

---

**Sistema textil inteligente  
para la monitorización  
de la temperatura del pie diabético**

---



**VNiVERSiDAD  
DSALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

**TESIS DOCTORAL**

**Juan José Bullón Pérez  
Universidad de Salamanca  
Noviembre 2021**



# Sistema textil inteligente para la monitorización de la temperatura del pie diabético

Memoria que presenta para optar al grado de Doctor por la Universidad  
de Salamanca

*Juan José Bullón Pérez*

Dirigida por la Doctora  
*Araceli Queiruga Dios*

**Universidad de Salamanca**

**Noviembre 2021**



## **Declaración de autoría**

D. Juan José Bullón Pérez, presenta la tesis doctoral titulada "Sistema textil inteligente para la monitorización de la temperatura del pie diabético", para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca y declara que este proyecto ha sido realizado bajo la dirección de la Dra. Araceli Queiruga Dios, profesora Titular de Universidad, del Departamento de Matemática Aplicada, de la Universidad de Salamanca.

En Salamanca, a 8 de noviembre de 2021

Juan José Bullón Pérez

Dra. Araceli Queiruga Dios



*. . . Siempre hay un precio  
Que tienes que pagar  
Todo de golpe  
O día a día lo harás . . .  
Enrique Urquijo*





# Agradecimientos

*“Es de bien nacidos ser agradecidos”*, es una de las sentencias que durante muchos años he escuchado en mi entorno familiar y que aún retumba en mis oídos.

Como es habitual, hay muchas personas a las que agradecer su amabilidad, su atención, sus constructivas observaciones y comentarios. Por tanto, a todos aquellos que se reconocerán fácilmente a sí mismos: ¡un enorme y afectuoso agradecimiento!

Y ahora algo de gratitud para amigos más específicos:

En primer lugar me gustaría mostrar mi agradecimiento a mis tutoras Ascensión Hernández y Araceli Queiruga por su apoyo constante en el desarrollo de mi tesis y al proyecto Monitorización de la temperatura del pie diabético, dándome siempre buenos y acertados consejos.

De manera especial a mi mujer Reyes y mis hijas Ana y Cristina por su colaboración, cariño, por tener fé en mí, por su comprensión y por brindarme las palabras que me impulsaron a seguir adelante cuando más lo necesité.

A Miquel Soler amigo y Director del Centre de Recerca i Transferència de Tecnologia Tèxtil, Escola de Teixits, de Canet de Mar por creer en mí, por su preocupación, por quererme y apoyarme siempre, sin él, esta Tesis doctoral jamás hubiese sido terminada.

...Así como a muchos amigos que, cada uno a su forma, me regalaron momentos maravillosos ... y compartieron su buen humor conmigo.

A todos “que Dios os lo aumente allí donde más lo necesitéis” como diría mi madre, Paulina. Esto también va por ti.



# Resumen

En este documento se analiza la afinidad entre textiles e informática, se identifica la necesidad de su integración y se construye un sistema textil inteligente utilizando herramientas proporcionadas por un nuevo campo emergente de investigación, que combina las fortalezas y capacidades de la electrónica y los textiles.

Los textiles inteligentes se definen como textiles que pueden detectar y reaccionar a las condiciones ambientales o estímulos de fuentes mecánicas, térmicas, químicas, eléctricas o magnéticas, interactuando así con el usuario final.

Los sensores y otros elementos computacionales simples se pueden integrar en los textiles inteligentes, en los hilos y los tejidos, con el objetivo de recopilar información personal, monitorizar las constantes vitales y enviarlas de forma remota e inalámbrica para su posterior procesamiento.

En los últimos años, los productos textiles y las prendas de vestir inteligentes han creado nuevos campos de aplicación, con el fin de detectar y analizar estímulos y dar una respuesta adecuada, permitiendo diferentes usos centrados en la monitorización e interacción basadas en sensores.

Entre las aplicaciones de la monitorización basada en sensores, se incluyen la adquisición de signos vitales en la vigilancia médica, la estimación de la actividad física en los deportes o los sistemas de seguridad para cuerpos y fuerzas de seguridad o bomberos, por citar algún ejemplo. Su carácter discreto hace que las prendas inteligentes sean especialmente adecuadas para cualquier tarea de control físico y fisiológico. A diferencia de los dispositivos portátiles, que el consumidor utiliza como complemento personal, la ropa, enriquecida con tejidos inteligentes, proporciona comodidad en cualquier tipo de actividad. Los textiles son fibras cómodas de usar y ofrecen una plataforma flexible para comunicar funciones de detección.

El estudio de diferentes procedimientos no invasivos para monitorizar los indicadores de salud está creciendo, debido a los avances en dispositivos móviles, chips y sensores inalámbricos. Además, pueden ser utilizados por el

personal sanitario y por los pacientes fuera del entorno clínico.

Las enfermedades relacionadas con la diabetes afectan principalmente a los ojos, los riñones y las extremidades inferiores, en particular a los pies. De hecho, en presencia de un factor desencadenante, la diabetes provoca ulceraciones en los pies, que pueden dar lugar a una posterior amputación. Por otra parte, las afecciones asociadas a la patología del pie diabético incluyen neuropatías, trastornos arteriales periféricos (isquemia) e infecciones, y como consecuencia de esta patología, cada 30 segundos, en algún lugar del mundo alguien sufre la mutilación, total o parcial, de una extremidad inferior. Por ello, en esta memoria se propone un sistema de monitorización específico para pacientes diabéticos.

Los pacientes diabéticos sufren pérdida de la sensibilidad y de la sensación de dolor, motivo por el cual no perciben el desarrollo de úlceras en los pies. Diferentes investigaciones que se han realizado sobre afecciones vasculares y ulceraciones sugieren que existe una variación de temperatura en la zona donde se produce una úlcera, que logra indicar su aparición. Es así, que el análisis de medidas de la temperatura plantar se considera una herramienta útil en el diagnóstico precoz del pie diabético.

La temperatura del cuerpo humano, junto con la frecuencia cardíaca, la presión arterial y la frecuencia respiratoria constituyen los cuatro signos vitales estándar en los entornos médicos, por lo que la información facilitada por estos datos y sus valores se utiliza para la evaluación médica del estado de salud de los pacientes. Además, es un indicador importante de la condición física del cuerpo, y se relaciona con la comodidad y el rendimiento, tal es el caso del calor y frío que se producen en situaciones de estrés. La desviación de pocos grados de la temperatura corporal normal (37 °C), se considera un síntoma de infección.

En este trabajo se desarrolla e implementa un sistema textil inteligente que mide la temperatura podal en pacientes diabéticos. Se trata de un dispositivo no invasivo que recoge los valores de temperatura, de forma continua y durante largos períodos de tiempo, y envía la información a un dispositivo móvil. De esta forma el paciente será capaz de obtener un diagnóstico en las etapas tempranas de su enfermedad.

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación .....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodología.....	5
<b>2. Identificación del problema. Contexto científico</b>	<b>7</b>
2.1. Diabetes. Fundamentos.....	8
2.2. Problema del pie diabético .....	10
2.3. Temperatura. Factor influyente en el pie diabético.....	15
<b>3. Tejidos inteligentes</b>	<b>23</b>
3.1. Concepto de dispositivo corporal.....	25
3.2. Materiales textiles funcionales y su aplicación como sistemas textiles inteligentes.....	31
3.3. Componentes de los sistemas textiles inteligentes .....	41
3.3.1. Sensores y actuadores textiles inteligentes.....	42
3.3.2. Sistema de procesamiento de datos.....	45
3.3.3. Procedimiento de comunicación .....	46
3.3.4. Fuente de alimentación .....	47
3.4. Estandarización de los textiles inteligentes .....	50
3.4.1. Verificación .....	52
3.4.2. Inocuidad.....	53
3.4.3. Durabilidad de las propiedades .....	53
3.4.4. Información sobre el producto .....	54
3.4.5. Aspectos medioambientales .....	54
3.4.6. Legislación de la Unión Europea .....	55
<b>4. Diseño y desarrollo del prototipo</b>	<b>59</b>

---

4.1. Diseño del prototipo .....	61
4.2. Dispositivos de medida de la temperatura.....	69
4.2.1. Termopares.....	70
4.2.2. Detectores de temperatura resistivos.....	71
4.2.3. Termistores .....	71
4.2.4. Sensores de silicio .....	72
4.3. Implementación del prototipo .....	72
4.3.1. Protocolo de comunicación 1–Wire .....	81
4.3.2. Verificación por redundancia cíclica .....	82
4.4. Módulo de transmisión y procesamiento .....	83
4.5. Programación del sistema textil inteligente .....	86
4.6. Prototipos de monitorización de la temperatura podal .....	100
4.6.1. Prototipo inicial.....	100
4.6.2. Estructuras textiles.....	106
4.6.3. Prototipo final .....	108
<b>5. Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro</b> .....	<b>113</b>
5.1. Conclusiones.....	113
5.1.1. Sistema de medición de temperatura.....	114
5.1.2. Sistema textil inteligente .....	115
5.2. Aportaciones .....	115
5.3. Trabajo futuro.....	118
<b>Bibliografía</b> .....	<b>119</b>

# Índice de figuras

2.1. Complicaciones diabéticas (Guariguata et al., 2015).....	9
2.2. Patogénesis de las heridas en un pie diabético.....	11
2.3. Úlcera causada por un esfuerzo repetitivo (Bakker et al., 2012).12	
2.4. Regiones de interés (Bakker et al., 2012). .....	12
2.5. Exploración de problemas potenciales del pie. ....	14
2.6. Exploración mediante el monofilamento Semmes-Weinstein (Viade, 2006).....	15
2.7. Exploración con neurotensiómetro (Viade, 2006).....	16
2.8. Medidas de temperatura de pacientes diabéticos y un grupo de control (Chan et al., 1991).....	19
2.9. Asimetrías térmicas (Arnaiz-Lastras et al., 2011).....	20
3.1. Dispositivos inteligentes portátiles.....	27
3.2. Tecnología portátil: primer dispositivo corporal portátil. Museo MIT. ....	28
3.3. Tecnología portátil: gafas electrónicas. ....	29
3.4. Camiseta inteligente (Rajamanickam et al., 1998). ....	30
3.5. Esquema tejidos inteligentes. ....	33
3.6. Fenómenos físicos en los materiales textiles funcionales. ....	34
3.7. Ejemplos de uso de materias textiles inteligentes (Van Langenhove, 2015; Van Langenhove y Hertleer, 2004). ....	36
3.8. Sistema de monitorización médica (Van Langenhove, 2015)...	37
3.9. Funcionalidad del sistema textil inteligente.....	41
3.10. Diagrama del flujo de información (Areny, 1993). ....	46
3.11. Electrónica flexible (Van Langenhove et al., 2012). ....	46
3.12. Aspectos de la estandarización de los tejidos inteligentes. ....	52
4.1. Sensor de base textil. ....	60
4.2. Tecnologías de producción textil. ....	62
4.3. Método de diseño propuesto para la elaboración del prototipo.63	
4.4. Proyecto electrónico: diseño funcional del STI. ....	67
4.5. Sensor de temperatura DS18B20U. ....	75

---

4.6. Elementos del STIMTP .....	76
4.7. Esquema eléctrico del STIMTP .....	77
4.8. Sensor STIMTP .....	77
4.9. Esquema del sensor (Maxim Integrated, 2019). .....	78
4.10. Identificador único (Maxim Integrated, 2019). .....	79
4.11. Circuito generador de CRC (Maxim Integrated, 2019). .....	83
4.12. Placa LilyGo <sup>®</sup> Mini32 Wifi ESP32. ....	86
4.13. Configuración eléctrica. ....	87
4.14. Identificación de los sensores conectados. ....	89
4.15. Identificación sensores por sus índices. ....	90
4.16. Respuesta sensores. ....	90
4.17. Protocolo cliente–servidor. Evento: toma de lecturas. ....	91
4.18. Protocolos cliente – servidor: evento y HTTP .....	92
4.19. Estructura de programación. ....	93
4.20. STI_Servidor_Web.ino .....	95
4.21. Esquema de implementación. ....	97
4.22. Servicio IFTTT .....	98
4.23. Prototipo Base .....	101
4.24. Circuito divisor de tensión. ....	103
4.25. Detalles del prototipo inicial. ....	106
4.26. Punto liso de poliamida y plata .....	107
4.27. Punto liso con rizo. ....	107
4.28. Calcetín. ....	108
4.29. Prototipo final. Desarrollo. ....	109
4.30. Prototipo final. ....	110
4.31. Monitorización temperatura podal. ....	111



# Índice de Tablas

3.1. Aplicaciones de los sistemas textiles inteligentes.....	26
3.2. Mecanismos estímulo–respuesta de los textiles inteligentes .....	35
3.3. Categorías de sistemas textiles inteligentes.....	36
3.4. Categorías de sistemas textiles inteligentes basados en la energía y la comunicación (Van Langenhove, 2015; Van Langenhove y Hertleer, 2004).....	38
3.5. Aplicaciones de los sensores en los sistemas textiles inteligentes.	44
4.1. Propiedades de las señales analógicas y digitales.....	65
4.2. Características de los sensores de temperatura.....	73
4.3. Relación temperatura–salida.....	80
4.4. Configuración de la resolución del sensor.....	80



# Capítulo 1

## Introducción

La globalización, la personalización y el valor añadido son características dominantes en los productos y artículos que se encuentran en el mercado, a disposición de los usuarios finales. Las empresas están tratando de ser flexibles, ágiles y receptivas para satisfacer estas demandas, rápidamente cambiantes, de los consumidores. Para alcanzar este objetivo, de complacer las exigencias de los usuarios, la industria debe ser capaz de adoptar, en sus procesos, la tecnología de la información y las técnicas eficaces de gestión de la cadena de suministro, siendo cada vez más consciente del valor añadido de sus artículos.

Si la innovación es de vital importancia para el éxito de la industria en el siglo XXI, la versatilidad es la única constante en el mundo dinámico de hoy. De hecho, el cambio no es nuevo para los productos textiles, que han evolucionado considerablemente durante esta última década. La vestimenta surgió como una forma de protección contra el duro entorno al que se enfrentaban los seres humanos, convirtiendo así esa protección en una de las principales razones para vestirse. Con el paso del tiempo, la faceta estética de la ropa comenzó a emerger, la indumentaria se usaba para hacer que el usuario se viera (y por lo tanto se sintiera) mejor y se pudiera distinguir de los demás.

Estas dos facetas principales del atuendo, la protección y la estética, han evolucionado, y la ropa actual es claramente diferente de (y mejor que) las primeras indumentarias, enriqueciéndose, entre otras cosas, con el desarrollo de nuevas fibras, productos químicos y tecnologías de fabricación. Sin embargo, los textiles han permanecido pasivos, puesto que no responden (ni automáticamente, ni como consecuencia de acciones del usuario) a los cambios en el entorno de la persona que los lleva, ni a las necesidades de esta en tiempo real. Además de ser pasiva, la vestimenta tiene otras características,

como son el proporcionar protección del entorno, transmitir pasión y que se considera ubicua y generalizada.

La invención en 1801 de la máquina de tejer Jacquard, por Joseph Marie Jacquard, supuso un punto de inflexión en la fabricación de tejidos y sirvió de inspiración para el motor analítico de Charles Babbage, el precursor de la informática moderna. El mecanismo Jacquard dio origen a la tarjeta perforada Hollerith y ha sido fundamental para lograr uno de los avances tecnológicos más profundos conocidos, la revolución del procesamiento de la información (Jayaraman, 1990). De hecho, cuando Intel introdujo sus microprocesadores Pentium, uno de sus anuncios tenía por lema: “*un tejido de chips que emergió de una máquina de tejer*”, capturando así, eficazmente, la esencia de la fabricación de chips, que suponía una verdadera mezcla de arte y ciencia, al igual que el diseño y la producción de textiles.

Este dispositivo Jacquard, constituyó el primer sistema de procesamiento de información binaria programado y mecanizado, que se programaba mediante tarjetas perforadas y de acuerdo con el esquema del diseño o dibujo que se deseaba obtener en la tela, una vez elaborada. Por otra parte, se habla de procesamiento mecanizado porque tiene como objetivo levantar y bajar los hilos longitudinales o de urdimbre, con los que se forma el tejido, y de esta forma se realizan los diseños deseados, basados en el picado o el programa incrustado en las tarjetas. Este procedimiento permite que durante la elaboración del tejido, también denominado proceso de tisaje, el hilo pueda estar en cualquier punto de una tela tejida y en uno de los dos estados o posiciones: en la cara o haz, o en la parte posterior o envés del tejido. Un orificio en la tarjeta significaba que el hilo aparecería en la cara de la tela, mientras que un espacio sólido, sin abertura, representaba que el extremo del hilo quedaría retrasado y aparecería en el envés de la tela.

Así, el mecanismo Jacquard estableció el escenario adecuado para el procesamiento de la información binaria moderna. Se dice que Ada Lovelace, matemática e hija de Lord Byron, considerada como la primera programadora informática y en cuyo honor el lenguaje de programación ADA lleva su nombre, describía de forma poética la información binaria de la siguiente forma:

*“La máquina analítica teje patrones algebraicos igual que el telar de Jacquard teje flores y hojas”* (Suárez, 2014).

## 1.1. Justificación

La diabetes mellitus (DM), conocida como diabetes, se caracteriza por la existencia de altos niveles de glucosa en sangre, que son el resultado de deficiencias en la capacidad del cuerpo para producir y/o secretar insulina. La diabetes es una enfermedad grave y crónica causada por factores here-

ditarios y ambientales. Actualmente, 350 millones de personas de edades comprendidas entre 20 y 64 años han sido diagnosticados de algún tipo de diabetes.

Las enfermedades relacionadas con la diabetes afectan principalmente a los ojos, los riñones y las extremidades inferiores. Esta investigación centra su atención en el estudio del pie diabético, cuyas afecciones incluyen neuropatías, trastornos arteriales periféricos (isquemia) e infecciones. Ante la presencia de un factor desencadenante, esta alteración es capaz de provocar una ulceración que motive una posterior amputación.

Las personas con diabetes sufren pérdida de la sensibilidad y de la sensación de dolor, y no identifican el desarrollo de úlceras en los pies. Una consecuencia de esto es que, cada 30 segundos, en algún lugar del mundo, alguien sufre la amputación, total o parcial, de una extremidad inferior.

En muchas ocasiones, el desarrollo y el deterioro de las alteraciones del pie diabético se previenen o retrasan sustancialmente con un tratamiento adecuado; es decir, con una evaluación del riesgo de los pacientes diabéticos y la precisión del estado del pie, siempre en una fase temprana. Las variaciones de temperatura, que se producen en el pie diabético antes de que aparezca una úlcera, son multifactoriales, se relacionan principalmente con problemas de circulación sanguínea, lesiones del sistema nervioso o neuropatías y con infecciones. En estos casos, la temperatura se considera un parámetro de interés, por lo que la medición de la temperatura plantar resulta útil en el diagnóstico precoz del pie diabético.

La temperatura corporal se considera uno de los signos vitales más importantes en el diagnóstico clínico de los pacientes. La práctica sanitaria actual, para la evaluación de la temperatura podal, consiste en la palpación manual del pie para su identificación y, aunque el estudio de diferentes procedimientos no invasivos para monitorizar los indicadores de salud está en aumento, debido a los avances en dispositivos móviles, chips y también sensores inalámbricos, prácticamente no se está realizando la monitorización de la temperatura del pie diabético de forma regular.

Algunos de los resultados que se han publicado, relacionados con investigaciones sobre las consecuencias de la diabetes, son los siguientes:

- En 2019, los costes sanitarios dedicados al tratamiento de la diabetes y sus complicaciones alcanzaron los 700 mil millones de euros del gasto mundial en atención sanitaria.
- Entre las complicaciones de la diabetes se encuentran los problemas del pie, que es la causa más común de amputación no traumática de miembros.
- La temperatura plantar varía en el pie diabético debido a los trastornos de termorregulación relacionados con neuropatías, isquemias o infecciones.

- El análisis de medidas de la temperatura plantar logra ser útil en el diagnóstico precoz del pie diabético.
- La monitorización regular de la temperatura del pie diabético tiene el potencial de reducir la incidencia de úlceras en el pie.

Con la finalidad de mejorar la calidad de vida de los pacientes diabéticos, se presenta en esta tesis un sistema de monitorización regular de la temperatura podal mediante la utilización de un textil electrónico o sistema textil inteligente (STI). Además, se describe la utilización de estos textiles inteligentes, caracterizados como sistemas ciberfísicos, que son capaces de sentir los estímulos del entorno, reaccionar y adaptarse a ellos integrando estas funcionalidades en la propia estructura textil, y que se obtienen de la integración física de un sistema inteligente con un sustrato textil. Los textiles electrónicos, no solo tienen capacidades “ponibles” como cualquier otra prenda textil, sino que también permiten la monitorización, la computación local y la comunicación inalámbrica. Los sensores y elementos computacionales que forman el STI se encuentran integrados en los hilos y los tejidos, con el objetivo de recopilar información, supervisar las estadísticas vitales y enviar de forma remota e inalámbrica los datos obtenidos, para su posterior procesamiento, con el fin de reducir la incidencia de úlceras en el pie diabético.

Actualmente, el vínculo entre textiles e informática es una realidad y permite afirmar que el tejido es la computadora.

## 1.2. Objetivos

Una vez identificado el problema, se establece una relación entre las complicaciones del pie diabético y la pérdida de calidad de vida de los pacientes que lo sufren, lo que supone elevados costes económicos para el sistema de salud. En muchas ocasiones, el desarrollo y el deterioro de los trastornos del pie diabético se retrasa sustancialmente con un tratamiento y prevención adecuados, como es la realización de una evaluación del riesgo de los pacientes y el diagnóstico preciso del estado del pie, siempre en una fase temprana, puesto que los signos de una posible isquemia o neuropatía son discretos y logran pasar inadvertidos en las primeras etapas de la enfermedad.

El objetivo general que se plantea en esta tesis es diseñar, desarrollar y optimizar un prototipo de sistema textil inteligente, con el que se monitorice la temperatura plantar del paciente diabético, para salvaguardar su integridad ayudando a prevenir la aparición de úlceras en el pie diabético.

Se han establecido los siguientes objetivos específicos, que han permitido alcanzar el objetivo final propuesto:

1. Diseñar y desarrollar un sistema que posibilite tomar medidas de tem-

peratura, procese la información obtenida y la transmita de forma inalámbrica a un dispositivo móvil.

2. Adaptar e incorporar el sistema de medida y control de la temperatura plantar a un textil inteligente, que facilite la monitorización de dicha señal biomédica.

### **1.3. Metodología**

El proyecto de un sistema textil inteligente para el control de la temperatura podal en pacientes diabéticos se inició con la búsqueda y revisión bibliográfica de los trabajos publicados al respecto, utilizando como palabras clave “medida de la temperatura” y “pie diabético” en diferentes bases de datos, tales como Scopus, Web of Science o Google Académico, además de los repositorios institucionales de diferentes universidades. También, con el fin de encontrar los dispositivos adecuados que permitieran recopilar datos sobre la temperatura del pie, la búsqueda se amplió a la plataforma en línea European Patent Office (EPO, 2004). La estrategia de investigación consistió en encontrar patentes y otros documentos de interés, así como en el seguimiento de actualizaciones y mejoras. Para localizar invenciones y equipos no patentados ya disponibles en el mercado, se realizó la exploración a través de Internet, estableciendo las siguientes palabras clave: pie diabético, temperatura del pie, monitorización de temperatura y evaluación de temperatura y tecnología (Martín Vaquero et al., 2019).

Con la finalidad de lograr los propósitos planteados en este trabajo, se establecieron una serie de etapas a ejecutar durante su desarrollo, distribuidas en dos líneas de investigación:

*Línea de investigación 1:* Estudio y fabricación del dispositivo de medida que permita captar la temperatura, incluyendo el diseño del circuito correspondiente. Se realizó un análisis comparativo y se seleccionaron diferentes sensores de temperatura en base a su tipología y a la sensación de confort que proporcionaban. A continuación, se procedió a estudiar la tecnología más adecuada para comunicar los datos obtenidos por el sensor y se optó por utilizar un protocolo de comunicación inalámbrico, ya que permite la creación de redes dinámicas, de bajo coste y sencillas en su desarrollo, además de promover la flexibilidad, la movilidad y ser una tecnología que se encuentra en rápido crecimiento. Posteriormente, se aplicaron los conocimientos adquiridos al diseño y desarrollo del circuito más adecuado para los requisitos del proyecto, para lo cual se identificaron las funcionalidades de los componentes necesarios y su configuración, proceso que ha permitido la programación e implementación del software de propósito específico, que ha dotado al sistema de una funcionalidad adecuada. Esta línea de investigación se encuentra relacionada directamente con el primero de los objetivos específicos.

*Línea de investigación 2:* Estudio y desarrollo del sistema textil inteligente que permita la monitorización continua de la temperatura plantar. Vinculado a los resultados obtenidos en la primera línea de investigación planteada y directamente supeditado al segundo de los objetivos específicos, se procedió al estudio descriptivo de los conceptos y fundamentos de los tejidos inteligentes, identificando los diferentes materiales y tecnologías que han posibilitado integrar el textil y la computación. Tras la descripción del entorno tecnológico en el que se ubican estos materiales textiles, se procedió a identificar los distintos componentes que conforman el sistema textil inteligente y que han permitido definir los elementos (con sus funcionalidades específicas) utilizados para llevar a cabo el prototipo de un calcetín inteligente.

De acuerdo con los temas que abarca esta tesis, se detalla a continuación la estructura que se ha propuesto.

En el Capítulo 2 se describen la diabetes y sus complicaciones y se presenta un enfoque sobre el pie diabético, que conduce a la definición del objetivo de la tesis.

El Capítulo 3 introduce los conceptos fundamentales relacionados con los textiles inteligentes, también denominados textiles electrónicos o ropa tecnológica, así como su contexto. Se resumen en este capítulo los principales hitos de la historia de la ropa tecnológica con dispositivos corporales para ilustrar el estado actual de la investigación sobre textiles y prendas de vestir inteligentes. El capítulo finaliza presentando la importancia y la necesidad a corto plazo del proceso de estandarización de los tejidos inteligentes.

El Capítulo 4 constituye la parte novedosa de este trabajo e incluye el diseño y realización del prototipo de un calcetín, así como el procedimiento completo de la toma de datos y su procesamiento. La obtención de una monitorización personalizada y asequible permite al sistema inteligente el cuidado de la salud y un diagnóstico precoz de problemas en el pie diabético; es decir, constituye una atención médica accesible, en cualquier lugar, en cualquier momento y para cualquier usuario.

En el Capítulo 5 se detallan las principales aportaciones de esta tesis, de forma precisa y sintética. Además, se identifican futuras líneas de investigación y posibles aportaciones a otras áreas de conocimiento, apoyadas en los resultados obtenidos.

Por último, en la Bibliografía, se incorporan las referencias de las fuentes de información citadas como resultado de una revisión exhaustiva, principalmente libros, revistas científicas, patentes y varios informes de empresas publicados en línea que han sido consultadas durante la realización del estudio.



## Capítulo 5

# Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro

En este capítulo se incluyen las conclusiones obtenidas del diseño e implementación de un sistema textil inteligente realizado para medir la temperatura podal, en pacientes diabéticos. Este sistema constituye un dispositivo no invasivo que puede obtener valores de temperatura, de forma continua y enviar la información a un dispositivo móvil. De esta forma, el paciente será capaz de prevenir posibles lesiones en sus pies, que de otra forma, posiblemente, no serían detectadas.

Se presentan además, los resultados de esta tesis que han permitido publicar varios artículos y comunicaciones en congresos internacionales.

Por último, se incluyen las posibles líneas futuras de trabajo, que son consecuencia del estudio realizado y podrían seguirse como continuación del mismo.

### 5.1. Conclusiones

Tal como se ha tratado en diversos capítulos de esta tesis, el sistema textil inteligente desarrollado es un procedimiento de medida y control digital dispuesto en un substrato textil, en forma de calcetín. Con la integración del sistema electrónico en el tejido, se dota a este de la funcionalidad de sentir, analizar, transmitir, aplicar y procesar la información recibida. Por lo tanto, la prenda puede configurarse para el procesamiento personalizado de los datos recogidos de forma continua. En concreto, el dispositivo ha sido diseñado para el ámbito de la atención sanitaria de los pacientes diabéticos con patologías en los pies.

Como resultado del estudio previo realizado, de la puesta en práctica del sistema textil y de su puesta en funcionamiento en un entorno controlado, es posible presentar las conclusiones que se detallan en los siguientes apartados,

agrupadas en función de los objetivos alcanzados.

### 5.1.1. Sistema de medición de temperatura

Se han alcanzado los siguientes resultados respecto a la consideración del STI como sistema de medida para su utilización como dispositivo de monitorización de la temperatura podal:

1. Se ha realizado un proyecto multidisciplinar, en el que se ha diseñado y elaborado el prototipo de un sistema de adquisición, procesamiento y comunicación de datos como un sistema de medida y control digital.
2. El desarrollo de este sistema de medida y control digital ha sido posible gracias al diseño y a la fabricación de un sensor de propósito específico, capaz de medir y transmitir de forma inalámbrica, un signo vital como es la temperatura.
3. Se ha desarrollado e implementado el circuito electrónico y se ha optimizado mediante el diseño, la programación e implementación de software específico.
4. Este dispositivo de medida se ha implementado, en primer lugar, tras la programación del código necesario para transmitir las medidas captadas a un servidor web en el que se representan en tiempo real y de manera gráfica las medidas de temperatura captada de forma continua, favoreciendo tanto al paciente como al especialista sanitario la interpretación de los datos recibidos.
5. Mediante la implementación del software se ha conseguido que las medidas de temperatura podal, captadas por el dispositivo, se almacenen de forma automática en una hoja de cálculo. Con esta funcionalidad se consigue que el dispositivo adquiera las medidas y a continuación entre en modo reposo, durante el tiempo que se estime conveniente, y vuelva a operar de forma automática, obteniendo así unas nuevas lecturas. Esta operativa puede re-programarse en función de las necesidades del usuario final.
6. Este programa informático, de propósito específico, ha permitido dotar al sistema de manera útil y cómoda, de la posibilidad de monitorizar la temperatura podal del paciente.
7. Este software puede proporcionar una protección activa a los usuarios, pacientes diabéticos con patologías en el pie, comúnmente conocido como pie diabético, al detectar y transmitir de forma inalámbrica, a un dispositivo portátil, las posibles variaciones de temperatura que se produzcan en la superficie plantar.

### 5.1.2. Sistema textil inteligente

Las conclusiones que se derivan de desarrollar el dispositivo de medida de la temperatura para su integración como textil inteligente son las siguientes:

- Se ha realizado un proyecto en el que se ha diseñado tanto un sistema de adquisición de datos como un sistema de medida y control digital, todo ello con la finalidad de incrementar la funcionalidad del circuito electrónico, mediante su integración en una estructura textil, que facilita la monitorización continua de la temperatura podal del paciente diabético.
- Este sistema textil inteligente puede ser utilizado como una herramienta que permita ser una medida preventiva para el auto diagnóstico de las complicaciones del pie diabético.

## 5.2. Aportaciones

Un sistema corporal portátil implica típicamente un dispositivo bastante rígido situado sobre un área pequeña de contacto y en posiciones concretas del cuerpo, que limitan el tipo de datos a los que estos dispositivos pueden acceder.

Además, todas las tecnologías llevan asociadas ciertas restricciones, los textiles inteligentes no son una excepción. Aunque estos dispositivos electrónicos tienen enormes posibilidades y potenciales beneficios, estos aún deben superar algunas barreras.

Las limitaciones encontradas en el proceso de desarrollo del sistema textil inteligente para la monitorización de la temperatura del pie diabético han sido principalmente las relacionadas con los siguientes aspectos:

- La precisión y confiabilidad de la medición de datos (incluyendo reducción de ruido) y el riesgo de interferencia con los sistemas de comunicación y otros sistemas electrónicos. Además, las condiciones ambientales internas y externas, como la sudoración abundante, también pueden afectar al correcto funcionamiento. Los sensores convencionales de tipo rígido, que muestran un alto rendimiento eléctrico, pueden fabricarse fácilmente mediante procesos convencionales. Sin embargo, es difícil obtener señales fisiológicas precisas, porque no es fácil hacer un contacto fuerte con el cuerpo humano. Si se requiere un dispositivo portátil para realizar funciones críticas de manera segura, la tolerancia al error es cero.
- La confiabilidad, seguridad y protección en la transferencia de datos. Se ha demostrado que los sistemas de comunicación en textiles electrónicos, como Wifi o Bluetooth, permiten la comunicación del textil

con otros dispositivos inteligentes para la visualización y análisis de datos obtenidos en tiempo real, lo que implica que la privacidad y la fiabilidad son aspectos importantes para estudios posteriores. Garantizar la seguridad y privacidad de la información recopilada por dichas tecnologías es crucial para convencer a los usuarios reales de que adopten este tipo de dispositivos, especialmente en entornos de atención médica, debido a la necesidad de proteger la privacidad.

- La minimización del número de accesorios adicionales. La tecnología utilizada permite la integración de sensores y dispositivos en los textiles sin componentes rígidos. Sin embargo, dada la variedad de textiles disponibles en el mercado, no hay una forma única de adaptarse a todas las necesidades. Dependiendo de la textura del tejido, son necesarios tratamientos previos y posteriores para integrar circuitos eléctricos en el tejido. En general, cada sistema de ropa inteligente contiene partes de hardware y software, que incluyen control, detección, actuador, comunicación, ubicación, suministro de energía, almacenamiento, visualización, así como el subsistema de interconexión y software. La minimización del número de accesorios adicionales a los dispositivos electrónicos portátiles es fundamental.
- La eficiencia de la gestión de energía. Además de la densidad de energía/potencia, el peso ligero y la comodidad también son requisitos esenciales. Un dispositivo de potencia ideal debe tener la forma de un tejido que se pueda incorporar fácilmente a una prenda sin sacrificar demasiado su suavidad, peso o comodidad.
- La durabilidad de los sistemas, además de la capacidad de lavado y la precisión de funcionamiento a largo plazo. Los textiles inteligentes están sujetos a fuertes flexiones, torsiones y estiramientos durante su uso. Por lo tanto, sus propiedades mecánicas y su comportamiento de lavado deben ser buenos, pero, hasta ahora, tienen poca estabilidad cíclica y durabilidad a largo plazo. Además, en este caso, el sistema de monitorización se enfrenta a condiciones ambientales adversas y movimientos bruscos. La robustez del sistema es un criterio esencial. Uno de los desafíos críticos es conseguir que sea reutilizable, lo suficientemente eficiente y superar el proceso de lavado. Los sensores textiles son propensos a dañarse durante el lavado, los ciclos de calor, el paso del tiempo y la exposición al polvo y al sudor.
- La facilidad de uso, incluida la capacidad de usar las prendas y sus sistemas electrónicos de forma más intuitiva, sin ayuda. Los dispositivos electrónicos están integrados en textiles y, por lo tanto, su capacidad de lavado es importante. Por lo general, los textiles solo se pueden lavar cuando se retiran todos los componentes electrónicos. Es importante que las fibras conductoras de electricidad se conecten fácilmente

a otros componentes. Para ser fáciles de usar, deben poder resistir los procedimientos de limpieza comunes, es decir, ser lavables a máquina y resistentes al secado en secadora. La relación entre el sistema textil y el usuario debe ser intuitivo, fácil de aprender, sin la necesidad de una capacitación extensa y costosa, fácil de usar, o mejor aún, usar sin ayuda.

- La movilidad, incluida la reducción de peso. Una limitación importante está relacionada con las baterías: su peso, volumen y el proceso de carga.
- Coste *versus* vida útil o durabilidad del producto. En particular, se necesitan materiales de producción en masa y de bajo coste con rendimientos superiores. Además de los problemas de costes, es necesario desarrollar aún más una mayor sensibilidad y una estabilidad operativa más prolongada de los sensores para realizar aplicaciones prácticas que puedan detectar con mayor precisión señales fisiológicas.
- La salud y la seguridad. Se plantean interrogantes sobre la entrada o la generación de partículas durante el proceso de fabricación y durante el periodo de uso. Esto incluye la potencial toxicidad de las nanopartículas y los metales, los efectos de los campos electromagnéticos, las descargas eléctricas accidentales. Además, este sistema presenta los mismos desafíos en su tratamiento de residuos que los residuos electrónicos tradicionales. Los desperdicios generados contienen sustancias problemáticas junto con sus baterías. En particular, es fundamental garantizar que los desechos generados por el uso no creen nuevos riesgos para la salud del usuario y el medio ambiente.

El trabajo realizado en las sucesivas etapas de esta tesis doctoral ha permitido dar a conocer parte de la investigación mediante presentaciones en congresos y artículos en revistas especializadas, contribuciones todas ellas aceptadas tras las procedentes revisiones ciegas por pares. En este sentido, las aportaciones realizadas han sido las siguientes:

- *Industrial cyber-physical systems in textile engineering* (Bullón Pérez et al., 2016): presentación en el *International Conference on European Transnational Education, SOCO16-CISIS16-ICEUTE16*, celebrado en San Sebastián en octubre de 2016, siendo publicado en las actas del congreso.
- *Proposal of wearable sensor-based system for foot temperature monitoring* (Bullón Pérez et al., 2017b): presentación en el *14th International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence*, celebrado en Oporto en junio de 2017, siendo publicado en las actas del congreso.

- *Skin temperature monitoring to avoid foot lesions in diabetic patients* (Queiruga Dios et al., 2017): presentación en el *11th International Conference on Practical Applications of Computational Biology & Bioinformatics (PACBB)*, celebrado en Oporto en junio de 2017, siendo publicado en las actas del congreso.
- *Manufacturing processes in the textile industry. Expert systems for fabrics production* (Bullón Pérez et al., 2017a): publicado en la revista *ADCAIJ: Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal* (2017).
- *Review on wearables to monitor foot temperature in diabetic patients* (Martín Vaquero et al., 2019): publicado en la revista *Sensors* (2019).

### 5.3. Trabajo futuro

El trabajo llevado a cabo en esta investigación sugiere la posibilidad de continuar algunas de las líneas de investigación desarrolladas e incluso iniciar otras nuevas asociadas a aspectos que, aunque estén situados fuera de los objetivos de la presente tesis, se encuentran relacionados con los temas tratados.

Es necesario saber en qué medida se manifiesta la temperatura plantar en los pacientes con Diabetes Mellitus. Para ello, se propone describir cuál es el estado termo-plantar de los pies de los pacientes con patologías y relacionar estas medidas, obtenidas mediante termografía plantar y el sistema textil inteligente, con los marcadores de riesgo clásico del pie diabético (neuropatía y artropatía), mediante escalas de valoración neuropática e índice tobillo-brazo. Si la concordancia entre la asimetría termo plantar y la neuropatía e ITB alterado es alta, se dispondrá de una técnica complementaria e innovadora que permita identificar y cuantificar objetivamente situaciones de riesgo de pie diabético, permitiendo aplicar las medidas preventivas de forma más precoz, reduciendo la aparición de úlceras, que precede al 85% de las amputaciones (Prompers et al., 2008; Tesfaye et al., 2010). La difusión de los resultados supondrá una aportación novedosa en el ámbito de trabajo y servirá de base para futuros estudios de los que se beneficiarán las personas con diabetes.

El proyecto, “Estudio de termometría plantar en pie diabético”, en el que se enmarcan las investigaciones realizadas en esta tesis, surgió como resultado de los contactos mantenidos entre un grupo de investigación multidisciplinar de la Universidad de Salamanca (del que el autor de esta investigación forma parte), dirigido por la Dra. Araceli Queiruga Dios, la Universidad de Extremadura y el Centro de Salud M<sup>a</sup> Auxiliadora de Béjar. Debido a la pandemia acaecida en los últimos años, dicha colaboración se encuentra paralizada, pero se espera poder retomarla en breve.

# Bibliografía

- Abbott, C. A., Vileikyte, L., Williamson, S., Carrington, A. L., y Boulton, A. J. (1998). Multicenter study of the incidence of and predictive risk factors for diabetic neuropathic foot ulceration. *Diabetes Care*, 21(7):1071–1075.
- Al-Kassir, A. R., Fernandez, J., Tinaut, F., y Castro, F. (2005). Thermographic study of energetic installations. *Applied Thermal Engineering*, 25(2-3):183–190.
- American Diabetes Association (2014). Diagnosis and classification of diabetes mellitus. *Diabetes Care*, 37(Supplement 1):81–90.
- American Diabetes Association (2017a). Classification and diagnosis of diabetes. *Diabetes Care*, 40(Supplement 1):11–24.
- American Diabetes Association (2017b). Standards of medical care in diabetes. *Diabetes Care*, 40(Supplement 1):1–135.
- Apelqvist, J., Bakker, K., Van Houtum, W., y Schaper, N. (2008). Practical guidelines on the management and prevention of the diabetic foot: Based upon the international consensus on the diabetic foot (2007) prepared by the international working group on the diabetic foot. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, 24:181–187.
- Areny, R. P. (1993). *Adquisición y distribución de señales*. Marcombo.
- Armstrong, D. G., Lavery, L. A., Liswood, P. J., Todd, W. F., y Tredwell, J. A. (1997). Infrared dermal thermometry for the high-risk diabetic foot. *Physical Therapy*, 77(2):169–175.
- Arnaiz-Lastras, J., Fernández-Cuevas, I., Gómez-Carmona, P., Sillero-Quintana, M., García, M., y Piñonosa, C. (2011). Pilot study to determine thermal asymmetries in judokas. In *16th annual congress of the European College of Sport Sciences ECSS*.
- Bagavathiappan, S., Philip, J., Jayakumar, T., Raj, B., Rao, P. N. S., Varalakshmi, M., y Mohan, V. (2010). Correlation between plantar foot

- temperature and diabetic neuropathy: A case study by using an infrared thermal imaging technique. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 4(6):1386–1392.
- Bakker, K., Apelqvist, J., y Schaper, N. C. (2012). Practical guidelines on the management and prevention of the diabetic foot 2011. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, 28:225–231.
- Bakker, K., Foster, A., Van Houtum, W., y Riley, P. (2005). Diabetes and foot care: Time to act. *International Diabetes Federation, Belgium*, 34.
- Ballerstadt, R. y Schultz, J. S. (2000). A fluorescence affinity hollow fiber sensor for continuous transdermal glucose monitoring. *Analytical Chemistry*, 72(17):4185–4192.
- Bobircă, F., Mihalache, O., Georgescu, D., y Pătrașcu, T. (2016). The new prognostic–therapeutic index for diabetic foot surgery–extended analysis. *Chirurgia*, 111:151–155.
- Bogue, R. (2013). Sensors for condition monitoring: A review of technologies and applications. *Sensor Review*, 33(4):295–299.
- Boulton, A. J. (2013). The pathway to foot ulceration in diabetes. *Medical Clinics of North America*, 97(5):775–790.
- Boulton, A. J., Meneses, P., y Ennis, W. J. (1999). Diabetic foot ulcers: A framework for prevention and care. *Wound Repair and Regeneration*, 7(1):7–16.
- Bouzida, N., Bendada, A., y Maldague, X. P. (2009). Visualization of body thermoregulation by infrared imaging. *Journal of Thermal Biology*, 34(3):120–126.
- Bullón Pérez, J., Arrieta, A. G., Hernández Encinas, A., y Queiruga Dios, A. (2016). Industrial cyber–physical systems in textile engineering. In *International Joint Conference SOCO16-CISIS16-ICEUTE16*, pages 126–135. Springer.
- Bullón Pérez, J., González Arrieta, A., Hernández Encinas, A., y Queiruga Dios, A. (2017a). Manufacturing processes in the textile industry. Expert systems for fabrics production. *ADCAIJ-Advances in Distributed Computing y Artificial Intelligence Journal*, 6(4):15–23.
- Bullón Pérez, J., Hernández Encinas, A., Martín Vaquero, J., Queiruga Dios, A., Martínez Nova, A., y Torreblanca González, J. (2017b). Proposal of wearable sensor–based system for foot temperature monitoring. In *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence*, pages 165–172. Springer.



- Carta, R., Jourand, P., Hermans, B., Thoné, J., Brosteaux, D., Vervust, T., Bossuyt, F., Axisa, F., Vanfleteren, J., y Puers, R. (2009). Design and implementation of advanced systems in a flexible–stretchable technology for biomedical applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 156(1):79–87.
- Castano, L. M. y Flatau, A. B. (2014). Smart fabric sensors and e–textile technologies: A review. *Smart Materials and Structures*, 23(5):053001.
- CEN/TEC (2009). Textiles and properties smart textiles definitions, state of development, applications and standardisation needs.
- Chan, A. W., MacFarlane, I. A., y Bowsher, D. R. (1991). Contact thermography of painful diabetic neuropathic foot. *Diabetes Care*, 14(10):918–922.
- Chan, M., EstèVe, D., Fourniols, J.-Y., Escriba, C., y Campo, E. (2012). Smart wearable systems: Current status and future challenges. *Artificial Intelligence in Medicine*, 56(3):137–156.
- Cherenack, K. y Van Pieterse, L. (2012). Smart textiles: Challenges and opportunities. *Journal of Applied Physics*, 112(9):091301.
- Cho, G., Lee, S., y Cho, J. (2009). Review and reappraisal of smart clothing. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 25(6):582–617.
- Dalsgaard, C. y Sterrett, R. (2014). White paper on smart textile garments and devices: A market overview of smart textile wearable technologies. *Market Opportunities for Smart Textiles, Ohmatex*.
- DeFronzo, R. A., Ferrannini, E., Alberti, K. G. M. M., Zimmet, P., y Alberti, G. (2015). *International Textbook of Diabetes Mellitus, 2 Volume Set*, volume 1. John Wiley & Sons.
- Di, J., Zhang, X., Yong, Z., Zhang, Y., Li, D., Li, R., y Li, Q. (2016). Carbon-nanotube fibers for wearable devices and smart textiles. *Advanced Materials*, 28(47):10529–10538.
- Dias, T. y Fernando, A. (2005). *Operative Devices Installed in Yarns*. Patente: GB0509963B1. [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en\\_EP&FT=D&date=20090604&CC=US&NR=2009139198A1&KC=A1](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20090604&CC=US&NR=2009139198A1&KC=A1) [Online; available 30/09/2021].
- Dias, T. y Rathnayake, A. (2016). *Electronically Functional Yarns*. Patente: GB2529900. [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=2&ND=3&adjacent=true&locale=en\\_EP&FT=D&date=20170928&CC=US&NR=2017275789A1&KC=A1](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=2&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20170928&CC=US&NR=2017275789A1&KC=A1) [Online; available 30/09/2021].

- Dias, T. (2017). Electronic strip yarn. Patente: US2019003084 (A1). [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=1&ND=3&adjacent=true&locale=en\\_EP&FT=D&date=20190103&CC=US&NR=2019003084A1&KC=A11](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=1&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20190103&CC=US&NR=2019003084A1&KC=A11) [Online; available 30/09/2021].
- Edmison, J., Lehn, D., Jones, M., y Martin, T. (2006). E-textile based automatic activity diary for medical annotation and analysis. In *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN'06)*, pages 131–134. IEEE.
- Ehrmann, G y Ehrmann, A. (2020). Suitability of common single circuit boards for sensing and actuating in smart textiles. *Communications in Development and Assembling of Textile Products*, 1(2):170–179.
- EPO (2004). European patent office. <https://www.epo.org/>.
- Espressif Systems Co., L. (2021). ESP-IDF programming guide.
- Farahani, B., Firouzi, F., Chang, V., Badaroglu, M., Constant, N., y Mankodiya, K. (2018). Towards fog-driven iot ehealth: Promises and challenges of iot in medicine and healthcare. *Future Generation Computer Systems*, 78:659–676.
- Farrar, C. R. y Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):303–315.
- Farrington, J. (2001). Wearable electronics and clothing from Philips and Levi. *Technical Textiles International*, 10(8):22–24.
- Farrington, J., Moore, A. J., Tilbury, N., Church, J., y Biemond, P. D. (1999). Wearable sensor badge and sensor jacket for context awareness. In *Digest of Papers. Third International Symposium on Wearable Computers*, pages 107–113. IEEE.
- Fendler, W., Borowiec, M., Baranowska-Jazwiecka, A., Szadkowska, A., Skala-Zamorowska, E., Deja, G., Jarosz-Chobot, P., Techmanska, I., Bautembach-Minkowska, J., Mysliwiec, M., et al. (2012). Prevalence of monogenic diabetes amongst Polish children after a nationwide genetic screening campaign. *Diabetologia*, 55(10):2631–2635.
- Firouzi, F., Rahmani, A. M., Mankodiya, K., Badaroglu, M., Merrett, G. V., Wong, P., y Farahani, B. (2018). Internet-of-things and big data for smarter healthcare: From device to architecture, applications and analytics.
- Fishlock, D. (2001). Doctor volts. *IEE Review*, 47(3):23–28.

- Formenti, D., Ludwig, N., Rossi, A., Trecroci, A., Alberti, G., Gargano, M., Merla, A., Ammer, K., y Caumo, A. (2018). Is the maximum value in the region of interest a reliable indicator of skin temperature? *Infrared Physics and Technology*, 94:299–304.
- Fundación redGDPS Diabetes (2021). Un A–hora por la diabetes. <https://www.redgdps.org/unahoraporladiabetes/> [Online; available 30/09/2021].
- Gade, R. y Moeslund, T. B. (2014). Thermal cameras and applications: A survey. *Machine Vision and Applications*, 25(1):245–262.
- Gatzoulis, L. y Iakovidis, I. (2007). Wearable and portable ehealth systems. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 26(5):51–56.
- Gaussorgues, G. y Chomet, S. (2012). *Infrared thermography*, volume 5. Springer Science & Business Media.
- Gniotek, K. y Krucinska, I. (2004). The basic problems of textronics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 12(1):13–16.
- Gorostiza, E. M., Lázaro Galilea, J. L., Meca Meca, F. J., Salido Monzú, D., Espinosa Zapata, F., y Pallarés Puerto, L. (2011). Infrared sensor system for mobile–robot positioning in intelligent spaces. *Sensors*, 11(5):5416–5438.
- Gualandi, I., Marzocchi, M., Achilli, A., Cavedale, D., Bonfiglio, A., y Fraboni, B. (2016). Textile organic electrochemical transistors as a platform for wearable biosensors. *Scientific Reports*, 6(1):1–10.
- Guariguata, L., Nolan, T., Beagley, J., et al. (2015). International diabetes federation. IDF diabetes atlas.
- Hamedi, M., Forchheimer, R., y Inganäs, O. (2007). Towards woven logic from organic electronic fibres. *Nature Materials*, 6(5):357.
- Hardy, J. D. y Muschenheim, C. (1934). The radiation of heat from the human body. IV. The emission, reflection, and transmission of infrared radiation by the human skin. *The Journal of Clinical Investigation*, 13(5):817–831.
- Hardy, J. D. y Muschenheim, C. (1936). Radiation of heat from the human body. V. The transmission of infrared radiation through skin. *The Journal of Clinical Investigation*, 15(1):1–9.
- Harms, H. (2011). *Body posture detection using non–tight fitting garments*. PhD thesis, ETH Zurich.

- Harms, H., Amft, O., Roggen, D., y Tröster, G. (2009). Rapid prototyping of smart garments for activity-aware applications. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 1(2):87–101.
- Hasan, R., Firwana, B., Elraiyah, T., Domecq, J. P., Prutsky, G., Nabhan, M., Prokop, L. J., Henke, P., Tsapas, A., Montori, V. M., et al. (2016). A systematic review and meta-analysis of glycemic control for the prevention of diabetic foot syndrome. *Journal of Vascular Surgery*, 63(2):22–28.
- Hernandez-Contreras, D., Peregrina-Barreto, H., Rangel-Magdaleno, J., Ramirez-Cortes, J., y Renero-Carrillo, F. (2015). Automatic classification of thermal patterns in diabetic foot based on morphological pattern spectrum. *Infrared Physics & Technology*, 73:149–157.
- Honarvar, M. G. y Latifi, M. (2017). Overview of wearable electronics and smart textiles. *The Journal of The Textile Institute*, 108(4):631–652.
- Houdas, Y. y Ring, E. (2013). *Human body temperature: Its measurement and regulation*. Springer Science & Business Media.
- Hughes-Riley, T., Dias, T., y Cork, C. (2018). A historical review of the development of electronic textiles. *Fibers*, 6(2):34.
- Ibrahim, A. (2017). IDF clinical practice recommendation on the diabetic foot: A guide for healthcare professionals. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 127:285–287.
- Jayaraman, S. (1990). Designing a textile curriculum for the 1990s: A rewarding challenge. *Journal of the Textile Institute*, 81(2):185–194.
- Jones, B. F. (1998). A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 17(6):1019–1027.
- Jost, K., Dion, G., y Gogotsi, Y. (2014). Textile energy storage in perspective. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(28):10776–10787.
- Katsilambros, N., Dounis, E., Makrilakis, K., Tentolouris, N., y Tsapogas, P. (2010). *Atlas of the diabetic foot*. John Wiley & Sons.
- Koncar, V. (2016). Introduction to smart textiles and their applications. In *Smart Textiles and their Applications*, pages 1–8. Elsevier.
- Kristensen, S. L., Rørth, R., Jhund, P. S., Docherty, K. F., Sattar, N., Preiss, D., Køber, L., Petrie, M. C., y McMurray, J. J. (2019). Cardiovascular, mortality, and kidney outcomes with glp-1 receptor agonists in patients with type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis of cardiovascular outcome trials. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 7(10):776–785.

- Laforgue, A. (2011). All-textile flexible supercapacitors using electrospun poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) nanofibers. *Journal of Power Sources*, 196(1):559–564.
- Lam, P. (2009). The application of communication technologies in smart clothing. In *Smart Clothes and Wearable Technology*, pages 205–213. Elsevier.
- Lasobras, J., Alonso, R., Carretero, C., Carretero, E., y Imaz, E. (2014). Infrared sensor-based temperature control for domestic induction cooktops. *Sensors*, 14(3):5278–5295.
- Lavery, L. A., Higgins, K. R., Lanctot, D. R., Constantinides, G. P., Zamorano, R. G., Armstrong, D. G., Athanasiou, K. A., y Agrawal, C. M. (2004). Home monitoring of foot skin temperatures to prevent ulceration. *Diabetes Care*, 27(11):2642–2647.
- Levin, M. E., OÑeal, L. W., y Bowker, J. H. (1993). *The diabetic foot*. Mosby.
- Litzelman, D. K., Marriott, D. J., y Vinicor, F. (1997). Independent physiological predictors of foot lesions in patients with niddm. *Diabetes Care*, 20(8):1273–1278.
- Liu, C., van Netten, J. J., Van Baal, J. G., Bus, S. A., y van Der Heijden, F. (2015). Automatic detection of diabetic foot complications with infrared thermography by asymmetric analysis. *Journal of Biomedical Optics*, 20(2):026003.
- Liu, Y., Gorgutsa, S., Santato, C., y Skorobogatiy, M. (2012). Flexible, solid electrolyte-based lithium battery composed of LiFePO<sub>4</sub> cathode and Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> anode for applications in smart textiles. *Journal of the Electrochemical Society*, 159(4):349–356.
- Lymberis, A. y De Rossi, D. E. (2004). *Wearable ehealth systems for personalised health management: State of the art and future challenges*, volume 108. IOS press.
- Lymberis, A. y Dittmar, A. (2007). Advanced wearable health systems and applications. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 26(3):29.
- Maccioni, M., Orgiu, E., Cosseddu, P., Locci, S., y Bonfiglio, A. (2006). Towards the textile transistor: Assembly and characterization of an organic field effect transistor with a cylindrical geometry. *Applied Physics Letters*, 89(14):143515.
- Maldague, X. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley Online Library.

- Mann, S. (1997). Introduction: On the bandwagon or beyond wearable computing? *Personal Technologies*, 1(4):203–207.
- Mann, S. (1998). Wearable computing as means for personal empowerment. In *Proceedings 3rd International Conference on Wearable Computing (ICWC)*, pages 51–59.
- Martín Vaquero, J., Hernández Encinas, A., Queiruga Dios, A., José Bullón, J., Martínez Nova, A., Torreblanca González, J., y Bullón Carbajo, C. (2019). Review on wearables to monitor foot temperature in diabetic patients. *Sensors*, 19(4):776.
- Martine, G. (1740). *Essays Medical and Philosophical: By George Martine*. London, A. Millar.
- Maxim Integrated, I. (2019). Ds18b20. programmable resolution 1–Wire digital thermometer. Datasheet DS18B20. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> [Online; available 30/09/2021].
- Meola, C. y Carlomagno, G. M. (2004). Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*, 15(9):27.
- Min, G. (2009). Power supply sources for smart textiles. In *Smart Clothes and Wearable Technology*, pages 214–231. Elsevier.
- Modest, M. F. (2013). *Radiative heat transfer*. Academicpress.
- Moxey, P., Gogalniceanu, P., Hinchliffe, R., Loftus, I., Jones, K., Thompson, M., y Holt, P. (2011). Lower extremity amputations? A review of global variability in incidence. *Diabetic Medicine*, 28(10):1144–1153.
- Murff, R. T., Armstrong, D. G., Lanctot, D., Lavery, L. A., y Athanasiou, K. A. (1998). How effective is manual palpation in detecting subtle temperature differences? *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*, 15(1):151–154.
- Nagase, T., Sanada, H., Takehara, K., Oe, M., Iizaka, S., Ohashi, Y., Oba, M., Kadowaki, T., y Nakagami, G. (2011). Variations of plantar thermographic patterns in normal controls and non-ulcer diabetic patients: novel classification using angiosome concept. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 64(7):860–866.
- National Research Council et al. (1995). *Expanding the vision of sensor materials*. National Academies Press.
- Park, S. y Jayaraman, S. (2009). Wearable sensor network: A framework for harnessing ambient intelligence. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 1(2):117–128.

- Prompers, L., Schaper, N., Apelqvist, J., Edmonds, M., Jude, E., Mauricio, D., Uccioli, L., Urbancic, V., Bakker, K., Holstein, P., et al. (2008). Prediction of outcome in individuals with diabetic foot ulcers: Focus on the differences between individuals with and without peripheral arterial disease. the eurodiale study. *Diabetologia*, 51(5):747–755.
- Queiruga Dios, A., Bullón Pérez, J., Encinas, A. H., Martín Vaquero, J., Nova, A. M., y González, J. T. (2017). Skin temperature monitoring to avoid foot lesions in diabetic patients. In *International Conference on Practical Applications of Computational Biology & Bioinformatics*, pages 110–117. Springer.
- Rajamanickam, R., Park, S., y Jayaraman, S. (1998). A structured methodology for the design and development of textile structures in a concurrent engineering framework. *Journal of the Textile Institute*, 89(3):44–62.
- Rantanen, J. y Marko, H. (2005). Data transfer for smart clothing: Requirements and potential technologies. In *Wearable Electronics and Photonics*, pages 198–222. Elsevier.
- Ren, J., Zhang, Y., Bai, W., Chen, X., Zhang, Z., Fang, X., Weng, W., Wang, Y., y Peng, H. (2014). Elastic and wearable wire-shaped lithium-ion battery with high electrochemical performance. *Angewandte Chemie*, 126(30):7998–8003.
- Ring, E. (2007). The historical development of temperature measurement in medicine. *Infrared Physics & Technology*, 49(3):297–301.
- Roback, K. (2010). An overview of temperature monitoring devices for early detection of diabetic foot disorders. *Expert Review of Medical Devices*, 7(5):711–718.
- Rodríguez-Martín, M., Lagüela, S., González-Aguilera, D., y Arias, P. (2014). Cooling analysis of welded materials for crack detection using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 67:547–554.
- Sazonov, E. (2014). *Wearable Sensors: Fundamentals, implementation and applications*. Elsevier.
- Schneegass, S., Olsson, T., Mayer, S., y Van Laerhoven, K. (2016). Mobile interactions augmented by wearable computing: A design space and vision. *International Journal of Mobile Human Computer Interaction*, 8(4):104–114.
- Seung, W., Gupta, M. K., Lee, K. Y., Shin, K.-S., Lee, J.-H., Kim, T. Y., Kim, S., Lin, J., Kim, J. H., y Kim, S.-W. (2015). Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 9(4):3501–3509.

- Spoerry y Co AG, S. (2019). *Spoerry and Co AG*. Swiss Shield.
- Stoppa, M. y Chiolerio, A. (2014). Wearable electronics and smart textiles: A critical review. *Sensors*, 14(7):11957–11992.
- Suárez, A. (2014). La inteligencia artificial a través de sus científicos. *Encuentros Multidisciplinares*.
- Sultan, N. (2015). Reflective thoughts on the potential and challenges of wearable technology for healthcare provision and medical education. *International Journal of Information Management*, 35(5):521–526.
- Sun, P.-C., Jao, S.-H. E., y Cheng, C.-K. (2005). Assessing foot temperature using infrared thermography. *Foot & Ankle International*, 26(10):847–853.
- Sutherland, I. E. (1968). A head-mounted three dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, Fall Joint Computer Conference*, pages 757–764. ACM.
- Tan, J.-H., Ng, E., Acharya, U. R., y Chee, C. (2009). Infrared thermography on ocular surface temperature: A review. *Infrared Physics & Technology*, 52(4):97–108.
- Tao, X. (2001). *Smart fibres, fabrics and clothing: Fundamentals and applications*. Elsevier.
- Tao, X., Koncar, V., y Dufour, C. (2011). Geometry pattern for the wire organic electrochemical textile transistor. *Journal of the Electrochemical Society*, 158(5):572.
- Tesfaye, S., Boulton, A. J., Dyck, P. J., Freeman, R., Horowitz, M., Kempler, P., Lauria, G., Malik, R. A., Spallone, V., Vinik, A., et al. (2010). Diabetic neuropathies: Update on definitions, diagnostic criteria, estimation of severity, and treatments. *Diabetes Care*, 33(10):2285–2293.
- Thorp, E. O. (1998). The invention of the first wearable computer. In *Second International Symposium on Wearable Computers, 1998. Digest of Papers*, pages 4–8. IEEE.
- Torreblanca González, J., Gómez-Martín, B., Hernández Encinas, A., Martín-Vaquero, J., Queiruga-Dios, A., y Martínez-Nova, A. (2021). The use of infrared thermography to develop and assess a wearable sock and monitor foot temperature in diabetic subjects. *Sensors*, 21(5).
- Uematsu, S., Edwin, D. H., Jankel, W. R., Kozikowski, J., y Trattner, M. (1988). Quantification of thermal asymmetry: Part 1: Normal values and reproducibility. *Journal of Neurosurgery*, 69(4):552–555.



- Van Langenhove, L. (2015). Smart textiles: Past, present, and future. *Handbook of Smart Textiles*, pages 1035–1058.
- Van Langenhove, L. y Hertleer, C. (2004). Smart clothing: A new life. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 16(1/2):63–72.
- Van Langenhove, L., Hertleer, C., y Schwarz, A. (2012). Smart textiles: An overview. In *Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC Protection*, pages 119–136. Springer.
- Van Netten, J. J., Van Baal, J. G., Liu, C., Van Der Heijden, F., y Bus, S. A. (2013). Infrared thermal imaging for automated detection of diabetic foot complications.
- Vandrico Solutions Inc. (2019). Vandrico wearable technology database. <https://vandrico.com/wearables/list.html> [Online; available 30/09/2021].
- Viade, J. (2006). *Pie diabético: Guía práctica para la prevención, evaluación y tratamiento*. Ed. Médica Panamericana.
- Wang, G., Zhang, L., y Zhang, J. (2012). A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, 41(2):797–828.
- Wolfe, W. L. y Zissis, G. J. (1978). The infrared handbook. *Arlington: Office of Naval Research, Department of the Navy, 1978, edited by Wolfe, William L.; Zissis, George J.*
- Wunderlich, C. A. (1871). *On the temperature in diseases: A manual of medical thermometry*, volume 49. New Sydenham Society.
- Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F., y Tao, X.-M. (2014). Fiber-based wearable electronics: A review of materials, fabrication, devices, and applications. *Advanced Materials*, 26(31):5310–5336.
- Zhang, X. y Tao, X. (2001). Smart textiles: Passive smart. *Textile Asia*, 32(6):45–49.