



Junio 2022



Programa de Doctorado en Ingeniería Textil

Dispositivos electrónicos impresos sobre sustratos textiles mediante la técnica de flexografía

Tesis Doctoral

Presentada por
Ana María Rodes Carbonell

Directores
Eva Bou Belda
Eduardo García Breijo

A mis padres y a mi hermano

Agradecimientos

Gracias a mis tutores Eva y Eduardo por su paciencia, por su ayuda y por su buen humor durante el desarrollo de esta tesis doctoral. Gracias Eva por haber estado ahí todo el tiempo, con ampliación de familia incluida. Gracias Eduardo por tus recordatorios por WhatsApp que, de verdad, son los que me han empujado a seguir adelante. Llevar a cabo esta investigación con el paso de la pandemia COVID-19 y un cambio de trabajo de por medio, para mí no ha sido tarea fácil, pero con vosotros ha sido posible. Muchas gracias de todo corazón, ha sido un verdadero placer.

Aprovecho para dar las gracias a AITEX por haber fomentado el inicio de esta tesis. En particular, al equipo de Textiles Inteligentes, que lideran los proyectos más innovadores del centro, potenciando la digitalización del sector. Gracias a Jorge y a Josué por haberme incluido en este proyecto de impresión electrónica y por vuestro apoyo, durante y después, de mis años en AITEX.

Quiero agradecer también a Nacho el soporte recibido desde el Departamento de Ingeniería Textil del Campus de Alcoy de la Universitat Politècnica de València.

Un agradecimiento especial a mis padres y a mi hermano, por ser mi fuente de inspiración y de fuerza, en todas las etapas de mi vida. A Rubén por apoyarme en cualquier aventura que se me ocurre emprender.

Resumen

La integración de electrónica en los tejidos para obtener nuevas funcionalidades es una de las apuestas de futuro de la industria textil y de la moda. Al estar compuestos parcialmente por tejido, los textiles electrónicos proporcionan a los usuarios un mayor confort, durabilidad y ligereza que otros dispositivos, manteniendo al mismo tiempo las propiedades electrónicas. No obstante, conseguir estas nuevas funcionalidades, a un coste asequible y asegurando la flexibilidad y ligereza propias de los tejidos, sigue siendo un reto para el sector.

El área de la electrónica impresa ha permitido el desarrollo de una electrónica flexible combinando métodos de impresión tradicionales con el uso de tintas electrónicas. La técnica de impresión flexográfica destaca entre las demás por ofrecer altas velocidades de fabricación, calidad y alta productividad a bajo coste. En el ámbito textil, sin embargo, su incorporación es todavía muy reciente y no hay suficientes estudios para su aplicación.

En este contexto, esta tesis doctoral tiene como objetivo fundamental estudiar la novedosa aplicación de la técnica de la flexografía sobre materiales textiles. Para ello, se ha tomado como base los actuales conocimientos de la autora en el área de la electrónica impresa textil empleando la tecnología serigráfica.

Con este fin, durante el desarrollo de la tesis se realiza, en primer lugar, el estudio de los parámetros necesarios para la aplicación de dicha tecnología en diferentes sustratos. Del estudio se obtienen diferentes valores adecuados para la impresión mediante flexografía según si el sustrato se trata de un tejido, un no-tejido, un sustrato polimérico o un papel siliconado.

En segundo lugar, se definen los protocolos que permiten la integración de tintas con características eléctricas en las telas empleando la tecnología flexográfica. Por un lado, se estudia el impacto de los parámetros estructurales de un tejido de calada en la conductividad de la tinta impresa y, por otro lado, la influencia del material de la trama en la conductividad de elementos conductores-resistivos. Para ello, se realiza una impresión controlada sobre tejidos de calada utilizando la misma tinta conductora de plata y se analizan las propiedades físicas y eléctricas de las muestras resultantes. Se concluye que, cuanto mayor sea la densidad del textil, menor es la conductividad final de la impresión, y que el algodón es el material menos recomendable para la impresión electrónica mediante la técnica de la flexografía.

Finalmente, se trabaja en el objetivo de desarrollar un sistema de medición de temperatura continuo mediante impresión electrónica sobre sustratos flexibles y elásticos mediante serigrafía para su traslación a flexografía. Se consigue desarrollar con éxito un sistema robusto, de bajo consumo y confortable para los pacientes que permite la adquisición de los datos de temperatura de forma continua.

La memoria de esta tesis se presenta "por compendio de artículos" siguiendo los requisitos marcados por la Universitat Politècnica de València y la Escuela de Doctorado.

Teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos y las contribuciones realizadas, se espera que esta investigación pueda servir como base y soporte para la impresión de dispositivos electrónicos sobre tejidos mediante el uso de la técnica de flexografía.

Resum

La integració d'electrònica en els teixits per a obtenir noves funcionalitats és una de les apostes de futur de la indústria tèxtil i de la moda. A l'estar compostos parcialment per teixit, els tèxtils electrònics proporcionen als usuaris un major confort, durabilitat i lleugeresa que altres dispositius, mentre mantenen les mateixes propietats electròniques. No obstant això, aconseguir aquestes noves funcionalitats, a un cost assequible i mantenint la flexibilitat i lleugeresa pròpies dels teixits, continua sent un repte per al sector.

L'àrea de l'electrònica impresa ha permès el desenvolupament d'una electrònica flexible combinant mètodes d'impressió tradicionals amb l'ús de tintes electròniques. La tècnica d'impressió flexogràfica destaca entre les altres per oferir altes velocitats de fabricació, qualitat i alta productivitat a baix cost. En l'àmbit tèxtil, no obstant això, la seua incorporació és encara molt recent i no hi ha suficients estudis per a la seua aplicació.

En este context, esta tesi doctoral té com a objectiu fonamental estudiar la nova aplicació de la tècnica de la flexografia sobre materials tèxtils. Per a això, s'ha pres com a base els actuals coneixements de l'autora en l'àrea de l'electrònica impresa tèxtil emprant la tecnologia serigràfica.

Amb este fi, durant el desenrotllament de la tesi es realitza, en primer lloc, l'estudi dels paràmetres necessaris per a l'aplicació de la dita tecnologia en diferents substrats. De l'estudi s'obtenen diferents valors adequats per a la impressió per mitjà de flexografia segons si el substrat es tracta d'un teixit, un no-teixit, un substrat polimèric o un paper siliconat.

En segon lloc, es defineixen els protocols que permeten la integració de tintes amb característiques elèctriques en les te les emprant la tecnologia flexogràfica. D'una banda, s'estudia l'impacte dels paràmetres estructurals d'un teixit de calada en la conductivitat de la tinta impresa i, d'altra banda, la influència del material de la trama en la conductivitat d'elements conductors-resistius. Per a això, es realitza una impressió controlada sobre teixits de calada utilitzant la mateixa tinta conductora de plata i s'analitzen les propietats físiques i elèctriques de les mostres resultants. Es conclou que, quant major siga la densitat del tèxtil, menor és la conductivitat final de la impressió, i que el cotó és el material menys recomanable per a la impressió electrònica per mitjà de la tècnica de la flexografia.

Finalment, es treballa en l'objectiu de desenrotllar un sistema de mesurament de temperatura continu per mitjà d'impressió electrònica sobre substrats flexibles i elàstics per mitjà de serigrafia per a la seua translació a flexografia. S'aconsegueix desenrotllar amb èxit un sistema robust, de baix consum i confortable per als pacients que permet l'adquisició de les dades de temperatura de forma contínua.

La memòria d'esta tesi es presenta “per compendi d’articles”; seguint els requisits marcats per la Universitat Politècnica de València i l'Escola de Doctorat.

Tenint en compte tots els resultats obtinguts i les contribucions realitzades, s'espera que esta investigació pugua servir com a base i suport per a la impressió de dispositius electrònics sobre teixits per mitjà de l'ús de la tècnica de flexografia.

Abstract

Electronics' integration into textiles to obtain new functionalities is one of the bets for the future of the textile and fashion industry. Electronic textiles provide users greater comfort, durability, and lightness than other devices as they are partially made of fabric, while maintaining the same electronic properties. However, achieving these new functionalities, maintaining the flexibility and flexibility typical of the fabrics with at affordable cost, continues to be a challenge for the sector.

The area of printed electronics has allowed the development of flexible electronics by combining traditional printing methods with the use of electronic inks. The flexographic printing technique stands out among the others for offering high manufacturing speeds, quality, and high productivity at low cost. In the textile field, however, its incorporation is still very recent and there are not enough studies for its application.

In this context, this doctoral thesis fundamental objective is to study the novel application of the flexography technique on textile materials. For this, the current knowledge of the author about printed textile electronics using serigraphic technology has been taken as a basis.

To this end, for the development of the thesis, in the first place the study of the necessary parameters for the application of this technology in different substrates has been carried out. Different suitable values for flexographic printing have been obtained from the study regarding whether the substrate is a fabric, a non-woven, a polymeric substrate or a silicone-coated paper.

Secondly, the protocols that allow the integration of electrical inks with fabrics using flexographic technology have been defined. On the one hand, the impact of the structural parameters of a woven fabric on the conductivity of the printed ink has been studied. On the other hand, also the influence of the weft material on the conductivity of conductive-resistive elements was also studied. To do this, a controlled impression has been made on woven fabrics using the same conductive silver ink. Then both physical and electrical properties of the resulting samples have been analysed. It has been concluded that the higher the density of the textile, the lower final conductivity of the print is. Also, it has been defined that cotton is the least recommended material for electronic printing when using the flexography technique.

Finally, towards the objective of developing a continuous temperature measurement system by electronic printing on flexible and elastic substrates, work has been carried out using screen printing for its translation into flexography. It has been possible to successfully develop a robust, low-consumption and comfortable system for patients that allows the continuous acquisition of temperature data.

The report of this thesis is presented "by compendium of articles" following the requirements set by the Universitat Politècnica de València and the Doctoral School.

Taking into account all the results obtained and the contributions made, it is expected that this research can serve as a basis and support for the printing of electronic devices on fabrics through the use of the flexography technique.

Índice

Resumen	6
Resum	8
Abstract.....	10
Índice.....	12
Lista de figuras	15
Lista de tablas	17
Capítulo 1. Introducción	19
1. Estado del arte	21
1.1. Electrónica Impresa.....	21
1.2. Tecnologías de Impresión en <i>printed electronics</i>	29
1.3. El Sector textil y la Innovación	42
1.4. Sustratos textiles	45
2. Motivación y alcance.....	52
3. Objetivos	54
4. Contexto	54
5. Estructura de la tesis	56
6. Publicaciones científicas	58
7. Contribuciones académicas	58
8. Divulgación científica	59
9. Referencias.....	63
Capítulo 2. Electrodo híbrido flexible para la medición continua de temperatura.....	82
1. Introduction	85
2. Materials and Methods.....	87
2.1. Sensor Design	87
2.2. Multisensors.....	88
2.1. Electronic System	91

2.2.	Manufacturing.....	91
2.3.	Measurements	94
3.	Results and Discussion	95
3.1.	Study of the Conductive Inks on Films	95
3.2.	Study of the Polyurethane Films on Fabrics	97
3.3.	Study of the Conductive Tracks' Resistance	97
3.4.	Study of NTC Soldering.....	98
3.1.	Field Testing	102
4.	Conclusions	104
5.	References.....	105
Capítulo 3. Estudio preliminar de la impresión electrónica mediante la tecnología de la flexografía sobre sustratos flexibles		108
1.	Introduction	111
2.	Materials and methods	112
2.1.	Materials	112
2.2.	Methods	112
3.	Results and discussion	113
3.1.	Ink uniformity.....	113
3.2.	Ink penetration.....	113
3.3.	Ink penetration.....	115
3.4.	Conductivity	115
3.5.	Colour fastness.....	116
4.	Conclusions	116
5.	References.....	117
Capítulo 4. Influencia de la estructura y la composición de tejidos de calada en la conductividad de impresiones electrónicas por flexografía.....		120
1.	Introduction	123
2.	Materials and Methods.....	125
	Materials	125
2.1.	Flexographic Electronic Printing.....	129
2.2.	Characterization	130
3.	Results and Discussion	131
3.1.	Electrical Characterization	131

3.2. Physical Characterization	133
4. Conclusions	139
5. References.....	140
Capítulo 5. Discusión y conclusiones	144
1. Discusión general de los resultados	145
1.1. Estudios del comportamiento de diferentes sustratos textiles.	146
1.2. Impacto de los parámetros estructurales del tejido en la conductividad.....	146
1.3. Impacto del material de trama de un tejido en la conductividad	147
1.4. Desarrollo de sistema de medición de temperatura continuo..	147
2. Acciones futuras.....	148
3. Conclusiones	149

Lista de figuras

Capítulo 1.

- Figura 1** Móvil con pantalla plegable
- Figura 2** Representación esquemática de técnicas de impresión electrónica
- Figura 3** Partes importantes del proceso de flexografía
- Figura 4** Plantas piloto de flexografía Roll to Roll
- Figura 5** Cifra de negocio del Sector Textil y Confección (2018)
- Figura 6** Empresas con actividades innovadoras (2019)
- Figura 7** Integración de electrónica en textil mediante tejeduría
- Figura 8** Representación tejido de calada
- Figura 9** Impresión electrónica mediante serigrafía
- Figura 10** Titular de prensa
- Figura 11** Logo proyecto HYBRID
- Figura 12** Esquema tesis doctoral
- Figura 13** Participación en concurso “Tu Tesis Doctoral”

Capítulo 2.

- Figura 1** Sensor system configuration
- Figura 2** Multisensor dimensions
- Figura 3** Pattern transferred to the printing screen.
- Figura 4** Pattern screen-printed with conductive silver ink on the polyurethane substrate.
- Figura 5** PDMS drop used to isolate the sensor from skin contact.
- Figura 6** Experimental setup used for applying axial force and acquiring data during the electrode characterization.
- Figura 7** Experimental setup used for applying the Z and X forces (and X force rotation) and acquiring data during the electrode characterization.
- Figura 8** (a) Printing of the conductive silver ink on polyurethane; (b) printing defects of a conductive line on PDMS.
- Figura 9** 3D profilometry of a section of the pattern printed
- Figura 10** Dimensions of the pattern used to determine the parameters of elongation of inks and base films.
- Figura 11** Percentage variation of the resistance value according to the percentage elongation for the 1.5 mm-wide pattern.
- Figura 12** (a) The 0805 solder reflow footprint, (b) the 0805 wave solder footprint and (c) the 0805 package (mm)
- Figura 13** Stencil printing of pastes/adhesives on solder reflow footprint.
- Figura 14** Stencil printing of pastes/adhesives on wave reflow footprint.
- Figura 15** Screen printing of the Inkron IPC-603X on wave reflow footprint.
- Figura 16** Solder view from the back of the polyurethane.

-
- Figura 17** Effect of shear force on the solder reflow footprint
Figura 18 Placement of the system along the leg
Figura 19 Placement of the system in the wound dressing.
Figura 20 Temperature data recorded over a 24 h period.

Capítulo 4.

- Figura 1** Significant parts of the flexography process.
Figura 2 Graphic representation of the electrical resistance of the printings measured on warp direction and measured on weft direction.
Figura 3 Graphic representation of the relation between electrical resistance of the printings measured on warp direction and the mass per unit area.
Figura 4 Two-dimensional CIELAB (L^* , a^* , b^*) coordinates representation.

Lista de tablas

Capítulo 1.

Tabla 1	Estructuras básicas de calada
Tabla 2	Propiedades de la fibra de Algodón
Tabla 3	Propiedades de la fibra de Poliéster

Capítulo 2.

Tabla 1	Characteristics of the prototype.
Tabla 2	Temperature sensor requirements
Tabla 3	Characteristics of the NTCS0805E3104SMT sensor
Tabla 4	Characteristics of the films.
Tabla 5	Characteristics of the silver inks
Tabla 6	Percentage of correct package soldered with stencil printing technique.
Tabla 7	Maximum force (N) applied on the axis.

Capítulo 3.

Tabla 1	Substrates characterization
Tabla 2	Printing process variables
Tabla 3	Optical images
Tabla 4	Kelvin (4-wire) resistance measurement
Tabla 5	Color fastness to was and rubbing results

Capítulo 4.

Tabla 1	Textile substrate's characterization (I): composition and ligament.
Tabla 2	Textile substrate's characterization (II): size and weight characteristics.
Tabla 3	PFI-RSA6012—Silver ink characteristics.
Tabla 4	Printing parameters.
Tabla 5	Electrical resistance of the printings. Measurements have been made both in warp and weft directions.
Tabla 6	Optical and FE-SEM characterization (I).
Tabla 7	Optical and FE-SEM characterization (II).
Tabla 8	Color fastness results (I).
Tabla 9	Color fastness results (II).
Tabla 10	CIELAB* coordinates ($D_{65}/10^\circ$).



Capítulo 1

Introducción

**Dispositivos electrónicos impresos sobre sustratos textiles
mediante la técnica de la flexografía** Tesis Doctoral

Capítulo 1. Introducción

La mítica escena de la película Regreso al Futuro II, en la que Marty McFly se pone unas zapatillas Nike que se ataban solas, verdaderamente predecía el futuro de las prendas inteligentes. En el año 2015, Nike hizo el anuncio de que iba a lanzar unas zapatillas que se ajustarían al pie electrónicamente.

Figura 1 Escena película Regreso al Futuro II



Fuente: [1]

La realidad, sin embargo, es que salieron al mercado un año después a un precio de \$720, no alcanzable por todos los compradores [2].

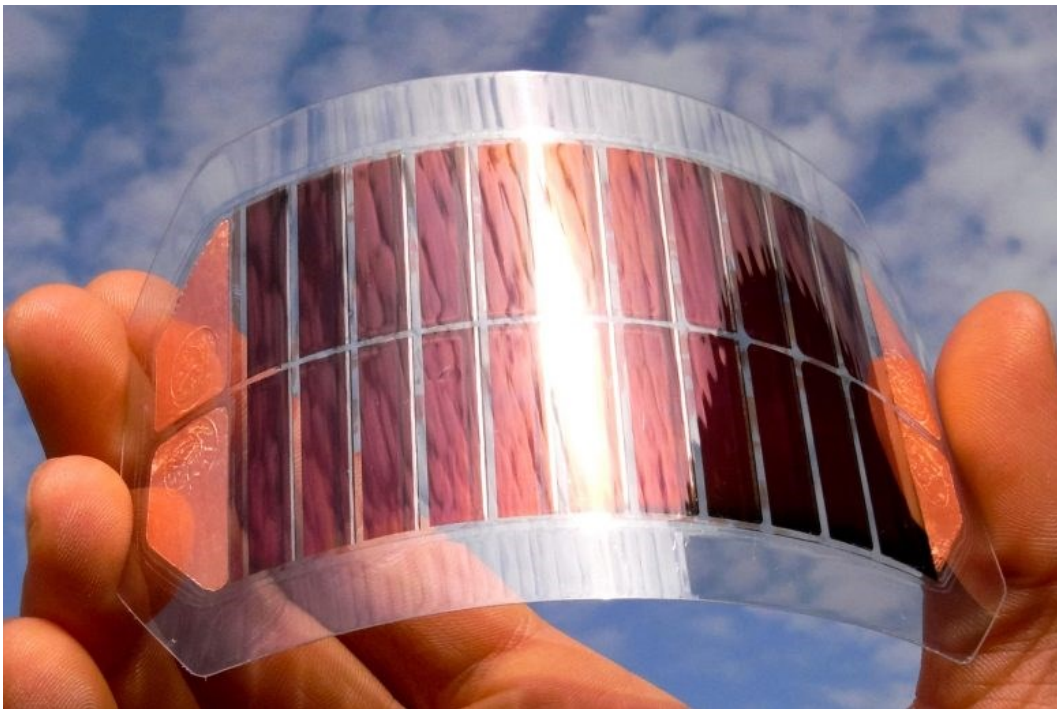
Los “textiles electrónicos” o “e-textiles” son una de las apuestas de futuro de la industria textil y de la moda, considerada como uno de los pilares económicos y sociales de España [3]. No obstante, conseguir estas nuevas funcionalidades, a un coste asequible, sigue siendo un reto para el sector.

Tras el duro golpe del efecto de la crisis de la pandemia COVID-19, con tiendas y empresas cerradas, es cierto que la industria debe reinventarse y ofrecer a los clientes nuevas funcionalidades y experiencias. Junto con la sostenibilidad y el uso de materiales con nuevas propiedades, la fabricación de productos conectados e inteligentes puede ser el cambio de paradigma necesario para un sector que siempre ha sido considerado como tradicional.

Uno de los principales retos a los que se enfrenta la integración de la electrónica en los materiales textiles es la dificultad de encontrar métodos y tecnologías que además de lograr la funcionalidad electrónica deseada, mantengan las propiedades de flexibilidad, ligereza y resistencia [4] que caracterizan a los tejidos.

En este sentido, en el campo de la electrónica flexible destaca la electrónica impresa. Una unión de la electrónica con los métodos de impresión tradicionales que permite la fabricación de dispositivos electrónicos flexibles, como pantallas OLED [5]–[10] o células fotovoltaicas [11]–[16] que se pueden doblar (Figura 2).

Figura 2 Célula orgánica flexible



Fuente: [17]

Dentro de la electrónica impresa, existen diferentes técnicas de impresión con características y requerimientos distintos. En concreto, en esta tesis doctoral se ha empleado la flexografía por ofrecer altas velocidades de fabricación, calidad y alta productividad a bajo coste. A pesar de sus ventajas, su incorporación en el campo de la impresión electrónica es todavía muy reciente y no se han encontrado estudios sobre su uso sobre sustratos textiles como se detalla, a continuación, en el estado del arte.

Por ello, esta tesis está enfocada en trasladar los actuales conocimientos de la autora de otras técnicas de impresión electrónica sobre textil a la novedosa aplicación de la tecnología flexográfica.

A continuación, se incluye un estado del arte, para contextualizar al lector, en el que se identifica el estado de la técnica en las diferentes áreas de investigación

que engloba esta tesis doctoral. Así se pretende identificar el punto de partida de la investigación, ofreciendo una mayor comprensión del problema tratado.

En primer lugar, se contextualiza la electrónica impresa como método de fabricación de textiles inteligentes, incluyendo las definiciones, las diferentes tecnologías y las clasificaciones disponibles. Se particulariza la flexografía como la técnica de impresión electrónica empleada en los desarrollos de la tesis, estableciendo comparaciones con otras tecnologías y demostrando sus ventajas. Se estudian y analizan las investigaciones realizadas en el campo de la flexografía para la fabricación de dispositivos flexibles sobre sustratos distintos al textil. Además, por un lado, se explican las partes mecánicas del equipo y los parámetros de proceso y, por otra parte, se destaca la importancia de la selección de la tinta y del sustrato entre la multitud de opciones accesibles en el mercado. Todo ello a través del análisis de las investigaciones y publicaciones relacionadas.

A continuación, se enmarca la importancia de la integración electrónica dentro de la innovación en la industria textil mediante un estudio sectorial. Como base para comprender los resultados obtenidos en el desarrollo de la tesis, se investigan en profundidad las diferentes características estructurales de los textiles, así como la importancia de las propiedades físicas y químicas de los materiales que componen los tejidos. Se resumen los mayores logros de impresión electrónica sobre textil mediante otras técnicas distintas a la flexografía publicados en artículos de investigación y se destacan las mayores barreras a superar, entre las que destaca la porosidad de los tejidos. Por último, a pesar la ventaja económica y productiva que supone el uso de la flexografía, se destaca la falta de estudios para su aplicación sobre textil ya que su incorporación en el campo de la impresión electrónica es todavía muy reciente.

1. Estado del arte

1.1. Electrónica Impresa

La electrónica impresa, también denominada en inglés como *printed electronics*, hace referencia a la tecnología que permite la fabricación de sistemas o dispositivos electrónicos a través de un proceso de impresión. A diferencia de la electrónica tradicional basada en silicio, la electrónica impresa permite reducir de una forma sustancial los costes de fabricación gracias a los elevados volúmenes de fabricación. Aunque todavía está lejos de alcanzar los niveles de integración de la electrónica de silicio, es una de las tecnologías con mayor crecimiento ya que ofrece la posibilidad de fabricar a bajo coste grandes áreas de dispositivos electrónicos flexibles [18].

Las técnicas de impresión empleadas en la electrónica impresa, para obtener los dispositivos electrónicos, proceden del sector de artes gráficas. Las más

habituales son la serigrafía, el huecograbado, la flexografía, el *offset* o litografía y la inyección de tinta o *inkjet*.

En cuanto a la su historia, no se conoce la fecha concreta origen del concepto de “electrónica impresa”, pero se puede decir que fue aproximadamente en el 2011. Ese año, investigadores del MIT, crearon una célula solar flexible impresa con *inkjet* sobre papel [19].

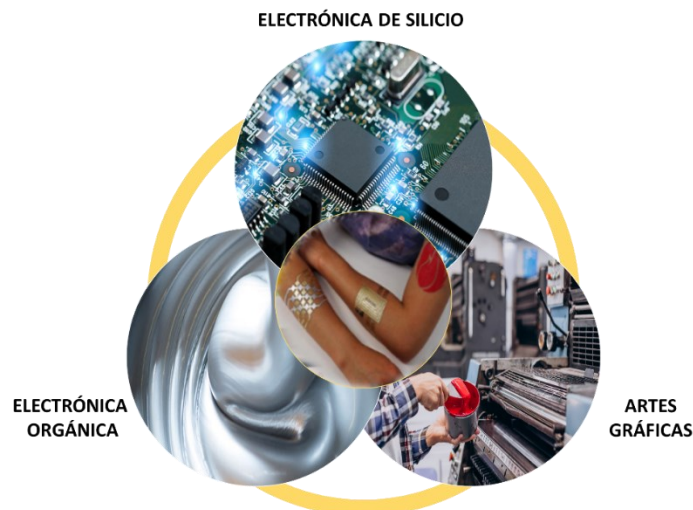
De hecho, se debería distinguir entre el concepto de “electrónica impresa” de la “electrónica impresa flexible”. Mientras que la “electrónica impresa” se enmarca en el área de la impresión funcional al otorgarle un carácter electrónico a la impresión, la “electrónica impresa flexible” es una parte delimitada dentro de la electrónica impresa donde los sustratos son flexibles.

Es cierto que el desarrollo de polímeros conductores orgánicos durante los años 70 tuvo un papel fundamental en el impulso del nacimiento de la electrónica impresa. Tres científicos, el norteamericano *Hegger*, el neozelandés *McMardid* y el japonés *Shirakawa* obtuvieron por ello el premio Nobel en el año 2000 [20]. Este hito supuso además la creación la llamada “electrónica orgánica”, también conocida en inglés como *organic electronics*.

De esta forma, la electrónica impresa surge como una combinación de la electrónica orgánica junto con las tecnologías de fabricación de las artes gráficas y la electrónica de silicio (Figura 3).

Figura 3

Electrónica Impresa: sinergia entre la Electrónica Orgánica, Tecnologías de Artes Gráficas y Electrónica de Silicio



Fuente: Propia

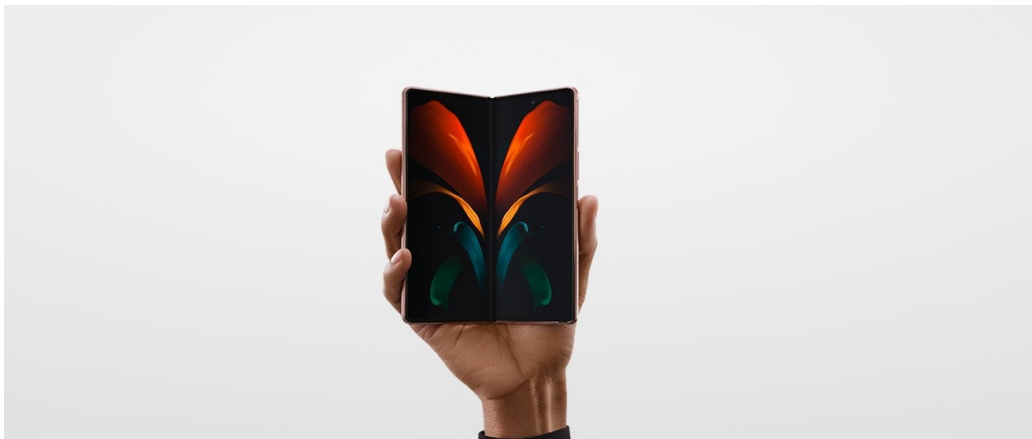
Durante los últimos años, la tecnología de electrónica flexible ha atraído considerablemente la atención de la comunidad científica empleándose para la

fabricación de dispositivos en múltiples áreas y sectores como el aeroespacial, la automoción, la biomedicina, la robótica o el sector de la salud, entre otros [21].

Algunos ejemplos de dispositivos fabricados con electrónica impresa son tarjetas inteligentes [22], *displays* flexibles [23]–[27], textiles inteligentes [28]–[33], células fotovoltaicas [11]–[16], etiquetas RFID [34]–[38], pantallas *OLED* [5]–[10] (Figura 4), memorias [39]–[41], sensores [42]–[48], baterías [49]–[53], supercondensadores [54]–[59], envases inteligentes [60]–[65], etc.

Sin embargo, una de las aplicaciones más significativas de esta tecnología es en los dispositivos *wearables*. Los *wearables* son dispositivos electrónicos que se utilizan en el cuerpo humano y que interactúan con otros aparatos para transmitir o recoger algún tipo de datos, como los relojes inteligentes con sensores integrados [67].

Figura 4 Móvil con pantalla OLED plegable



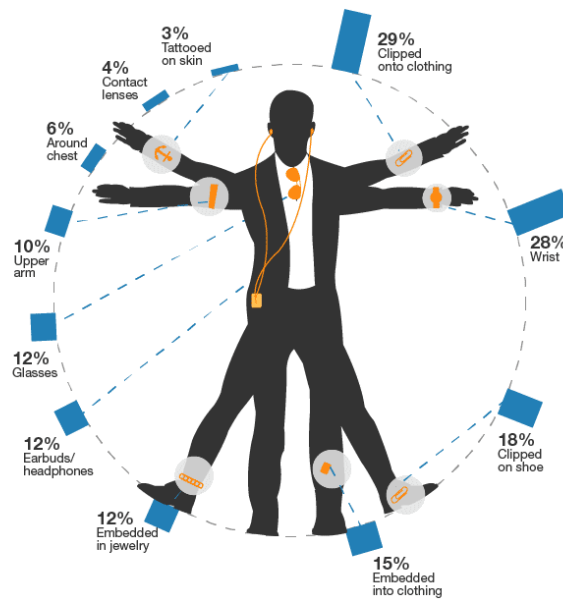
Fuente: [66]

Los *wearables* se pueden usar en distintas posiciones del cuerpo. En *Forrester Research, Inc.* realizaron una encuesta donde se determinaba los *wearables* más utilizados y en qué lugar del cuerpo se usaban. En la Figura 5 se muestra el resultado.

Se puede determinar, según este estudio, que casi el 45 % de los *wearables* están en la ropa, unida o embebida en ella. Por lo tanto, se podrían diferenciar los *wearables* según:

- ▶ *Wearables* no textiles o accesorios, como el ejemplo de la Figura 6.
- ▶ *Wearables* textiles o *Smart Textile*, como el ejemplo de la Figura 7.

Figura 5 Distribución porcentual de distribución de los wearables



Fuente: Forrester Research, Inc.

Figura 6 Anillo para detectar síntomas de COVID



Fuente: 20minutos.es

1.1.1. Smart Textile

Los *wearables* textiles, textiles inteligentes o *smart textiles*, al estar compuestos parcialmente por tejido, están muy demandados en el mercado como sustitución de otros productos más rígidos como los dispositivos electrónicos. Proporcionan a los usuarios un mayor confort, durabilidad y ligereza, mientras mantienen las mismas funcionalidades [68].

La norma europea *CEN/TC 248/WG 31-Smart textiles: CEN ISO/TR 23383:2020 (sustituye a UNE-CEN/TR 16298:2012 IN): Textiles and textile products - Smart (Intelligent) textiles - Definitions, categorisation, applications and standardization needs*, hace la siguiente distinción:

- ▶ **Material Textil Inteligente:** Material textil funcional que interactúa con su ambiente, es decir, responde o se adapta a cambios en su ambiente.
- ▶ **Sistema Textil Inteligente:** El sistema que exhibe una respuesta ideada y aprovechable como una reacción tanto a los cambios en su ambiente/entorno como a una señal (entrada) externa.

Figura 7 Visualizador de tiempo atmosférico



Fuente: tecnologia-informatica.com

Por lo tanto, el término “textil inteligente” o *smart textile* se puede referir tanto al material como al sistema, pero se hablará de uno u otro según el contexto. Asimismo, dentro de los “textiles inteligentes”, según la norma *ASTM D8248 - 20 Standard Terminology for Smart Textiles*, se debe diferenciar entre:

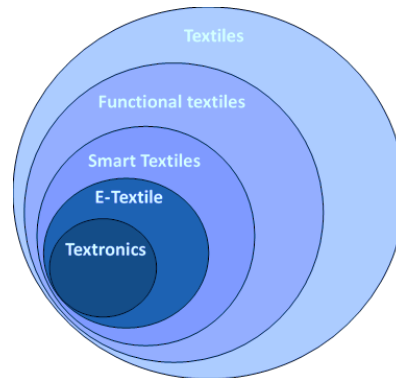
- ▶ **Smart Textile:** Una fibra, hilo, tela o producto final con una o más propiedades que cambian por diseño en respuesta a estímulos, como los de fuentes mecánicas, térmicas, químicas, eléctricas, magnéticas u otras. (Sinónimos: textil inteligente, sistema textil inteligente, sistema textil inteligente).
- ▶ **E-Textile:** Una fibra, hilo, tejido o producto final que comprende elementos que dan como resultado un circuito eléctrico o electrónico, con o sin capacidad de procesamiento, o los componentes de este. (Sinónimos: textil electromagnético, e-textil).

Por lo tanto, *los E-Textile* estarían comprendido dentro del área de los *Smart Textile*. Algunos autores incluyen dentro de los *E-Textile* los *Textronics* [69], formados por aquellos que incorporan sistemas electrónicos realizados con textil (Figura 8).

Por último, es habitual encontrar una clasificación no normalizada, pero muy utilizada en la bibliografía [70], que habla de:

- ▶ **Passive Smart Textile:** el textil actúa solo como sensor.
- ▶ **Active Smart Textile:** cuando además de sensor actúa sobre un estímulo.
- ▶ **Ultra Smart Textile:** además de sensar y actuar frente a un estímulo, son capaces de adaptarse al entorno.

Figura 8 Jerarquías en el área textil



Fuente: Propia

1.1.1.1. E-Textile

Como se ha definido previamente, los E-Textiles son aquellos tejidos a los que se incorporan elementos externos o a los que se modifica su estructura, para que actúen como un sistema electrónico, pudiendo detectar estímulos externos y reaccionar frente a estos.

Las propiedades electrónicas conferidas a los textiles les permiten ser aplicados en sectores tan diferentes como el de la salud [71], [72], la industria de los videojuegos [73], [74], en defensa [75], [76], deporte [72] o automoción [77].

Uno de los campos de aplicación que adquiere más relevancia es el relativo a la sensorica. Los sensores integrados en textiles inteligentes hacen uso de las propiedades eléctricas conferidas [78] siendo posible su uso, entre otros, para las comunicaciones [79], [80], para las mediciones en electrocardiogramas o encefalogramas [81] o para la monitorización postural [82].

Dependiendo de la funcionalidad, los E-Textiles se podrían clasificar según:

- ▶ **Con Funcionalidad conferida por un sistema externo:** El textil actúa solo como un sustento del sistema.
- ▶ **Con Funcionalidad propia:** El textil es modificado estructuralmente para darle funcionalidad.

Por lo tanto, un *E-textile* se puede obtener a través de diferentes formas, entre las que destacan:

- ▶ Fibras con propiedades funcionales o con aditivos que las les otorgan esa funcionalidad.
- ▶ Hilos o telas a partir del uso de diferentes fibras o capas funcionales.
- ▶ Acabados superficiales en telas.
- ▶ La integración de componentes electrónicos.

En cuanto a la integración de componentes electrónicos para otorgar funcionalidad al textil, la norma *CEN/TC 248/WG 31-Smart textiles* distingue cuatro niveles de integración (Figura 9).

- ▶ **Nivel 1:** se puede quitar el componente electrónico integrado del tejido inteligente sin destruir el producto. El textil y la electrónica son elementos independientes, unidos por distintos métodos.
- ▶ **Nivel 2:** es imposible retirar el componente electrónico de la tela al estar unido a ella. Si se retira se destruye el producto. La parte electrónica se fija a la tela con un enlace más íntimo. Se vuelve flexible y lavable como la tela.
- ▶ **Nivel 3:** uno o más componentes electrónicos son textiles o de acabado textil (fibras, hilos o telas). Se combinan con componentes electrónicos enlazados, de forma permanente o semipermanente, con una base textil. La tela e incluso los hilo, llevan integrada la parte electrónica.
- ▶ **Nivel 4:** los componentes electrónicos son textiles o de acabado textil, es decir una solución totalmente textil. La parte electrónica está hecha de tela.

Figura 9

Cuadro resumen de los cuatro niveles de integración de componentes electrónicos

Nivel de integración	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Denominación CEN WG31	Side-by-side	Híbrido	Integrado	Intrínseco
Tipo de integración	Electrónica aplicada al textil		Electrónica embebida en el textil	
	Retirable	No retirable	Integrada en el textil	Tela/Hilo son activos
Ejemplo				

Fuente: Propia

Como se puede observar, los niveles 1 y 2 incorporan sistemas electrónicos al textil [83]–[94]. Estos sistemas electrónicos suelen fabricarse en un PCB (*Printed Circuit Board*). Así, el PCB contiene el diseño electrónico y el textil actúa como un segundo sustrato con conductores que realizan la conexión con otros componentes.

Para lograr la integración de la electrónica en los E-textile se pueden utilizar, principalmente, cuatro tipos de tecnologías textiles (Figura 10):

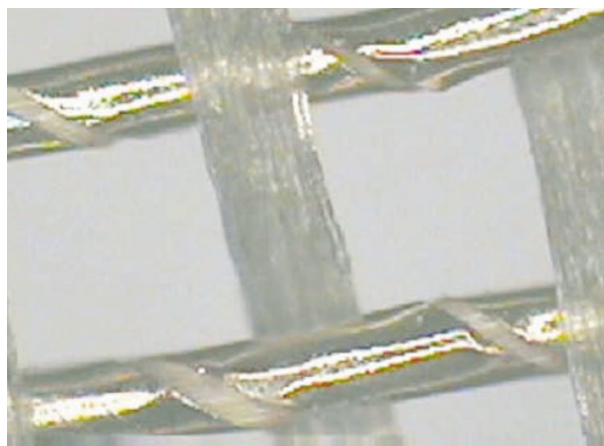
- ▶ La tejeduría de calada [95], [96] (Figura 11) o de punto [97]–[100].
- ▶ El bordado [95],[101]–[106], o cosido [107], [108].
- ▶ El proceso de laminación.
- ▶ La impresión [84],[109]–[117].

Figura 10 Tecnologías de integración electrónica en textil



Fuente: Propia

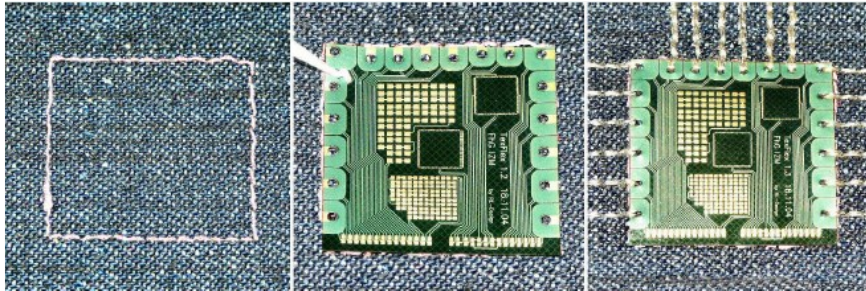
Figura 11 Micrografía de organza metálica tejida. Los dos hilos horizontales están envueltos con una lámina de metal.



Fuente: [118]

Figura 12

Bordado de interconexiones eléctricas con hilo conductor para la integración de PCB flexibles en el tejido.

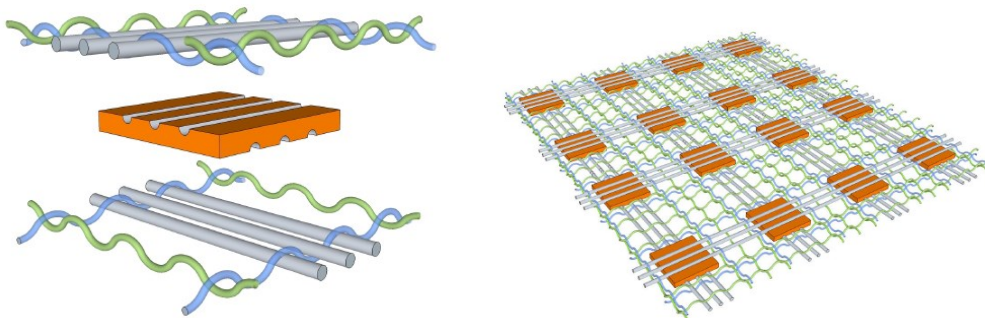


Fuente: [102]

Para ilustrar los sistemas electrónicos embebidos al textil [119]–[131], que forman parte de los niveles 2 y 3, Varga, M. et al [92] describe un ejemplo de cómo se puede insertar un PCB en un *E-Textile*. En este caso, el PCB se coloca entre dos capas del *e-textile*. Los circuitos textiles se forman al poner en contacto los hilos conductores previamente integrados en el tejido mediante tejeduría, y el PCB (Figura 13).

Figura 13

Inserción de PCB mediante hilo conductor e hilo aislante entrelazados



Fuente: [132]

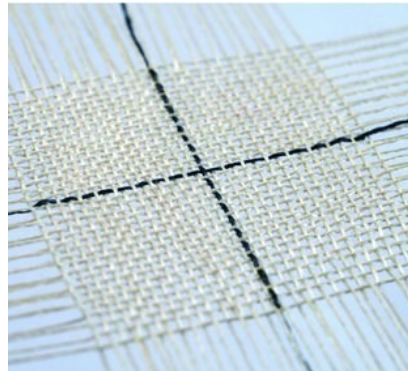
En otro ejemplo, de Müller et al [131], se presentan transistores electroquímicos tejidos en fibras de seda del gusano de seda *Bombyx mori* (Figura 14).

1.2. Tecnologías de Impresión en *printed electronics*

Para la impresión electrónica o *printed electronics*, es necesario tener en cuenta tres importantes ejes (Figura 15):

- ▶ La tecnología de impresión a emplear.
- ▶ El tipo de tinta que utilizar.
- ▶ El tipo de sustrato sobre el que imprimir.

Figura 14 Transistores electroquímicos tejidos en fibras de seda.



Fuente: [131]

Figura 15 Los tres pilares de la fabricación de sistemas electrónicos impresos.

Sustratos

Tipos:

- Papel, plásticos, vidrios, metales, textiles, etc.

Propiedades:

- Flexibilidad, rugosidad, estabilidad térmica, etc.

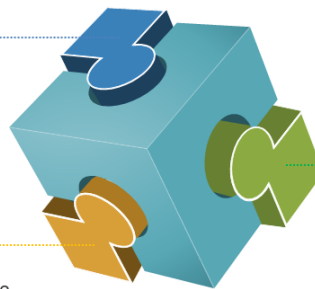
Tintas

Composición:

- Solventes, material activo, aditivos, etc.

Propiedades:

- Tensión superficial, viscosidad, pH, tamaño partícula, etc.



Tecnologías impresión

Tipos:

- Serigrafía, huecograbado, inkjet, flexografía, etc.

Propiedades:

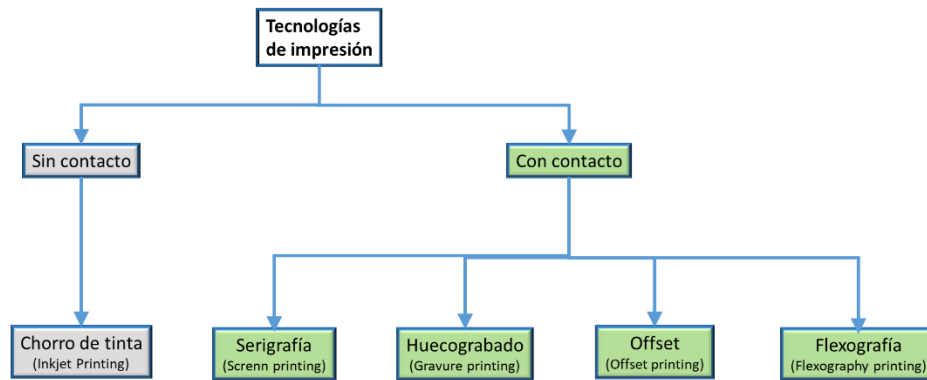
- Resolución, espesor de tinta, velocidad de impresión, etc.

Fuente: Propia

En primer lugar, la elección de la tecnología de impresión más adecuada se debe hacer analizando la aplicación final del dispositivo electrónico (por ejemplo: si se requiere que sea más o menos pequeño, delgado, ligero o flexible), el coste de fabricación y el volumen de producción. En consecuencia, los materiales más relevantes del proceso, las tintas y los sustratos, deberán cumplir con ciertos requerimientos, dependiendo de la tecnología de impresión que haya sido seleccionada y la aplicación final del dispositivo.

Las técnicas de impresión electrónica se dividen en (Figura 16) técnicas de contacto (como la flexografía, el huecograbado o la litografía), donde el cliché de impresión está en contacto directo con el sustrato; y en técnicas sin contacto (como la serigrafía, el aerosol o la inyección de tinta), donde solo la tinta está en contacto con el sustrato [48].

Figura 16 Clasificación de las tecnologías de impresión.



Fuente: Propia

En la Figura 17 se muestran las cuatro tecnologías principales de impresión en el área de la electrónica impresa. Como ejemplo de tecnología sin contacto está la impresión de chorro de tinta o *Inkjet*, tanto en su versión térmica como piezoeléctrica. En cuanto a tecnologías con contacto, las más utilizada es la serigrafía y, en menor medida, la flexografía y el *offset*.

La selección del método se debe hacer según las características del dispositivo electrónico a fabricar (por ejemplo, pequeño, delgado, ligero, flexible, barato, desechable, etc.). Por ello, una correcta elección de la tecnología es vital para conseguir fiabilidad y un coste de fabricación efectivo. En la Figura 18, se pueden observar las diferentes características técnicas entre las tecnologías y su comparativa en función de la resolución y del rendimiento.

Como muestra la Figura 18, la serigrafía es rápida y modulable, pero la variación en el espesor debido a la deposición de la tinta podría llevar a inconsistencias en la funcionalidad final del dispositivo. Por ejemplo, para la impresión de pantallas OLED, esta variabilidad no permitiría garantizar un espesor constante que no supere el máximo requerido para su correcto funcionamiento [134]. También hay que tener en cuenta que pueden dar problemas las técnicas que incorporan pequeños puntos en la tecnología de impresión (las celdas en huecograbado, la malla en serigrafía o las gotas en inyección).

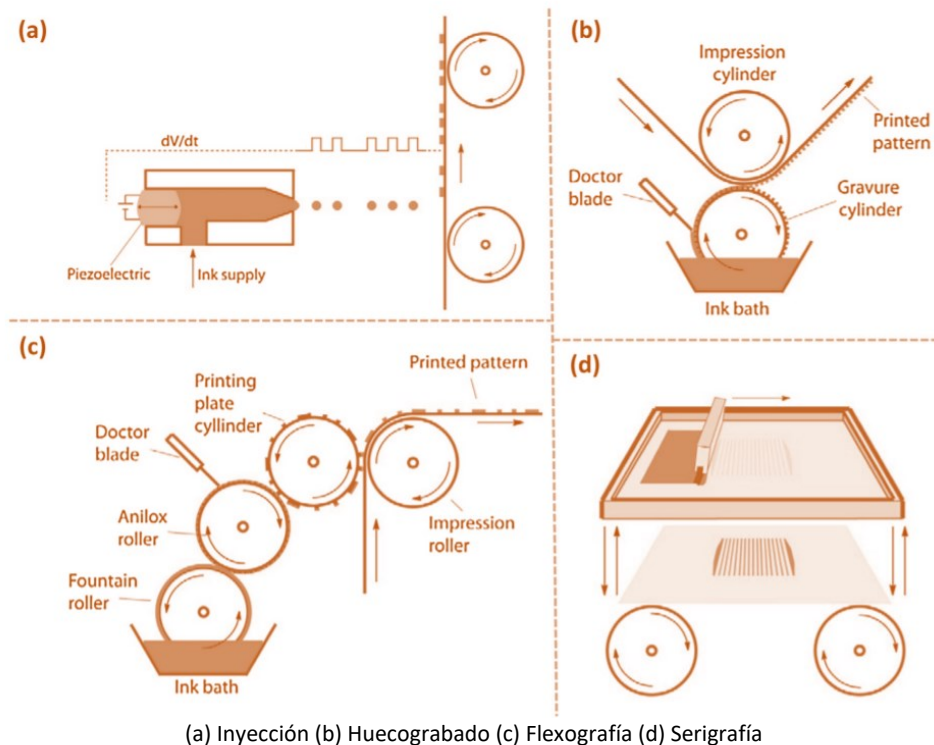
Las técnicas que permiten un proceso continuo *roll-to-roll* (R2R), como la flexografía, son especialmente atractivas ya que ofrecen una mayor productividad [132].

1.2.1. Flexografía

La flexografía es el proceso de depositar la tinta a través del uso de un rodillo de impresión con la imagen en relieve. Esta técnica destaca por depositar un amplio rango de grosores de tinta sin perder resolución en la imagen obtenida.

Se utiliza, sobre todo, en la industria del *packaging* para la impresión de envases, desde cajas de cartón corrugado, películas o films de plásticos (polietileno, polipropileno, poliéster, etc.) hasta bolsas de papel o plástico. Incluso los periódicos se imprimen de forma rotativa con este sistema además de con litografía [136].

Figura 17 Representación esquemática de técnicas de impresión electrónica



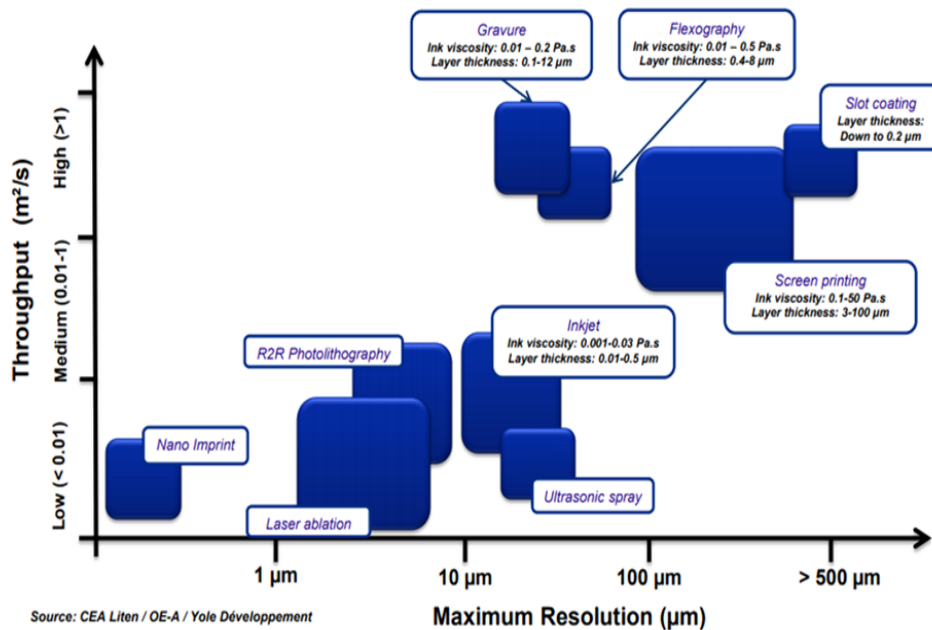
(a) Inyección (b) Huecograbado (c) Flexografía (d) Serigrafía

Fuente: [133]

La diferencia entre la flexografía y la litografía es que la flexografía es un sistema de impresión en altorrelieve, es decir, las zonas de la plancha que imprimen están más altas que aquellas que no deben imprimir. Por su parte, la litografía u offset es un sistema por el cual un molde o plancha transfiere la tinta a un rodillo, que es el que imprime sobre el sustrato. La ventaja principal de la flexografía frente al offset es el coste. El offset es más caro por las complejas unidades de impresión, necesita más tiempo de configuración y produce más desperdicio [137].

Las partes más importantes de un equipo de flexografía están representadas en la Figura 19 y son las siguientes: (1) Unidad de tinta; (2) Cilindro anilox (Figura 20); (3) Doctor Blade (Figura 21); (4) cilindro porta-chichés (Figura 23); (5) cilindro de impresión; (6) sustrato de impresión [18], [135], [138].

Figura 18 Gráfica comparativa entre las principales tecnologías de impresión electrónica.

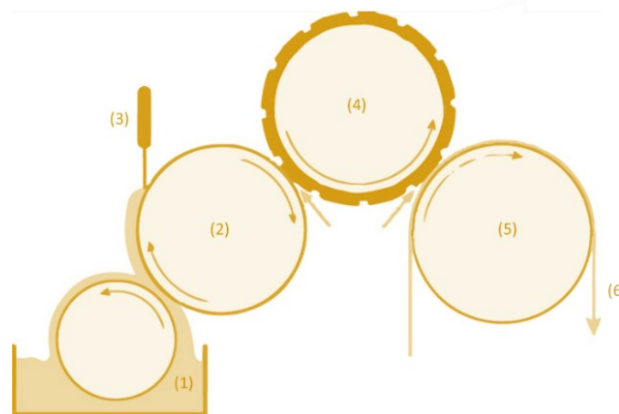


Fuente: CEA Liten/OE-A/Yole Development

El proceso se inicia cuando el cilindro anilox gira y sus celdas se llenan de la tinta que recogen de la unidad de tinta. En la Figura 20 se incluye un detalle microscópico de distintos tipos de celdas.

El exceso de material en la superficie del anilox se retira mediante el Doctor Blade, una cuchilla como la mostrada en la Figura 21, y la tinta de las celdas se transfiere al cliché (Figura 22) una imagen en relieve en el cilindro porta-chichés (Figura 23). Finalmente, la imagen se transfiere al sustrato que gira alrededor del cilindro de impresión.

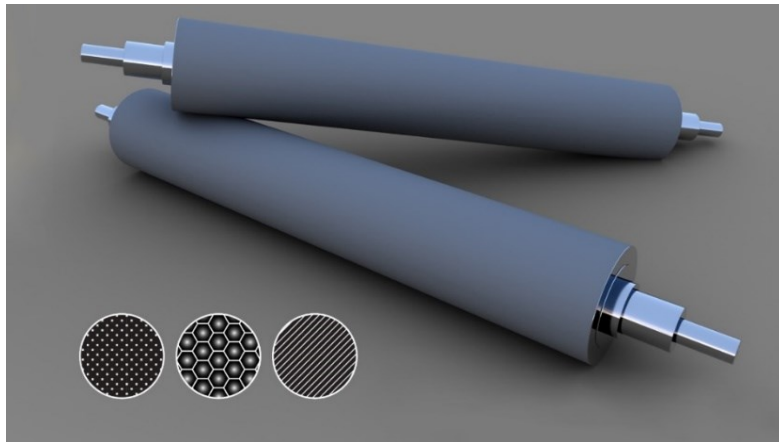
Figura 19 Partes importantes del proceso de flexografía



(1) Unidad de tinta; (2) Cilindro anilox; (3) Doctor Blade; (4) cilindro porta-clichés; (5) cilindro de impresión; (6) sustrato de impresión.

Fuente: [124]

Figura 20 Cilindro anilox



Abajo: detalle microscópico de distintos tipos de celdas.

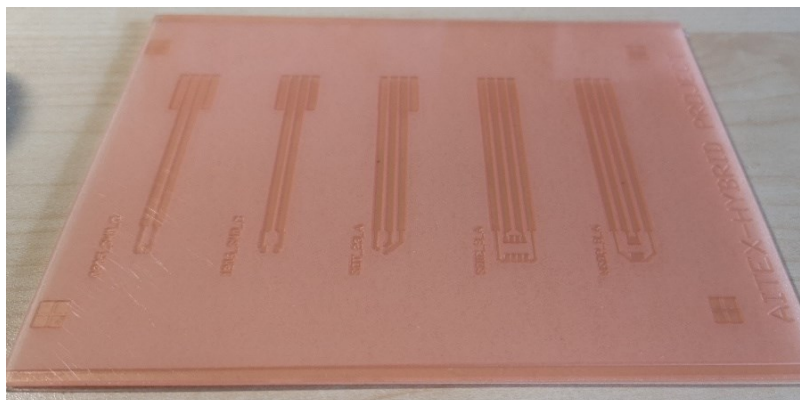
Fuente: joancalveras.com/anilox-roller

Figura 21 Doctor-Blade



Fuente: markandy.com

Figura 22 Cliché



Fuente: Propia

Figura 23 Cilindro porta-clichés



Fuente: Propia

En cuanto a las variables asociadas al proceso de impresión por flexografía [125], principalmente se debe controlar:

- ▶ La velocidad.
- ▶ La presión o fuerza de impresión.
- ▶ El volumen de las celdas del anilox.
- ▶ La presión del rodillo de anilox.
- ▶ Las propiedades de la tinta.
- ▶ El sustrato [126].

Estas variables tienen un impacto directo en la morfología y la uniformidad de la impresión, lo que influye directamente el comportamiento eléctrico y la funcionalidad del dispositivo final [134]. A continuación, se explican en detalle cada una de ellas.

1.2.1.1. La selección de la velocidad y la presión en el proceso de impresión electrónica por flexografía

En la Tabla 1, se muestra una comparación de la flexografía con las técnicas más comunes de impresión en relación la resolución, la velocidad de impresión y el grosor de la tinta depositada.

Según muestran los datos de la Tabla 1 la flexografía destaca frente al resto por depositar un amplio rango de grosores de tinta con la misma resolución, y pudiendo alcanzar elevadas velocidades de impresión.

La presión entre el cilindro porta-clichés y el cilindro de impresión es relevante en la calidad de la impresión final. Situaciones como el “efecto halo” (impresiones con un exceso de tinta) ocurren durante la compresión entre el cilindro de impresión y el sustrato, por una falta de presión. Esto conlleva limitaciones en la estabilidad del tamaño de imagen y la resolución [142].

Tabla 1 Comparación de las técnicas de impresión

	Flexografía	Huecograbado	Serigrafía	Inyección
Resolución (µm)	20	15	30	15
Velocidad de impresión (m/min)	5-180	8-100	0.6-100	0.02-5
Grosor de la deposición de tinta (µm)	0.17-8	0.02- 12	3-30	0.01-0.5

Fuente:[18]

1.2.1.2. El cliché y el anilox en el proceso de impresión electrónica por flexografía

El proceso de flexografía destaca por transferir la imagen por el contacto directo de la imagen en relieve sobre el sustrato. La imagen en relieve se encuentra en un cliché colocado sobre el rodillo porta-clichés. Normalmente el cliché está hecho de goma o algún fotopolímero. En la Tabla 2 se muestra la diferencia entre la forma de trasladar la imagen en flexografía a diferencia de otras técnicas de impresión. En huecograbado, la imagen se encuentra en forma de pequeñas cavidades en el rodillo huecograbado que se llenan de tinta y se transfieren al sustrato. En serigrafía, se requiere de una malla en la que se define el motivo a imprimir. Por el contrario, en inyección no se requiere de ningún elemento extra ya que la imagen se trasfiere de forma de pixels digitales al equipo que lo deposita en forma de gotas sobre el sustrato.

Tabla 2 Comparación de las técnicas de impresión

	Flexografía	Huecograbado	Serigrafía	Inyección
Portador de la imagen	Cliché	Cilindro huecograbado	Plantilla	Virtual
				

Fuente: [18]

El cliché es de un material muy flexible, capaz de adaptarse a una cantidad de soportes o sustratos de impresión muy variados.

Sin embargo, en flexografía, el control de la cantidad de tinta que se transfiera durante la impresión depende directamente del volumen del cilindro de anilox y

la forma de sus celdas. El cilindro de anilox está lleno de celdas o microcavidades embebidas en la superficie exterior del cilindro (Figura 20Figura 22) generalmente de cromo o de cerámica. La capacidad de tinta del cilindro de anilox se suele medir en centímetros cúbicos de tinta por metro cuadrado de superficie de anilox, lo que da un indicador de la cantidad máxima de tinta que se puede transferir [134].

1.2.1.3. La selección tinta en el proceso de impresión electrónica por flexografía

En las artes gráficas, las tintas están formadas por mezclas de pigmentos, polímeros solventes y aditivos. En el caso particular de la impresión electrónica, los pigmentos se reemplazan por partículas o precursores metálicos que aportan la conductividad eléctrica [133]. Existen de base solvente o base agua, siendo estas últimas las que se están imponiendo por sus ventajas medioambientales. Frecuentemente, las tintas conductoras están formuladas mezclando micro o nanopartículas de metales sólidas altamente conductoras, siendo posible también el uso de materiales no metálicos (como nanotubos de carbono o grafeno).

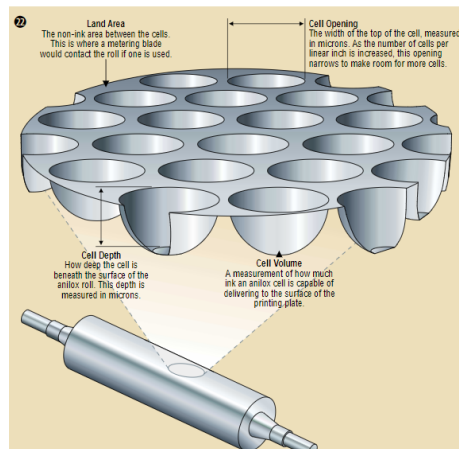
Según sus propiedades eléctricas, las tintas que se utilizan para electrónica impresa se dividen en cuatro tipos:

- ▶ **Conductoras:** Permiten la circulación de la corriente eléctrica. Normalmente están basadas en partículas metálicas o en nanopartículas de compuestos como la plata, oro, cobre, níquel, etc.,
- ▶ **Resistivas:** Presentan resistencia a la circulación de la corriente eléctrica. Normalmente están basadas en partículas metálicas o en nanopartículas grafito o grafeno.
- ▶ **Dieléctricas:** Impiden la circulación de la corriente eléctrica. Normalmente basadas en dieléctricos orgánicos o inorgánicos: tereftalato de polietileno, (PET), polimetilmetacrilato (PMMA), Polivinilpirrolidona (PVP), Poliestireno (PS), etc.
- ▶ **Semiconductoras:** Tienen una respuesta variable a la corriente eléctrica. Basadas en polímeros conductores: P3HT, PEDOT:PSS, PANI, F8T2, etc.

Existen otros tipos más particulares de tintas como las tintas Ag/AgCl para electrodos de ECG, tintas para baterías impresas a base de óxido de estaño y LiTiO_2 , tintas poliméricas fotoactivas para células fotovoltaicas y tintas para sensores impresos como las tintas piezoresistivas, piezoeléctricas y las magnéticas.

Algunas formulaciones de tintas incluyen aditivos para mejorar la deposición de la tinta y las propiedades en el uso final, sin embargo, esto puede afectar a las propiedades eléctricas o funcionales, y así influir en el rendimiento final de la muestra impresa [18]. Por ello, la selección de la tinta a utilizar es vital según el proceso de impresión.

Figura 24 Celdas de un cilindro anilox



Fuente: [143]

En general, las tintas pueden estar basadas en materiales orgánicos e inorgánicos. Las inorgánicas normalmente contienen [133]:

- ▶ Las partículas sólidas metálicas que actúan como el relleno conductor (como el cobre, el oro, la plata o el aluminio).
- ▶ Los polímeros como agentes dispersantes o reductores que aseguran la adhesión de la tinta impresa al sustrato.
- ▶ Los solventes soportes que disuelven los polímeros.
- ▶ Otros aditivos para mejorar o modificar las propiedades de la tinta resultante.

Por su parte, las tintas orgánicas se basan en materiales orgánicos como polímeros conductores, semiconductores o dieléctricos. Las tintas basadas en polímeros altamente conductores se utilizan en baterías, campos electromagnéticos, resistores e inductores, sensores, etc. Mientras que las tintas basadas en semiconductores orgánicos se emplean como capas activas de dispositivos activos como fotodiodos orgánicos (OPDs), diodos de emisión de luz orgánicos (OLEDs), células solares orgánicas (OSC), sensores, etc [144].

Todas las tintas necesitan un post-procesado consistente en un secado y un sinterizado. El curado es un proceso para la fijación de la tinta al sustrato, no sólo para su permanencia, sino para resistir el uso del material impreso. Pueden utilizarse en general dos procesos: curado térmico y curado por UV. En el proceso térmico se elimina el 35-45% de los solventes o agua, así como resinas poliméricas, pigmentos y aditivos se asientan en el sustrato. En el proceso UV se polimerizan de los monómeros y oligómeros y se forman de cadenas que asientan la tinta en el sustrato [145]. El sinterizado es un tratamiento para alcanzar la unión óptima de las partículas funcionales mediante la eliminación del máximo de componentes del vehículo de la tinta. Al igual que el curado, los dos principales métodos de

sinterizado son el térmico y por UV, aunque en los últimos años se estén introduciendo los sinterizados fotónico [146] y láser [147].

Debido al amplio rango de tecnologías de impresión existentes, las tintas deben cumplir ciertos requerimientos dependiendo del tipo de tecnología que se vaya a utilizar y su aplicación final. Como cualquier otra tinta, existen ciertas características, aparte de las eléctricas, como son las reológicas, tixotrópicas y mecánicas. Tal vez, la más importante cara a la impresión es la viscosidad, parte de las características reológicas. También el contenido y tamaño de sólidos (elementos activos) es importante sobre todo en cuanto a tamaño de partículas puesto que influye sensiblemente sobre los parámetros de impresión.

Por un lado, las tintas vienen definidas por sus características reológicas de viscosidad y tensión superficial. En la Tabla 3 se muestran los parámetros requeridos para la flexografía en comparación con otro tipo de técnicas de impresión.

En el caso de la flexografía, la viscosidad de la tinta debe estar entre 0.01–0.5 Pa.s y 14-23 mN/m de tensión superficial.

A diferencia de las impresiones en el sector de las artes gráficas, las impresiones para fines electrónicos tienen un requerimiento mayor en uniformidad de la tinta [148]. Una mala uniformidad limitará la conductividad de la impresión lo que conlleva a una variación funcional del circuito. Una evaporación desigual del solvente puede resultar en el efecto “anillo de café”, dejando una marca cuando una partícula líquida se evapora, por lo que también debe considerarse e intentar resolverse mezclando solventes de diferentes puntos de ebullición y tensiones superficiales en la formulación de la tinta.

Tabla 3 Propiedades reológicas requeridas para la formulación de tintas

Técnica de impresión	Viscosidad (Pa.s)	Tensión superficial (mN/m)
Flexografía	0.01–0.5	14–23
Serigrafía	0.5–5	38–47
Inyección	0.001–0.1	15–25

Fuente: [133]

En el mercado, no existen muchas referencias de tintas conductoras específicas para la impresión por flexografía sobre sustratos textiles. El fabricante Dupont (Delaware, Estados Unidos) ofrece tintas conductoras estirables, es decir, que mantienen el rendimiento a pesar de una elongación repetida. Está diseñada para materiales y tejidos sintéticos, pero no para el uso de la técnica de flexografía. En la Tabla 4 se indican las especificaciones más relevantes de una tinta estirable de carbono conductiva de la familia de productos Interxar™ de Dupont. Sin embargo, solo es apta para técnicas de serigrafía que permiten esas viscosidades y tiempos

de secado. Por otro lado, el fabricante Novacentrix (Austin, Estados Unidos) es uno de los proveedores que ofrecen tintas de plata para flexografía garantizando buena adhesión, conductividad y flexibilidad para superficies poliméricas. En la Tabla 5 se indican las especificaciones más relevantes de una de las tintas de la familia de productos Metalon® Conductive de Novacentrix en base agua con nanopartículas de plata que ofrece rápidos tiempo de curado, alta conductividad eléctrica, impresión de líneas finas y buena flexibilidad. Ideal para sustratos poliméricos o papeles siliconados. Sin embargo, teóricamente no está diseñada para superficies rugosas.

Tabla 4 Especificaciones técnicas de la tinta PE874 de Dupont

PE874	
Partícula	Plata
Temperatura de curado	160°C — 10 min
Viscosidad	50–80 @0.2 s ⁻¹
Resistividad (mΩ/sq/mil)	<75
Sustratos	TPU film y tejidos sintéticos

Fuente: [149]

Tabla 5 Especificaciones técnicas de la tinta PFI-RSA6012 de Novacentrix

PFI-RSA6012	
Partícula	Nanopartículas de plata
Temperatura de curado	140°C - 10-60 segundos
Viscosidad @10s⁻¹	10000 – 15000 cP
Resistividad (Ohm)	8E-6 to 1E-5
Sustratos	Tereftalato de Polietileno (PET), poliamida, poliuretano, papeles recubiertos

Fuente:[150]

Además de la selección de la tinta correcta para el proceso, se debe tener en cuenta el sustrato elegido y su compatibilidad. La relación entre la energía superficial del sustrato y la tensión superficial de la tinta es crítica. La adhesión entre las dos superficies ocurre cuando las gotas de tinta entran en contacto y desarrollan fuerza para mantener una estabilidad sólido-líquido. Esta adhesión entre es la suma de fuerzas mecánicas físicas y químicas, que incluyen principalmente:

- ▶ Las propiedades del sustrato (composición química, topografía de la superficie, porosidad, etc.)
- ▶ Propiedades de la tinta conductora (composición química, comportamiento reológico, ratio de la evaporación del solvente, etc.)
- ▶ La diferencia entre la tensión superficial de la tinta y la energía superficial del sustrato que recibe la tinta.
- ▶ Grupos funcionales y sus fuerzas intermoleculares presentes en la tinta.

Como regla general, la tensión superficial del sustrato debe ser al menos 10 dynes/cm mayor que la tensión superficial de la tinta. Y está demostrado que el ángulo de contacto de la tinta con el sustrato debe ser además menor de 90 grados para permitir un mojado adecuado [18].

1.2.1.4. La selección de sustratos para el proceso de impresión por Flexografía

El sustrato es el material base donde sobre el que se imprimirá la tinta. En general se pueden clasificar como:

- ▶ Rígidos.
- ▶ Flexibles (y estirables).

La elección de un sustrato adecuado muchas veces viene determinada por el coste, los parámetros de secado o curado de la tinta, y los requerimientos del usuario final. Algunas de las propiedades importantes de los sustratos incluyen [18], pero no están limitadas a:

- ▶ Estabilidad mecánica y térmica.
- ▶ Flexibilidad.
- ▶ Resistencia a los solventes.
- ▶ Rugosidad de la superficie.
- ▶ Energía de la superficie.
- ▶ Reciclabilidad.
- ▶ Propiedades barreras (humedad, gas, vapor).

Los sustratos utilizados para la impresión electrónica suelen ser sustratos poliméricos, como los mostrados en la Tabla 6, aunque también papel, cristal o metal.

El tereftalato de polietileno (PET), la poliimida (PI) o el policarbonato (PC) son algunos de los sustratos poliméricos más utilizados. Cada uno de esos sustratos tiene sus ventajas y desventajas, por lo que la elección debe basarse en las necesidades de los usuarios finales y su aplicación. Por ejemplo, el PET y el naftalato de polietileno (PEN) se utilizan mucho para circuitos flexibles de bajo coste. PI se utiliza cuando hay un requerimiento de altas temperaturas (~300 °C). PC se utiliza para electrónica *in-mold* [151]. Pero de todos los sustratos poliméricos, el PET es el más utilizado en la industria de la impresión electrónica.

1.2.1. Flexografía *roll-to-roll*

Como alternativa a la impresión tradicional en la que se imprimen hojas o sustratos uno a uno, aparece el proceso Rollo a Rollo.

La impresión rollo a rollo, *roll-to-roll* o R2R, hace referencia a las técnicas de producción que implican el procesamiento constante de sustratos flexibles que se

mueven entre dos rollos de material [152]. La mayor producción y el menor coste, son factores diferenciadores para que las técnicas de impresión que permiten un procesamiento R2R sean más deseables que las convencionales que únicamente permiten una impresión cada vez. Una de estas técnicas es la flexografía que, mediante una disposición adecuada de los rodillos, permite la aplicación rollo a rollo.

Tabla 6 Temperatura de transición vítrea de los sustratos poliméricos más utilizados en impresión electrónica

Sustrato polimérico	Tg (°C)
Tereftalato de polietileno, PET	70
Naftalato de polietileno, PEN	120
Polycarbonato, PC	150
Polyarylate, PAr	215
Polietersulfona, PEI	220
Poliamida, PI	270
Fluoreno poliéster, FPE	340
Polynorborneno, PN	340

Fuente:[133]

Un ejemplo de planta piloto de flexografía *roll-to-roll* es el modelo Lambda de Edale que se muestra en la Figura 25 y que se localiza en las instalaciones de NAITEC-Estella. Este equipo tiene la peculiaridad de contar con un diseño modular que permite definir diferentes configuraciones de proceso, lo que maximiza el uso de recursos. Permite trabajar con sustratos flexibles de entre 12 y 700 micras de espesor y con anchos máximos de tamaño de impresión de 330 mm. Alcanza velocidades máximas de trabajo de 50 m/min. Las tintas aplicadas pueden secarse mediante dos tratamientos térmicos diferentes, utilizando lámpara de infrarrojos (IR) o los cuatro hornos de convección que permiten hacer rampas de secado a diferentes temperaturas. También es posible utilizar tintas de curado ultravioleta (UV), empleando una lámpara de 160 W/cm [153].

Otro ejemplo es la planta VCML Lab de RK Print que se muestra en la Figura 26 y que se localiza en las instalaciones de AITEX-Alcoy. Este equipo también cuenta con diseño modular que permite definir diferentes configuraciones de proceso. Permite trabajar con todo tipo de papeles, películas y láminas rollo a rollo de un ancho hasta 300mm y alcanza velocidades de trabajo entre 1-70 m/min.

1.3. El Sector textil y la Innovación

Para enmarcar el desarrollo de esta tesis doctoral, es necesario entender la importancia del sector textil en España y, en concreto en la Comunidad Valenciana que, como muestra la Figura 27, tiene uno de los mayores porcentajes de cifra de negocio del sector del país.

Figura 25 Plantas piloto de flexografía *roll-to-roll*. Modelo Lambda de Edale en NAITEC.



Fuente: [153]

Figura 26 Plantas piloto de flexografía *roll-to-roll*. VCML Lab de RK Print en AITEX.



Fuente: Elaboración propia

Según el último informe sectorial del Ministerio de Consumo y Turismo [154] el Sector de Textil y Confección en España contaba en 2019 con 15.465 empresas (7.96% del total de la industria). Con una cifra de negocios de 10.595.945 miles de € y ocupando a 89.447 personas.

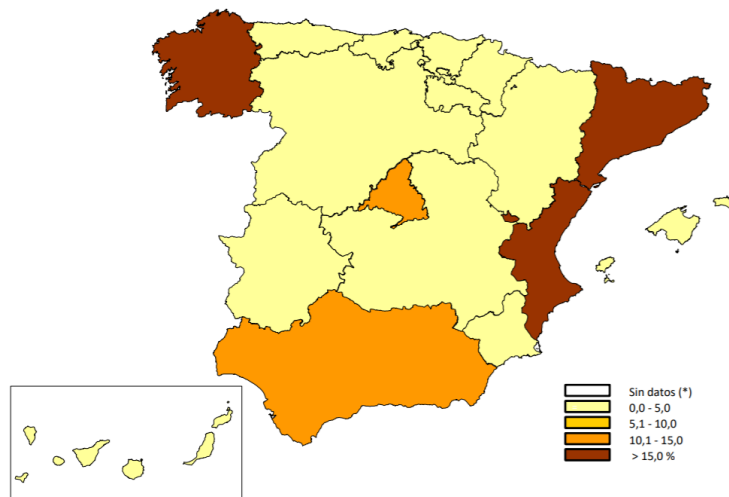
Cabe destacar que el sector está compuesto mayoritariamente por PYMES con un tamaño medio de 4.9 empleados, lo que dificulta la actividad innovadora en el sector.

Según el último informe de McKinsey & Company [155], el año 2022 estará marcado por la sostenibilidad, la digitalización y la innovación.

Después de dos años de disrupción, se deben destacar iniciativas españolas que responden a estas nuevas necesidades de los consumidores. Como modelo de apuesta por la sostenibilidad, está la empresa española Recover [156], que transforma el residuo textil en fibras recicladas con las que se pueden volver a fabricar prendas, cerrando el círculo en la industria de la moda. Asimismo, la empresa Piñatex [157], que utiliza el excedente de las producciones agrícolas de piñas como base para la fabricación de un nuevo material textil.

En cuanto a digitalización de la cadena de valor textil, las marcas españolas se han adaptado a los cambios de consumo generados por el COVID-19. Inditex, por ejemplo, ha desarrollado una plataforma propia, Inditex Open Platform y, en base de su tecnología RFID, que permitirá ya este año que todas sus enseñas trabajen con un stock único (en digital y tienda) [143].

Figura 27 Cifra de negocio del Sector Textil y Confección (2018)



Porcentaje sobre el total nacional
Fuente: MINCOTUR [154]

No obstante, como muestra el gráfico de la Figura 29, la industria textil y de la confección en España está por debajo de la media en el porcentaje de empresas con actividades innovadoras.

Así, en el mundo globalizado y conectado actual, para poder registrar una recuperación y crecimiento del sector textil es necesario que las empresas apuesten por la innovación. El éxito de esta recuperación será la adecuada adaptación de los productos tradicionales a nuevos productos conectados e inteligentes.

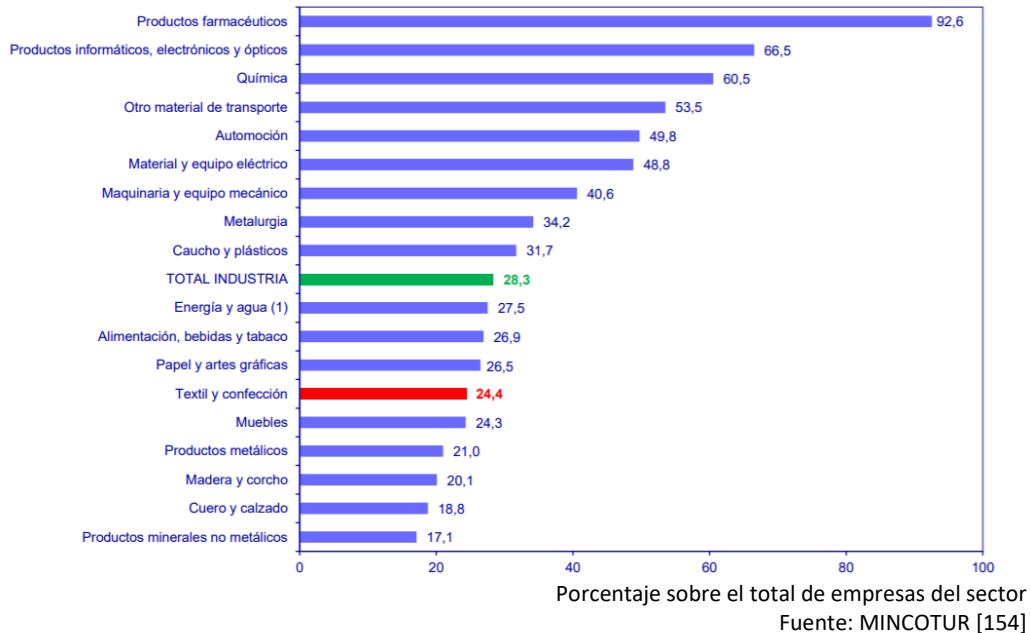
Figura 28 Proceso de reciclaje de la empresa Recover



Fuente: Recover

El Internet de las Cosas es el componente tecnológico fundamental sobre el que sienta sus bases el paradigma de la Industria 4.0, y que se define como la dotación de conectividad a internet a cualquier objeto sobre el que se pueda medir parámetros físicos o actuar, así como las aplicaciones y tratamiento de datos inteligentes relativos a los mismos [159].

Figura 29 Empresas con actividades innovadoras (2019)



1.4. Sustratos textiles

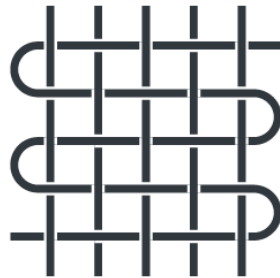
Los sustratos laminares textiles son sinónimo de telas, siendo su definición, láminas más o menos anchas, gruesas o finas, flexibles y consistentes, variando el aspecto de ellas en función de la materia, constitución y acabado [137]. La clasificación general de los textiles es según su proceso productivo [161]:

- ▶ Telas tejidas.
 - ▶ De calada.
 - ▶ De punto.
- ▶ Telas no tejidas.

El tejido de calada (Figura 30), desde el punto de vista técnico textil, se conoce como el género obtenido en forma de lámina más o menos resistente, elástica y flexible, mediante el cruzamiento y enlace de dos series de hilos: una longitudinal y la otra transversal. Hay tejidos que están formados por un solo hilo que se enlaza consigo mismo formando mallas, los tejidos de punto por trama y aquellos conseguidos mediante una serie de hilos que forman la urdimbre que se entrelazan unos con otros [137].

Tanto los tejidos de calada, como los de punto parten su obtención de hilos del uso de los hilos, los cuales pueden presentar distintas variables. En cambio, los no tejidos se conforman a partir de las propias fibras dispuestas aleatoriamente y consolidadas por diversos métodos [160]. Los textiles más utilizados para prendas e incluso para aplicaciones técnicas son los tejidos de calada, donde dos sets de hilos perpendiculares se cruzan y se entrelazan perpendicularmente entre sí para crear una estructura coherente y estable [162], como se muestra en la Figura 30. Siendo la urdimbre los hilos longitudinales y la trama los hilos transversales [159].

Figura 30 Representación de un tejido de calada



Fuente: [160]

Los tejidos de calada se obtienen mediante el proceso de tisaje de calada, donde a su vez puede utilizarse la tecnología a lizos o la tecnología Jacquard.

Cada tela o tejido, puede presentar distintos tipos de características interesantes: estructurales y de comportamiento (mecánico, a los fluidos, al uso, a los tratamientos de conservación, al fuego, etc.). Todas ellas presentan un mayor o menor grado de importancia según la aplicación a la que el tejido vaya a destinarse. Pero sea cual sea el uso de las telas, los parámetros estructurales tienen vital importancia para poder planificar y ejecutar la fabricación del producto.

En el contexto de esta tesis, el término “estructura” se refiere a los tipos de ligamentos de entrelazado de los hilos en los tejidos de calada, considerando también parámetros estructurales internos de los hilos utilizados. Por lo tanto, la estructura de los hilos de calada se determina, entre otros factores, por el tipo de ligamento, el coeficiente de ligadura, la densidad de los hilos en el tejido y las características de los hilos en trama y urdimbre [163]. A continuación, se explican en detalle cada uno de ellos ya que el resto de las propiedades físicas (rizo, grosor, densidad física, masa por unidad de superficie, porosidad, etc.), mecánicas (resistencia a la rotura y al alargamiento, tenacidad, fuerza de rotura, resistencia a la abrasión, etc.) y de permeabilidad (permeabilidad a los gases, líquidos, luz, ruido, energía, agua, vapor, bacterias, etc.) están afectadas por los factores mencionados anteriormente [164]. La topografía de la superficie de los tejidos, en concreto, es la responsable de la funcionalidad – apariencia, manejo y uso, humectabilidad, comportamiento ante la suciedad y la facilidad de limpieza y la resistencia a la abrasión. Las características topográficas por su parte dependen del tipo y finura de los filamentos, de la finura de los hilos, de la densidad del hilo y del tipo de telar. Estas características tienen una fuerte influencia en muchos casos sobre el control de las propiedades humectantes.

Ligamento

Es la ley según la cual los hilos se cruzan o entrelazan con las pasadas para formar el tejido. Para la puesta en producción de un telar deben tenerse en cuenta todas las estructuras que lo configuran

El curso del ligamento es la estructura mínima que en el tejido se va repitiendo, tanto horizontal como verticalmente.

Las estructuras básicas en calada son las que se muestran en la Tabla 7.

Coefficiente de ligadura [160], [161], [165]


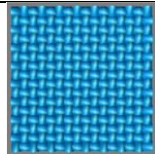
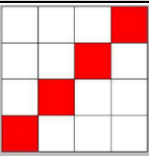
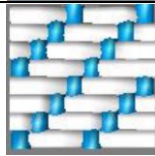
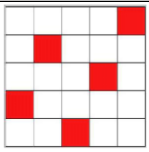
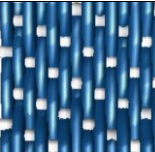
Conocidos los puntos de ligadura o puntos de inflexión que el hilo o pasada produce en su paso de la cara al envés puede obtenerse el coeficiente de ligadura de un hilo o pasada. También puede conocerse el coeficiente de ligadura de una sección (urdimbre o trama) como muestra la Ecuación (1) y del ligamento completo como muestra la Ecuación (2).

$$kl_{u/t} = \frac{n^{\circ} \text{ puntos de ligadura sección}}{n^{\circ} \text{ hilos} \times n^{\circ} \text{ pdas}} \quad (1)$$

$$kl = \frac{kl_u + kl_t}{2} \quad (2)$$

Cuanto más pequeña es la estructura (menos hilos y pasadas), se consigue mayor coeficiente de ligadura y por tanto mayor estabilidad dimensional y mejor comportamiento mecánico del tejido. Por el contrario, su capacidad de ornamentación se ve mermada.

Tabla 7 Estructuras básicas de calada

	<p>El tafetán es el ligamento más básico, de menor tamaño y con mayor poder de ligadura y por lo tanto el más utilizado. De tamaño invariable (2x2).</p>	
	<p>Las sargas se caracterizan por la disposición en diagonal de sus puntos de escalonado. De tamaño variable ($\geq 3 \times 3$).</p>	
	<p>Los rasos se caracterizan por un aspecto muy liso y normalmente brillante en una de sus caras. De tamaño variable. ($\geq 5 \times 5$).</p>	

Fuente: Elaboración propia

Densidad del tejido [160], [161], [165]

Es la cantidad de hilos que contiene el tejido en una determinada longitud (se suele utilizar como unidad de longitud el centímetro).

En los tejidos de calada existen dos densidades: densidad de urdimbre (hilos/cm) y densidad de trama (pasadas/cm).

Título de los hilos [160], [161], [165]

Es la finura de los hilos componentes. Pueden expresarse en el sistema propio de titulación, según la materia, el proceso de fabricación y su proveedor, o en el sistema tex con el fin de percibir fácilmente las diferencias de grosor entre los hilos.

Masa por unidad de superficie [160], [161], [165]

Cantidad de materia que contiene el tejido por metro cuadrado. Puede obtenerse mediante ensayo de laboratorio o mediante cálculos teóricos.

Grosor o espesor [160], [161], [165]

Definido como la distancia entre el haz y el envés. Aunque se trata de una característica estructural, este parámetro presenta menor importancia en las telas convencionales y puede ganarla en telas utilizadas en aplicaciones específicas: aislamiento térmico, acústico, revestimientos, etc.

Para el desarrollo de esta tesis doctoral, no es únicamente importante la estructura de los tejidos si no también los materiales utilizados. La composición de los tejidos afecta a la porosidad e influencia directamente sobre las características textiles relacionadas con el peso, el grosor, el comportamiento tensión-deformación o la permeabilidad al aire, entre otras.

De esta forma, las fibras se pueden clasificar según su origen de la siguiente forma [161]:

- ▶ Fibras naturales.
 - Fibras de origen animal.
 - Fibras de origen vegetal.
 - Fibras minerales.

- ▶ Fibras químicas.
 - Fibras de polímero natural.
 - Fibras de polímero sintético.

El tipo de fibra seleccionada es muy importante para determinar las características finales del tejido. Como se puede comprobar, por ejemplo, al comparar las propiedades del algodón y el poliéster detalladas en las Tabla 8 y Tabla 9 respectivamente.

Tabla 8 Propiedades de la fibra de Algodón

Propiedades Físicas		Propiedades químicas	
Longitud	20-35 mm	Tasa legal de humedad (%)	11
Finura	1-4 dtex	Imbibición	42-53%
LOI (%)	20,1	Lavado	Sí T ^º , No acción mecánica
Tenacidad	20-50 cN/tex	Disolventes	Percloroetileno
Resiliencia	Baja	Ácidos/Álcalis	Mal / Bien
Abrasión	Media	Tintura	Directos, reactivos, tina, sulfurosos
Pilling	No genera	Oxidantes	Atacan
T ^º Fusión	No tiene	Luz	Resistencia

Fuente: [161]

Para el desarrollo de la tesis, de las propiedades de las fibras identificadas, es importante tomar en consideración la tasa legal de humedad de las fibras y la imbibición. Mientras que la tasa hace referencia al porcentaje legal de humedad aceptada que contiene las fibras, la imbibición es la capacidad real que tienen las fibras de absorber humedad del ambiente.

La Tabla 8 muestra que el algodón presenta una tasa legal de humedad del 11%, siendo significativamente mayor que la fibra de poliéster, que alcanza un 1.5% según se indica en la Tabla 9. Esto se debe principalmente a que las fibras celulósicas, y en concreto el algodón, presentan menor número de zonas cristalinas en su estructura interna que las fibras de poliéster. Esta característica puede influir en el resultado de la absorción de la tinta, por ello, su estudio se tendrá en cuenta en los desarrollos de la tesis.

Tabla 9 Propiedades de la fibra de Poliéster

Propiedades Físicas		Propiedades químicas	
Longitud	-	Tasa legal de humedad (%)	1.5
Finura	-	Imbibición	2-5%
LOI (%)	2.6	Lavado	Tª y acción mecánica
Tenacidad	23-80 cN/tex	Disolventes	Percloroetileno
Resiliencia	Muy buena	Ácidos/Álcalis	Bien / Bien
Abrasión	Buena	Tintura	Dispersos
Pilling	Sí genera	Oxidantes	No atacan
Tª Fusión	260°C	Luz	Degradación lenta

Fuente: [161]

1.4.1. Impresión electrónica sobre textiles

Una vez comprobada la necesidad de innovación en el sector textil para adaptar los productos tradicionales a nuevos productos conectados e inteligentes, y el simultaneo auge de la impresión electrónica entre la comunidad científica, surge el planteamiento de la impresión electrónica sobre textiles.

Sin embargo, en este planteamiento, debe destacarse el reto de la durabilidad y la resistencia a la flexión, al estiramiento, a la abrasión y al lavado [146].

Se han publicado numerosos artículos y libros sobre la impresión electrónica sobre sustratos de cristal, metal, papel o polímeros [17, 125]. Sin embargo, el proceso se complica al enfrentarse a sustratos porosos como son los textiles.

Es muy importante que la tinta tenga buena adhesión sobre el sustrato que se emplee [167]. Esto se vuelve particularmente complejo en la impresión electrónica sobre tejidos en los que la porosidad intrínseca de las estructuras y las características de los textiles afectan a la difusión y a la penetración de la tinta conductora, siendo posible que se deteriore la precisión de la impresión y el rendimiento eléctrico de las pistas conductoras [168].

Según la estructura del tejido, se ha probado a través de la impresión por serigrafía, que cuanto menor sea el tamaño del poro y la rugosidad del tejido, mayor es la precisión de impresión y menor es la resistencia eléctrica de las pistas conductoras impresas [21].

En cuanto a la composición de los materiales del tejido, las fibras naturales como el algodón tienden a absorber más tinta más fácilmente que las fibras sintéticas como el poliéster, debido a las propiedades hidrofóbicas y humectantes de las fibras celulósicas [169]. En general, los materiales sintéticos tienen superficies más suaves y apretadas que ofrecen menor textura para la adhesión de la tinta [18].

En cuanto a las técnicas de impresión electrónica utilizadas, se han encontrado estudios de impresión sobre textil, pero utilizando técnicas de impresión más comunes como la inyección de tinta o la serigrafía, para obtener dispositivos

electrónicos como sensores capacitivos [170], células solares perovskitas [171], etiquetas RFID [172] o sensores analógicos con lectura con NFC como muestra la Figura 31 [173].

1.4.2. Impresión electrónica sobre textiles mediante flexografía

Como se ha explicado anteriormente, la flexografía es una técnica muy madura en la industria de artes gráficas. Sin embargo, a pesar la ventaja económica y productiva que supone el uso de la flexografía frente a otras técnicas de impresión, su incorporación en el campo de la impresión electrónica es todavía muy reciente y no hay suficientes estudios para su aplicación.

Figura 31 Impresión electrónica mediante serigrafía

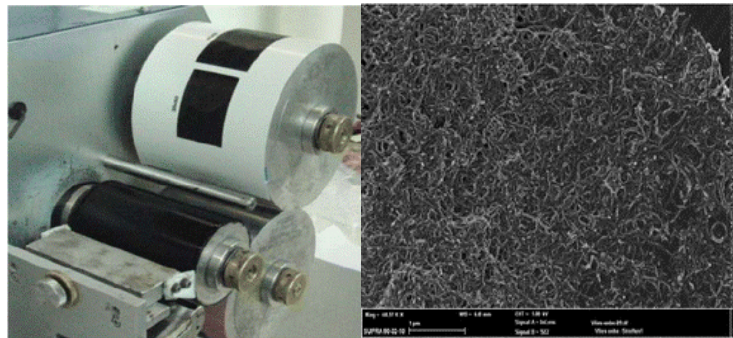


Fuente: AITEX [174]

Esto se refleja en la literatura ya que solo se encuentran unas pocas publicaciones sobre este tema y todas relacionadas con sustratos plásticos [168]–[178]. Fischer *et al*, crearon unas estructuras basadas en nanotubos de carbono (CNT) e impresas mediante flexografía (Figura 32). La tinta se generó utilizando dispersiones de nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) en agua. Los nanotubos de carbono se aplicaron a un sustrato textil hecho de microfilamentos de poliéster y poliamida para producir capas conductoras de electricidad que se pueden usar, por ejemplo, como elementos calefactores [186].

En concreto, no hay ninguna investigación sistemática sobre la relación del rendimiento electrónico de una impresión sobre textil con la estructura del tejido (por ejemplo, con el coeficiente de ligadura, con el número del hilo o con la densidad de trama) ni tampoco con la composición del tejido.

Figura 32 Impresión flexográfica sobre textil



Prensa de impresión con áreas rectangulares impresas (izquierda). Imagen SEM de una capa CNT impresa (número de capas impresas 3) sobre sustrato textil (derecha)
Fuente: [186]

2. Motivación y alcance

El sector textil y de la moda, representa un pilar económico y social en nuestro país. Las empresas del sector son un dinamizador económico fundamental, generando el 2.8% del PIB nacional y contribuyendo en un 4.1% al mercado laboral [3].

Sin embargo, la crisis de 2008 tuvo un impacto negativo estructural que ha hecho que hoy en día el sector esté lejos de las magnitudes previas a la recesión. Además, el sector se enfrenta a la actual pandemia del COVID-19, la mayor amenaza sanitaria y social de estas últimas décadas. Lo que ha provocado una caída inmediata en el volumen de ingresos.

Frente a esta situación, los expertos señalan la apuesta por la innovación como elemento clave para hacer frente a la crisis y reconstruir la economía española. El sector textil, tradicional y manufacturero, debe adaptarse para no quedarse atrás y ofrecer nuevos productos conectados y dotados de diferentes dispositivos electrónicos que ofrezcan nuevos servicios a los usuarios.

En los titulares de los periódicos del último año empiezan a aparecer noticias como *“La revolución de los tejidos inteligentes: pantallas integradas en la tela y prendas que obtienen energía del cuerpo”* [187] o *“La moda inteligente gana espacio en los armarios de los españoles”* [188].

La integración de electrónica en los tejidos para obtener nuevas funcionalidades es ya una realidad. Además, al estar compuestos parcialmente por tejido, los Textiles Inteligentes están demandados en el mercado al proporcionar a los usuarios un mayor confort, durabilidad y ligereza de peso que otros dispositivos, mientras mantienen las mismas funcionalidades electrónicas.

Figura 33 Titular de prensa

Fuente: [188]

El auge de la electrónica impresa, la tecnología que permite la fabricación de dispositivos electrónicos a través de un proceso de impresión, ofrece la posibilidad de fabricar a bajo coste grandes áreas de dispositivos electrónicos flexibles. Existen diferentes técnicas de impresión electrónica según el procedimiento utilizado y multitud de estudios sobre su aplicabilidad sobre superficies como el papel, el plástico o el cristal. También se han desarrollado dispositivos electrónicos sobre textil, pero utilizando técnicas comunes como la serigrafía.

En concreto, la técnica de la flexografía destaca entre las demás por ofrecer altas velocidades de fabricación, calidad y alta productividad a bajo coste. Es un sistema directo de impresión rotativa en el que se emplean planchas flexibles, en alto relieve, que transfieren la imagen directamente de la plancha a cualquier tipo de sustrato. Se utiliza, sobre todo, en la industria del packaging.

En el ámbito textil, sin embargo, a pesar la ventaja económica y productiva que supone el uso de la flexografía frente a otras técnicas de impresión, su incorporación en el campo de la impresión electrónica es todavía muy reciente y no hay suficientes estudios para su aplicación.

En concreto, no hay ninguna investigación sistemática sobre la relación del rendimiento electrónico de una impresión sobre textil con la estructura del tejido (por ejemplo, con el coeficiente de ligadura, con el número del hilo o con la densidad de trama) ni tampoco con la composición del tejido.

Por lo tanto, el desarrollo de esta tesis doctoral surge de la motivación de proveer al sector textil de más información y datos sobre un método asequible y productivo de producción de textiles inteligentes.

El alcance teóricamente estaba limitado a la aplicación de la técnica de la flexografía sobre sustratos textiles para el desarrollo de dispositivos electrónicos, pero por el desarrollo de la tesis, se ha debido ampliar para incluir pruebas con la técnica de la flexografía de la que se dispone más información y también pruebas con otro tipo de sustratos para poder comparar los resultados con los obtenidos sobre textiles.

Se espera que estos descubrimientos puedan servir como base y soporte para la impresión de dispositivos electrónicos sobre tejidos mediante el uso de la técnica de flexografía.

3. Objetivos

El objetivo principal de la tesis es el estudio de la novedosa aplicación de la técnica de la flexografía sobre materiales textiles. Para ello, se ha tomado como base los actuales conocimientos de la autora en el área de la electrónica impresa empleando la tecnología serigráfica.

Para lograr este fin se realizará, por un lado, el estudio de los parámetros necesarios para la aplicación de dicha tecnología en diferentes sustratos textiles. Por otro lado, se desarrollarán protocolos que permitan una perfecta integración de tintas con características eléctricas en las telas con tecnología flexográfica. Por último, se caracterizarán eléctricamente las citadas tintas una vez embebidas en el sustrato textil.

Este objetivo general se ha subdividido en cuatro objetivos parciales que han guiado el desarrollo de la tesis:

- ▶ Realizar estudios del comportamiento de diferentes sustratos textiles frente a tintas con características eléctricas y frente a los distintos parámetros de impresión flexográfica, con el objetivo de determinar los sustratos textiles más adecuados para este tipo de tecnología.
- ▶ Definir el impacto de los parámetros estructurales de un tejido de calada en la conductividad de la impresión. Los parámetros incluyen, el tipo de ligamento, el coeficiente de ligadura, el número de hilo y la densidad del tejido.
- ▶ Establecer la influencia del material de la trama en la conductividad de elementos conductores-resistivos.
- ▶ Desarrollar un sistema de medición de temperatura continuo mediante impresión electrónica sobre sustratos flexibles y elásticos mediante serigrafía para su traslación a flexografía.

4. Contexto

Parte de la investigación desarrollada en esta tesis se ha realizado dentro de AITEX, Centro Tecnológico Textil. AITEX es una asociación privada de investigación, ensayos de caracterización y certificación de artículos y materiales textiles con aplicación a muy diversos sectores como hábitat, moda e indumentaria, salud y medicina, higiene y cosmética, ropa laboral, equipos de protección individual,

deporte y ocio, transporte público, automoción, náutica, aeronáutica, obra civil y construcción, superficies deportivas, etc.

El objetivo fundamental de AITEX es generar conocimiento tecnológico y transferirlo a las empresas textiles, para que sean más competitivas, creen más valor, y tengan acceso a nuevas oportunidades de negocio. Por este motivo, desde el Instituto se fomenta la modernización y la introducción de las tecnologías emergentes y nuevas mediante la realización de proyectos de I+D y, en general, de actuaciones que contribuyen al progreso industrial del sector. Así como, proveer a las empresas de las certificaciones de producto adecuadas para que puedan competir en el mercado internacional y facilitar su entrada en nichos de mercado de alto valor añadido [174].

Esta tesis se enmarca en las dos anualidades del proyecto de investigación HYBRID.

HYBRID - Desarrollo de soluciones electrónicas híbridas sobre sustrato textil

Este proyecto cuenta con el apoyo de la Conselleria d'Economia Sostenible, Sectors Productius, Comerç i Treball de la Generalitat Valenciana, a través del IVACE. Expedientes: IMAMCI/2020/1 y IMAMCI/2021/1

Figura 34 Logo proyecto HYBRID



Fuente:[173]

La tendencia de los textiles inteligentes va dirigida a incorporar más funcionalidades de forma completamente integrada. Elementos como circuitos integrados, sensores, fuentes de luz, baterías y pequeñas computadoras son ya una realidad. Soluciones como que estos elementos se encuentren integrados de forma imperceptible facilitarán la aceptación de estos textiles.

La electrónica actual está evolucionando hacia soluciones flexibles y con diversas formas alejándose de las típicas placas de circuito impreso rígidas y cuadradas. Es una realidad emplear sustratos flexibles e incluso estirables que posibilitan que en cierta medida puedan ser doblados o incluso estirados facilitando su colocación en productos u objetos que con electrónicas anteriores no era posible. Los textiles inteligentes tienen una gran oportunidad con este tipo de soluciones, ya que les permite alcanzar un mayor nivel de funcionalidades sin renunciar al confort y a la comodidad.

Este tipo de soluciones denominadas electrónicas flexibles han sufrido grandes avances en los últimos años con la aparición de materiales específicos para su uso,

como tintas conductoras, resistivas, dieléctricas, electroluminiscentes o semiconductoras. Mediante estructuras complejas de superposición de estos materiales, con diseños y patrones concretos, es posible crear diminutos sensores o componentes para funciones específicas, como pueden ser electrodos, sensores de presión, sensores de humedad, sensores de temperatura o pequeños circuitos impresos.

No obstante, aunque los procesos de fabricación de electrónica flexible han avanzado enormemente, el nivel de integración o de reducción de tamaño de los circuitos está limitado por las propias tecnologías empleadas. En este sentido, tecnologías tradicionales como la electrónica de silicio, que lleva entre nosotros cerca de 60 años, tiene una posición ventajosa. Esta tecnología permite grandes niveles de integración, que además de reducir tamaño ofrece obtener menores consumos energéticos en funcionamiento, así como incorporar mayores funcionalidades.

La electrónica híbrida viene a combinar lo mejor de los dos mundos. Por una parte, flexibilidad y adaptabilidad a los elementos donde se necesita incorporar y, por otra parte, potencia en procesado y mínimo consumo energético. En este sentido, el proyecto HYBRID pretende seguir obteniendo conocimiento para la aplicación de tintas electrónicas con materiales orgánicos sobre sustratos flexibles y estirables incorporando pequeños componentes de silicio.

El objetivo establecido en el proyecto es la investigación y desarrollo de soluciones electrónicas híbridas combinando circuitos impresos y componentes integrados de silicio para aplicaciones textiles.

En este proyecto se desarrollarán estructuras flexibles funcionales impresas con diferentes tecnologías, para alcanzar un nivel de demostrador.

Parte de los objetivos van dirigidos a obtener sensores avanzados, que puedan ser integrados en textil, que permitan la detección de:

- ▶ Temperatura.
- ▶ Humedad.
- ▶ Biosensores.
- ▶ Sustancias tóxicas.

5. Estructura de la tesis

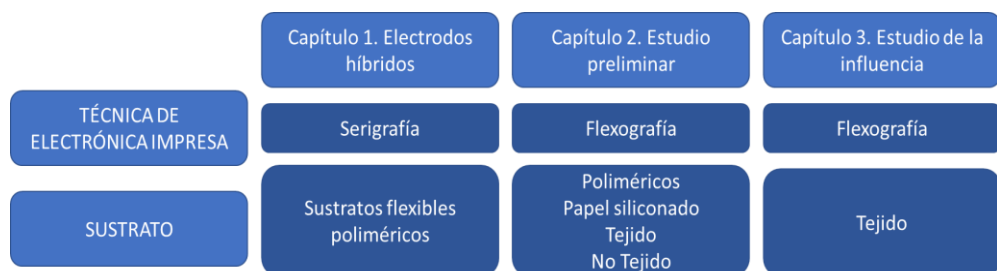
La memoria de esta tesis se presenta "por compendio de artículos" siguiendo los requisitos marcados por la Universidad Politécnica de Valencia y la Escuela de Doctorado.

De esta forma, la organización y estructura de cada capítulo de la tesis se resume a continuación:

- **Capítulo 1. Introducción.** Se proporciona una descripción del estado del arte de la electrónica impresa y su relación con los textiles inteligentes, que motiva la realización del presente trabajo. Además, se incluye una introducción básica de las diferentes tecnologías existentes, de los retos que plantea la impresión sobre textil y de por qué se selecciona la flexografía. Finalmente, se incluyen los objetivos específicos sobre los cuales se ha estructurado el desarrollo de la tesis.
- **Capítulo 2. Electrodo híbridos flexibles para la medición continua de temperatura.** Se investiga y desarrolla un sistema de medición de temperatura continuo mediante impresión electrónica por serigrafía sobre diferentes sustratos poliméricos flexibles y elásticos. Se utilizan tintas y técnicas diferentes para conseguir los indicadores potenciales que permiten el control y la evolución de la temperatura de heridas crónicas.
- **Capítulo 3. Estudio preliminar de la impresión electrónica mediante la tecnología de la flexografía sobre sustratos flexibles.** Se identifican las diferencias en el comportamiento de diferentes sustratos flexibles como base en la impresión electrónica mediante la técnica de flexografía. Incluyendo una lámina polimérica, papel siliconado, un tejido y un no-tejido.
- **Capítulo 4. Influencia de la estructura y la composición de tejidos de calada en la conductividad de impresiones electrónicas por flexografía.** Presenta el estudio de la influencia que tiene la estructura y composición de los tejidos en la conductividad final de una impresión sobre textil mediante la técnica de la flexografía. Por un lado, se define el impacto de los parámetros estructurales (el tipo de ligamento, el coeficiente de ligadura, el número de hijo y la densidad del tejido) y por otro lado se establece la influencia del material de la trama en la conductividad.
- **Capítulo 5. Discusión y conclusiones.** La tesis concluye con un apartado final, donde las conclusiones generales se resumen. Además, las limitaciones y barreras encontradas durante la investigación son analizadas, y se presentan junto con directrices para futuras investigaciones.

A continuación, se presenta un esquema para mostrar la conexión entre los diferentes capítulos de la tesis.

Figura 35 Esquema tesis doctoral



Fuente: Elaboración propia

6. Publicaciones científicas

Las siguientes publicaciones se han incluido en el compendio de este trabajo:

- ▶ Rodes-Carbonell AM, Torregrosa-Valls J, Guill Ibáñez A, Tormos Ferrando A, Juan Blanco MA, Ferriols AC. Flexible Hybrid Electrodes for Continuous Measurement of the Local Temperature in Long-Term Wounds. *Sensors*. 2021; 21(8):2741. <https://doi.org/10.3390/s21082741>
- ▶ Rodes, Ana & Ferri, Josue & García-Breijo, Eduardo & Bou-Belda, Eva. (2021). A preliminary study of printed electronics through flexography impression on flexible substrates. *Industria Textila*. 72. 133-137. 10.35530/IT.072.02.202024.
- ▶ Rodes-Carbonell AM, Ferri J, Garcia-Breijo E, Montava I, Bou-Belda E. Influence of Structure and Composition of Woven Fabrics on the Conductivity of Flexography Printed Electronics. *Polymers*. 2021; 13(18):3165. <https://doi.org/10.3390/polym13183165>

7. Contribuciones académicas

En esta sección se incluyen las contribuciones académicas de artículos, conferencias relacionadas y patentes resultantes, no incluidas en el compendio de la tesis.

Revistas académicas:

- ▶ Rodes, A., 2020. Integración de células fotovoltaicas flexibles en textiles. *Revista de Química e Industria Textil*, 235, pp.22-26.
- ▶ Ferri, J.; Moreno, J.; Rodes, A.; Garcia-Breijo, E. Learning how to print sensors onto stretchable substrates. *Technical Textiles International*. A. 2019, 28, 31-33.

Conferencias internacionales:

- ▶ Rodes, A., Ferri, J., Garcia-Breijo, E., Bou-Belda, E. (2020, Mayo). Colour fastness analysis of printed electronics through the flexography technique on textile substrates. International Conference - Innovative solutions for sustainable development of textiles and leather industry 2020., Oradea, Romania.
- ▶ Ferri, J., Moreno, J., Rodes, A., Garcia, JM., Mira, E., Garcia-Breijo, E., Llinares, R. (2020, November). Sensor and Electronic Circuits Development on Flexible Substrates through Additive Manufacturing Technologies for

Textile Applications. The Fifth International Conference on Advances in Sensors, Actuators, Metering and Sensing (ALLSENSORS 2020)

- ▶ Ferri, J., Moreno, J., Rodes, A., Mira, E., Garcia-Breijo, E., Llinares, R. (2018, October). Embedded Sensors on Stretchable Substrates Research Project. In 9th Workshop on Flexible & Printed Electronics Industry, Athens, Greece.
- ▶ Ferri, J., Moreno, J., Rodes, A., Garcia, JM., Mira, E., Garcia-Breijo, E., Llinares, R. (2020, Julio). Sensors and electronic circuits development printed on flexible substrates. 2nd World Conference on Advanced Materials for Defense (AuxDefense 2), Online edition.
- ▶ Ferri, J., Moreno, J., Rodes, A., Mira, E., Garcia, JM., Garcia-Breijo, E., Llinares, R. (2019, Julio). Investigación y desarrollo de sensores y circuitos electrónicos sobre sustratos flexibles mediante tecnologías de fabricación aditiva. VII Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias., Alcoy, España.
- ▶ Rodes, A., Moreno, J., Martínez, G., Gisbert-Paya, J. (2019, Julio). Integración de células fotovoltaicas flexibles en textiles. VII Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando sinergias., Alcoy, España.

Patentes:

- ▶ Rodes, A., Moreno, J., Martínez G. (2021) Textil Fotovoltaico Flexible. ES1277929U.
- ▶ Ferri, J., Rodes, A., Moreno, J. (2020) Dispositivo NFC flexible para la medición, almacenamiento y transmisión de datos. ES1264864.

8. Divulgación científica

Participación seleccionada en la Universitat Politècnica de València dentro del **Concurso Tu Tesis Doctoral** organizado por Crue Universidades Españolas.

El objetivo era promover la actividad divulgadora entre el estudiantado de Doctorado de las universidades españolas. Los participantes debían dar a conocer el contenido de su tesis en un máximo de 20 tuits, atendiendo a las limitaciones de esta red social.

Figura 36 Participación en concurso “Tu Tesis Doctoral”



Ana Rodes @anarodes_ · 18 abr. 2021

Nuestro objetivo es imprimir directamente sobre tejidos y crear [#SmartTextiles](#) o textiles inteligentes CONFORTABLES y ASEQUIBLES 🧠 que aporten nuevas funcionalidades a los usuarios.



1 3

Ana Rodes @anarodes_ · 18 abr. 2021

Un ejemplo de [#SmartTextile](#) es la chaqueta de [@levis_es](#) + [@GoogleES](#) que permite manejar tu móvil. 📱 Inconveniente: no está hecha por impresión sino mediante la inserción de hilos conductores y es MUUY cara 💸💸



youtube.com
Introducing Levi's® Commuter Trucker Jacket with...
Meet the jacket made to fit your life on the move.
With Jacquard technology woven in, the smart ...

1 2

Ana Rodes @anarodes_ · 18 abr. 2021

En la [#tesis](#) perseguimos imprimir electrónica como se imprimen los periódicos: en cadena, rápido y barato. Para ello debemos adaptar la técnica de [#flexografía](#) para el textil y las tintas electrónicas. 📄 ¡PAREN LAS ROTATIVAS! 🛑 Que vamos a imprimir ropa electrónica 😄



1 1

Ana Rodes @anarodes_ · 18 abr. 2021

Barrera a superar nº **1**: la porosidad de los textiles y su compatibilidad con las tintas. Si las tintas no quedan bien fijadas y de forma uniforme, los circuitos que forman no conducirán la electricidad y no conseguiremos el [#SmartTextile](#)



1 1 1

Ana Rodes @anarodes_ · 18 abr. 2021

Como dirían en [@MaestrosCostura](#): "La elección del tejido es lo más importante, no todos valen" ⚠️👉 Hay que tener en cuenta el material, la estructura, el tipo de hilo y muchas variables más 🤖🔗

1 1 1

Ana Rodes @anarodes_ · 18 abr. 2021

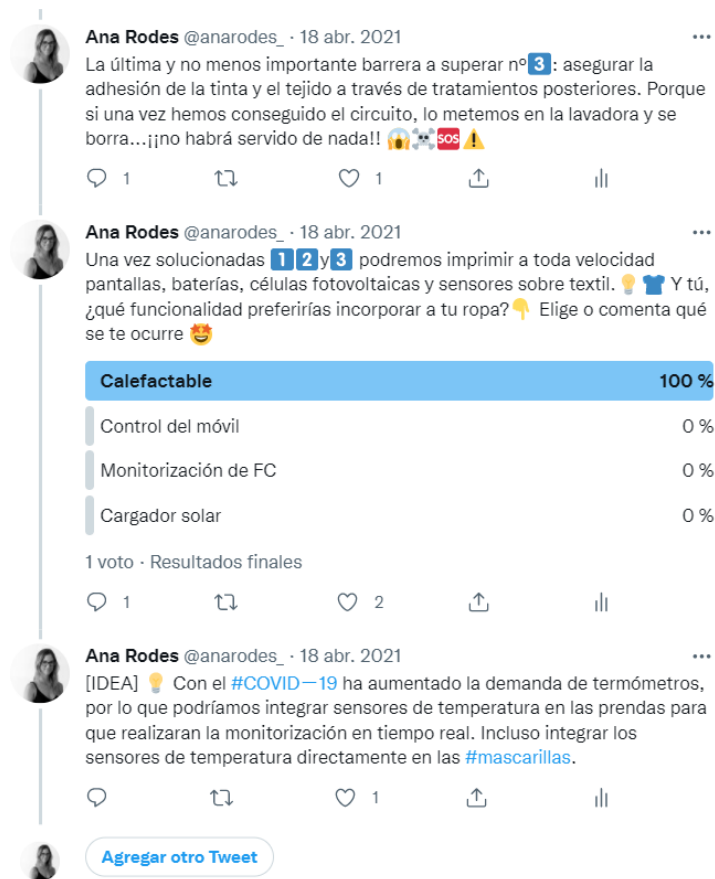
Barrera a superar nº **2**: la adaptación de la técnica de [#flexografía](#) al textil y a las tintas electrónicas. 🤖👉 Aquí podéis ver cómo nos estamos peleando con el equipo de impresión de [@RKPrintCoat](#) para las primeras pruebas.

RK PrintCoat @RKPrintCoat · 5 feb. 2020

A snapshot of [@RKPrintCoat](#) projects in the last few weeks. Installation completed at AITEX Spain for a [VCML](#) for [#Research](#) & [#Development](#) with [#printedelectronics](#) on textiles...



1 2 1



9. Referencias

- [1] Ramón Soto, “Tecvolucion,” *Nike HyperAdapt 1.0, las zapatillas que te harán sentir como Marty McFly*, Oct. 11, 2016. <https://tecvolucion.com/nike-hyperadapt-zapatillas-que-haran-sentir-como-marty-mcfly/> (accessed Apr. 29, 2022).
- [2] Dennis Green, “Nike’s new science fiction-inspired, self-lacing sneakers will cost \$720 a pair,” *INSIDER*, 2016. Accessed: Feb. 25, 2022. [Online]. Available: <https://www.businessinsider.com/nike-hyperadapt-sneakers-cost-720-dollars-2016-11>
- [3] S. L. Ernst & Young, “Informe sector moda en España. Análisis del impacto de la crisis del Covid-19,” 2020.
- [4] A. Rodes, “Integración de células fotovoltaicas flexibles en textiles,” *Revista de Química e Industria Textil*, vol. 235, pp. 22–26, Dec. 2020.
- [5] W. Kim *et al.*, “Reliable Actual Fabric-Based Organic Light-Emitting Diodes: Toward a Wearable Display,” *Advanced Electronic Materials*, vol. 2, no. 11, 2016, doi: 10.1002/aelm.201600220.

- [6] D. H. Cho *et al.*, “Flexible integrated OLED substrates prepared by printing and plating process,” *Organic Electronics*, vol. 50, pp. 170–176, 2017, doi: 10.1016/j.orgel.2017.07.041.
- [7] D. Zhao *et al.*, “5.5 inch full screen flexible high-resolution OLED display fabricated by ink jet printing method,” *Digest of Technical Papers - SID International Symposium*, vol. 50, no. Book 2, pp. 945–948, 2019, doi: 10.1002/sdtp.13081.
- [8] L. Zhou *et al.*, “Screen-Printed Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene):Poly(Styrenesulfonate) Grids as ITO-Free Anodes for Flexible Organic Light-Emitting Diodes,” *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 11, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1002/adfm.201705955.
- [9] J. B. Preinfalk *et al.*, “Large-Area Screen-Printed Internal Extraction Layers for Organic Light-Emitting Diodes,” *ACS Photonics*, vol. 4, no. 4, pp. 928–933, 2017, doi: 10.1021/acsp Photonics.6b01027.
- [10] D. Han, Y. Khan, K. Gopalan, A. Pierre, and A. C. Arias, “Emission Area Patterning of Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs) via Printed Dielectrics,” *Advanced Functional Materials*, vol. 28, no. 37, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1002/adfm.201802986.
- [11] A. Satharasinghe, T. Hughes-Riley, and T. Dias, “A review of solar energy harvesting electronic textiles,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 20, 2020, doi: 10.3390/s20205938.
- [12] C. K. Cho, W. J. Hwang, K. Eun, S. H. Choa, S. I. Na, and H. K. Kim, “Mechanical flexibility of transparent PEDOT:PSS electrodes prepared by gravure printing for flexible organic solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 12, pp. 3269–3275, 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2011.07.009.
- [13] N. Ikeda, T. Koganezawa, D. Kajiya, and K. I. Saitow, “Performance of Si/PEDOT:PSS Hybrid Solar Cell Controlled by PEDOT:PSS Film Nanostructure,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 120, no. 34, pp. 19043–19048, 2016, doi: 10.1021/acs.jpcc.6b07101.
- [14] X. Fan, J. Wang, H. Wang, X. Liu, and H. Wang, “Bendable ITO-free Organic Solar Cells with Highly Conductive and Flexible PEDOT:PSS Electrodes on Plastic Substrates,” *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 7, no. 30, pp. 16287–16295, 2015, doi: 10.1021/acsami.5b02830.
- [15] L. Hu, J. Song, X. Yin, Z. Su, and Z. Li, “Research progress on polymer solar cells based on PEDOT: PSS electrodes,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.3390/polym12010145.

- [16] L. V. Kayser and D. J. Lipomi, "Stretchable Conductive Polymers and Composites Based on PEDOT and PEDOT:PSS," *Advanced Materials*, vol. 31, no. 10, 2019, doi: 10.1002/adma.201806133.
- [17] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, "Flexible, organic solar cell modul," *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Website*. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/photovoltaics/perovskite-and-organic-photovoltaics/organic-solar-cells-and-modules.html> (accessed Apr. 29, 2022).
- [18] S. G. R. Avuthu, M. Gill, N. Ghalib, M. Sussman, G. Wable, and J. Richstein, "AN INTRODUCTION TO THE PROCESS OF PRINTED ELECTRONICS".
- [19] D. L. Chandler, "While you're up, print me a solar cell," *MIT News*, Jul. 11, 2011. <https://news.mit.edu/2011/printable-solar-cells-0711> (accessed Mar. 04, 2022).
- [20] "The Nobel Prize in Chemistry 2000," *The Nobel Prize*, Oct. 10, 2000. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2000/press-release/> (accessed Mar. 04, 2022).
- [21] S. M. F. Cruz, L. A. Rocha, and J. C. Viana, "Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics," in *Flexible Electronics*, 2018. doi: 10.5772/intechopen.76161.
- [22] K. B. Biji, C. N. Ravishankar, C. O. Mohan, and T. K. Srinivasa Gopal, "Smart packaging systems for food applications: a review," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 52, no. 10. 2015. doi: 10.1007/s13197-015-1766-7.
- [23] P. Yang, P. Sun, and W. Mai, "Electrochromic energy storage devices," *Materials Today*, vol. 19, no. 7. 2016. doi: 10.1016/j.mattod.2015.11.007.
- [24] J. Park *et al.*, "Highly Customizable All Solution-Processed Polymer Light Emitting Diodes with Inkjet Printed Ag and Transfer Printed Conductive Polymer Electrodes," *Advanced Functional Materials*, vol. 1902412, 2019, doi: 10.1002/adfm.201902412.
- [25] M. Mizukami *et al.*, "Flexible Organic Light-Emitting Diode Displays Driven by Inkjet-Printed High-Mobility Organic Thin-Film Transistors," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 1, pp. 39–42, 2018, doi: 10.1109/LED.2017.2776296.
- [26] J. Lee *et al.*, "Reliable and uniform thin-film transistor arrays based on inkjet-printed polymer semiconductors for full color reflective displays," *Advanced Materials*, vol. 25, no. 41, pp. 5886–5892, 2013, doi: 10.1002/adma.201301257.

- [27] M. Ryu, J. Kim, S. Lee, J. Kim, and T. Song, "Stretchable and Transparent Paper Based on PDMS–CNC Composite for Direct Printing," *Advanced Materials Technologies*, vol. 6, no. 7, 2021, doi: 10.1002/admt.202100156.
- [28] T. M. Fernandez-Carames and P. Fraga-Lamas, "A Review on Human-Centered IoT-Connected Smart Labels for the Industry 4.0," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 25939–25957, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2833501.
- [29] L. Yu, Y. Feng, L. Yao, R. H. Soon, J. C. Yeo, and C. T. Lim, "Dual-Core Capacitive Microfiber Sensor for Smart Textile Applications," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 11, no. 36, pp. 33347–33355, Sep. 2019, doi: 10.1021/acami.9b10937.
- [30] X. Li, K. H. Koh, M. Farhan, and K. W. C. Lai, "An ultraflexible polyurethane yarn-based wearable strain sensor with a polydimethylsiloxane infiltrated multilayer sheath for smart textiles," *Nanoscale*, vol. 12, no. 6, pp. 4110–4118, 2020, doi: 10.1039/c9nr09306k.
- [31] D. Maity, K. Rajavel, and R. T. Rajendra Kumar, "MWCNT enabled smart textiles based flexible and wearable sensor for human motion and humidity monitoring," *Cellulose*, vol. 28, no. 4, pp. 2505–2520, 2021, doi: 10.1007/s10570-020-03617-5.
- [32] Y. Koyama, "Monitoring test for bed care motion using smart textiles embedding a hetero-core optical fiber sensor," *2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics, GCCE 2020*, pp. 553–554, 2020, doi: 10.1109/GCCE50665.2020.9291849.
- [33] S. Seipel, J. Yu, A. P. Periyasamy, M. Viková, M. Vik, and V. A. Nierstrasz, "Characterization and optimization of an inkjet-printed smart textile UV-sensor cured with UV-LED light," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 254, no. 7, pp. 8–11, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/254/7/072023.
- [34] J. Zhang, G. Y. Tian, A. M. J. Marindra, A. I. Sunny, and A. B. Zhao, "A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 2. 2017. doi: 10.3390/s17020265.
- [35] Y. Wang *et al.*, "Flexible RFID Tag Metal Antenna on Paper-Based Substrate by Inkjet Printing Technology," *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 29, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1002/adfm.201902579.
- [36] R. Singh, E. Singh, and H. S. Nalwa, "Inkjet printed nanomaterial based flexible radio frequency identification (RFID) tag sensors for the internet of nano things," *RSC Advances*, vol. 7, no. 77, pp. 48597–48630, 2017, doi: 10.1039/c7ra07191d.

- [37] C. L. Baumbauer *et al.*, “Printed, flexible, compact UHF-RFID sensor tags enabled by hybrid electronics,” *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-73471-9.
- [38] B. Zhang, X. Tang, J. Zhang, C. Liu, D. He, and Z. P. Wu, “Long read range and flexible UHF RFID tag antenna made of high conductivity graphene-based film,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1002/mmce.21993.
- [39] K. Rajan, E. Garofalo, and A. Chiolerio, “Wearable intrinsically soft, stretchable, flexible devices for memories and computing,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 2, pp. 1–16, 2018, doi: 10.3390/s18020367.
- [40] G. Casula *et al.*, “A flexible organic memory device with a clearly disclosed resistive switching mechanism,” *Organic Electronics*, vol. 64, no. July 2018, pp. 209–215, 2019, doi: 10.1016/j.orgel.2018.10.018.
- [41] X. Chen, X. Han, and Q. D. Shen, “PVDF-Based Ferroelectric Polymers in Modern Flexible Electronics,” *Advanced Electronic Materials*, vol. 3, no. 5, 2017, doi: 10.1002/aelm.201600460.
- [42] J. Xu, Y. Fang, and J. Chen, “Wearable Biosensors for Non-Invasive Sweat Diagnostics,” *Biosensors 2021, Vol. 11, Page 245*, vol. 11, no. 8, p. 245, Jul. 2021, doi: 10.3390/BIOS11080245.
- [43] G. Vavasour, O. M. Giggins, J. Doyle, and D. Kelly, “How wearable sensors have been utilised to evaluate frailty in older adults: a systematic review,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2021 18:1*, vol. 18, no. 1, pp. 1–20, Jul. 2021, doi: 10.1186/S12984-021-00909-0.
- [44] M. Surya, S. Singh, R. Gorade, M. Mhatre, and S. Naik, “Review Paper on Smart Health Safety Device,” *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.48175/568.
- [45] S. Khan, S. Ali, and A. Bermak, “Recent developments in printing flexible and wearable sensing electronics for healthcare applications,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 5. 2019. doi: 10.3390/s19051230.
- [46] A. Hatamie *et al.*, “Review—Textile Based Chemical and Physical Sensors for Healthcare Monitoring,” *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 3, p. 037546, Jan. 2020, doi: 10.1149/1945-7111/AB6827.
- [47] M. Ha, S. Lim, and H. Ko, “Wearable and flexible sensors for user-interactive health-monitoring devices,” *Journal of Materials Chemistry B*, vol. 6, no. 24. 2018. doi: 10.1039/c8tb01063c.

- [48] C. Cano-Raya, Z. Z. Denchev, S. F. Cruz, and J. C. Viana, "Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics – A review," *Applied Materials Today*, vol. 15. 2019. doi: 10.1016/j.apmt.2019.02.012.
- [49] W. Raza *et al.*, "Recent advancements in supercapacitor technology," *Nano Energy*, vol. 52. 2018. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.08.013.
- [50] Z. Gao, Y. Zhang, N. Song, and X. Li, "Towards flexible lithium-sulfur battery from natural cotton textile," *Electrochimica Acta*, vol. 246, pp. 507–516, 2017, doi: 10.1016/j.electacta.2017.06.069.
- [51] L. Yin *et al.*, "High Performance Printed AgO-Zn Rechargeable Battery for Flexible Electronics," *Joule*, vol. 5, no. 1, pp. 228–248, 2021, doi: 10.1016/j.joule.2020.11.008.
- [52] Z. Guo, Y. Ma, X. Dong, J. Huang, Y. Wang, and Y. Xia, "An Environmentally Friendly and Flexible Aqueous Zinc Battery Using an Organic Cathode," *Angewandte Chemie*, vol. 130, no. 36, pp. 11911–11915, 2018, doi: 10.1002/ange.201807121.
- [53] J. Chen *et al.*, "A vertical graphene enhanced Zn-MnO₂ flexible battery towards wearable electronic devices," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 9, no. 1, pp. 575–584, 2021, doi: 10.1039/d0ta08775k.
- [54] M. Stoppa and A. Chiolerio, *Wearable electronics and smart textiles: A critical review*, vol. 14, no. 7. MDPI AG, 2014, pp. 11957–11992.
- [55] C. Cheng, J. Xu, W. Gao, S. Jiang, and R. Guo, "Preparation of flexible supercapacitor with RGO/Ni-MOF film on Ni-coated polyester fabric," *Electrochimica Acta*, vol. 318, pp. 23–31, 2019, doi: 10.1016/j.electacta.2019.06.055.
- [56] N. Wang *et al.*, "Integrated flexible supercapacitor based on poly (3, 4-ethylene dioxothiophene) deposited on Au/porous polypropylene film/Au," *Journal of Power Sources*, vol. 395, no. November 2017, pp. 228–236, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.05.074.
- [57] M. Areir, Y. Xu, D. Harrison, and J. Fyson, "3D printing of highly flexible supercapacitor designed for wearable energy storage," *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, vol. 226, no. August, pp. 29–38, 2017, doi: 10.1016/j.mseb.2017.09.004.
- [58] V. Rajendran, A. M. V. Mohan, M. Jayaraman, and T. Nakagawa, "All-printed, interdigitated, freestanding serpentine interconnects based flexible solid state supercapacitor for self powered wearable electronics," *Nano Energy*, vol. 65, no. June, p. 104055, 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2019.104055.

- [59] Y. Ko, M. Kwon, W. K. Bae, B. Lee, S. W. Lee, and J. Cho, “Flexible supercapacitor electrodes based on real metal-like cellulose papers/639/4077/4079/4105/639/301/299/1013 article,” *Nature Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 1–10, 2017, doi: 10.1038/s41467-017-00550-3.
- [60] R. Kumar, J. Shin, L. Yin, J. M. You, Y. S. Meng, and J. Wang, “All-Printed, Stretchable Zn-Ag₂O Rechargeable Battery via Hyperelastic Binder for Self-Powering Wearable Electronics,” *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 8, 2017, doi: 10.1002/aenm.201602096.
- [61] A. A. Tyuftin and J. P. Kerry, “Review of surface treatment methods for polyamide films for potential application as smart packaging materials: surface structure, antimicrobial and spectral properties,” *Food Packaging and Shelf Life*, vol. 24, no. January, p. 100475, 2020, doi: 10.1016/j.fpsl.2020.100475.
- [62] F. Mustafa and S. Andreescu, “Chemical and biological sensors for food-quality monitoring and smart packaging,” *Foods*, vol. 7, no. 10, 2018, doi: 10.3390/foods7100168.
- [63] I. Ahmed *et al.*, “An overview of smart packaging technologies for monitoring safety and quality of meat and meat products,” *Packaging Technology and Science*, vol. 31, no. 7, pp. 449–471, 2018, doi: 10.1002/pts.2380.
- [64] G. Wang *et al.*, “Verifiable smart packaging with passive RFID,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 18, no. 5, pp. 1217–1230, 2019, doi: 10.1109/TMC.2018.2852637.
- [65] S. Chen, S. Brahma, J. Mackay, C. Cao, and B. Aliakbarian, “The role of smart packaging system in food supply chain,” *Journal of Food Science*, vol. 85, no. 3, pp. 517–525, 2020, doi: 10.1111/1750-3841.15046.
- [66] “SAMSUNG,” *Los móviles plegables han llegado para quedarse*, 2022. <https://www.samsung.com/es/business/insights/moviles-plegables-presente-y-futuro/> (accessed Apr. 29, 2022).
- [67] H. Shen *et al.*, “Wearable Carbon Nanotube Devices for Sensing,” *Industrial Applications of Carbon Nanotubes*, pp. 179–199, 2017, doi: 10.1016/B978-0-323-41481-4.00007-1.
- [68] N. Karim, S. Afroj, S. Tan, K. S. Novoselov, and S. G. Yeates, “All Inkjet-Printed Graphene-Silver Composite Ink on Textiles for Highly Conductive Wearable Electronics Applications,” *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-44420-y.

- [69] N. A. Choudhry, L. Arnold, A. Rasheed, I. A. Khan, and L. Wang, "Textronics- A Review of Textile-Based Wearable Electronics," 2021, doi: 10.1002/adem.202100469.
- [70] "Clasificación y aplicación de textiles de tejido inteligente," *Testex*, Nov. 25, 2022. <https://www.testextextile.com/es/clasificaci%C3%B3n-y-aplicaci%C3%B3n-de-tejidos-inteligentes/> (accessed Mar. 04, 2022).
- [71] P. Mostafalu *et al.*, "Smart Bandage for Monitoring and Treatment of Chronic Wounds," *Small*, vol. 14, no. 33, 2018, doi: 10.1002/sml.201703509.
- [72] N. Molinaro *et al.*, "Wearable textile based on silver plated knitted sensor for respiratory rate monitoring," in *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 2018, vol. 2018-July. doi: 10.1109/EMBC.2018.8512958.
- [73] G. Mann and G. Oatley, "Positive design of smart interactive fabric artifacts for people with dementia," 2017. doi: 10.1109/SeGAH.2017.7939257.
- [74] R. Costa *et al.*, "SmartLife smart clothing gamification to promote energy-related behaviours among adolescents," in *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering, Technology and Innovation Management Beyond 2020: New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC 2017 - Proceedings*, 2018, vol. 2018-January. doi: 10.1109/ICE.2017.8280058.
- [75] H. Shi, H. Zhao, Y. Liu, W. Gao, and S. C. Dou, "Systematic analysis of a military wearable device based on a multi-level fusion framework: Research directions," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 12. 2019. doi: 10.3390/s19122651.
- [76] R. Nayak, L. Wang, and R. Padhye, "Electronic textiles for military personnel," in *Electronic Textiles: Smart Fabrics and Wearable Technology*, 2015. doi: 10.1016/B978-0-08-100201-8.00012-6.
- [77] E. Drean, L. Schacher, D. Adolphe, and F. Bauer, "Smart textiles for automotive: Application to airbag development," *Experimental Techniques*, vol. 32, no. 4, pp. 44–48, Jul. 2008, doi: 10.1111/J.1747-1567.2008.00317.X.
- [78] I. Gehrke, Vadim. Tenner, V. (Doctor of engineering) Lutz, D. Schmelzeisen, and T. Gries, "Smart textiles production : overview of materials, sensor and production technologies for industrial smart textiles," p. 192.
- [79] N. Gupta *et al.*, "Design and Evaluation of a Textile-Integrated GPS Receiver," *2016 Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2016 - Proceedings*, vol. 82, no. Nrsc, 2016.

- [80] M. Klemm and G. Troester, "Textile UWB Antennas for Wireless Body Area Networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 11, 2006, doi: 10.1109/TAP.2006.883978.
- [81] A. Soroudi, N. Hernández, J. Wipenmyr, and V. Nierstrasz, "Surface modification of textile electrodes to improve electrocardiography signals in wearable smart garment," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 30, no. 17, 2019, doi: 10.1007/s10854-019-02047-9.
- [82] C. R. Merritt, H. T. Nagle, and E. Grant, "Textile-based capacitive sensors for respiration monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 1, 2009, doi: 10.1109/JSEN.2008.2010356.
- [83] D. Marculescu *et al.*, "Electronic textiles: A platform for pervasive computing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 12, pp. 1995–2016, 2003, doi: 10.1109/JPROC.2003.819612.
- [84] I. Locher, T. Kirstein, and G. Tröster, "Routing Methods Adapted to e-Textiles," *Proceedings of 37th international Symposium on Microelectronics (IMAPS 2004)*, 2004.
- [85] I. Locher and G. Tröster, "Fundamental building blocks for circuits on textiles," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 30, no. 3, pp. 541–550, 2007, doi: 10.1109/TADVP.2007.898636.
- [86] H. Kim, Y. Kim, B. Kim, and H. J. Yoo, "A wearable fabric computer by planar-fashionable circuit board technique," *Proceedings - 2009 6th International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks, BSN 2009*, pp. 282–285, 2009, doi: 10.1109/BSN.2009.51.
- [87] L. Buechley and M. Eisenberg, "Fabric PCBs, electronic sequins, and socket buttons: Techniques for e-textile craft," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 13, no. 2, pp. 133–150, 2009, doi: 10.1007/s00779-007-0181-0.
- [88] E. P. Simon, C. Kallmayer, M. Schneider-Ramelow, and K. D. Lang, "Development of a multi-terminal crimp package for smart textile integration," *2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference, ESTC 2012*, 2012, doi: 10.1109/ESTC.2012.6542057.
- [89] J. Vanfleteren, "Stretchable Electronics for Smart Textiles," p. 98, 2012.
- [90] F. Bossuyt, T. Vervust, and J. Vanfleteren, "Stretchable electronics technology for large area applications: Fabrication and mechanical characterization," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 229–235, 2013, doi: 10.1109/TCPMT.2012.2185792.

- [91] L. M. Castano and A. B. Flatau, "Smart fabric sensors and e-textile technologies: A review," *Smart Materials and Structures*, vol. 23, no. 5, 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/5/053001.
- [92] M. Varga and G. Tröster, "Designing an interface between the textile and electronics using e-textile composites," *Proceedings - International Symposium on Wearable Computers, ISWC*, pp. 255–260, 2014, doi: 10.1145/2641248.2666717.
- [93] T. Dias and A. Ratnayake, *Integration of micro-electronics with yarns for smart textiles*. Elsevier Ltd., 2015. doi: 10.1016/B978-0-08-100201-8.00006-0.
- [94] A. Komolafe *et al.*, "Integrating Flexible Filament Circuits for E-Textile Applications," *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, no. 7, 2019, doi: 10.1002/admt.201900176.
- [95] P. R. Russo and N. Gershenfeld, "E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing," vol. 39, 2000.
- [96] D. Cottet, J. Grzyb, T. Kirstein, and G. Tröster, "Electrical Characterization of Textile Transmission Lines," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 26, no. 2, pp. 182–190, 2003, doi: 10.1109/TADVP.2003.817329.
- [97] S. Seyedin, J. M. Razal, P. C. Innis, A. Jeiranikhameneh, S. Beirne, and G. G. Wallace, "Knitted Strain Sensor Textiles of Highly Conductive All-Polymeric Fibers," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 7, no. 38, pp. 21150–21158, 2015, doi: 10.1021/acsami.5b04892.
- [98] A. Maziz, A. Concas, A. Khaldi, J. Stålhand, N. K. Persson, and E. W. H. Jager, "Knitting and weaving artificial muscles," *Science Advances*, vol. 3, no. 1, pp. 1–12, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1600327.
- [99] J. Ou, D. Oran, D. D. Haddad, J. Paradiso, and H. Ishii, "SensorKnit: Architecting Textile Sensors with Machine Knitting," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1089/3dp.2018.0122.
- [100] W. Fan *et al.*, "Machine-knitted washable sensor array textile for precise epidermal physiological signal monitoring," *Science Advances*, vol. 6, no. 11, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1126/sciadv.aay2840.
- [101] G. F. Eichinger, K. Baumann, T. Martin, and M. Jones, "Using a PCB layout tool to create embroidered circuits," *Proceedings - International Symposium on Wearable Computers, ISWC*, pp. 105–106, 2007, doi: 10.1109/ISWC.2007.4373789.
- [102] T. Linz, C. Kallmayer, R. Aschenbrenner, and H. Reichl, "Embroidering electrical interconnects with conductive yarn for the integration of flexible

- electronic modules into fabric,” *Proceedings - International Symposium on Wearable Computers, ISWC*, vol. 2005, no. March 2014, pp. 86–89, 2005, doi: 10.1109/ISWC.2005.19.
- [103] C. Zeagler, S. Gilliland, H. Profita, and T. Starner, “Textile interfaces: Embroidered jog-wheel, beaded tilt sensor, twisted pair ribbon, and sound sequins,” *Proceedings - International Symposium on Wearable Computers, ISWC*, pp. 60–63, 2012, doi: 10.1109/ISWC.2012.29.
- [104] M. Hasani, A. Vena, L. Sydanheimo, L. Ukkonen, and M. M. Tentzeris, “Implementation of a dual-interrogation-mode embroidered RFID-Enabled strain sensor,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1272–1275, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2283539.
- [105] V. Mecnika, M. Hoerr, I. Krievins, S. Jockenhoevel, and T. Gries, “Technical Embroidery for Smart Textiles: Review,” *Materials Science. Textile and Clothing Technology*, vol. 9, no. November, p. 56, Mar. 2015, doi: 10.7250/mstct.2014.009.
- [106] AITEX, “E-BRODER. Investigación y desarrollo de textiles inteligentes empleando tecnología de bordado para aplicaciones textiles para tapicería, decoración y contract (2018).” 2018.
- [107] K. Peppler and D. Glosson, “Stitching Circuits: Learning About Circuitry Through E-textile Materials,” *Journal of Science Education and Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 751–763, 2013, doi: 10.1007/s10956-012-9428-2.
- [108] R. Aigner, A. Pointner, T. Preindl, P. Parzer, and M. Haller, “Embroidered Resistive Pressure Sensors: A Novel Approach for Textile Interfaces,” *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2020*, doi: 10.1145/3313831.3376305.
- [109] T. Koshi, K. I. Nomura, and M. Yoshida, “Electronic component mounting for durable e-textiles: Direct soldering of components onto textile-based deeply permeated conductive patterns,” *Micromachines (Basel)*, vol. 11, no. 2, pp. 19–21, 2020, doi: 10.3390/mi11020209.
- [110] S. Shin, B. Kim, Y. K. Son, J. E. Kim, and I. Y. Cho, “A flexible textile wristwatch using Transfer Printed Textile Circuit technique,” *Digest of Technical Papers - IEEE International Conference on Consumer Electronics*, pp. 21–22, 2012, doi: 10.1109/ICCE.2012.6161719.
- [111] Y. L. Zheng *et al.*, “Unobtrusive Sensing and Wearable Devices for Health Informatics,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 61, no. 5, pp. 1538–1554, 2014, doi: 10.1109/TBME.2014.2309951.

- [112] E. Garcia-Breijo, G. Prats-Boluda, J. V. Lidon-Roger, Y. Ye-Lin, and J. Garcia-Casado, "A comparative analysis of printing techniques by using an active concentric ring electrode for bioelectrical recording," *Microelectronics International*, vol. 32, no. 2, pp. 103–107, 2015, doi: 10.1108/MI-03-2015-0021.
- [113] D. A. Hardy *et al.*, "Automated insertion of package dies onto wire and into a textile yarn sheath," *Microsystem Technologies*, vol. 0123456789, 2019, doi: 10.1007/s00542-019-04361-y.
- [114] K. Klamka, R. Dachzelt, and J. Steimle, "Demonstrating rapid iron-on user interfaces: Hands-on fabrication of interactive textile prototypes," *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1145/3334480.3383139.
- [115] B. Mohamadzade, R. M. Hashmi, R. B. V. B. Simorangkir, R. Gharaei, S. U. Rehman, and Q. H. Abbasi, "Recent advances in fabrication methods for flexible antennas in wearable devices: State of the art," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 10, 2019, doi: 10.3390/s19102312.
- [116] S. Micus, M. Haupt, and G. T. Gresser, "Soldering electronics to smart textiles by pulsed Nd:YAG laser," *Materials*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/ma13112429.
- [117] J. Ferri, J. V. Lidón-Roger, J. Moreno, G. Martinez, and E. Garcia-Breijo, "A wearable textile 2D touchpad sensor based on screen-printing technology," *Materials*, vol. 10, no. 12, 2017, doi: 10.3390/ma10121450.
- [118] P. R. Russo and N. Gershenfeld, "E-broidery: Design and fabrication of textile-based computing," vol. 39, 2000.
- [119] V. Sanchez, C. J. Walsh, and R. J. Wood, "Textile Technology for Soft Robotic and Autonomous Garments," *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 6, pp. 1–55, 2021, doi: 10.1002/adfm.202008278.
- [120] R. Wu *et al.*, "All-Textile Electronic Skin Enabled by Highly Elastic Spacer Fabric and Conductive Fibers," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 11, no. 36, pp. 33336–33346, 2019, doi: 10.1021/acsami.9b10928.
- [121] M. Hamedi, R. Forchheimer, and O. Inganäs, "Towards woven logic from organic electronic fibres," *Nature Materials*, vol. 6, no. 5, pp. 357–362, 2007, doi: 10.1038/nmat1884.
- [122] S. de Mulatier, M. Nasreldin, R. Delattre, M. Ramuz, and T. Djenizian, "Electronic Circuits Integration in Textiles for Data Processing in Wearable Technologies," *Advanced Materials Technologies*, vol. 3, no. 10, pp. 1–26, 2018, doi: 10.1002/admt.201700320.

- [123] Y. J. Yun, W. G. Hong, N. J. Choi, B. H. Kim, Y. Jun, and H. K. Lee, "Ultrasensitive and highly selective graphene-based single yarn for use in wearable gas sensor," *Scientific Reports*, vol. 5, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1038/srep10904.
- [124] O. Atalay, "Textile-based, interdigital, capacitive, soft-strain sensor for wearable applications," *Materials*, vol. 11, no. 5, May 2018, doi: 10.3390/ma11050768.
- [125] J. Lee *et al.*, "Highly Sensitive Multifilament Fiber Strain Sensors with Ultrabroad Sensing Range for Textile Electronics," *ACS Nano*, vol. 12, no. 5, pp. 4259–4268, 2018, doi: 10.1021/acsnano.7b07795.
- [126] K. Qi *et al.*, "Core-sheath nanofiber yarn for textile pressure sensor with high pressure sensitivity and spatial tactile acuity," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 561, pp. 93–103, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2019.11.059.
- [127] T. Q. Trung, H. S. Le, T. M. L. Dang, S. Ju, S. Y. Park, and N. E. Lee, "Freestanding, Fiber-Based, Wearable Temperature Sensor with Tunable Thermal Index for Healthcare Monitoring," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 7, no. 12, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1002/adhm.201800074.
- [128] R. E. Oweung, M. J. Panzer, and S. R. Sonkusale, "Colorimetric Gas Sensing Washable Threads for Smart Textiles," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-42054-8.
- [129] F. W. Zeng, X. X. Liu, D. Diamond, and K. T. Lau, "Humidity sensors based on polyaniline nanofibres," *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 143, no. 2, pp. 530–534, 2010, doi: 10.1016/j.snb.2009.09.050.
- [130] J. W. Han, B. Kim, J. Li, and M. Meyyappan, "A carbon nanotube based ammonia sensor on cotton textile," *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 19, 2013, doi: 10.1063/1.4805025.
- [131] C. Müller *et al.*, "Woven Electrochemical Transistors on Silk Fibers," *Advanced Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 898–901, Feb. 2011, doi: 10.1002/ADMA.201003601.
- [132] M. Varga and G. Tröster, "Designing an interface between the textile and electronics using e-textile composites," in *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers Adjunct Program - ISWC '14 Adjunct*, 2014, pp. 255–260. doi: 10.1145/2641248.2666717.
- [133] C. Cano-Raya, Z. Z. Denchev, S. F. Cruz, and J. C. Viana, "Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics – A review," *Applied Materials Today*, vol. 15, 2019. doi: 10.1016/j.apmt.2019.02.012.

- [134] B. T. Mogg, T. Claypole, D. Deganello, and C. Phillips, "Flexographic printing of ultra-thin semiconductor polymer layers," *Translational Materials Research*, vol. 3, no. 1, 2016, doi: 10.1088/2053-1613/3/1/015001.
- [135] R. R. Søndergaard, M. Hösel, and F. C. Krebs, "Roll-to-Roll fabrication of large area functional organic materials," *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, vol. 51, no. 1. 2013. doi: 10.1002/polb.23192.
- [136] Alex S. Jones, "The New Newspaper War: Flexo vs. Offset," *The New York Times*, 1989. Accessed: Feb. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/1989/07/24/business/the-media-business-the-new-newspaper-war-flexo-vs-offset.html>
- [137] Grafiflex SRL, "Flexografía Vs Offset," *Grafiflex*, 2021. <https://grafiflex.net/2021/03/19/flexografia-vs-offset/> (accessed Feb. 14, 2022).
- [138] J. Izdebska, *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*. 2015.
- [139] B. Auguštin, P. Miljković, and D. Valdec, "The influence of printing substrate properties on color characterization in flexography according to the ISO specifications," *Tehnički glasnik*, vol. 11, no. 3, 2017.
- [140] Z. W. Zhong, J. H. Ee, S. H. Chen, and X. C. Shan, "Parametric investigation of flexographic printing processes for R2R printed electronics," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 35, no. 5, 2020, doi: 10.1080/10426914.2020.1732411.
- [141] B. T. Mogg, T. Claypole, D. Deganello, and C. Phillips, "Flexographic printing of ultra-thin semiconductor polymer layers," *Translational Materials Research*, vol. 3, no. 1, 2016, doi: 10.1088/2053-1613/3/1/015001.
- [142] A. Blayo and B. Pineaux, "Printing processes and their potential for RFID printing," in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2005, vol. 121. doi: 10.1145/1107548.1107559.
- [143] *Flexography: Principles & Practices - Flexographic Technical Association*.
- [144] L. Basiricò, "Inkjet Printing of Organic Transistor Devices," *University of Cagliari*, no. March, 2012.
- [145] B. Polzinger *et al.*, "UV-sintering of inkjet-printed conductive silver tracks," in *2011 11th IEEE International Conference on Nanotechnology*, Aug. 2011, pp. 201–204. doi: 10.1109/NANO.2011.6144541.
- [146] "Research pe sintering of conductive inks using pulsed light," *Xenon*. <https://xenoncorp.com/printed-electronics/rd-solutions/> (accessed Mar. 04, 2022).

- [147] “Metal nano-ink sintering | Applied products of semiconductor lasers,” *Hamamatsu*. <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/lasers/applied-products-of-semiconductor-lasers/metal-nano-ink.html?https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/lasers/applied-products-of-semiconductor-lasers/metal-nano-ink/index.html&nfxsid=CjwKCAiAyPyQBhB6EiwAFUuak> (accessed Mar. 04, 2022).
- [148] M. L. Morgan, D. J. Curtis, and D. Deganello, “Control of morphological and electrical properties of flexographic printed electronics through tailored ink rheology,” *Organic Electronics*, vol. 73, 2019, doi: 10.1016/j.orgel.2019.05.027.
- [149] DUPONT, “Printed wearables: electronic inks for the wearable world.” 2014. [Online]. Available: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/DuPont-Electronic-Inks-for-the-Wearable-World.pdf>
- [150] “Novacentrix. Website,” *Flexographic Conductive Inks*. <https://www.novacentrix.com/flexographic-conductive-inks/> (accessed Apr. 29, 2022).
- [151] P. , P. Hita, “La Revolución funcional de Polímeros y Electrónica,” *Plásticos Hita*. . www.plasticoshita.com (accessed Feb. 27, 2022).
- [152] R. Bollström, D. Tobjörk, and P. Dolietis, “Roll-to-roll printed electronics on paper,” 2012.
- [153] “NAITEC. Planta piloto de impresión R2R.” 2020.
- [154] MINCOTUR, “Presentaciones sectoriales 2021: Textil y confección,” 2021. Accessed: Feb. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.mincotur.gob.es/es-es/IndicadoresyEstadisticas/Presentaciones%20sectoriales/02.%20Textil%20y%20confeccion.pdf>
- [155] McKinsey & Company, “State of Fashion 2022: An uneven recovery and new frontiers,” Dec. 2021.
- [156] “Recover.” <https://recoverfiber.com/> (accessed Mar. 01, 2022).
- [157] “Piñatex.” <https://www.ananas-anam.com/about-us/> (accessed Mar. 01, 2022).
- [158] V. Osorio, “Inditex acelera su digitalización con 2.700 millones tras entrar en pérdidas,” *Expansión*, Jun. 2020. Accessed: Mar. 01, 2022. [Online]. Available:

<https://www.expansion.com/empresas/distribucion/2020/06/11/5ee1675d468aeb3e068b45c4.html>

- [159] EOI, “EL INTERNET DE LAS COSAS COMO TECNOLOGÍA DISRUPTIVA EN LA INDUSTRIA 4.0,” 2015.
- [160] V. Galceran, “Tecnología del tejido,” 1961.
- [161] N. Hollen and J. C. Saddler, *Introducción a los textiles*, H721i Ej. 1 005250., vol. 677. Limusa, 1990.
- [162] B. Kumar and J. Hu, “Woven fabric structures and properties,” in *Engineering of High-Performance Textiles*, 2017. doi: 10.1016/B978-0-08-101273-4.00004-4.
- [163] M. Haque, M. Ruhul Amin, and M. Mahbubul Haque, “EFFECT OF WEAVE STRUCTURE ON FABRIC PROPERTIES ANNALS OF THE UNIVERSITY OF ORADEA FASCICLE OF TEXTILES, LEATHERWORK EFFECT OF WEAVE STRUCTURE ON FABRIC PROPERTIES,” 2011. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/321161966>
- [164] B. Rogina-Car, S. Kovačević, I. Schwarz, and K. Dimitrovski, “Microbial Barrier Properties of Cotton Fabric—Influence of Weave Architecture,” *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 7, p. 1570, Jul. 2020, doi: 10.3390/polym12071570.
- [165] R. Canalejas Romá, *Tejidos de calada*. Alcoy: Lloréns, DL., 1999.
- [166] K. Yang, R. Torah, Y. Wei, S. Beeby, and J. Tudor, “Waterproof and durable screen printed silver conductive tracks on textiles,” *Textile Research Journal*, vol. 83, no. 19, pp. 2023–2031, Nov. 2013, doi: 10.1177/0040517513490063.
- [167] M. Meseldžija, N. Vukić, T. Erceg, and N. Budinski, “The analysis of the substrate influence on the print quality parameters of screen-printed textile,” *VIII International Conference on Social and Technological Development*, doi: 10.7251/STED1902362M.
- [168] H. Hong, J. Hu, and X. Yan, “Effect of the basic surface properties of woven lining fabric on printing precision and electrical performance of screen-printed conductive lines,” *Textile Research Journal*, vol. 90, no. 11–12, pp. 1212–1223, Jun. 2020, doi: 10.1177/0040517519888251.
- [169] K. Agathian, L. Kannammal, B. Meenarathi, S. Kailash, and R. Anbarasan, “Synthesis, characterization and adsorption behavior of cotton fiber based Schiff base,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 107, pp. 1102–1112, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.09.086.
- [170] J. Ferri, R. Llinares Llopis, J. Moreno, J. Vicente Lidón-Roger, and E. Garcia-Breijo, “An investigation into the fabrication parameters of screen-printed

- capacitive sensors on e-textiles,” *Textile Research Journal*, vol. 90, no. 15–16, pp. 1749–1769, Aug. 2020, doi: 10.1177/0040517519901016.
- [171] C Quinto, A Linares, E Larena, and Carlos Montes, “Screen printing for perovskite solar cells metallization,” Sep. 2015.
- [172] *Chipless RFID based on RF Encoding Particle*. Elsevier, 2016. doi: 10.1016/C2015-0-01228-X.
- [173] “HYBRID – Desarrollo de soluciones electrónicas híbridas sobre sustrato textil,” *AITEX*, 2020. <https://www.aitex.es/portfolio/hybrid-desarrollo-de-soluciones-electronicas-hibridas-sobre-sustrato-textil/> (accessed Mar. 01, 2022).
- [174] “Acerca de AITEX,” *AITEX*. <https://www.aitex.es/acerca-de/> (accessed Mar. 01, 2022).
- [175] J. Benson, C. M. Fung, J. S. Lloyd, D. Deganello, N. A. Smith, and K. S. Teng, “Direct patterning of gold nanoparticles using flexographic printing for biosensing applications,” *Nanoscale Research Letters*, vol. 10, no. 1, 2015, doi: 10.1186/s11671-015-0835-1.
- [176] C. M. Fung, J. S. Lloyd, S. Samavat, D. Deganello, and K. S. Teng, “Facile fabrication of electrochemical ZnO nanowire glucose biosensor using roll to roll printing technique,” *Sensors and Actuators, B: Chemical*, vol. 247, 2017, doi: 10.1016/j.snb.2017.03.105.
- [177] J. Tian, T. Arbatan, X. Li, and W. Shen, “Liquid marble for gas sensing,” *Chemical Communications*, vol. 46, no. 26, 2010, doi: 10.1039/c001317j.
- [178] D. C. Hoekstra, K. Nickmans, J. Lub, M. G. Debije, and A. P. H. J. Schenning, “Air-curable, high-resolution patternable oxetane-based liquid crystalline photonic films via flexographic printing,” *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 11, no. 7, 2019, doi: 10.1021/acsami.8b21464.
- [179] K. Higuchi *et al.*, “High-mobility, flexible carbon nanotube thin-film transistors fabricated by transfer and high-speed flexographic printing techniques,” *Applied Physics Express*, vol. 6, no. 8, 2013, doi: 10.7567/APEX.6.085101.
- [180] A. C. Hübler, M. Bellmann, G. C. Schmidt, S. Zimmermann, A. Gerlach, and C. Haentjes, “Fully mass printed loudspeakers on paper,” *Organic Electronics*, vol. 13, no. 11, 2012, doi: 10.1016/j.orgel.2012.06.048.
- [181] D. Maddipatla *et al.*, “A novel flexographic printed strain gauge on paper platform,” 2015. doi: 10.1109/ICSENS.2015.7370606.

- [182] S. Shrestha, R. Yerramilli, and N. C. Karmakar, "Microwave performance of flexo-printed chipless RFID tags," *Flexible and Printed Electronics*, vol. 4, no. 4, 2019, doi: 10.1088/2058-8585/AB4B09.
- [183] M. Gajadhur and M. Regulska, "Mechanical and light resistance of flexographic conductive ink films intended for printed electronics," *Dyes and Pigments*, vol. 178, 2020, doi: 10.1016/j.dyepig.2020.108381.
- [184] J. Krzyżkowski, T. Dąbrowa, J. Hamerliński, and P. Śleboda, "Investigation on lineworks printed with different types of flexographic printing forms for purposes of printed electronics."
- [185] M. Â. P. R. Cerqueira, J. M. Lagaron, L. M. P. Castro, and A. A. M. de O. S. Vicente, *Nanomaterials for food packaging: Materials, processing technologies, and safety issues*. 2018. doi: 10.1016/C2016-0-01251-2.
- [186] T. Fischer, N. Wetzold, H. Elsner, L. Kroll, and A. C. Hübler, "Carbon nanotube areas - printed on textile and paper substrates," *Nanomaterials and Nanotechnology*, vol. 1, no. 1, 2011, doi: 10.5772/50946.
- [187] A. Herrero, "La revolución de los tejidos inteligentes: pantallas integradas en la tela y prendas que obtienen energía del cuerpo ," *El Mundo*, Mar. 2021. Accessed: Mar. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/ciencia/2021/03/10/6048dea8fc6c8327448b4577.html>
- [188] "La moda inteligente gana espacio en los armarios de los españoles," *ABC*, Jan. 2022. Accessed: Mar. 01, 2022. [Online]. Available: https://www.abc.es/economia/abci-moda-inteligente-gana-espacio-armarios-espanoles-202201190122_noticia.html#vca=rrss-inducido&vmc=abc-es&vso=tw&vli=noticia.fot



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Capítulo 2

Electrodos híbridos flexibles para la medición continua de temperatura

Dispositivos electrónicos impresos sobre sustratos textiles mediante la técnica de la flexografía Tesis Doctoral



Título

**Flexible Hybrid Electrodes for Continuous
Measurement of the Local Temperature in Long-
Term Wounds**

Revista

Sensors 2021, 21, 2741

Ránking

Q1

Autores

Ana María Rodes-Carbonell

Juan Torregrosa-Valls

Antonio Guill Ibáñez

Alvaro Tormos Ferrando

María Aránzazu Juan Blanco

Antonio Cebrián Ferriols.

Abstract

Long-term wounds need a continuous assessment of different biophysical parameters for their treatment, and there is a lack of affordable biocompatible devices capable of obtaining that uninterrupted flow of data. A portable prototype that allows caregivers to know the local temperature behavior of a long-term wound over time and compare it with different reference zones has been developed. Alternative flexible substrates, screen-printing techniques, polymeric inks, and an embedded system have been tested to achieve potential indicators of the status and evolution of chronic wounds. The final system is formed by temperature sensors attached to a flexible and stretchable medical-grade substrate, where silver conductive tracks have been printed as interconnections with the data-acquisition unit. In addition, a specific datalogger has been developed for this system. The whole set will enable health personnel to acquire the temperature of the wound and its surroundings in order to make decisions regarding the state and evolution of the wound.

Keywords: lower extremity wound; wound temperature; infection; inflammation; wound continuous monitoring; screen-printing; printed sensors; flexible hybrid electronics

1. Introduction

Long-term wounds represent one of the most important causes of morbidity and mortality for patients with chronic diseases such as diabetes or venous insufficiency. Likewise, those caused by physical factors like pressure, friction, or shearing are characteristic of bedridden patients [1]. Currently, these injuries are a challenge for professionals who apply advanced wound care and represent a high cost to both human and economic resources [2].

Long-term wound healing requires cellular activities that need an optimal specific environment to take place in the right form and time. Wound healing strongly depends on different biophysical parameters such as temperature or pH. The proper evolution of these parameters enables the transition through the different healing phases (hemostasis, inflammation, proliferation, and remodeling/epithelialization), thereby promoting local homeostasis. On the other hand, their alteration may result in a delay of the wound healing [3], or even in an infection by indigenous or external microorganisms. The management, treatment, and monitoring of these wounds is mainly based on clinical expertise and qualitative methods with a high subjectivity level. The evolution of these biophysical parameters is not estimated quantitatively. This is because the measuring devices only allow sporadic quantification, as they require complex calibrations with a high cost. Additionally, these measurements may be biased by a difficult anatomical morphology, the environment where they are performed, the technique, and the dimensions of the probes used.

There is currently great interest in measuring these wound characteristics, since they involve potential indicators and predictors of the evolution healing [4]. The wound anatomy needs to be locally delineated. Each anatomical region will have a meaning in the subsequent interpretation of the results obtained from the measurement of the characteristics of the wound. Wounds International divides the wound into two anatomical regions of great interest: the wound bed and the periwound skin. The wound bed is the region where there is a solution of continuity and where the tissues below the epidermis are exposed, be they subcutaneous tissue, fasciae, muscles, tendons, or bone. According to Dowsett and Hallern, the perilesional skin is considered as the distance between the wound edge and the 4 centimeters of skin that surrounds the wound-bed perimeter. This region faces a series of challenges during the wound-care process due to its influence on the healing prognosis, and therefore acquires great relevance in the objective assessment of the wound. Continuous assessment of the zone around the wound through indicators can help to make objective the abstract phenomenon of healing. Quantifying the state of the wound bed, its edge, and the state of the perilesional skin will allow caregivers to dynamically assist treatment plans and to compare results, reducing the healing time. The determination of these results is the key to the research in healthcare. All the changes achieved in

those indicators can be considered the results from the interventions over the wounds.

New organic substrates such as polyurethane (PU), polydimethylsiloxane (PDMS), polyethylene terephthalate (PET), indium and tin oxide (ITO), or polyaniline (PANi) allow circuit printing using techniques such as screen printing. This enables the development of continuous wound sensing and monitoring systems that require certain characteristics. A series of conductive tracks based on high-conductivity electronic inks are printed on these substrates by screen printing. These tracks serve as an interface between the sensor and the acquisition system. Following the same manufacturing technique, Milne in 2014 [5] and Rahimi in 2015 [6] proposed a pH measurement system printed on an ion-selective membrane, using a reference electrode composed of Ag/AgCl printed in the same way. Later, they developed a humidity sensor based on the same system of polymeric silver inks on PU [7]. This manufacturing technique used by the previous authors was characterized by Suikkola in 2016 [8]. On the other hand, authors such as Matzeu and Salvo [9,10] developed sensory-resistive sensors for continuous temperature measurement using materials such as polyimide (Kapton) and integrated graphene nanotubes. All these sensors met the requirements for reliability and flexibility, although their reuse and biocompatibility are not entirely known due to the use of components not tested in humans.

Although these technologies have points of similarity, the choice of different textiles and films provide differentiating characteristics between them. Flexible substrates like PU and PDMS can be reusable and sterilizable, as they are not associated with single-use wound dressings. They have elasticity and are adaptable to the body morphology. Furthermore, their biocompatibility has been demonstrated [11,12].

Among the measurable parameters that can be highlighted are pH and temperature, which Kassanos achieved to measure using electrochemical deposition [13,14]. There also are more complex ones, such as transepidermal water loss (TEWL). Of these, temperature is a simple parameter to interpret that can provide interesting information regarding the state of chronic wounds (CWs). The temperature in the wound bed should be between 31 and 35 °C, while in the perilesional skin it should be between 31 and 34 °C [15]. Temperatures around 33 °C are necessary for optimal cellular processes [16].

Armstrong et al. suggested that changes in the temperature gradients in different locations of the wound, compared to reference areas, are indicators of the presence of inflammation, infection and, in the absence of these, the evolution toward healing [3]. Feirheller et al. reported a connection between the increase in perilesional skin temperature regarding the bed temperature, and the presence of infection. They recommended the inclusion of the measurement of these gradients in the routine assessment of CWs [17].

Mufti [18] compared the most popular techniques, such as thermography and infrared thermometry, with four-point measurement protocols. Despite being reliable, both techniques only allowed discontinuous measurements and were influenced by the environment. In contrast, although contact thermometry is less used, it lacks some of the main limitations presented and allows continuous measurements of this parameter with an adequate system [19,20]. Objectification of the wound's assessment becomes necessary to guide the treatments. Long-term wounds are a silent epidemic with a high social, professional, and economic burden, so techniques and devices are sought to reduce costs, shorten healing time, and improve the patient's quality of life.

The ease of access and cost of manufacturing techniques mentioned above allow the manufacturing of devices able to assist in monitoring and control the status of this type of wound. The purpose of this research is to develop a continuous measurement system for temperature differentials. It will be based on flexible and elastic medical grade PU substrates that are able to adapt to the morphology of the wound. It will be marked by high autonomy, as well as low impact on the body and on the patient's mobility. With it, it will be possible to detect critical changes related to inflammation and infection that aggravate and prolong a wound.

2. Materials and Methods

2.1. Sensor Design

A prototype has been developed to be used in chronic wounds in order to gather longitudinal information about the temperature evolution. The system allows caregivers to know the behavior of the local temperature of the wound over time and to compare it with different reference areas (proximal and perilesional).

The prototype consists of two main blocks, a temperature multisensor and an electronic system for measuring, storing, and managing data. The main features of each block are detailed in Table 1.

The multisensor block comprises the sensors that will facilitate, in contact with the wound and the reference areas, the acquisition of the temperatures of interest.

The electronic system is responsible for the quantification, storage, and management of the information gathered. It will be made up of a microprocessor for the acquisition of the signal generated by the sensors, a recording unit, and the necessary components for data transmission.

Table 1. Characteristics of the prototype.

General	<p>Lightweight, small dimensions, with the ability to store information for later analysis</p> <p>Temperature sensor isolated by biocompatible systems allowing contact with healthy skin and the wound itself</p>
Sensor Block	<p>Minimal impact on the cellular processes of the skin</p> <p>Adaptable to the anatomical morphology of the wound</p> <p>Reusable by sterilization</p> <p>Biocompatible materials to minimize the risk of allergic reactions and rejections</p> <p>Simple connectivity to the acquisition system</p> <p>Durability when it is in contact with the wound</p> <p>Individual sensors per measurement point</p>
Electronic Block	<p>Small dimensions</p> <p>Lightweight</p> <p>Large data storage capacity</p> <p>Low energy consumption</p> <p>Data upload to PC via USB</p> <p>Simple software interface</p> <p>Real-time measurements</p>

2.2. Multisensors

Figure 1 shows the sensor system, and the multisensor block is detailed. This part is composed of a biocompatible flexible substrate on which conductive tracks are screen-printed using high-conductivity inks, thus connecting the temperature sensors with the connectors of the electronic system. There are four sensor elements for measuring the temperature of the wound (T_u), the periwound zone (T_p), the healthy skin as reference (T_r), and the environmental (T_a). The sensors are PDMS-coated to avoid direct contact of the sensor with the injury or the skin. The rest of the substrate is also protected with a second layer of heat-sealed PU film, thus avoiding direct contact with the conductive inks. The substrates and the silver conductive inks are flexible and stretchable, so they can be adapted to any shape and length.

For the sensor-element selection, several requirements have been considered, which are detailed in Table 2.

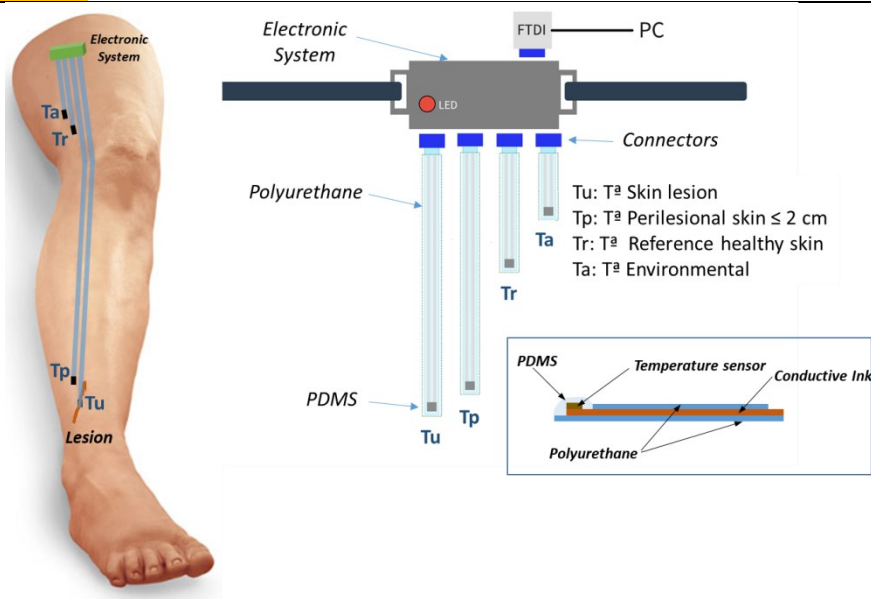
The commercial sensor model used is the NTCS0805E3104SMT from Vishay (Malvern, PA, USA). It is a negative temperature coefficient (NTC) thermistor, the main characteristics of which are shown in Table 3. The sensor encapsulation has a surface of 2.5 mm^2 and a low enough profile to avoid discomfort or injuries caused by pressure on the wound.

Table 2. Temperature sensor requirements.

Parameters	Specifications
Temperature resolution	0.1 °C
Support	Flexible and able to be adapted to the contour of the limb and the injury
Size	10 mm ² maximum
Encapsulation	Surface-mount technology (SMT)
Injury sensor location	In contact with the wound bed
Control sensor location	In contact with healthy/perilesional skin
Environmental sensor location	In the bandage, without skin contact
Power	Low energy
Material	Biocompatible

Figure 1.

Sensor system configuration. The electronic measurement, data storage, and transmission system are attached to the leg by means of an extensible tape. The different temperature sensors placed in the areas detailed in the figure are connected to this system. The entire sensor system is covered with a compression bandage (not shown in the figure)



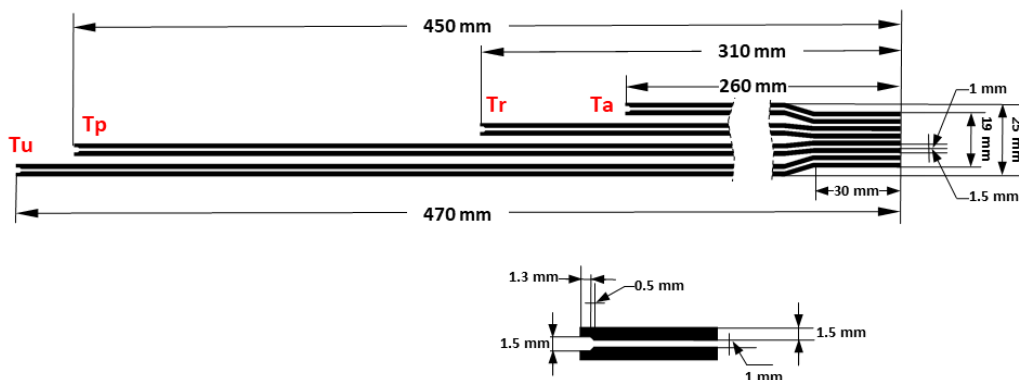
With these premises, the dimensions of the multisensor element are shown in Figure 2. The total length is 47 cm, determined by the length of the injury temperature sensor (Tu). The periwound sensor (Tp) measures 45 cm, the reference sensor (Tr) measures 31 cm, and the environmental temperature sensor (Ta) is 26 cm long. A unique eight-pin connector has been chosen to facilitate connection to the electronics. The end of the substrate has the required dimensions for the correct positioning of the connector (track size of 1.5 mm and 1 mm of pitch). The length of the connecting tracks is 30 mm. At each end where

the sensors are located, a soldering zone has been designed for the NTC with an 0805 encapsulation.

Table 3 Characteristics of the NTCS0805E3104SMT sensors

Parameter	Value
Resistance value at 25 °C (Ω)	100 k
Tolerance on R25-value (%)	1
B25/85-value (K)	3590
Tolerance on B25/85-value (%)	± 1
Maximun power dissipation (mW)	210
Response time (63.2%) 25 °C to 85 °C still air(s)	10
Dissipation factor in still air /mW/K)	3.5
Operating temperatura range (°C)	-40 to +125
Weight (mg)	8
Dimension LxWxT (mm)	2.0x1.25x0.8

Figure 2. Multisensor dimensions. The top of the figure shows the overall dimensions, and the dimensions of the temperature sensor zone are shown at the bottom.



The support where the sensors are located must be a flexible material, such as cotton textile, PU, or PDMS, which are gas-permeable and biocompatible. Cotton textiles for medical uses are widely used. The PU film has perfect characteristics for its use in medical applications: breathability, elasticity, and formability. The most important characteristic for application as a dressing is breathability and, at the same time, the ability to keep the covered area dry. PDMS is recommended for laboratory experiments and medical research that require a gas-permeable and liquid-impermeable membrane.

Three PU films and one PDMS film have been used as substrates to define which provides the best results, and later they will be validated in cotton textiles. Table 4 shows the main characteristics of the PU films used: The EU50 and EU94DS were from DelStar Technologies, Inc. (Middletown, DE, USA), the SK81SS + 06 was from Novotex Italiana SpA (Gaggiano, MI, Italy), and the film PDMS SSPM823-040-12 was from SSP, Inc. (Ballston Spa, NY, USA).

Table 4. Characteristics of the films.

	DelStar EU50	DelStar EU94DS	Novotex SK81SS+06	PDMS
Thickness (μm)	50	80	25	100
Weight (g/m^3)	55	94	1.20	1.12
MVTR * upright ($\text{g}/\text{m}^2/24 \text{ h}$)@37 °C	700	400	441	-
Tensile Strength MD ** (gf/cm)	1200	3000	3610	-
Elongation at break MD ** (%)	1000	700	511	570

* Moisture vapor transmission rate (MVTR). ** Machine direction (MD).

To print the conductive tracks on the substrate, which allow the electrical connection between the sensor and the connector, conductive silver inks (Table 5) have been screen-printed with two key features: elasticity and flexibility. PE873 from DuPont (Wilmington, DE, USA) and IPC-603X from Inkron (Kutojantie, Espoo, Finland), both with good compatibility with polymeric substrates, have been used. Neither manufacturer specifies their degree of biocompatibility.

2.1. Electronic System

Multisensor temperature measurements were carried out by an electronic system based on a microcontroller (Figure A1). The detailed circuit diagram is shown in Figure A2. It is a standalone system based on an ultralow-consumption 32-bit ARM Cortex STM32L151RB from STMicroelectronics (Geneva, Switzerland). Each of the four NTC sensors was excited by a 3 V voltage through a series resistance in a resistive divider configuration. Voltage was digitized in a 12-bit resolution ratiometric conversion (one sample per second for real-time measurements), converted to temperature, and stored in memory (one measurement per minute). Additionally, external temperature and humidity were recorded with an integrated Si7021 sensor from Silicon Laboratories Inc. (city, TX, USA). Temperatures were stored in an external flash memory using the serial peripheral interface (SPI) protocol.

2.2. Manufacturing

The manufacturing technology used was based on thick-film screen-printing technology. The screen-printing process consists of forcing pastes of different characteristics on a substrate through screens using scrapers. The openings in the screen define the pattern to be printed on the substrate. The final thickness of the pastes can be adjusted by varying the thickness of the screens.

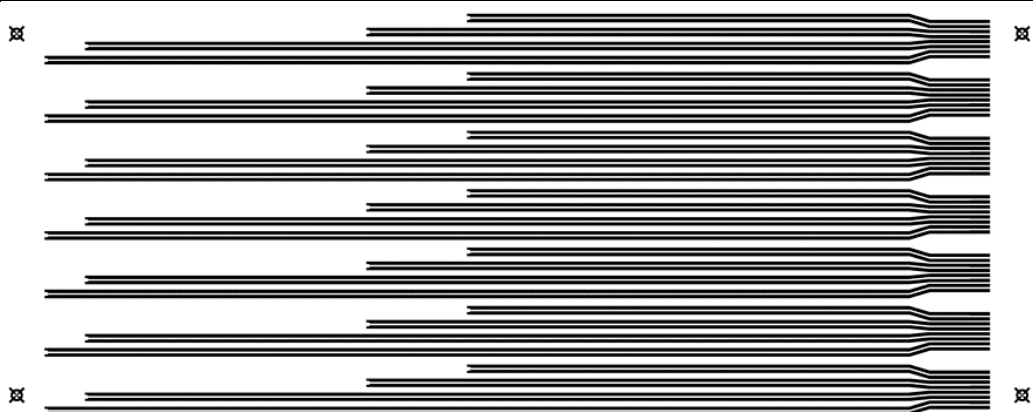
When screen-printing technology is used, it is necessary to make frames with a mesh for the design. The screen for the conductive tracks was made of 230 PET 1500 90/230-48 mesh polyester material from Sefar (Thal, Switzerland). To transfer the pattern to the screen mesh, a UV Dirasol 132 film from Fujifilm (Minato, Japan) was used. The final thickness of the screen was 74 μm for the conductive designs screen. The pattern was transferred to the screen using an UV IC-5000 light source from BCB (Tarrasa, Spain).

Printing was carried out by using an EKRA E2XL screen printer from ASYS Group (Dornstadt, Germany) with a shore 75° hardness squeegee, 60° squeegee angle, 1 mm of snap-off, 3.5 bar of force, and a speed of 100 mm/s. Figure 3 shows the transferred pattern in each frame for printing multiple units at once.

Table 5. Characteristics of the silver inks.

	DUPONT PE873	INKRON IPC-603X
Sheet resistivity ($\text{m}\Omega/\text{sq}/\text{mil}$)	<75	<15
Solids (%)	60–65	100
Viscosity (Pas)	50–80 @0.2 s^{-1}	16 @0.25 s^{-1}
Screens polyester (threads/inch)	120–77	
Curing	160 °C—10 min	130 °C—15 min
Properties	Stretchable Flexible Washable with encapsulation	High stretchability Flexible

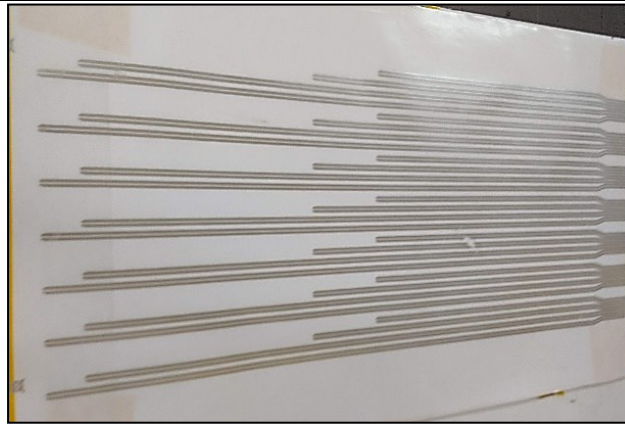
Figure 3. Pattern transferred to the printing screen. An 80 × 65 cm frame was used, so seven identical multi-sensors were included



After the deposition of inks, they were cured in a FED-115 air oven from BINDER (Tuttlingen, Germany) at 130 °C for 15 min using the same curing characteristics for both inks. Although some manufacturers recommend curing at higher

temperatures, lower temperatures can be used with an increase of the cure time. In this case, it was done in this way to avoid the film deterioration during heating, since the typical melting point for PU films is 150 °C. The final result is shown in Figure 4.

Figure 4. Pattern screen-printed with conductive silver ink on the polyurethane substrate.



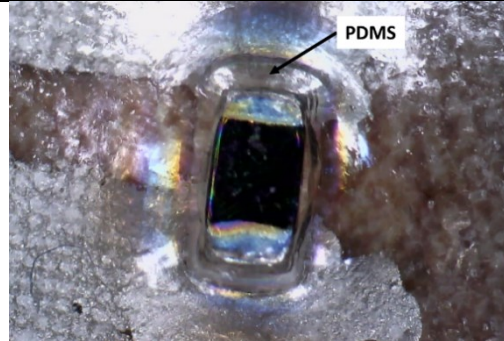
The PU film's second layer was heat-sealed on the first layer with a DCH-100 thermal press from Microtec (Valencia, Spain) at 130 °C for 60 s.

NTC thermistor welding on the PU has been a critical point, since the typical melting point is 150 °C, as mentioned. For this reason, a soldering study, which is detailed in Section 3.4, was carried out.

The NTC thermistors were covered with a thin layer of PDMS SYLGARD 184 from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA), deposited as a drop to avoid direct contact on the skin. On the other hand, PDMS provides consistency to the solder, hindering possible shear failures when the stretching of the base film occurs. Figure 5 shows the result of this process. Although PDMS thermal conductivity was very low (0.2 W/m·K), and therefore there was some inherent thermal inertia to the NTC–PDMS block, it was not critical since the measurement was carried out every 60 s, a long enough period to stabilize the temperature in the NTC–PDMS block. Furthermore, the goal of the electrode was to measure temperature increases, rather than to accurately measure the temperature at the operation point.

Clincher flex connectors from Amphenol Corporation (Wallingford, CT, USA) were used to connect the electrodes with the measurement equipment, since they allow close contact between the conductive tracks and the connector by pressure. With this configuration, the final prototypes shown in Figure A6 were developed

Figure 5. PDMS drop used to isolate the sensor from skin contact.



2.3. Measurements

Resistance measurements were made with a Fluke 8845A multimeter from Fluke Corp. (Everett, WA, USA).

3D profilometry was measured with a Profilm3D profilometer from Filmetrics Inc. (San Diego, CA, USA) with a Nikon CF IC Epi Plan $\times 20$ objective.

For the tensile test on PU films, a 3400 single-column equipment from Instron (Norwood, MA, USA) was used to determine the behavior of materials under axial stretching loads (up to 5000 N). The sample length increased between 1% and 10% of its nominal length, and its resistance was measured with the Fluke 8845A multimeter (Figures 6 and 7).

To measure the shear strength of welds, the V-275.431 PIMag voice-coil linear actuator with force sensor from Physik Instrument (PI) GmbH & Co. KG (Karlsruhe, Germany) was used.

Figure 6. Experimental setup used for applying axial force and acquiring data during the electrode characterization.

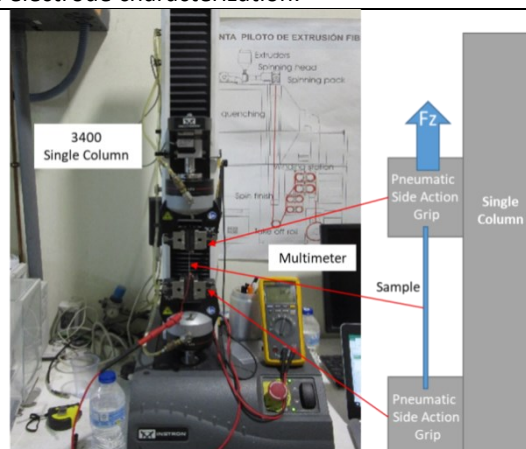
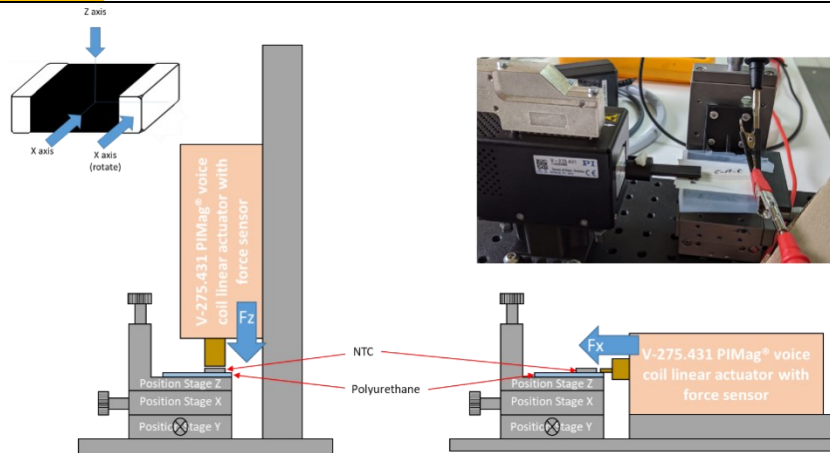


Figure 7. Experimental setup used for applying the Z and X forces (and X force rotation) and acquiring data during the electrode characterization.



3. Results and Discussion

3.1. Study of the Conductive Inks on Films

The surface characteristics of PDMS made it difficult to print conductive inks on this film. To improve printing, different surface treatments had to be used to improve the surface tension of PDMS, such as a treatment with 30% sulfuric acid or a corona treatment. Despite obtaining improvements, it was decided not to use this substrate since the final print was not adequate (Figure 8).

To calculate the average thickness of both inks, a resistance pattern of 15×3 mm was screen-printed on thermosetting PET film, resulting in an average layer thickness of $1.2 \mu\text{m}$ for DuPont PE873 and $7 \mu\text{m}$ for Inkron IPC-603X (Figure 9).

Figure 8. (a) Printing of the conductive silver ink on polyurethane; (b) printing defects of a conductive line on PDMS.

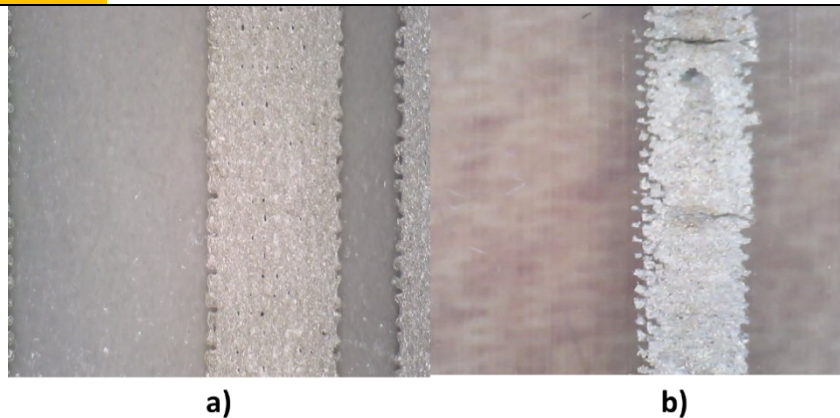
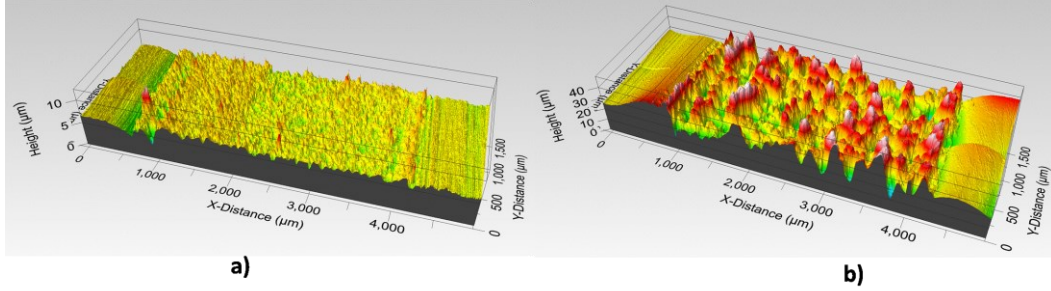


Figure 9.

3D profilometry of a section of the pattern. Printed with (a) DuPont PE873 ink and (b) Inkron IPC-603X on the PET thermosetting substrate.



Conductive layer thickness before drying can be calculated using Equation (1):

$$T_{bd} = (T_S \cdot A_S) + T_f \quad (1)$$

where T_{bd} is the thickness of the conductor before drying, T_S is the thickness of the screen, A_S is the open area of the screen, and T_f is the thickness of the photosensitive film. The values used were from the display data sheet used for the 230 mesh polyester material conductors (PET 1500 90/230-48 from Sefar) and the UV Dirasol 132 film from Fujifilm. The value obtained for T_{bd} was $21.75 \mu\text{m}$ ($T_S = 71 \mu\text{m}$, $A_S = 25\%$, and $T_f = 4 \mu\text{m}$).

T_{bd} is reduced after drying according to the percentage of solid content and the type of ink solvent. The reduction after drying was 94.5% for the DuPont ink and 67.8% for the Inkron ink.

Then, the actual resistivity value was calculated and compared with the sheet resistivity provided by the manufacturer.

Equations (2) and (3) make the comparison possible:

$$R_S = \rho \frac{L}{t \cdot W} \rightarrow \rho = \frac{R_S \cdot t \cdot W}{L} \quad (2)$$

$$\rho_{Sheet} = \frac{\rho}{25 \mu\text{m}} \quad (3)$$

where R_S is the resistance of the sample (1.1Ω in the case of DuPont ink and 0.35Ω in the case of Inkron ink), ρ is the resistivity, ρ_{sheet} is the manufacturer's sheet resistivity, t is the layer thickness, L is the length, and W is the resistance width. The value of $25 \mu\text{m}$ is the print thickness used by manufacturers to specify the resistivity of the sheet.

Therefore, for DuPont PE873 ink, the resulting sheet resistivity was $7.5 \text{ m}\Omega/\text{sq}/\text{mil}$ (according to the manufacturer, $<75 \text{ m}\Omega/\text{sq}/\text{mil}$), and for the Inkron IPC-603X ink, the resistance of the sheet resistivity was $16 \text{ m}\Omega/\text{sq}/\text{mil}$ (according to the manufacturer, $<15 \text{ m}\Omega/\text{sq}/\text{mil}$).

3.2. Study of the Polyurethane Films on Fabrics

To test the elongation effect on screen-printed conductive inks printed on PU and PDMS films, a test was carried out with patterns of different widths. The test checked the pattern value according to the percentage of elongation. In the case of PDMS, the results were not conclusive, since the printing of the conductive inks on this film was not perfect, as previously mentioned, and when the test was carried out, the inks came off the substrate.

For carrying out the test on the traction equipment, specific test samples were designed and printed with the dimensions shown in Figure 10. The equipment was programmed to stretch the samples up to 10 mm, in intervals of 1 mm and with stops of 25 s, to carry out the electrical-resistance measurements.

Figure 11 shows the percentage variation of the resistance value according to the percentage elongation for the 1.5 mm-wide pattern, since it was the one used for the sensor design. The most suitable combination to obtain a reduced variation was the Inkron IPC-603X ink with the DelStar EU94DS substrate, as can be observed in the graph.

3.3. Study of the Conductive Tracks' Resistance

The conductive tracks' resistance after printing was $39.1 \pm 0.2 \Omega$ for Tu, $34.3 \pm 0.5 \Omega$ for Tp, $23.2 \pm 0.4 \Omega$ for Tr, and $21.0 \pm 0.5 \Omega$ for Ta. With these track resistance values; the substrate would have to be 133% longer to cause a variation of $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ in the measurement for the selected NTC thermistor.

Figure 10.

Dimensions of the pattern used to determine the parameters of elongation of inks and base films.

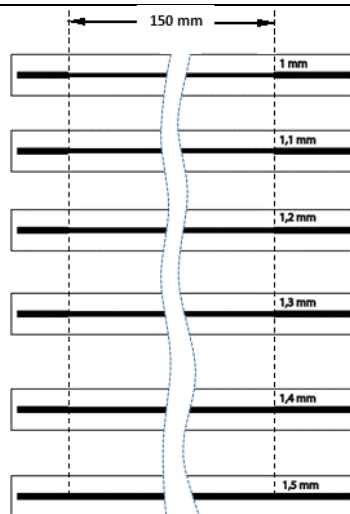
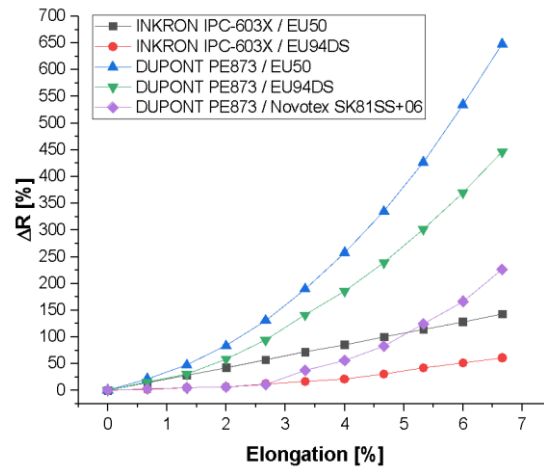


Figure 11. Percentage variation of the resistance value according to the percentage elongation for the 1.5 mm-wide pattern.



3.4. Study of NTC Soldering

NTC solder with Inkron IPC-603X ink on a DelStar EU94DS substrate has been studied. The weld must not exceed 150 °C due to the PU melting point. This temperature limits the type of solder pastes that can be used, so work has been done with:

- ▶ The same silver ink (Inkron IPC-603X) that was used in the conductive tracks acting as a solder paste, although in this case it would act as a conductive adhesive. Curing was carried out at 130 °C. The advantage of soldering with conductive ink is the ability to use the same temperature in the conductor-manufacturing process, and in soldering, the disadvantage is that the ink viscosity is low, and it is difficult to place on pads with stencils.
- ▶ An anisotropic conductive adhesive that allows a first curing by long-wave ultraviolet rays (UVAs) to block the solder, and subsequently perform a low-temperature thermal curing. The paste used was DELO MONOPOX AC245 from DELO Adhesives (Windach, Germany). This paste requires a first UVA curing, between 320 nm and 400 nm from 1 s to 5 s, and then a thermal curing between 80 °C and 150 °C for 30 min and 10 min, respectively. In this case, a Ncure-Lab/Static 120 UV oven from EneMaq (Barcelona, Spain) with 0.5 J/cm² and a FED-115 air oven from BINDER were used at 130 °C for 15 min. The advantages of the anisotropic solder paste are the proper viscosity and that the paste can be placed with less precision on the pads, while the disadvantage is that it requires two curing processes, UV and thermal.
- ▶ An NC-SMQ80/1E paste (52In/48Sn) from Indium Corp. (Clinton, NY, USA) with a melting point of 118° C. The temperature peak was set at 135 °C for 110 s. This is a solder paste with a very low melting point, but with the

drawback of not presenting Ag in its composition, making it difficult to solder with the silver ink.

- ▶ A Voltera T4/T5 (57.6Bi/42Sn/0.4Ag) from Voltera (Kitchener, Canada) with a melting point of 138° C. The temperature peak was set at 145 °C for 90 s. This solder paste contains silver, and although its melting point is low, it was too close to the 150 °C limit imposed.

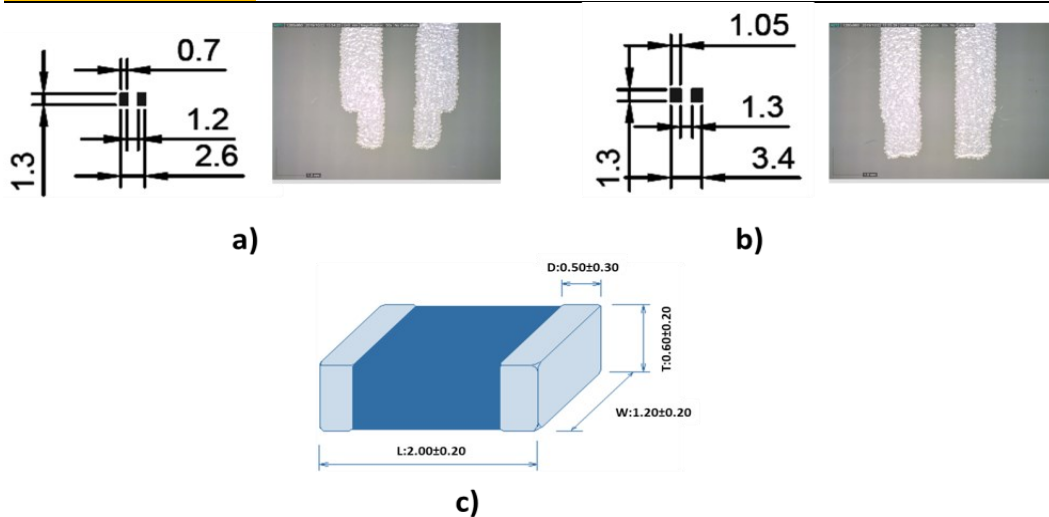
Two types of footprints were designed, one with the recommended size for solder reflow and the other for solder wave based on an encapsulation size of 0805 (Figure 12). All pastes and adhesives were printed on the track pads using a 250 µm-thick stainless-steel stencil with a print speed of 20 mm/s and a squeegee pressure of 0.02 kg/mm of blade length. Figures 13 and 14 show the soldering results.

After printing and curing of the pastes, continuity measurements were made to check the correct soldering. Table 6 shows the percentages of correct solders.

With respect to the Inkron IPC-603X ink, the screen-printing technique was also used, since this ink is specific to this technology (Figure 15). In this case, percentages reached 100% and 85.7% for the solder reflow footprint and the wave solder footprint, respectively.

Figure 12.

(a) The 0805 solder reflow footprint, (b) the 0805 wave solder footprint and (c) the 0805 package (mm).



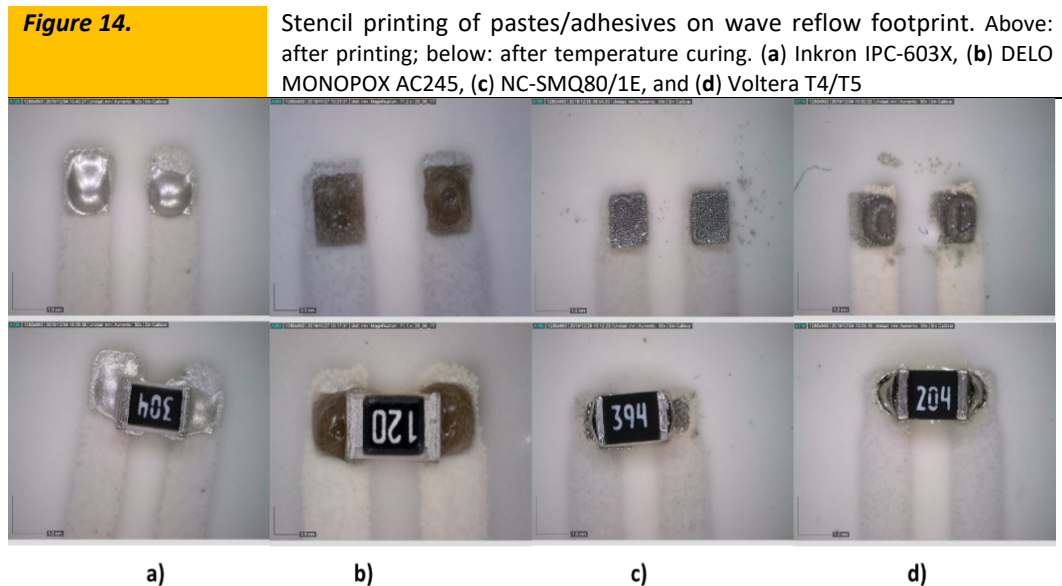
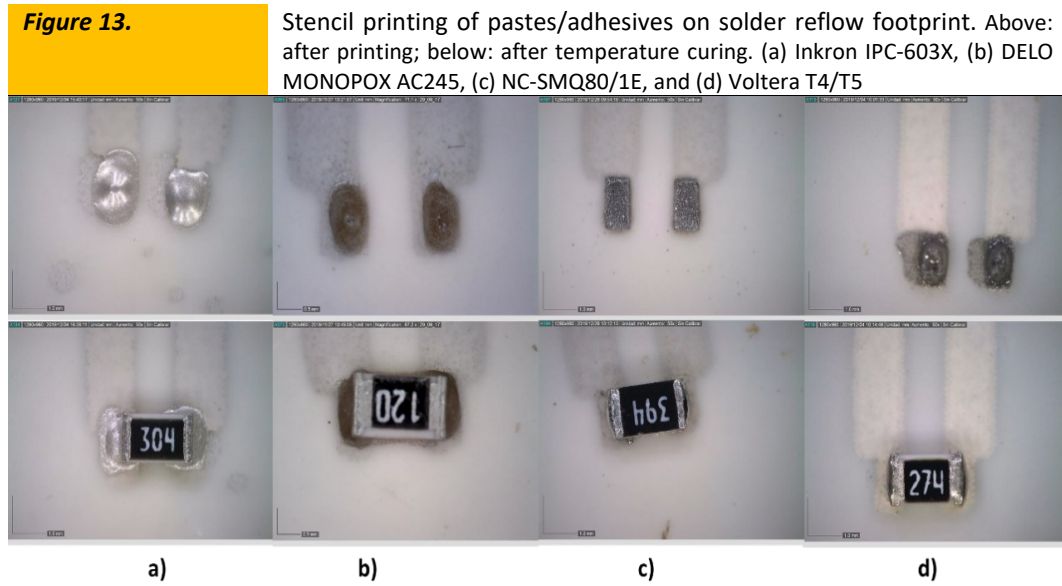


Table 6. Percentage of correct package soldered with stencil printing technique.

	Solder Reflow Footprint	Wave Solder Footprint
INKRON IPC-603X	57.1%	57.1%
DELO MONOPOX AC245	71.4%	28.5%
NC-SMQ80/1E	100%	100%
VOLTERA T4/T5	71.4%	57.1%

*

Figure 15. Screen printing of the Inkron IPC-603X on wave reflow footprint. (a) after printing; and (b) after temperature curing

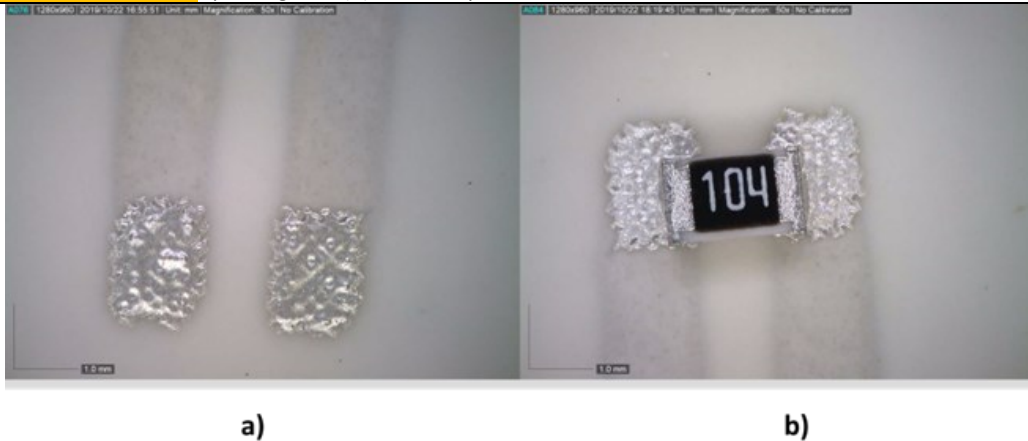
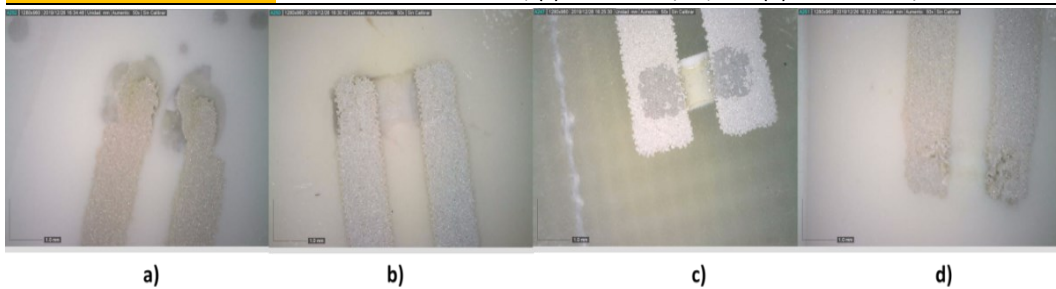


Figure 16 shows the appearance of the solder from the back of the PU. It was observed how the NC-SMQ80/1E paste had a very good integration with the conductor silver.

Figure 16. Solder view from the back of the polyurethane. (a) Inkron IPC-603X, (b) DELO MONOPOX AC245, (c) NC-SMQ80/1E, and (d) VOLTERA T4/T5.



Once welded and protected with PDMS, the electrodes with the NTC thermistors must withstand a minimum pressure of 10 mmHg (1333.22 Pa) and a maximum of 40 mmHg (5332.9 Pa) by the compression bandage [21]. This means that in the 0805 package, a force of 0.015 N was on the Z axis, and a force of 0.006 N was on the X axis.

Table 7 shows the shear-strength tests performed on the Z, X, and X (rotation) axes for both types of footprint. Figure 17 shows the effects of the shear force on the solder reflow footprint on the X axis and X axis (rotation). It was observed that the break occurred simultaneously with the silver ink of the conductive tracks in the case of the NC-SMQ80/1E paste. This effect also was detected in the Voltera T4/T5 ink, although minor in the case of the X axis.

All results exceeded the needed values to withstand the pressure of the bandage, which was 0.015 N on the Z axis and 0.006 N on the X axis. However, the NC-SMQ80/1E paste significantly outperformed the rest in either case.

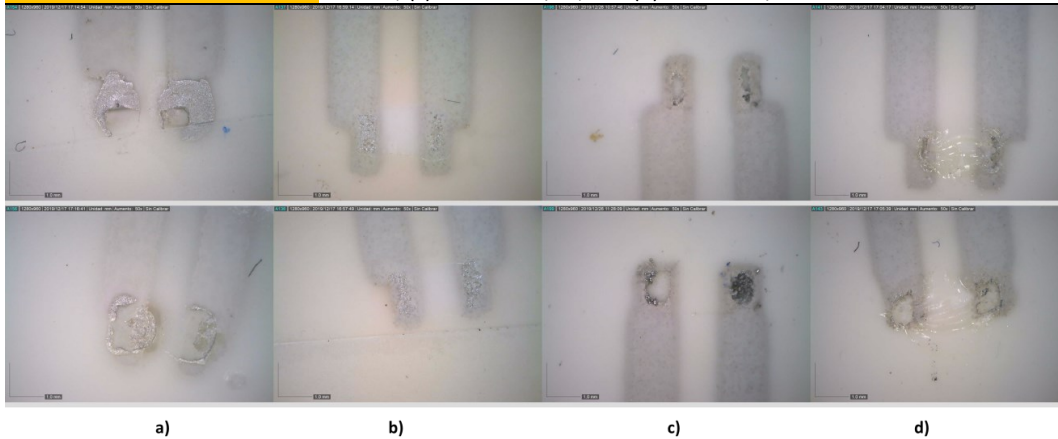
Table 7. Maximum force (N) applied on the axis.

	Z axis		X axis		X axis (Rotation)	
	Solder Reflow Footprint	Wave Solder Footprint	Solder Reflow Footprint	Wave Solder Footprint	Solder Reflow Footprint	Wave Solder Footprint
INKRON IPC-603X	10	10	0.304	0.809	0.433	1.247
DELO MONOPOX AC245	10	0.01	0.787	0.001	0.377	0.001
NC-SMQ80/1E	10	10	1.247	1.625	1.119	1.496
VOLTERA T4/T5	10	10	0.156	0.375	0.287	0.896

*

Figure 17.

Effect of shear force on the solder reflow footprint. X axis (above) and X axis (rotation) (below). (a) Inkron IPC-603X, (b) DELO MONOPOX AC245, (c) NC-SMQ80/1E, and (d) Voltera T4/T5.



3.1. Field Testing

First, tests carried out in a healthy individual made it possible to verify the operation of the registration system. Once longitudinally separated (Figure A6, top), sensors were placed on healthy skin, ensuring good contact with the PDMS face. The NTC1 thermistor, the one with the longest connection, was located 3 cm from the ankle, leaving the others at different distances according to the length of the leg (Figure 18). Then, a minimally compressive bandage was applied, leaving the connection to the registration prototype out (Figure 19a). Finally, the system was fixed below the knee with a new padded bandage to protect the circuit and the leg (Figure 19b).

Figure 18. Placement of the system along the leg.



Figure 19. Placement of the system in the wound dressing. (a) Sensors applied under a finished bandage; (b) protection of the data acquisition system to avoid damaging the device and the patient during their activity.



Figure 20 shows the evolution of the four temperatures involved over a 24 h period. The temperatures of the sensors in contact with the skin underwent small variations throughout the day, being very stable in the night period (hours 14 to 22 in the series). The differences between them remained in a very small range

Figure 20.

Temperature data recorded over a 24 h period. NTC1 = skin lesion, NTC2 = perilesional skin, NTC3 = healthy skin, and NTC4 = environmental.

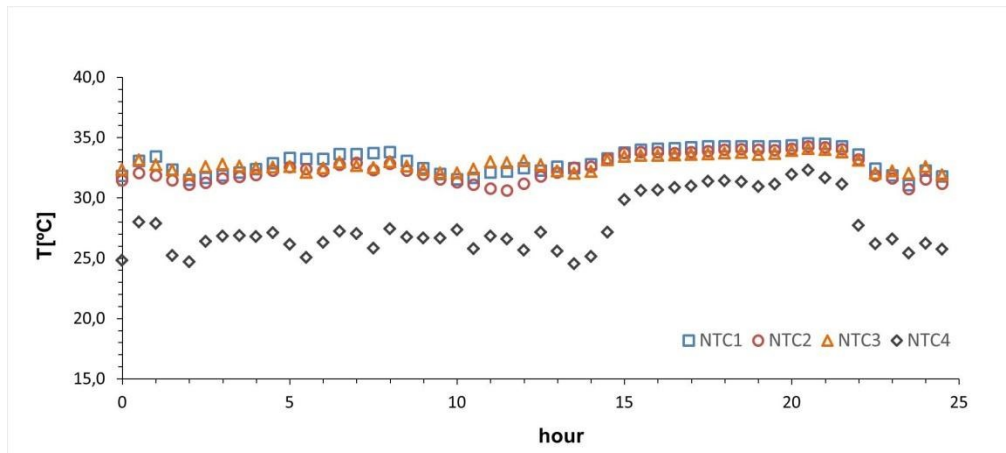


Figure 20 shows the temperature behavior in each of the regions where a sensor was placed in a simulated wound on the intact skin of an investigator. As mentioned above, the fluctuations between the sensors were minimal. These differences may vary, depending on, among other things, the activity that was being carried out at that time, the position of the leg, or the type of clothing. Between 10:00 p.m. and 3:00 p.m., the activity was minimal. From 3:00 p.m. to 10:00 p.m., the researcher underwent more activity as part of the test. It was found that the temperature increase occurred in all the sensors, especially in the NTC4 (environmental). The temperature change of the NTC1 between 5:00 a.m. and 8:00 a.m. could be caused by the position and support of the limb during the last hours of sleep. On the other hand, the increase of this same NTC thermistor in the most active time slot may have been due to the friction of the sensor with the bandage produced by the movement. Therefore, taking the activity into account is essential during the data collection to determine the cause of possible anomalous data.

4. Conclusions

In the development phase of the NTC electrode with encapsulation 0805, it was proven that, from a technological point of view, the best option was the use of a DelStar EU94DS medical grade polyurethane substrate with Inkron IPC-603X silver ink in screen printing; using the NC-SMQ80/1E paste from Indium for welding.

The NTC device must be protected with a PDMS layer. This structure can withstand the stresses of the compression bandage, as well as the inherent stretching in the use of the electrodes during the data-acquisition phase in a patient, without breaks.

The developed electronic system has proven to be robust, low consumption, and comfortable for the patient, and it allows control of the data acquisition times, as well as the data dump for further study.

Field tests in a healthy individual verified the correct operation of the system, as well as the data acquisition over long periods of time without causing discomfort to the individual and without electrode breaks or data losses.

The study's next steps will consist of carrying out the necessary tests for cytotoxicity for contact with wounds, antimicrobials, measurements in patients, and the subsequent data treatment that will allow better monitoring of chronic wounds.

5. References

1. Ochoa, M.; Rahimi, R.; Ziaie, B. Flexible Sensors for Chronic Wound Management. *IEEE Rev. Biomed. Eng.* **2014**, *7*, 73–86, doi:10.1109/RBME.2013.2295817.
2. Frykberg, R.G.; Banks, J. Challenges in the Treatment of Chronic Wounds. *Adv. Wound Care* **2015**, *4*, 560–582, doi:10.1089/wound.2015.0635.
3. Armstrong, D.G.; Lipsky, B.A.; Polis, A.B.; Abramson, M.A. Does Dermal Thermometry Predict Clinical Outcome in Diabetic Foot Infection? Analysis of Data from the SIDESTEP* Trial. *Int. Wound J.* **2006**, *3*, 302–307, doi:10.1111/j.1742-481X.2006.00269.x.
4. Power, G.; Moore, Z.; O'Connor, T. Measurement of PH, Exudate Composition and Temperature in Wound Healing: A Systematic Review. *J. Wound Care* **2017**, *26*, 381–397, doi:10.12968/jowc.2017.26.7.381.
5. Milne, S.D.; Connolly, P. The Influence of Different Dressings on the PH of the Wound Environment. *J. Wound Care* **2014**, *23*, 53–57, doi:10.12968/jowc.2014.23.2.53.
6. Rahimi, R.; Ochoa, M.; Parupudi, T.; Zhao, X.; Yazdi, I.K.; Dokmeci, M.R.; Tamayol, A.; Khademhosseini, A.; Ziaie, B. A Low-Cost Flexible PH Sensor Array for Wound Assessment. *Sens. Actuators B Chem.* **2016**, *229*, 609–617, doi:10.1016/j.snb.2015.12.082.
7. Milne, S.D.; Connolly, P.; Al Hamad, H.; Seoudi, I. Development of Wearable Sensors for Tailored Patient Wound Care. In Proceedings of the 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2014, Chicago, IL, USA, 26–30 August 2014; pp. 618–621, doi:10.1109/EMBC.2014.6943667.

8. Suikkola, J.; Björninen, T.; Mosallaei, M.; Kankkunen, T.; Iso-Ketola, P.; Ukkonen, L.; Vanhala, J.; Mäntysalo, M. Screen-Printing Fabrication and Characterization of Stretchable Electronics. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 25784, doi:10.1038/srep25784.
9. Matzeu, G.; Losacco, M.; Parducci, E.; Pucci, A.; Dini, V.; Romanelli, M.; Di Francesco, F. Skin Temperature Monitoring by a Wireless Sensor. In Proceedings of the IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), Melbourne, VIC, Australia, 7–10 November 2011; pp. 3533–3535, doi:10.1109/IECON.2011.6119881.
10. Salvo, P.; Calisi, N.; Melai, B.; Cortigiani, B.; Mannini, M.; Caneschi, A.; Lorenzetti, G.; Paoletti, C.; Lomonaco, T.; Paolicchi, A.; et al. Temperature and PH Sensors Based on Graphenic Materials. *Biosens. Bioelectron.* **2017**, *91*, 870–877, doi:10.1016/j.bios.2017.01.062.
11. Kim, S.J.; Lee, D.S.; Kim, I.G.; Sohn, D.W.; Park, J.Y.; Choi, B.K.; Kim, S.W. Evaluation of the Biocompatibility of a Coating Material for an Implantable Bladder Volume Sensor. *Kaohsiung J. Med. Sci.* **2012**, *28*, 123–129, doi:10.1016/j.kjms.2011.10.016.
12. Rahimi, R.; Brener, U.; Ochoa, M.; Ziaie, B. Flexible and Transparent PH Monitoring System with NFC Communication for Wound Monitoring Applications. In Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Las Vegas, NV, USA, 22–26 January 2017, doi:10.1109/MEMSYS.2017.7863356.
13. Kassanos, P.; Seichepine, F.; Wales, D.; Yang, G. Towards a Flexible/Stretchable Multiparametric Sensing Device for Surgical and Wearable Applications. In Proceedings of the 2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), Nara, Japan, 17–19 October 2019; pp. 1–4, doi:10.1109/BIOCAS.2019.8919197.
14. Kassanos, P.; Gil-Rosa, B.; Keshavarz, M.; Yang, G. *Chapter 2—From Wearables to Implantables—Clinical Drive and Technical Challenges*; Sazonov, E., Sensors, W., Eds.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2021; pp. 29–84
15. Dini, V.; Salvo, P.; Janowska, A.; Di Francesco, F.; Barbini, A.; Romanelli, M. Correlation between Wound Temperature Obtained with an Infrared Camera and Clinical Wound Bed Score in Venous Leg Ulcers. *Wounds* **2015**, *27*, 274–278.
16. McGuinness, W.; Vella, E.; Harrison, D. Influence of Dressing Changes on Wound Temperature. *J. Wound Care* **2004**, *13*, 383–385, doi:10.12968/jowc.2004.13.9.26702.

17. Feirheller, M.; Sibbald, R.G. A Clinical Investigation into the Relationship between Increased Periwound Skin Temperature and Local Wound Infection in Patients with Chronic Leg Ulcers. *Adv. Skin Wound Care* **2010**, *23*, 369–379.
18. Mufti, A.; Somayaji, R.; Coutts, P.; Sibbald, R.G. Infrared Skin Thermometry: Validating and Comparing Techniques to Detect Periwound Skin Infection. *Adv. Ski. Wound Care* **2018**, *31*, 607–661, doi:10.1097/01.ASW.0000527352.75716.70.
19. Bach, A.J.E.; Stewart, I.B.; Minett, G.M.; Costello, J.T. Does the Technique Employed for Skin Temperature Assessment Alter Outcomes? *Syst. Rev. Physiol. Meas.* **2015**, *36*, R27–R51, doi:10.1088/0967-3334/36/9/R27.
20. Bach, A.J.E.; Stewart, I.B.; Disher, A.E.; Costello, J.T. A Comparison between Conductive and Infrared Devices for Measuring Mean Skin Temperature at Rest, during Exercise in the Heat, and Recovery. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0117907, doi.org:10.1371/journal.pone.0117907.
21. Partsch, H.; Mortimer, P. Compression for Leg Wounds. *Br. J. Dermatol.* **2015**, *173*, 359–369, doi:10.1111/bjd.13851.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Capítulo 3

Estudio preliminar de la
impresión electrónica mediante
la tecnología de la flexografía
sobre sustratos flexibles

Dispositivos electrónicos impresos sobre sustratos textiles
mediante la técnica de la flexografía Tesis Doctoral



Título

**A preliminary study of printed electronics through
flexography impression on flexible substrates**

Revista

Industria Textila - 2021, vol. 72, no. 2

Ránking

Q3

Autores

Ana María Rodes-Carbonell

Josué Ferri

Eduardo Garcia-Breijo

Eva Bou-Belda.

Abstract

The work is framed within Printed Electronics, an emerging technology for the manufacture of electronic products. Among the different printing methods, the roll-to-roll flexography technique is used because it allows continuous manufacturing and high productivity at low cost. Apart from the process parameters, the ink and the substrate properties are some of the variables associated with the flexographic printing. Specifically, this study investigates the ink penetration, the print uniformity, the adhesion, the fastness, and the electrical behaviour of the same conductive silver ink printed on different flexible substrates through the flexography process. In addition to polymeric and siliconized paper substrates, which are typical used in printed electronics, two substrates were also chosen for the study: woven and nonwoven fabric. Optical, scanning electronic microscope (SEM), 4-point Kelvin and colour fastness to wash and rubbing analyses have been performed. The results concluded that, regarding the conductivity behaviour, porous substrates like textiles and nonwoven fabrics without pre and post treatments do not present acceptable results, whereas polymers or silicone papers do. Nevertheless, woven and nonwoven fabrics are a suitable early option regarding colour fastness to wash instead of thin polymeric and paper substrates that tear at the wash machine. A solution for an optimal printing on textiles would be the surface substrates pre-treatment by applying different chemical compounds that increase the adhesion of the ink on the fabric.

Keywords: smart textile, wearable, printed-electronics, conductivity, flexography.

1. Introduction

The technology that allows the fabrication of electronic devices through a printing process is known as printed electronics (PE). It is one of the fastest growing technologies in the world as it provides different printing techniques for fabricating low-cost and large-area flexible electronic devices [1]. In recent years, the technology of flexible electronics has attracted considerable attention as it is applicable to wearable devices including flexible displays, flexible batteries and flexible sensors [2] in different areas such as aerospace and automotive, biomedical, robotics, and health applications [3]. Among them, wearable electronic textiles (e-textiles) are of great significance, as they provide better comfortability, durability and lighter weight as well as maintaining the desirable electrical property [4].

The PE printing technique selection shall be according to the type of electronic application (e.g., small, thin, lightweight, flexible, and disposable, etc.) to be fabricated, the production cost and volume. Also, the materials (inks/pastes and substrates) must meet certain requirements, depending on the type of printing technology being used and the final application.

PE technologies are divided in contact techniques (e.g., flexography, gravure printing and soft lithography techniques), in which the printing plate is in direct contact with the substrate and, non-contact techniques (e.g., screen printing, aerosol printing, inkjet printing, laser direct writing), where only the inks get in contact with the substrate [5, 6]. Those techniques suitable for roll-to-roll (R2R) processing, such as flexography, are especially attractive as they offer continuous production and high productivity [7].

Flexographic printing is known for depositing a wide range of thicknesses with the same resolution. Impression cylinder, plate cylinder, anilox roller, doctor blade and inking unit are the main parts of the flexographic printing [1]. Variables associated with the flexographic printing process include print speed, print force/engagement, anilox cell volume, anilox force/engagement as well as the ink and substrate properties. [8] Those variables have a direct impact on the prints' morphological and electrical behaviour, as well as the print uniformity has a considerable influence on the final functionality of the device [9]. It must be highlighted in the context of printed electronics on fabrics, the challenge of durability and withstanding bending, stretching, abrasion and washing [10].

Numerous reviews and books have been already published considering printed electronics on substrates that are usually used on electronic devices such as glass, metal, paper or polymers [3, 7]. However, the incorporation of the flexography printing technique for printed electronics in the textile field is still very recent and there are not enough studies for its application. As a result, the authors have proposed to analyse this printing methodology for conductive inks on textiles regarding their electronic performance. In order to compare the results of the

impression carried out on different laminar substrates, printed samples were characterized using the optical microscope and the scanning electron microscope (SEM). The behaviour of the impression is evaluated before maintenance actions such as washing and rubbing.

2. Materials and methods

2.1. Materials

In addition to polymeric and siliconized paper substrates, which are typical used in printed electronics [3, 7], two substrates were also chosen for the study: woven and nonwoven fabric. The four flexible substrates are characterized in table 1.

Table 1. Substrates characterization

Code	Substrate	Material	Structure	Mass per unit area*	Color	Protector
SA	Woven fabric	100% Cotton	Plain	300 g/m ²	Greige	No
SB	Spunbonded Nonwoven fabric	100% Polypropylene	Nonwoven	50 g/m ²	White	No
SC	Paper	Siliconized paper	-	140 g/m ²	White	No
SD	Polymeric	100% Thermoplastic Polyurethane	-	94 gr/m ²	Transparent	Yes (white paper)

Note: *Mass per unit area determined according to the standard ISO 3801

Same aqueous flexo-printable conductive ink, PFI-600 – Silver ink from Novacentrix, has been used in all prints to ensure comparable results. The ink contains silver nanoparticles and has been formulated for high conductivity, fast curing, and improved levelling at lower printing speeds.

2.2. Methods

Flexography is a roll-to-roll direct printing technology, where an anilox roller, covered with micro-cavities on its surface, allows the collection of ink, and then is transferred to the printing plate cylinder. At the study, the one-layer flexography printing process has been performed using flexography experimental plants (Flexo VCML Lab from RK and Lambda from Edale) for printing the samples.

Different test drawings for the pattern of the printing plate cylinder were designed specifically for the study. Details of the process are described in table 2.

Table 2. Printing process variables

Code	Ink	Anilox volume (cm ³ /m ²)	Print speed (m/min)
SA	PFI-600	12	6-22
SB	PFI-600	12	6-22
SC	PFI-600	11	5
SD	PFI-600	12	6-22

Printed layers were dried using an in-line air flow convection dryer with temperatures within 80-150°C.

3. Results and discussion

3.1. Ink uniformity

The optical macroscopic images were taken with a LEICA MZ APO stereomicroscope. It was used to analyse the print uniformity of each layer of the electronic printed samples. Magnifications from 20 to 80 were used. Table 3 show images of the 20x results.

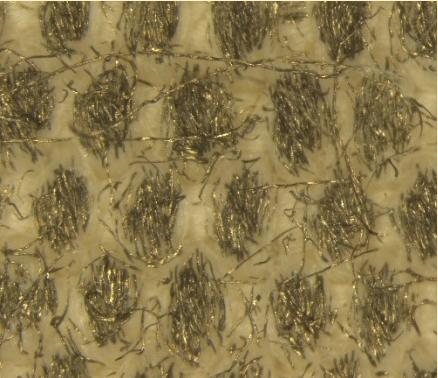
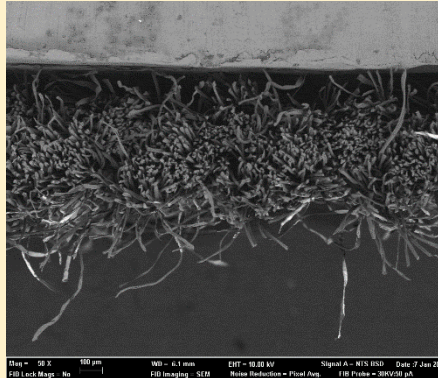
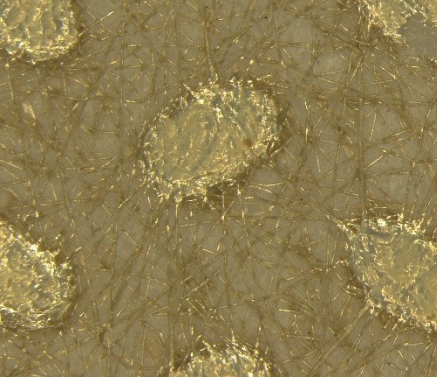
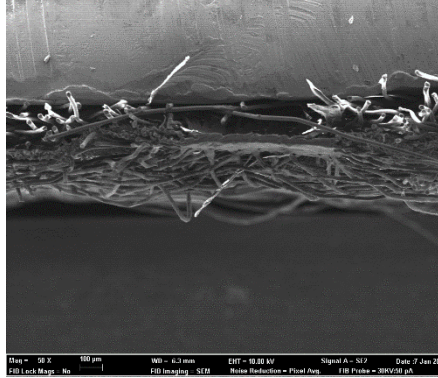
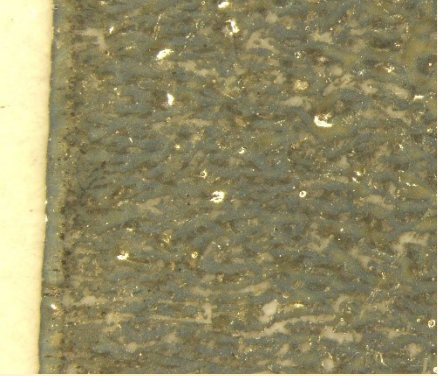
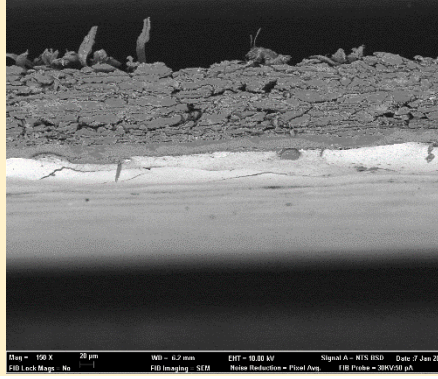

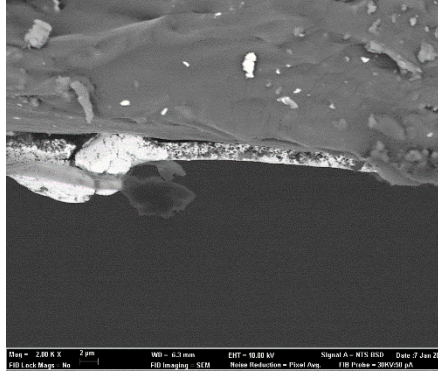
It is observed that both woven and non-woven fabric do not present uniformity at the print, due to the porous surface. Printing electronics with low viscosity inks onto a rough and porous textile surface is of great challenge, due to the orientation of fibres or yarns and the change of fibre morphology constantly [4].

3.2. Ink penetration

High-resolution topographic images by SE (secondary electrons) and maps of crystalline and textural orientations by EBSD (electron backscatter diffraction) were taken with a ZEISS ULTRA 55 Scanning Electron Microscope Field Emission Gun (field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)). They were used to analyse the ink penetration and the adhesion in each substrate. Table 3 shows the FE-SEM images obtained.

These images confirm that the continuity of the ink does not appear on the woven and non-woven fabrics, being able to observe a space between the ink and the surface of the fabric, not being completely adhered to the substrate. This does not observed when the ink is deposited on the paper, as it is much more uniform, the ink is completely in contact with the surface.

Table 3 .

Substrate	Optical microscope 20x	FE-SEM
(SA) Woven fabric		 Mag = 50 X 100 µm WD = 6.1 mm EHT = 10.00 kV Signal A = NIS BSD Date: 7 Jan 2012 FIB Lock Magn. No FIB Imaging = SE-TOPO Noise Reduction = Fixed Avg FIB Probe = SiKV-500 pA
(SB) Nonwoven fabric		 Mag = 50 X 100 µm WD = 6.2 mm EHT = 10.00 kV Signal A = Si7 Date: 7 Jan 2012 FIB Lock Magn. No FIB Imaging = SE-TOPO Noise Reduction = Fixed Avg FIB Probe = SiKV-500 pA
(SC) Siliconized paper		 Mag = 100 X 20 µm WD = 6.2 mm EHT = 10.00 kV Signal A = NIS BSD Date: 7 Jan 2012 FIB Lock Magn. No FIB Imaging = SE-TOPO Noise Reduction = Fixed Avg FIB Probe = SiKV-500 pA
(SD) Polymeric film		 Mag = 2,000 X 2 µm WD = 6.2 mm EHT = 10.00 kV Signal A = NIS BSD Date: 7 Jan 2012 FIB Lock Magn. No FIB Imaging = SE-TOPO Noise Reduction = Fixed Avg FIB Probe = SiKV-500 pA

3.3. Ink penetration

High-resolution topographic images by SE (secondary electrons) and maps of crystalline and textural orientations by EBSD (electron backscatter diffraction) were taken with a ZEISS ULTRA 55 Scanning Electron Microscope Field Emission Gun (field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)). They were used to analyse the ink penetration and the adhesion in each substrate. Table 3 shows the FE-SEM images obtained.

These images confirm that the continuity of the ink does not appear on the woven and non-woven fabrics, being able to observe a space between the ink and the surface of the fabric, not being completely adhered to the substrate. This does not observed when the ink is deposited on the paper, as it is much more uniform, the ink is completely in contact with the surface.

3.4. Conductivity

To measure the electrical behaviour a usual two-terminal sensing unit was firstly considered. Nevertheless, a two-wire system does not provide correct output due to variation in ambient temperature, as the resistance of the lead wires (both sides) changes unpredictably. Meanwhile, Four-Wire Kelvin resistance measurement makes it possible to accurately measure resistance values less than 0.1Ω while eliminating the inherent resistance of the lead wires connecting the measurement instrument to the component being measured. [11] For that reason, 4-wire system measurements were made Resistance measurements were made with a FLUKE 8845A multimeter from FLUKE CORPORATION (Everett, Washington, USA). Table 4 shows the results obtained for each substrate.

Table 4. Kelvin (4-wire) resistance measurement

Code	Substrate	Resistance
SA	Woven fabric	-
SB	Spunbonded Nonwoven fabric	-
SC	Paper	1.2450 Ω
SD	Polymeric	1.9747 Ω

Whereas the results for paper and polymeric substrates indicate that the printing is conductive, neither the woven nor the nonwoven fabrics present electrical conductivity. This is because poor uniformity limits the conductivity of a print, leading to functional variation and short circuits. In order to address these challenges, surface pre-treatment onto rough and porous substrates or coating and lamination processes should be done in order to produce continuous conductive pathway onto textiles [4, 6].

3.5. Colour fastness

The grade of colour fastness to wash and rubbing of the electronic flexo printed samples were evaluated and presented in the table 5. Neither the siliconized paper (SC) nor the polymeric substrate (SD) could stand the washing test and were torn at the wash machine. Furthermore, the SD was not capable of withstanding the rubbing test, crashing with the pressure of the crockmeter.

Table 5. Color fastness to was and rubbing results

Code	Rubbing				Washing	
	Degradation		Discharge		Degradation	Discharge
	Dry	Wet	Dry	Wet		
SA	4-5	3-4	1	1	4	5
SB	4	1-2	3	2	4	5
SC	2	1	3	1	-	-
SD	-	-	-	-	-	-

The overall results of colour fastness to rubbing of samples showed poor fastness properties in terms of discharge, which was harmonious with previous studies of other printing techniques [12]. SA and SB showed an improved grade in the rubbing degradation possibly due to the large amount of ink deposited on the surface although wet rubbing properties are lower than dry. In order to address these challenges, surface pre-treatment onto rough and porous substrates should be done in order to improve the ink adhesion and therefore the electrical behaviour [4].

On the other hand, the overall results of colour fastness to wash of woven (SA) and nonwoven (SB) fabrics samples were very good to excellent. According to a previous review [13], an increment of ink volume improves the ink coverage, upgrading in this case the conductivity, nevertheless it enhances the ink wash-out effect. For this reason, the ink volume transferred to the substrate should be optimized when conductivity and colour fastness to washing are the objectives. In addition, coating and lamination processes could be done in order to ensure the continuous conductive pathway on textiles [10].

4. Conclusions

By a comparison of the same ink printed on different flexible substrates it has been concluded that the roll-to-roll flexography printing process is an effective technique to produce conductive tracks on silicone paper and polymer flexible substrates. Nevertheless, it has been demonstrated that the same silver ink printings do not present uniformity, ink penetration and electrical conductivity onto textile and non-woven fabrics. For this reason, future work will explore different surface pre-treatments, such as hydrophobic and oleophobic

treatments, in order to improve ink uniformity and then produce continuous conductive pathway through flexography on textiles and non-woven fabrics.

On the other hand, woven and nonwoven fabrics are a suitable early option regarding colour fastness to wash instead of thin polymeric and paper substrates that tear at the wash machine. The ink volume transferred to the substrate should be optimized when conductivity and colour fastness to washing are the objectives. Future work will also explore several coatings that could also be applied after the printing to protect the circuits and then improve the electronic behaviour after washing. Concerning colour fastness to rubbing, even better than for thin polymeric and paper substrates, poor results were obtained for woven and nonwoven fabrics. For this reason, future work will be focused on surface pre-treatment onto rough and porous substrates in order to improve the ink adhesion and therefore the electrical behaviour.

5. References

- [1] Avuthu, S.G., Gill, M., Ghalib, N., Sussman, M.R., Wable, G., Richstein, J.Ph., Jabil, D., *An introduction to the process of printed electronics*, 2016
- [2] Kim, C., Jeon, S., Kim, C.-H., *Reduction of Linearly Varying Term of Register Errors Using a Dancer System in Roll-to-Roll Printing Equipment for Printed Electronics*, In: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, <https://doi.org/20.10.1007/s12541-019-00157-2>
- [3] Cruz, S., Rocha, L., Viana, J., *Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics*, 2018, <https://doi.org/10.5772/intechopen.76161>
- [4] Karim, N., Afroj, S., Novoselov, K., Yeates, S., *All Inkjet-Printed Graphene-Silver Composite Ink on Textiles for Highly Conductive Wearable Electronics Applications*, In: Scientific Reports, 2019, 8035, 1-10, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44420-y>
- [5] Cano-Raya, C., Denchev, Z., Cruz, S., Viana, J., *Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics – A review*, In: Applied Materials Today, 2019, 15, 416-430, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.02.012>
- [6] Yang, K., Torah, R., Wei, Y., Beeby, S., Tudor, J., *Waterproof and durable screen printed silver conductive tracks on textiles*, In: Textile Research Journal, 2013, 83, 2023-2031, <https://doi.org/10.1177/0040517513490063>
- [7] Søndergaard, R., Hosel, M., Krebs, F., *Roll to roll fabrication of large area functional organic materials*, In: Journal of Polymer Science, 2012, 51, 16-34

- [8] Mogg, B., Claypole, T., Deganello, D., Phillips, C.O., *Flexographic printing of ultra-thin semiconductor polymer layers*, In: Translational Materials Research, 2016, 3, 015001, <https://doi.org/10.1088/2053-1613/3/1/015001>
- [9] Davide, D., *Control of morphological and electrical properties of flexographic printed electronics through tailored ink rheology*, In: Organic Electronics, 2019, 73, 212-218
- [10] Yang, K., Torah, R., Wei, Y., Beeby, S., Tudor, J. *Waterproof and durable screen printed silver conductive tracks on textiles*, In: Textile Research Journal, 2013, 83, 19, 2023–2031
- [11] Revuelta, P., Litrán, S., Thomas, J., *Electrical Power Terms in the IEEE Std 1459 Framework*, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803216-9.00002-X>
- [12] Vasić, J., Kasikovic, N., Delic, G., Đurđević, M., *Impact of type of ink and substrate on colorimetric values of inkjet prints*, 2018, 365-372, <https://doi.org/10.24867/GRID-2018-p44>
- [13] Kasikovic, N., Vladić, G., Milic, N., Novaković, D., Milošević, R., Dedijer, S., *Colour fastness to washing of multi-layered digital prints on textile materials*, In: Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, 2018, 46, 381, <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v46i3.8489>



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Capítulo 4

Influencia de la estructura
y la composición de tejidos
de calada en la conductividad
de impresiones electrónicas
por flexografía

Dispositivos electrónicos impresos sobre sustratos textiles
mediante la técnica de la flexografía Tesis Doctoral



Título

**Influence of Structure and Composition of Woven
Fabrics on the Conductivity of Flexography Printed
Electronics**

Revista

Polymers 2021, 13, 3165

Ránking

Q1

Autores

Ana María Rodes-Carbonell

Josué Ferri

Eduardo Garcia-Breijo

Ignacio Montava

Eva Bou-Belda.

Abstract

The work is framed within Printed Electronics, an emerging technology for the manufacture of electronic products. Among the different printing methods, the roll-to-roll flexography technique is used because it allows continuous manufacturing and high productivity at low cost. Nevertheless, the incorporation of the flexography printing technique in the textile field is still very recent due to technical barriers such as the porosity of the surface, the durability and the ability to withstand washing. By using the flexography printing technique and conductive inks, different printings were performed onto woven fabrics. Specifically, the study is focused on investigating the influence of the structure of the woven fabric with different weave construction, interlacing coefficient, yarn number and fabric density on the conductivity of the printing. In the same way, the influence of the weft composition was studied by a comparison of different materials (cotton, polyester, and wool). Optical, SEM, color fastness to wash, color measurement using reflection spectrophotometer and multi-meter analyses concluded that woven fabrics have a lower conductivity due to the ink expansion through the inner part of the textile. Regarding weft composition, cotton performs worse due to the moisture absorption capacity of cellulosic fiber. A solution for improving conductivity on printed electronic textiles would be pre-treatment of the surface substrates by applying different chemical compounds that increase the adhesion of the ink, avoiding its absorption.

Keywords: flexography; e-textiles; wearables; printed-electronics; textiles; electronic textiles

1. Introduction

Printed electronics (PE) refers to the technology that allows electronic device manufacturing through a printing process. PE is one of the fastest growing technologies in the world as it provides different printing techniques for manufacturing low-cost and large-area flexible electronic devices [1]. In recent years, flexible electronics technology has attracted considerable attention since it can be applied to wearable devices including flexible displays, flexible batteries and flexible sensors [2,3] in different areas such as aerospace and automotive, biomedical, robotics, and health applications [4]. Among them, wearable electronic textiles (e-textiles) are of great significance since they provide better comfortability, durability and lighter weight as well as maintaining desirable electrical properties [5].

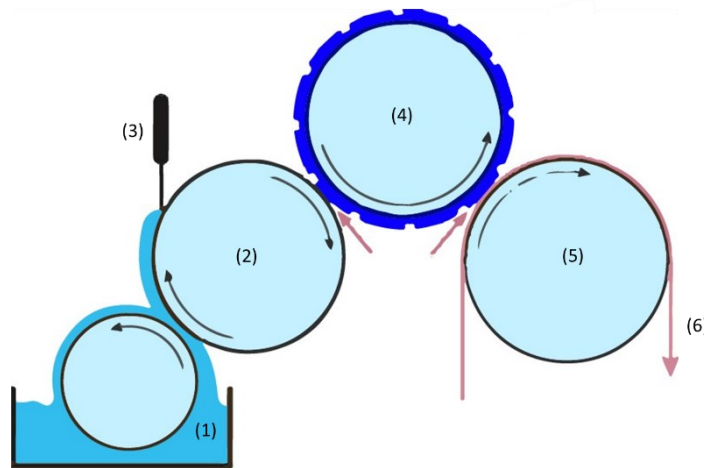
The PE printing technique choice must be done according to the electronic application (e.g., small, thin, lightweight, flexible, and disposable, etc.), the manufacturing cost and volume. Additionally, the main materials (inks/pastes and substrates) must meet certain requirements, depending on the printing technology selected and the final application.

PE technologies are divided into contact techniques (e.g., flexography, gravure printing and soft lithography techniques), where the printing plate is in direct contact with the substrate and non-contact techniques (e.g., screen printing, aerosol printing, inkjet printing, laser direct writing), where only the ink contacts the substrate [6]. Those techniques suitable for roll-to-roll (R2R) processing, such as flexography, are especially attractive since they offer continuous manufacturing and high productivity [7].

Flexographic printing is known for depositing a wide range of thicknesses with the same resolution. The impression cylinder, plate cylinder, anilox roller, doctor blade and inking unit are the main parts of the flexographic printing process [1], as illustrated in Figure 1. Variables associated with the flexographic printing process include print speed, print force/engagement, anilox cell volume, anilox force/engagement as well as the ink and substrate properties [8]. Those variables have a direct impact on the print's morphological and electrical behavior. The print uniformity has a considerable influence on the final functionality of the device [9]. Within the context of printing electronics onto fabrics, it must be highlighted the challenge of durability and withstanding bending, stretching, abrasion and washing [10].

Numerous reviews and books were previously published, considering printed electronics on substrates such as glass, metal, paper or polymers [4,7]. Different studies were focused on the application of printed electronics onto textiles to obtain electrical devices such as capacitive sensors [11], perovskite solar cells [12] or RFID tags [13], but by using other printing techniques, such as ink jet or screen printing which are more common.

Figure 1. Significant parts of the flexography process



inking unit (1); anilox roller (2); doctor blade (3); plate cylinder (4); impression cylinder (5); printing substrate (6)

However, the incorporation of the flexography printing technique for printed electronics in the textile field is still very recent and there are not enough studies for its application. Continuing our previous work [14], this research is focused on the influence of the textile substrate parameters on the electrical performance of the printing.

The most used textile type for garments and even for technical applications is woven fabrics, where two sets of perpendicular yarns are crossed and interweave each other to create a coherent and stable structure [15]. In the context of this study, the term 'structure' refers to binding patterns of interlacing threads in woven fabrics, also considering internal structural features of the threads involved. Therefore, the structure of the woven fabric is determined, among other factors, by the weave construction, the interlacing coefficient, the density of threads in the fabric and the characteristics of warp and weft threads [16]. All the other physical (crimp, thickness, physical density, mass of unit area, porosity, etc.), mechanical (breaking strength and elongation, tensile strength, forces of rupture, resistance to abrasion, etc.) and permeability properties (permeabilities of gasses, liquids, light, sound, energy, water vapor, bacteria, etc.) are affected by previously mentioned selection [17]. Fabric texture and composition affect the porosity and strongly influence the textile characteristics such as the fabric mass, thickness, draping ability, stress-strain behavior, or air permeability. The surface topography of fabrics is responsible for their functionality—appearance and handle, wettability, soiling behavior and cleanability, abrasion resistance and wear. Topographical characteristics of the fabrics strongly depend on their construction parameters such as the type and fineness of filaments, yarn fineness, yarn density, and the type of weave. These characteristics have strong influence on, and in many cases, control the wetting properties [18].

It is important that printing ink has good adhesion to the substrate [19]. This becomes particularly complex in printing electronics onto fabrics where the

intrinsic porous structures and texture characteristic of textiles affects the diffusion and penetration of conductive ink, being able to deteriorate the printing precision and electrical performance of conductive lines [20].

Related to the fabric structure, it was proved in other printing techniques, such as screen-printing, that the smallest pore size and roughness shows a higher printing precision and lower electrical resistance of printed conductive lines [20].

According to material composition, natural fibers such as cotton tend to absorb the ink more readily than synthetic fibers such as polyester, due to hydrophilic and wettability properties of cellulosic fibers [21]. Generally, synthetic textile materials have smooth, tight surfaces that offer little texture for ink adhesion [19].

However, there are not systematic investigations about the relationship between the electrical performance of a flexo printed textile with the structure of the woven fabric (i.e., interlacing coefficient, yarn count and weft density) as well as with the material composition of the weft.

With the aim of establishing this relation, different textiles were specifically manufactured varying their structural parameters and materials. After that, a controlled flexographic printing process was performed by using a silver electrical ink. Finally, fabrics were physically and electrically examined and compared.

The research and the obtained results are presented from two different approaches. On the one hand, an approach is followed from a perspective focused on distinguishing the impact of the structural parameters of the woven fabric on the conductivity of the printing. Structural parameters include, but are not limited to, weave construction, interlacing coefficient, yarn count and fabric density. On the other hand, from a point of view based on establishing the influence of the weft material composition on the conductivity, a comparison between fabrics with different weft materials (cotton, polyester, and wool) was also performed.

Physical and electrical analyses were carried out for both approaches. Several methodologies were used including optical, FE-SEM, color fastness to wash, and color measurement using reflection spectrophotometer or multi-meter analyses. Significant results were obtained and therefore studied.

It is believed that these findings will provide some important support for printing electronic devices on woven textiles by using the flexographic technique.

2. Materials and Methods

Materials

With the aim of establishing the influence of structure and composition of woven fabrics on the conductivity of flexographic printed electronics, eleven textile types were specifically manufactured for the research (Textiles Joyper S.L., Cocentina, Spain), to be used as substrates for the printing.

On the one hand, eight different textiles structures were defined by varying the following constructional parameters: weave construction, weft yarn count, and weft density. On the other hand, textiles alternatives of the material used for the weft were added into the composition of three fabrics while maintaining the fabric structure.

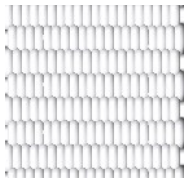
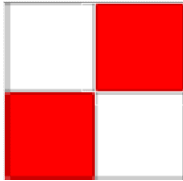
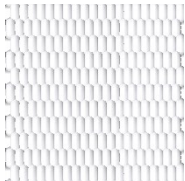
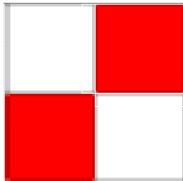
Table 1 shows the main characteristics of these fabrics, where test samples from T1–T8 correspond to textile structure variations and textiles from T9–T11 to alternative weft materials. It should be noted that polyester yarn was used in the warp in all samples.

The weave construction of textile materials is the regular structure produced by a pattern (unit cell) of interlaced threads repeating at regular intervals in two transversal directions [22]. The weave interlacing coefficient, KL , which depends on weave construction, is calculated by Equation (1):

$$KL = \frac{i}{w_1 \times w_2} \quad (1)$$

where i is the number of interlacing points in the weave repeat, w_1 is the number of ends in the weave repeat, and w_2 is the number of picks in the weave repeat [23]. The research was focused on the two most traditional and commonly used weaves—plain and twill. The plain weave is the basic weave where one warp yarn is lifted over one weft yarn. The interlacing is opposite in all neighboring cells. Plain weave allows the highest possible number of interlacing. The twill weave has a pattern of diagonal lines; each warp yarn lifts over more than one weft, so the diagonal lines in fabric reach high densities [24].

Table 1. Textile substrate’s characterization (I): composition and ligament.

Substrate Code	3D Modeling	Weft Composition	Weave Construction	Graphic Representation	Interlacing Coefficient (KL)
T1		Polyester	Plain		1
T2		Polyester	Plain		1

Capítulo 4. Influencia de la estructura y la composición de tejidos de calada en la conductividad de impresiones electrónicas por flexografía

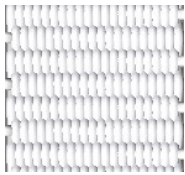
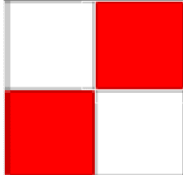
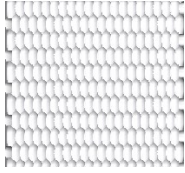


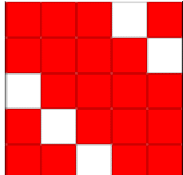

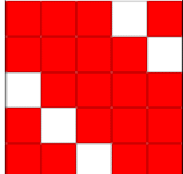

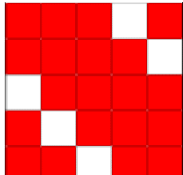

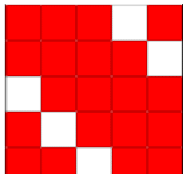

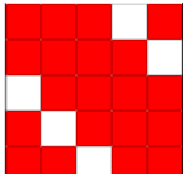

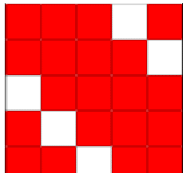

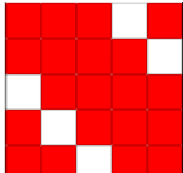
T3		Polyester	Plain		1
T4		Polyester	Plain		1
T5		Polyester	Twill		0.4
T6		Polyester	Twill		0.4
T7		Polyester	Twill		0.4
T8		Polyester	Twill		0.4
T9		Polyester	Twill		0.4
T10		Cotton	Twill		0.4
T11		Wool	Twill		0.4

Table 2 completes the main characteristics of the fabrics, adding the characteristics of the textile yarns in a detailed way for a better understanding.

Yarn number or yarn count refers to the thickness of a yarn and it is determined by its mass per unit length [25]. The fabric samples used in this study were produced by variation of the weft yarn count (167 dtex/333 dtex), without changing the warp count (167 dtex).

The density of the warp and weft is defined by the number of warps ends per cm and the number of picks per cm.

Therefore, the structure variations among samples from T1–T8 are the following: the weave construction, as samples from T1–T4 are plain and T5–T8 are twill; the yarn count used in for the weft, which is thicker in samples T4, T5, T7 and T8; and the weft density, which is lower in samples T1, T3, T5 and T7.

Meanwhile, while maintaining the structure parameters, the difference among samples T9–T11 is the weft composition, which is made from polyester in T9, from cotton in T10 and from wool in T11.

For the research, other structural parameters have been accordingly obtained to complete the characterization of the woven fabric samples. Cover factor (the degree of fabric fullness) is the proportion of the fabric area covered by warp and weft yarns. It means that in practice, cover factor is calculated independently for warp and weft yarn by the proportion of fabric area covered by those yarn, according to Equation (2):

$$Cf = Cfw_a + Cfw_e - Cfw_a \times Cfw \quad (2)$$

as $Cfw_a = Dwa \times dwa$ and $Cfw_e = Dwe \times dwe$, where Dwa and Dwe are densities of warp and weft and dwa and dwe are the diameter of warp and weft yarns, respectively. The cover factor directly depends on the yarn density and the yarn count [26]. Finally, the fabric weight was obtained according to the standard ISO 3801 by measuring the textile mass per unit area.

Regarding the ink, flexographic printing technology requires low-viscosity printing inks, which allows regular ink flow in the printing unit. Viscosity is generally lower than 0.05–0.5 Pa·s [27]. Same aqueous flexo-printable conductive ink, PFI-RSA6012—silver ink from Novacentrix (Austin, United States), was used in all prints to ensure comparable results. Details can be consulted in Table 3. The selection was made considering high conductivities and stretching properties for printing electronics on flexible substrates. It should be highlighted that there is a low supply on the market due to the novelty of the application of printed electronics in the textile through the flexography technique as stated above.

Table 2. Textile substrate's characterization (II): size and weight characteristics.

Substrate Code	Warp Density (ends/cm)	Weft Density (picks/cm)	Weft Count (dtex)	Cover Factor (%)	Fabric Weight ¹ (g/m ²)	Thickness (μm)
T1	58.0	10.5	333.3	84.8	154	515
T2	58.8	15.3	333.3	93.6	171	550
T3	58.4	10.7	666.7	92.9	191	622
T4	57.2	15.8	666.7	103.4	233	650
T5	59.2	10.6	333.3	64.5	160	705
T6	55.9	16.0	333.3	68.3	180	725
T7	57.3	11.6	666.7	70.0	222	744
T8	56.3	16.5	666.7	77.6	241	805
T9	59.4	15.9	666.7	79.3	235	800
T10	58.8	16.2	666.7	78.5	230	795
T11	60.4	16.8	666.7	82.1	225	790

¹ Mass per unit area determined according to the standard ISO 3801.

The ink contains silver nanoparticles and was formulated for high conductivity, fast curing, and improved levelling at lower printing speed.

Table 3. PFI-RSA6012—Silver ink characteristics.

Ink Code	Density (g/mL)	Solids (%)	Viscosity (Pas)	Volume Resistivity (μΩ·cm)	Curing	Properties
PFI-RSA601 Silver ink	2.22	60 (±2)	0.05–0.15 @1000 s ⁻¹	8–10	10–60 s 140 °C	Flexible Compatible with Polyester

2.1. Flexographic Electronic Printing

The manufacturing technology that is used is based on the flexographic printing technique of thick film. Flexography is a roll-to-roll direct printing technology, where an anilox roller, covered with micro-cavities on its surface, allows the collection of ink, and then is transferred to the printing plate cylinder. The specification of the anilox determines the volume of ink transferred to the printing plate. The ink is taken into these cells and the excess ink is subsequently removed by a doctor blade assembly.

For the research, one-layer flexographic prints were performed by using a printing experimental plant (K Printing Proofer, RK Print Coat Instruments Ltd., Litlington, United Kingdom). The equipment allows high quality proofs using flexography, among other printing techniques, with variable printing speeds of up to 40 m/min. Printing plates for use with the experimental plant are electronically engraved in exactly the same way as production cylinders. Using the flexo head, ink is transferred from the printing plate to a plain stereo roller and then onto the substrate. Adjustments can be made by micrometers.

As developing a specific electronic device is out of the scope of this research, a plain design has been used for the test; nevertheless the printing plate and the printing roller in the industrial machine could be customized.

The experimental phase of this research consisted of the flexo-printing of the woven fabrics shown in Tables 1 and 2 using the silver ink described in Table 3. With the objective of studying the influence of the textile substrates on the conductivity of the printing, the equipment settings were kept fixed so that they did not interfere with the results. The specific setup conditions are shown in Table 4. Printed layers were dry cured in a FED-115 air oven from BINDER at 140 °C for one minute in order to use the same curing characteristics for all the samples. Moreover, previous to the printing, a thermic treatment was applied to all the fabrics to avoid variations of size due to the curing temperature of inks. The thermic treatment applied consisted of introducing the fabrics in the same oven at 130 °C for 15 min.

Table 4. Printing parameters.

Ink	Anilox Volume	Resolution	Printed Area	Speed	Curing
PFI-RSA6012 Silver ink	11 cm ³ /m ²	150 LPI	150 × 95 mm ²	12 m/min	60 s 140 °C

2.2. Characterization

Once dried, the printed textile samples were physically and electrically analyzed by carrying out several studies.

Regarding physical characterization, the following measurement methods were used: optical, scanning electron microscopy (FE-SEM) (Oxford Instruments plc, Abingdon, United Kingdom), and color fastness to wash and color measurement using reflection spectrophotometer.

The optical macroscopic images were taken with a LEICA MZ APO stereomicroscope. It was used to analyze the print uniformity of each layer of the electronic printed samples.

High-resolution topographic images by SE (secondary electrons) and maps of crystalline and textural orientations by EBSD (electron backscatter diffraction) (Oxford Instruments plc, Abingdon, United Kingdom) were taken with a ZEISS ULTRA 55 Scanning Electron Microscope Field Emission Gun (field emission scanning electron microscopy (FE-SEM)) (Oxford Instruments plc, Abingdon, United Kingdom). They were used to analyze the ink penetration and the adhesion in each substrate.

Color fastness to domestic and commercial laundering was evaluated with a Gyrowash according to the standard method EN ISO 105-C06:2010. The test conditions were: temperature of 40 °C, 10 steel balls and standardized ECE soap reference without optical or chemical whitener. After the test, the printed woven textiles were dried in a forced-air circulation dryer and treated samples were compared with untreated samples visually using a grey scale, according to ISO 105-A02 standard.

Color measurement was evaluated by the determination of CIELAB coordinates according to the standard method ISO 105-J01:1997. The apparatus used was DATACOLOR DC 650 (400–700 nm) (Datacolor, New Jersey, United States) with the following conditions: illuminant $D_{65}/10^\circ$, diffuse measuring geometry and 6.6 mm of observation area.

With respect to electrical characterization, a usual two-terminal sensing unit was firstly considered to measure the conductivity behavior. Nevertheless, a two-wire system does not provide correct output due to variation in ambient temperature, as the resistance of the lead wires (both sides) changes unpredictably. Meanwhile, 4-wire Kelvin resistance measurement makes it possible to accurately measure resistance values less than 0.1 Ω while eliminating the inherent resistance of the lead wires connecting the measurement instrument to the component being measured [28]. For that reason, 4-wire system measurements were made. Resistance measurements were made with a FLUKE 8845A multimeter from FLUKE CORPORATION (Everett, WA, USA).

3. Results and Discussion

3.1. Electrical Characterization

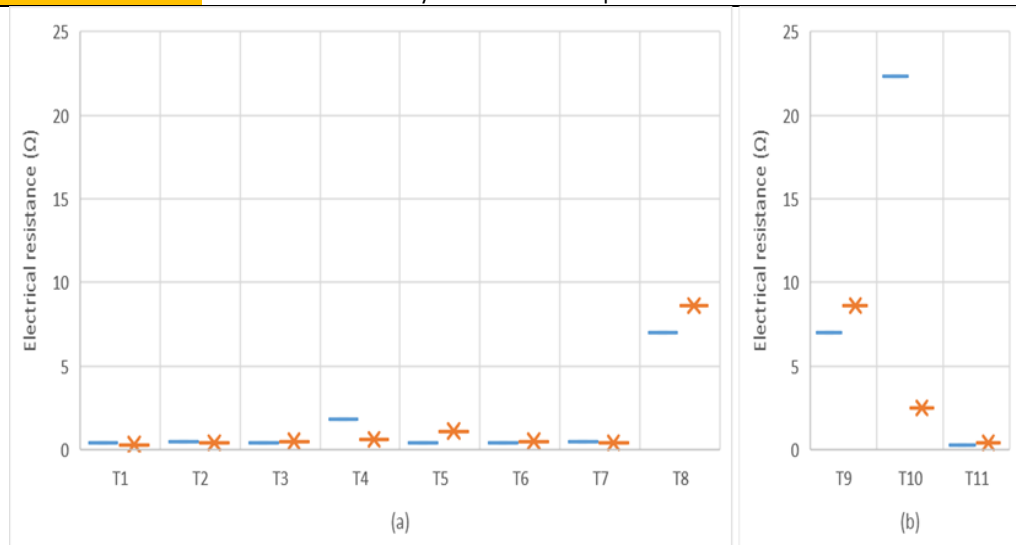
For the purpose of determining the electrical conductivity of the printings an approach based on measuring the electrical resistance was considered. A low resistivity indicates a material that readily allows electric current. Table 5 shows a summary of the printing results for all the fabrics in terms of electrical resistivity. Four different samples of each fabric were measured. The orientation of the measurements on the woven fabrics were separately considered. In addition, results are graphically shown in Figure 2.

Table 5. Electrical resistance of the printings. Measurements have been made both in warp and weft directions.

Substrate Code	Resistance (Ω) Warp Direction	Resistance (Ω) Weft Direction
T1	0.4	0.3
T2	0.5	0.4
T3	0.4	0.5
T4	1.8	0.6
T5	0.4	1.1
T6	0.4	0.5
T7	0.5	0.4
T8	7	8.6
T9	7	8.6
T10	22.3	2.5
T11	0.3	0.4

Figure 2.

Graphic representation of the electrical resistance of the printings (—) measured on warp direction and (*) measured on weft direction. (a) Electrical resistance affected by the structural variations of the textiles; and (b) Electrical resistance affected by the material composition of the textiles



Regarding the influence of the textile structure on the electrical behavior shown in Figure 2a, both measures on warp and weft directions agree that the woven fabric that presents the higher electrical resistance, and therefore worse electrical conductivity, is the substrate coded as T8. T8 was characterized by a lower interlacing coefficient and the highest mass per unit area.

These results coincide with the conclusions about the surface properties of woven fabric on electrical performance through a screen-printed technique. The fabric substrate with the smallest pore size and roughness shows a higher printing precision and lower electrical resistance of screen-printed conductive lines [20]. Therefore, the surface structure of the fabric substrate determines to some degree, not only the printing precision of conductive lines, but its electrical properties as well.

In order to address these challenges, surface pre-treatment onto rough and porous substrates or coatings and lamination processes should be performed in order to produce a continuous conductive pathway onto the textiles [5,10].

In order to deeply explore the relation found between woven fabric density and conductivity, results were plotted, as shown in Figure 3.

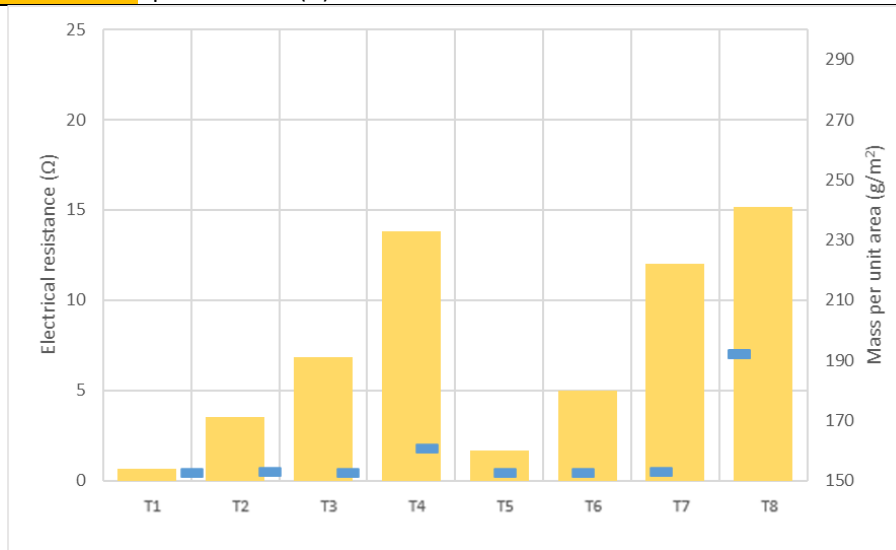
According to results shown in Figure 3, with regard to the influence of the textile structure on the electrical behavior, it could be expected that the higher the mass per unit, the lower conductivity due to the ink expansion through the inner part of the textile.

Moreover, Figure 2b allows the analysis in terms of the impact of the textile composition on the electrical behavior of electronic printing through the flexographic technique. Again, resistance measures in both directions agree and show that the woven fabric T10 presents higher electrical resistance. Even though

the measure on the warp direction shows better electrical conductivity, it is worse than the other textile samples made from other materials. The weft of T10 was made from cotton. This makes sense, because of the moisture absorption capacity of cellulosic fiber. In this way it can be demonstrated that cotton performs worse as the weft material for printing electronics with the flexo technique.

Figure 3.

Graphic representation of the relation between electrical resistance of the printings measured on warp direction and the mass per unit area. Electrical resistance of the printings measured on warp direction (—) and the mass per unit area (■).



An alternative solution for improving conductivity on printed electronic textiles with similar problems would be pre-treatment of the surface substrates by applying different chemical compounds that increase the adhesion of the ink avoiding its absorption.


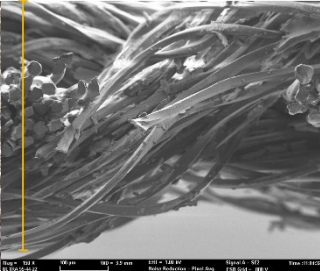
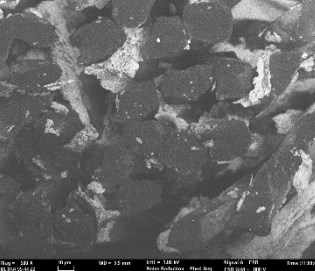

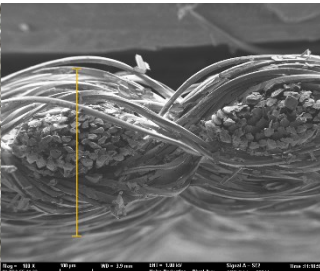
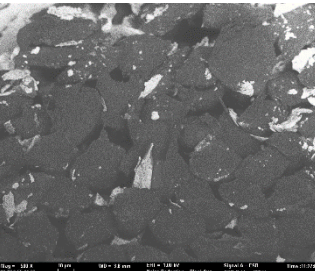

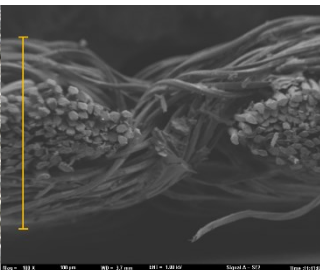
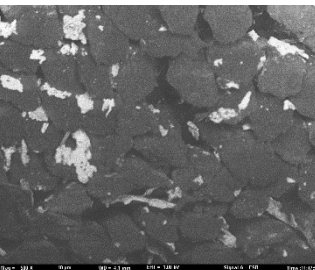

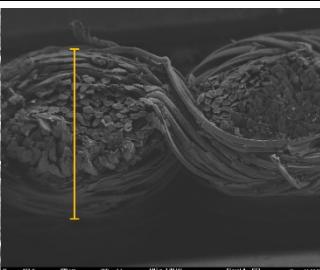
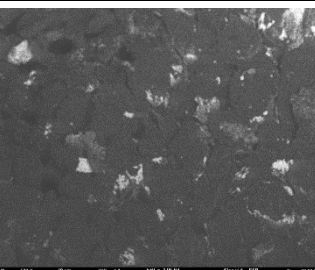

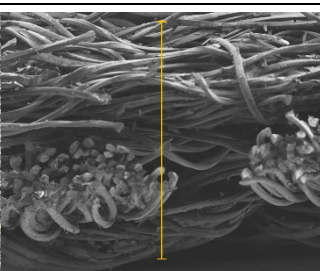
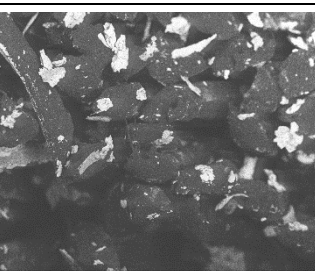
3.2. Physical Characterization

Focusing on analyzing the print uniformity of each layer of the electronic flexo printed woven textiles, optical macroscopic images were taken with 20 magnifications. In parallel, in order to discuss the ink penetration and the adhesion in each substrate, high-resolution topographic images were taken with Scanning Electron Microscope Field Emission Gun (FE-SEM).

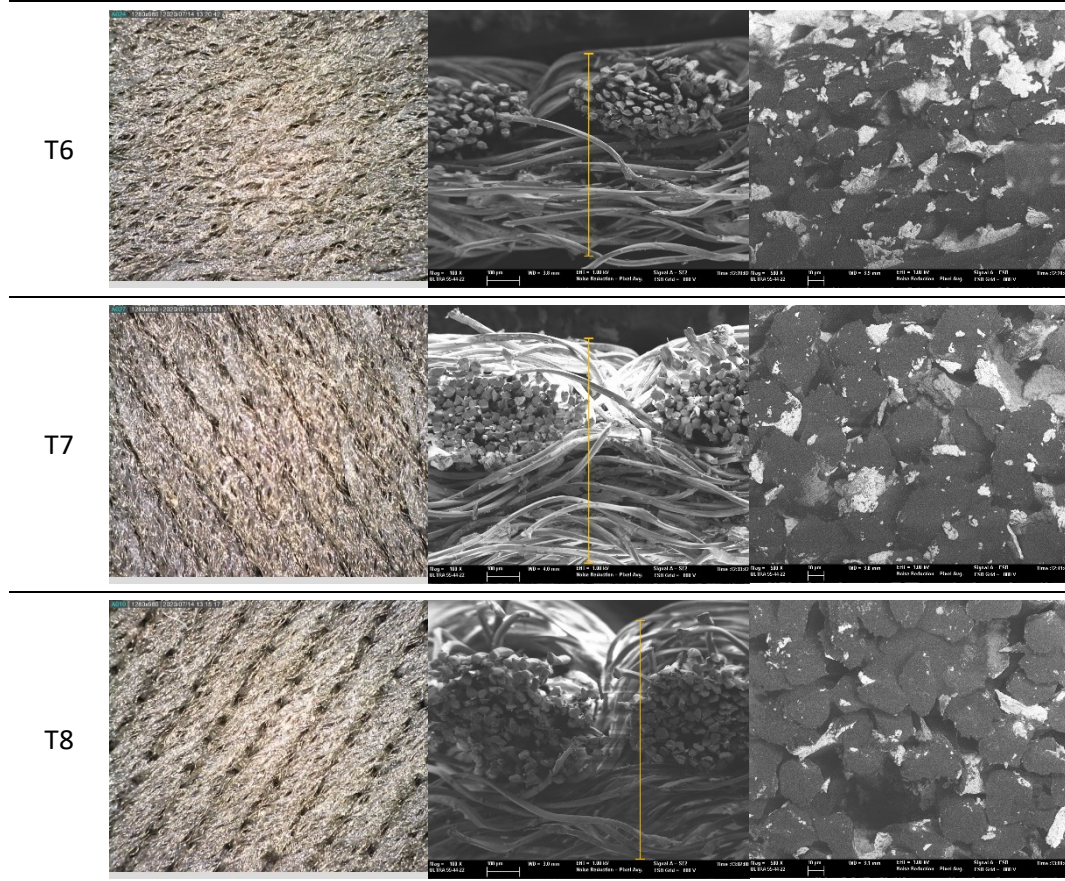
Table 6 shows the images obtained for the Optical and FE-SEM characterization of the woven substrates with different textile structures. The FE-SEM (×100) images show a visual characterization of the fabric and ink, and the FE-SEM (×150) images on the right show maps of crystalline and textural orientations by EBSD for a determination of the position of the silver particles.

Capítulo 4. Influencia de la estructura y la composición de tejidos de calada en la conductividad de impresiones electrónicas por flexografía

Table 6. Optical and FE-SEM characterization (I).

Substrate Code	Optical (×20)	FE-SEM (×100)	FE-SEM (×150)
T1			
T2			
T3			
T4			
T5			

Capítulo 4. Influencia de la estructura y la composición de tejidos de calada en la conductividad de impresiones electrónicas por flexografía



Regarding optical results, images in Table 6 show a total color uniformity on the substrates' surface not depending on the textile structure. The silver shade obtained is typical from conductive inks which contains silver nanoparticles. In addition, the images reveal the porosity of the woven fabrics as they show their characteristic textiles holes, being different for each structure. It should be highlighted the picture of the substrate T8 as it is the one with more holes between the yarns forming the woven fabric, in comparison with the other samples.


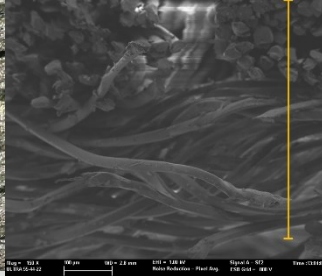
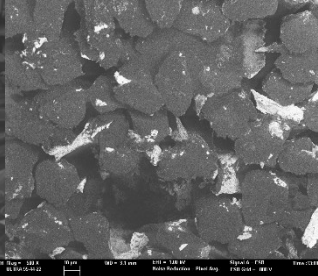

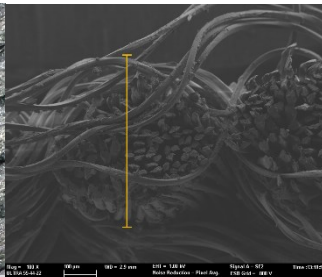
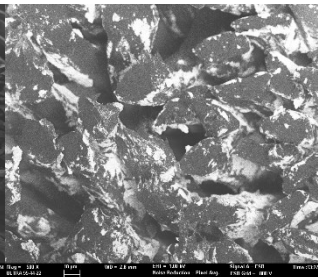

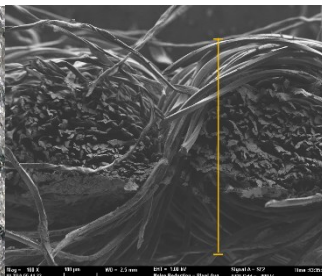
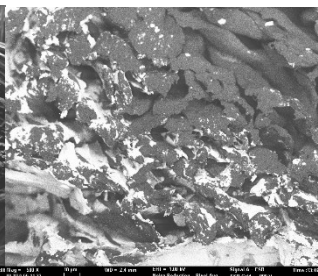
In respect of FE-SEM results, thanks to images of the cross section of the substrates shown in Table 6, it can be observed how weft threads with different titles and densities are intertwined with the warp threads. These pictures reveal the enclaves formed by the interlacing of the threads in both directions, obtaining a roughness of the fabric and presenting different heights. Depending on the structure and yarn title, the enclave formed is different and it directly affects to the fabric thickness. As already stated on the fabrics' characterization in Table 2, the FE-SEM ($\times 100$) images in Table 6 confirm the thickness is greater for fabrics whose ligament is sarge (substrates T5–T8).

Furthermore FE-SEM ($\times 150$) results with more magnification allow to observe the ink penetration and distribution in the inner part of the textile. Images demonstrate that there are particles of the silver ink between the fibers of the weft threads.

Capítulo 4. Influencia de la estructura y la composición de tejidos de calada en la conductividad de impresiones electrónicas por flexografía

Meanwhile, Table 7 shows the images obtained for the Optical and FE-SEM characterization of the woven substrates with different materials on the weft.

Table 7. Optical and FE-SEM characterization (II).

Substrate Code	Optical (×20)	FE-SEM (×100)	FE-SEM (×150)
T9			
T10			
T11			

Regarding ink uniformity, all the woven fabrics present a good visual level at the print in spite of the porous surface. To ensure this uniformity in printing electronics with low viscosity inks onto a rough and porous textile surface is a great challenge, due to the orientation of fibers or yarns and the change of fiber morphology constantly [5].

With respect to ink penetration, the images in Table 7 show that ink does not remain at the surface, but penetrates until the lower side of the textile. Thus, results coincide with the relation pointed out in Figure 3 about the influence of the mass per unit area on the electrical behavior. Whereas conventional printing that uses thickeners to increase the viscosity of the paste achieve deposition only on the surface, the low ink viscosity used in flexo printing penetrates to the inner of the textile, the interior of the textile. Thus, the topography of the sample plays an important role in achieving the homogeneity and continuity of the ink. Therefore, it is demonstrated that the higher the mass per unit, the lower conductivity due to the ink expansion through the inner part of the textile.

In terms of the impact of the material of the weft, the images shown in Table 7 do not show significant differences among them.

The color loss and staining resulting from desorption and/or abrasive action of the samples was evaluated according to EN ISO 105-C06:2010 tests for color fastness [29]. The grade of color fastness to domestic and commercial laundering is presented in Tables 8 and 9.

For assessing the change in color, woven treated textiles were compared with a grey scale complying with ISO 105-A02. Regarding assessing staining, the grey scale used follows ISO 105-A03. Both scales consist of five pair of non-glossy grey color chips which illustrate the perceived color differences corresponding to fastness rating 5, 4, 3, 2 and 1. A range of 5 is given only when there is no perceived difference between the tested specimen and the original material.

Table 8. Color fastness results (I).

Substrate Code	Change in Color	Staining					
		Wool	Acrylic	Polyester	Polyamide	Cotton	Acetate
T1	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T2	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T3	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T4	4	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T6	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T7	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T8	4	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5

Table 9. Color fastness results (II).

Substrate Code	Change in Color	Staining					
		Wool	Acrylic	Polyester	Polyamide	Cotton	Acetate
T9	4	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
T10	1	4	4	4	4	4	4
T11	1	4	4	4	4	4	4

According to results shown in Table 8, obtained values for change in color and staining are between 4 (Very Good) and 5 (Excellent). Therefore, it can be concluded that structural variations have not a relevant influence on the color fastness of the flexo electronic printings.

However, results shown in Table 9 demonstrate that color fastness decreases with natural fibers such as cotton and wool. The reason can be that ink adhesion improves in synthetic fibers such as polyester thanks to the curing time after the flexography printing using 150 °C, as this type of fiber is a thermoplastic material and being its glass transition temperature around 70 °C [30].

In order to address these challenges in woven textiles with natural fibers, surface pre-treatment should be done in order to improve the ink adhesion and therefore the electrical behavior [5]. It has been proved that special pretreatment processes on the fabric substrates improve the wash fastness for other printing techniques such as digital printing [31] or ink-jet [32]. According to a previous review [33], an increment of ink volume improves the ink coverage, upgrading in this case the conductivity, nevertheless it enhances the ink wash-out effect. For this reason, the ink volume transferred to the substrate should be optimized when conductivity and color fastness to washing are the objectives. In addition, coating and lamination processes could be done to ensure the continuous conductive pathway on textiles [10].

Spectrophotometric methods are adequate and objective for determining the color values of the fabric surface [34]. To assess variations found on the printings, measurements have been performed according to ISO 105-J01:1997 General principles for measurement of surface color [35].

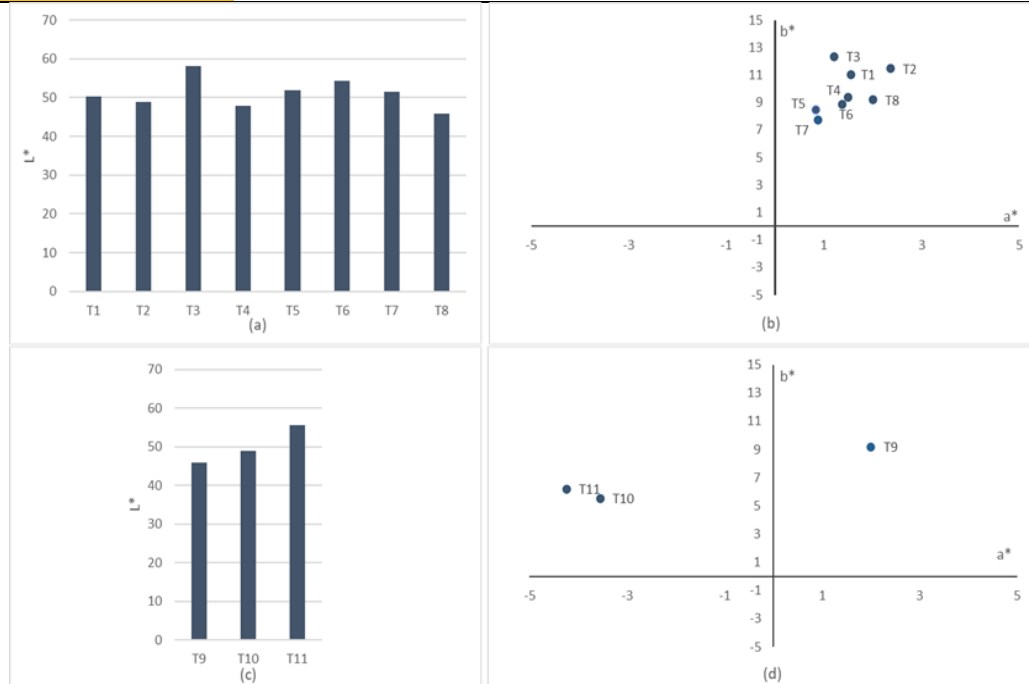
The CIELAB, or CIE $L^* a^* b^*$, color system represents quantitative relationship of colors on three axes: L^* value indicates lightness, and a^* and b^* are chromaticity coordinates. It is the most widely used method for measuring and ordering object color. The results of the analysis of color of the printings onto the woven fabrics are shown in Table 10. For a better understanding, results have been plotted and can be consulted at the Figure 4. On the color space diagram, L^* is represented on a vertical axis with values from 0 (black) to 100 (white). The a^* value indicates red-green component of a color, where $+a^*$ (positive) and $-a^*$ (negative) indicate red and green values, respectively. The yellow and blue components are represented on the b^* axis as $+b^*$ (positive) and $-b^*$ (negative) values, respectively. At the centre of the plane is neutral or achromatic [36].

Table 10. CIELAB* coordinates ($D_{65}/10^\circ$).

Substrate Code	L^*	a^*	b^*
T1	50.19	1.56	11.04
T2	48.86	2.36	11.48
T3	58.07	1.21	12.36
T4	47.78	1.49	9.36
T5	51.88	0.83	8.49
T6	54.29	1.37	8.86
T7	51.58	0.87	7.71
T8	45.95	2	9.19
T9	45.95	2	9.19
T10	48.91	-3.55	5.53
T11	55.58	-4.24	6.19

Figure 4.

Two-dimensional CIELAB (+L*, +a*, +b*) coordinates representation. (a) CIELAB lightness (+L*) of textile structure variations T1–T8; (b) CIELAB a* and b* coordinates of textile structure variations T1–T8; (c) CIELAB lightness (+L*) of textile material variations T9–T11; (d) CIELAB a* and b* coordinates of textile material variations T9–T11



Lower L* indicates that the sample becomes darker, and all printed samples show low light (L*) values near to 50. It is observed that there is no correlation between the conductivity and the tone obtained from the coordinates a* and b* in contrast to silver coatings of polymeric substrates, where it is demonstrated that shifting in the a* and b* during sintering means best conductivity [37]. On the other hand, it is observed that the sample T8/T9, the one with more weight and less conductivity, shows the lowest L* value, being darker than the other samples. This fact corroborates firstly, that variations on the fabric density have an influence on the color values [34], and secondly that the penetration of the silver particles into the textile, when the silver particles remain on the surface, thanks to emulsion resins, present values of L* between 60–70 [38].

4. Conclusions

It was proved that a direct relationship exists between the electrical performance of a flexographic printed textile with the structure of the woven as well as with the material composition of the weft.

After performing controlled flexographic printing processes onto woven fabrics by using a silver electrical ink, physical and electrical analysis led to the following conclusions. On the one hand, from a perspective focused on the structural parameters, the weave construction, interlacing coefficient, yarn count and fabric density, there was an effect due to the higher mass per unit of the fabric and lower

conductivity due to the ink expansion through the inner part of the textile. On the other hand, based on the weft material composition (cotton, polyester, and wool), it was shown that cotton performs worse as weft material for printing electronics with the flexo technique due to the moisture absorption capacity of cellulosic fiber.

It is believed that these findings will provide some important support for printing electronic devices on woven textiles by using the flexographic technique.

The study's next steps will consist of improving the conductivity of flexographic printed textile by carrying out surface pre-treatment, coating and lamination processes that increase the ink adhesion and therefore the electrical behavior.

5. References

1. Avuthu, S.G.; Gill, M.; Ghalib, N.; Sussman, M.R.; Wable, G.; Richstein, J.; Circuit, J. An introduction to the process of printed electronics. In Proceedings of the SMTA International, Rosemont, IL, USA, 25–29 September 2016.
2. Kim, C.; Jeon, S.W.; Kim, C.H. Reduction of Linearly Varying Term of Register Errors Using a Dancer System in Roll-to-Roll Printing Equipment for Printed Electronics. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **2019**, *20*, 1485–1493.
3. Wiklund, J.; Karakoç, A.; Palko, T.; Yiğitler, H.; Ruttik, K.; Jäntti, R.; Paltakari, J. A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. *J. Manuf. Mater. Process.* **2021**, *5*, 89, doi:10.3390/jmmp5030089.
4. Rocha, L.A.; Viana, J.C. Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Electronics. 2018. Available online: <https://doi.org/10.5772/intechopen.76161> (accessed on 2021.06.15).
5. Karim, N.; Afroj, S.; Tan, S.; Novoselov, K.S.; Yeates, S.G. All Inkjet-Printed Graphene-Silver Composite Ink on Textiles for Highly Conductive Wearable Electronics Applications. *Sci. Rep.* **2019**, *9*, 1–10.
6. Cano-Raya, C.; Denchev, Z.Z.; Cruz, S.F.; Viana, J.C. Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics—A review". *Appl. Mater. Today* **2019**, *15*, 416–430, doi:10.1016/j.apmt.2019.02.012.
7. Søndergaard, R.R.; Hosel, M.; Krebs, F. Roll to roll fabrication of large area functional organic materials. *J. Polym. Sci.* **2012**, *51*, 16–34.
8. Mogg, B.T.; Claypole, T.; Deganello, D.; Phillips, C. Flexographic printing of ultra-thin semiconductor polymer layers. *Transl. Mater. Res.* **2016**, *3*, 015001, doi:10.1088/2053-1613/3/1/015001.

9. Davide, D. Control of morphological and electrical properties of flexographic printed electronics through tailored ink rheology. *Org. Electron.* **2019**, *73*, 212–218.
10. Yang, K.; Torah, R.; Wei, Y.; Beeby, S.; Tudor, J. Waterproof and durable screen printed silver conductive tracks on textiles. *Text. Res. J.* **2013**, *83*, 2023–2031.
11. Ferri, J.; Llopis, R.L.; Moreno, J.; Lidón-Roger, J.V.; Garcia-Breijo, E. An investigation into the fabrication parameters of screen-printed capacitive sensors on e-textiles. *Text. Res. J.* **2020**, *90*, 1749–1769, doi:10.1177/0040517519901016.
12. Quinto, C.; Linares, A.; Llarena, E.; Montes, C.; González, O.; Molina, D.; Pío, A.; Ocaña, L.; Friend, M.; Cendagorta, M. Screen Printing for Perovskite Solar Cells Metallization. In Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; Hamburg, Germany. 14-18 September 2015; pp. 1144–1148, doi:10.4229/eupvsec20152015-3bv.5.41.
13. Vena, A.; Perret, E.; Tedjini, S. Implementation and Measurements of Chipless RFID Tags. In *Chipless RFID Based on RF Encoding Particle*; 2016, ISTE Press – Elsevier (London, United Kingdom), doi:10.1016/B978-1-78548-107-9.50005-7.
14. Rodes-Carbonell, A.M.; Ferri, J.; Garcia-Breijo, E.; Bou-Belda, E. A preliminary study of printed electronics through flexography impression on flexible substrates. *Ind. Textila* **2021**, *72*, 133–137.
15. Kumar, B.; Hu, J. Woven fabric structures and properties. In *The Textile Institute Book Series*; Woodhead Publishing (Sawston, United Kingdom): 2017; pp. 133–151, doi:10.1016/b978-0-08-101273-4.00004-4.
16. Amin, R.; Haque, M. Effect of weave structure on fabric properties. *Ann. Univ. Oradea Fascicle Text.* **2011**, *12*, 161–165.
17. Rogina-Car, B.; Kovačević, S.; Schwarz, I.; Dimitrovski, K. Microbial Barrier Properties of Cotton Fabric—Influence of Weave Architecture. *Polymers* **2020**, *12*, 1570, doi:10.3390/polym12071570.
18. Hasan, M.; Calvimontes, A.; Synytska, A.; Dutschk, V. Effects of Topographic Structure on Wettability of Differently Woven Fabrics. *Text. Res. J.* **2008**, *78*, 996–1003, doi:10.1177/0040517507087851.
19. Meseldžija, M.; Vukić, N.; Erceg, T.; Budinski, N.; Lavicza, Z.; Lera, I.; Kojić, D. The analysis of the substrate influence on the print quality parameters of screen-printed textile. VIII International Conference on Social and Technological Development, 8th - 9th November 2019. Trebinje Bosnia and Herzegovina. **2019**, doi:10.7251/STED1902362M.
20. Hong, H.; Hu, J.; Yan, X. Effect of the basic surface properties of woven lining fabric on printing precision and electrical performance of screen-printed

- conductive lines. *Text. Res. J.* **2019**, *90*, 1212–1223, doi:10.1177/0040517519888251.
21. Agathian, K.; Kannammal, L.; Meenarathi, B.; Kailash, S.; Anbarasan, R. Synthesis, characterization and adsorption behavior of cotton fiber based Schiff base. *Int. J. Biol. Macromol.* **2018**, *107*, 1102–1112.
 22. Grishanov, S.; Meshkov, V.; Omelchenko, A. A Topological Study of Textile Structures. Part I: An Introduction to Topological Methods. *Text. Res. J.* **2009**, *79*, 702–713, doi:10.1177/0040517508095600.
 23. Özdemir, H.; Mert, E. The effects of fabric structural parameters on the tensile, bursting, and impact strengths of cellular woven fabrics. *J. Text. Inst.* **2013**, *104*, 330–338, doi:10.1080/00405000.2012.725521.
 24. Šajn Gorjanc, D. *J. Eng. Fibers Fabr.* **2014**, *9*, 38–46.
 25. Vrljičak, Z.; Dragana, K.; Skenderi, Z. Impact of yarn count, noil percentage and yarn tension on structure of jersey fabric. *Tekstil* **2015**, *64*, 158–168.
 26. Kostajnshek, K.; Dimitrovski, K. Use of Extended Cover Factor Theory in UV Protection of Woven Fabric. *Polymers* **2021**, *13*, 1188, doi:10.3390/polym13081188.
 27. Żołek-Tryznowska, Z. Rheology of Printing Inks. In *The Printing Ink Manual*; 2016; pp. 87–99, doi:10.1016/B978-0-323-37468-2.00006-3.
 28. Revuelta, P.S.; Litrán, S.P.; Thomas, J.P. Electrical Power Terms in the IEEE Std 1459 Framework. **2016**, 23–49, doi:10.1016/B978-0-12-803216-9.00002-X.
 29. Textiles—Tests for Colour Fastness—Part C06: Colour Fastness to Domestic and Commercial Laundering (ISO 105-C06:2010). Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045649> (accessed on 2021.07.15).
 30. Deopura, B.L.; Padaki, N.V. Synthetic textile fibres: Polyamide, polyester and aramid fibres. In *Textiles and Fashion*; Woodhead Publishing (Sawston, United Kingdom): 2015; pp. 97–114.
 31. Jong, S.E.; Mok, L.Y.; Lee, J.S.; Chul, Y.S. Development of Cellulosic Woven Fabric for Digital Textile Printing. *Text. Coloration Finish.* **2005**, *17*, 20–26.
 32. Zhang, Y.; Westland, S.; Cheung, V.; Burkinshaw, S.M.; Blackburn, R.S. A custom ink-jet printing system using a novel pretreatment method. *Color. Technol.* **2009**, *125*, 357–365, doi:10.1111/j.1478-4408.2009.00218.x.
 33. Kašiković, N.; Vladić, G.; Milić, N.; Novaković, D.; Milošević, R.; Dedijer, S. Colour fastness to washing of multi-layered digital prints on textile materials. *J. Natl. Sci. Found. Sri Lanka* **2018**, *46*, 381, doi:10.4038/jnsfsr.v46i3.8489.

34. Gabrijelčič, H.; Dimitrovski, K. Influence of yarn count and warp and weft thread density on colour values of woven surface. *Fibres Text. East. Eur.* **2004**, *12*, 32–39.
35. Available online: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0023384> (accessed on 2021.07.15).
36. Ly, B.C.K.; Dyer, E.B.; Feig, J.L.; Chien, A.L.; Del Bino, S. Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement. *J. Investig. Dermatol.* **2020**, *140*, 3–12.e1, doi:10.1016/j.jid.2019.11.003.
37. Cherrington, M.; Claypole, T.; Gethin, D.; Worsley, D.; Deganello, D. Non-contact assessment of electrical performance for rapidly sintered nanoparticle silver coatings through colorimetry. *Thin Solid Films* **2012**, *522*, 412–414, doi:10.1016/j.tsf.2012.08.039.
38. Soleimani-gorgani, A.; Pishvaei, M. Water Fast Ink Jet Print Using an Acrylic /Nano-Silver Ink. 2021.



Capítulo 5

Discusión y conclusiones

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

El objetivo del capítulo final es analizar los resultados y resumir las conclusiones más relevantes obtenidas durante el curso de la investigación.

A continuación, se describen todas las contribuciones novedosas relativas al proceso de impresión sobre sustratos textiles mediante flexografía. Sin embargo, hay aspectos que todavía pueden ser foco de nuevos estudios. Por ello se han identificado, además de las barreras y limitaciones encontradas en el desarrollo de la tesis, aquellas acciones y líneas de trabajo que pueden ser origen de potenciales investigaciones en un futuro.

1. Discusión general de los resultados

El fin principal de la tesis es el estudio de la novedosa aplicación de la técnica de la flexografía sobre materiales textiles. Para ello, se ha tomado como base los actuales conocimientos de la autora en el área de la electrónica impresa empleando la tecnología serigráfica.

Este objetivo general se ha subdividido en cuatro objetivos parciales que han guiado el desarrollo de la tesis:

- ▶ Realizar estudios del comportamiento de diferentes sustratos textiles frente a tintas con características eléctricas y frente a los distintos parámetros de impresión flexográfica, con el objetivo de determinar los sustratos textiles más adecuados para este tipo de tecnología.
- ▶ Definir el impacto de los parámetros estructurales de un tejido de calada en la conductividad de la impresión. Los parámetros incluyen, el tipo de ligamento, el coeficiente de ligadura, el título de hilo y la densidad del tejido.
- ▶ Establecer la influencia del material de la trama en la conductividad de elementos conductores-resistivos.
- ▶ Desarrollar un sistema de medición de temperatura continuo mediante impresión electrónica sobre sustratos flexibles y elásticos mediante serigrafía para su traslación a flexografía.

La discusión, por lo tanto, se basa en analizar los resultados obtenidos para valorar así las posibilidades de la aplicación de la flexografía para la impresión electrónica en el sector textil.

1.1. Estudios del comportamiento de diferentes sustratos textiles

Específicamente, se han investigado parámetros como la penetración de la tinta, la uniformidad de la impresión, la adhesión, la solidez y el comportamiento eléctrico de la misma tinta conductora de plata impresa en diferentes sustratos flexibles aplicada con el proceso de flexografía.

Además de los sustratos de papel polimérico y siliconado, que se utilizan normalmente en la electrónica impresa, también se eligieron dos sustratos para el estudio: tela tejida y no tejida.

Se han realizado análisis ópticos, microscopio electrónico de barrido (SEM), Kelvin de 4 puntos y solidez del color al lavado y al frote.

Los resultados concluyeron que, en cuanto al comportamiento de la conductividad, los sustratos porosos como los textiles y las telas no tejidas sin tratamientos previos y posteriores, no presentan resultados aceptables. En los análisis ópticos, se observan espacios entre la tinta y la superficie de los sustratos lo que indica una baja uniformidad y una mala penetración de la tinta. Esta mala adherencia provoca circuitos abiertos y, por tanto, una baja o nula conductividad eléctrica.

Por el contrario, en los análisis de los sustratos poliméricos y papeles siliconados se observa una mayor uniformidad mostrando un contacto completo de la tinta con el sustrato.

En cuanto a la solidez del color al lavado, las telas tejidas y no tejidas son una opción más adecuada en lugar de los sustratos poliméricos y de papel delgados que se degradan significativamente después del proceso de lavado.

1.2. Impacto de los parámetros estructurales del tejido en la conductividad

El estudio se ha centrado en investigar la influencia de las variaciones de la estructura del tejido en la conductividad de la tinta impresa. Los parámetros incluyen, el tipo de ligamento, el coeficiente de ligadura, el número de hilo y la densidad del tejido. Para ello, se fabricaron diferentes tejidos en los que se variaba cada uno de esos parámetros y se realizaron impresiones utilizando la técnica de la flexografía con tinta conductora de plata.

La caracterización eléctrica demuestra que un menor coeficiente de ligadura y una mayor densidad de tejido, empeoran la conductividad de la tinta impresa. Esto se debe a que la tinta se expande por el interior del tejido, empeorando la

uniformidad en la superficie del sustrato. Además, este fenómeno se ha verificado a través de los análisis ópticos y SEM, que muestran cómo la tinta no permanece en la superficie, sino que se filtra a través de los tejidos de mayor densidad.

Por el contrario, cuando el tamaño del poro que se forma en el tejido es más pequeño, debido a un mayor coeficiente de ligadura, y la rugosidad de la superficie es menor, hay una mejor adhesión de la tinta. Esta observación coincide con otros estudios realizados para la técnica de la serigrafía.

De esta forma se puede establecer que la estructura del tejido determina las propiedades eléctricas de las pistas conductoras impresas.

1.3. Impacto del material de trama de un tejido en la conductividad

El estudio se ha centrado en investigar la influencia de la materia de la trama de un tejido en la conductividad de la tinta impresa. Para ello se fabricaron diferentes tejidos en los que se variaba la composición de la trama (algodón, poliéster y lana).

Se realizaron impresiones utilizando la técnica de la flexografía con tinta conductora de plata. Las medidas eléctricas muestran una peor conductividad en los tejidos con trama de algodón. Esto se debe a la alta absorción de la humedad propia de las fibras celulósicas.

Además, en cuanto a los resultados obtenidos en los ensayos de solidez, se muestra que la trama que contiene poliéster presenta mayor resistencia que los materiales naturales. Esto se debe al tiempo de curación después de la impresión de flexografía, en el que se alcanza una temperatura de 150 °C ya que el material pasa a su fase cristalina a partir de los 70 °C.

1.4. Desarrollo de sistema de medición de temperatura continuo.

Se ha desarrollado un prototipo portátil que permite al personal sanitario conocer el comportamiento de la temperatura local de úlceras de extremidad inferior de larga duración en el tiempo y compararla con diferentes zonas de referencia adyacentes a la úlcera.

Para ello, se probaron sustratos flexibles alternativos, técnicas de serigrafía, tintas poliméricas y un sistema incorporado para lograr indicadores potenciales del estado y la evolución de las heridas crónicas.

En la fase de desarrollo del sensor de temperatura mediante una NTC (*negative temperatura coeficient*) con encapsulado de montaje superficial se comprobó que, desde el punto de vista tecnológico, la mejor opción era el uso de un sustrato de poliuretano grado médico DelStar EU94DS con tinta Inkron IPC-603X plata en serigrafía; utilizando la pasta NC-SMQ80/1E de Indium para soldar.

Para la elección del sustrato, inicialmente se consideró el uso de un PDMS (polidimetilsiloxano) en film, por estar recomendado para experimentos de laboratorio e investigación médica. Pero finalmente descartó debido a la baja adherencia de las tintas, a pesar de haber intentado aplicar varios acabados para mejorar la tensión superficial. En su lugar, se consideraron varios sustratos de poliuretano de grado médico, siendo el DelStar EU94DS el que mejor mantenía la conductividad de la impresión durante los ensayos de elongación

La soldadura de la NTC sobre la tinta conductora en el sustrato de poliuretano también ha sido un parámetro de estudio. La temperatura de la soldadura no debe exceder los 150 °C debido al punto de fusión del sustrato poliuretano, por lo que el uso de tipo de pastas de soldadura estaba limitado. Obteniéndose una soldadura óptima con la pasta de soldar NC-SMQ80/1E de Indium.

El sistema final está formado por sensores de temperatura unidos DelStar EU94DS al sustrato de grado médico flexible y estirable, donde se han impreso pistas conductoras de plata como interconexiones con la unidad de adquisición de datos.

Se han realizado test de funcionamiento en un individuo sano para verificar el registro de datos. De esta forma se comprobó con éxito la toma de cuatro temperaturas durante un periodo de 24 horas. Los sensores, que estaban en contacto con la piel, detectaron pequeñas variaciones durante el día, siendo muy estable durante la noche.

Además, se ha desarrollado un *datalogger* específico para este sistema. Todo el conjunto permitirá al personal sanitario adquirir la temperatura de la herida y su entorno para tomar decisiones sobre el estado y evolución de la misma.

El sistema electrónico desarrollado ha demostrado ser robusto, de bajo consumo y cómodo para el paciente, y permite controlar los tiempos de adquisición de datos, así como el volcado de datos para su posterior estudio.

2. Acciones futuras

La incorporación de la flexografía en el campo de la impresión electrónica sobre textil es todavía muy reciente, por ello, el desarrollo de esta tesis doctoral no ha hecho sino iniciar este recorrido y abrir puertas a nuevas investigaciones.

Con esta intención, a continuación, se listan las potenciales acciones y líneas de trabajo para continuar trabajando en el futuro derivadas de la presente tesis.

- ▶ Desarrollo de un sistema de medición de temperatura continuo mediante la impresión electrónica sobre sustratos flexibles y elásticos, utilizando la

técnica de la flexografía y tomando como base los descubrimientos y protocolos desarrollados en esta tesis.

- ▶ Ampliar el alcance de esta tesis doctoral realizando pruebas de la tecnología de impresión electrónica por flexografía en un entorno real, para validarla a escala industrial.
- ▶ Explorar el efecto de diferentes tratamientos superficiales, como el hidrofóbico y el óleo-fóbico para mejorar la uniformidad de la tinta en las impresiones mediante flexografía sobre tejido.
- ▶ Explorar el efecto de diferentes acabados tras la impresión para la protección de los circuitos impresos sobre textil mediante flexografía para la mejora de durabilidad y conductividad de los circuitos.

3. Conclusiones

En la introducción, se expone cómo los “textiles electrónicos” o “e-textiles” son una de las apuestas de futuro de la industria textil y de la moda. Estos dispositivos pueden aplicarse en múltiples áreas y sectores como el aeroespacial, la automoción, la biomedicina, la robótica o el sector de la salud, entre otros. Sin embargo, conseguir estas nuevas propiedades electrónicas en los textiles, sin perder ligereza y resistencia, y manteniendo un precio asequible, sigue siendo un reto para el sector.

El desarrollo de esta tesis doctoral surge precisamente de la motivación de proveer a la industria textil de más información sobre la impresión electrónica sobre textiles mediante la técnica de la flexografía, un método que ofrece alta productividad y calidad a un bajo coste.

Los artículos recogidos en la tesis, siguiendo los requisitos marcados por la Universitat Politècnica de València y la Escuela de Doctorado, ponen de manifiesto el estudio realizado sobre la novedosa aplicación de la técnica de la flexografía sobre materiales textiles, cumpliendo así con el objetivo establecido. Se espera que los avances en la impresión mediante flexografía sobre el textil impulsen el desarrollo de los textiles electrónicos de una forma asequible para todo el público.

El primer estudio estaba enfocado en comprender el comportamiento de diferentes sustratos textiles frente a tintas con características eléctricas y frente a los distintos parámetros de impresión flexográfica, con el objetivo de determinar los sustratos textiles más adecuados para este tipo de tecnología. Para ello se realizó un estudio utilizando la misma tinta electrónica y los siguientes sustratos: lámina polimérica, papel siliconado, un tejido y un no-tejido.

Los resultados de la impresión mediante flexografía fueron aceptables en la lámina polimérica y el papel siliconado. Sin embargo, el material tejido y no-tejido no presentaban buenos valores relativos a la uniformidad de la tinta, la penetración

de la tinta en el sustrato y a la conductividad. En cambio, obtuvieron mejores resultados en cuanto a solidez al lavado que el sustrato polimérico y el de papel, que se degradaban después de realizar el proceso de lavado normalizado.

De esta forma, se confirma la eficiencia del proceso de impresión electrónica mediante flexografía en sustratos laminares de superficie lisa. Y consecuentemente, se opta por estudiar aquellos parámetros estructurales del tejido que permiten alterar la superficie de este, para saber cuál es su influencia sobre la conductividad.

El segundo capítulo, se centraba en desarrollar los protocolos adecuados para lograr una perfecta integración de tintas con características eléctricas en las telas con tecnología flexográfica. Por ello, como se concluye en el estudio anterior, uno de los objetivos específicos era definir el impacto de los parámetros estructurales de un tejido de calada en la conductividad de la impresión.

Para ello, se realizó una impresión controlada sobre tejidos de calada desarrollados para el proyecto utilizando la misma tinta electrónica de plata y se analizaron las propiedades físicas y eléctricas de las muestras resultantes.

Cuanto mayor sea la densidad del textil menor es la conductividad final de la impresión debido a la expansión de la tinta a través de la parte interna del tejido. Para ello se deben ajustar los parámetros estructurales que incluyen el tipo de ligamento, el coeficiente de ligadura y el número de hijo utilizados.

Así, se demostró que sí que existe una relación directa entre la conductividad de una impresión por flexografía con la estructura del tejido de calada.

El otro objetivo específico para el desarrollo de los protocolos era establecer la influencia del material de la trama en la conductividad de elementos conductores-resistivos.

Para esto, se realizó una impresión controlada sobre tejidos con tramas de diferentes composiciones (algodón, lana y poliéster), pero utilizando la misma tinta electrónica de plata, y se analizaron las propiedades físicas y eléctricas de las muestras resultantes.

El algodón sería el material menos recomendable para la impresión electrónica mediante la técnica de la flexografía debido a la capacidad de absorción de la humedad de las fibras celulósicas. Así, se demostró que sí que existe una relación directa entre la conductividad de una impresión por flexografía con el material utilizado en la trama.

Finalmente, se trabajó en el objetivo de desarrollar un sistema de medición de temperatura continuo mediante impresión electrónica sobre sustratos flexibles y elásticos mediante serigrafía para su traslación a flexografía.

Se consigue desarrollar con éxito un sistema robusto, de bajo consumo y confortable para los pacientes que permite la adquisición de los datos de

temperatura de forma continua. Se determina de esta forma que la mejor opción como sustrato es el DelStar EU94DS de grado médico de poliuretano con una tinta de plata Inkron IPC-603X.

En resumen, teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos y las contribuciones realizadas, se espera que estas observaciones puedan servir como base y soporte para la impresión de dispositivos electrónicos sobre tejidos mediante el uso de la técnica de flexografía.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

