

Resultado intelectual IO2: eBook

DESARROLLO DE TEXTILES MÉDICOS, SENSORIALES Y DE PROTECCIÓN EN EL CONTEXTO DE LA ECONOMÍA EUROPEA Y LA DIGITALIZACIÓN

Edición: Daiva Mikučionienė (KTU)
Ginta Laureckienė (KTU)

El apoyo de la Comisión Europea a la producción de este ebook no constituye una aprobación de los contenidos, que reflejan únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en el mismo.

© 2021-2023 Socios del Consorcio DIGITEX. Todas las marcas comerciales y otros derechos sobre productos de terceros mencionados en este documento son reconocidos y propiedad de sus respectivos titulares.

RESUMEN

El proyecto DIGITEX tiene como objetivo apoyar enfoques innovadores y tecnologías de aprendizaje digital para acelerar la innovación, la enseñanza y el aprendizaje en el campo del diseño de textiles médicos, protectores, sensoriales e inteligentes en 3D, la realización de pruebas y la fabricación de productos avanzados e innovadores para la atención sanitaria (equipos de protección, dispositivos wearables de monitorización) en el contexto de la economía digital.

Este libro ofrece una visión global de los dispositivos vestibles integrados en el textil, desde la perspectiva del investigador y del usuario final. El objetivo es proporcionar el veredicto sobre todos los aspectos relativos a la integración y eficiencia de dichos dispositivos vestibles basados en textiles para la asistencia sanitaria y la protección. El diseño y la fiabilidad de los sistemas wearables se presentan desde la perspectiva de la aceptación y la usabilidad por parte del usuario final. Además, se presenta el papel de los algoritmos de inteligencia artificial utilizados para proporcionar gemelos digitales para la atención sanitaria y la protección. El ecodiseño de las tecnologías vestibles se presenta en estrecha relación con los aspectos de comodidad y reutilización o reciclaje de los componentes en el contexto de la necesidad de una economía circular. Los textiles basados en dispositivos ponibles para equipos de protección y atención sanitaria serían un excelente recurso para investigadores, diseñadores y académicos en fase inicial o avanzada interesados en el desarrollo de tecnologías ponibles integradas en textiles.



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Capítulo 1. HISTORIA | 5 |
| <i>Md. Reazuddin Repon y Daiva Mikucioniene, Universidad Tecnológica de Kaunas, Lituania</i> | |
| Capítulo 2. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN | 12 |
| <i>Md. Reazuddin Repon y Daiva Mikucioniene, Universidad Tecnológica de Kaunas, Lituania</i> | |
| Capítulo 3. MATERIALES AVANZADOS PARA LA ATENCIÓN SANITARIA | 17 |
| <i>Md. Reazuddin Repon, Rimvydas Milašius y Daiva Mikučioniene, Universidad Tecnológica de Kaunas, Lituania</i> | |
| Capítulo 4. MATERIALES AVANZADOS PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN | 23 |
| <i>David Gómez, AEI Tèxtils, Desarrollo empresarial, Terrassa, Barcelona, España</i> | |
| Capítulo 5. MATERIALES AVANZADOS PARA LA PROTECCIÓN TÉRMICA | 27 |
| <i>Michail Delagrammatikas, Desarrollo del pensamiento creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia</i> | |
| Capítulo 6. MATERIALES AVANZADOS PARA LA ENERGÍA | 32 |
| <i>Michail Delagrammatikas, Desarrollo del pensamiento creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia</i> | |
| Capítulo 7. MATERIALES AVANZADOS PARA LA ATENUACIÓN ELECTROMAGNÉTICA | 37 |
| <i>Razvan Radulescu y Raluca Aileni, INCDTP, Bucarest, Rumanía</i> | |
| Capítulo 8. MATERIALES AVANZADOS PARA SENSORES DE DEFORMACIÓN | 43 |
| <i>Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina y Bodoga Alexandra, Universidad Técnica "Gheorghe Asachi", Rumanía</i> | |
| Capítulo 9. MATERIALES AVANZADOS PARA SENSORES DE PRESIÓN | 48 |
| <i>Aileni Raluca Maria, Stroe Cristina y Radulescu Razvan, INCDTP, Rumanía</i> | |
| Capítulo 10. MATERIALES AVANZADOS PARA ACTUADORES | 53 |
| <i>Aileni Raluca Maria y Cristina Stroe, INCDTP, Rumanía</i> | |
| Capítulo 11. DEFINICIONES, DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS MATERIALES SENSORIALES | 58 |



*Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis y Ioannis Chronis, Universidad de
Ática Occidental, Grecia*

Capítulo 12. EVALUACIÓN DEL CONFORT SENSORIAL 63

David Gómez, AEI Tèxtils, Desarrollo empresarial, Barcelona, España

Capítulo 13. MATERIALES FOTÓNICOS PARA APLICACIONES SENSORIALES 68

*Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis y Ioannis Chronis, Universidad de
Ática Occidental, Grecia*

Capítulo 14. DAÑOS EN LOS E-TEXTILES 74

*Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina y Bodoga Alexandra, Universidad Técnica
"Gheorghe Asachi", Rumanía*

Capítulo 15. LAVABILIDAD DE LOS E-TEXTILES, ESTÁNDARES Y NORMAS 80

David Gómez, AEI Tèxtils, Desarrollo empresarial, Barcelona, España

Capítulo 16. ECODISEÑO PARA UN DESARROLLO TEXTIL INTELIGENTE 86

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

Capítulo 17. MATERIALES TEXTILES INTELIGENTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS 92

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

Capítulo 18. CÓMO TRATAR LOS RESIDUOS TEXTILES INTELIGENTES 99

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

Capítulo 19. CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS TEXTILES INTELIGENTES POR 3R
CONCEPTO 103

*Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina y Bodoga Alexandra, Universidad Técnica
"Gheorghe Asachi", Rumanía*

Capítulo 20. DESARROLLO DE TEXTILES INTELIGENTES SOSTENIBLES 108

Athanasios Panagiotopoulos y Georgios Priniotakis, UNIWA, Grecia

Capítulo 21. TOXICIDAD EN TEXTILES INTELIGENTES 114

Olga Papadopoulou, Creative Thinking Development, Grecia



Capítulo 1. HISTORIA

Md. Reazuddin Repon y Daiva Mikucioniene, Universidad Tecnológica de Kaunas, Lituania.

Resumen. La investigación sobre tejidos inteligentes representa un nuevo modelo de desarrollo de soluciones innovadoras y creativas para la integración de la electrónica en entornos atípicos y dará lugar a nuevos avances científicos. La capacidad de combinar tecnologías de fabricación textil y electrónica para funcionalizar superficies de gran superficie a gran velocidad es una motivación fundamental para la investigación de los tejidos inteligentes. En este capítulo repasamos la historia del desarrollo de los textiles inteligentes y presentamos las principales tendencias en este campo. Por último, presentamos nuestras perspectivas en este campo y una predicción para el futuro.

1.1 Historia del desarrollo de los textiles inteligentes

Este repaso histórico de los textiles inteligentes permitirá al lector comprender mejor su evolución. La innovación textil de hace 27.000 años podría disputarse como el primer invento material de la humanidad [1]. El telar de punto, inventado por William Lee en 1589 [2], la lanzadera volante, inventada por John Kay en 1733, y la hilandera, inventada por James Hargreaves hacia 1765 [3], fueron inventos importantes que transformaron la sociedad y sentaron las bases de la primera revolución industrial. El uso de diademas luminosas en el ballet La Farandole en 1883 fue uno de los primeros ejemplos de textiles inteligentes [4]. Los textiles electrónicos se dividen en tres generaciones en función de la integración de la electrónica en los textiles: poner electrónica o circuitos en una prenda (primera generación), tejidos funcionales como sensores e interruptores (segunda generación) e hilos funcionales (tercera generación) [5]. La figura 1.1 muestra la evolución de los textiles electrónicos en una línea de tiempo.

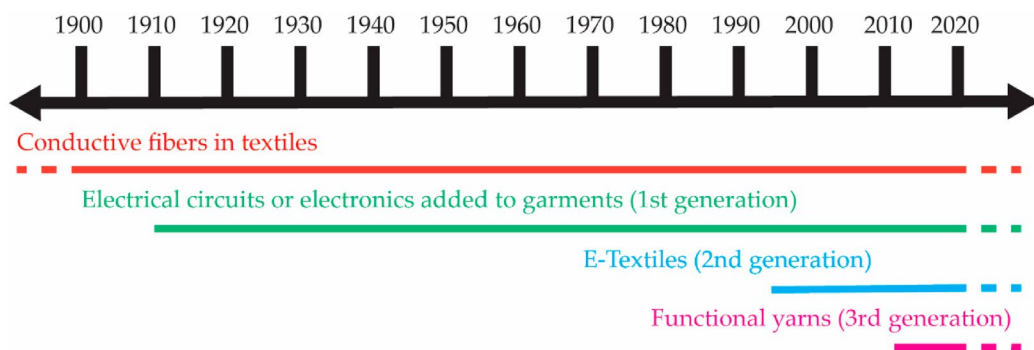


Figura 1.1 Evolución de los textiles electrónicos a lo largo del tiempo [5]

Aunque las aplicaciones médicas de la electricidad en la ropa, como corsés y cinturones, se estudian desde 1850, el mundo científico sólo se ha interesado recientemente por las aplicaciones eléctricas vestibles (en particular, la informática vestible) [6]. Edward Thorpe y Claude Shannon crearon el primer ordenador portátil en 1955 [7]. Los ordenadores que

se llevan puestos se caracterizan por la falta de conexión entre el equipo electrónico del usuario y su ropa. A principios de 1990, la informática vestible evolucionó hacia los textiles inteligentes, con funcionalidades electrónicas incorporadas más íntimamente a la ropa. El nivel de integración de los componentes "inteligentes" con la estructura textil se ilustrará paso a paso en esta sección.

Primer paso. El textil inteligente se quedó estancado y se dedicó al concepto de informática vestible creando una plataforma informática textil. Un objetivo importante era crear tecnologías de interconexión fácilmente reconfigurables dentro de los textiles. Se emplearon fibras e hilos y se limitó la dimensión de la función. En los materiales textiles integrados se observó una única funcionalidad, como la conductividad eléctrica u óptica. Para lograr el rendimiento deseado del sistema, estas interconexiones se emparejaron con componentes estándar habituales en el mercado. La Georgia Tech Wearable Motherboard (GTWM) fue, por ejemplo, uno de los primeros textiles inteligentes creados a partir de 1996 (Figura 1.2 (a)) [8].

Segundo paso. Se produjeron textiles inteligentes combinando varias tecnologías novedosas. Se utilizó el bordado para crear textiles híbridos inteligentes. En estos textiles inteligentes, el tejido solía ser parte integrante del dispositivo o circuito textil. Era algo más que un simple soporte para hilos textiles y circuitos. El diseño de textiles inteligentes seguía realizándose desde la perspectiva del diseño de sistemas electrónicos tradicionales, pero el propio textil empezó a desempeñar cada vez más funciones. Los procesos tradicionales de fabricación textil también se combinaron con métodos tradicionales de fabricación de circuitos electrónicos, como el diseño de placas de circuitos impresos [9]. Los teclados acolchados y bordados, así como el traje de luciérnaga desarrollado (Figura 1.2 (b)) por el MIT Media Lab en 1997 y 1998 son ejemplos tempranos en esta etapa.





Figura 1.2 Varios tejidos inteligentes; (a) GTWM. Reproducido con permiso [8]. Copyright © 2002, ACM. (b) Vestido Firefly. Reproducido con permiso [10]. Copyright© 2000, International Business Machines Corporation. (c) Sensor de presión textil con 16 elementos sensores bordados con hilo conductor. Reproducido con permiso [11]. Copyright© 2006, IEEE proceedings. (d) Teclado textil Eleksen para blackberry rim [12]. Licencia Creative Commons BY-NC-SA 2.0. (e) Sensor de hominididad Textronic [13]. (f) Un chip microcontrolador Lillypad Arduino integrado en un textil [14]. licenciado bajo Creative Commons BY-NC-SA 2.0





Tabla 1. Cronología y avances de los textiles inteligentes [16, 17]

| | |
|-----------|---|
| 1600 | Gold threads were weaved into garments for a shining accent during the Elizabethan era. |
| 1990s | MIT students started researching smart apparel for military use. |
| 1996 | The conductive fabric superstore launches for EMF blocking purposes. |
| 1998 | Sabine Seymour launches Moondial. |
| 2000–2009 | E-textile Lounge launches as a resource for e-textile craft. |
| 2000 | i) E-broidery design and fabrication of textile based computing. ii) Plug and wear launches, selling conductive materials for knitting and sewing. |
| 2003 | Georgia Tech Motherboard shirt appears in press. |
| 2007 | Leah Buechley develops the Lilypad, a microcontroller made specifically for textiles. |
| 2009 | Forster Rohner launches the Climate Dress using their innovative embroidered techniques. |
| 2011 | MICA Fiber department begins to explore conductive thread and electronics, creating the Midi Puppet Glove. |
| 2012 | Drexel launches their Haute Tech Lab exploring smart fabrics and additive manufacturing for textiles. |
| 2013 | Machina Launches the Midi Controller Jacket on Kickstarter. |
| 2014 | Dupont presents their stretchable, conductive ink at printed electronics and bebop sensors launches wearable tech and textile circuits. |
| 2015 | Polotech Shirt developed; Google's Project Jacquard directs tech eyes to e-textiles at Google I/O and ZSK embroidery reveals conductive thread and sequin LEDs. |
| 2016 | \$302 million DoD and M.I.T collaboration and the U.S Commerce Department's first ever smart-fabrics gathering. |
| 2017 | Harnessing the power of enzymatic oxygen activation (OXYTRAIN); Smart Clothing Gamification to promote Energy-related Behaviours among Adolescents (SmartLife). |
| 2018 | Design and integration of graphene fibre based antennas for smart textiles (GFSMART). |



Tercer paso. A principios del año 2000 aparecieron los primeros intentos de desarrollar una electrónica más compleja a nivel de fibra. Fibertrónica es otro nombre para este campo de estudio. El objetivo de estos estudios era desarrollar dispositivos y circuitos lógicos "por debajo del nivel de dispositivo", es decir, lograr operaciones electrónicas de orden superior a nivel de fibra y producir textiles inteligentes más sofisticados a partir de fibras individuales. Estos estudios suelen centrarse más en el desarrollo tecnológico, y los sistemas se construyen desde la fibra hacia arriba. Se utilizaron tiras flexibles con circuitos básicos de transistores de película fina (TFT) para introducir textiles inteligentes a nivel de fibra en circuitos inversores de textiles tejidos [15]. Aunque existe una tendencia general en esta industria a integrar gradualmente cada vez más sistemas de componentes en las fibras textiles, la mayoría de los enfoques combinan estos conceptos. El enfoque más adecuado vendrá determinado por el uso final de los textiles inteligentes en productos comerciales, y los textiles inteligentes del futuro pueden tener un aspecto radicalmente distinto de los actuales. La figura 1.2 muestra varios sistemas textiles inteligentes desde el primer al tercer paso, y la tabla 1 recoge la cronología y el progreso de los textiles inteligentes.

1.2 Conclusión y perspectivas

A pesar de que la investigación sobre tejidos inteligentes lleva realizándose hasta 30 años, existen pocas soluciones comerciales en el mercado. Los tejidos inteligentes han avanzado mucho en los últimos tiempos, y este tema de estudio goza de un amplio apoyo tanto en el sector de la investigación como en el comercial. Para garantizar que los tejidos inteligentes pasen con éxito de las instalaciones de investigación a las aplicaciones industriales, hay que resolver una serie de problemas. Se han mencionado como obstáculos la falta de normalización, la ausencia de legislación para los nuevos productos, la falta de coordinación y colaboración entre los participantes en la cadena de valor y las limitaciones financieras de las empresas para sufragar los gastos de desarrollo. La seguridad, así como las consideraciones éticas y sociales, deben ser abordadas. Para hacer posible la próxima oleada de productos textiles inteligentes, se necesita más investigación básica. En un entorno textil inteligente, aún estamos lejos de aprovechar plenamente las capacidades disponibles en el sector textil. Los textiles 3D, en particular, ofrecen posibilidades hasta ahora inexploradas.

Referencias

1. Adovasio, J.M., Soffer, O, Klíma, B. Upper palaeolithic fibre technology: Interlaced woven finds from Pavlov I, Czech Republic, c. 26,000 years ago. *Antiquity*, 1996, 70(5), 26–34. <https://doi.org/10.1017/S0003598X0008368X>.
2. Lewis, P. W. Lee's stocking frame: technical evolution and economic viability 1589-1750. *Text Hist.*, 1986, 17, 29–47. <https://doi.org/10.1179/004049686793700890>.
3. Thackeray, F.W., Findling, J.E. Events that Changed Great Britain Since 1689. Annotated. Westport, CT, USA: Greenwood Publishing Group, 2002.
4. Guler, S.D., Gannon, M., Sicchio, K.A. Brief History of Wearables. *Crafting Wearables*, Apress,

- Berkeley, CA, 2016, p. 3–10. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1808-2_1.
5. Hughes-Riley, T., Dias, T., Cork, C. A historical review of the development of electronic textiles. *Fibers*, 2018, 6. <https://doi.org/10.3390/fib6020034>.
 6. Fishlock, D. Doctor volts. *Electrotherapy*, 2001, 47(2), 3–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1049/ir:20010304>.
 7. Thorp, E.O. The invention of the first wearable computer. *2nd Int. Symp. Wearable Comput.*, 1998, 4–8. <https://doi.org/10.1109/ISWC.1998.729523>.
 8. Park, S., Mackenzie, K., Jayaraman, S. The wearable motherboard: A framework for personalized mobile information processing (PMIP). *Proc - Des Autom Conf*, 2002, 170(4). <https://doi.org/10.1145/513918.513961>.
 9. Eichinger, G.F., Baumann, K., Martin, T., Jones, M. Using a PCB layout tool to create embroidered circuits. *Proc - Int Symp Wearable Comput ISWC*, 2007, 105(6). <https://doi.org/10.1109/ISWC.2007.4373789>.
Post ER, Orth M, Gershenfeld N, Russo PR. E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing. *IBM Syst J* 2000;39:840–60.
 10. Meyer, J., Lukowicz, P., Tr3ster, G. Textile pressure sensor for muscle activity and motion detection. *Proc - Int Symp Wearable Comput ISWC*, 2006, 69–74. <https://doi.org/10.1109/ISWC.2006.286346>.
 11. Eleksen Developing Fabric Keyboard for RIM BlackBerry, 2006. <https://www.geekzone.co.nz/content.asp?contentid=6303>.
 12. Jakubas, A., Lada-Tondyra, E., Nowak, M. Textile sensors used in smart clothing to monitor the vital functions of young children. *Prog Appl Electr Eng*, 2017, 5–8. <https://doi.org/10.1109/PAEE.2017.8008989>.
 13. Llypad Embroidery, 2008. <https://www.flickr.com/photos/bekathwia/2426457410/in/photostream/>.
 14. Bonderover, E., Wagner, S. A woven inverter circuit for e-textile applications. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(5), 295 - 297. <https://doi.org/10.1109/LED.2004.826537>.
 15. A History of Smart Fabric, 2016. <https://medium.com/@LoomiaCo/tale-2-a-history-of-e-textiles-and-conductive-fabrics-dbe9c4a0cb03>.
 16. H2020 projects about “textiles”, 2020. <https://www.fabiodisconzi.com/open-h2020/per-topic/textiles/list/index.html>.



Capítulo 2. DEFINICIONES Y CLASIFICACIÓN

Md. Reazuddin Repon y Daiva Mikucioniene, Universidad Tecnológica de Kaunas, Lituania.

Resumen. Las fibras, hilos y tejidos que han sido diseñados y fabricados para contener tecnologías que proporcionen al usuario una mayor funcionalidad se conocen como textiles inteligentes. En este capítulo repasamos las definiciones y clasificaciones de los textiles inteligentes según diferentes perspectivas.

2.1 Definiciones de textiles inteligentes

Los materiales inteligentes o smart son el origen del término "textiles inteligentes". En 1989, Japón fue el primer país en definir el término "material inteligente". El hilo de seda con memoria de forma fue el primer material textil etiquetado como "textil inteligente" en retrospectiva. Los textiles inteligentes, también conocidos como textiles inteligentes, electrotexiles o e-textiles, son materiales inteligentes que detectan y responden a estímulos externos. Los textiles funcionales más sencillos se incluyen a veces en la definición de textiles inteligentes [1, 2].

La primera definición formal se encontró como "los textiles inteligentes están compuestos por materiales o estructuras que detectan y reaccionan a estímulos ambientales, como los mecánicos, térmicos, químicos, magnéticos o de otro tipo" [3].

Según el Comité Europeo de Normalización (CEN), la definición de sistema textil inteligente es: "Conjunto de materiales textiles y no textiles integrados en un producto que conserva sus propiedades textiles e interactúa con su entorno" [4].

El CEN ofrece una definición adicional sobre los niveles de integración:



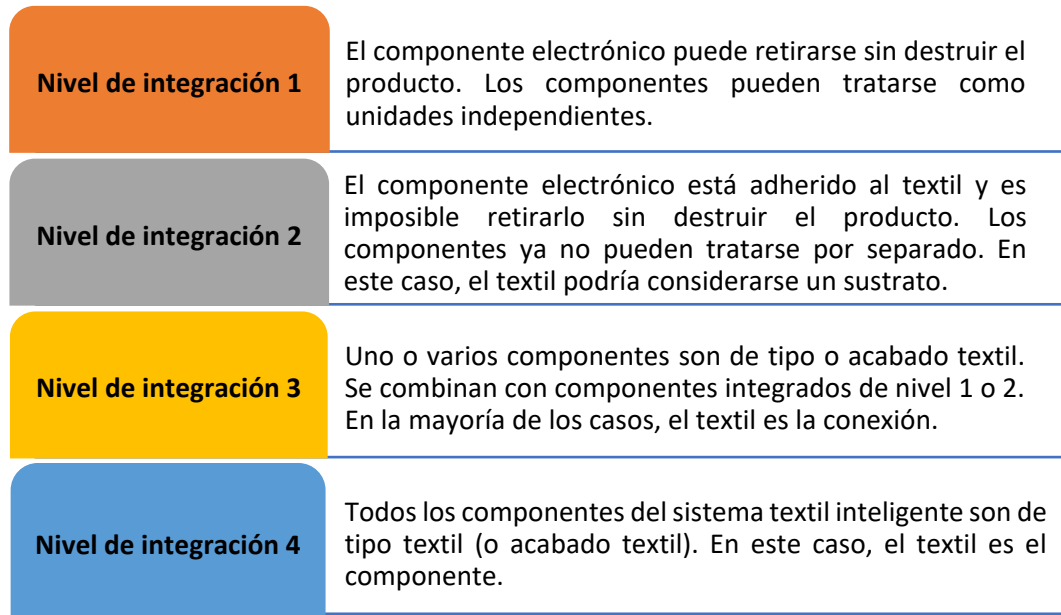


Figura 2.1 Definición de niveles de integración 1-4

2.2 Clasificación de los textiles inteligentes

No existen clasificaciones claramente establecidas de los textiles inteligentes. En este capítulo se ofrecen y explican ejemplos de las clasificaciones utilizadas.

Una primera clasificación es posible a partir de la definición de "textiles inteligentes" dada por el Comité Europeo de Normalización [4].

Esta clasificación divide los "textiles inteligentes" y los "sistemas textiles inteligentes":



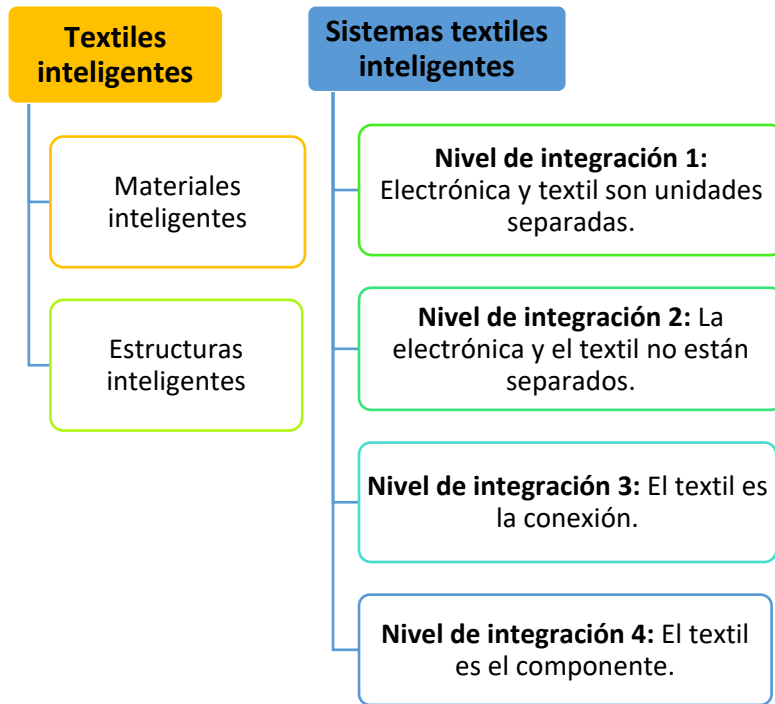


Figura 2.2 Clasificación basada en la definición del CEN

Los textiles inteligentes pueden dividirse en tres subgrupos [3, 5-8]:

- **Tejidos inteligentes pasivos.** Los textiles inteligentes pasivos sólo son capaces de percibir el entorno o al usuario. También se denominan primeras generaciones de textiles inteligentes. Estos textiles inteligentes sólo se consideran sensores. Un buen ejemplo es una sonda de temperatura integrada en un textil. Otros ejemplos son los tejidos antimicrobianos, antiolor, antiestáticos y a prueba de balas.
- **Textiles inteligentes activos.** Los textiles inteligentes activos son capaces de percibir estímulos del entorno y actuar. También se denominan textiles inteligentes de segunda generación. Contienen una parte sensora y una función de actuación. Esta respuesta se considera predeterminada. Los textiles inteligentes activos son tejidos con memoria de forma, camaleónicos, resistentes al agua y permeables al vapor (hidrófilos/no porosos), con almacenamiento de calor, termorregulados, que absorben vapor y evolucionan con el calor y trajes calentados eléctricamente.
- **Tejidos muy inteligentes.** Los textiles muy inteligentes son capaces de percibir, reaccionar y adaptar su comportamiento a las circunstancias dadas. Esta clasificación es válida para los textiles inteligentes con y sin electrónica, aunque la categoría de "textiles muy inteligentes" parece reservada a los "e-textiles". También se denomina tercera generación de textiles inteligentes o textiles ultrainteligentes. Un textil muy inteligente o inteligente consiste esencialmente en



una unidad que funciona como el cerebro, con capacidades de cognición, razonamiento y activación. La producción de textiles muy inteligentes es ya una realidad tras una exitosa incorporación de la tecnología tradicional de los textiles y la confección con otras ramas de la ciencia como la ciencia de los materiales, la mecánica estructural, la tecnología de sensores y actuadores, la tecnología de procesamiento avanzado, la comunicación, la inteligencia artificial, la biología, etc.

Los e-textiles también pueden subclasificarse en:

- ❖ **NoReact:** La familia NoReact contiene e-textiles con una sola función, como detectar, actuar y transmitir.
- ❖ **React:** La familia React es más inteligente y contiene e-textiles con al menos dos funciones, como detectar y actuar.

Los textiles inteligentes también pueden clasificarse en función del tipo de estímulo/respuesta. Pero esta clasificación es mucho menos universal. La figura 2.3 presenta listas de estímulos y respuestas de los textiles inteligentes.

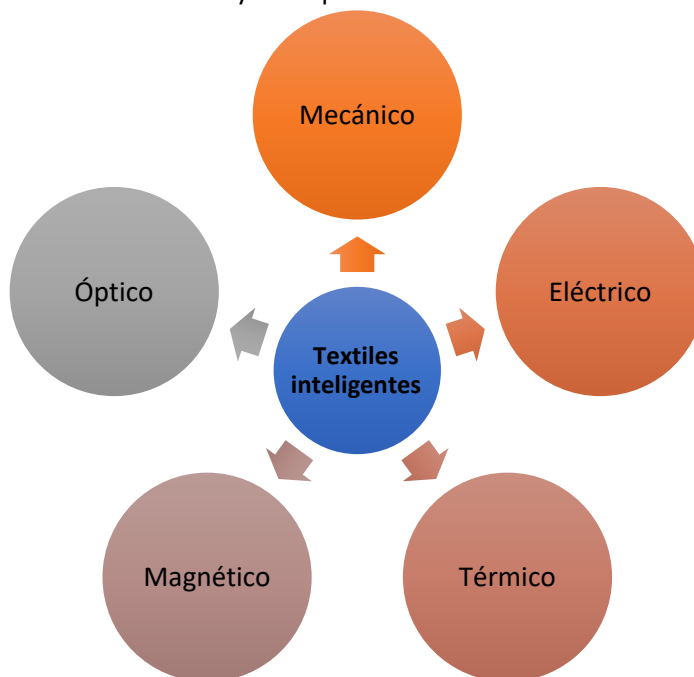


Figura 2.3 Clasificación de los textiles inteligentes en función de diferentes estímulos.

He aquí otro ejemplo de clasificación un poco más limitado. Consiste en separar las actividades de comunicación y energía. La "comunicación" debe interpretarse en sentido amplio y abarca no sólo la emisión de ondas, sino también, por ejemplo, la difusión de un mensaje visual (a través de una pantalla) y la vibración. La creación y el almacenamiento de energía eléctrica se incluyen en la función "energía". La figura 2.4 indica la clasificación

de los textiles inteligentes en función de la comunicación y el suministro de energía.

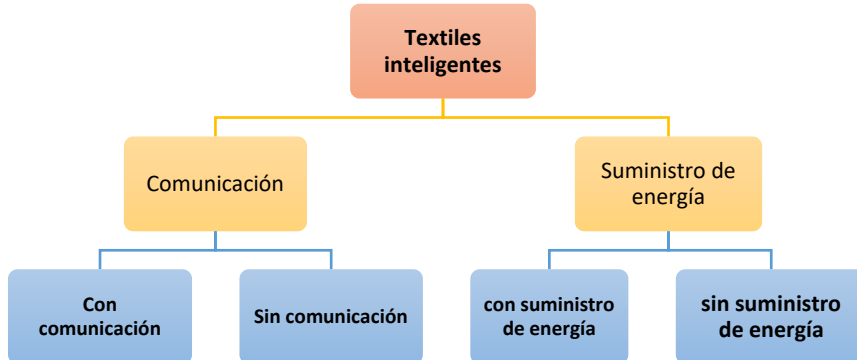


Figura 2.4 Clasificación de los textiles inteligentes en función de la comunicación y el suministro de energía

2.3 Conclusión

In the last three decades, the development of new kinds of textiles, smart and interactive textiles, has continued unabated. Smart textile materials and their applications are set to drastically boom as the demand for these textiles have been increasing with the emergence of new fibres, new fabrics, and innovative processing technologies. The demand of the smart textiles market is increasing with advanced functions and miniaturisation of electronic components. Therefore, there are no clearly established definitions and classifications of smart textiles. In this lesson, the used definitions and classifications have been simply given and explained.

Referencias

1. Van Langenhove, L., Hertleer, C. Smart clothing: A new life. *Int J Cloth Sci Technol*, 2004, 16, 63–72. <https://doi.org/10.1108/09556220410520360>.
2. Tao, X. Handbook of smart textiles. Hung Hom, Hong Kong: Springer Singapore, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-981-4451-45-1>.
3. Tao, X. Smart Fibres, Fabrics and Clothing: Fundamentals and Applications. Woodhead Publishing Limited, 2001.
4. European committee for standardization (CEN), Technical report, PDCEN/TR 16298:2011, 2011.
5. Stoppa, M., Chiolerio, A. Wearable electronics and smart textiles: A critical review. *Sensors (Switzerland)*, 2014, 14, 11957–11992. <https://doi.org/10.3390/s140711957>.
6. Zhang, X.X., Tao, X. Smart textiles: Passive smart. *Text Asia*, 2001, 32, 45–48.
7. Zhang, X.X., Tao, X. Smart textiles: Active smart. *Text Asia*, 2001, 32, 49–52.
8. Zhang, X.X., Tao, X. Smart textiles: Very smart. *Text Asia* 2001, 32, 35–37.



Capítulo 3. MATERIALES AVANZADOS PARA LA ATENCIÓN SANITARIA

Md. Reazuddin Repon, Rimvydas Milašius y Daiva Mikučionienė, Departamento de Ingeniería de Producción, Facultad de Ingeniería Mecánica y Diseño, Universidad Tecnológica de Kaunas, Lituania.

3.1 Introducción

Los textiles inteligentes e interactivos tienen un gran potencial en la investigación biomédica y son un tema de aprendizaje relativamente nuevo. Los materiales textiles inteligentes son un ejemplo en el que la incorporación de dispositivos inteligentes puede reconocer, registrar y transmitir datos básicos a la autoridad destinataria. Estos dispositivos pueden utilizarse para observar y registrar datos de actividad cardíaca, temperatura corporal, frecuencia respiratoria, etc., que posteriormente pueden transferirse a través de Internet, el móvil o cualquier otro medio accesible al centro de emergencias/sanitario [1]. La ropa puede predecir sobrecargas musculares y meditaciones de estrés, lo que ayuda a prevenir lesiones por sobrecarga, monitorizar los latidos del corazón de los bebés y evaluar las señales bioquímicas del fluido generado en las actividades diarias o cuando se realiza ejercicio físico [2]. La capacidad de los tejidos inteligentes para interactuar con el cuerpo proporciona una técnica para determinar la fisiología del usuario y ajustarse a sus necesidades. La ropa inteligente puede ofrecer una solución personalizada al aumentar el conocimiento del estado de salud individual y animar a las personas a asumir un papel más eficaz en el cuidado de su salud individual. La ropa inteligente puede ayudar a los médicos a realizar diagnósticos más precisos al conservar un registro digital. Hoy en día, para cumplir diversos objetivos sanitarios, los dispositivos médicos vestibles pueden envolverse en tela [3]. La ingeniería médica incorpora la experiencia de ingenieros, científicos y médicos [4, 5].

3.2 Textiles antimicrobianos

Los materiales textiles antimicrobianos se utilizan para minimizar la acumulación microbiológica peligrosa. Diversos agentes antimicrobianos, como los iones metálicos, el quitosano, los taninos, el triclosán, los compuestos de amonio cuaternario, las biguanidas de polihexametileno, las n-halaminas y los polipirroles, se utilizan no sólo para vencer los ataques microbianos, sino también para reducir el olor y dar resistencia mecánica a las prendas. El desarrollo de tejidos sensibles a los estímulos con gestión microbiológica y de la humedad facilita la aplicación regulada y la disponibilidad a largo plazo de sustancias químicas antimicrobianas recubiertas en tejidos textiles. Los tejidos con sensores son uno de los avances en materia de textiles antimicrobianos inteligentes. Se utilizan varias sustancias químicas antimicrobianas para crear tejidos antimicrobianos inteligentes.

El quitosano tiene una amplia gama de aplicaciones en el sector textil. El quitosano es activo contra tipos específicos de microorganismos por sí solo [6]. La propiedad de repulsión al agua del quitosano tratado con fluorocarbono o polisiloxano reduce la energía superficial que permite que se adhieran los contaminantes y, por tanto, ayuda a proteger a las



personas de la atmósfera microbiológica. El textil recubierto de quitosano protege a quienes operan en el ámbito clínico y no clínico sectores. A pH cutáneo, la forma ionizada del quitosano interactúa con la pared celular microbiana, lo que provoca una alteración de la permeabilidad celular y, finalmente, la muerte microbiana [7].

Los tejidos antimicrobianos funcionalizados con metales se están extendiendo rápidamente por todo el mundo. En dosis bajas / no tóxicas, la combinación de metales, incluyendo Ag, Cu, Ni, Zn, Co y Cd, mejoró la acción antibacteriana en células de queratinocitos humanos [8]. El compuesto no tejido funcionalizado CuO₃Si fundido tiene una capacidad antibacteriana extremadamente alta contra las bacterias *S. aureus* y *E. coli*. Sin embargo, la adición de diversos polímeros, por ejemplo (C₃H₄O₂)_n, (R)-3-hidroxiácido graso, al silicato de cobre reduce la capacidad de descomposición biológica de la mezcla al alterar los procesos de fusión/cristalización [9]. Las nanopartículas bimetálicas de Ag / Cu pueden mejorar la actividad antibacteriana de los tejidos de algodón / poliuretano [10]. Debido a sus eficaces propiedades antibacterianas y de detección, el grafeno está desempeñando un papel activo en aplicaciones médicas y electrónicas [11]. Los sensores de grafeno pueden detectar virus, síntomas alérgicos, frecuencia respiratoria, cantidad de glucosa en sangre, interacciones entre moléculas pequeñas y proteínas, presión sanguínea y temperatura corporal [12]. Se creó un inmunosensor electroquímico para la identificación del virus de la gripe utilizando escamas de óxido de grafeno térmicamente reducido (rGO) derivadas de la goma laca. Estos sensores basados en rGO térmico presentan una gran estabilidad y repetibilidad, por lo que pueden utilizarse para crear toda una gama de inmunosensores.

Los polímeros conductores habituales utilizados para la actividad antibacteriana son el polipirrol (PPy), la polianilina (PANI), el politiofeno (PTh), el poliacetileno (IUPAC), etc., y todos ellos son polímeros conjugados. Se pueden desarrollar textiles antimicrobianos sostenibles recubriéndolos con polímeros π -conjugados. Las cargas positivas de los polímeros conductores se unen a las cargas negativas de la membrana bacteriana, impidiendo la actividad bacteriana [13]. El PTh muestra una sólida actividad antimicrobiana contra las bacterias *B. cereus*, *E. aerogenes*, *E. aureus* y *E. coli*; el PANI tiene una fuerte actividad antimicrobiana contra los patógenos debido a las unidades amino, la baja cadena polimérica y la interacción electrostática; el IUPAC muestra una actividad antimicrobiana causada por tres partes conjugadas. Las microcélulas resultan dañadas principalmente debido a la interfaz electrostática [14].

3.3 Tejidos liberadores de fármacos

Cuando los métodos de tratamiento tradicionales no son aceptables, un textil cargado de fármacos puede ser una opción viable. Los fármacos se absorben en la parte superior del abdomen o en el sistema intestinal por vías deglutorias, como cápsulas y comprimidos. Sin embargo, algunos medicamentos pueden perder su eficacia al destruirse en el medio ácido del estómago o metabolizarse en el hígado. Los textiles inteligentes pueden recubrirse con portadores de fármacos específicos y administrarse a un estímulo concreto. Se pueden seguir varios procedimientos de recubrimiento para formular textiles liberadores de



fármacos. Estos textiles pueden ser degradables o no degradables; pueden utilizarse para fibras liberadoras de fármacos, tejidos y no tejidos. Los tejidos no tejidos se utilizan habitualmente en aplicaciones médicas por su gran flexibilidad, sus rápidos ciclos de fabricación y su bajo coste de fabricación. Dentro del tejido no tejido, los hilos que contienen fármacos se enredan y se han revelado muy adecuados para sistemas de liberación controlada y sostenida de fármacos. El comportamiento deseado de liberación del fármaco puede modificarse en función de los requisitos de la aplicación. El electrospinning es una tecnología eficaz y versátil para producir fibras liberadoras de fármacos, ya que permite la incorporación de fármacos, proteínas o partículas metálicas ultrafinas atractivas y repulsivas al agua dentro de la fase másica de las fibras [14]. Los fármacos y agentes con efectos biológicos pueden introducirse en la vaina exterior reabsorbible y liberarse a velocidades controladas en función del grosor, el peso molecular y la forma del polímero.

Se ha desarrollado una endoprótesis de polidioxanona tejida por trama para la medicación del cáncer de colon o recto cargada con 5-fluorouracilo [15]. Se descubrió que los tejidos celulósicos de punto plano, recubiertos con quitosano, alginato sódico y alginato cálcico, son adecuados como vendaje, lo que resulta idóneo para la cicatrización de heridas [16]. Para aumentar las características antibacterianas y de cicatrización de heridas, se añadieron medicamentos de cloranfenicol y clorhidrato de tetraciclina a los polímeros recubiertos. Según el estudio, cuando el medicamento de la superficie del tejido desaparece, el recubrimiento de polímero de la superficie crea una nueva barrera contra los gérmenes.

Los sistemas tejidos se utilizan en algunas aplicaciones médicas para ensamblar tejidos encapsulados con fármacos o sustancias funcionales. Se pueden fabricar apósitos antimicrobianos para heridas con gasas de algodón tejido bioactivo; por ejemplo, se adornaron gasas médicas con partículas ultrafinas de Ag (plata) y se medicaron con goma de acacia [17]. Se colocaron nanopartículas de cafeína en tejidos micromodales de algodón y viscosa para crear parches antioxidantes transdérmicos. Cuando se llevan cerca de la piel, el dispositivo puede proporcionar cafeína durante algunos periodos sin que el paciente tenga que hacer nada más [18].

3.4 Textiles para el control de la salud

Los dispositivos portátiles pueden integrarse ahora en la ropa por diversas razones, entre ellas la monitorización de indicadores fisiológicos. La electromiografía (EMG) es una tecnología que ayuda a los médicos a medir la actividad eléctrica muscular para controlar el estado de nervios y músculos. Los electrodos colocados directamente sobre la piel son los más utilizados para registrar la actividad muscular. Para crear esta configuración de tres electrodos se utilizaron electrodos textiles integrados en pantalones cortos [19]. La posibilidad de registrar electromiogramas sin contacto se investigó en el proyecto ConText, financiado por la UE. Para realizar las mediciones, se incorporaron dos electrodos EMG bordados dentro de una camisa y un chaleco utilizando también un hilo conductor para enviar las señales desde el sensor sin contacto hasta la grabadora de datos [20].



El electrocardiograma (ECG) es una evaluación cutánea de la actividad eléctrica del músculo cardiaco. Los iones fluyen a través del músculo cardiaco con cada latido, formando gradientes de carga. Los distintos vectores del ECG son el resultado de mediciones diferenciales del potencial eléctrico en la superficie corporal en distintos lugares. En los últimos años se han investigado diversas tecnologías textiles para crear y desarrollar electrodos textiles que puedan integrarse en la ropa y proporcionar un ECG. La tecnología del bordado puede utilizarse para mejorar la interacción entre los electrodos y la piel, ya que la sección bordada se levanta de la superficie de la tela, lo que permite un mejor contacto [21]. Las láminas de tela pueden utilizarse para registrar un ECG tratadas con polímero piezoeléctrico [22].

El electroencefalograma (EEG) es una herramienta para monitorizar la actividad eléctrica de los músculos cerebrales. Utilizando tejidos conductores suaves, se puede emplear un dispositivo textil basado en el EEG para monitorizar la actividad del cerebro de los recién nacidos [23]. Dado que la piel de los recién nacidos es extremadamente sensible al dolor, los investigadores idearon unos electrodos únicos que permitieran una monitorización a largo plazo. Los cambios de voltaje entre los puntos del cuero cabelludo creados por las estructuras cerebrales se registran mediante electrodos de EEG, que suelen ser pequeñas placas metálicas conectadas al cuero cabelludo. Los electrodos suelen fijarse a un gorro de tejido elástico, como sugiere la norma internacional [24].

Los tejidos inteligentes pueden desempeñar un papel importante en la prevención y el tratamiento de la diabetes. Los niveles de glucosa en sangre pueden detectarse utilizando sensores de rejilla de fibra de Bragg [25]. En otro estudio, se comprobó que los calcetines inteligentes, utilizados por los pacientes diabéticos para controlar parámetros clave de su salud, presentaban una asociación sustancial con los calcetines dotados de un sistema de detección de la temperatura y la presión del pie [22].

La frecuencia respiratoria media oscila entre 12 y 25. Se trata de un cinturón que mide el ciclo respiratorio y detecta los ataques de apnea/hipopnea [26]. El volumen torácico y la frecuencia respiratoria pueden medirse mediante un sensor flexible fijado a la camiseta [27]. Además, se han desarrollado camisetas inteligentes con sensores textiles para medir los tiempos y las fases de la respiración, la frecuencia de inhalación y el tamaño del pecho [28]. Otros investigadores también han fabricado dispositivos textiles para detectar la frecuencia respiratoria, lo que hace que este tipo de control de la salud sea más frecuente en el mundo de los textiles inteligentes.

Uno de los criterios más esenciales para la evaluación clínica y la supervisión sanitaria es la temperatura corporal. Para la fabricación de sensores de temperatura pueden utilizarse compuestos que incluyan herramientas conductoras y polímeros que respondan a la temperatura.



3.5 Resumen

La mayoría de los trastornos médicos se tratan en fases que implican inhibición, cuidados agudos, rehabilitación y apoyo continuo. Los textiles inteligentes tienen una responsabilidad en cada una de estas fases de medicación y prevención de enfermedades. Los sensores textiles pueden insertarse fácilmente en la ropa y unirse mediante hilos conductores a través de procesos de bordado, punto o tejido. En caso de enfermedad, la ropa inteligente puede ayudar a la sociedad médica ofreciendo una imagen más completa de la salud de sus pacientes y permitiendo la monitorización a distancia para minimizar las llamadas clínicas. En rehabilitación, una prenda inteligente puede ayudar al paciente a asumir un papel activo en su curación y prevenir futuras recaídas. Los textiles inteligentes pueden tener funciones terapéuticas en el futuro, proporcionando una forma variable y ajustable de tratamiento. Sin embargo, hay varias dificultades que deben resolverse antes de que los wearables puedan adoptarse de forma generalizada. Para satisfacer las exigencias de la ropa típica, la tecnología ponible debe ser suave, flexible y lavable. El lavado es un aspecto crucial en el ciclo de vida de un producto.

Referencias

1. Lymberis, A., Olsson, S. Intelligent Biomedical Clothing for Personal Health and Disease Management: State of the Art and Future Vision. *Telemedicine Journal and e-health*, 2003, 9(4), 379-386.
2. Milenković, A., Otto, C., Jovanov, E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation. *Computer Communications*. 2006, 29(13-14), 2521-2533.
3. Esfahani, M.I.M. Smart textiles in healthcare: a summary of history, types, applications, challenges, and future trends. *Nanosensors and Nanodevices for Smart Multifunctional Textiles*, Matthew Deans, 2021.
4. Fagette, P. Tracking the Historical Development of Biomedical Engineering: The 1960s and 1970s. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 1997, 16(5), 164-173.
5. Jatoi, A.S., et al. Current applications of smart nanotextiles and future trends. *Nanosensors and Nanodevices for Smart Multifunctional Textiles*. Woodhead Publishing Ltd., 2021.
6. Nalankilli, G. Crosslinking of Chitosan with Cotton using Polycarboxylic Acids. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2014, 3(4), 1769–1774.
7. Alonso, D., et al. Cross-linking chitosan into UV-irradiated cellulose fibers for the preparation of antimicrobial-finished textiles. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(3), 536-543.
8. Garza-Cervantes, J.A., et al. Synergistic antimicrobial effects of silver/transition-metal combinatorial treatments. *Scientific reports*, 2017, 7(1), 1-16.
9. Sójka-Ledakowicz, J., et al. Antimicrobial functionalization of textile materials with copper silicate. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2016, 24(5), 151-156.
10. Paszkiewicz, M., et al. The antibacterial and antifungal textile properties functionalized by bimetallic nanoparticles of Ag/Cu with different structures. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 1-13.
11. Ye, S., et al. Antiviral Activity of Graphene Oxide: How Sharp Edged Structure and Charge Matter. *ACS applied materials & interfaces*, 2015, 7(38), 21571-21579.
12. Seshadri, D.T., Bhat, N.V. Synthesis and properties of cotton fabrics modified with polypyrrole. *Journal of Fiber Science and Technology*, 2005, 61(4), 103-108.



13. Chundawat, N.S., Chauhan, N.P.S. Conducting polymers with antimicrobial activity. *Biocidal Polymers*. De Gruyter, 2019.
14. Pornsopone, V., et al. Electrospun methacrylate-based copolymer/indomethacin fibers and their release characteristics of indomethacin. *Journal of Polymer Research*, 2007, 14(1), 53-59.
15. Li, G., et al. A 5-fluorouracil-loaded polydioxanone weft-knitted stent for the treatment of colorectal cancer. *Biomaterials*, 2013, 34(37), 9451-9461.
16. Hanmugasundaram, O.L., Mahendra, Gowda, R.V. Development and characterization of cotton, organic cotton flat knit fabrics coated with chitosan, sodium alginate, calcium alginate polymers, and antibiotic drugs for wound healing. *Journal of Industrial Textiles*, 2012, 42(2), 156-175.
17. El-Naggar, M.E., et al. Bioactive Wound Dressing Gauze Loaded with Silver Nanoparticles Mediated by Acacia Gum. *Journal of Cluster Science*, 2020, 31(6), 1349-1362.
18. Massella, D., et al. Preparation of bio-functional textiles by surface functionalization of cellulose fabrics with caffeine loaded nanoparticles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
19. Finni, T., et al. Measurement of EMG activity with textile electrodes embedded into clothing. *Physiological Measurement*, 2007, 28(11), 1405-1419.
20. Linz, T., Gourmelon, L., Langereis, G. Contactless EMG sensors embroidered onto textile. *IFMBE Proceedings*, 2007.
21. Marozas, V., et al. A comparison of conductive textile-based and silver/silver chloride gel electrodes in exercise electrocardiogram recordings. *Journal of electrocardiology*, 2011, 44(2), 189-194.
22. Najafi, B., et al. An Optical-Fiber-Based Smart Textile (Smart Socks) to Manage Biomechanical Risk Factors Associated with Diabetic Foot Amputation. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 2017, 11(4), 668-677.
23. Adnane, M., et al. Detecting specific health-related events using an integrated sensor system for vital sign monitoring. *Sensors*, 2009, 9(9), 6897-6912.
24. Löfhede, J., Seoane, F., Thordstein M. Textile electrodes for EEG recording - a pilot study. *Sensors*, 2012, 12(12), 16907-16919.
25. Kurasawa, S., et al. Development of smart textiles for self-monitoring blood glucose by using optical fiber sensor. *Journal of Fiber Science and Technology*, 2020, 76(3), 104-112.
26. Wang, H., et al. The regulatory role of the SIRT1 / FoxO1 pathway in the prevention of insulin resistance in skeletal muscle by aerobic exercise in mice. *Research Square*, 2022, 1-17.
27. Mokhlespour, Esfahani, M.I., et al. A wearable respiratory plethysmography using flexible sensor. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 2013, 11(4), 364-380.
28. Massaroni, C., et al. Smart textile for respiratory monitoring and thoraco-abdominal motion pattern evaluation. *Journal of Biophotonics*, 2018, 11(5), 1-12.





Capítulo 4. MATERIALES AVANZADOS PARA EQUIPOS DE PROTECCIÓN

David Gómez, AEI Tèxtils, Desarrollo Corporativo, Terrassa, Barcelona, España

4.1 Introducción

Los lugares de trabajo no siempre son seguros. De hecho, algunos de los puestos de trabajo existentes en la actualidad presentan varias tareas de riesgo a las que deben enfrentarse los empleados. Por ello, la seguridad se convirtió en una prioridad en la industria de forma transversal, especialmente en algunos sectores como la minería de superficie y subterránea, las obras de construcción, las centrales eléctricas, las fábricas, etc. [1].

Para ello, es importante prevenir a los trabajadores de posibles riesgos que pueden acabar generando varios tipos de lesiones como las térmicas, biológicas, eléctricas, mecánicas o químicas, que pueden actuar al mismo tiempo [2] en diferentes partes del cuerpo humano (ojo y cara, cabeza, pie y pierna, mano y brazo, cuerpo y oído [3]). Los equipos de protección individual (EPI) ayudan a prevenir esas lesiones protegiendo al usuario.

En resumen, los EPI pueden y deben mejorarse para que sus objetivos se alcancen de forma más eficaz y eficiente mediante el desarrollo y la integración de tecnologías de sensores en la ropa de los trabajadores. Esta mejora permitiría monitorizar la salud de los trabajadores, su exposición a elementos nocivos, su proximidad a zonas de peligro, entre otros [4]. Los EPI inteligentes pueden organizarse en cuatro categorías diferentes en función de la tecnología que se les aplique. Por un lado, según la presencia o no de componentes electrónicos y, por otro, según sus características de recogida de datos (véase la figura 4.1).

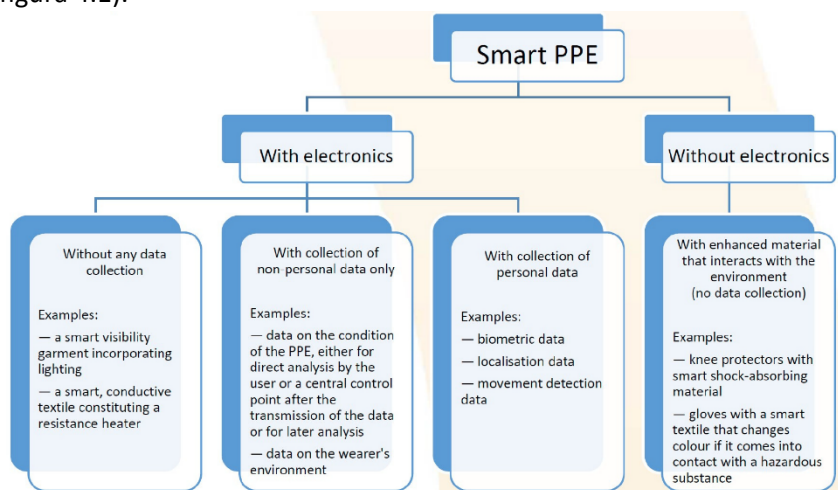


Figura 4.1 Clasificación de los EPI inteligentes, según su composición y capacidad de recogida de datos.

Algunos ejemplos de EPI con electrónica integrada o materiales inteligentes [5] son los siguientes:

En primer lugar, los protectores de rodilla inteligentes. Pueden ser suaves y flexibles, y facilitar movimientos normales como caminar y, al mismo tiempo, garantizar las propiedades de amortiguación del material inteligente en el momento de un eventual choque.

A continuación, los textiles inteligentes y conductores que constituyen un calentador de resistencia. Los textiles inteligentes pueden integrar conductividad eléctrica. Con la provisión de un suministro eléctrico constante y la integración de sensores, estos productos textiles inteligentes pueden generar y mantener una temperatura constante alrededor del calentador.

Además, las prendas con iluminación inteligente pueden emitir luz mediante la integración de fibras ópticas en el material de la prenda. Las fibras ópticas integradas en los tejidos y conectadas a una fuente de luz controlable pueden utilizarse como parte de las prendas inteligentes. Incluso pueden determinar el tipo de iluminación mediante la integración de un sensor.

Asimismo, los guantes inteligentes capaces de identificar sustancias peligrosas son también un producto innovador para los EPI diseñado gracias a los avances de los tejidos inteligentes. Se vuelven de un color diferente en función del contacto con posibles sustancias peligrosas.

Por último, algunos EPI inteligentes también pueden recoger datos sobre su propio uso. Si está equipado con sensores, puede recoger varios tipos de datos sobre la duración del uso o las cantidades... y comunicarlos a una base de datos central.

Lo dicho, son sólo algunos ejemplos de la amplia gama de posibilidades que pueden ofrecer los textiles inteligentes.

4.2 Aplicaciones de los EPI

Las aplicaciones de los textiles inteligentes en los EPI son múltiples y diversas. Y cada vez que aumenta la investigación en este campo, se amplía su potencial [6].

Hoy en día, podemos encontrar tres categorías, tres vías de desarrollo de productos. Se refieren, básicamente, a las necesidades prácticas de los usuarios, a los sistemas globales y a las reacciones a estímulos externos y condiciones ambientales.

Por ejemplo, algunas formas concretas de profundizar en el desarrollo de EPI mediante textiles inteligentes [7] y sus diversos campos de investigación (estado fisiológico, sensores de temperatura y humedad, transmisores de energía y datos, e indicadores de fin de vida útil, materiales inteligentes...) podrían ser las siguientes: pueden fabricarse membranas con permeabilidad sensible, incluso al vapor de agua, utilizando polímeros con memoria de forma, geles poliméricos, polímeros superabsorbentes, cepillos



poliméricos injertados y líquidos iónicos poliméricos. Estas membranas de barrera pueden incluso autodescontaminarse con N-halaminas, grupos de amonio cuaternario, enzimas de bioingeniería, metales y óxidos metálicos, nanomateriales y compuestos activados por la luz. El confort térmico también puede mejorarse con materiales de cambio de fase que pueden proporcionar calor o frío adicional según las necesidades. También, fluidos espesantes que se solidifican y se convierten en amortiguadores cuando reciben impactos a gran velocidad.

4.3 Nuevos horizontes para los EPI

No todos los riesgos potenciales son visibles o perceptibles para los sentidos humanos. La protección contra gases, polvo, sonido y/o humo es esencial. La conectividad es un campo clave que aporta un amplio abanico de nuevas utilidades para los EPI obtenidas a través de materiales específicos como los textiles inteligentes. Una vez interconectados con el Internet de las Cosas, smartphones y cualquier dispositivo inteligente, pueden proporcionar aplicaciones como las siguientes para aumentar la protección de la persona que lleva el EPI en diversas condiciones [1]. Por ejemplo:

Los EPI conectados pueden detectar riesgos invisibles, como las altas temperaturas. Un sensor de temperatura puede hacer un seguimiento del entorno externo y alertar a tiempo al usuario sobre entornos peligrosos y avisar a los supervisores si los trabajadores se encuentran en condiciones inseguras.

Además, la geolocalización, integrada en un EPI conectado, puede monitorizar y determinar en tiempo real la ubicación del usuario y darle información sobre cuál es el itinerario más seguro, por dónde continuar o si es más seguro volver de la zona. Además, la posibilidad de generar y transferir análisis de datos en tiempo real permitiría alertar inmediatamente al usuario cuando entre o esté en contacto con un entorno peligroso o cualquier otro aspecto externo que pueda dañar su integridad.

También relacionado con los sistemas de comunicación, el EPI puede facilitar canales integrados de comunicación rápidos y eficaces en condiciones de ruido o de baja visibilidad.

Y por último, pero no por ello menos importante, la monitorización de las constantes de salud de los usuarios, como su frecuencia cardiaca, se convierte en básica para garantizar la seguridad de la persona que lleva el EPI.

4.4 Resumen

La proyección de los materiales avanzados y los textiles inteligentes como dinamizadores de los EPI es clara, larga y digna de tener en cuenta. La mayoría de las aplicaciones se encuentran actualmente en fase de pruebas piloto, necesitan ser mejoradas o apenas están siendo prototipadas. Pero algunas de las ya aplicadas están mostrando unas prestaciones impresionantes y un gran potencial.

Aun así, hay que superar algunos riesgos y legislaciones y establecer normas para estos nuevos productos.



Referencias

1. Adjiski, V., Despodov, Z., Mirakovski, D., Serafimovski, D., System architecture to bring smart personal protective equipment wearables and sensors to transform safety at work in the underground mining industry, In: The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 2019, 34, 1, 37-44.
2. Dolez, P.I., Vu-Khanh, T. Recent Developments and Needs in Materials Used for Personal Protective Equipment and Their Testing. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2009, 15(4), 347-362, DOI: 10.1080/10803548.2009.11076815
3. Berry, C., McNeely, A., Beauregard, K., Haritos, S. A guide to personal protective equipment. Raleigh, NC, USA: N.C. Department of Labor, 2008. Retrieved December 16, 2008, from: <http://www.nclabor.com/osha/etta/indguide/ig25.pdf>
4. Cao, H., Smart technology for personal protective equipment and clothing, Chapter of Smart textiles for protection, Woodhead Publishing Limited, 2013, 229-241
5. CEN/TR 16298:2011 'Smart textiles – Definitions, categorisation, applications and tandardization needs', 2011.
6. Dolez, P.I., Mlynarek, J., Smart materials for personal protective equipment, Chapter of Smart Textiles and their Applications, Editor Chapman R., Woodhead Publishing, 2016
7. Gómez, D. *R&D Alfredo Grassi SPA*, 2022. <https://www.grassi.it/en/research-and-development>



Capítulo 5. MATERIALES AVANZADOS PARA LA PROTECCIÓN TÉRMICA

Michail Delagrammatikas, Desarrollo del Pensamiento Creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia

5.1 Introducción

Los textiles para la protección térmica pueden utilizarse contra la exposición a temperaturas extremadamente altas o bajas, para mitigar los riesgos para la salud por la exposición prolongada a temperaturas fuera de los límites termofisiológicos de la temperatura humana o para evitar la incomodidad, normalmente en condiciones de actividad física intensa. Los principales mecanismos de los textiles de protección térmica son el aislamiento térmico y la regulación de la transferencia de calor. Los materiales avanzados e inteligentes pueden incorporar sensores de temperatura, así como estructuras tridimensionales y tejidos con propiedades cambiantes que responden a diferentes condiciones. Los productos textiles de protección contra temperaturas extremas se basan principalmente en propiedades aislantes, con el objetivo de evitar que el calor corporal, producido por la actividad metabólica, se escape al entorno o evitar que el calor ambiental llegue al cuerpo.

El cuerpo humano genera calor a través de la actividad metabólica y necesita mantener una temperatura casi constante de $36,6 \pm 5$ °C. En función de las condiciones ambientales, el ser humano necesita retener o evacuar el calor corporal. La zona de confort para el ser humano se sitúa a temperaturas de entre 22 °C y 27 °C y una humedad relativa (HR) de entre el 40% y el 60% [1]. La evolución ha privado al cuerpo humano del tonto pelaje corporal, que actúa como regulador de la transferencia de calor en la mayoría de los mamíferos. Esta función está más o menos sustituida por el uso de prendas para atrapar el calor corporal y la sudoración para descargar el exceso de calor.

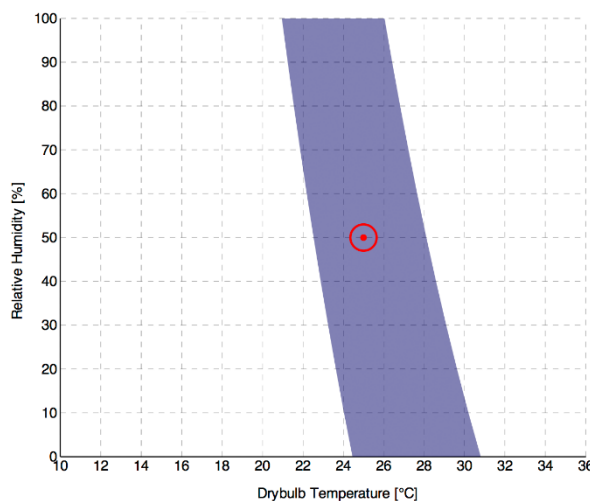


Figura 5.1 Zona de confort del cuerpo humano. Centre for the Built Environment, Universidad de California Berkeley, CC BY-SA 3.0, vía Wikimedia Commons.

La transferencia de calor puede producirse principalmente a través de tres mecanismos: conducción térmica, convección térmica y radiación térmica. La conducción térmica se produce entre cuerpos sólidos o fluidos atrapados que permanecen inmóviles. La tasa de calor que puede transferirse por conducción depende en gran medida de la naturaleza de los materiales. Los metales tienen una conductividad térmica muy alta, mientras que la mayoría de los materiales utilizados para tejidos tienen una conductividad térmica baja. El aire atrapado presenta una conductividad térmica muy baja, por lo que la mayoría de los materiales aislantes utilizan aire atrapado en burbujas o entre fibras como principal mecanismo para impedir la transferencia de calor. El agua presenta una conductividad térmica elevada, por lo que un paño mojado no protege de las bajas temperaturas. La convección térmica se produce cuando el calor se transfiere por el flujo de un fluido. La transferencia de calor por convección puede ser muy eficaz, como uno puede saber por experiencia propia cuando le golpea una brisa fría o al entrar en un edificio que utiliza calefacción central. La radiación térmica se produce cuando la diferencia de temperatura entre el cuerpo radiante y el entorno es elevada. El calor del sol llega a la tierra por radiación, el mismo es el mecanismo del calor que sentimos ante un fuego o un metal al rojo vivo. Una forma diferente de que se produzca la transferencia de calor es la transición de fase y el papel clave en la regulación de la temperatura del cuerpo humano lo desempeña la evaporación del agua. Cuando el agua, ya sea agua dulce o sudor, se evapora, las moléculas pasan del estado líquido al gaseoso y esto reduce la temperatura del agua restante que sigue en contacto con el cuerpo, actuando así como mecanismo de enfriamiento.

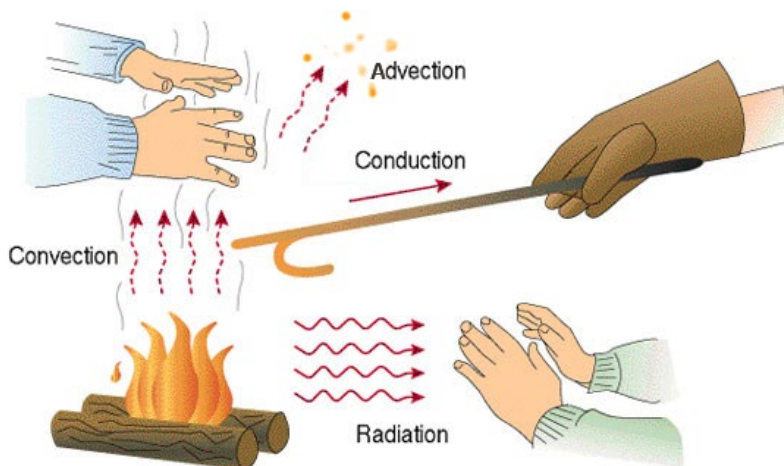


Figura 5.2 Mecanismos de transferencia de calor. Kmecciunit, cmglee, CC BY-SA 4.0, vía Wikimedia Commons

El equilibrio térmico del cuerpo humano depende del balance entre el calor que genera el metabolismo y el que intercambia con el entorno. En la mayoría de los casos, el calor no se transfiere por un único mecanismo, sino por una combinación de mecanismos que funcionan en serie o en paralelo. El diseño de textiles y urdimbres para la protección térmica requiere comprender tanto los mecanismos de transferencia de calor como el

mecanismo de regulación del calor del cuerpo humano, como para lograr las propiedades deseadas, en relación con las condiciones ambientales para las que se utilizarán los wearables.

Además de regular los flujos de calor, los textiles avanzados también pueden incorporar componentes generadores de calor o de refrigeración que interactúen activamente con el equilibrio de transferencia de calor para alcanzar la temperatura deseada para el cuerpo humano. Estas tecnologías se analizarán en el próximo capítulo.

Otra categoría importante de material textil de protección térmica no son las prendas de vestir, como los paneles aislantes y la tapicería.

5.2 Tejidos avanzados para el aislamiento térmico y la regulación del calor corporal

El objetivo de los textiles para el aislamiento térmico es reducir al mínimo la transferencia de calor del cuerpo humano a un entorno frío o disminuir la transferencia de calor de un entorno caliente hacia el cuerpo, permitiendo al mismo tiempo la transferencia de calor del cuerpo al entorno.

En el primer caso, los principales mecanismos de protección contra el frío consisten en utilizar materiales de baja conductividad térmica (normalmente aprovechando el aire atrapado entre las fibras), evitar que el agua moje el tejido e impedir que los flujos de aire lleguen a las capas interiores, donde podrían inducir la evaporación del agua desde cerca del cuerpo o sustituir el calor atrapado. En este último caso, para la protección contra el calor, también se desean propiedades aislantes, pero -especialmente en el caso de la regulación del calor corporal- se busca una rápida evaporación del agua desde cerca del cuerpo.

Estos resultados pueden lograrse utilizando materiales y técnicas de fabricación, tanto en la producción de hilo como en la confección textil, para crear productos novedosos. La bibliografía reciente es rica en publicaciones científicas que proponen soluciones utilizando distintos enfoques. N. Khadse et al. [2] aprovechan la diferencia de coeficiente de dilatación térmica entre dos materiales, Hytrel® y Crastin®, para producir una fibra bicomponente que se curva a bajas temperaturas atrapando aire. La fibra se produjo mediante coextrusión/hilatura por fusión y se evaluó originalmente para producir acolchados no tejidos. Y. Chen et al. [3] desarrollaron una membrana vestible, basada en polímero PET reciclado, para regular la transferencia de sudor y mejorar el aislamiento térmico. Para ello utilizaron filtración al vacío y pulverización catódica por magnetrón para crear una membrana multicapa que incorporaba nanotubos de carbono/nanohilos de óxido de manganeso (CNTs-MnO₂ nanowires) para regular la transferencia de sudor y nanopartículas de plata (Ag) para aumentar las propiedades antibacterianas. Y. Xu et al. [4], inspirándose en el pelo y las plumas de animales polares, utilizaron la hilatura húmeda en una mezcla de etanol/agua/amoniaco para desarrollar una fibra biomimética con nanoporos ocultos internos (HNPF) utilizando ácido algínico/quaternario quitosano como precursores. De esta forma consiguieron producir una fibra con un coeficiente de conducción térmica muy bajo y propiedades biomiméticas de captación de energía solar



para tejidos textiles resistentes al frío. L. Wang et al. [5], inspirándose en el mismo pelo de animal, produjeron fibras huecas porosas compuestas de poliuretano termoplástico (TPU)/poliacrilonitrilo (PAN) mediante hilado en húmedo en agua.

5.3 Tejidos avanzados para la protección contra incendios

La protección contra incendios es un caso distinto en los equipos de protección térmica debido a las características específicas del fuego, que puede proporcionar una gran cantidad de energía térmica, producir temperaturas muy altas e inducir reacciones oxidantes rápidas cuando se "prende fuego" a un objeto. Por lo tanto, los textiles de protección contra incendios deben conservar ciertas propiedades, como un excelente aislamiento térmico, resistencia al choque térmico y a la transferencia rápida de calor, estabilidad a altas temperaturas, es decir, el material no debe fundirse, perder funcionalidades o inflamarse cuando entra en contacto con llamas, objetos en llamas (por ejemplo, líquidos inflamables) o cuando la temperatura aumenta por flujos de fluidos calientes o como resultado de la radiación térmica. Además, los tejidos de protección contra el fuego no deben sostener el fuego y, en caso de que se enciendan, el fuego debe extinguirse por sí solo. Tradicionalmente, los tejidos de protección contra incendios se fabricaban con fibras de amianto y, cuando se comprendió el carácter cancerígeno del amianto, se sustituyeron por otras fibras inorgánicas como la fibra de vidrio y la lana de roca, que también son tóxicas.

J. Sullivan et al. [5] hacen uso de la anisotropía de la conducción térmica de los nanotubos de carbono para modelar un textil que sería resistente a las llamas y altamente aislante frente al calor procedente de una dirección perpendicular, pero al mismo tiempo, pero con una alineación adecuada de los nanotubos de carbono, dirigiendo el calor procedente del fuego lejos del cuerpo y hacia el entorno, reduciendo la temperatura del textil protector.

G.M. Gonzalez et al. [6] crearon láminas no tejidas semiestructuradas de fibra de para-aramida, que presentan propiedades tanto mecánicas como de protección térmica, debido al uso de fibra continua ultrafina de para-aramida que alcanza una compacidad baja similar a la de un aerogel. Este novedoso material puede utilizarse para equipos de protección contra entornos explosivos. La necesidad de combinar las propiedades de protección térmica y blindaje electromagnético en un mismo tejido llevó a M. Li et al. [7] a producir nanofibras de aramida compuestas conductoras para crear textiles de aerogel ultraligeros, flexibles y robustos. Esto se consiguió añadiendo nanotubos de carbono y mezclando mediante agitación mecánica y ultrasonidos la mezcla precursora para hilarla en húmedo y liofilizarla. Así se produjo un hilo microporoso compuesto de aerogel de nanofibras.

Los textiles sensoriales suelen ser poco extensibles, lo que limita sus posibles aplicaciones. S. Zou et al. [8] crearon un hilo jerárquico estirable resistente a las llamas para aplicaciones de control de temperatura y sensores de deformación. El hilo consta de tres partes: un núcleo flexible de spandex cubierto por dos capas de fibras de aramida. La capa interior es una capa conductora de fibra compleja de aramida/nanotubos de carbono, y la capa exterior es de aramida lisa. Ambas capas de fibra de aramida se producen envolviendo la fibra alrededor del núcleo mediante rodillos de fricción. La dirección perpendicular de las capas de fibra de aramida, con respecto al núcleo de spandex, permite que el hilo sea



elástico, mientras que el aire atrapado entre las fibras disminuye la transferencia de calor y proporciona aislamiento.

L. Wang et al. [9] siguieron un enfoque diferente y crearon un sistema de tejido inteligente tejiendo un filamento con memoria de forma en un tejido de para-aramida. El filamento con memoria de forma (aleación de níquel/titanio) puede "entrenarse" para pasar de una forma lineal a una sinusoidal (ondulada) a una temperatura determinada. El tejido con memoria de forma puede introducirse en un sistema de tejido inteligente multicapa 2D. Cuando se alcanza la temperatura de transformación de forma, el filamento se dobla y curva, creando una estructura 3D con grandes áreas de aire y actuando eficazmente como barrera de transferencia de calor.

5.4 Resumen

La tecnología punta se utiliza para diseñar fibras, hilos y textiles novedosos que puedan utilizarse para la protección térmica y el confort. El ecodiseño, el uso de materiales reciclados y reciclables, así como la sustitución de materiales tóxicos y cancerígenos es otra cuestión clave en la investigación y producción de productos innovadores. Los ejemplos de bibliografía reciente que se presentan en este capítulo permiten hacerse una idea de las tendencias en el uso de materiales, tecnologías de producción y diseño. Tanto el diseño 2D como el 3D pueden utilizarse para crear wearables avanzados adaptados a entornos específicos que ofrezcan protección y comodidad.

Referencias

1. ASHRAE Standard 55-2004. "Thermal environmental conditions for human occupancy". American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 2004.
2. Khadse, N., et al. Temperature Responsive PBT Bicomponent Fibers for Dynamic Thermal Insulation. *Polymers (MDPI)*, 2022, 14, 2757.
3. Chen, Y., et al. Laminated PET-based membranes with sweat transportation and dual thermal insulation properties. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450, 138177.
4. Xu, Y., et al. Gradient assembly of alginic acid/quaternary chitosan into biomimetic hidden nanoporous textiles for thermal management. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 300, 120236.
5. Wang, L., et al. Large-scalable polar bear hair-like cellular hollow fibers with excellent thermal insulation and ductility. *J Appl Polym Sci.*, 2022, 139, e53018
6. Gonzalez, G. M., et al. Para-Aramid Fiber Sheets for Simultaneous Mechanical and Thermal Protection in Extreme Environments. *Matter*, 2020, 3, 742–758.
7. Li, M., et al. Ultralight aerogel textiles based on aramid nanofibers composites with excellent thermal insulation and electromagnetic shielding properties. *Composites Communications*, 2022, 35, 101346.
8. Zou, S., et al. Facile and scalable fabrication of stretchable flame-resistant yarn for temperature monitoring and strain sensing. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450, 13846.
9. Wang, L., et al. Developing smart fabric systems with shape memory layer for improved thermal protection and thermal comfort. *Materials & Design*, 2022, 221, 110922.



Capítulo 6. MATERIALES AVANZADOS PARA LA ENERGÍA

Michail Delagrammatikas, Desarrollo del Pensamiento Creativo, Ntrafi Rafinas, Grecia

6.1 Introducción

Los textiles inteligentes suelen utilizar pequeñas cantidades de electricidad necesarias para el funcionamiento de sensores activos o actuadores. La fuente de energía eléctrica puede proceder de baterías instaladas en el wearable, pero la energía también puede recogerse del entorno y almacenarse en dispositivos flexibles de almacenamiento de energía (baterías y supercondensadores) incorporados a los textiles. Así pues, hay dos temas principales en la gestión de la energía de los wearables: la captación y el almacenamiento de energía.

Pequeñas cantidades de energía pueden ser obtenidas por el entorno y quedar disponibles para su almacenamiento y uso. Este proceso suele denominarse captación de energía. Las fuentes de energía del entorno para los wearables pueden ser la radiación solar, los campos electromagnéticos, la energía cinética generada por el movimiento de la persona que lleva el textil inteligente o la energía potencial generada por la presión, entre muchas otras. Normalmente, todas estas fuentes de energía se utilizan para generar electricidad. Mientras que la producción de energía eléctrica a escala industrial sólo es posible utilizando unas pocas tecnologías escalables, la producción de electricidad a pequeña escala puede aprovechar muchos más fenómenos y tecnologías de conversión de energía. A continuación se enumeran algunas fuentes de energía que pueden utilizarse para la captación de energía a pequeña escala y las tecnologías asociadas:

- Energía solar cosechada mediante energía fotovoltaica flexible (FV). La energía solar también puede utilizarse para cosechar energía térmica.
- Energía potencial cosechada por fibras piezoeléctricas y generadores piezoeléctricos (PEG) que aprovechan la flexión y el estiramiento de los textiles, la presión aplicada durante el uso o las vibraciones.
- Los generadores termoeléctricos (TEG) generan electricidad aprovechando gradientes de temperatura que pueden derivarse del calor corporal, fuentes radiantes ect.
- La energía cinética puede cosecharse mediante imanes para inducir electricidad o mediante nanogeneradores triboeléctricos (TENG).

Los campos electromagnéticos también pueden interactuar con antenas especiales e inducir electricidad.





Figura 6.1 a - Generador termoelectrico PEDOT:PSS incrustado en un guante para la generacion de electricidad mediante el calor del cuerpo humano. Eun Jin Bae et al., CC BY 4.0, via Wikimedia Commons; b - Hilo de cinta piezoelectrico de PVDF (2,5x). Ptosky, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons.

Una vez recolectada y convertida en electricidad, la energía debe ser utilizada por dispositivos como sensores y actuadores o almacenada para un uso futuro. En el caso de los textiles inteligentes y los wearables, esto se consigue mediante dispositivos de almacenamiento eléctrico como baterías y supercondensadores. Las baterías y algunos tipos de supercondensadores se cargan convirtiendo la energía eléctrica en energía química, que vuelve a estar disponible como energía eléctrica a través de reacciones electroquímicas. Las reacciones electroquímicas son transformaciones químicas que implican el intercambio de iones entre dos materiales, el ánodo y el cátodo, a través de un medio conductor denominado electrolito. Cuando los dos polos, el ánodo y el cátodo, están conectados a través de un material conductor de electrones (por ejemplo, un hilo metálico, fibras de nanotubos de carbono, un hilo conductor), como resultado de la reacción electroquímica, el material conductor es recorrido por la corriente eléctrica. Cuando se corta el circuito conductor de electrones, la reacción electroquímica se detiene y la energía permanece almacenada. Otros tipos de supercondensadores almacenan energía en forma de energía potencial electrostática o aprovechan tanto los mecanismos electrostáticos como los electroquímicos. En [1] se puede encontrar una revisión exhaustiva de las tecnologías de baterías y supercondensadores.

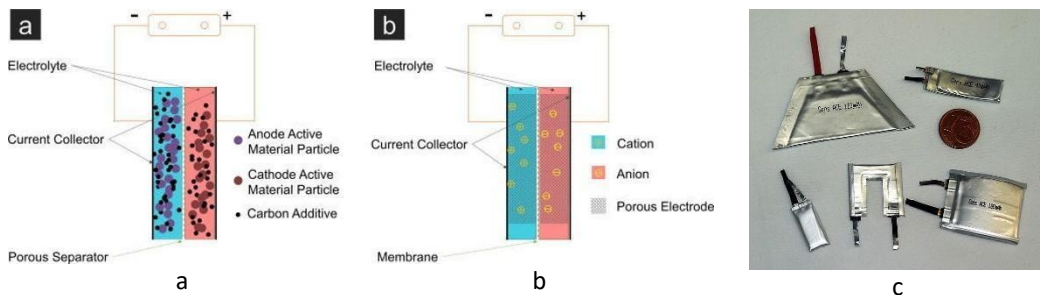


Figura 6.2 a-b - Ilustración esquemática de (a) una batería de iones de litio y (b) un supercondensador. Zhaoxiang Qi, Gary M. Koenig Jr [1], CC-BY 4.0; c - Varios Gens ACE LiPo-Batterypacks de diferentes tamaños, diseños y capacidad, considerados para alimentar dispositivos informáticos vestibles, fabricados por GREPOW Battery Co., Ltd., en el Reino Unido. Thomas Springer, CC0, via Wikimedia Commons.

En algunos casos, la energía no se almacena ni se utiliza en forma de electricidad, sino en forma de energía química y energía térmica. Se utilizan reacciones químicas exotérmicas o endotérmicas para calentar o enfriar, respectivamente, sin que intervengan reacciones electroquímicas como en los dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica. Las dos sesiones siguientes pretenden presentar un caso ejemplar de la bibliografía reciente sobre los avances de los materiales para los textiles de captación de energía y el almacenamiento de energía en wearables.

6.2 Textiles para la captación de energía

Se han utilizado diferentes tecnologías para añadir energía fotovoltaica a los wearables. La solución más sencilla consiste en añadir paneles fotovoltaicos comunes desmontables (y baterías) en los textiles y utilizar la energía para generar calor o para producir luz. Aunque estas aplicaciones pueden ser una solución cuando se necesitan grandes cantidades de energía, presentan ciertas desventajas, ya que añaden peso al textil, son rígidas e incómodas, pueden dañarse fácilmente y no pueden lavarse como la ropa normal. La investigación reciente se centra en la fotovoltaica flexible que se adhiere a los textiles o incluso en el desarrollo de fibras con propiedades fotovoltaicas. Se presentan tres ejemplos diferentes de la bibliografía reciente. T.M Bandara, J.M. Hansadi y F. Bella [2] han publicado recientemente un artículo de revisión sobre células solares textiles sensibilizadas por colorantes (DSSC) para electrónica vestible. Las DSSC suelen constar de un ánodo transparente de vidrio de óxido de indio/flúor y estaño (ITO/FTO), un medio poroso que contiene el colorante de transferencia de carga y un cátodo conductor para recoger electrones [3] que puede incluir nanotubos de carbono. Las DSSC textiles son ligeras, flexibles, cómodas y escalables para su producción industrial. Las DSSC textiles pueden fabricarse como hilos o desarrollarse sobre textiles. E.N. Güler et al. utilizan un tipo diferente de fotovoltaica flexible, la fotovoltaica orgánica (OPV) [4]. La OPV proporciona una solución de captación de energía altamente flexible y muy eficiente (en términos de potencia generada por relación de masa) para los textiles, pero tiene el inconveniente de que tiende a oxidarse con la exposición ambiental (la radiación UV solar y la exposición al sudor son dos entornos oxidantes comunes). Este trabajo se centra en depositar las distintas capas que componen el sistema OPV directamente sobre una película de barrera, evitando así el encapsulado en sándwich que se suele utilizar para proteger el OPV de la oxidación. I. Borazan, A.C. Bedeloglu y A. Demir, proponen una solución basada en un tejido de malla de acero inoxidable [5], utilizando técnicas habituales en la industria textil, como el recubrimiento por inmersión. Este producto puede utilizarse para prendas de vestir, pero también como tejido en estructuras de geometría compleja.

Las investigaciones más avanzadas también proponen soluciones innovadoras utilizando las tecnologías PEG, TEG y TENG para la captación de energía. L. Veeramuthu et al. [6] desarrollaron un generador nano piezoeléctrico basado en fibras conductoras reforzadas por electrohilado (ERCF), que es barato y no tóxico. La captación de energía es posible gracias al alto orden de alineación de las nanofibras durante la producción, lo que permite que los electrones sean recogidos por el ánodo y el cátodo del generador. U. Zubair [7] propone la alimentación de sensores activos mediante la recolección de



energía de un recubrimiento nanocompuesto piezoeléctrico formado por nanopartículas de óxido de zinc dispersas en un aglutinante de fluoruro de polivinilideno (PVDF) aplicado sobre textiles. R. Bagherzadeh et al. [8] resumen los avances en nanogeneradores PENG y TENG para su uso en wearables inteligentes y sensoriales.

6.3 Almacenamiento de energía en textiles

K. Jain et al. [9] han utilizado técnicas de impresión 3D para modificar fibras de celulosa utilizando tinta de poli(3,4-etileno dioxitiofeno) poli(estireno sulfonato) (PEDOT:PPS). Los autores demostraron que estas impresiones 3D, fáciles de fabricar, presentan propiedades de supercondensador. Y. Liang et al. [10] desarrollaron supercondensadores flexibles incrustando un armazón de imidazolato zeolítico en hilos de polímero modificados por nanotubos de carbono desarrollados mediante deposición química en fase vapor (CVD) y tejidos. Y. Rao et al. [11] utilizaron la litografía para crear mediante láser micro-supercondensadores basados en grafeno sobre tejido Kevlar. Este método permite desarrollar dispositivos electrónicos complejos sobre textiles. El avance tecnológico en el campo del almacenamiento de energía para la microelectrónica vestible se resume en un reciente artículo de revisión de X. Xiao et al. [12]. Esta revisión también destaca el estado del arte, las limitaciones existentes en la tecnología y las tendencias futuras. A. H Khadem et al. [13] se centran en su revisión en las aplicaciones del grafeno para el desarrollo de textiles para aplicaciones de supercondensadores, ya que la tecnología del carbono 2D puede aumentar la eficiencia de los dispositivos flexibles de almacenamiento de energía.

Otra forma de almacenar energía es aprovechar la conversión directa de energía química en energía térmica (y viceversa) mediante reacciones químicas exotérmicas y endotérmicas o fenómenos de cambio de fase. Las esteras refrigerantes son una aplicación muy extendida que aprovecha las reacciones endotérmicas relacionadas con el agua liberada por las sales hidratadas, que se producen a temperaturas ambiente elevadas. El uso de materiales que cambian de fase en hilos o textiles para aplicaciones de calefacción y refrigeración en la industria textil se trata como un campo de aplicación distinto en el artículo de revisión de K.A.R. Ismail et al. [14].

6.4 Resumen

Los avances en la tecnología de materiales relacionados con diversos mecanismos de captación y almacenamiento de energía permiten desarrollar textiles inteligentes y sensoriales que incorporan dispositivos consumidores de energía. La fijación de fuentes de energía a prendas de vestir mediante equipos desmontables que simplemente se adhieren a un textil convencional está dando paso rápidamente al desarrollo de dispositivos flexibles, duraderos y eficaces de captación y almacenamiento de energía que se incrustan intrínsecamente en los textiles o incluso en hilos que pueden tejerse o tricotarse.

Referencias

1. Zhaoxiang, Q., Gary, M., Koenig, J. Review Article: Flow battery systems with solid electroactive





- materials. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2017, B 35, 040801.
2. Bandara, T.M., Hansadi, J.M., Bella, F. A review of textile dye-sensitized solar cells for wearable electronics. *Ionics*, 2022, 28, p.p. 2563-2583.
 3. Sharma, S., et al. Dye sensitized solar cells: From genesis to recent drifts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 70, p. p. 529-537.
 4. Güler, E.N., et al. Fully solution-processed, light-weight, and ultraflexible organic solar cells. *Flexible and Printed Electronics*, 2022, 7, 025003.
 5. Borazan, I., Bedeloglu, A.C., Demir, A. A photovoltaic textile design with a stainless steel mesh fabric. *Journal of Industrial Textiles*, 2022, 51(10), p.p. 1527-1538.
 6. Veeramuthu, L., et al. Muscle fibers inspired electrospun nanostructures reinforced conductive fibers for smart wearable optoelectronics and energy generators. *Nano Energy*, 2022, 107592.
 7. Zubair, U., et al. Multifunctional knit fabrics for self-powered sensing through nanocomposites coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 293, 126951.
 8. Bagherzadeh, R., et al. Wearable and flexible electrodes in nanogenerators for energy harvesting, tactile sensors, and electronic textiles: novel materials, recent advances, and future perspectives. *Materials Today Sustainability*, 2022, 20, 100233.
 9. Jain, K., et al. 3D printable composites of modified cellulose fibers and conductive polymers and their use in wearable electronics. *Applied Materials Today*, 2023, 30, 101703.
 10. Liang, Y., et al. Deposition of ZIF-67 and polypyrrole on current collector knitted from carbon nanotube-wrapped polymer yarns as a high-performance electrode for flexible supercapacitors. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 631, p.p. 77-85.
 11. Rao, Y., et al. Laser-scribed phosphorus-doped graphene derived from Kevlar textile for enhanced wearable micro-supercapacitor. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 630, p.p. 586-594.
 12. Xiao, X., et al. Advances in solid-state fiber batteries for wearable bioelectronics. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2022, 26, 101042.
 13. Khadem, A.H., et al. Fabrication, properties, and performance of graphene-based textile fabrics for supercapacitor applications: A review. *Journal of energy storage*, 2022, 56, 105988.
 14. Ismail, K.A.R., et al. New potential applications of phase change materials: A review. *Journal of energy storage*, 2022, 53, 105202.



Capítulo 7. MATERIALES AVANZADOS PARA LA ATENUACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Razvan Radulescu y Raluca Aileni, INCDTP, Bucarest, Rumanía

7.1 Introducción

Este módulo pretende describir la fabricación y el uso de tejidos textiles para el apantallamiento electromagnético (EM). Una primera propiedad importante de estos tejidos es la conductividad eléctrica [1]. Sin embargo, estudios recientes están asociados con el apantallamiento EM y otras propiedades también, tales como: transpirabilidad, carácter antimicrobiano, resistencia mecánica, lavabilidad [2-6].

Como aplicación principal, los tejidos con electroconductividad pueden apantallar la radiación EM según el principio de la jaula de Faraday, induciendo corrientes de Foucault con una dirección opuesta al campo EM incidente y, por tanto, con un efecto de atenuación [7]. La protección contra la radiación EM es importante hoy en día, debido a las diversas fuentes de contaminación EM: GSM, WiFi, líneas de transmisión eléctrica, radiodifusión, etc. Estas radiaciones pueden causar graves problemas de salud a los seres humanos, según varios estudios [8-9] y también interferencias con otros equipos electrónicos, que deben evitarse de acuerdo con los principios de protección de la compatibilidad electromagnética [7]. Los tejidos textiles presentan varias ventajas en comparación con los apantallamientos metálicos clásicos, como se muestra en la figura 7.1.

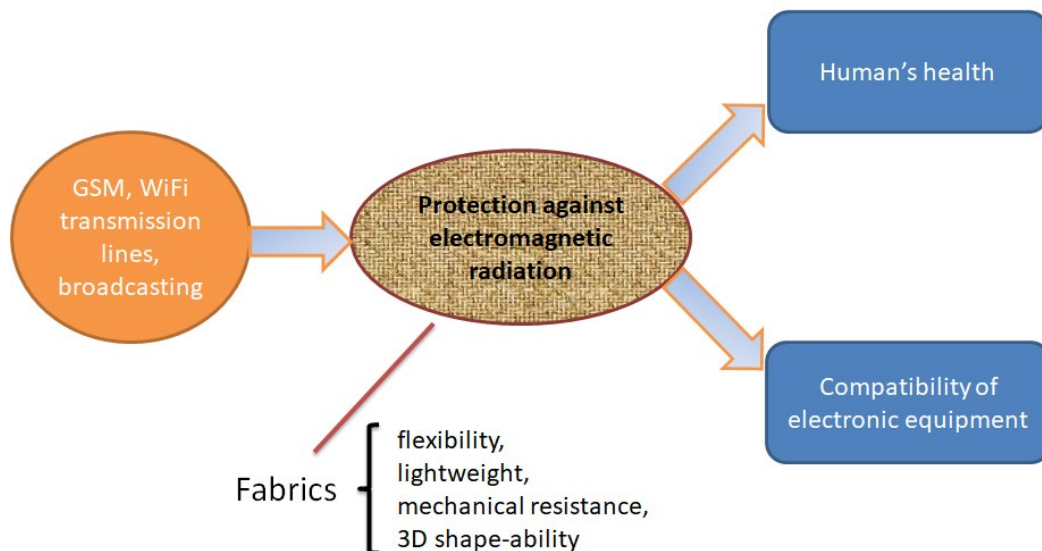


Figura 7.1 Aplicación de tejidos para apantallamiento EMI - fundamentos

Las principales propiedades intrínsecas de los tejidos textiles se conservan en el proceso de conferirles propiedades conductoras eléctricas: flexibilidad, ligereza, resistencia mecánica y moldeabilidad 3D [10].

7.2 Fabricación de tejidos conductores eléctricos para apantallamiento EMI

En la fabricación de tejidos electroconductores pueden distinguirse dos tecnologías principales, como se muestra en la figura 7.2.

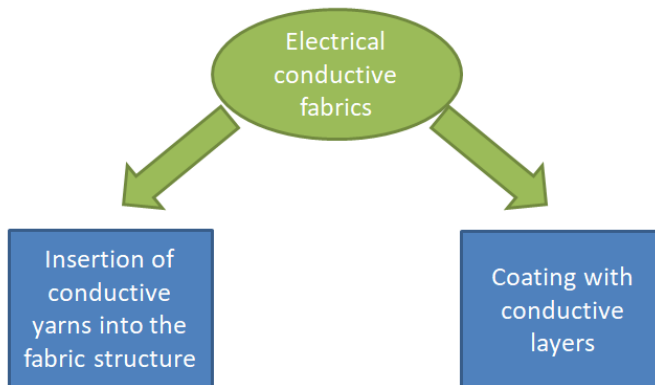


Figura 7.2 Principales tecnologías para conferir propiedades conductoras a los tejidos.

Los dos métodos principales son:

- Inserción de hilos conductores de la electricidad en la estructura del tejido (tejido, punto, tela no tejida) - Las figuras 7.3 y 7.4 presentan el telar y el plegador de urdimbre para preparar tejidos con hilos metálicos.



Figura 7.3 Telar SOMET para la inserción de hilos metálicos SC Majutex SRL



Figura 7.4 Plegador de urdimbre para insertar hilos metálicos en la estructura de urdimbre

- Recubrimiento con capas conductoras de la electricidad (PECVD, magnetrón, pulverización, etc.) - Las figuras 7.5 y 7.6 presentan equipos de plasma para recubrir los tejidos con finas capas metálicas.





Figura 7.5 Equipo de plasma de baja presión del INCDTP

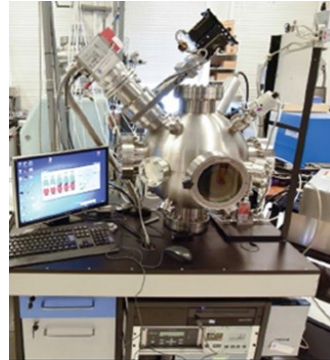


Figura 7.6 Equipo de plasma para sputtering de magnetron de INFLPR

En primer lugar, hay que fabricar los tejidos de apantallamiento EM y, a continuación, medir su principal funcionalidad en función de la aplicación: la eficacia de apantallamiento.

7.3 Métodos para medir la eficacia de apantallamiento EM de los escudos textiles

La eficacia del apantallamiento electromagnético (EMSE) se define por la relación entre la potencia de la señal incidente y la señal transmitida y se expresa en Decibelios [dB]. EMSE se define como:

$$EMSE = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{potencia de la señal incidente}}{\text{potencia de la señal transmitida}} \right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

Uno de los métodos más convenientes para medir la EMSE es mediante la célula transversal-electromagnética, o célula TEM. El principio del ensayo consiste en medir la señal eléctrica con y sin muestra y calcular la relación según la relación (1). Según la norma ASTM-ES07, la construcción de la célula TEM es la siguiente: figura 7.7 [11]. Un generador de potencia crea la señal eléctrica y un amplificador refuerza la señal que se introduce en una conexión de la célula TEM. La muestra textil tiene un efecto de apantallamiento sobre la señal, que se mide con un analizador de redes o un osciloscopio en la otra conexión de la célula TEM. La muestra textil de ensayo tiene forma de arandela, para ajustarse al diámetro interior y exterior de la célula TEM ($d = 30 \text{ mm}$; $D = 100 \text{ mm}$).

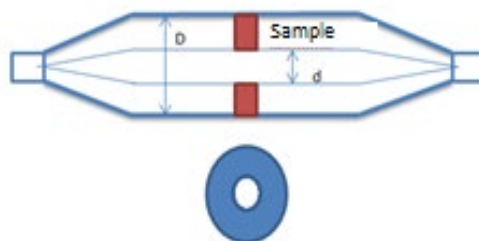


Figura 7.7 Célula TEM conforme a la norma ASTM-ES07.

En nuestro módulo didáctico se presentan dos tipos de muestras textiles. La primera muestra es un tejido con hilos de plata insertados en urdimbre y trama sobre un sustrato

de algodón. La distancia entre los hilos de plata es de 5 mm y el tejido tiene una masa específica de 118 g/m² (Figura 7.8). El mismo tejido fue recubierto en plasma magnetrón con una capa de 1200 nm de Cobre en ambas caras (Figura 7.9). Como se ha mencionado en el párrafo anterior, ambas muestras se prepararon en formato de arandela para su medición mediante célula TEM.

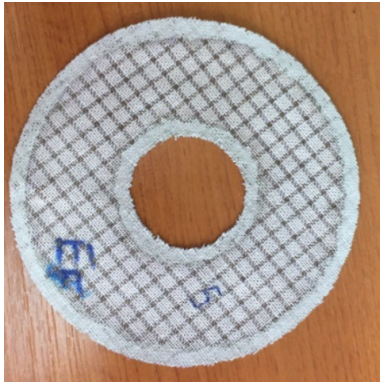


Figura 7.8 Muestra F1 para célula TEM: tejido con hilos conductores de plata insertados.



Figura 7.9 Muestra F2 para célula TEM: tela tejida con hilos conductores insertados de plata y recubrimiento de plasma con cobre.

La EMSE se midió en dB según (1) en la gama de frecuencias 0,1-1000 MHz. La figura 7.10 presenta los valores de EMSE en una escala logarítmica para la frecuencia en MHz. El EMSE presenta valores de 44-45 dB para el tejido con hilos de plata y de 50-53 dB para el tejido con hilos de plata y revestimiento de cobre, para la gama de frecuencias de 0,1-100 MHz. Se midió una ligera disminución de los valores de EMSE para el rango de frecuencias de 100-1000 MHz, debido al espesor eléctrico del material, donde el espesor de la muestra \gg profundidad de la piel y la aparición de modos de transmisión más altos en la célula TEM coaxial. Estos modos de transmisión superiores se superponen al modo de transmisión principal y pueden afectar al resultado de la medición [12].



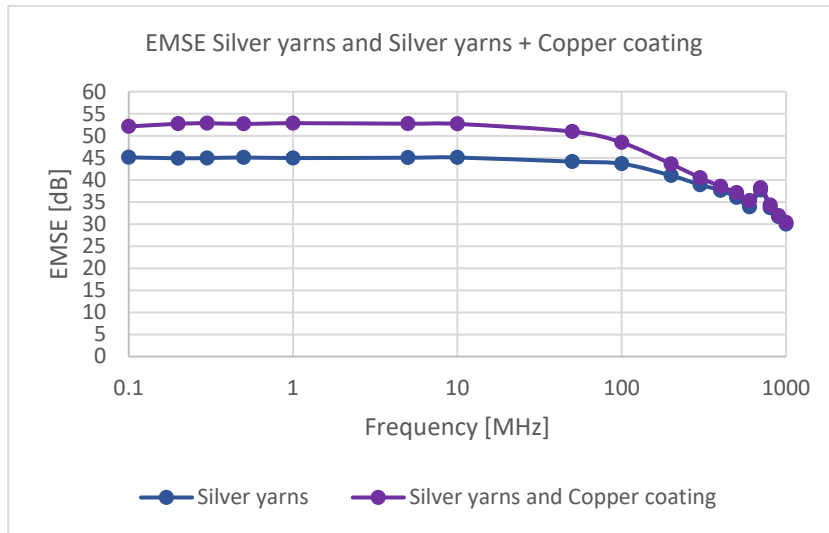


Figura 7.10 Resultados EMSE de ambas muestras de tejido.

7.4 Conclusiones

Los tejidos textiles han alcanzado en los últimos 20 años aplicaciones adicionales a los productos de confección, denominadas textiles técnicos. Una de estas aplicaciones es el apantallamiento de la radiación EM, según los principios de compatibilidad electromagnética (EMC). La principal propiedad de los tejidos de apantallamiento es la electroconductividad, que permite generar corrientes de Foucault con un efecto de apantallamiento según el principio de la jaula de Faraday. Las modernas tecnologías de hilado y recubrimiento han permitido la fabricación de hilos metálicos y el recubrimiento con capas metálicas. Estas nuevas tecnologías han dado lugar a la fabricación de tejidos con hilos metálicos insertados en la estructura (telas tejidas, de punto y no tejidas) o al recubrimiento de los tejidos con capas metálicas (PECVD, magnetrón, pulverización). Tras la fabricación de los tejidos electroconductores, la siguiente consideración está relacionada con la medición de su funcionalidad principal, la eficacia de apantallamiento EM (EMSE). Uno de los métodos de ensayo más sencillos es mediante la célula electromagnética transversal (TEM) según la norma ASTM ES-07. Los resultados EMSE muestran un aumento de 5-8 dB para el tejido recubierto de plasma en el rango de frecuencias de 0,1-1000 MHz.

Referencias

1. Ziaja, J., Jaroszewski, M. EMI shielding using composite materials with plasma layers. In *Electromagnetic Waves*. InTechOpen: London, UK, 2011.
2. Mengwei, D., et al. A green approach to preparing hydrophobic, electrically conductive textiles based on waterborne polyurethane for electromagnetic interference shielding with low reflectivity. *Chemical Engineering Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127749>
3. Qiongzhen, L., et al. Flexible, breathable, and highly environmental-stable Ni/PPy/PET conductive fabrics for efficient electromagnetic interference shielding and wearable textile



antennas. *Composites Part B*, 2021, 215, 108752.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108752>

4. Zhang, X., Qingwen, Li, et al. Developing thermal regulating and electromagnetic shielding textiles using ultra-thin carbon nanotube films. *Composites Communications* 21, 2020, 100409. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100409>
5. Pakdel, E., Xungai, W., et al. Advances in photocatalytic self-cleaning, superhydrophobic and electromagnetic interference shielding textile treatments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, 277, 102116. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102116>
6. Cortez, J., et al. Sintering of nanoscale silver coated textiles, a new approach to attain conductive fabrics for electromagnetic shielding. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, 147, 815e822. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.06.025>
7. Schwab, A., Kuerner, W. Electromagnetic compatibility. AGIR publishing house, 2013.
8. Community research: Health and electromagnetic fields, EU-funded research into the impact of electromagnetic fields and mobile telephones on health, 2005
9. World Health Organization (WHO): Radiation: Electromagnetic fields - Questions and Answers. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-electromagnetic-fields>, 2015, Accessed 19.04.2022
10. The Handbook of the Textile Engineer, AGIR publishing house, 2005
11. Standard ASTM ES-07, https://infostore.saiglobal.com/en-us/standards/astm-es-7-1983-154532_saig_astm_astm_371798/, Accessed 19.04.2022
12. Bădic, M., Marinescu, M-J. The Failure of Coaxial TEM Cells ASTM Standards Methods in H.F. Range. *IEEE Xplore*, 2002, DOI: 10.1109/IEMC.2002.1032442





Capítulo 8. MATERIALES AVANZADOS PARA SENSORES DE DEFORMACIÓN

Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina y Bodoga Alexandra, Universidad Técnica "Gheorghe Asachi", Rumanía

8.1 Introducción

Cuando una estructura textil es capaz de detectar estímulos, reaccionar y adaptarse a ellos, se convierte en un textil avanzado. Los materiales avanzados pueden modificar o adaptar sus propiedades en respuesta a factores externos (por ejemplo, materiales electroconductores, materiales capaces de cambiar de color (figura 8.1) [1], materiales que pueden almacenar la forma, materiales que pueden volver a la forma anterior bajo la acción de factores térmicos, materiales fabricados con tejidos con tratamientos retardantes o hidrófobos).

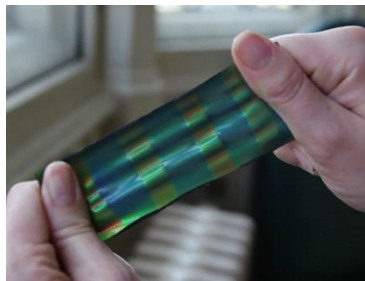


Figura 8.1 Materiales inteligentes que cambian de color [1]

Los sensores textiles de deformación constituyen una nueva generación de dispositivos que combinan la capacidad de detección de la deformación con la de llevarlos puestos y que tienen una gran capacidad de estiramiento [2].

8.2 Clasificación de sensores

En la figura 8.2 [2] se presentan muchos tipos de sensores de deformación basados en textiles.

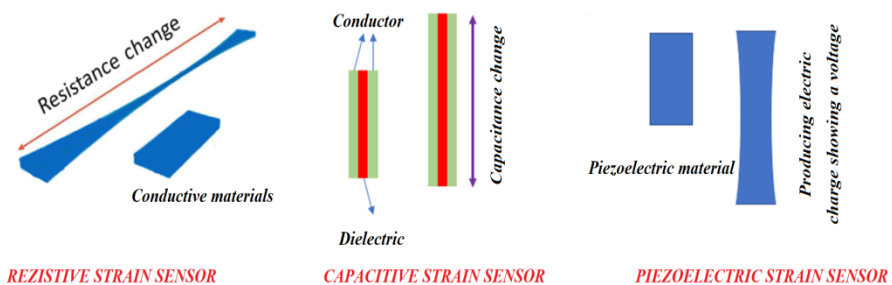


Figura 8.2 Clasificación de sensores de deformación



En la figura 8.2 se puede observar que existen tres categorías de sensores:

- **Sensores de deformación resistivos** (se componen de materiales activos y un sustrato flexible [6]) que, al aplicar tensión, provocan un cambio en la resistencia eléctrica del sensor [3, 4, 5]. La resistencia eléctrica del sensor se recupera a medida que los materiales conductores restablecen los estados o estructuras originales, cuando se libera la tensión. Los sensores de deformación resistivos basados en textiles tienen un proceso de fabricación sencillo y señales de lectura accesibles [3]. Los sensores de deformación resistivos basados en textiles se caracterizan por una capa de electrodo textil de materiales activos que funciona como una resistencia cuando se aplica un voltaje, y la resistencia se altera según la magnitud de la deformación aplicada (Figura 8.3) [15].

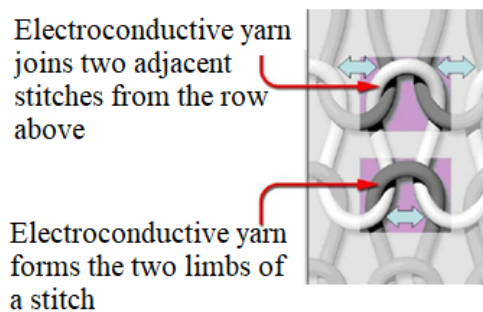


Figura 8.3 Estructura del sensor de deformación resistivo

En la figura 8.3 observa las flechas que marcan las regiones donde se produce el contacto eléctrico a medida que la estructura base se relaja tras el estiramiento.

- **Sensores capacitivos** (Figura 8.4) se componen de dos electrodos opuestos de materiales activos y que están separados por una capa dieléctrica de materiales aislantes entre ellos [7,8,9,10,14].

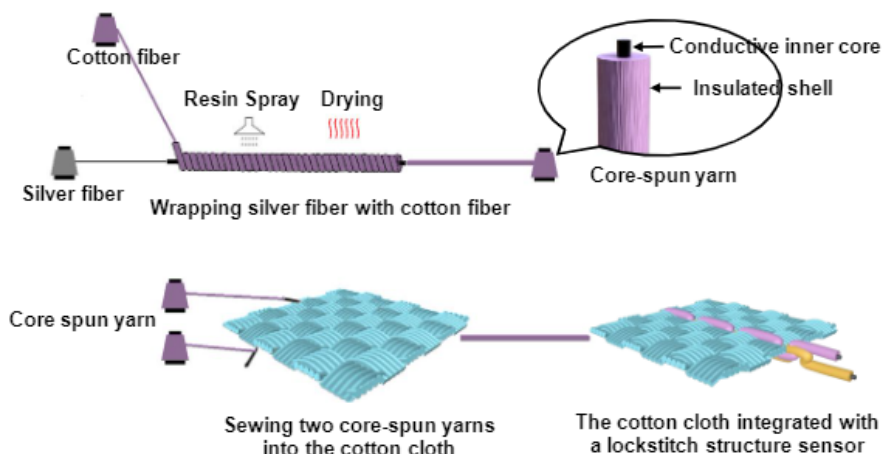


Figura 8.4 Un sensor capacitivo

- **Sensor de deformación piezoeléctrico** es un material piezoeléctrico que transforma la deformación en energía eléctrica [11, 12]. En estos sensores, cuando se aplica un estímulo externo (presión, fuerzas de tracción, fuerzas de compresión y torsión) se genera una diferencia de tensión (figura 8.5).

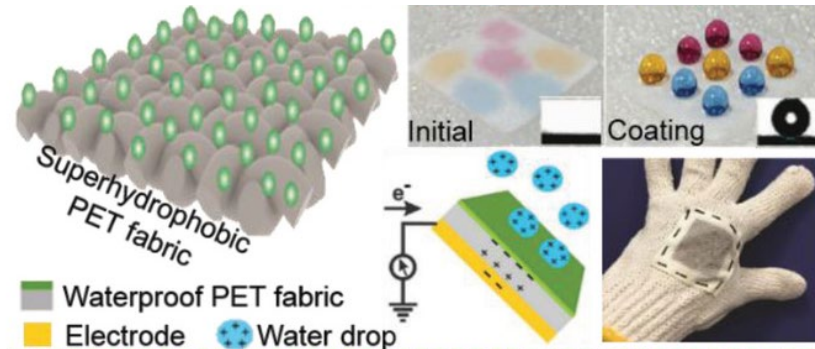


Figura 8.5 Sensor de deformación piezoeléctrico

Materiales textiles conductores se utilizan para obtener textiles inteligentes (sensores, textiles calefactores, prendas con descarga electrostática, comunicación).

Los tejidos conductores pueden obtenerse por tres métodos:

1. Utilización de polímeros intrínsecamente conductores.
2. Añadiendo carbono o metales en diferentes formas, como hilos, fibras o partículas.
3. Recubrimiento con sustancias conductoras [13].

Clasificación de los textiles conductores

- a. **Textiles antiestáticos** que acumulan carga eléctrica en la superficie de los objetos.
- b. **Textiles de apantallamiento electromagnético** que pueden restringir la difusión de campos electromagnéticos en un espacio (tejidos, de punto y no tejidos) (Figura 8.6) [16].



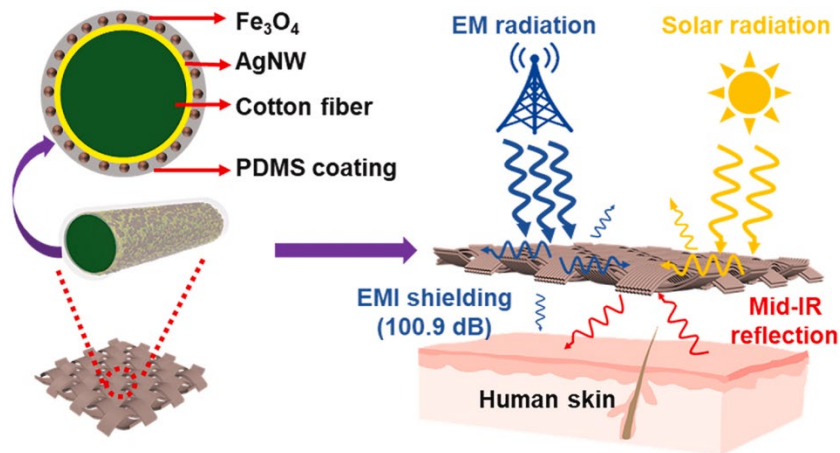


Figura 8.6 Textiles de blindaje electromagnético

Los hilos de la figura 8.6 son conductores eléctricos por efecto electromagnético.

c. Los **e-textiles**, fibras e hilos conductores de la electricidad, tienen características como una conductividad eléctrica razonable, flexibilidad, descarga electrostática y protección contra interferencias electromagnéticas.

El principal componente de los textiles inteligentes vestibles son las fibras textiles conductoras utilizadas en sensores, blindaje contra interferencias electromagnéticas, descargas electrostáticas y transferencia de datos en la ropa [13].

d. Los **revestimientos funcionales** pueden ser interfaces o superficies de materiales y son una posibilidad para modificar los textiles con propiedades conductoras [16].

Referencias

1. <https://materialdistrict.com/article/colour-changing-smart-material/>, 2012.
2. Jilong, W., Chunhong, L. and Kun, Z. Textile-Based Strain Sensor for Human Motion Detection. *Energy & Environmental Materials*, Wiley
3. Amjadi, M., Kyung, K.U., Park, I., Sitti, M. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26, 1678.
4. Jian, M., Wang, C., Wang, Q., Wang, H., Xia, K., Yin, Z., Zhang, M., Liang, X., Zhang, Y. *Sci. China Mater.*, 2017, 60, 1026.
5. Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y., Yomogida, Y., Izadi-Najafabadi, A., Futaba, D.N., Hata, K. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, 6, 296.
6. Huang, C.T., Shen, C.L., Tang, C.F., Chang, S.H. *Sens. Actuators a Phys.*, 2008, 141, 396.
7. Lipomi, D.J., Vosgueritchian, M., Tee, B.C.K., Hellstrom, S.L., Lee, J.A., Fox, C.H., Bao, Z. *Nat. Nanotechnol.*, 2011, 6, 788.
8. Cai, L., Song, L., Luan, P., Zhang, Q., Zhang, N., Gao, Q., Zhao, D., Zhang, X., Tu, M., Yang, F., Zhou, W., Fan, Q., Luo, J., Zhou, W., Ajayan, P.M., Xie, S. *Sci. Rep.*, 2013, 3, 3048.
9. Yao, S., Zhu, Y. *Nanoscale*, 2014, 6, 2345.
10. Cai, L., Song, L., Luan, P.S., Zhang, Q., Zhang, N., Gao, Q.Q., Zhao, D., Zhang, X., Tu, M., Yang, F., Zhou, W.B., Fan, Q.X., Luo, J., Zhou, W.Y., Ajayan, P.M., Xie, S.S. *Sci. Rep.*, 2013, 43, 3048.
11. Sun, Q., Seung, W., Kim, B.J., Seo, S., Kim, S.-W., Cho, J.H. *Adv. Mater.*, 2015, 27, 3411.

12. Zhou, Y., Gu, Fei, P., Mai, W., Gao, Y., Yang, R., Bao, G., Wang, Z.L. *Nano Lett.* 2008, 8, 3035.
13. <https://www.textileblog.com/conductive-textiles-types-properties-and-applications/>
14. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssensors.0c00210>
15. https://www.google.com/search?q=Resistive+strain+sensors+in+textile+images&tbm=isch&ved=2ahUKEwjw_PGBx8n4AhWfwwIHHQ4kBAAQ2-cCegQIABAA&oiq
16. Zong, J.Y., Zhou, X.J., Hu, Y.F., Yang, T.B., Xiang, Y.D., Hao, L., Lei, J., Li, Z.M. A wearable multifunctional fabric with excellent electromagnetic interference shielding and passive radiation heating performance. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225 (15).





Capítulo 9. MATERIALES AVANZADOS PARA SENSORES DE PRESIÓN

Aileni Raluca Maria, Stroe Cristina y Radulescu Razvan, INCDTP, Rumanía

Resumen. El desarrollo de sensores textiles de presión supone un reto para los investigadores que tratan de generar avances científicos en la monitorización biomédica (movimiento, pulso, puerta y respiración) o robótica (pieles electrónicas artificiales para robots). El bordado versátil de materiales textiles, las tecnologías con polímeros, los compuestos micro/nanoestructurados avanzados y la digitalización (software y microelectrónica) generan productos wearables innovadores. Este capítulo presenta los principales aspectos de los materiales utilizados y las tecnologías de desarrollo de sensores resistivos y capacitivos.

9.1 Introducción

Los sensores de presión se utilizan para detectar la presión y convertirla en una señal eléctrica cuyo valor depende del nivel y la variación de la presión aplicada. Un sensor de presión consta de elementos sensibles a la presión (piezoresistivos, capacitivos y eléctricamente resistivos) para evaluar la presión aplicada y algunos componentes para convertir esta información en una señal eléctrica. La presión representa la fuerza aplicada por un líquido o un gas sobre una superficie (elementos sensibles). Los sensores de presión detectan el movimiento, la puerta, el pulso, la frecuencia respiratoria o la piel electrónica (figura 9.1). Los elementos sensibles más utilizados son los materiales piezoresistivos o capacitivos.



Figura 9.1 Aplicaciones de los sensores de presión

9.2 Materiales utilizados para los sensores de presión

La materia prima utilizada para la fabricación de sensores de presión consiste en polímeros no conductores (NCP), productos químicos (CNT, grafeno, SWCNT, MWCNT), polímeros conductores (CP=NCP+CNT), polímeros intrínsecamente conductores (PEDOT: PSS, PANI).

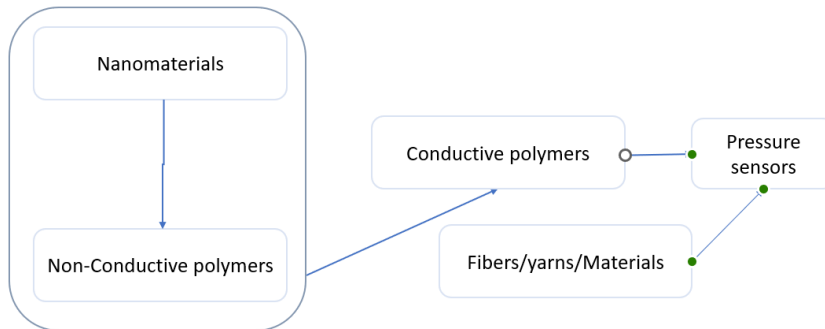


Figura 9.2 Materiales para sensores de presión

● *Polímeros conductores*

El poli(3,4-etilendioxitiofeno)-polisulfonato de estireno (PEDOT: PSS es un polímero conductor que puede depositarse sobre sustratos textiles para formar compuestos con propiedades electroquímicas para aplicaciones como la electrónica impresa. La polianilina (PANI) es un polímero inherentemente conductor y semiconductor con aplicaciones en sensores y fabricación de circuitos impresos.

● *Polímeros no conductores - Elastómeros*

El difluoruro de polivinilideno (PVDF) es un fluoropolímero termoplástico utilizado en la impresión 3D y la fabricación de sensores (matrices de sensores táctiles), baterías y supercondensadores. Por lo general, la silicona polimérica se utiliza para el aislamiento eléctrico mediante la integración en la matriz polimérica de los nanotubos de grafeno o CNT (nanotubos de carbono) para convertirse en silicona conductora ideal para su uso en sensores de presión.

● *Nanomateriales*

Los nanotubos de carbono (CNT) presentan excelentes propiedades eléctricas para los sensores de presión piezorresistivos. En general, los sensores de presión piezorresistivos se fabrican utilizando diversos elementos, como hilos de oro, nanocables de ZnO, nanocables de plata, grafeno, nanopartículas de oro/plata y nanotubos de carbono integrados en siliconas.



9.3 Clasificación y fabricación de sensores de presión

A. Sensores de presión capacitivos

Los sensores de presión capacitivos (figuras 9.3 y 9.4) están fabricados con materiales conductores en forma de placas separadas por dieléctricos (espumas sintéticas, separadores de tejido o polímeros blandos no conductores). Estos sensores pueden fabricarse utilizando diferentes tecnologías, como el tejido, la costura, el punto 3D (figura 9.3), el bordado con filamentos/hilos conductores, seguido de la impresión 3D (figura 9.4), que se deposita por pulverización catódica, o la serigrafía con tintas/pastas conductoras basadas en polímeros conductores.

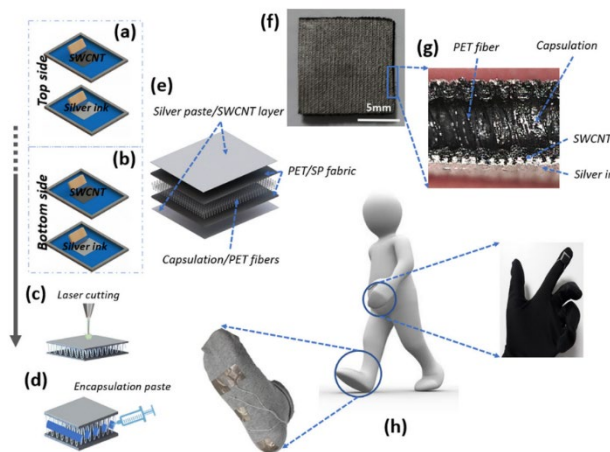


Figura 9.3 Proceso de fabricación de un sensor de presión capacitivo compuesto por tejido espaciador e impresión SWCNT/plata [6].



Figura 9.4 Fabricación de sensores capacitivos flexibles [6] sensores de presión basados en CB/CNT/PDMS [7].

El uso de polímeros conductores (por ejemplo, PEDOT: PSS (Figura 9.5), PANI (Figura 9.6)) se pueden desarrollar sensores táctiles para aplicaciones como teclados, sensores de presión integrados en camas, sofás o plantillas médicas [8] o detección de movimiento, sensores táctiles 3D para la detección de movimiento en robótica [8]. El sensor de presión se fabrica tejiendo los hilos recubiertos con el polímero conductor PEDOT: PSS y una película polimérica perfluoro dieléctrica (Cytop) [8].

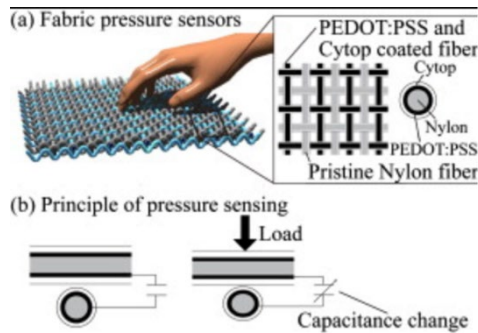


Figura 9.5 Conjunto de sensores de presión de tejido [8].

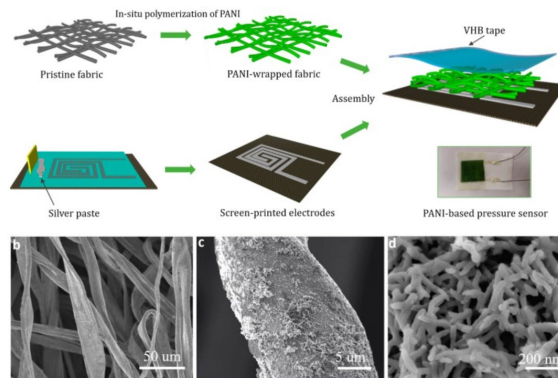


Figura 9.6 Fabricación de sensores capacitivos flexibles basados en nanofibras de PANI y electrodos de plata [9].

B. Sensores de presión resistivos

Los sensores de presión resistivos pueden fabricarse utilizando materiales eléctricamente resistivos/conductivos como hilos/filamentos tejidos, pegados, trenzados o bordados en diversas estructuras mediante diferentes técnicas de fabricación (tejido, bordado, tricotado, cosido). El principio de funcionamiento se basa en el aumento de la resistencia eléctrica cuando la tela (tejida, de punto) se estira o se comprime. Los sensores pueden generar variaciones de tensión al estirarse (figura 9.7 a) o comprimirse (figura 9.7 b).



Figura 9.7 Sensores de presión resistivos: a - sensor de presión de punto basado en hilos piezoresistivos [10]; b - sensor de presión resistivo bordado [11].

Referencias

1. Textile pressure sensors can be washed online available, 2015, 10. www.electronicweeky.com/news/research-news/textile-pressure-sensors-can-be-washed-
2. Pyka, W., Jedrzejowski, M., Chudy, M., Krafczyk, W., Tokarczyk, O., Dziezok, M., Bzymek, A., Bysko, S., Blachowicz, T. and Ehrmann, A. On the use of textile materials in robotics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2020, 15, 1558925020910725
3. Analyze Foot Function with Pressure Mapping, online available: www.tekscan.com/products-solutions/pressure-offloading-foot-function
4. Zhao, B., Dong, Z. and Cong, H. A wearable and fully-textile capacitive sensor based on flat-knitted spacing fabric for human motions detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 340, 113558.
5. Kumar, A. Recent progress in the fabrication and applications of flexible capacitive and resistive pressure sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 113770.
6. Vu, C.C. and Kim, J. Highly elastic capacitive pressure sensor based on smart textiles for full-range human motion monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314, 112029.
7. Shi, Y., Lü, X., Zhao, J., Wang, W., Meng, X., Wang, P. and Li, F. Flexible Capacitive Pressure Sensor Based on Microstructured Composite Dielectric Layer for Broad Linear Range Pressure Sensing Applications. *Micromachines*, 2022, 13(2), 223.
8. Takamatsu, S., Kobayashi, T., Shibayama, N., Miyake, K. and Itoh, T. Fabric pressure sensor array fabricated with die-coating and weaving techniques. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 184, 57-63.
9. Liu, K., Zhou, Z., Yan, X., Meng, X., Tang, H., Qu, K., Gao, Y., Li, Y., Yu, J. and Li, L. Polyaniline nanofiber wrapped fabric for high-performance flexible pressure sensors. *Polymers*, 2019, 11(7), 1120.
10. Pointner, A., Preindl, T., Mlakar, S., Aigner, R. and Haller, M. Knitted resi: A highly flexible, force-sensitive knitted textile based on resistive yarns. In ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, 2020, 1-2.
11. Aigner, R., Pointner, A., Preindl, T., Parzer, P. and Haller, M. Embroidered resistive pressure sensors: A novel approach for textile interfaces. In Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2020, 1-13.



Capítulo 10. MATERIALES AVANZADOS PARA ACTUADORES

Aileni Raluca Maria y Cristina Stroe, INCDTP, Rumanía

Resumen. El diseño de actuadores textiles (textuadores) representa un reto para los investigadores que tratan de mejorar la solución integrando materiales ligeros, flexibles y cómodos para actuadores vestibles (guantes de RV, músculos artificiales, exoesqueletos, dispositivos de electroestimulación, artículos de moda) o robóticos (pieles electrónicas artificiales para robots). El desarrollo de actuadores blandos/flexibles implica el uso de tecnologías clásicas (punto, costura, tejido, bordado) y avanzadas (plasma, sputtering, impresión 3D). Además, mediante la integración de polímeros electroactivos o electroconductores, micro/nanoestructuras y digitalización (software, componentes electrónicos) se pueden fabricar actuadores innovadores basados en productos vestibles. Este capítulo presenta los principales aspectos relativos al tipo de actuador, los materiales utilizados y las tecnologías para el desarrollo de actuadores flexibles.

10.1 Introducción

Las investigaciones actuales en el campo de los actuadores flexibles/suaves muestran un creciente interés por resolver los retos actuales mediante la integración de materiales flexibles con funciones actuadoras en sistemas vestibles.

Los actuadores actúan mecánica, química, magnética, eléctrica y térmicamente bajo la acción de un estímulo (por ejemplo, térmico, eléctrico, mecánico, óptico o magnético). Para desarrollar actuadores se utilizan diversos materiales inteligentes, como los piezoeléctricos, los electrostrictivos, los magnetostrictivos, los reológicos, los con memoria de forma (termosensibles), los sensibles al pH y los electrocromáticos [1].

Los actuadores convierten los estímulos de entrada (energía eléctrica, mecánica, térmica, óptica o química, campo magnético) en una acción. En función de la conversión de energía de los estímulos de entrada en acción de salida, en la Tabla 1.1 se presentan varios actuadores.

Principalmente, los actuadores integran materiales piezoeléctricos [2, 3], electrostrictivos [4], electrocromáticos [5], magnetostrictivos [6, 7], con memoria de forma [8], con conductividad térmica, baja resistencia superficial, sensibles al pH y propiedades reológicas y magnéticas. Los actuadores reaccionan a los estímulos de entrada (energía eléctrica, mecánica, óptica, química o térmica) y generan una acción o una conversión de un tipo de energía en otro (Tabla 1.1). Por ejemplo, se sabe que los músculos artificiales (Figura 10.1) actúan basándose en polímeros electroactivos [9, 10]. Para desarrollar actuadores textiles se utilizan tecnologías clásicas (punto, tejido, costura) combinadas con tecnologías avanzadas como plasma RF, sputtering, impresión 3D y microondas.

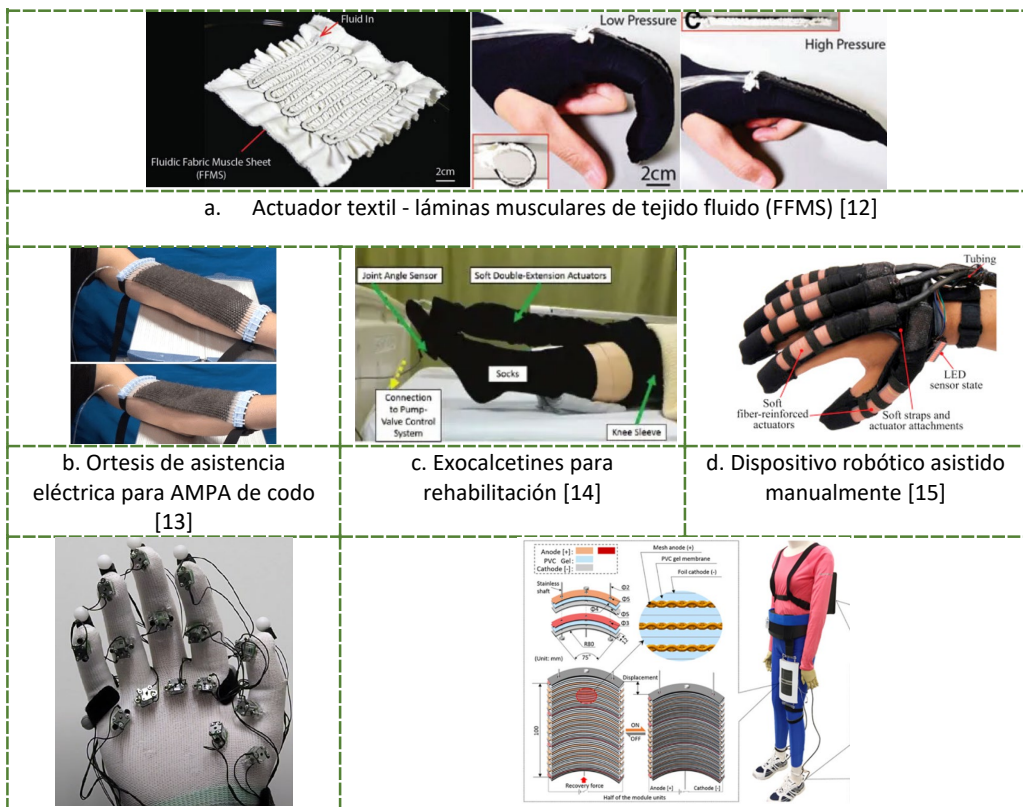




Figura 10.1 Polímeros electroactivos basados en músculos artificiales [11].

10.2 Tipos de actuadores y fabricación

Los actuadores pueden ser blandos o duros, según la flexibilidad del material. Los actuadores blandos son materiales flexibles y extensibles con propiedades variables y reversibles. Los actuadores blandos (Figura 10.2) se utilizan para dispositivos portátiles, láminas musculares de tejido fluido (FFMS -Figura 10.2 a), músculos artificiales (músculos artificiales neumáticos (PAM) fabricados mediante tecnologías de trenzado o punto -Figura 10.2 b), exo-calcetines de punto para rehabilitación (Figura 10.2 c), guante para rehabilitación (Figura 10.2 d), guante háptico para RV (Figura 10.2 e), actuador de elastómero dieléctrico (DEA -Figura 10.2 f) y empuñaduras blandas. Por otro lado, los actuadores duros hechos de materiales rígidos con propiedades invariables no son adecuados para dispositivos portátiles porque resultan incómodos.





- | | |
|---|---|
| e. Actuador EM para guante háptico [16] | f. Actuador de elastómero dieléctrico (DEA) para la rehabilitación de la articulación de la cadera [17] |
|---|---|

Figura 10.2 Aplicaciones de los textuadores (actuadores suaves)

La figura 10.3 presenta el principio de acción de los textuadores fabricados tejiendo o tricotando.

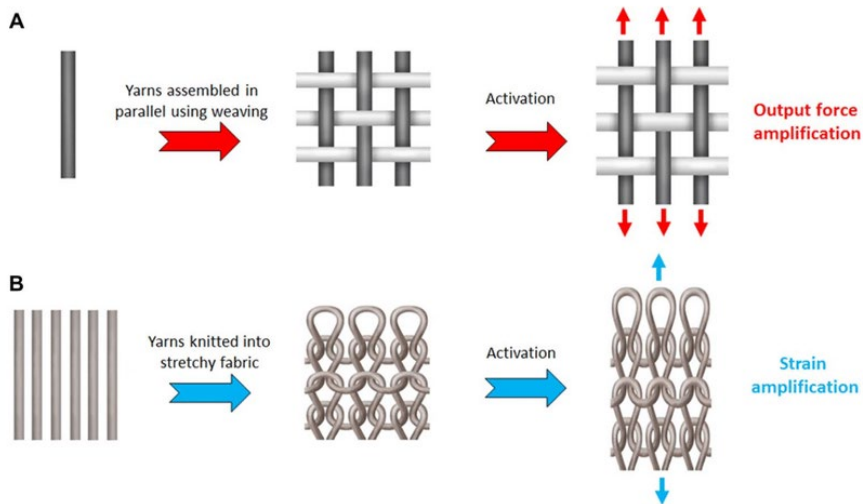


Figura 10.3 Textuadores: A - los hilos de tejido amplificaban la fuerza en paralelo; B - la tensión se amplificaba mediante hilos de tejido en una estructura de punto de trama [18].

La figura 10.4 presenta varios materiales avanzados utilizados para actuadores blandos.

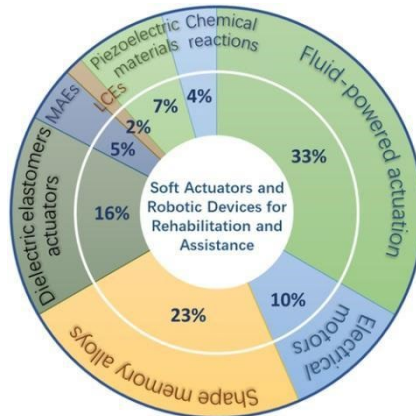


Figura 10.4 Actuadores blandos basados en elastómeros dieléctricos, SMA, MAE, LCE y materiales piezoeléctricos [19].



Tabla 10.1 Tipo de actuadores

| Tipo de actuador | Estímulo de entrada | Respuesta de salida | Acción | Tipo de material | Ejemplo |
|------------------|---------------------|---|---------------------------------------|------------------|---|
| Térmico | Energía térmica | Energía mecánica [19] (cinética/movimiento) | Termomecánica (contracción/expansión) | Energía térmica | Smart Thermally Actuating Textiles |
| Termoeléctrico | Energía térmica | Eléctrica | Termoeléctrico | Termoeléctrico | Turning heat into electricity |
| Electromagnético | Energía eléctrica | Mecánica | Electromecánica | Electromagnético | Electromagnetic Actuators for Rendering Haptics in VR |
| Piezoeléctrico | Energía mecánica | Eléctrica | Piezoeléctrico | Piezoeléctrico | Piezoelectric fiber for motion-sensitive textiles |
| Optoelectrónico | Optical energy | Eléctrica | Optoelectrónico | Fotoeléctrico | Photovoltaic power from textiles |
| Electro-fotónico | Energía eléctrica | Óptica | Electro-fotónica | Electro-fotónico | LED into Textile for Smart Clothes |
| Fototérmico | Energía lumínica | Térmica | Fototérmico | Fototérmico | photothermal phase change textile |
| Magnetoreológico | Campo magnético | Efecto magnetoelástico (deformación) | Mecánica (Deformación elástica) | Magnetoelástico | Magnetoelastic fibers |
| Electroquímico | Energía eléctrica | Química | Electroquímica | Electroquímico | Twisted yarn actuator |
| Fotoquímico | Energía lumínica | Química | Fotoquímica | Fotoquímico | Fiber-type FETs |



Referencias

1. Aileni, R.M., Project 3D Electotex.
2. Sorayani, B., Sadeghi, M.S., Latifi, A.H. and Bagherzadeh, R. Design and fabrication of a piezoelectric out-put evaluation system for sensitivity measurements of fibrous sensors and actuators. *Journal of Industrial Textiles*, 2021, 50(10), 1643-1659.
3. Dagdeviren, C., Joe, P., Tuzman, O.L., Park, K.I., Lee, K.J., Shi, Y., Huang, Y. and Rogers, J.A. Recent progress in flexible and stretchable piezoelectric devices for mechanical energy harvesting, sensing and actuation. *Extreme mechanics letters*, 2016, 9, 269-281.
4. Cottinet, P.J., Guyomar, D., Guiffard, B., Lebrun, L. and Putson, C. Electrostrictive polymer composite for energy harvesters and actuators, 2011.
5. Moretti, C., Tao, X., Koehl, L. and Koncar, V. Electrochromic textile displays for personal communication. In *Smart textiles and their applications*. Woodhead Publishing, 2016.
6. Zhao, X., Zhou, Y., Xu, J., Chen, G., Fang, Y., Tat, T., Xiao, X., Song, Y., Li, S. and Chen, J. Soft fibers with magnetoelasticity for wearable electronics. *Nature communications*, 2021, 12(1), 1-11.
7. Spizzo, F., Greco, G., Del Bianco, L., et al. Magnetostrictive and Electroconductive Stress-Sensitive Functional Spider Silk. *Advanced Functional Materials*, 2022, 2207382.
8. Chan Vili, Y.Y. Investigating smart textiles based on shape memory materials. *Textile Research Journal*, 2007, 77(5), 290-300.
9. Bar-Cohen, Y. Electroactive polymers as artificial muscles: a review. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(6), 822-827.
10. Carpi, F. and De Rossi, D. Electroactive polymer-based devices for e-textiles in biomedicine. *IEEE Transactions on Information Technology in biomedicine*, 2005, 9(3), 295-318.
11. Jager, E.W., Martinez, J.G., Zhong, Y. and Persson, N.K. Soft actuator materials for textile muscles and wearable bioelectronics. In *Wearable Bioelectronics*, 2020, 201-218.
12. Zhu, M., Do, T.N., Hawkes, E. and Visell, Y. Fluidic fabric muscle sheets for wearable and soft robotics. *Soft robotics*, 2020, 7(2), 179-197.
13. Pneumatic artificial muscles for orthosis, online available: atlasofthefuture.org/project/pneumatic-artificial-muscles-for-orthosis
14. Low, F.Z., Yeow, R.C., Yap, H.K. and Lim, J.H. Study on the use of soft ankle-foot exoskeleton for alternative mechanical prophylaxis of deep vein thrombosis. *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2015, 589-593.
15. Polygerinos, P., Wang, Z., Galloway, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 73, 135-143.
16. Vechev, V., Zarate, J., Lindlbauer, D., Hinchet, R., Shea, H. and Hilliges, O. March. Tactiles: Dual-mode low-power electromagnetic actuators for rendering continuous contact and spatial haptic patterns in VR. *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2019, 312-320.
17. Li, Y. and Hashimoto, M. PVC gel soft actuator-based wearable assist wear for hip joint support during walking. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(12), 125003.
18. Maziz, A., Concas, A., Khaldi, A., Stålhånd, J., Persson, N.K. and Jager, E.W. Knitting and weaving artificial muscles. *Science advances*, 2017, 3(1), e1600327.
19. Pan, M., Yuan, C., Liang, X., Dong, T., Liu, T., Zhang, J., Zou, J., Yang, H. and Bowen, C. Soft Actuators and Robotic Devices for Rehabilitation and Assistance. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(4), 2100140.
20. Yang, Y., Wu, Y., Li, C., Yang, X. and Chen, W. Flexible actuators for soft robotics. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, 2(1), 1900077.

Capítulo 11. DEFINICIONES, DESARROLLO Y APLICACIONES DE LOS MATERIALES SENSORIALES

Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis y Ioannis Chronis, Universidad de Ática Occidental, Grecia

11.1 Introducción

Los sensores son una parte esencial de las innovaciones actuales. Son el núcleo de la llamada Cuarta Revolución Industrial y de la próxima generación de Internet, o Internet de los objetos, como se conoce comúnmente. Cuando nos referimos a un sensor, podríamos describirlo como un dispositivo, un módulo, una máquina o incluso un subsistema, que puede detectar o medir uno o más parámetros del entorno que le rodea. Los sensores miden estos parámetros, (entradas) y proporcionan (transmiten) los resultados (valores) de una forma acorde con la estructura del dispositivo de medición del que forman parte.

Los sensores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, que van desde la medicina a las ciencias medioambientales. Los recientes avances en el diseño de sensores han diversificado sus aplicaciones y los materiales donde pueden incorporarse. Cada vez son más pequeños, baratos y eficaces. También son capaces de funcionar en entornos difíciles y duran más. Los materiales a micro y nanoescala han propiciado estas mejoras, así como las tecnologías digitales. Las técnicas empleadas para fabricar sensores también son algo crucial a tener en cuenta. Se han utilizado métodos novedosos, como la impresión de circuitos electrónicos, con resultados impresionantes.

Los sensores se llevan en las actividades cotidianas, a menudo sin que el usuario se dé cuenta explícitamente. Por ejemplo, los teléfonos inteligentes tienen un montón de sensores diferentes que se utilizan en diversas tareas y aplicaciones como brújula, acelerómetro, sensores de proximidad, sensores de orientación y dispositivos de luz, por nombrar algunos. Los sensores en la ciencia médica son vitales para detectar, controlar, tratar y curar enfermedades. No es exagerado decir que la civilización actual está inmersa en tecnologías relacionadas con los sensores.

Los dispositivos vestibles dependen de sensores para informar de parámetros como la distancia recorrida, el intervalo de latidos del corazón y la saturación de oxígeno en sangre, entre otros. La temperatura del cuerpo humano y del entorno también puede medirse mediante sensores miniaturizados para la aplicación correspondiente.

11.2 Sensores portátiles para vigilar la salud

Los sensores portátiles pueden fabricarse con muchos métodos de transducción diferentes, como el resistivo, el capacitivo, el piezoeléctrico y el triboeléctrico. Todos estos métodos transmiten señales mediante electrones.



Los sensores portátiles pueden dividirse en tres categorías principales en función de las señales biológicas medidas: sensores electrofisiológicos, físicos y químicos [1]

11.3 Sensores electrofisiológicos

En los sensores electrofisiológicos es crucial diseñar electrodos epidérmicos delgados, conformados y biocompatibles para disminuir la impedancia de contacto piel-electrodo. La proximidad constante del contacto es la clave para reducir la impedancia de contacto piel-electrodo. Los sensores electrofisiológicos detectan la diferencia de potencial eléctrico entre electrodos en tejidos especializados como el corazón (electrocardiograma [ECG]), el cerebro (electroencefalografía [EEG]) y los músculos (EMG).

Esto da lugar a una variedad de productos finales que incluyen EEG epidérmico, ECG pegajoso, ECG epidérmico, EEG de grafeno y EMG basado en seda [2].

Sensores físicos

Los sensores físicos detectan las señales físicas del cuerpo humano. Hay varias señales físicas relacionadas con la salud humana, como la presión sanguínea, la temperatura corporal y el estiramiento de los músculos o la piel. En el diseño de sensores de presión conformes a la piel se han utilizado materiales como nanocables de plata, nanocables de oro, nanotubos de carbono, grafeno, polímeros conductores, líquidos iónicos y metales líquidos.

Los parámetros clave que se examinan son la sensibilidad, la histéresis y la durabilidad.

Los sensores físicos miden la presión, la temperatura, la luz, la tensión y el sonido. Las aplicaciones de este tipo de sensores pueden encontrarse en sensores de temperatura de tatuajes, detección de gestos, grado de flexión, movimiento de extremidades y entrenamiento muscular.

Sensores químicos

En los sensores químicos, para su fabricación pueden utilizarse materiales como iones de potasio y sodio, iones de cloruro, ácido láctico y glucosa. Algunos de estos sensores son los detectores de glucosa en sangre, los detectores microfluídicos de sudor, los sensores de hidratación y los sensores textiles multiiónicos que se utilizan en el diagnóstico de la fibrosis quística.

Propiedades de los sensores

Los principales objetivos de un sensor útil son la obtención de resultados precisos, la durabilidad, el bajo coste y la inocuidad para las personas y el medio ambiente.

Para proporcionar las características mencionadas son necesarias una serie de propiedades deseadas, a saber, extensibilidad, modularidad, escalabilidad, propiedades de autocuración y transparencia, entre otras. Para conseguir todo esto es importante el uso

de materiales nanoestructurados, conductores iónicos basados en gel, electrónica impresa, electrodos estirables y el uso de electrónica biorreabsorbible.

Por otra parte, la biorreabsorción, la biocompatibilidad, el consumo de energía y la permeabilidad podrían lograrse mediante la detección de la exposición ambiental, la detección de factores de salud y el desarrollo de sistemas autoalimentados.

Además, la conductividad, la sensibilidad, el rango de detección, la fiabilidad, la selectividad y la repelencia al agua son cruciales para los sensores de temperatura, los sensores de deformación y presión, los sensores electrofisiológicos y los sensores ópticos y electroquímicos [3].

Elasticidad

Un sensor que se utilice en un dispositivo portátil o que se adhiera al cuerpo humano debe ser estirable. Entre las formas de conseguirlo se encuentran la reducción de las dimensiones de los materiales utilizados como electrodos [4], el uso de polímeros elásticos, hidrogeles y líquidos iónicos [5].

Factor de forma

En el aspecto del factor de forma, el objetivo es crear sensores flexibles, ponibles, delgados y secos que sean transparentes, ligeros y cómodos [6].

Transparencia

Para utilizar sensores en el cuerpo humano se necesita transparencia. Las películas poliméricas transparentes y la limitación de la anchura de las líneas de electrodos metálicos son algunas de las formas de conseguirlo. Otras incluyen el uso de películas elásticas transparentes de nanotubos de carbono, nanocables de silicio y nanocables metálicos [7, 8].

Biocompatibilidad

La baja toxicidad es vital para el uso a largo plazo de sensores en la piel humana. Para ello, se puede utilizar la encapsulación o la composición con materiales biocompatibles. Otra posibilidad es utilizar adhesivos secos sin gel [9, 10].

11.4 Materiales utilizados en los sensores

Cada tipo de sensor incluye materiales específicos que se han utilizado, examinado o están en fase de investigación y examen por su potencial de uso. El tipo de materiales depende en gran medida de la aplicación potencial.

Para sensores de temperatura se han descrito Cr y Au sobre parches de silicona [11].

Para sensores electrofisiológicos se utilizan NWs de Au-Ag, CNTs y AgNWs [12, 13].

Los sensores de presión y deformación consisten en nanofibras de AgNW/poliamida, micropartículas de ZnO con forma de erizo de mar y redes de matriz estirables y conformables sobre sustratos de PVA o PDMS [14, 15].

Los sensores electroquímicos utilizan PEDOT: PSS sobre sustrato SEBS y cortisol basado en OECT.

Smart materials for sensors

Debido al brote de la pandemia COVID-19, los avances en materiales inteligentes que se utilizan para sensores se aceleraron y mostraron un crecimiento significativo.

Los materiales inteligentes se entrecruzan en múltiples disciplinas que abarcan la ciencia de los materiales, la química, la física, la ingeniería y la nanotecnología [16].

Los materiales más comunes de este tipo son los nanomateriales, el grafeno, las nanopartículas de carbono, los materiales inorgánicos, las nanopartículas orgánicas, los polímeros conductores y aislantes y los materiales híbridos.

11.5 Conclusión

Los sensores interceptan la vida humana de formas muy diversas. Es esencial desarrollar mejores sensores con mayores capacidades para integrarlos con éxito en más aspectos de nuestra sociedad. Sensores para vigilar la salud y el deporte, sensores para monitorizar métricas medioambientales, el tiempo, el mar, los animales son sólo algunos de los campos importantes que dependen de estos avances.

La investigación sobre los materiales que pueden dar lugar a sensores más complejos y sofisticados se está llevando a cabo en laboratorios de investigación y universidades de todo el mundo.

Referencias

1. Ling, Y., Tiance, A., Lim Wei, Y., Zhu, B., Gong, S., Wenlong, Ch. Disruptive, Soft, Wearable Sensors. *Advanced Materials*, 2019. doi:10.1002/adma.201904664
2. Ha, M., Lim, S., Ko, H. Wearable and flexible sensors for user-interactive health-monitoring devices. *Journal of Materials Chemistry B*, 2018. doi:10.1039/C8TB01063C
3. Lim, H.R., Kim, H.S., Qazi, R., Kwon, Y.T., Jeong, J.W., Yeo, W.H. Advanced Soft Materials, Sensor Integrations, and Applications of Wearable Flexible Hybrid Electronics in Healthcare, Energy, and Environment. *Advanced Materials*, 2019. doi:10.1002/adma.201901924
4. Koo, J.H., Kim, D.C., Shim, H.J., Kim, T.H., Kim, D.H. Flexible and Stretchable Smart Display: Materials, Fabrication, Device Design, and System Integration. *Advanced Functional Materials*, 2018. doi:10.1002/adfm.201801834
5. Trung, T.Q., Lee, N.-E. *Advanced Materials*, 2017, 29, 1603167.
6. Wen, Z., Yang, Y., Sun, N., Li, G., Liu, Y., Chen, C., Shi, J., Xie, L., Jiang, H., Bao, D., Zhuo, Q., Sun, X., *Advanced Functional Materials*, 2018, 28. <https://doi.org/10.1002/adfm.201803684>

7. Lipomi, D.J., Vosgueritchian, M., Tee, B.C., Hellstrom, S.L., Lee, J.A., Fox, CH., Bao, Z. Skin-like pressure, and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes. *Nat Nanotechnology*, 2011, 6(12), 788-792. Doi: 10.1038/nano.2011.184. PMID: 22020121.
8. Miyamoto, A., Lee, S., Cooray, N.F., Lee, S., Mori, M., Matsuhisa, N., Jin, H., Yoda, L., Yokota, T., Itoh, A., Sekino, M., Kawasaki, H., Ebihara, T., Amagai, M., Someya, T. Inflammation-free, gas-permeable, lightweight, stretchable on-skin electronics with nano meshes. *Nat Nanotechnology*, 2017, 12(9), 907-913. doi: 10.1038/nnano.2017.125. Epub 2017 Jul 17. PMID: 28737748.
9. Wang, C.Y., Xia, K.L., Wang, H.M., Liang, X.P., Yin, Z., Zhang, Y. *Advanced Materials*, 2019, 31, <https://doi.org/10.1002/adma.201801072>
10. Wang, C., Li, X., Hu, H., Zhang, L., Huang, Z., Lin, M., Zhang, Z., Yin, Z., Huang, B., Gong, H., Bhaskaran, S., Gu, Y., Makihata, M., Guo, Y., Lei, Y., Chen, Y., Wang, C., Li, Y., Zhang, T., Chen, Z., Pisano, A.P., Zhang, L., Zhou, Q., Xu, S. Monitoring of the central blood pressure waveform via a conformal ultrasonic device. *Nat Biomed Eng.*, 2018, 2(9), 687-695. doi: 10.1038/s41551-018-0287-x. Epub 2018 Sep 11. PMID: 30906648; PMCID: PMC6428206.
11. Krishnan, S.R., Su, C.-J., Xie, Z., Patel, M., Madhvapathy, S.R., Xu, Y., Freudman, J., Ng, B., Heo, S.Y., Wang, H., Ray, T.R., Leshock, J., Stankiewicz, I., Feng, X., Huang, Y., Gutruf, P., Rogers, J.A. *Small*, 2018, 14. <https://doi.org/10.1002/sml.201803192>
12. Son, D., et al. An integrated self-healable electronic skin system fabricated via dynamic reconstruction of a nanostructured conducting network. *Nature nanotechnology*, 2018, 13(11), 1057-1065.
13. Choi, S., Han, S.I., Jung, D., et al. Highly conductive, stretchable, and biocompatible Ag–Au core–sheath nanowire composite for wearable and implantable bioelectronics. *Nature Nanotech*, 2018, 13, 1048–1056. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0226-8>
14. Fan, Y.J., Li, X., et al. *ACS Nano*, 2018, 12, 9326.
15. Yin, B., Liu, X., et al. *Nat. Commun*, 2018, 9, 5161
16. Özgecan, E., Esmâ, D., Kutay, S., Eylul, G.Y., Fatih, I. Smart materials-integrated sensor technologies for COVID-19 diagnosis. *Emergent Materials*, 2021. doi:10.1007/s42247-020-00150-w

Capítulo 12. EVALUACIÓN DEL CONFORT SENSORIAL

David Gómez, AEI Tèxtils, Desarrollo empresarial, Barcelona, España

12.1 Introducción

El confort sensorial desempeña un papel determinante en la evaluación de los textiles. Este concepto suele utilizarse para describir la sensación del tejido en su contacto con la piel humana con respecto a la suavidad, sedosidad u otras cualidades cualitativas que añaden vestibilidad al textil. También puede denominarse tacto del tejido o sensación del tejido por aludir directamente al grado de sensibilidad y confortabilidad del cuerpo cuando está en contacto con la fibra [1]. Es relevante mencionar que dependiendo de las preferencias de la persona que lleve el textil en cuestión, las variables que determinarían su calidad, y confortabilidad variarán, ya que este tipo de evaluación es completamente subjetiva [2].

El contacto mecánico del textil con la piel es lo que provoca la presencia o ausencia de sensación de confort. Puede ser pegajoso con la piel mojada por el sudor, rasposo o demasiado rígido, lo que suele percibirse como una sensación desagradable, o puede ser suave y liso, sensaciones que se atribuyen a la confortabilidad y lo agradable. Además, algunos tejidos pueden incluso producir irritaciones cuando entran en contacto con la piel por contacto mecánico. Éstos se clasificarían como textiles incómodos. [3] Es muy probable que los textiles inteligentes produzcan este tipo de efecto debido a los hilos conductores que puedan tener en su estructura.

La fricción y la rugosidad del tejido y su comportamiento sobre la piel humana también son factores clave para evaluar la comodidad del tejido. Este contacto y/o fricción, junto con la rugosidad o suavidad del tejido, son los que generan la sensación que se evalúa posteriormente. Generalmente, la suavidad se asocia a la comodidad y recibe una buena evaluación [4].

12.2 Factores clave de la evaluación del confort

Las sensaciones más específicas que pueden tenerse en cuenta en la evaluación de la comodidad de una fibra, tejido o textil son las siguientes [5]:

En primer lugar, podemos hablar de las sensaciones táctiles más genéricas: punzante, cosquilleante, áspera, suave, escarpada, rasposa, picante, quisquillosa, pegajosa.

Como ya se ha mencionado, la fuerza de fricción desempeña un papel importante en la evaluación física de una fibra o un tejido: una superficie irregular o rugosa de la fibra siempre generará más fricción que una lisa [6]. Así pues, a la fuerza necesaria para mover el tejido a lo largo de la piel durante el contacto tejido-piel se opone la fuerza de fricción creada por dicho contacto. Cuando la fuerza aplicada supera la fuerza de fricción, se produce el movimiento del tejido contra la piel. Las características de fricción de las

superficies de deslizamiento suelen describirse mediante el coeficiente de fricción, que se define como la relación entre la fuerza de arrastre (paralela a una superficie) y la fuerza normal que ejerce presión sobre la superficie de contacto [7, 8].

En segundo lugar, las sensaciones que la presencia o ausencia de humedad puede generar en la fibra, como si está húmeda, mojada, pegajosa, bochornosa, no absorbente, pegajosa.

Algunos estudios sugieren que la presencia de humedad aumenta la fricción entre el tejido y la piel, por lo que la sensación humana ante el textil en estas condiciones es más áspera que en un ambiente seco. En otras palabras, a mayor presencia de humedad, mayor fricción y percepción de falta de comodidad. Así pues, la reacción a la humedad se convierte en una clave importante para la evaluación del confort sensorial [9].

El número de filamentos de un hilo también modifica la sensación al tocar un tejido: cuanto mayor sea el número de filamentos, más suave será el tejido. Por eso se utilizan microfibras en algunas aplicaciones específicas que necesitan generar una sensación agradable en contacto con la piel. Cuando se habla de textiles inteligentes, los hilos conductores tienen propiedades diferentes a las de los hilos del tejido, y no se utiliza el concepto de microfibras. Además, la rigidez de los hilos conductores puede desempeñar un papel importante en la suavidad del tejido.

Algunas de estas propiedades son más fáciles de modificar en los tejidos sintéticos que en las fibras naturales (especialmente las vegetales).

Luego, el ajuste o la adaptación al cuerpo y cómo se siente, como ceñido, holgado, ligero, pesado, suave, rígido.

Y, por último, también es una variable importante: las sensaciones térmicas: frío, escalofrío, frescor, tibieza, calor.

12.3 Innovación y confort

Un campo que exige un alto rendimiento de los tejidos y una sensación de confort tan precisa es el mercado de la ropa deportiva. En este ámbito de aplicación, los deportistas no sólo necesitan sentirse cómodos en condiciones normales, sino que para actividades específicas se requieren movimientos repetidos durante largos periodos que pongan a prueba la fricción de la tela con la piel, cómo reacciona la tela a la humedad y al sudor, su resistencia y protección a condiciones climáticas adversas (tanto en ambientes de alta como de baja temperatura),... Así, de hecho, esa es la razón por la que el mundo del deporte ejemplifica adecuadamente la evaluación del confort de los textiles. Además, la combinación entre innovación, deporte y confort está actualmente en el punto de mira [10]. En este sentido, a continuación se presenta una interesante recopilación de ejemplos [10]:



Figura 12.1 Productos inteligentes de Sensoria (camiseta sin mangas, sujetador deportivo, calcetines y zapatillas de correr)

La marca Sensoria ha desarrollado varias líneas de productos inteligentes relacionados con la ropa deportiva. La gama incluye prendas que van desde zapatillas y calcetines hasta camisetas. La particularidad de estos innovadores productos es que son capaces de realizar un seguimiento del ritmo cardíaco, la velocidad, las calorías y la distancia, entre otros.

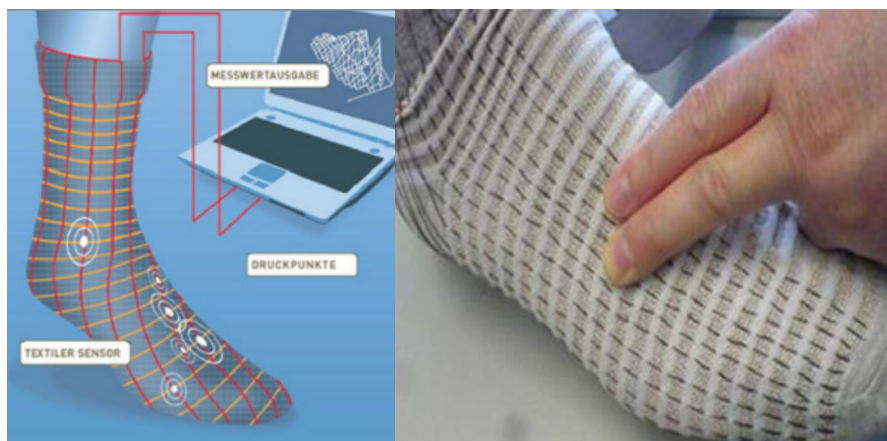


Figura 12.2 SmartSock de Alphafit para medir el ajuste

SmartSock es un producto con propiedades y funciones interesantes. Ofrece la posibilidad de evaluar el ajuste del pie dentro del zapato.





Figura 12.3 Cinta para el sudor y gorro de natación Moov HR

MOV HR es una banda para el sudor que puede realizar un seguimiento de constantes humanas como la frecuencia cardiaca o proporcionar datos más personalizados, ya que puede conectarse y sincronizarse con auriculares. Además, puede utilizarse bajo un gorro de natación.



Figura 12.4 Chaqueta térmica Venture Heat Deluxe

El forro calefactable Venture Heat Deluxe proporciona a la persona que lo lleva una sensación de calor que suaviza el frío exterior. Es especialmente útil para los motoristas.

Todos estos artículos necesitan un alto nivel de confort para rendir correctamente y no perturbar la actividad del deportista.

12.4 Conclusión

Llegados a este punto del análisis, algunas afirmaciones son claras. Por un lado, la confortabilidad en el textil y la confección puede evaluarse desde múltiples ángulos. Y por otro lado, podemos inferir que cuantas más variables se tengan en cuenta, mejor, ya que la confortabilidad es, en un porcentaje determinante, una cualidad subjetiva. Aún así, para el público en general, las sensaciones táctiles relacionadas con la suavidad y otras condiciones, ligadas a la humedad, son probablemente consideradas las variables más importantes que modulan la presencia o ausencia de confort.

Y, finalmente, sobre la aplicación concreta de esta confortabilidad en la nueva generación textil, cabe destacar que aunque la innovación dote a los nuevos productos de nuevas y múltiples aplicaciones y mejoras, la sensación de uso nunca es un aspecto que deba olvidarse.



Referencias

1. Meinander, H., Luible, C., Magnenat-Thalmann, N. Influence of Physical Parameters on Fabric Hand. *Proceedings of the HAPTEX'05 Workshop on Haptic and Tactile Perception of Deformable Objects, Hanover, 2005*, 12.
2. Pan, N., Yen, K.C., Zhao, S.T., Yang, S.R. A New Approach to the Objective Evaluation of Fabric Handle from Mechanical Properties, Part I; Objective Measure for Total Handle. *Textile Research Journal*, 1988, 58, 438-444.
3. Bartels, V.T. Physiological comfort of bio functional textile s in Current problems in Dermatology. G. burg, Editor: Karger, Switzerland, 2006, 51-66.
4. LaMotte, R.H. Psychophysical and Neurophysiological Studies of Tactile Sensibility, in Clothing comfort. N.R.S. Hollies and R.F. Goldman, Editors: Michigan, 1977, 83-105.
5. Sundaresan, S., and Dasaradan, B.S. Comfort Properties of Apparels. *The Indian Textile Journal*, 2007, 32, 2-10.
6. Bhupender, E.M., and Gupta, S. Friction in Fibrous Materials. *Textile Research Journal*, 1991, 61(9), 547-554.
7. Gwosdow, A.R., and Steven, J.C. Skin friction and fabric sensations in neutral and warm environments. *Textile Research Journal*, 1986, 56(9), 574-580.
8. Nawaza, N., Troynikovb, N., Watsonc, C. Evaluation of Surface Characteristics of Fabrics Suitable for Skin Layer of Firefighters' Protective Clothing. *International conference on Physics Science and Technology*, 2011.
9. Li, Y., ed. The Science of clothing comfort. *The Textile Institute, Textile Progress, Oxford, UK*, 2001, 103
10. Kazani, I., Lutz, V., Malik, S., Mazari, A., Nierstrasz, V., Rodrigues, L., Tedesco, S. CONTEXT-COST, *Smart textiles for sportswear and wearables (WG5)*, 2021.



Capítulo 13. MATERIALES FOTÓNICOS PARA APLICACIONES SENSORIALES

Athanasios Panagiotopoulos, Georgios Priniotakis y Ioannis Chronis, Universidad de Ática Occidental

13.1 Introducción

La fotónica es un campo de estudio que implica el uso de la radiación en el espectro de frecuencias de la luz utilizando el elemento fundamental de la luz, que es el fotón. Existe una relación entre las aplicaciones electrónicas y las aplicaciones fotónicas: las aplicaciones electrónicas utilizan electrones y las aplicaciones fotónicas utilizan el fotón de forma similar. La fotónica tiene ventajas específicas en comparación con la electrónica, y ésta es la razón de su uso.

Ya existe una gran variedad de componentes fotónicos que se utilizan en aplicaciones comunes, como láseres, fibras ópticas, cámaras y pantallas de teléfonos móviles, pinzas ópticas, iluminación de vehículos y edificios, pantallas de ordenador y televisores y muchas más.

Con el término "materiales fotónicos" nos referimos a los materiales que emiten, detectan, manipulan o controlan la luz. Los dispositivos fotónicos emiten, transfieren y detectan luz y se construyen con componentes como diodos láser, diodos emisores de luz, células solares y fotovoltaicas, pantallas y amplificadores ópticos.

13. 2 Uso de materiales fotónicos en sensores

Una familia común de materiales que se utilizan como elementos sensores son los cristales coloidales autoensamblados. Son cristales a escala micro o incluso nanométrica que se colocan sobre un sustrato, en una dispersión muy fina. Suelen producirse a partir de una solución. La estructura y la naturaleza de los materiales que los componen determinan la brecha de banda fotónica y el color estructural de los mismos y, por este motivo, resultan útiles como elementos sensores en diversas aplicaciones [1].

Los sensores fotónicos poseen ciertas ventajas en comparación con los sensores electrónicos convencionales. Éstas son la alta sensibilidad, la baja histéresis y la inmunidad a las interferencias electromagnéticas [2].



Materials

Las tecnologías disponibles y el uso de sensores fotónicos se han desarrollado en los últimos años. Las principales categorías de estos materiales se presentan en la Figura 13.1.

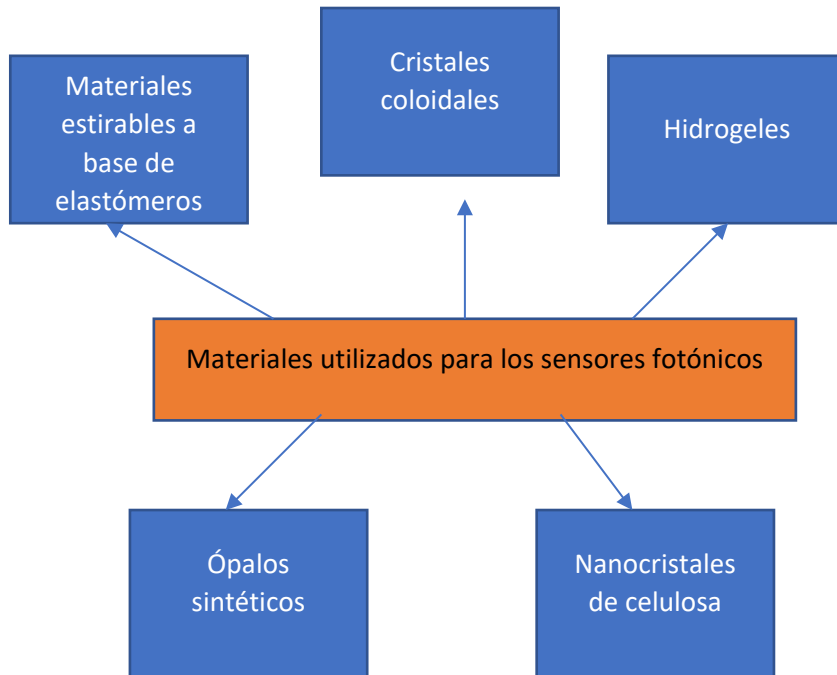


Figura 13.1 Materiales utilizados en aplicaciones fotónicas

Materiales estirables a base de elastómeros

Un componente común de los textiles inteligentes son los materiales funcionales estirables y, con mayor frecuencia, los elementos conductores estirables. El sustrato suele ser un elastómero que funciona como matriz para rellenos y redes conductoras, o como material de soporte para películas conductoras, pistas y dispositivos funcionales [3]. La característica deseada de los elastómeros es su naturaleza flexible, lo que significa que soportan fuerzas de deformación y pueden conservar su forma original repetidamente tras la aplicación de tensión, durante miles de ciclos de estiramiento y liberación. Los sensores estirables ofrecen funciones como la transparencia óptica, que facilita las aplicaciones ópticas en optoelectrónica, fotodetectores, dispositivos emisores de luz y células solares [4, 5].

El polidimetilsiloxano (PDMS) es el material elastomérico más utilizado en aplicaciones relevantes. Se trata de un polímero mineral-orgánico que contiene silicona y es un producto comercial maduro, ya que lleva mucho tiempo en el mercado [6].

Además, los materiales elastoméricos se han utilizado para la fabricación de conductores eléctricos. Los conductores eléctricos más utilizados son las películas metálicas (a granel), los nanocables metálicos, los nanomateriales basados en carbono, los polímeros intrínsecamente conductores, los metales líquidos y los líquidos iónicos.

Se han fabricado aplicaciones basadas en materiales elastómeros sensores, como galgas extensométricas [7], sensores de presión [8], sensores de temperatura [9], sensores de gas [10] y sensores UV [11].

Cristales coloidales

Los cristales coloidales son una estructura de matriz secuencial compuesta por nanopartículas monodispersas, inorgánicas u orgánicas [12, 13]. Todas las características ópticas interesantes asociadas a los cristales fotónicos se deben a la existencia de bandas de energía [14].

Los cristales fotónicos se clasifican según sus dimensiones: unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) [15]. Los cristales coloidales se clasifican en la categoría de los cristales fotónicos tridimensionales.

Se ha informado de la integración de cristales coloidales en sensores de tiempo-temperatura [16].

Se ha producido una lámina fotónica basada en cristales coloidales, mediante la aplicación de poliestireno (PS) monodispersado, sobre un sustrato de polidimetilsiloxano (PDMS). Según la tensión aplicada al sustrato de elastómero y la deformación de éste, el color de la lámina va cambiando [17].

Hidrogeles

Los hidrogeles son materiales bifásicos formados por un líquido (normalmente agua) y una estructura polimérica sólida porosa y permeable al agua. Cualquier cambio en su síntesis química (por ejemplo, cambio en la concentración de agua), produce un cambio en sus propiedades mecánicas (por ejemplo, elasticidad, resistencia al cizallamiento, etc.). Un efecto similar se produce si cambian la estructura de su matriz polimérica. De este modo, al adaptar sus propiedades químicas y su estructura física, se vuelven sensibles a los estímulos externos y biocompatibles; se les puede dar forma en diversas estructuras e integrarlos en microsistemas [18].

La síntesis de hidrogeles se realiza en soluciones acuosas aplicando radiación UV [19], polimerización radical termoiniciada [20], reacción de adición [21], autoensamblaje de motivos de reconocimiento como espirales [22], péptidos [23], puentes de hidrógeno [24] o ADN [25].

Los hidrogeles pueden utilizarse como sensores, pero también pueden actuar como sensores en sí mismos. Otra aplicación de los hidrogeles es la posibilidad de utilizarlos como biosensores.

Ópalos sintéticos

Los ópalos sintéticos son ópalos fabricados por el hombre, es decir, sílice hidratada SiO_2 . Tienen la misma composición química, estructura interna, propiedades físicas y aspecto que los ópalos naturales. También se denominan ópalos creados en laboratorio, ópalos cultivados en laboratorio u ópalos cultivados para indicar su origen artificial. Los ópalos son cristales que pueden guiar o atrapar la propagación de la luz, proporcionando localización de la luz, que es un efecto muy deseable en aplicaciones fotónicas.

Por ejemplo, una referencia de ópalos sintéticos compuestos por esferas de a-SiO_2 de igual diámetro estrechamente empaquetadas en celosías cúbicas centradas en caras 3D con periodos de unos 200 nm, refería que poseen bandas de parada fotónicas en todo el espectro visible (400-600 nm) [26].

Nanocristales de celulosa

La celulosa en forma nanométrica (nanopartículas, NPs) es otro nuevo material prometedor en aplicaciones fotónicas. Las propiedades de las nanopartículas de celulosa son muy diferentes de las de la celulosa a granel. Se han descubierto capacidades de detección avanzadas para películas finas compuestas hechas de nanocristales de celulosa [27].

Las aplicaciones de los nanocristales de celulosa se extienden a diversos tipos de sensores, como sensores de presión, sensores de deformación, sensores de proximidad, sensores de gas y vapor, biosensores, sensores ópticos, sensores de PH, sensores fluorescentes y sensores electroquímicos [27].

La síntesis de nanocristales de celulosa suele realizarse por el método de hidrólisis con ácido sulfúrico, un método bien definido y establecido. Estos nanocristales, que ya se utilizan en algunos productos médicos, tienen un gran potencial como sensores portátiles [28].

Referencias

1. Zheng, H., Ravaine, S. Bottom-Up Assembly and Applications of Photonic Materials. *Crystals*, 2016, 6(5). doi:10.3390/cryst6050054
2. Peng, W., Wu, H., Flexible and Stretchable Photonic Sensors Based on Modulation of Light Transmission. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7. <https://doi.org/10.1002/adom.201900329>
3. Yu, X., Mahajan, B., Shou, W., Pan, H. Materials, Mechanics, and Patterning Techniques for Elastomer-Based Stretchable Conductors. *Micromachines*, 2016, 8(1). doi:10.3390/mi8010007
4. Yao, S., Zhu, Y. Nanomaterial-enabled stretchable conductors: Strategies, materials and devices. *Adv. Mater.*, 2015, 27, 1480–1511
5. McCoul, D., Hu, W., Gao, M., Mehta, V., Pei, Q. Recent advances in stretchable and transparent electronic materials. *Adv. Electron. Mater.*, 2016, 2, 1500407

6. Vohra, A.; Filiatrault, H.L.; Amyotte, S.D.; Carmichael, R.S.; Suhan, N.D.; Siegers, C.; Ferrari, L.; Davidson, G.J.E.; Carmichael, T.B. Reinventing butyl rubber for stretchable electronics. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26, 5222–5229
7. Amjadi, M.; Kyung, K.-U.; Park, I.; Sitti, M. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26, 1678–1698
8. Gong, S.; Schwalb, W.; Wang, Y.; Chen, Y.; Tang, Y.; Si, J.; Shirinzadeh, B.; Cheng, W. A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires. *Nat. Commun.*, 2014, 5, 3132
9. Yu, C.; Wang, Z.; Yu, H.; Jiang, H. A stretchable temperature sensor based on elastically buckled thin film devices on elastomeric substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95, 141912
10. Yun, J.; Lim, Y.; Jang, G.N.; Kim, D.; Lee, S.-J.; Park, H.; Hong, S.Y.; Lee, G.; Zi, G.; Ha, J.S. Stretchable patterned graphene gas sensor driven by integrated micro-supercapacitor array. *Nano Energy*, 2016, 19, 401–414
11. Yoon, J.; Hong, S.Y.; Lim, Y.; Lee, S.-J.; Zi, G.; Ha, J.S. Design and fabrication of novel stretchable device arrays on a deformable polymer substrate with embedded liquid-metal interconnections. *Adv. Mater.*, 2014, 26, 6580–6586
12. Asher, S.A., Alexeev, V.L., Goponenko, A.V., Sharma, A.C., Lednev, I.K., Wilcox, C.D., Finegold, J. *Am. Chem. Soc.*, 2003, 125, 3322
13. Pratibha, R., Park, W., Smalyukh, I.I. *J. Appl. Phys.*, 2010, 107
14. Kittel, C. *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons, New York, 1976
15. Furumi, S.; Fudouzi, H.; Sawada, T. Self-organized colloidal crystals for photonics and laser applications. 2010, 4(2), 205–220. doi:10.1002/lpor.200910005
16. Schöttle, M., Tran, T.; Feller, T.; Retsch, M. Time–Temperature Integrating Optical Sensors Based on Gradient Colloidal Crystals. *Advanced Materials*, 2021. doi:10.1002/adma.202101948
17. Fudouzi, H., Sawada, T. *Langmuir*, 2006, 22, 1365
18. Buenger, D.; Topuz, F.; Groll, J. Hydrogels in sensing applications. 2012, 37(12). doi:10.1016/j.progpolymsci.2012.09.001
19. Nguyen, K.T, West, J.L. Photopolymerizable hydrogels for tissue engineering applications. *Biomaterials*, 2002, 23, 4307–14.
20. Biswal, D., Hilt, J.Z. Microscale analysis of patterning reactions via FTIR imaging: application to intelligent hydrogel systems. *Polymer*, 2006, 47, 7355–60.
21. Dalton, P.D., Hostert, C., Albrecht, K., Moeller, M., Groll, J. Structure and properties of urea-crosslinked star poly (ethylene oxide)-ran- (propylene oxide) hydrogels. *Macromolecular Bioscience*, 2008, 8, 923–31.
22. Vandermeulen, G.W.M., Tziatzios, C., Duncan, R., Klok, H.A. PEG-based hybrid block copolymers containing alpha-helical coiled coil peptide sequences: control of self-assembly and preliminary biological evaluation. *Macromolecules*, 2005, 38, 761–9.
23. Galler, K.M., Aulisa, L., Regan, K.R., D’Souza, R.N., Hartgerink, J.D. Self-assembling multidomain peptide hydrogels: designed susceptibility to enzymatic cleavage allows enhanced cell migration and spreading. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132, 3217–23
24. Dankers, P.Y.W., Harmsen, M.C., Brouwer, L.A., Van Luyn, M.J.A., Meijer, E.W. A modular and supramolecular approach to bioactive scaffolds for tissue engineering. *Nature Materials*, 2005, 4, 568–74.
25. Topuz, F., Okay, O. Rheological behavior of responsive DNAhydrogels. *Macromolecules*, 2008, 41, 8847–54
26. Vlasov, Yu.A.; Astratov, V.N.; Karimov, O. ; Kaplyanskii, A. A.; Bogomolov, V. ; Prokofiev, A.V. Existence of a photonic pseudogap for visible light in synthetic opals. *Physical Review B*, 1997, 55(20), R13357–R13360. doi:10.1103/PhysRevB.55.R13357



27. Ansari, J.R. Nanocellulose Based Composites for Electronics. *Nanocellulose-based materials/composites for sensors*, 2021, 185–214. doi:10.1016/B978-0-12-822350-5.00008-4
28. Kelcilene, B.R.T; Rafaela, C.S.; Fernanda, L.M.; Pavinatto, A.; Murilo H.M.F. ; Correa, D.S. A Review on the Role and Performance of Cellulose Nanomaterials in Sensors. *ACS Sensors*, 2021. doi:10.1021/acssensors.1c00473



Capítulo 14. DAÑOS EN LOS E-TEXTILES

Farima Daniela, Iovan Dragomir Alina y Bodoga Alexandra, Universidad Técnica "Gheorghe Asachi", Rumanía

Definición

Un tejido inteligente activo que contiene elementos electrónicos en su composición se denomina E-textil (textil inteligente). Los tejidos electrónicos son, de hecho, dispositivos informáticos o electrónicos para llevar puestos, introducidos en diseños de prendas de vestir. Los tejidos inteligentes pueden utilizarse en tecnologías de diseño de interiores. Eso supone que se introducen componentes electrónicos en tejidos o fibras [1]. Asimismo, los textiles electrónicos pueden utilizarse en prendas basadas en micro/nanofibras, que llevan electrónica integrada y que adoptan formas corporales [3, 4].

14.1 Introducción

Los e-textiles se caracterizan por su elasticidad, flexibilidad y comodidad [2]. Dependiendo del campo de uso, los e-textiles también se conocen como textiles inteligentes, textiles smart, tecno-textiles, wearable computers, wearable electronics [5, 6].

El carácter multidisciplinar de los e-textiles, supone:

- textiles (smart fabrics)
- electrónica digital (electrónica vestible)
- tecnología de la información (informática vestible) (Figura 14.1) [5]

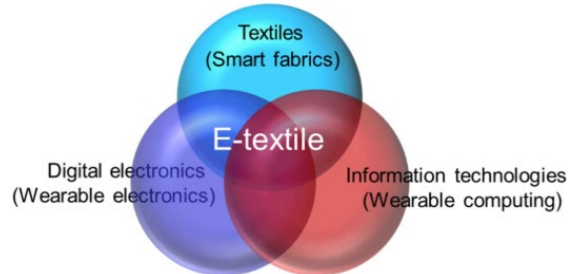


Figura 14.1 Carácter multidisciplinar de los e-textiles.

14.2 Clasificación de los e-Textiles

Los e-textiles pueden clasificarse en 3 categorías [7]:

1. Los e-textiles pasivos se basan en sensores que pueden percibir el entorno.



2. Textiles inteligentes activos que reaccionan a los estímulos del entorno, sobre la base de una función actuadora y un dispositivo sensor. En la Figura 14.2 se muestra un ejemplo de textil inteligente activo [8].

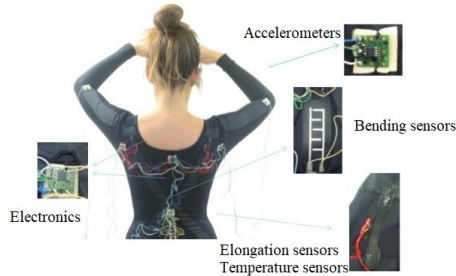


Figura 14.2 Tejido inteligente activo

3. Textiles muy inteligentes, que perciben los estímulos del entorno, reaccionan y adaptan su comportamiento. Las funciones de los e-textiles.

4. Textiles muy inteligentes: capaces de percibir los estímulos del entorno, reaccionar y adaptar su comportamiento a las circunstancias dadas.

Las funciones de los e-textiles se presentan en la Figura 14.3.

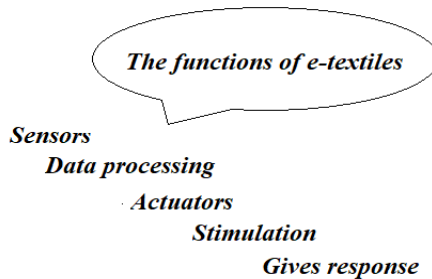


Figura 14.3 Funciones de los e-textiles

Los sensores son necesarios para captar parámetros del entorno. El procesamiento activo es para el tratamiento de datos y para las respuestas por la función resultante del sensor (actuadores). La estimulación procede del entorno.

Las **aplicaciones de los e-textiles** son para diferentes campos de actividad y se presentan en la Figura 14.4 [7].

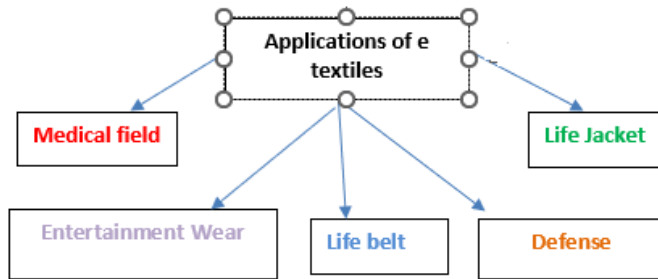


Figura 14.4 Aplicaciones de los e-textiles

Materiales para e-textiles

Existen muchos tipos de materiales (fibras, o en cualquier otra forma adecuada, como circuitos de soldadura, o como capa impresa) en función de la conductividad eléctrica:

- metales

- polímeros intrínsecamente conductores

materiales compuestos (micro o nano) de partículas conductoras y polímeros [7].

- entorno, integrando una función de actuador y un dispositivo sensor
entorno, integrando una función de actuador y un dispositivo sensor

Daños en los e-textiles

Es muy importante que los e-textiles puedan lavarse, pero esto supone un gran problema. Los factores que influyen en el proceso de lavado (factores Sinners) son:

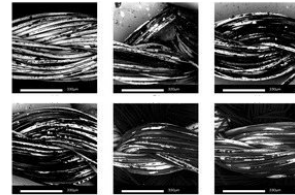
- el tiempo
- la temperatura
- la acción mecánica;
- los factores químicos/biológicos [8, 9].

Los problemas más comunes relacionados con el lavado de e-textiles son:

- Daños en los revestimientos conductores y en las estructuras conductoras impresas (Figura 14.5) [10];
- Daños en las capas de metalización (Figura 14.6) [15];
- Daños en cables, pistas conductoras y conexiones (Figura 14.7) [16];
- Daños en las capas protectoras (Figura 14.8) [16];
- Cambios textiles.



Figura 14.5 Daños en los revestimientos conductores por lavado



Increased loss of metalization dependent on wash cycle: 5;10;20;40;50

Figura 14.6 La cantidad de metal depende del número de ciclos

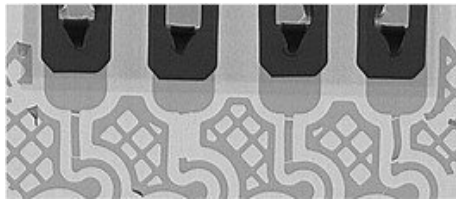


Figura 14.7 Grietas en las pistas de cobre en la transición a las almohadillas de contacto



Figura 14.8 Determinación de la capa protectora a lo largo de las vías conductoras

Tras varios ciclos de lavado, el contenido de plata aumenta, pero la mayor pérdida de plata se produce durante los primeros ciclos de lavado [11] (Figura 14.6) [15]. La pérdida de metalización depende de la fricción entre los tejidos sometidos a prueba [12, 13]. Además, los cambios cíclicos de temperatura durante el lavado determinan un desajuste del coeficiente de expansión térmica en los materiales implicados, lo que provoca daños [14]. Pueden observarse roturas en el metal (en la transición de la zona conductora a las almohadillas de contacto) cuando se lavan tiras de placas de circuitos flexibles tejidas en textiles (Figura 14.7) [16].

Los daños en las capas protectoras dependen de la dureza del programa de lavado (las fuerzas de fricción que actúan sobre las muestras provocarán el adelgazamiento y, finalmente, la rotura de la capa de PU) (Figura 14.8) [17].

Otros daños durante el lavado son

- cambios y daños en el sustrato textil
- arrugas en las muestras de ensayo [18]
- formación de bolitas [17];
- enredo de fibras [19];
- pérdida del pretratamiento del tejido tras el lavado [20];

- corrosión en algunos de los hilos conductores lavados;
- oscurecimiento de la superficie, lo que indica la oxidación del revestimiento de plata [21].

14.3 Conclusiones

El lavado puede provocar numerosos problemas en los e-textiles. Estos fallos pueden producirse en puntos concretos del diseño o por todas partes, dependiendo del tipo y la composición del e-textil. Los puntos débiles son los contactos entre distintos materiales y componentes, así como las zonas de transición dentro del mismo material. En hilos o textiles conductores sin algún tipo de protección, los daños pueden producirse en toda la estructura. Por ahora, los tipos de daños en los e-textiles deben investigarse en aspectos concretos de la lavabilidad de los e-textiles.

Referencias

1. <https://www.techopedia.com/definition/29467/electronic-textile-e-textile>
2. Wang, Y.; Yu, W.; Wang, F. Structural design and physical characteristics of modified ring-spun yarns intended for e-textiles: A comparative study. *Text. Res. J.*, 2017, 004051751774115.
3. Coyle, S.; Diamond, D. Smart Nanotextiles: Materials and Their Application. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*; Elsevier: New York, NY, USA, 2010; pp. 1–5. ISBN 978-0-08-043152-9.
4. Zeng, W.; Shu, L.; Li, Q.; Chen, S.; Wang, F.; Tao, X.-M. Fiber-Based Wearable Electronics: A Review of Materials, Fabrication, Devices, and Applications. *Adv. Mater.*, 2014, 26, 5310–5336.
5. Ghahremani Honarvar, M.; Latifi, M. Overview of wearable electronics and smart textiles. *J. Text. Inst.*, 2017, 108, 631–652.
6. Meoli, D. Interactive Electronic Textiles: Technologies, Applications, Opportunities, and Market Potential. North Carolina State University: Raleigh, NC, USA, 2002.
7. Sornamugi, V. E-Textile and its Applications. *IJSK*, 9(3), ISSN 2321 3361 2019
8. Wagner, G. *Waschmittel*. 5th ed., Wiley VCH: Weinheim, Germany, 2017.
9. Ellmer, K. *Wäsche-Cluster in Konsumentenhaushalten*. Ph.D. Thesis, Technische Universität Berlin, Germany, 2016.
10. <https://encyclopedia.pub/entry/10041>
11. Dhanawansa, K.B.; Senadeera, R.; Gunathilake, S.S.; Dassanayake, B.S. Silver nanowire-containing wearable thermogenic smart textiles with washing stability. *Adv. Nano Res.*, 2020, 9, 123–131.
12. Foerster, P. *Untersuchungen zu Eigenschaften von Nanosilberschichten auf Polyamidfasern*. Studienarbeit, Technische Universität Berlin, Germany, 2010.
13. Lee, J.C.; Lo, C.; Chen, C.C.; Liu, W. Laundering Reliability of Electrically Conductive Fabrics for E-Textile Applications. *Proceedings of the 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Las Vegas, NV, USA, 2019; 1826–1832.
14. Rotzler, S.; Kallmayer, C.; Dils, C.; von Krshiwoblozki, M.; Bauer, U.; Schneider-Ramelow, M. Improving the washability of smart textiles: Influence of different washing conditions on textile integrated conductor tracks. *J. Text. Inst.*, 2020, 111, 1766–1777.



15. Hardy, D.A.; Rahemtulla, Z.; Satharasinghe, A.; Shahidi, A.; Oliveira, C.; Anastasopoulos, I.; Nashed, M.N.; Kgatuke, M.; Komolafe, A.; Torah, R.; et al. Wash Testing of Electronic Yarn. *Materials*, 2020, 13, 1228.
16. Shahariar, H.; Kim, I.; Bhakta, R.; Jur, J.S. Direct-write Printing Process of Conductive Paste on Fiber Bulks for Wearable Textile Heaters. *Smart Mater. Struct.*, 2020.
17. Rotzler, S. Einfluss der Sinnerschen Faktoren Sowie der Textilien Substrate auf die Waschbarkeit Textilintegrierter Leiterbahnen. Master's Thesis, Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, Germany, 2018.
18. Ojuoye, O.; Torah, R.; Beeby, S. Modified PDMS packaging of sensory e-textile circuit microsystems for improved robustness with washing. *Microsyst. Technol.*, 2019.
19. Quandt, B.M.; Braun, F.; Ferrario, D.; Rossi, R.M.; Scheel-Sailer, A.; Wolf, M.; Bona, G.L.; Hufenus, R.; Scherer, L.J.; Boesel, L.F. Body-monitoring with photonic textiles: A reflective heartbeat sensor based on polymer optical fibres. *Interface*, 2017, 14, 20170060.
20. Martinez-Estrada, M.; Moradi, B.; Fernández-García, R.; Gil, I. Impact of Manufacturing Variability and Washing on Embroidery Textile Sensors. *Sensors*, 2018, 18, 3824
21. Gaubert, V.; Gidik, H.; Bodart, N.; Koncar, V. Investigating the Impact of Washing Cycles on Silver-Plated Textile Electrodes: A Complete Study. *Sensors*, 2020, 20, 173.



Capítulo 15. LAVABILIDAD DE LOS E-TEXTILES, ESTÁNDARES Y NORMAS

David Gómez, AEI Tèxtils, Desarrollo empresarial, Barcelona, España

15.1 Introducción

El lavado de los textiles electrónicos (e-textiles) o textiles con capacidad conductora es uno de los retos o puntos débiles de este tipo de productos innovadores.

La principal razón por la que los textiles electrónicos son vulnerables al lavado es su sensibilidad al agua. El contacto con este elemento los expone a la pérdida de sus propiedades.

Hoy en día, existen varios procedimientos que evalúan y validan que un e-textil tiene la calidad suficiente para seguir cumpliendo sus funciones tras un determinado número de lavados.

El hecho de que existan diferentes normas para los procesos de lavado de e-textiles y que ninguna de ellas esté consensuada por la comunidad científica supone una dificultad para el sector textil y para este tipo de productos. Esta falta de consenso hace que no exista una normativa homogénea reconocida por todos y, por tanto, hace que un mismo producto pueda ser apto y funcional tras un determinado número de lavados según un procedimiento, pero ser insatisfactorio según otro tipo de procedimiento o norma que exija el cumplimiento de otros criterios [1].

La unificación o universalización de los criterios utilizados para certificar que un textil electrónico es adecuado, no sólo en el primer momento tras su fabricación, sino para la vida diaria del usuario (y esto implica un cierto número de lavados diarios) [1].

15.2 Deterioro de los e-textiles durante el proceso de lavado

Durante el lavado de un e-textil, el tejido puede sufrir diversos daños relacionados con el envejecimiento de la pieza, así como cambios en su forma o color (más allá de la pérdida de propiedades ya mencionada) [1].

Al experimentar uno o varios de los daños ya mencionados, un e-textil puede sufrir los siguientes efectos secundarios:

- Cambios en sus propiedades eléctricas, como la pérdida de conductividad.
- Cambios en su funcionalidad, como el cese del funcionamiento de uno o más de sus componentes (como los LEDs).
- Cambios en sus características, como, por ejemplo, cambios en los sensores.
- Cambios en su aspecto, como oscurecimiento de la superficie, arrugas o encogimiento.



La aparición o no de estos cambios tras un determinado número de lavados se utiliza como indicador para evaluar la rentabilidad de los textiles electrónicos.

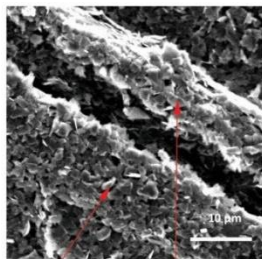
15.3 Características de vulnerabilidad de los textiles electrónicos

El lavado de los e-textiles puede provocar errores y fallos, y sus características previas definirán qué vulnerabilidades o resistencias tendrán a uno o varios procesos de lavado.

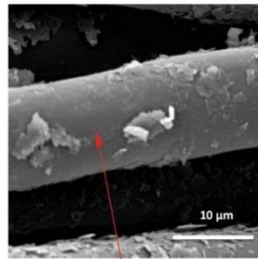
Un elemento clave es el tipo y la composición del producto, es decir, el material del que está hecho y cómo se relacionan el tejido y el hilo con los componentes que forman la prenda. Por ejemplo, un textil electrónico que esté integrado por elementos conductores entre dispositivo y dispositivo (expuestos directamente al agua) será muy susceptible a la degradación. O bien, un conductor que tenga esta función, pero no esté protegido, también estará expuesto a una rápida degradación.

Al mismo tiempo, cabe decir que los textiles electrónicos que integran componentes protegidos, encapsulados de algún modo, son mucho más resistentes al lavado y evitan la degradación con mucha más frecuencia que las piezas conductoras. Además, estos componentes son lo suficientemente resistentes como para evitar desprenderse de la pieza total o parcialmente.

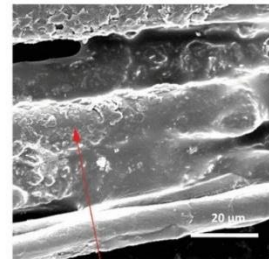
Ejemplos de deterioro de los textiles electrónicos:



G flakes on the individual fibre surface after coating



G flakes were removed after washing



G flakes are encapsulated on the fibre surface even after washing

Figura 15.1 Ejemplo de daños en revestimientos textiles conductores tras el lavado [2]

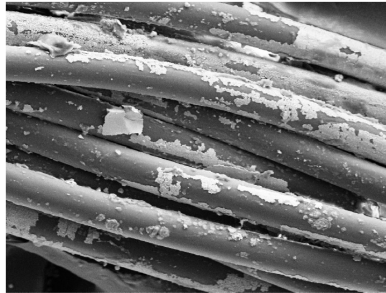


Figura 15.2 Capa de plata agotada sobre filamentos de nailon [3]

15.4 Situación actual de la estandarización

Como ya se ha mencionado, existen varias normas para la evaluación de la lavabilidad y no hay ninguna regla general o indicación para una estandarización global [4].

Sin embargo, se han probado varias normas y métodos que son la referencia para la evaluación de muchos textiles electrónicos. Los principales elementos que consideran que indican la forma en que el producto debe lavarse y, por tanto, preservar sus características son los siguientes [4]: el tipo de dispositivo de lavado, la duración del programa, la cantidad de carga de lavado, la temperatura de lavado, el tipo de detergente o el método de secado [4].

Hasta la fecha, el número de normas existentes especialmente concebidas para los e-textiles híbridos es muy reducido. De las existentes, la mayoría cubren terminología y/o definiciones como ISO/PRF TR 23383 y ASTM D 8248:2020. Otras ofrecen métodos de ensayo para medir la resistencia de los productos textiles: AATCC 76 para tejidos, AATCC 84 para hilos y CSN EN 16812 para pistas conductoras en textiles.

La norma más utilizada en ámbitos adyacentes para comprobar la lavabilidad de los e-textiles es la ISO 6330 Textiles-domestic washing and drying procedures for textile testing. El ámbito de aplicación de la norma incluye no sólo los textiles, sino también "otros artículos textiles" -término que puede aplicarse a los textiles híbridos inteligentes o electrónicos-, lo que permite ampliar la norma para sus pruebas. La norma no incluye

directrices ni recomendaciones sobre el número de ciclos de lavado que deben realizarse ni criterios sobre cómo puede evaluarse la fiabilidad del lavado tras las pruebas.

| Source | Version | Tested product | Parameter ^b | Washing device ^c | Cycles | Load ^d | Temperature [°C] | Program/duration [min] ^e | Detergent | Drying |
|---------------------------------------|---------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------|------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------|
| Ankhili et al. ¹² | 2012 | ECG electrodes | R, c | Datacolor Ahiba | 50 | | 40 | 30 | | |
| Baribina et al. ¹³ | 2012 | Conductive yarn | R | | 10 | Protective bag | 30 | 3M/23 | | Air |
| Blecha et al. ¹⁴ | 2012 | Fire-fighter suit | f | HH front | 30 | | 60 | | | |
| Erdem et al. ¹⁵ | 2000 | Knee pad | R | | 10 | | 40 | 4M/25 | | Air |
| Foerster ¹⁶ | 2000 | Conductive yarn | R | Wascator | 20 | | 40 | 4M/25 | ECE-2 | |
| Gerhold ¹⁷ | 2000 | Textile circuit board, LED module | R | Wascator | 16 | Protective bag + 2 kg towels | 40 | 4M/25 | 66 g ECE 105 | Air |
| Hardy et al. ¹⁸ | 2012 | Conductive yarn | f | Wascator? | 25 | Total 2 kg, +CO T-shirts | 40 | 4N/31 | 20 g Persil | Air, dryer |
| Huang et al. ¹⁹ | 2012 | Conductive paste and yarn | R | Datacolor Ahiba | 10 | | 30 | 30 | | Air |
| Kayacan et al. ²⁰ | 2012 | Conductive yarn | R | HH | 5 | | 40 | | With | |
| Kazani et al. ²¹ | 2000 | Conductive paste | R | | 20 | | 40 | 4M/25 | | |
| Kazani et al. ²² | 2000 | Printed antenna | c | Reference | 20 | | 30 | 3G/16 | 20 g ECE | Air, 50°C |
| Kim and Lee ²³ | 2000 | Conductive ink | R, c | HH top | 20 | | 20 | (11B)/15 | 5 g/l | |
| Kivanc and Bahadir ²⁴ | 2012 | Conductive yarn | R | HH front | 5 | Total 3 kg | 40 | 49 | 20 g reference | Air |
| Komolafe ²⁵ | 2000 | Stretch sensor | R | HH front | 5 | | 40 | 58 | | Air, 100°C |
| Komolafe et al. ²⁵ | 2000 | Functional filament | f | HH front | 5 | 7 garments | 40 | 58 | DAZ | |
| Liang et al. ²⁶ | 2000 | Stretch sensor | c | HH front | 3 | | 40 | | | Air |
| Linz ²⁷ | 2000 | Conductive yarn | R | Wascator | 20 | Total 2 kg CO | 40 | 4M/24 | ECE A | Air |
| Malm et al. ²⁸ | 2012 | Conductive paste | R | Wascator | 5 | + 1 kg | 40 | 4G/18 | | Air, air 50°C |
| Martínez-Estrada et al. ²⁹ | 2012 | Moisture sensor | c | HH front | 2 | + 1 kg | 40 | | 10 g ECE 105 | |
| Matsouka et al. ³⁰ | 2012 | Textile electrodes | R | Datacolor Ahiba | 50 | | 40 | 30 | | Air |
| Ojuroye et al. ³¹ | 2012 | Flexible sensors | f | HH front | 20 | + 2 kg CO towels | 30 | 15, 37, 42 | 37 ml, 20 g | Air |
| Parkova et al. ³³ | 2000 | Conductive yarn | R, c | HH front | 5 | | 30 | 31 | 37 ml softener | |
| Rozler et al. ¹ | 2000 | Conductive tracks | R | Wascator | 10 | Total 2 kg, CO and PES | 20, 40, 60 | 28, 38, 48 | 30 g ECE 2 | Air |
| Satharasinghe et al. ³⁴ | 2012 | Solar cell | f | HH | 25 | | 40 | 4M/25 | | Air |
| Schwarz ³⁵ | 2000 | Conductive yarn | R | Wascator | 25 | Total 2 kg, CO | 40 | 4M/25 | | |
| Tadesse et al. ³⁶ | 2012 | Conductive coating | R | HH front | 10 | | (30) | 3N | | |
| Tadesse et al. ³⁷ | 2012 | Conductive coating | R | HH front | 10 | Protective bag, total 2 kg, PES | 30 | 3N/23 | 20 ml | Air |
| Tao et al. ³⁸ | 2012 | Conductive yarn, LED, flex PCB | R | Datacolor Ahiba | 50 | | 30 | 30 | | Air |
| uz Zaman et al. ³⁹ | 2000 | Conductive yarn | R | HH front | 10 | | 40 | 35 | 20 g | |
| uz Zaman et al. ⁴⁰ | 2000 | ECG electrodes | R | HH front | 50 | Total 2 kg | 40 | 35 | 20 g Xtra Total | |
| Vervust et al. ⁴¹ | 2000 | Stretchable circuit board | R, delamination | HH front | 50 | Protective bag | 40 | 4N/30 | ECE A | Air, dryer |

^aBlank spaces indicate non-disclosed information. ^bR: change in resistance; c: change in characteristic; f: change in or loss of function. ^cHH: household washing machine (not further specified), HH front: horizontal axis front-loading household washing machine, HH top: vertical axis top-loading household washing machine. ^dCO: cotton; PES: polyester. ^eThe washing program only refers to ISO 6330 washing programs. The program labels from the 2000 version of the standard were transferred to their 2012 version counterparts to make for easier comparison.

Figura 15.3 Prueba de lavado según ISO 6330 [4]

| Source | Standard | Tested product | Parameter ^b | Washing device ^c | Cycles | Load | Temperature [°C] | Duration [min] | Detergent | Drying |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------|------------------------------|------------------|----------------|-----------------|--------|
| Frank and Bauch ⁴³ | DIN EN 20105-C01-5 DIN 54015 | Conductive coating | R | | | | 40, 50, 60, 95 | 20, 30, 45 4 h | 5 g/l | |
| Jin et al. ⁵² | AATCC 135 | Conductive tracks | R | HH top | 10-50 | | 40 | | | |
| Lee et al. ⁵¹ | AATCC M6 | Conductive fabric | R | HH top | 10 | Total 1.8 kg | 27 | 21 | 66 g reference | Dryer |
| Li and Tao ⁵³ | AATCC 135 | Conductive yarn | R | HH top | 30 | Total 1.8 kg, protective bag | 40 | | 66 g Castle | Dryer |
| Liu et al. ⁴⁶ | AATCC 61 | Incontinence monitoring pants | R | | 20 | | | | | |
| Sala de Medeiros et al. ⁵⁴ | AATCC 135 | Tribo-electric nanogenerator | R, c | HH top | 50 | + 2 kg garments | 22 | 8 | Without | Air |
| Quandt et al. ⁴⁴ | EN ISO 105-C06 | Heartbeat sensor | c | Color tester | 10 | | 40 | 45 | 4 g/l + bleach | Air |
| Shahariar et al. ⁴⁷ | AATCC 61 | Conductive ink | R | 150 ml water + steel balls | 5 | Only test samples | 49 | 45 | 0.24 g | |
| Shahariar et al. ⁴⁸ | AATCC 61 2a | Conductive paste | R | | 5 | | | | | |
| Trindade et al. ⁴⁵ | ISO 105 | ECG sensor | R, c | | 30 | | 40 | 45 | 1 g/l | Air |
| Xu et al. ⁴⁹ | AATCC 61 1b | Textile antenna | R, c | 150 ml water + rubber balls | 1 | | | 20 | 1 ml + softener | Air |
| Yokus et al. ⁵⁰ | AATCC 61 2a | Conductive paste | R | Water + 50 steel balls | 20 | | 49 | | Powder | |
| Zhao et al. ⁵⁵ | AATCC 135 | Tribo-electric nanogenerator | R, c | HH top | 20 | + 1.8 kg, protective bag | 20 | 40 | | Air |

^aBlank spaces indicate non-disclosed information. ^bR: change in resistance; c: change in characteristic; f: change in or loss of function. ^cHH: household washing machine (not further specified), HH front: horizontal axis front-loading household washing machine, HH top: vertical axis top-loading household washing machine.

Figura 15.4 Pruebas de lavado según otras normas [4]



En la siguiente figura se muestran algunas de las normas relacionadas con los e-textiles, clasificadas en función de su estado actual. Desde el punto de vista europeo, es importante mencionar que actualmente no se utiliza ninguna norma ISO para los e-textiles.

| Identification | Title | Year |
|---|--|------|
| Existing standards | | |
| DS/CEN/TR 16298 | Textiles and textile products—smart (intelligent) textiles—definitions, categorization, applications and standardization needs | 2012 |
| ASTM D 8248 | Standard terminology for smart textiles | 2020 |
| AATCC 76 | Test method for electrical surface resistivity of fabrics | 2018 |
| AATCC 84 | Test method for electrical resistance of yarns | 2018 |
| CSN EN 16812 | Textiles and textile products—electrically conductive textiles—determination of the linear electrical resistance of conductive tracks | 2016 |
| IPC-8921 | Requirements for woven and knitted electronic textiles (e-textiles) integrated with conductive fibers, conductive yarns and/or wires | 2019 |
| Upcoming standards | | |
| IEC 63203 204-1 | Wearable electronic devices and technologies: electronic textile—washable durability test method for leisure and sportswear e-textile system | 2022 |
| IPC 8981 | Quality and reliability of e-textiles wearables | 2022 |
| IPC 8952 | Design standard for printed electronics on coated or treated textiles and e-textiles | ? |
| IPC 8941 | Guideline on connections for e-textiles | ? |
| Standards from other fields used in e-textile wash testing | | |
| ISO 6330 | Textiles—domestic washing and drying procedures for textile testing | 2012 |
| ISO 105-C01 | Textiles—tests for color fastness—Part C01: color fastness to washing | 1989 |
| ISO 15797 | Textiles—industrial washing and finishing procedures for testing of workwear | 2017 |
| DIN 54015 | Testing for colorfastness of textiles—determination of color fastness of dyeings and prints to washing in presence of peroxide | 2017 |
| AATCC 6 | Colorfastness to acids and alkalis | 2016 |
| AATCC 61 | Colorfastness to laundering: accelerated | 2013 |
| AATCC 135 | Dimensional changes of fabrics after home laundering | 2018 |

Figura 15.5 Estado de la estandarización de los e-textiles

15.5 Conclusiones

La lavabilidad es una de las cuestiones clave de los e-textiles. Igual que lo que son capaces de ofrecer cuando la conductividad y los dispositivos se añaden en el producto.

Un simple lavado puede destruir toda la tecnología por la que el producto ha sido avalado, por lo que, la forma en que el textil se confecciona y la forma en que se lava jugarán un papel relevante en el éxito de su limpieza (es decir, que no pierda propiedades).

Para ello, una normalización común es clave. Unas reglas generales facilitarían el desarrollo de este tipo de productos, ya que se desarrollarían siguiendo unas normas desde el principio y todos los productores jugarían con las mismas reglas.

La principal limitación encontrada hasta el momento, tiene que ver con los responsables políticos. Aunque las investigaciones realizadas hasta el momento orientan a una parte significativa de los productores de e-textiles y se puede decir que en torno a un 60% siguen las normas existentes, las instituciones que tienen competencias para regular estas normas no las han establecido.



Referencias

1. Rotzler, S., Schneider-Ramelow, M. Washability of E-Textiles: Failure Modes and Influences on Washing Reliability. *MDPI. Textiles*, 2021, 1, 37–54. <https://doi.org/10.3390/textiles1010004>
2. Afroj, S.; Tan, S.; Abdelkader, A.M.; Novoselov, K.S.; Karim, N. Highly Conductive, Scalable, and MachineWashable Graphene-Based E-Textiles for Multifunctional Wearable Electronic Applications. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 2000293.
3. Rotzler, S. Einfluss der Sinnerschen Faktoren Sowie der Textilen Substrate auf die Waschbarkeit Textilintegrierter Leiterbahnen. Master's Thesis, Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, Germany, 2018.
4. Rotzler, S., von Krshiwoblozki, Schneider-Ramelow, M. Washability of e-textiles: current testing practices and the need for standardization. *Textile Research Journal*, 2021, 0(0), 1–17.

Capítulo 16. ECODISEÑO PARA UN DESARROLLO TEXTIL INTELIGENTE

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

16.1 E-textil y reciclaje

El actual proceso de innovación en el sector de los textiles inteligentes podría chocar con los propósitos de las políticas relativas al medio ambiente y los residuos. Cabe esperar, teniendo en cuenta los ejemplos contemporáneos de textiles electrónicos, que los sistemas existentes de recogida y reciclado de residuos electrónicos o textiles viejos no estén diseñados para procesar materias primas de este tipo.

16.2 Tendencias recientes en el proceso de innovación

Los e-textiles pueden concebirse como precursores de las tecnologías inteligentes que impregnarán nuestras vidas en el futuro. Estos productos se describen como "tecnología de moda" cuyas principales características son la singularidad y la funcionalidad avanzada combinadas con el sentido de la moda y la estética[1]. [1] La informática vestible evidencia una visión de largo alcance de dispositivos informáticos incrustados en prendas de vestir de forma discreta. Investigadores y empresas de los sectores electrónico y textil persiguen el desarrollo de los e-textiles. La figura siguiente (16.1) representa la innovación tecnológica convergente cuando se mezclan en un mismo producto materiales y dispositivos de distintos ámbitos tecnológicos.

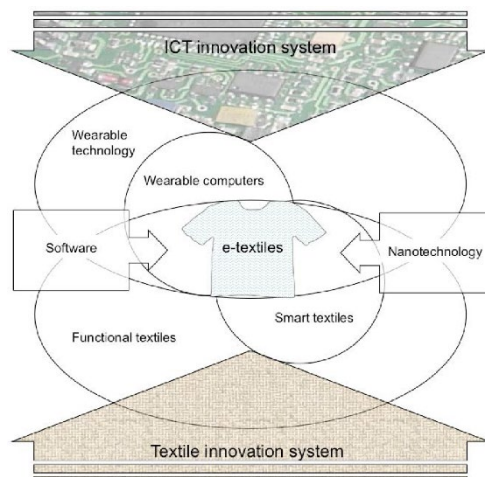


Figura 16.1 Los textiles electrónicos en el sistema de innovación del sector textil y electrónico [2].

La convergencia de los textiles y la electrónica exige la organización de nuevos conceptos de diseño, especialmente para la composición de los materiales y la configuración de los componentes. Las principales características de la electrónica integrada en los textiles deben ser la flexibilidad, la elasticidad y la plegabilidad. Los e-textiles deben ser cómodos, modernos y lavables, al tiempo que conservan su funcionalidad inteligente durante

muchos ciclos de uso para mejorar la experiencia del usuario. El éxito de los textiles electrónicos requiere, por tanto, nuevos paradigmas de diseño y configuración, así como nuevos materiales y tecnologías. Una comunidad interdisciplinar de diseñadores, artesanos y artistas de la moda ramifican el desarrollo de los e-textiles a medida que elaboran a mano componentes textil-electrónicos y hacen que sus conceptos sean abiertamente accesibles a través de blogs, sitios web y talleres [3].

16.3 Impacto de los textiles electrónicos al final de su vida útil

Uno de los fenómenos que hace que los productos de alta tecnología se conviertan en residuos se conoce como obsolescencia progresiva: son sustituidos por modelos más nuevos tras una vida útil relativamente corta. Los e-textiles están sujetos a este tipo de obsolescencia en la medida en que combinan la electrónica efímera con las fugaces tendencias de la moda que rigen el mercado de la confección. Las conclusiones de un estudio de evaluación tecnológica sugieren que los e-textiles viejos se convertirán en una nueva categoría de residuos poco después de su introducción en los mercados de consumo masivo [4]. Estos productos también podrían provocar un aumento del consumo de pilas, que hay que eliminar cuando se agotan. En eso se parecen al problema contemporáneo de los residuos electrónicos. Pero los e-textiles desechados también plantean nuevos problemas derivados de sus propiedades únicas: la dispersión de materiales electrónicos en grandes cantidades de residuos textiles dificultará la recuperación de materiales valiosos a partir de una materia prima de baja calidad [5]. Además, las sustancias potencialmente peligrosas también están dispersas y, por tanto, son difíciles de separar para su eliminación segura. Desde la perspectiva actual, la gestión ambientalmente benigna de los residuos textiles electrónicos no está garantizada por las siguientes razones

(1) Cabe esperar grandes flujos masivos de residuos de e-textiles si éstos irrumpen con fuerza en los mercados de masas [6].

(2) Las emisiones de sustancias peligrosas podrían ser una consecuencia de los e-textiles depositados en vertederos o incinerados, pero también de los riesgos para la salud laboral cuando los e-textiles se someten a procesos de reciclado.

(3) Los componentes electrónicos incorporados a los textiles contienen pequeñas cantidades de materiales escasos que están dispersos en grandes superficies textiles y son difíciles de recuperar. Parece difícilmente viable procesar estas materias primas mezcladas mediante las instalaciones de reciclado existentes. Recuperar cantidades ínfimas de materiales valiosos de un gran flujo masivo de materiales textiles a granel es técnica y económicamente difícil. Sin reciclaje, existe el riesgo de que la aplicación masiva de e-textiles acelere el agotamiento de recursos escasos, como los metales tecnológicos y los recursos para la producción de fibras.



16.4 Ecodiseño de e-textiles: los retos

El objetivo de los desarrolladores de e-textiles es integrar a la perfección la electrónica en los textiles, pero hasta que no se consiga completamente ese objetivo, aún se desconocen las cualidades exactas de los e-textiles.

Por ello, es difícil predecir los posibles problemas al final de la vida útil y elaborar recomendaciones de diseño para minimizar los residuos. Por ejemplo, la recomendación hecha por Design for Recycling de utilizar cierres a presión (en lugar de tornillos) para las cubiertas de plástico de los dispositivos eléctricos es inútil si se cosen o bordan sobre tejidos [7]. Si los componentes electrónicos se adhieren a la tela, también será difícil diseñarlos para que puedan desmontarse fácilmente de la forma convencional. El principio DfR, que restringe el uso de piezas de plástico con metalización superficial, está en contradicción con el uso de hilos recubiertos de metal para los e-textiles. Esto significa que las ideas de diseño innovadoras deben crearse en combinación con el proceso de innovación de los e-textiles.

Las tablas 16.1-16.2 muestran los principios de diseño ecológico relacionados con la prevención de residuos y los tratamientos al final de la vida útil. Se han adoptado de la norma ECMA 341 [8] y del Green Electronics Council [9].

| Eco-design principle | Evaluation | Discussion |
|--|------------|---|
| Reduce the diversity of materials in the product | ! | The amalgamation of electronic and textile components increases the variety of materials found in a product. |
| | + | The use of conjugated polymers (conductive or semi-conductive plastics) can reduce the amount of metallic components. Innovations in organic electronics can stimulate the design of e-textiles free of metals and silicon. |
| Reduce the weight of the product | + | Trend towards flexible thin-layer electronic components can pave the way for to weight savings and increased resource efficiency, |
| | + | Lightweight textile materials can replace solids (plastic, metals) as casing or backing material in devices, |
| | ! | Increasing number of devices used per person can outweigh savings. |
| Using renewable materials | + | Natural fibres (e.g. cotton, hemp, kenaf, bamboo) can replace plastics as casing or backing material. This helps in reducing the consumption of fossil resources and lowers the carbon footprint of products. |
| Using recycled materials | + | Textile materials can, by virtue of their flexibility, be easier refurbished or remanufactured into new products than those rigid materials typically found in electronics. |

* Opportunity (+); Challenge (!)



Tabla 16.1 Retos y oportunidades del diseño ecológico en relación con la eficiencia de los materiales

| Eco-design principle | Evaluation | Discussion |
|--|------------|--|
| Timeless design | ! | The apparel market is subject to rapidly changing design trends and renders textile products unfashionable at seasonal intervals. |
| | + | Smart textile materials may offer possibilities to adjust design features to new fashion trends (colours, shape, thickness) without replacing the product. |
| Easy to upgrade and repair | ! | Fault detection and maintenance are difficult due to seamless integration of electronic components. Repair may damage re-usable garments. |
| | ! | Difficult to update wearable computing devices with regard to firmware, data formats, networking protocols, data safety requirements. Software obsolescence obstructs the availability of servicing information needed to preserve smart functions for a long use phase. |
| | + | Higher fault tolerance due to networked and redundant architecture of textile embedded electronics. |
| Understandable design for the user | ! | The design trends of unobtrusiveness and seamless integration of e-textile components obstruct the user's comprehension of the product |
| Use of standardized parts (power supplies, batteries, connectors) | ! | Standardisation of e-textiles components is lagging behind technological innovation and rapidly changing fashion trends. |
| | ! | Standardisation is a complex task due to the vast heterogeneity of the converging technology and its parent industrial sectors (textile, electronics). |
| Allowing for the reuse and replacement of common parts or modules of the product | ! | Difficulties to replace electronic components being tightly integrated in textiles. In particular, this concerns textile-embedded batteries. |
| | ! | The trend towards low-cost components reduces economic incentives for reuse. User habits in regard to apparel products may discourage reuse. |
| Reuse/refurbishment of old products | ! | The export of old e-textiles to foreign second-hand clothing markets (as part of charity or commercial trade of old garments) could conflict with legislation (The Basel Convention) because of waste electronics contained in them. |

* Opportunity (+); Challenge (!)

Tabla 16.2 Retos y oportunidades del ecodiseño en relación con la obsolescencia de los productos



16.5 Técnicas de ecodiseño para la durabilidad y el reciclado de los textiles electrónicos

Los conceptos de diseño sostenible de los e-textiles deben centrarse en la prevención de residuos. Los diseñadores deben buscar posibilidades para prolongar la vida útil de los e-textiles. Esto podría lograrse diseñando productos para su reparación, renovación y reutilización. El sector de la alta costura ha dado ejemplos de upcycling de prendas antiguas [10]. Estas experiencias pueden inspirar el diseño de prendas de alta tecnología para que sean prendas vintage del futuro y no residuos. Si la moda cambia, se pueden utilizar materiales y tecnologías inteligentes para que los productos sean reconfigurables y ajusten su aspecto. Esto ayudaría a retrasar la obsolescencia y evitaría los residuos. El diseño para el reciclaje de textiles electrónicos implica que los componentes electrónicos defectuosos pueden sustituirse sin dañar el tejido. La aplicación respetuosa con el medio ambiente de tecnologías y materiales avanzados puede acelerar el proceso de innovación en sectores como la electrónica de polímeros.

Hay posibilidades de reducir el consumo de recursos primarios utilizando fibras

recicladas y evitar el uso de sustancias peligrosas. Los materiales textiles pueden sustituir a componentes problemáticos en los productos electrónicos. El uso de dispositivos TIC miniaturizados puede allanar el camino para reducir el consumo de recursos si los dispositivos pequeños sustituyen las funciones de otros más grandes. Además, existen oportunidades para disminuir el consumo de metales escasos si la electrónica de polímeros sustituye a la electrónica basada en el silicio.

Durante la fase de uso, es crucial reducir al mínimo el uso de pilas y electricidad. En la carcasa y el embalaje de los aparatos electrónicos, por ejemplo, los materiales textiles respetuosos con el medio ambiente podrían sustituir a los materiales convencionales. Pulsadores, tiras de velcro o bolsas cosidas son ejemplos de accesorios textiles comunes que pueden utilizarse para instalar componentes electrónicos en los textiles con métodos respetuosos con el medio ambiente (con el objetivo de minimizar el tiempo de desmontaje).

Los materiales inteligentes y los principios de diseño bioinspirados pueden lograr muchas de las tareas deseadas sin necesidad de utilizar componentes electrónicos [11]. Singh et al. analizan los principios de diseño biomimético de los textiles inteligentes, como el tejido autorreparable y la resistencia a las arrugas o los desgarros.

La nanotecnología autocurativa permite desarrollar productos capaces de repararse a sí mismos y menos propensos a sufrir daños. Los materiales intercambiables abren nuevas opciones de diseño de artefactos reciclables, ya que permiten métodos de autodesmontaje [12]. Los hilos o adhesivos destructibles que se rompen al exponerse al calor, las microondas o los campos magnéticos podrían crearse utilizando polímeros sensibles a los estímulos [13]. Tales tecnologías podrían ser capaces de deconstruir económicamente cantidades significativas de e-textiles post-consumo desechados si se colocan en plantas de reciclaje automatizadas.



Referencias

1. Seymour, S. Fashionable technology: the intersection of design. Fashion, Science and Technology, Springer, 2008.
2. Challenges for eco-design of emerging technologies: The case of electronic textiles. Material and Design, Elsevier Ltd., 2013, 51/60
3. Satomi, M., Perner-Wilson, H. Future Master craftsmanship: Where we want electronic textile crafts to go. In: international symposium on electronic Art – ISEA, 2011.
4. Köhler, A.R. End-of-life implications of electronic textiles. Assessment of a converging technology. Lund: Lund University, 2008.
5. Reuter, M.A. Limits of design for recycling and “sustainability”: a review. *Waste Biomass Valor*, 2011, 2, 183–208.
6. Köhler, A.R., Hilty, L.M., Bakker, C. Prospective impacts of electronic textiles on recycling and disposal. *J Ind Ecol*, 2011, 15, 496–511.
7. Masanet, E., Horvath, A. Assessing the benefits of design for recycling for plastics in electronics: a case study of computer enclosures. *Mater Des*, 2007, 28, 1801–11
8. ECMA International. Standard ECMA-341: Environmental design considerations for ICT & CE Products, 2008.
9. Rifer, W., Brody-Heine, P., Peters, A., Linnell, J. Closing the Loop – electronics design to enhance reuse/recycling value. Final Report. Green Electronics Council, 2009.
10. Gardiner, B. Upcycling evolves from recycling. The New York Times. Energy & Environment, 2010
11. Singh, A.V., Rahman, A., Kumar, N.V.G.S, Aditi, A.S., et al. Bio-inspired approaches to design smart fabrics. *Mater Des*, 2012, 36, 829–39.
12. Motornov, M., Roiter, Y., Tokarev, I., Minko, S. Stimuli-responsive nanoparticles, nanogels and capsules for integrated multifunctional intelligent systems. *Progr Polym Sci.*, 2010, 35, 174–211.
13. Bakker, C.A., Wever, R., Teoh, C., Clercq, S.D. Designing cradle-to-cradle products: a reality check. *Int J Sustain Eng*, 2010, 3, 2–8.

Capítulo 17. MATERIALES TEXTILES INTELIGENTES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

17.1 Materiales textiles inteligentes

La llamada industria textil inteligente e interactiva ha crecido considerablemente en los últimos treinta años. Con la introducción de nuevas fibras, nuevos tejidos y técnicas de procesamiento de vanguardia, se espera que aumente la demanda de materiales textiles inteligentes y sus aplicaciones. Además, hay una gran demanda de e-textiles lavables, flexibles, ligeros y resistentes. En estas características influyen las características iniciales del material, el tratamiento posterior y los métodos de integración.

Un e-textil puede crearse utilizando diversas técnicas de superficie para aplicar un componente conductor a la superficie de un sustrato textil o creando un sustrato textil a partir de metales y polímeros conductores naturales y utilizándolos para crear fibras, hilos y textiles. Además, es posible incluir fibras o hilos conductores en sustratos textiles tradicionales durante y después de la creación del tejido textil mediante bordado. El componente textil inteligente completo puede imprimirse en 3D, capa por capa, y la idea de 4D podría ser crucial para elevar el prestigio de los textiles inteligentes a un nuevo nivel [1].

17.2 Clasificación de los textiles inteligentes

Los textiles inteligentes son materiales y estructuras que perciben y reaccionan a las condiciones o estímulos ambientales y pueden reaccionar sobre sí mismos. Las expresiones textil "smart" e "inteligente" o textil "wearable electronic" se utilizan como sinónimos. De hecho, los materiales textiles inteligentes son materiales funcionales que interactúan activamente con su entorno. Por otro lado, los sistemas textiles inteligentes son sistemas que muestran una respuesta intencionada y explotable como reacción a cambios en su entorno o a una entrada externa. La figura 17.1 ilustra un sujetador biónico creado por Steele et al. que utiliza tecnología muscular artificial y sensores electromateriales para detectar un aumento del movimiento del pecho y responder proporcionando más soporte para una vida activa.

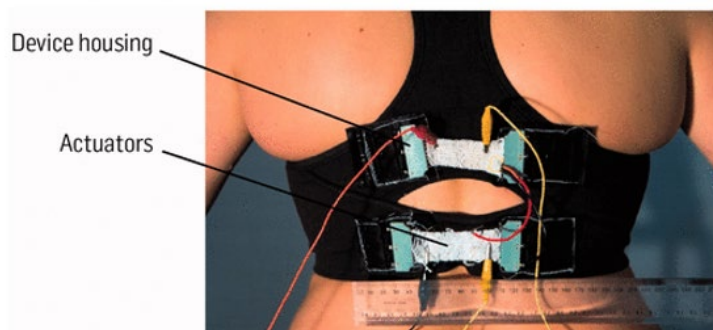


Figura 17.1 Sujetador biónico

Los textiles inteligentes pueden dividirse en tres subgrupos:

- Pasivo
- Activo
- Textiles inteligentes o muy inteligentes

Los textiles inteligentes pueden dividirse en tres categorías:

Para crearlos se pueden utilizar componentes electrónicos, polímeros conductores, materiales de cambio de fase encapsulados, materiales con memoria de forma y otros sensores electrónicos y herramientas de comunicación. Según la investigación de Dadi de 2010, estos materiales responden a los estímulos que les rodean en función de cómo hayan sido construidos [3]. Ya se ha creado la primera generación de placas base vestibles. Estas placas base contienen sensores integrados en la ropa que pueden detectar lesiones e información sanitaria sobre el usuario y transferir esa información a distancia a un hospital.

17.3 Componentes de los sistemas textiles inteligentes

Los textiles inteligentes con capacidades de detección y actuación para el uso deseado se han producido como textiles de un solo propósito. Sin embargo, todo el sistema textil inteligente podría tener bloques de construcción con funciones específicas, como un sensor, un actuador, una interconexión, una unidad de control, un dispositivo de comunicación y una fuente de alimentación. En la figura 17.2 podemos ver una representación esquemática de un sistema textil inteligente.



Figure 17.2. Función de los textiles inteligentes [4]

Sensores: Un sensor es un componente electrónico que detecta una propiedad física y la registra o responde a ella. Entre los tipos típicos de sensores integrados en textiles figuran los electrodos textiles para tensión, humedad, temperatura, presión, luz, detección de moléculas, electrocardiografía, electromiografía y electroencefalografía.

Actuador: Los actuadores realizan acciones como mover objetos, liberar materiales y crear sonidos actuando sobre un efecto suministrado desde el sensor, potencialmente después de enviar primero este efecto a través de un procesador de información. Ejemplos habituales de actuadores textiles son los diodos orgánicos emisores de luz, los materiales que cambian de fase, los textiles que regulan la temperatura y los que generan sonidos [5].

Procesamiento de datos: En los textiles inteligentes se necesita un procesador adecuado al uso previsto para procesar los parámetros adquiridos por los sensores y proporcionar la salida necesaria. Solo cuando el textil procesa activamente la información se requiere el elemento de procesamiento de la información.

Dispositivo de Comunicación: Es una unidad integrada para transmitir y recibir datos electrónicos y/o información desde y hacia otro sistema, respectivamente.

Almacenamiento: La fuente de alimentación es una pieza que se utiliza para alimentar el sistema. Las baterías de polímero de litio (LiPo) se utilizan con frecuencia en los textiles inteligentes por su compacidad. Sin embargo, los condensadores y los sistemas de recolección de energía basados en textiles que se han desarrollado recientemente podrían ocupar su lugar en algunas aplicaciones [6].

17.4 Materiales conductores

Los textiles conductores de la electricidad se utilizan en muchas aplicaciones de materiales textiles inteligentes, pero los materiales textiles convencionales suelen ser aislantes, por lo



que no pueden utilizarse directamente para aplicaciones textiles inteligentes que requieran conductividad eléctrica. Sin embargo, es posible obtener textiles conductores de la electricidad integrando hilos metálicos, polímeros conductores u otros compuestos conductores en la estructura textil. Para impartir conductividad, se pueden insertar en la estructura textil hilos metálicos no textiles de plata, acero inoxidable, níquel, aluminio y cobre. Los metales proporcionan una alta conductividad, muy importante para algunas aplicaciones textiles inteligentes, pero aumentan el peso del material y afectan a su flexibilidad. Además, algunos metales son propensos a la corrosión. Los textiles conductores basados en metales también pueden fabricarse recubriendo la superficie de los materiales textiles con tinta metálica, pero presentan limitaciones en cuanto a su estabilidad al lavado. Buscar compuestos conductores alternativos es fundamental para saber cómo producir textiles conductores fiables y con mayor flexibilidad. Los materiales conductores para materiales textiles pueden clasificarse como:

1. Tintas conductoras.
2. Polímeros conductores a base de carbono.
3. Polímeros conductores intrínsecos.
4. Compuestos de polímeros conductores.

17.5 Tintas conductoras

El desarrollo de tintas funcionales imprimibles con diversos tamaños y arquitecturas a nanoescala se considera un factor clave del éxito de la impresión por chorro de tinta para la electrónica impresa. Las tintas conductoras pueden tener el aspecto de placas, nanocables, nanotubos u otros materiales nanoestructurados tridimensionales. Hay muchas opciones disponibles para la tinta imprimible, incluidas las tintas conductoras, semiconductoras y dieléctricas. Pueden utilizarse nanopartículas y micropartículas metálicas conductoras para crear tintas conductoras. Los polímeros orgánicos, los semiconductores inorgánicos y los óxidos metálicos pueden utilizarse para crear tintas semiconductoras. Las tintas dieléctricas son polímeros orgánicos en disolventes, polímeros orgánicos termoestables o polímeros orgánicos empaquetados con cerámica. Los metales, los óxidos metálicos, los polímeros conductores, las tintas organometálicas, el grafeno, los nanotubos de carbono y las mezclas de las distintas tintas pueden utilizarse para crear tintas conductoras útiles [7].

17.6 Materiales conductores a base de carbono

Se ha estudiado el desarrollo de tejidos conductores de la electricidad utilizando materiales basados en el carbono, como el grafeno, los nanotubos de carbono (CNT), el negro de humo, el óxido de grafeno y los óxidos de grafeno reducidos. Estos materiales

de carbono son ideales para crear tejidos conductores debido a sus características: flexibilidad, resistencia a la corrosión y asequibilidad. Se creó un tejido de poliéster conductor hecho de grafeno que se utilizó para aplicaciones de monitorización del biopotencial [8]. Dependiendo del contenido de carga, estos materiales pueden utilizarse para crear tejidos conductores con diversos rangos de conductancia. Zhu et al. utilizaron el recubrimiento por inmersión y el recubrimiento por pulverización para crear tejidos conductores lavables a máquina hechos de nanotubos de carbono de pared simple [9]. Los tejidos conductores de la electricidad creados tienen una alta conductividad de hasta 7,4 10² S/m.

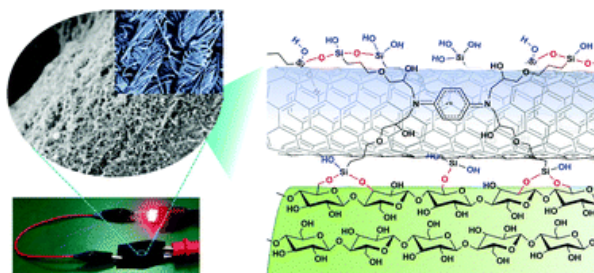


Figura 17.3 Composición de nanomateriales a base de carbono [10]

17.7 Polímeros intrínsecamente conductores

En la actualidad, la creación de textiles electroconductores hace un amplio uso de polímeros intrínsecamente conductores. Los polímeros con una estructura molecular conjugada -que incluye enlaces simples y dobles alternos entre átomos de carbono- se conocen como polímeros conductores. Son la opción perfecta para los electrodos textiles porque pueden combinar las propiedades eléctricas de los metales o semiconductores con las ventajas de los polímeros ordinarios. Los polímeros conductores más eficaces para fabricar textiles conductores son el polipirrol (PPy), la polianilina (PANI) y el derivado del politiofeno poli (3,4-etileno dioxitiofeno): poli (sulfonato de estireno) (PEDOT:PSS) [11]. Los disolventes orgánicos conocidos como dopantes pueden añadirse a los polímeros para aumentar su conductividad; por ejemplo, utilizando disolventes orgánicos polares como etilenglicol, dimetilsulfóxido y glicerol, la conductividad del PEDOT:PSS puede aumentarse en un factor de uno a tres [12]. Dado que se puede obtener una gran variedad de propiedades eléctricas experimentando con el polímero añadido y la cantidad de dopante, estos polímeros conductores pueden utilizarse para diseñar todos los componentes estructurales del sistema textil inteligente. En la Figura 17.4 se muestra la composición química de varios polímeros conductores.

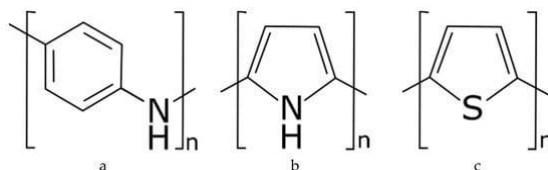


Figura 17.4. Los polímeros conductores más eficaces: a - polianilina; b - polipirrol; c - politiofeno.
[1]

17.8 Compuestos poliméricos conductores

La mayor conductividad se encuentra en los textiles conductores con base metálica, aunque suelen ser demasiado rígidos. Los polímeros conductores existentes presentan una conductividad alentadora, pero siguen necesitando mejoras en sus propiedades mecánicas. Por ello, los compuestos poliméricos conductores presentan una mayor estabilidad mecánica y conductividad eléctrica. Los compuestos hechos de cargas poliméricas carbonosas, metálicas y conductoras, solas o combinadas, se conocen como compuestos poliméricos conductores de la electricidad. Pueden crearse utilizando un solo polímero o una mezcla multifásica, en función de las cualidades eléctricas y mecánicas necesarias. El uso de compuestos poliméricos conductores en entornos académicos y profesionales no ha dejado de aumentar. Para crear tejidos conductores, se han desarrollado y empleado numerosos compuestos poliméricos conductores.

Referencias

1. Malengier, B., Fante, K.A., Nigusse, A.B., Van Langenhove, L. Integration of Conductive Materials with Textile Structures, an Overview Granch Berhe Tseghai, *MDP – Sensors*, 2020.
2. Steele, J.R., Ghossein, S.A., Campbell, T.E., Richards, C.J., Beirne, S., Spinks, G.M., Wallace, G.G. The Bionic Bra: Using electromaterials to sense and modify breast support to enhance active living. *J. Rehabil. Assist. Technol. Eng.*, 2018, 5, 205566831877590.
3. Dadi, H.H. Literature over View of Smart Textiles. Boras University: Boras, Sweden, 2010.
4. Çelikel, D.C. Intech Open Advanced Functional Materials - Smart E-Textile. Materials chapter, 2019
5. Tao, X. Handbook of Smart Textiles, 1st ed. Springer Science+Business Media: Singapore, 2014.
6. Giuri, A., Colella, S., Listorti, A., Rizzo, A., Mele, C., Esposito, C. GO/glucose/PEDOT:PSS ternary nanocomposites for flexible supercapacitors. *Compos. Part B*, 2018, 148, 149–155.
7. Thangakameshwaran, N., Santhoskumar, A.U. Cotton Fabric Dipped in Carbon Nano Tube Ink for Smart Textile Applications. *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, 2014, 63, 557–562.
8. Gamage, S.J.P., Yang, K., Braveenth, R., Raagulan, K., Kim, H.S., Kim, J.S., Yang, C.-M., Jung, M.J.; Chai, K.Y. MWCNT Coated Free-Standing Carbon Fiber Fabric for Enhanced Performance in EMI Shielding with a Higher Absolute EMI SE. *Materials*, 2017, 10, 1350.
9. Zhu, S., Wang, M., Qiang, Z., Song, J., Wang, Y., Fan, Y., You, Z., Liao, Y., Zhu, M., Ye, C. Multi-functional and Highly Conductive Textiles with Ultra-high Durability through 'Green' Fabrication Process. *Chem. Eng. J.*, 2020, 406, 127140.



10. Highly conductive and ultra-durable electronic textiles via covalent immobilization of carbon nanomaterials on cotton fabric. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019.
11. Maity, S., Chatterjee, A. Polypyrrole Based Electro-Conductive Cotton Yarn. *J. Text. Sci. Eng.*, 2014, 4, 171.
12. Achilli, A., Pani, D., Bonfiglio, A. Characterization of Screen-Printed Textile Electrodes Based on Conductive Polymer for ECG Acquisition. In Proceedings of the 2017 Computing in Cardiology Conference, Rennes, France, 24–27 September 2017.

Capítulo 18. CÓMO TRATAR LOS RESIDUOS TEXTILES INTELIGENTES

Veronica Guagliumi, Ciape, Italia

18.1 Los retos

Los residuos textiles son reconocidos como el flujo de residuos de más rápido crecimiento entre los residuos sólidos urbanos (RSU). En todo el mundo, el aumento del consumo y la producción de ropa ha provocado una generación de residuos textiles que ha planteado numerosos retos en muchos países. Uno de ellos es la recogida de residuos mediante infraestructuras de clasificación económicamente viables que son difíciles de encontrar. Otro reto importante lo representan las variaciones en las mezclas de fibras que hacen que la clasificación de los residuos textiles sea exigente y complicada. Sin embargo, la automatización de la clasificación y las innovaciones en el reciclaje textil son campos de creciente interés [1]. La opción preferida es la reutilización textil, pero sufre una contracción del mercado debido a la prohibición de importar ropa usada en algunos países. La producción de ropa nueva a través de la reutilización y el reciclaje textil debería estar impulsada por incentivos económicos que la hicieran viable en el ámbito que nos ocupa. Para reducir el impacto medioambiental, hay que utilizar de forma innovadora materiales mezclados sostenibles fabricados a partir de fibras recicladas. Además, es fundamental trabajar en la caracterización de la estructura y las propiedades de las fibras celulósicas regeneradas a partir de residuos de algodón. Otra acción clave podría ser la investigación de tecnologías de reciclado para gestionar de forma sostenible otros residuos textiles, como la fibra celulósica artificial (MMCF) y otras fibras como la poliamida. Tras el poliéster y el algodón, las MMCF son una clase de fibras fabricadas principalmente a partir de madera y otros materiales que contienen celulosa. Son la tercera fibra más utilizada en el mundo. Suponen el equivalente a unas 7,1 Tm de fibra al año, o alrededor del 6,4% de toda la fibra producida [2]. La sostenibilidad se ve favorecida además por la creación de fibras no tradicionales y un proceso de ligado sin productos químicos. En comparación con las fibras vegetales tradicionales, las fibras naturales pueden ofrecer ventajas sustanciales por su menor impacto medioambiental. Las tecnologías de reciclado que pueden crear nuevas fibras comparables a las fibras vírgenes son algunas de las innovaciones que promueven la economía circular y los sistemas de reciclado de circuito cerrado. El sector de la moda se beneficia enormemente de la transición de la actual economía lineal a una economía circular, al tiempo que minimiza las repercusiones negativas del aumento de la población mundial, que está provocando una mayor demanda de ropa [3].

18.2 Ventajas del reciclaje de textiles inteligentes

Se prevé que los e-textiles se utilicen de forma generalizada y produzcan importantes flujos de residuos. Será difícil recoger y reciclar los e-textiles viejos sin sistemas de recogida y reciclado de última generación. Los e-textiles también pueden afectar a la salud humana y a los problemas de justicia social generalmente relacionados con los

residuos electrónicos. Podemos obtener beneficios ilimitados reciclando los textiles inteligentes de la forma adecuada. Algunos hechos son:

- Los productos de fibra sintética no se descomponen y las fibras naturales pueden liberar gases de efecto invernadero, por lo que se necesita menos espacio para vertederos.
- Se evita el uso de fibras vírgenes.
- Menor consumo de energía y agua.
- Se evita la contaminación.
- Menor demanda de tintes.
- Menor emisión de gases de efecto invernadero [4].



Figura 18.1 Reciclaje textil inteligente

18.3 Posibilidades de reciclaje de textiles inteligentes

El destino de los viejos textiles electrónicos depende de los sistemas de gestión de residuos que se establezcan en el lugar de su eliminación. Sin embargo, los sistemas de reciclado que se utilizan actualmente son inadecuados para recoger y procesar textiles con componentes electrónicos integrados. Según los expertos en reciclaje, es difícil reciclar los textiles electrónicos debido a diversos problemas técnicos. Por ejemplo, los textiles podrían atascar trituradoras y trituradores como los que se utilizan actualmente en el reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) [5].

Se pensaba que la separación de materiales esponjosos y ligeros, como las láminas de plástico metalizadas y los hilos textiles, superaba las capacidades de los separadores automatizados. Sabemos por la tecnología de reciclado de RAEE existente que la trituración mecánica provoca importantes pérdidas de metales preciosos. Estos materiales se transmiten en cantidades sustanciales a las fracciones de salida, donde no pueden recuperarse. Además, los metales valiosos (como la plata) se transferirían a la fracción de polvo durante la destrucción de los e-textiles. Los expertos predijeron que la clasificación y el tratamiento manual de los residuos de e-textiles eran factibles, aunque suponían un reto. Dado que los metales ricos no están concentrados en los residuos de e-textiles como lo



están en los residuos eléctricos tradicionales, se predijo que los costes de procesamiento serían inasequibles.

La solución al reciclado inteligente de textiles aún está por desarrollar. Estos son los resultados de algunas investigaciones: [6-9]

- La tecnología debería utilizarse para producir artículos con un ciclo de vida más largo.
- Los desarrolladores de tecnología y los diseñadores de productos de e-textiles no deben limitarse a responsabilizar a la industria del reciclaje de la fase de fin de vida de sus inventos.
- Transformar los retos en oportunidades construyendo artefactos tecnológicos para que tengan beneficios de sostenibilidad a largo plazo durante todo el ciclo de vida del producto.
- Los beneficios de la sostenibilidad deben buscarse y ponerse en práctica.
- Los diseñadores industriales pueden desempeñar un papel vital creando escaparates de e-textiles sostenibles para inspirar a los consumidores y a los responsables de la toma de decisiones a centrar su atención en alternativas sostenibles.
- El diseño ecológico del nuevo producto debe imponerse en todas las instituciones de investigación.
- La prevención de residuos debe convertirse en un objetivo explícito de las estrategias de innovación.
- Un mayor uso de textiles inteligentes para sensores simples y gruesos, como los sensores resistivos o capacitivos, puede ayudar a obtener precisión mediante el uso de múltiples sensores y la extrapolación de datos.
- Mayor uso de los tejidos superficiales que existen actualmente para reducir la necesidad de sensores y componentes electrónicos diminutos.
- Asegurarse de que las múltiples vías de datos y las líneas paralelas garantizan la fiabilidad y la seguridad de los circuitos en caso de fallo.
- Considerar el uso mínimo de materiales, como los monomateriales.
- El uso de combustibles fósiles puede crear nuevas posibilidades para un futuro sostenible.
- Desmontaje de los circuitos de control del textil inteligente para una mayor longevidad y un uso más prolongado.
- Mejorar la durabilidad de los productos centrándose en la calidad, desechabilidad, desgaste, reparabilidad y obsolescencia.

Referencias

1. Bukhari, M.A., Carrasco-Gallego, R., Ponce-Cueto, E. Developing a national programme for textiles and clothing recovery. *Waste Manag. Res.*, 2018, 36, 321–331.
2. Textile Exchange. Preferred Fiber & Materials, Market Report, 2020.
3. GFA & BCG (Global Fashion Agenda and the Boston Consulting Group). Pulse of the Fashion Industry, 2021



4. Biswas, P. Smart Recycling of Smart Textiles – an Un-explored area in Textile Waste Management, Textile Focus. *Textile Engineer.*, 2021.
5. Shradhanjali, B. & Goutam, B. Sustainability in Smart Textile. National Institute of Fashion Technology, Bhubaneswar, India. – Textile Value Chain, Dec 04, 2020.
6. Çelikel, D.C. Smart E-Textile Materials. Intechopen, October 30th, 2020.
7. Leblanc, R. The Basics of Textile Recycling- Growth of Textile Recycling Promises to Divert More Material from Landfills. The Balance Small Business, December 30, 2020.
8. <https://www.environmentalleader.com/2011/11/study-smart-fabrics-pose-e-waste-threat/>
9. <https://www.360researchreports.com/global-electronic-textiles-sales-market-16615686>

Capítulo 19. CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS TEXTILES INTELIGENTES POR 3R CONCEPT

Alexandra Bodoga, Daniela Farima y Alina Dragomir Iovan, Universidad Técnica "Gheorghe Asachi" de Iasi, Rumanía

Nuestra vida está rodeada de tejidos y, como estamos en la era de la tecnología, no es de extrañar que los tejidos también tengan funciones inteligentes. Hoy en día hay muchos tejidos inteligentes e innovadores, tejidos inteligentes que pueden utilizarse en la industria de la moda.

Los tejidos inteligentes también se denominan tejidos electrónicos o e-textiles y son tejidos con componentes electrónicos para realizar algunas funciones. La integración de componentes digitales no debe modificar las funciones de la ropa, como la comodidad, la suavidad, la resistencia o la durabilidad.

El mercado de los textiles inteligentes está creciendo en los países en desarrollo y el mercado mundial de los tejidos inteligentes pasará de 943 millones de dólares en 2015 a 5369 millones de dólares en 2022 [1].

La literatura proporciona varios tipos de tejidos inteligentes, y la clasificación común se basa en las funciones estéticas y de rendimiento de la ropa. Los tejidos inteligentes estéticos se utilizan en la industria de la moda, y pueden cambiar de color, pueden iluminarse. Estos tejidos utilizan materiales termocrómicos, solvatocrómicos, fotocromáticos y electrocromáticos. Las funciones de rendimiento se refieren a la capacidad del material para proteger contra las radiaciones, monitorizar las funciones corporales como el ritmo cardíaco, controlar la temperatura corporal.

Los textiles inteligentes podrían transformar los estímulos en respuestas que interactúen con los 5 sentidos: táctil, visual, auditivo, olfativo y háptico. Además de la industria de la confección, los textiles inteligentes tienen otras aplicaciones como la medicina, la automoción, el ejército, la aviación o la robótica.

Los textiles inteligentes no son necesariamente más sostenibles que los normales y, según la bibliografía, existen algunas dudas sobre la sostenibilidad de los textiles inteligentes [2]. Ambas industrias, la textil y la microelectrónica, tienen algunos problemas relacionados con la sostenibilidad.

El término "sostenibilidad" se ha hecho cada vez más popular en los últimos años en todas las industrias y en el lenguaje de los consumidores. La sostenibilidad tiene diferentes definiciones, pero la más común es "Cualidad de una actividad antrópica de llevarse a cabo sin agotar los recursos disponibles y sin destruir el medio ambiente, por lo que sin comprometer las posibilidades de satisfacer las necesidades de las generaciones futuras" [3]. La sostenibilidad puede describirse como la intersección de los "tres pilares" que constituyen las soluciones a los problemas medioambientales, sociales y económicos.



Desde el punto de vista medioambiental, la industria textil no era muy respetuosa, pero gracias a tecnologías avanzadas e innovadoras, esto ha cambiado en los últimos años. El progreso tecnológico, la mejora de los procesos, el cuidado del medio ambiente, todo ello tiene como objetivo que la industria avance hacia un desarrollo sostenible.

Desde un punto de vista económico, el desarrollo sostenible de la industria europea puede lograrse a través de la competitividad: estar un paso por delante de la competencia. Debido a las injustas restricciones a la exportación, los competidores de otros terceros países pueden adquirir productos a bajo precio, lo que dificulta el mantenimiento de una ventaja competitiva en el mercado mundial.

Desde un punto de vista social, deben seguirse ciertos aspectos: garantizar el bienestar de los animales, mejorar la imagen de la industria y atraer inversiones, apoyar la educación y la formación especializada, así como no explotar a la mano de obra.

Durante mucho tiempo, la sostenibilidad y la economía circular se abordaron a través del prisma del concepto de las 3 "erres": **Reducir, Reutilizar, Reciclar**.

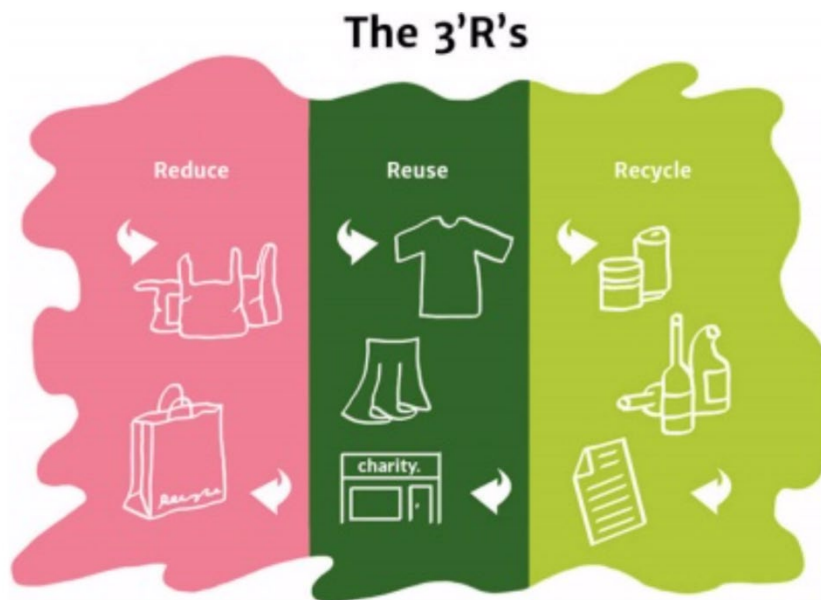


Figura 19.1. 3"Rs" concepto, fuente: <https://www.solarschools.net/knowledge-bank/sustainability/reduce-reuse-recycle>

Reducir

Se refiere a limitar el número de compras para reducir la cantidad de residuos generados. Es el componente más eficaz de la jerarquía de residuos.



Reutilizar

La segunda "R" significa que los productos deben utilizarse tanto como sea posible antes de sustituirlos. Los productos textiles suelen sustituirse porque ya no están de moda, aunque sigan siendo funcionales y no estén dañados.

Reciclar

La tercera "R" se refiere a dar una nueva finalidad al producto o a algunas de sus partes.

El objetivo de las 3 "R" es minimizar la cantidad de residuos producidos, reutilizando los productos en la medida de lo posible y reciclando cualquier material que pueda servir para un nuevo fin.

McDonough y Braungart propusieron un nuevo enfoque de las "R": Repensar o Rediseñar. Esta nueva "R" se basa en el comportamiento de reorganización de la sociedad, centrado en el ecodiseño y los procesos de diseño estrechamente relacionados con el desarrollo sostenible y la aparición de un nuevo tipo de consumidor, el consumidor consciente [1, 4].

El concepto más reciente es el de las "6R", que constituye la base de la producción sostenible (reducir, reutilizar, desechar, reimaginar, reparar, reciclar), ya que permite pasar de un ciclo de vida abierto tradicional a otro cerrado [5].



Figura 19.2. The 6 "R", fuente: <https://reimagineco.ca/blogs/news/the-6-rs>



Reimaginar o repensar

Se refiere al estilo de vida del consumidor y sus hábitos de compra. Antes de comprar algo, deben preguntarse si realmente necesitan ese producto y replantearse sus elecciones cotidianas.

Reutilizar

En lugar de comprar un producto nuevo, reinvente y encuentre un uso alternativo para el existente.

Reducir

El objetivo es reducir la cantidad de residuos generados comprando sólo los productos importantes y limitando las compras.

Reparar

Antes de tirar un producto debería prolongar su vida útil arreglándolo.

Rechazar

Se refiere al hecho de negarse a pagar más por algo que acabaría generando más residuos, como un gran embalaje lleno de papel.

Reciclar

Las materias primas de los productos textiles pueden recuperarse y reutilizarse para obtener otro producto, lo que supone conservar los recursos naturales y contribuir al desarrollo sostenible.

Cada una de estas "R" describe una acción que puede llevarse a cabo para reducir el impacto medioambiental de los productos.

La capacidad de reciclaje de los productos textiles inteligentes depende de los materiales utilizados y del nivel de integración entre los componentes textiles y tecnológicos [5]. Otro aspecto es la forma en que se colocan los dispositivos electrónicos: cosidos, abotonados, con velcro, con cremallera. No retirar los dispositivos electrónicos en el momento del reciclado dificulta el proceso. Incluso si se retiran los dispositivos electrónicos, son difíciles de reciclar. El mejor método de eliminación de residuos textiles es el reciclaje, pero en lo que respecta a los textiles inteligentes el proceso es muy complicado, difícil, caro y a veces imposible.



Referencias

1. Çelike, D.C. Smart E-Textile Materials, 2013. DOI: 10.5772/intechopen.92439
2. Ossevoort, S. Improving the sustainability of smart textiles: Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers, 2013. DOI: 10.1533/9780857093530.3.399
3. Brundtland Commission. *Our Common Future*. Oxford, Oxford University Press, 1987.
4. McDonough, W. and Braungart, M. *Cradle-to-Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York, North Point Press, 2002
5. Jayal, A.D., Badurdeen, F., Dillon, O.W. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process, and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2010, 2(3), 144-152. DOI: 10.1016/j.cirpj.2010.03.006

Capítulo 20. DESARROLLO DE TEXTILES INTELIGENTES SOSTENIBLES

Athanasios Panagiotopoulos y Georgios Priniotakis, UNIWA, Grecia

Introducción, definiciones

Los textiles inteligentes pueden definirse como tejidos capaces de percibir y reaccionar ante las condiciones ambientales y los estímulos externos (por ejemplo, estímulos mecánicos, térmicos y químicos) gracias a una serie de sensores incorporados en los textiles.

Sostenibilidad significa satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Además de los recursos naturales, el desarrollo sostenible también necesita recursos sociales y económicos. La sostenibilidad no es sólo ecologismo. En la mayoría de las definiciones de sostenibilidad encontramos preocupaciones por la equidad social y el desarrollo económico.

La combinación de los términos de textiles inteligentes y sostenibilidad, lleva a la necesidad de una nueva definición: la de los textiles inteligentes sostenibles. En un aspecto amplio y general, que se definiría como los textiles inteligentes que cumplen la demanda de sostenibilidad en todos los aspectos de sus funciones y aplicaciones y a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta el final de su vida útil, incluyendo las fases más importantes de fabricación y uso. Lo más importante para cumplir las exigencias de los textiles inteligentes sostenibles es que se diseñen y desarrollen como tales.

A continuación, presentaremos los aspectos más importantes del desarrollo de textiles inteligentes que puedan considerarse sostenibles. La búsqueda de la sostenibilidad es un proceso de desarrollo continuo que se repite eternamente, por lo que los aspectos que se presentan a continuación no deben considerarse los únicos, sino los más importantes y un buen punto de partida para cualquiera que desee desarrollar textiles inteligentes sostenibles.

21.1 Consumo de energía

El consumo de energía es uno de los aspectos más importantes relacionados con la sostenibilidad, especialmente el consumo excesivo de energía cuando ésta se basa en fuentes no renovables como los combustibles fósiles. En cuanto a los textiles inteligentes, una característica muy útil para evitar el consumo de energía es la capacidad de autolimpieza. Para ello se pueden utilizar varias soluciones tecnológicas, como fotocatalizadores, microondas, nanotubos de carbono, óxido metálico coloidal, nanopartículas de plata y cloro halamina [1]. La obtención de propiedades de autolimpieza en superficies textiles mediante el uso de nanotecnología ofrece un enorme potencial para



el desarrollo de nuevos materiales o nuevos productos y aplicaciones para materiales conocidos [2].

Además, la autocuración puede prolongar varios años el ciclo de vida de un textil. Si logramos la autocuración, podremos prolongar la sustitución de un textil, lo que se traduce en una menor necesidad de energía para producir uno nuevo.

Los tejidos autorreparables, que se conocen como textiles inteligentes con función de autorreparación automática, se consideran una promesa esencial para la expansión continua de la industria textil. Los tejidos autorreparadores se han desarrollado convencionalmente con el uso de acabados de recubrimiento químico en forma de microcápsulas, hidrogeles u otras matrices poliméricas [3].

Además, la capacidad de autotermorregulación de los textiles es una auténtica revolución para el consumo de energía. Se puede imaginar ropa que tenga la capacidad de regular la temperatura del cuerpo de la persona que la lleva, con lo que habría menos necesidad, o tal vez ninguna, de aparatos de calefacción o refrigeración que consumen una cantidad considerable de energía. Entre las estrategias para conseguirlo se encuentran los tejidos refrigerantes/calefactores, los tejidos refrigerantes/calefactores, los tejidos de colores, los tejidos dinámicos, los tejidos basados en fibras PCM, las películas/tejidos híbridos basados en nanofibras metálicas, los materiales basados en grafeno y carbono y los dispositivos termoeléctricos (TED) [4].



Figura 21.1 La sostenibilidad conduce a un futuro verde

21.2 Materiales

La sostenibilidad de los textiles inteligentes también debe referirse al tipo de materiales utilizados para la fabricación del producto. Los materiales demasiado caros o que requieren recursos considerables deben evitarse en favor de otros materiales e, idealmente, de materiales reciclados que se consideren sostenibles, por ejemplo, neutros en carbono o reciclados o reciclables.

Incluso es posible pensar en una solución de materiales y componentes electrónicos que han llegado al final de su vida útil y que podrían integrarse en textiles inteligentes. Un ejemplo son los microprocesadores que se consideran obsoletos para aplicaciones de alta tecnología (informática) pero que pueden funcionar eficazmente en aplicaciones de baja demanda en textiles inteligentes, ego controlar un número limitado o dispositivos de entrada/salida como sensores. De este modo, cantidades significativas de residuos electrónicos peligrosos se reciclan y permanecen en servicio en lugar de ser una fuente de contaminación [5]. Lo mismo puede aplicarse a las pequeñas pantallas de teléfonos móviles o equipos de radiocomunicación.

La posibilidad de que los componentes electrónicos puedan desmontarse del textil inteligente, montando el hardware electrónico en el textil de forma fácilmente desmontable, puede permitir la actualización del hardware y un ciclo de vida más largo y, en consecuencia, la reducción de los residuos electrónicos.

21.3 Producción de energía

Ya nos hemos referido al consumo de energía con el significado de disminuir la energía necesaria para la función del textil inteligente. Un paso adelante es la producción de energía a partir del propio textil.

Esto podría ocurrir con la recolección de energía biomecánica de los textiles, ya que el cuerpo humano es una rica fuente de energía biomecánica. Una solución tecnológica bastante madura para cosechar energía biomecánica es el efecto piezoeléctrico, que podría integrarse en los textiles para generar electricidad en el cuerpo. En comparación con la energía biomecánica intermitente que requiere movimientos corporales, otra fuente de energía es el calor corporal, que existe constantemente en el cuerpo humano incluso en posturas estacionarias, que se origina a partir de subproductos metabólicos y se ha convertido en las últimas décadas en una fuente de energía disponible para la generación continua de electricidad. Además de la mencionada generación de electricidad a partir de los movimientos biomecánicos y el calor corporal, la energía bioquímica es un tipo de fuente de energía en el cuerpo que suele estar disponible pero que normalmente se ignora, y que se presenta en formas como los fluidos corporales, incluidos el sudor, las lágrimas, la sangre y la saliva [6].

Fotovoltaica Textiles

Los dos sectores principales de los textiles fotovoltaicos (FV) son, por un lado, la alimentación de sensores y otros componentes electrónicos integrados en un tejido para llevar puesto y, por otro, el uso a gran escala de la energía solar de toldos, sombrillas, cubiertas e instalaciones similares. En la actualidad no existen productos de energía solar puramente textil, pero sí muchas versiones a escala de laboratorio que compiten por convertirse en aplicaciones comerciales.

El primer reto en la fabricación de cualquier célula fotovoltaica es proporcionar una base conductora de electricidad que no tenga una barrera resistiva al flujo de cargas de la célula. Para las células que suministran corrientes significativas sólo se utilizan metales, mientras que las células de película fina de menor rendimiento pueden utilizar óxidos transparentes menos conductores (por ejemplo, óxido de indio y estaño- ITO, u óxido de aluminio y zinc-AZO). Los polímeros conductores no son suficientemente conductores por sí solos [7].

Utilización de fibras naturales

Los compuestos a base de fibras naturales son objeto de intenso estudio por su carácter ecológico y sus propiedades únicas. Sus ventajas son su suministro continuo, su manipulación fácil y segura y su naturaleza biodegradable. Aunque las fibras naturales presentan unas propiedades físicas y mecánicas admirables, éstas varían en función de la fuente vegetal, la especie y la geografía, entre otros factores [8].

Las categorías de fibras naturales son:

- Fibras vegetales que incluyen el líber, la hoja, el tallo, el fruto, la semilla y otras como la madera.
- Fibras animales que incluyen pelo como lana, angora, mohair, cachemira y alpaca, así como seda.
- Las fibras minerales, como el amianto [9], también podrían ser útiles, pero plantean problemas para la salud humana, lo que constituye un factor inhibitorio.

La categoría más prometedora y novedosa es la de las fibras obtenidas de frutas y semillas. Cada año se desperdician toneladas de fruta. Si es posible producir fibras a partir de ellas, se obtendrán grandes resultados medioambientales y económicos.

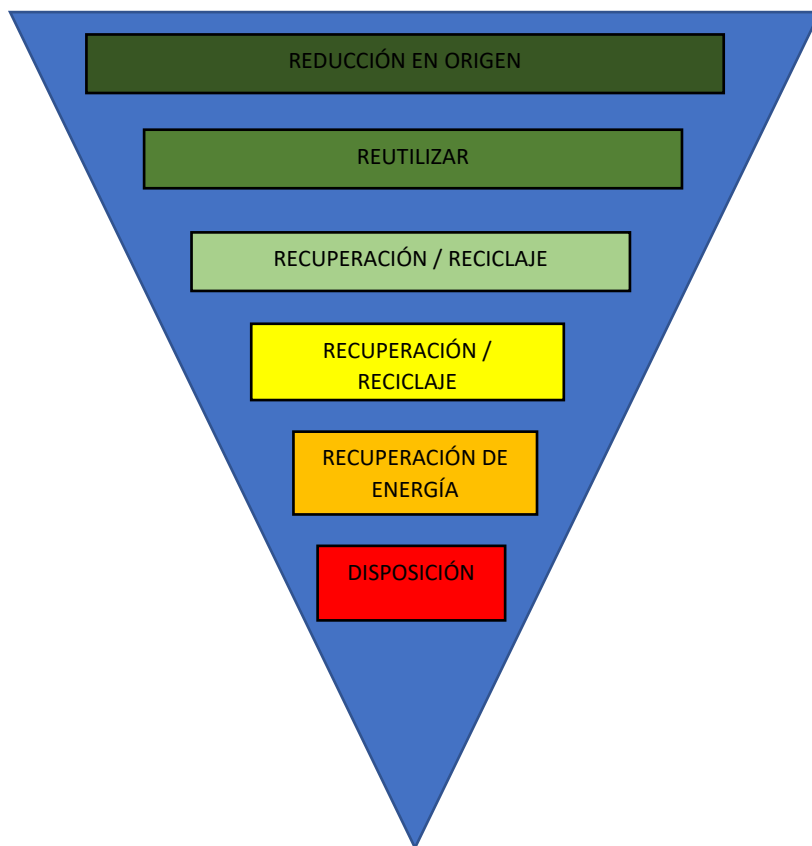


Figura 21.2 Jerarquía de reducción de residuos

Referencias

1. Saad, S.R., Mahmed, N., Abdullah, M.M.A.B., Sandu, A.V. Self-Cleaning Technology in Fabric: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 133. doi:10.1088/1757-899x/133/1/012028
2. Self Cleaning Textile <https://www.technicaltextile.net/articles/self-cleaning-textile-an-overview-2646>
3. Cheung, T.W., Li, L. Sustainable development of smart textiles: a review of self-functioning abilities which makes textiles alive. *J Textile Eng. Fashion Technol*, 2018, 4(2), 151-156. DOI: 10.15406/jteft.2018.04.00133
4. Hu, R.; Liu, Y.; Shin, S.; Huang, S.; Ren, X.; Shu, W.; Cheng, J.; Tao, G.; Xu, W.; Chen, R.; Luo, X. Emerging Materials and Strategies for Personal Thermal Management. *Advanced Energy Materials*, 2020. doi:10.1002/aenm.201903921
5. Veske, P.; Ilän, E. Review of the end-of-life solutions in electronics-based smart textiles. *Journal of Textile Institute*, 2020, 1–14. doi:10.1080/00405000.2020.1825176
6. Chen, G.; Li, Y.; Bick, M.; Chen, J. Smart Textiles for Electricity Generation. *Chemical Reviews*, 2020. doi:10.1021/acs.chemrev.9b00821
7. Wilson, J.I.B, and Mather, R.R. Photovoltaic solar textiles. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2019, 32, 1-4.



8. Asim, M.; Abdan, K.; Jawaid, M.; Nasir, M.; Dashtizadeh, Zahra; Ishak, M.R.; Hoque, M. E. A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 1–16. doi:10.1155/2015/950567
9. Daria, M.; Lejcuć, K.; Misiewicz, J. Characteristics of biodegradable textiles used in environmental engineering: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122129

Capítulo 21. TOXICIDAD EN TEXTILES INTELIGENTES

Olga Papadopoulou, Creative Thinking Development, Grecia

Introducción

La industria textil es un sector industrial completamente desarrollado y tecnológicamente avanzado con una huella de CO₂ sustancial y una contribución a la contaminación del agua, principalmente debido a los procesos de teñido [1, 2]. Una amplia gama de agentes químicos están involucrados en los procesos industriales de fabricación de textiles para el apresto y desengomado, el blanqueo, el teñido, el acabado y el suavizado [3]. También se deben considerar los retardantes de llama y los tratamientos superficiales con nanomateriales de ingeniería [1]. La toxicidad de la mayoría de estos productos químicos empleados en los procesos de producción de tejidos tradicionales está bien documentada y los límites de exposición se han determinado mediante estudios sistemáticos durante las últimas décadas [1, 3].

Además de los tipos convencionales de telas y los peligros correspondientes, el uso cada vez mayor de nanomateriales, productos químicos para baterías, metales pesados integrados con telas en textiles inteligentes ha planteado preocupaciones adicionales sobre los riesgos potenciales para la salud relacionados con su uso y mantenimiento, así como su final. tratamiento de por vida. Algunos estudios recientes destacan el impacto ambiental de los nanomateriales y describen los procedimientos necesarios [4-6]. Los aspectos de toxicidad relacionados con el ciclo de vida de los textiles inteligentes tienen un gran impacto en la salud y la seguridad de las personas, el medio ambiente y la eficiencia de los procedimientos de gestión de residuos y reciclaje existentes [2, 6]. Existe un profundo conflicto entre las funcionalidades ilimitadas y la sostenibilidad general de los productos textiles inteligentes [2,6,7].

Los siguientes párrafos brindan una descripción general del conocimiento fundamental sobre la toxicidad potencial de los textiles inteligentes con el objetivo de informar a los centros de innovación e investigadores de este campo, inversores, pymes y fabricantes industriales, usuarios finales y responsables políticos.

21.2 Peligros para la salud humana relacionados con los textiles inteligentes

Según Rovira et al. [1] las categorías de productos químicos de toxicidad testificada, ampliamente utilizados en la industria textil, incluyen:

(a) Aminas aromáticas, utilizadas principalmente para la producción de colorantes azoicos. Muchos de estos compuestos se caracterizan como alérgenos y, lo que es más importante, como compuestos cancerígenos y genotóxicos.

(b) Metales tóxicos como Co, Pb, Cr, Cu, Ni, Cd, Hg, AS, Zn (ingredientes de complejos organometálicos o pigmentos inorgánicos en tintes), catalizadores tóxicos como Sb₂O₃,



nanopartículas metálicas y de óxido añadidas en textiles para obtener propiedades a medida.

(c) Los ftalatos, que se encuentran con frecuencia en forma de impresiones de PVC, que se clasifican como posibles disruptores endocrinos.

(d) Resinas a base de formaldehído, utilizadas en acabados textiles, que son irritantes para la piel y carcinógenos potenciales en casos de altos niveles de formaldehído liberado.

e) Aditivos de éteres de difenilo polibromados (PBDE) y hexabromocyclodecano (HBCD), empleados como retardadores de llama. Estos productos químicos, aunque no se han estudiado de forma exhaustiva en términos de mecanismos particulares de intoxicación, se acumulan en los tejidos humanos y también se han detectado como contaminantes domésticos y de los principales ecosistemas.

Los nanomateriales de ingeniería ingresan al cuerpo humano, principalmente por inhalación, absorción cutánea e ingestión, siendo las dos primeras las vías más frecuentes [3, 4].

En el caso de los textiles y prendas de vestir funcionalizados, los tipos más comunes de nanopartículas, nanofibras y nanorrevestimientos empleados para ofrecer una amplia gama de propiedades, como conductividad eléctrica, autolimpieza y rendimiento antibacteriano, resistencia mecánica mejorada y resistencia a la abrasión, bloqueo de rayos UV, llama retardante, repelencia al agua y muchos más - son partículas metálicas (Ag, Cu, Au), diversas partículas a base de carbono (CNT, negro de humo), nanoarcillas y óxidos inorgánicos (TiO₂, Al₂O₃, ZnO), óxido de grafeno [2- 4, 9, 8, 9]. Algunos nanodispositivos integrados típicos y fibras flexibles que se utilizan como baterías son las celdas galvánicas de Al-NaOCl y (LiFePO₄/ Li₄Ti₅O₁₀/ óxido de polietileno sólido/ PVDF), respectivamente. Las capas de polímeros y copolímeros, las fibras de banda prohibida fotónica de polímeros, las películas metálicas depositadas por pulverización catódica y los hilos conductores de múltiples componentes con función de supercondensador también son componentes nanodimensionales típicos de los textiles inteligentes [2]. Todos los productos químicos y materiales mencionados anteriormente están relacionados con diversos peligros de toxicidad. La figura 21.1 muestra la penetración de los nanotubos de carbono en una célula pulmonar.

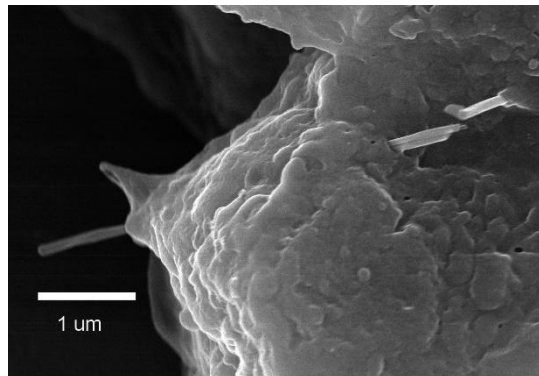


Figure 21.1 Imagen de microscopio electrónico de barrido que muestra nanotubos de carbono (CNT) que penetran en una célula pulmonar (Fuente: Robert R. Mercer, Ann F. Hubbs, James F. Scabillon, Liying Wang, Lori A. Battelli, Diane Schwegler-Berry, Vincent Castranova y Dale W. Porter/NIOSH; CCO Dominio público).

Los riesgos para la salud y la seguridad están ligados a todas las etapas del ciclo de vida de los productos: la producción de materias primas, la integración de nanomateriales y productos electrónicos con tejidos durante la fabricación, la fase de uso y el tratamiento y eliminación de residuos al final de su vida útil. Los trabajadores de la industria textil enfrentan el mayor riesgo de exposición durante la fase de producción [3, 4]. Los métodos más comunes para la integración de componentes textiles inteligentes son: (i) tejido, tricotado, laminación o cosido de hilos conductores sobre textiles, (ii) tejido y tricotado para la producción de textiles bidimensionales y tridimensionales, (iii) incorporación de la electrónica en el sustrato de tela mediante la creación de contactos eléctricos [10].

La liberación de componentes potencialmente tóxicos de los productos textiles inteligentes finales puede generarse por abrasión, sudor, fluctuaciones de temperatura, efectos de irradiación, tratamientos de lavado durante el uso [9]. La absorción por la piel se considera el principal problema de salud para los usuarios finales de textiles inteligentes, pero estos efectos no están bien estudiados [4]. Muchos estudios reportan posibles mecanismos de adsorción y acumulación de nanopartículas, nanoagregados y nanoaglomerados en órganos humanos [4]. Las partículas de tamaño inferior a 100 nm penetran en las membranas celulares y crean diversos trastornos, que incluyen estrés oxidativo, inflamación, apoptosis, disfunción mitocondrial y lisosomal y genotoxicidad [15]. Los peligros específicos dependen de las propiedades fisicoquímicas de las partículas (tamaño, composición química, energía superficial, carga, etc.) [4, 6] y las dos consecuencias principales son los efectos tóxicos y los daños en el ADN responsables de enfermedades neurológicas y cáncer [4]. Periyasamy en su extensa revisión sobre las consecuencias de la liberación de microfibras textiles, incluye estudios que han detectado microfibras en muestras de placenta humana [3]. El mismo autor enumera todos los metales pesados añadidos a los tejidos poliméricos, su funcionalidad y los riesgos para la salud relacionados con los seres humanos, que van desde alergias hasta diversos tipos de cáncer y fallos



orgánicos. En la Figura 21.2 se resumen los problemas de salud y enfermedades más comunes causados por la exposición humana intensa o prolongada a los nanomateriales.

DISEASES ASSOCIATED TO NANOPARTICLE EXPOSURE

C. Buzea, I. Pacheco, & K. Robbie, Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity, Biointerphases 2 (2007) MR17-MR71

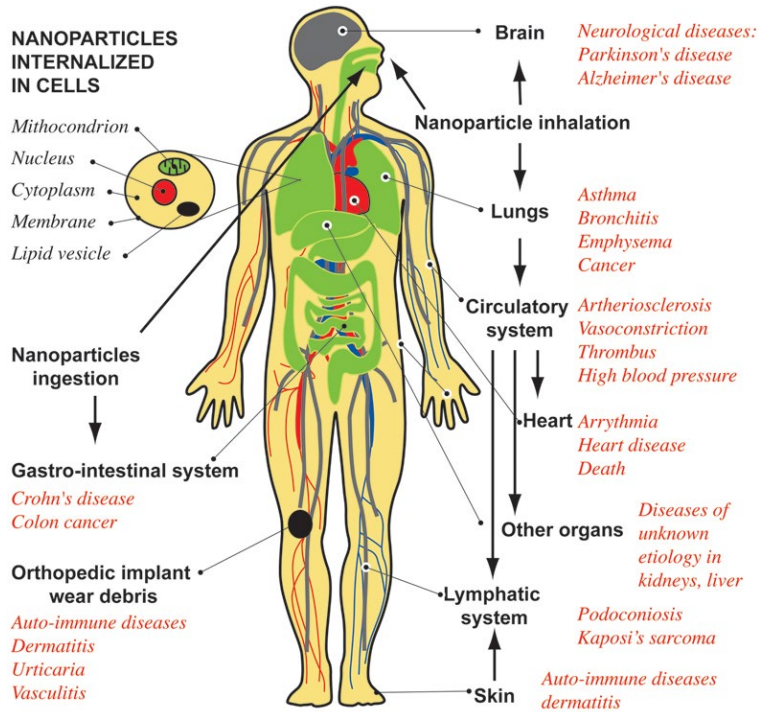


Figure 21.2 Enfermedades y condiciones de salud relacionadas con la exposición y acumulación de nanopartículas en el cuerpo humano (Fuente: Cristina Buzea; CCO Public Domain).

Almeida et al. Informar sobre las normas EN ISO que se han desarrollado o adaptado para la evaluación de los efectos del contacto de la piel con nanomateriales típicos contenidos en los textiles. La mayoría de estos métodos de prueba están diseñados como pruebas de inmersión en soluciones de transpiración artificial [9]. La electrónica integrada en los textiles inteligentes requiere un enfoque diferente.

21.3 Impactos ambientales de los elementos tóxicos de los textiles inteligentes

Los riesgos ambientales y los impactos de ecotoxicidad de la emisión de agentes tóxicos durante los procesos de lavado y la eliminación al final de su vida útil de los textiles inteligentes comprenden un campo separado que requiere monitoreo y control, de modo que la futura producción en masa de textiles, prendas de vestir y prendas de vestir de múltiples componentes no resulten en una contaminación generalizada, como en el caso de los microplásticos [5, 7].

Quizás, los datos publicados con mayor frecuencia son los resultados de pruebas de lavado de textiles con propiedades antiolor y/o antimicrobianas. Varios estudios [2,4] han informado sobre una extensa lixiviación de nanopartículas de plata, un riesgo que probablemente se subestimó durante el diseño de estos productos. Hasta el momento, solo hay un procedimiento estándar disponible para el lavado de acuerdo con la norma ISO 6330 y no hay pautas específicas para un reciclaje adecuado o regulaciones internacionales que minimicen el impacto ambiental [10]. Las prácticas apropiadas de reciclaje es un tema adicional que debe abordarse. La efectividad del reciclaje textil tradicional (alcanzando el 100%), no es aplicable a los residuos textiles inteligentes [6, 8]. Dolez et al. en su trabajo de revisión [11], mencionan algunas mejoras en la reciclabilidad de categorías particulares de fibras utilizadas para la fabricación de equipos de protección personal, como fibras elastoméricas altamente extensibles, fibras a base de celulosa y fibras sintéticas comerciales. También se han informado algunos resultados positivos con respecto a la reciclabilidad parcial de los componentes metálicos (después de la recuperación metalúrgica o la separación mecánica de los materiales poliméricos) en el caso de los textiles electrónicos conductores [6]. Sin embargo, esta no es una tendencia general y no existen prácticas sistemáticas disponibles a través de las cuales sea posible la desintegración/desprendimiento y separación de tejidos de sustrato de nanopartículas, componentes electrónicos u otros componentes.

Como señaló Köhler [7], los textiles inteligentes con componentes electrónicos y sensores al final de su vida útil deben recolectarse y tratarse como dispositivos electrónicos. Hasta el momento, no existe una legislación y normativa específica para el diseño ecológico y la gestión de residuos de los wearables [5]. La contaminación sistemática de los sistemas de reciclaje de residuos sólidos, los vertederos y los sitios de incineración, el tratamiento de aguas residuales con nanopartículas y otros agentes tóxicos y químicos conduciría inevitablemente a la contaminación del ecosistema a través del agua, el suelo y el aire [3, 7].

21.4 Métodos de evaluación de toxicidad y ecotoxicidad - Regulación y políticas necesarias

Los estudios centrados en la toxicidad de los nanomateriales para los seres humanos son bastante limitados y se basan principalmente en la extrapolación de modelos de exposición animal a los seres humanos. Para lograrlo, los investigadores han empleado varias especies de animales y microorganismos para experimentos in vivo, con el fin de evaluar el efecto de varios tipos de nanopartículas. Sin embargo, no se dispone de protocolos sistemáticos que correlacionen las propiedades fisicoquímicas de estos materiales y los mecanismos de intoxicación y, por lo tanto, los resultados experimentales a menudo no son concluyentes [4]. Según el artículo de revisión de Saleem et al. [4], la última tendencia de investigación de estudios toxicológicos es principalmente el uso de técnicas in vitro, empleando líneas de células epiteliales o, alternativamente, cultivos 3D. La evaluación de este tipo de experimentos podría proporcionar información sobre posibles daños en el ADN (destrucción u oxidación), mutaciones en genes y destrucción de cromosomas [4]. En

cualquier caso, la selección del método de prueba adecuado depende de las propiedades únicas de los nanomateriales y del factor toxicocinético del sistema biológico examinado [12].

El impacto ambiental se aborda principalmente mediante metodologías de evaluación de riesgos (evaluaciones del ciclo de vida diseñadas para predecir la carga tóxica resultante de los procesos de lavado o eliminación de desechos), combinadas con estudios de casos de ecotoxicidad al final de la vida útil [3-7]. Esta última categoría involucra análisis de acumulación de contaminantes tóxicos en fuentes acuáticas, sedimentos, plantas, bacterias del suelo y otros organismos vivos [4]. Por ejemplo, varios estudios han detectado microfibras liberadas de textiles funcionalizados en muestras de vegetales, frutas y pescado [3].

Evaluar la toxicidad y la ecotoxicidad de los textiles inteligentes y abordar los problemas de lavabilidad y reciclabilidad son desafíos directamente relacionados con la sostenibilidad general de estos productos innovadores [2, 4, 7, 10]. Encuestas dirigidas realizadas en 2011 por dos expertos, que entrevistaron a investigadores y gerentes de varios institutos de investigación europeos y PYME involucradas con tecnologías de textiles inteligentes, revelaron ignorancia sobre los efectos secundarios resultantes de la eliminación de desechos al final de su vida útil, falta de evaluaciones adecuadas del ciclo de vida y limitado adaptación de las estrategias de prevención de residuos de acuerdo con las políticas de la UE [7].

Schischke et al [5] en un estudio publicado en 2020, mencionan fuentes bibliográficas muy escasas con datos de análisis del ciclo de vida sobre dispositivos electrónicos portátiles y textiles inteligentes. Si bien se esperan avances significativos en la última década, se puede deducir que el diseño de normas y reglamentos internacionales específicos para la ingeniería de seguridad y medio ambiente está muy por detrás del avance tecnológico en investigación aplicada e innovación, diseño y fabricación de productos y producción a escala industrial [5, 7, 10].

La serie de normas ISO publicadas sobre nanotecnología [13] y las que están en desarrollo [14] son pasos positivos hacia una terminología concisa, caracterización de materiales, análisis de riesgos, pruebas de toxicidad y varios otros campos. Algunas pautas para la estandarización futura de productos textiles inteligentes se han incluido en ISO/TR 23383:2020(en) [15].

Los expertos en el campo destacan la responsabilidad de los inversores y productores de cumplir con las normas de salud y seguridad existentes y las normas ambientales, realizar análisis de evaluación de riesgos en todas las etapas del ciclo de vida de los productos textiles inteligentes y proporcionar información clara a los consumidores sobre el uso seguro y eliminación adecuada de los productos desechados [2, 5]. Glisovic et al. [6] informan metodologías genéricas para el análisis del ciclo de vida de los nanomateriales de ingeniería que son aplicables a la industria de textiles inteligentes y dispositivos portátiles.

Un enfoque interdisciplinario con la sinergia de expertos de varios campos -ingeniería, química, ciencia textil y de materiales, diseño de prendas, medicina, toxicología, seguridad, ciencias ambientales- se considera un requisito previo, no solo para el diseño de textiles inteligentes sino también para el establecimiento de los sistemas, reglamentos y políticas internacionales de salud y seguridad y control ambiental y la gestión sostenible de los desechos al final de su vida útil [6, 9, 11].

Resumen

Los productos químicos tóxicos más comunes que se encuentran en los textiles inteligentes y los dispositivos portátiles, así como en los sustratos de telas tradicionales, se presentan junto con los peligros para la salud y las enfermedades reportadas para los humanos en varias fases del ciclo de vida de los productos. Se discuten brevemente los impactos ambientales y la ecotoxicidad relacionada con el final de la vida. El capítulo ofrece una descripción general de las metodologías de evaluación de toxicidad y las regulaciones y políticas existentes, señalando los aspectos débiles relacionados con la sostenibilidad de los productos textiles inteligentes que deben abordarse en el futuro cercano.

Referencias

1. J. Rovira, J. L. Domingo (2019), Human health risks due to exposure to inorganic and organic chemicals from textiles: A review, *Environmental Research*, 168, pp.62-69, doi:10.1016/j.envres.2018.09.027
2. M. A. Shah, B. M. Pirzada, G. Price, A. L. Shibiru, A. Qurashi (2022), Applications of nanotechnology in smart textile industry: A critical review, *Journal of Advanced Research*, 38, pp. 55-75, doi: 10.1016/j.jare.2022.01.008
3. P. Periyasamy (2023), Microfiber emissions from functionalized textiles: Potential threat for human health and environmental risks, *Toxics*, 11, 406, doi: 10.3390/toxics11050406.
4. H. Saleem, S. J. Zaidi (2020), Sustainable use of nanomaterials in textiles and their environmental impact, *Materials*, 13, 5134, doi:10.3390/ma13225134
5. K. Schischke, N. F. Nilsen, M. Schneider-Ramelow (2023), *MRS Communications*, 10(1), pp.69-82, doi: 10.1557/mrc.2019.157.
6. S. Glisovic, D. Pesic, E. Stojiljovic, T. Golubovic, D. Krstic, M. Prascevic, Z. Jankovic (2017), Emerging technologies and safety concerns: a condensed review of environmental life cycle risks in the nano-world, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, pp.2301-2320, doi:10.1007/s13762-017-1367-2
7. A. R. Köhler, C. Som (2014), Risk preventive innovation strategies for emerging technologies the case of nano-textiles and smart textiles, *Technovation*, 34, pp. 420-430,
8. B.S. Hassan, G. M.N. Islam, A. N. M. A. Haque (2019), Applications of Nanotechnology in Textiles: A review, *Advance Research in Textile Engineering*, 4(2), 1038, ISSN: 2572-9373
9. L. Almeida, D. Ramos (2017), Health and safety concerns of textiles with nanomaterials, 17th World Textile Conference Autex 2017- Textiles - Shaping the Future, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 254, 102002, doi:10.1088/1757-899X/254/10/102002.
10. H. L. O. Junior, R. M. Neves, F. M. Monticelli, L. Dall Agnol (2022), Smart fabric textiles: Recent advances and challenges, *Textiles*, 2, pp.582-605, doi:10.3390/textiles2040034.

11. P. I. Dolez, S. Marsha, R. H. McQueen (2022), Fibers and Textiles for personal protective equipment: Review of recent progress and perspectives on future developments, *Textiles*, 2, pp.349-381, doi:10.3390/textiles2020020.
12. https://www.oecd.org/env/ehs/testing/Draft_GD_nano_and_genotox_rev2.pdf
13. <https://www.iso.org/committee/381983/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>
14. <https://www.iso.org/committee/381983/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>
15. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:23383:ed-1:v1:en>