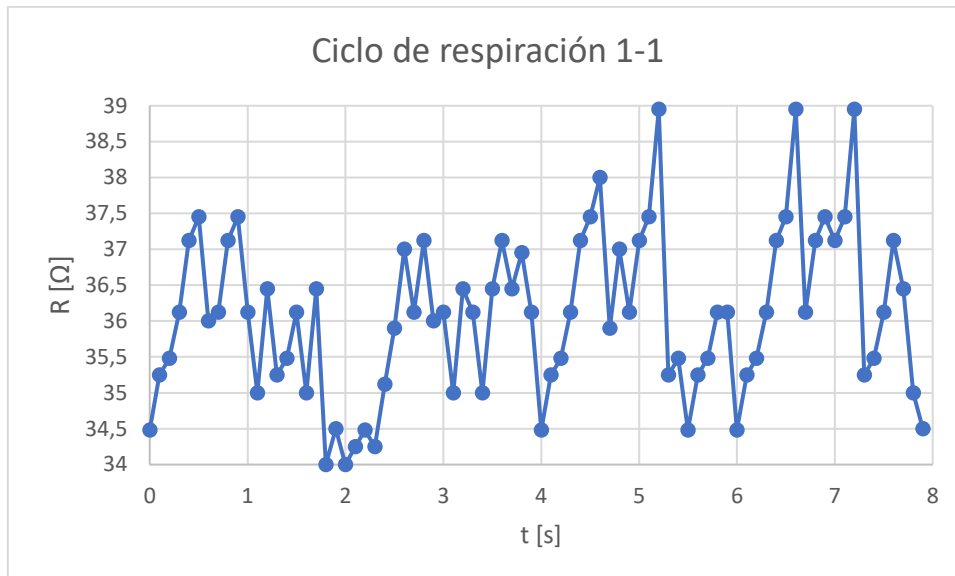


Figura 62. Gràfic respiració 1-1

Con esta gráfica se observa que respirar más rápido empeora un poco los resultados. Aunque las medidas se tomen rápido, cada 100ms, los movimientos rápidos de la caja torácica cuando se respira a este ritmo, hace que haya más desorden en las medidas.

De todas formas sí que se puede contemplar que hay cambios en la respiración respecto al ciclo 3-4-3, por tanto, se pueden identificar patrones de respiración diferentes (Tabla. 1)

## 8. Presupuesto

Es importante tener en cuenta la economía de este proyecto, tanto la fabricación del sensor como su desarrollo e implantación y finalmente su venta.

Es complicado dar números y valores en algunos casos dado que hay cosas que no tienen un valor establecido como tal.

### 8.1 Costes Directos

Los costes indirectos hacen referencia al precio que tienen los recursos utilizados en la construcción del sensor.

Componente/Recurso	Unidades	Cotes unitarios [€/Ud.]	Coste total [€]
Microcontrolador Arduino Nano 33 IoT	1	24,99	24,99
Resistencias (gama de resistencias diferentes)	4	0,1	0,4
Placa de prototipado (83x52x9mm)	1	2,598	2,598
Cables macho a macho (puente)	7	0,241	1,687
Remaches (snap button)	4	0,6495	2,598
Hilo conductor (metros)	5	0,1518	0,759
Tejido/Tela	4	1	4
Aguja de coser	1	3,99	3,99
Cable USB tipo B	1	6,99	6,99
Materiales varios de oficina	1	30	30

Tabla 4. Costes directos

La máquina de coser y el ordenador es material que ya había previamente y no ha supuesto un coste adicional. Los programas utilizados como Arduino o PLX-DAQ tampoco puesto que son gratuitos.

En total, los costes directos suman 78,1€.

### 8.2 Costes Indirectos

Los Indirectos son aquellos que corresponden al uso del material de laboratorio, la mano de obra y otros costes que no se reflejan en la construcción del sensor.

- Coste de material de laboratorio: Uso del multímetro, la bordadora, cables y demás herramientas varias del laboratorio. No se contabilizará el coste puesto que es material de la universidad a disposición del estudiante.
- Coste de mano de obra: este coste comprende la parte de investigación, desarrollo, diseño y testing del proyecto. Considerando un total aproximado de 300h trabajadas por parte de la autora del proyecto y a 20€/h, el coste de la mano de obra supone 6000€.
- Costes varios: transporte, alimentación, electricidad, etc.

Total costes indirectos = 6100€.

Costes totales = Costes directos + Costes indirectos = 6178,1€.

Financiado por la estudiante y la universidad

## 9. Implicaciones medioambientales

A nivel ambiental, si analizamos el ciclo de vida del producto y el desgaste de los sensores, vemos que es un parámetro que depende del uso que tengan y donde esten incorporados.

El sensor de este estudio está pensado para prendas de vestir tanto a nivel deportivo como en el ámbito de la salud así que su uso sería frecuente y por tanto tendría un ciclo de vida más corto.

El coste de fabricación también se ha de tener en cuenta. Hay varias industrias que intervienen en este proceso pero la más influyente en cuanto a medioambiente o la que se podría mejorar en el diseño del sensor es la industria textil ya que es muy contaminante. Se tendría que pensar la forma de hacer el sensor sobre un tejido reutilizable y lo menos contaminante posible dentro del problema tan grande para el medioambiente que supone esta industria.

Es imprescindible hoy en día tener en cuenta el medioambiente, por tanto, se deberá ahorrar material y utilizar materiales reciclados si es posible y mantener el producto lo mejor posible para evitar el desgaste antes de tiempo.

A pesar de las acciones que se puedan tomar para evitar el impacto, o minimizarlo, es un hecho que el sensor tiene cierto impacto medioambiental.

## 10. Planificación

A continuación se muestra la planificación por semanas del proyecto. Empieza en la semana del 07/02/2022 y acaba la del 11/07/2022. Se realizarán un total aproximado de 300h.

Esta planificación se hizo la primera semana, ha habido variaciones principalmente en el número de horas de trabajo por semana, igualmente, se ha seguido prácticamente el mismo orden, solo cambiaba el tiempo de dedicación por cada actividad.

Semana	Tiempo dedicado (horas)		Actividad	Tasa (€/h)	Coste total (€)
1	5	Reunión tutor	Planificación e inicio del Project Charter	20	100
2	15		Buscar información Sensores y Arduino	20	300
3	15		Buscar información Sensores y Arduino	20	200
4	20		Arduino (placa)	20	400
5	20	Entrega Project Charter	Project Charter	20	400
6	15		Antecedentes y estado del arte	20	300
7	15		Sensores en el mundo	20	300
8	10		Aplicaciones wearables	20	200
9	20	Seguimiento 1	Redacción	20	400
10	15		Redacción	20	300
11	15		Redacción	20	300
12	10	Seguimiento 2	Arduino	20	200
13	15		Arduino	20	300
14	10		Presupuesto	20	200
15	15	Seguimiento 3	Arduino	20	300
16	10		Conclusiones y Recomendaciones	20	200
17	20		Bibliografía y Normativa	20	400
18	15		Fabricación y diseño sensor	20	300
19	10		Redacción	20	200
20	20	Entrega Final TFM	Redacción	20	400
21	5		Presentación	20	100
22	5		Presentación	20	100
23	5	Presentación	Presentación	20	100

Tabla 5. Planificación tareas

Descripción de las tareas que se desarrollarán:

- Introducción:
  - Planificación: organizar todas las tareas con un orden lógico.
  - Buscar información: se hará una búsqueda general al principio del proyecto, principalmente sobre sensores resistivos en tejidos y Arduino, eso no quita que durante todo el proyecto se busque información.

- Project Charter: plantear el objeto, el alcance, las especificaciones básicas y la justificación.
- Sensores Resistivos en tejidos:
  - Antecedentes y estado del arte.
  - Sensores resistivos en tejidos en el mundo en 2022.
  - Aplicaciones, Riesgos, Ventajas e Inconvenientes
- Arduino: buscar información y programar la placa Arduino
- Desarrollo: configurar, diseñar, fabricar y simular el sensor resistivo
- Presupuesto: estudiar el coste técnico de redacción del proyecto y el coste de ejecución.
- Resultados: resumen medidas, conclusiones y recomendaciones.
- Bibliografía: poner la bibliografía ordenada y con el formato que toca.
- Normativa: buscar una normativa del sensor.
- Redacción: acabar de redactar todo bien y revisar que todo tenga coherencia.
- Presentación: preparar la presentación del proyecto.

A continuación se muestra el diagrama de Gantt (Fig. 62), se fue completando hasta la entrega del Project Charter.

## Diagrama de Gantt

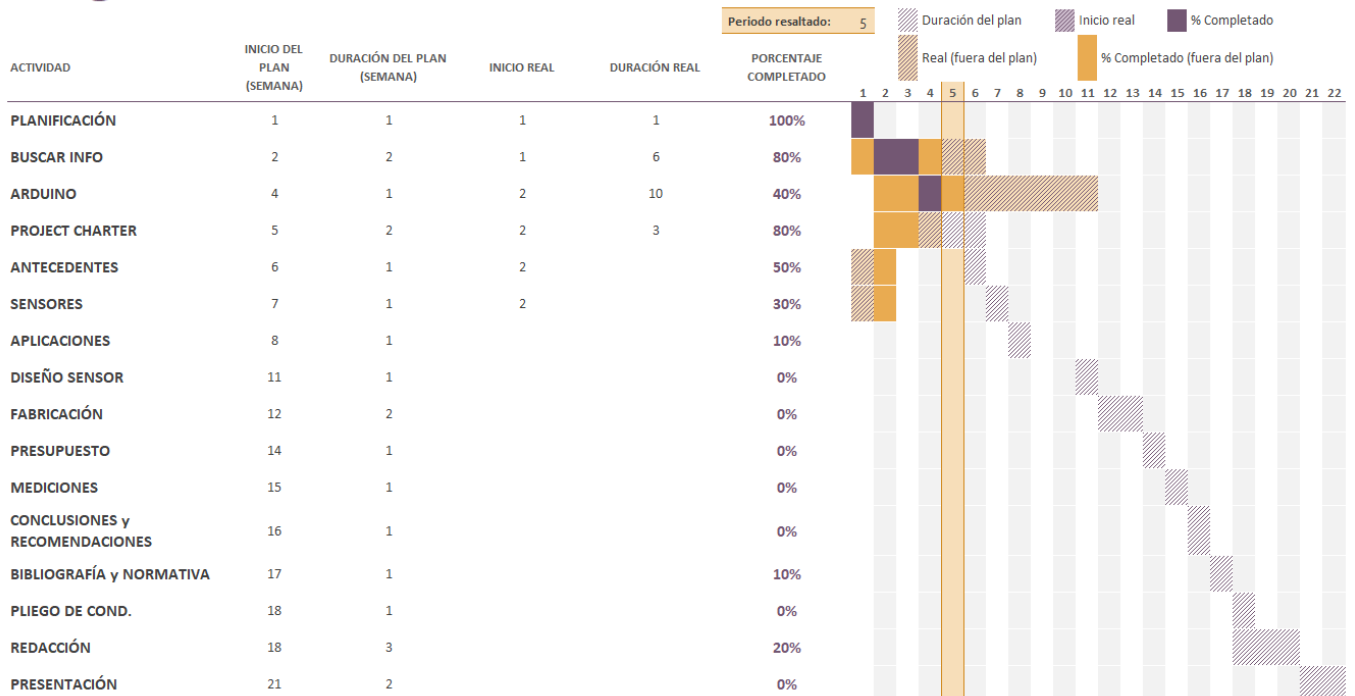


Figura 63. Diagrama de Gantt

Por último se muestra también la dependencia de tareas que se realiza al iniciar el trabajo.

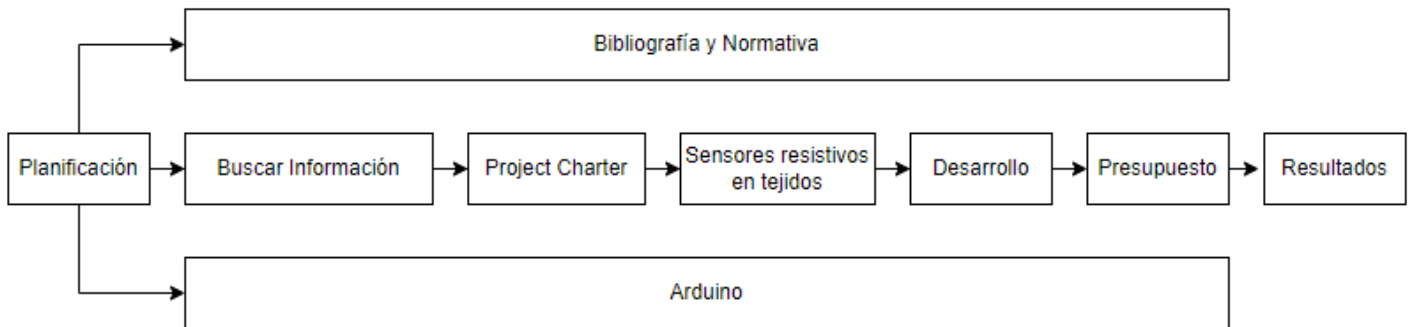


Figura 64. Dependencia tareas

## 11. Conclusiones

Como se ha visto durante todo el proyecto, el mundo de los tejidos inteligentes está en auge en muchos sectores. Con este estudio se ha demostrado este hecho ya que el sensor diseñado se puede utilizar en distintos ámbitos como en el sanitario, el deportivo, el militar, el doméstico, etc.

Sobre el diseño del sensor se ha visto que existen muchas combinaciones de materiales y diseños, esto requiere de un estudio más extenso pero también tiene la ventaja de que se pueden hacer diseños personalizados según el producto y el uso.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que los sensores bordados con hilo conductor sobre un tejido elástico, permiten construir un sistema que mide y monitorea la respiración.

Prestaciones sensor:

Tipo de sensor	Wearable	Textil	Área (mm <sup>2</sup> )	Sensibilidad	Localización	Técnica	Parámetro medido
Resistivo	✓	✓	76 x 15	0,1656	Pecho	Movimiento caja torácica	Resistencia

*Tabla 6. Prestaciones sensor*

Los resultados en general son positivos pero no son del todo satisfactorios puesto que no se ha llegado 100% al objetivo final, de todas formas es un buen comienzo y siguiendo las recomendaciones descritas posteriormente, el proyecto tendría futuro en el mundo de los textiles inteligentes.

En este proyecto se habla de utilizar el sensor para medir la respiración pero como se comenta, hay muchas aplicaciones en las que se podría utilizar un sistema parecido.

Todo este estudio ha permitido realizar un pequeño avance en la fusión de los elementos textiles y los electrónicos, para más adelante conseguir productos reales que resuelvan problemas, como en este caso, el monitoreo de la respiración.

Por último concluir diciendo que con este trabajo se cierra una etapa de 7 años en la UPC. Es un proyecto en el que queda constancia de los valores que aporta una ingeniería industrial ya que a pesar de ser un trabajo que corresponde a otras vertientes de la ingeniería, con la carrera y el máster uno está preparado para enfrentarse a proyectos como este.

## 12. Recomendaciones

La primera recomendación sería añadir al estudio la optimización del sensor 3D resistivo con el software CST Microwave Studio.

La segunda y más importante, sería seguir probando diferentes tejidos y geometrías para conseguir 100% el objetivo del proyecto que era monitorizar la respiración a tiempo real.

Sería necesario condicionar, modificar o amplificar la salida para generar información fiable y útil. Ya que los estímulos de entrada influyen en las medidas tomadas

En un trabajo futuro se probaría el sensor en otras posiciones como por ejemplo el abdomen. También con diferentes individuos y en situaciones distintas como haciendo deporte, durmiendo, caminando, etc.

Después se podría mejorar el programa añadiendo las librerías necesarias para trabajar por Bluetooth y WIFI. En casos reales así sería como tendría que funcionar, la señal sería grabada por un microprocesador y se transmitiría a través de Bluetooth a un ordenador para después procesarla.

Otra recomendación sería mejorar el diseño para incorporar el sensor de forma completa en una pieza de ropa y convertir la geometría del sensor en un patrón ordinario impreso en la prenda. Para ello se incluiría un estudio comparando distintos sensores y sus prestaciones.



## 13. Bibliografía

1. L. Guo, L. Berglin and Y.J. Li; H. Mattila; A.Kalantar Mehrjerdi and M. Skrifvars. (2011, July). 'Disappearing Sensor'-Textile Based Sensor for Monitoring Breathing. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/252038151\\_'Disappearing\\_Sensor'Textile\\_Based\\_Sensor\\_for\\_Monitoring\\_Breathing](https://www.researchgate.net/publication/252038151_'Disappearing_Sensor'Textile_Based_Sensor_for_Monitoring_Breathing)
2. Janusz Zięba, Michał Frydrysiak; Jan Błaszczuk. (2012). Textronic clothing with resistance textile sensor to monitoring frequency of human breathing. Retrieved from <https://publications.waset.org/10078/noninvasive-wireless-textronic-system-to-breath-frequency-measurement>
3. Chang- Ming Yang, Wen-Tzeng Huang, Tsu-Lin Yang, Mi-chi Hsieh, Chi-tso Liu. (2008, June). Textiles Digital Sensors for Detecting Breathing Frequency. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/224321430\\_Textiles\\_digital\\_sensors\\_for\\_detecting\\_breathing\\_frequency](https://www.researchgate.net/publication/224321430_Textiles_digital_sensors_for_detecting_breathing_frequency)
4. Martina Aurora Costa Angeli, Mallikarjun Madagalam , Mattia Petrelli , Silvia Pogliaghi Alessandra Scarton, Pietro Ibba, Enrico Avancini, Federico Gori; Roberto Biasi, Luisa Petti and Paolo Lugli. (2021, October). Assessing the role of textiles in the performance of wearable screen-printed strain sensors for breathing rate monitoring. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/357147085\\_Assessing\\_the\\_role\\_of\\_textiles\\_in\\_the\\_performance\\_of\\_wearable\\_screen-printed\\_strain\\_sensors\\_for\\_breathing\\_rate\\_monitoring](https://www.researchgate.net/publication/357147085_Assessing_the_role_of_textiles_in_the_performance_of_wearable_screen-printed_strain_sensors_for_breathing_rate_monitoring)
5. Agcayazi, T.; Yokus, M.; Gordon, M.; Ghosh, T.; Bozkurt, A. (2017, November). A stitched textile-based capacitive respiration sensor. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/322214154\\_A\\_stitched\\_textile-based\\_capacitive\\_respiration\\_sensor](https://www.researchgate.net/publication/322214154_A_stitched_textile-based_capacitive_respiration_sensor)
6. Sifuentes, E.; Cota-Ruiz, J.; González-Landaeta, R. (2016, May). Respiratory rate detection by a time-based measurement system. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/304938408\\_Respiratory\\_Rate\\_Detection\\_by\\_a\\_Time-Based\\_Measurement\\_System#:~:text=This%20paper%20proposes%20a%20system,near%20the%20nostrils%2C%20is%20used.](https://www.researchgate.net/publication/304938408_Respiratory_Rate_Detection_by_a_Time-Based_Measurement_System#:~:text=This%20paper%20proposes%20a%20system,near%20the%20nostrils%2C%20is%20used.)
7. Alejandro Jiménez Pallares. (2020). Diseño electrónico de un sensor capacitivo para la medida de frecuencia respiratoria. Retrieved from <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/106804/TFG-3314-JIMENEZ%20PALLARES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. Arduino (2022). Arduino Nano 33 IoT. Retrieved from <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano-33-iot>
9. Arduino (2022). Arduino BLE. Retrieved from [https://www.arduino.cc/en/Reference/ArduinoBLE?\\_gl=1\\*\\_cuzh7c\\*\\_ga\\*MTY3MjMyMTAxNy4xNjQ0Mzk1Mjky\\*\\_ga\\_NEXN8H46L5\\*MTY0NDM5NTI5MS4xLjEuMTY0NDM5NjY2Ni4w](https://www.arduino.cc/en/Reference/ArduinoBLE?_gl=1*_cuzh7c*_ga*MTY3MjMyMTAxNy4xNjQ0Mzk1Mjky*_ga_NEXN8H46L5*MTY0NDM5NTI5MS4xLjEuMTY0NDM5NjY2Ni4w)

10. Wordpress (2022). Aprendiendo Arduino. Sensores Arduino. Retrieved from [Sensores Arduino | Aprendiendo Arduino \(wordpress.com\)](#) (Bluetooth)
11. Programafacil (2022). Arduino Nano il capo de la familia Arduino Nano. Retrieved from <https://programafacil.com/blog/arduino-blog/familia-arduino-nano/>
12. DealerWorld (2022, February). El mercado de wearables seguirá creciendo en 2022. Retrieved from [El mercado de wearables seguirá creciendo en 2022 | Mercado en cifras | DealerWorld](#)
13. Angel Custodio Ruiz, Ramon Bragós Bardía, Ramon Pallàs Areny. (1999, December). Sensores Inteligentes: Una historia con futuro. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/9553/Article003.pdf>
14. Marcos Martínez. (2017, August). ¿Sabes cuál fue el primer sensor conectado de la historia? Retrieved from <https://www.nobbot.com/general/primer-sensor-conectado/>
15. R. Pallás Areny, J. Fraden, H.N. Norton, S. Middelhoek. (2022). Sensores. Retrieved from <https://www.ele.uva.es/~lourdes/docencia/Master IE/Sensores.pdf>
16. Ntcsensors (2022). ¿Qué es el sensor resistivo? Retrieved from [https://ntcsensors.com/Qu\\_es\\_el\\_sensor\\_resistivo/](https://ntcsensors.com/Qu_es_el_sensor_resistivo/)
17. Enrique Mandado Pérez y Antonio Murillo Roldan (2022). Sensores y acondicionadores. Retrieved from [https://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas\\_statics/sensores/temas/SA\\_TEMA\\_04-RESISTIVOS\\_1\\_.pdf](https://libroweb.alfaomega.com.mx/book/487/free/ovas_statics/sensores/temas/SA_TEMA_04-RESISTIVOS_1_.pdf)
18. Wikipedia (2022). Sensor Capacitivo. Retrieved from [https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_capacitivo](https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_capacitivo)
19. Joan Pla Company (2016, December). Integrados en prendas textiles deportivas para la práctica del triatlón. Retrieved from [CARACTERIZACIÓN DE SENSORES INTEGRADOS EN PRENDAS TEXTILES DEPORTIVAS PARA LA PRÁCTICA DEL TRIATLÓN. \(upv.es\)](#)
20. Iberdrola, S.A (2022). La tecnología 'wearable', mucho más que un complemento. Retrieved from [Tecnología wearable: qué es, tipos de dispositivos y ejemplos - Iberdrola](#)
21. Javier Luque Ordóñez (2016). Dispositivos y tecnologías wearables. Retrieved from [041001.pdf \(acta.es\)](#)
22. Alejandro Sanz Repiso (2020, September). Dispositivos Wearables: Aplicaciones en el ámbito de la medicina y la salud. Retrieved from [TFG-I-1700.pdf \(uva.es\)](#)
23. Ghasemzadeh, H.; Ostadabbas, S.; Guenterberg, E.; Pantelopoulos, A. (2013, February). Wireless medical-embedded systems: A review of signal-processing techniques for classification. IEEE Sens. J. 2013, 13, 423–437. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/260636464\\_Wireless\\_Medical-Embedded\\_Systems\\_A\\_Review\\_of\\_Signal-Processing\\_Techniques\\_for\\_Classification](https://www.researchgate.net/publication/260636464_Wireless_Medical-Embedded_Systems_A_Review_of_Signal-Processing_Techniques_for_Classification)

24. Madeira (2022). Silver plated threads for technical embroidery and sewing. Retrieved from [HC Flyer Lepporello A5 2019 MULTI VERSION.indd \(madeira.com\)](#)
25. Digi-key (2022). Calculadora de código de colores de resistencias de 4 bandas. Retrieved from [Calculadora de código de colores de resistencias: 4 bandas, 5 bandas, 6 bandas | DigiKey Electronics](#)
26. Blog Electrogate (2022). Ohmmeter con Arduino. Retrieved from [Ohmímetro con Arduino - Eletrogate Blog](#)
27. Instructables circuits (2022). Medir Una Resistencia Con Arduino. Retrieved from [\[Básico\] Medir Una Resistencia Con Arduino : 3 Steps - Instructables](#)
28. Senthil Kumar Kirthika, Godwin Ponraj, and Hongliang Ren (2017, June). Fabrication and Comparative Study on Sensing Characteristics of Soft Textile-Layered Tactile Sensors. Retrieved from [Fabrication and Comparative Study on Sensing Characteristics of Soft Textile-Layered Tactile Sensors | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore](#)
29. Johannes Mersch , Carlos A. Gómez Cuaran, Aleksandr Vasilev , Andreas Nocke,Chokri Cherif, and Gerald Gerlach (2021, November). Stretchable and Compliant Textile Strain Sensors. Retrieved from [\(PDF\) Stretchable and Compliant Textile Strain Sensors \(researchgate.net\)](#)
30. Shieldex (2022). Shieldex 117/17 x2 HCB. Retrieved from [Shieldex® 117/17 x2 HCB – Shieldex® – Metallized Technical Textiles](#)
31. Marc Martínez-Estrada, Ignacio Gil, Raúl Fernández-García (2021). An Alternative Method to Develop Embroidery Textile Strain Sensors. Retrieved from [Textiles | Free Full-Text | An Alternative Method to Develop Embroidery Textile Strain Sensors \(mdpi.com\)](#)
32. Qiao Jun Liew , Aiman Sajidah Abd Aziz, Hing Wah Lee,Mai Woon Lee,Huzein Fahmi Hawari, Mohd Haris Md Khir (2020, November). Inkjet-Printed Flexible Temperature Sensor Based on Silver Nanoparticles Ink †Retrieved from [Engineering Proceedings | Free Full-Text | Inkjet-Printed Flexible Temperature Sensor Based on Silver Nanoparticles Ink \(mdpi.com\)](#)
33. AENOR (2022). Retrieved from: [Buscador de Normas UNE - AENOR](#)
34. Tecnología + Informática (2022). La tecnología vestible. Wearables: la ropa inteligente. Retrieved from: [Wearables: ropa inteligente | Tecnología + Informática \(tecnologia-informatica.com\)](#)
35. PLX-DAQ (2022). Retrieved from [PLX-DAQ - Parallax](#)
36. Mariam El Gharbi, Raúl Fernández-García , Ignacio Gil (2021, November). Embroidered wearable Antenna-based sensor for Real-Time breath monitoring. Retrieves from: [Embroidered wearable Antenna-based sensor for Real-Time breath monitoring - ScienceDirect](#)

## 14. Normativa

Las normativas aplicables y vigentes se citarán a continuación:

- La norma IEEE-P1451 (Transducer to Microprocessor Interface) fija las directivas de los sensores inteligentes, así como la comunicación con el bus digital.
- Real Decreto 44/2022, de 18 de enero, por el que se establecen determinadas cualificaciones profesionales de las familias profesionales Textil, Confección y Piel y Transporte y Mantenimiento de Vehículos, que se incluyen en el Catálogo Nacional de Cualificaciones Profesionales.
- UNE-EN 62026-2:2013/A1:2019. Aparata de baja tensión. Interfaces para dispositivos controladores (CDIs). Parte 2: Interfaz del sensor/actuador (AS-i) (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en enero de 2020.)