

## INFORME DE RESULTADOS

### PROGRAMA ASTURIAS 2018-2020

TÍTULO DEL PROYECTO: Desarrollo de wearables inteligentes y personalizados mediante tecnologías de electrónica impresa (WINTEI)

REFERENCIA Nº: IDI/2018/000061

**Entidad Beneficiaria:**

**Fundación IDONIAL (CIF G33914557)**



**Investigador responsable: Paula Sánchez-Friera Simarro / Fernando Juan Berenguer Císcar**

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	4
2	OBJETIVOS Y GRADO DE CUMPLIMIENTO.....	4
3	DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS .....	5
3.1	CUMPLIMIENTO DEL PLAN DE TRABAJO .....	5
3.2	HITO 1. ESPECIFICACIONES.....	6
3.2.1	Tarea 1.1 Análisis de contexto y requisitos.....	6
3.2.2	Tarea 1.2 Definición de casos de uso y especificaciones .....	18
3.2.3	Tarea 1.3 Diseño conceptual de demostradores .....	22
3.3	HITO 2. DESARROLLO DE PROCESO R2R SOBRE SUSTRATO ELÁSTICO .....	33
3.3.1	Tarea 2.1. Selección de materiales y componentes.....	33
3.3.2	Tarea 2.2. Diseño de circuitos elásticos .....	36
3.3.3	Tarea 2.3. Optimización de impresión y sinterizado sobre sustrato elástico .....	41
3.3.4	Tarea 2.4. Integración de componentes .....	49
3.4	HITO 3. DESARROLLO DE PROCESOS DE INTEGRACIÓN EN PRODUCTO .....	55
3.4.1	Tarea 3.1. Selección de conectores y proceso de conexión.....	55
3.4.2	Tarea 3.2. Optimización de procesos de laminado y troquelado .....	57
3.4.3	Tarea 3.3. Adaptación de procesos de fabricación circuitos elásticos para termoconformado.....	60
3.4.4	Tarea 3.4. Termoconformado y pruebas de concepto.....	65
3.5	HITO 4. DEMOSTRADORES DE WEARABLES TEXTILES.....	70
3.5.1	Tarea 4.1. Diseño mecánico de detalle .....	70
3.5.2	Tarea 4.2. Diseño electrónico de detalle.....	75
3.5.3	Tarea 4.3. Fabricación de circuitos elásticos para demostradores .....	77
3.5.4	Tarea 4.4. Desarrollo electrónico.....	79
3.5.5	Tarea 4.5. Integración en prototipos.....	82
3.6	HITO 5. DEMOSTRADORES DE WEARABLES RÍGIDOS / SEMIRÍGIDOS O HÍBRIDOS .....	85
3.6.1	Tarea 5.1. Diseño mecánico de detalle .....	85
3.6.2	Tarea 5.2. Diseño electrónico de detalle.....	92
3.6.3	Tarea 5.3. Fabricación de circuitos termoconformados para demostradores.....	96
3.6.4	Tarea 5.4. Desarrollo electrónico.....	102
3.6.5	Tarea 5.5. Integración en prototipos.....	109
3.7	HITO 6. VALIDACIÓN .....	113

---

3.7.1	Tarea 6.1. Desarrollo de procedimientos de validación.....	113
3.7.2	Tarea 6.2. Validación funcional .....	122
3.7.3	Tarea 6.3. Ensayos.....	136
4	CONCLUSIONES .....	163
5	BIBLIOGRAFÍA.....	167

## 1 INTRODUCCIÓN

Los dispositivos portables inteligentes (smart wearables) ofrecen una oportunidad única de abordar diversos retos sociales de gran importancia en la actualidad, ofreciendo soluciones en las áreas de salud, envejecimiento activo, seguridad en el trabajo, bienestar y deportes, entre otros.

Algunas de las principales limitaciones actuales de la tecnología se asocian a la fragilidad de las interfaces flexible-rígida de los dispositivos, así como a la durabilidad mecánica y electrónica de los mismos y a la producción con tecnologías de fabricación poco eficientes y de alto coste. La integración es clave para lograr una mayor aceptabilidad de los productos por parte de los usuarios. Para abordar estos retos, la electrónica impresa se presenta como una tecnología facilitadora clave en la fabricación de wearables.

## 2 OBJETIVOS Y GRADO DE CUMPLIMIENTO

El objetivo general del proyecto WINTEI es desarrollar una nueva generación de wearables inteligentes y personalizados basados en tecnologías de electrónica impresa, que permitan responder a los requisitos del mercado en cuanto a conformabilidad, procesabilidad y bajo coste, entre otros factores.

Los resultados del proyecto permitirán al Centro consolidar la línea de trabajo de electrónica impresa incorporando nuevos conocimientos y procesos como son el uso de materiales elásticos y la integración en productos utilizando tecnologías de conformado.

Se indican a continuación los **objetivos técnicos específicos** del proyecto junto con su grado de cumplimiento a la finalización de la tercera anualidad:

Tabla 1. Objetivos específicos y grado de cumplimiento 31 de diciembre de 2020

Objetivo	Cumplimiento	Justificación
O1. Desarrollo de procesos de fabricación de circuitos electrónicos sobre sustratos elásticos (polimérico y textil)	Cumplido al 100%	Completado en la anualidad 2018
O2. Desarrollo de procesos de integración de los circuitos en los productos finales, incluyendo desarrollo de interfaces flexible-rígidas y fabricación de componentes rígidos o híbridos	Cumplido al 100%	Completado en la anualidad 2019
O3. Desarrollo de al menos 2 demostradores de wearables sobre textil	Cumplido al 100%	Completado en la anualidad 2019
O4. Desarrollo de al menos 2 demostradores de wearables rígidos o híbridos	Cumplido al 100%	Completado en la anualidad 2020
O5. Validación de procesos y productos	Cumplido al 100%	Completado en la anualidad 2020

### **3 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS**

#### **3.1 CUMPLIMIENTO DEL PLAN DE TRABAJO**

Durante la anualidad 2018 no se produjeron modificaciones sobre el plan de trabajo inicial y todas las tareas del proyecto se realizaron satisfactoriamente en los plazos temporales establecidos y con los recursos asignados.

En la anualidad 2019 se presentó en el mes de mayo una solicitud de cambios, para ampliar la duración de las tareas 3.1 y 3.2, ambas con fecha de finalización en junio, hasta septiembre de 2019 debido a retrasos de algunos proveedores en los plazos de entrega de determinados materiales. La solicitud fue aprobada mediante escrito de fecha 4 de junio de 2019. Teniendo en cuenta esta desviación, comunicada y aprobada, las tareas del proyecto se realizaron satisfactoriamente en los plazos temporales establecidos y con los recursos asignados para ello.

Durante la anualidad 2020 no se han producido modificaciones sobre el plan de trabajo previsto para esta anualidad. Todas las tareas se han realizado satisfactoriamente en los plazos temporales previstos y con los recursos asignados.

A continuación se muestran las actividades realizadas y los resultados obtenidos en las tareas realizadas a lo largo de estas tres anualidades.

## 3.2 HITO 1. ESPECIFICACIONES

### 3.2.1 Tarea 1.1 Análisis de contexto y requisitos

#### 3.2.1.1 ANÁLISIS CIENTÍFICO-TÉCNICO

Los wearables son dispositivos portables, generalmente integrados en la vestimenta o accesorios del usuario, que pueden medir diferentes parámetros del usuario o de su entorno. Los datos recogidos por el wearable son procesados y comunicados de forma inalámbrica al usuario o a otro dispositivo externo, como un teléfono móvil o un servidor central. Los wearables cuentan generalmente con múltiples funciones como sensorica, almacenamiento, control, comunicación y en algunos casos elementos actuadores.



Figura 1. Plataforma wearable incluyendo sensores, actuadores y sistema para procesado, alimentación y comunicación con dispositivo externo

El desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación de componentes electrónicos miniaturizados ha abierto nuevas vías para implementar dispositivos de este tipo y poder integrar nuevas funcionalidades en la vestimenta y accesorios, para sectores como salud, seguridad y entretenimiento.

Sin embargo, los smart wearables existentes en el mercado actualmente se caracterizan en general por un alto precio y un bajo nivel de integración, así como un factor de forma limitado, con módulos de potencia voluminosos y pesados. Existe por tanto **un gran potencial de mejora** para avanzar en términos de confort, costes, procesabilidad de los productos y durabilidad [1].

En los sectores de salud y bienestar, deporte y seguridad en el trabajo, tienen gran importancia los wearables orientados a monitorizar **variables asociadas al cuerpo humano**. Estas variables se asocian a diferentes parámetros fisiológicos como movimientos corporales (tronco, extremidades, análisis de pisada, nivel de actividad), constantes vitales (ritmo cardiaco o respiratorio, pulso, presión sanguínea, temperatura) y parámetros del metabolismo (glucosa, pH, ácido láctico...). Todos estos parámetros pueden ser medidos por distintos sensores, que pueden ser físicos o químicos en función de las variables a medir. En WINTEI se consideran únicamente sensores físicos, asociados por tanto a la medida de movimientos corporales y constantes vitales, pero no de parámetros metabólicos, que requieren normalmente el uso de sensores bioquímicos.

Los **sensores físicos** son transductores capaces de transformar una magnitud física como elongación, presión, temperatura, fuerza, aceleración o vibración en un parámetro eléctrico (un voltaje o una corriente). Para ello se basan en distintos mecanismos [2] como piezoresistividad, piezoelectricidad, triboelectricidad, termoresistividad o efecto Seebeck. Es necesario que su capacidad sensora (precisión o sensibilidad) se mantenga cuando el sensor es fabricado en un sistema flexible o bien integrado sobre el mismo.

En el proyecto nos centramos en los smart wearables fabricados con tecnologías de electrónica impresa, flexible y elástica. La **electrónica impresa** es una tecnología aditiva en la que se aplica material únicamente donde se requiere, mediante procesos de impresión sobre sustratos que pueden ser flexibles o elásticos. Esto reduce significativamente los costes de fabricación, por lo que resulta una tecnología idónea para la fabricación de wearables a gran escala. Se incluyen también tecnologías de electrónica flexible híbrida en la que se integran componentes rígidos sobre los circuitos impresos.

Muchos de los dispositivos wearables flexibles y elásticos encontrados en una revisión de la literatura científica se centran en aplicaciones médicas. La monitorización de las constantes vitales como el ritmo cardiaco puede ser de gran interés en pacientes con patologías cardiovasculares. La medición de la presión sanguínea puede ser también útil en pacientes con hipertensión que presentan mayor riesgo de sufrir accidentes cardiovasculares. Mostramos a continuación algunos ejemplos de estos resultados revisados.

Un grupo de investigadores de Eindhoven [3] han desarrollado un wearable textil capaz de monitorizar las constantes vitales para neonatos ingresados en cuidados intensivos. La chaqueta contiene sensores ECG que pueden monitorizar en todo momento la actividad cardiaca del bebé y su respiración. Se ha diseñado de modo que pueda ser llevada con comodidad por los pacientes durante periodos de hasta 48 horas.



Figura 2. Ejemplo de smart wearable en textil para monitorización de constantes vitales en neonatos

La monitorización del movimiento de personas resulta de gran interés en numerosas aplicaciones. Se han desarrollado varias prendas con este objetivo. Por ejemplo, en [4] se desarrolla una camiseta con sensores de elongación fabricados con hilos de polipirrol o elastómeros con carga de carbono que presentan propiedades piezoresistivas. En [5] se continúa este trabajo fabricando un leotardo y unos guantes con sensores de elongación basados en carbono, que son utilizados para monitorizar movimientos de los brazos y el tronco superior así como movimientos de los dedos. En la figura se muestra uno de los prototipos desarrollados.



Figura 3. Ejemplo de smart wearable en textil para monitorización de movimientos del cuerpo humano

Existen otros sistemas wearables para detección del movimiento humano basados en el uso de sensores como giroscopios, acelerómetros y sensores magnetoresistivos [6]. Por ejemplo estos sistemas han sido aplicados para el análisis del paso en pacientes con osteoartritis o pacientes en recuperación tras accidentes cerebrovasculares [7].

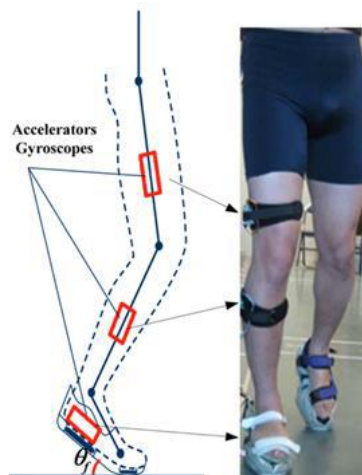


Figura 4. Ejemplo de smart wearable en textil para monitorización de posición del cuerpo humano

Otra opción para el análisis del paso, menos inclusiva pero también menos precisa, es incluir sensores de presión, que pueden ser integrados en el calzado [8]. Colocando un array de estos sensores en la planta del calzado, se pueden monitorizar las fuerzas ejercidas y de ahí extraer un análisis del paso.

Otros dispositivos wearables pueden basarse en la integración de actuadores en lugar de sensores. Una de las aplicaciones más comunes son las prendas calefactadas, basadas en el calentamiento por efecto Joule de unas resistencias al hacer pasar por ellas una corriente eléctrica [9].

Existen también numerosos ejemplos de integración de sistemas lumínicos en textiles, con aplicación no sólo en smart wearables, sino también en iluminación para el interior de automóviles o en el hogar. Esto puede lograrse mediante la integración de LEDs inorgánicos, la impresión directa de OLEDs o bien el uso de materiales electroluminiscentes.

Por otro lado, los textiles electrocrómicos pueden cambiar de color a demanda del usuario mediante la aplicación de una corriente eléctrica, lo cual puede ser de gran interés en aplicaciones

de moda, camuflaje o biomímesis. En [10] se presentan los resultados del desarrollo de un tejido de spandex que puede alterar su color entre los estados granate y verde.

Los wearables sobre textil también necesitan alimentación y una de las vías más eficientes es la energía solar fotovoltaica. Schubert y colaboradores presentan en [11] una interesante revisión del estado del arte de la integración de fotovoltaica en vestimenta hasta el año 2006. La mayor parte de los ejemplos mostrados se basan en la integración de células fotovoltaicas flexibles depositadas sobre polímero o metal y posteriormente pegadas o cosidas a la prenda. Estos sistemas no son totalmente conformables ni flexibles y resultan por tanto poco ergonómicos y cómodos para los usuarios.

Comentamos también algunos ejemplos de prototipos desarrollados con la tecnología de electrónica impresa elástica y termoconformado para la fabricación de objetos rígidos con funcionalidades electrónicas.

Vanfleteren y sus colaboradores [12] han publicado los resultados de sus trabajos de investigación en este campo, que culminan con la fabricación de varios demostradores como el mostrado en la Figura 5 para un dispositivo lumínico.

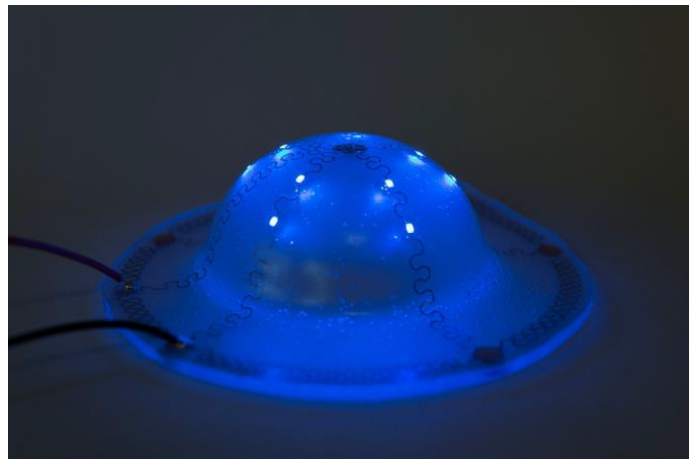


Figura 5. Ejemplo de demostrador rígido con electrónica termoconformada

En otros estudios se explora la posibilidad de integrar los circuitos en piezas rígidas utilizando tecnologías de sobreinyección, además de termoconformado [13]. Los procesos de fabricación de los circuitos, previos a su integración en la pieza, son muy similares en ambos casos. En este estudio se evaluaron diferentes polímeros aplicables al sector automoción y diferentes procesos para lograr la integración en prototipos funcionales.

En otro trabajo, liderado por investigadores de VTT en Finlandia, se realiza un prototipo de pulsera para control de actividad utilizando tecnologías de electrónica impresa y sobreinyección.

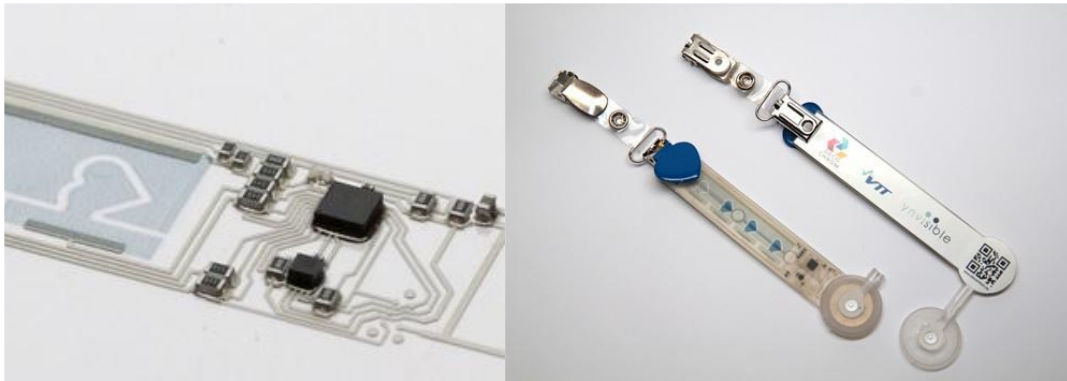


Figura 6. Ejemplo de demostrador rígido con electrónica sobreinyectada

### 3.2.1.2 ESTUDIO DE MERCADO Y PATENTES

En los últimos años, ha tenido lugar un crecimiento enorme en la demanda de distintos tipos de smart wearables en el mercado. Smartwatches, gafas inteligentes, pulseras de fitness, textiles inteligentes, joyería o exoesqueletos son algunos ejemplos.

El mercado de los dispositivos smart wearables superó los 30.000 millones de USD en 2016 y se espera que alcance los 100.000 millones de USD en 2024 [14]. Las expectativas son que los smart wearables estarán presentes en casi todas las facetas de nuestra vida diaria, una vez se logre alcanzar los objetivos de bajo coste, mayor integración, elevada conectividad, alta fiabilidad, múltiples usos y larga vida de las baterías.

A día de hoy, la mayor parte de los productos wearables en el mercado pertenecen a los sectores de deporte y salud. Los wearables más habituales son: smart watches, pulseras de fitness y dispositivos médicos (sistemas de monitorización de glucosa). En 2015 existían más de 300 dispositivos wearables comerciales. Otros dispositivos habituales son prendas textiles con wearables integrados, gafas y cascos de realidad virtual, exoesqueletos, joyería inteligente, etc. La Figura 7 muestra la distribución por sectores en el mercado en el año 2016 según datos de IDTechEx [14]. En los próximos años se espera que el sector dominante pase a ser el del textil y calzado inteligente para aplicaciones en la interfaz entre deporte y salud, debido al gran número de grandes compañías y marcas (como Apple o Adidas) que están desarrollando productos en este campo [15].



Figura 7. Distribución por tipo de smart wearable en el mercado

Hacia el año 2030 se espera que la electrónica vestible esté instalada en el mercado de masas, con objetos como las gafas Google o las pulseras fitness estando al alcance de todos. Otras tecnologías más disruptivas, como los textiles inteligentes totalmente integrados en la vestimenta, empezarán también a conseguir grandes volúmenes de ventas en los sectores de moda, industrial, comercial y militar.

Los autores Dehghani y Dangelico [16] han realizado un análisis de tendencias en el mercado de los smart wearables utilizando como indicador el número de patentes publicadas para cada tipo de producto. La primera patente registrada en smart wearables es del año 2001, por lo que el estudio se centra en el periodo 2001-2015. Se obtuvieron 1313 patentes. Los resultados más interesantes de este estudio son los siguientes:

- Más de la mitad de las patentes se refieren a relojes smart (53%), seguido por smart glasses (17%). Entre vestimenta y otros textiles smart se alcanza un 14% de las patentes analizadas.
- El 75% de las patentes se registran en los últimos 3 años del periodo temporal analizado.

Estos resultados están en línea con los que se extraen de los informes de mercado consultados.

Se ha realizado un estudio de mercado en primer lugar de los smart wearables flexibles o elásticos, principalmente integrados en textil, seguido por un estudio de smart wearables rígidos susceptibles de ser fabricados con las tecnologías propuestas en el proyecto WINTEI.

A continuación se presentan algunos ejemplos de smart wearables integrados en textil presentes en el mercado, para distintos campos de aplicación como son sector deportes, sector salud y sector industrial.

**Sector ocio / deporte**

COMPAÑÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
	Sujetador deportivo marca Numetrex desarrollado por Textronics que incorpora sensores monitorizar el ritmo cardiaco	
	Botonera táctil integrada en diferentes prendas, principalmente para el control de dispositivos de música portátiles	
	Sudadera para running de alta visibilidad gracias a la integración de tiras de LEDs	
	Chaqueta de invierno con 9 células fotovoltaicas integradas, de tecnología Si amorfo fabricadas por Akzo Nobel con una potencia total de 2.5 W	
	Calcetines para fitness acoplados a una tobillera rígida con Bluetooth que envía información a un smartphone sobre el número de pasos, velocidad, altitud, distancia recorrida y monitorización del paso	

**Sector salud / bienestar**






COMPañÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
	<p>Sistema para monitorización de glucosa que contiene un parche desechable para cada día y un sensor adhesivo que envía los datos a un Smartphone o un lector de datos de la misma marca</p>	
	<p>Manta para bebés con LEDs UV integrados en el tejido, utilizada para fototerapia.</p>	
	<p>Parche desechable con sensor de temperatura con comunicación Bluetooth a smartphone y textura confortable para la monitorización segura de la temperatura de pacientes durante periodos de hasta 48 horas</p>	
	<p>Parche que supuestamente reduce las arrugas de la piel mediante el paso de una pequeña corriente eléctrica</p>	
	<p>La camiseta interior WarmX incluye dos áreas calefactadas que utilizan una fibra de poliamida recubierta en plata como conductor y una batería que puede ser retirada del dispositivo para el lavado</p>	

**Sector industrial / profesional**

COMPAÑÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
	<p>Esta chaqueta para bomberos incluye sensores de temperatura en las capas internas y externas así como un sistema de alertas lumínicas con LED que avisa cuando las temperaturas superan ciertos umbrales</p>	
	<p>Se trata de un calzado de seguridad que integra un dispositivo para recibir señales del usuario y enviarlas externamente, así como un sistema de vibración para enviar feedback</p>	
	<p>Se trata de una banda a integrar en un casco o similar, para controlar la fatiga de los trabajadores mediante la monitorización del estado de alerta en tiempo real</p>	
	<p>El guante inteligente de ProGlove facilita operaciones de fabricación y logística, como escaneo “sin mano”, monitorización de secuencias de trabajo e identificación de herramientas</p>	

Como ejemplo de smart wearables rígidos en el mercado nos hemos centrado principalmente en la aplicación de exoesqueletos para distintos sectores (ocio, industrial o salud) por ser una de las más interesantes para aplicar las tecnologías a desarrollar en el proyecto. No se ha incluido un análisis de otros productos como smartwatches o pulseras fitness, muy presentes en el mercado, por considerar que existe ya una tecnología madura para su fabricación con abundancia de productos comerciales.







**Sector ocio / deporte**

COMPañÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
	<p>El Againer es un exoesqueleto que absorbe los golpes para esquiar.</p> <p>Proporciona amortiguación y apoyo en las rodillas mediante un resorte de gas ajustable.</p>	
<p>RoboGolfPro</p>	<p>El RoboGolfPro® es un dispositivo de entrenamiento de swing de golf.</p> <p>Está diseñado para desarrollar la memoria muscular y enseña un swing consistente que puede reproducirse en el campo de golf.</p>	
	<p>El Ski ~ Mojo es un exoesqueleto que absorbe los golpes en las rodillas. Está diseñado para ser utilizado sólo para esquiar.</p>	

**Sector ocio / deporte**

COMPañÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
	<p>Exoesqueleto diseñado principalmente para uso clínico. También se puede utilizar como una herramienta de capacitación para para uso doméstico. Hay casi 200 unidades en uso activo en todo el mundo, y se espera que ese número aumente considerablemente. Aprobado por la FDA.</p>	
	<p>El ATLAS 2030 es el exoesqueleto médico móvil más avanzado diseñado específicamente para niños. Está desarrollado por Marsi-Bionics y el Consejo Nacional de Investigación de España.</p>	
	<p>La “Mano de la Esperanza” es un exoesqueleto de guante eléctrico para rehabilitación. Se comercializa como un dispositivo de enseñanza para reaprender los movimientos de las manos.</p>	
	<p>Es un exoesqueleto de cadera, cuyo objetivo es facilitar el caminar proporcionando una fuerza adicional para mover las piernas con cada paso. En 2015, el dispositivo se comenzó a comercializar a diferentes empresas en Japón.</p>	

**Sector industrial**

COMPAÑÍA	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
	El FORTIS es una herramienta pasiva que contiene un exoesqueleto. Ha pasado por varios rediseños a lo largo de los años, la última versión se está probando en las plantas de fabricación de Lockheed Martin.	
	El exoesqueleto de cintura H-WEX de Hyundai fue mostrado en la feria CES 2017. Hyundai ha expresado el deseo de comercializar este robot portátil.	
	El guante SEM es un dispositivo de mano de asistencia diseñado para contrarrestar un agarre débil. La falta de fuerza en los dedos para sujetar objetos puede deberse a problemas musculares o neurológicos. El SEM Glove está diseñado para una amplia gama de usuarios.	

**3.2.1.3 ASPECTOS NORMATIVOS**

A nivel normativo uno de los aspectos más críticos asociados a los wearables inteligentes se centra en la privacidad de los datos generados por los usuarios. El gran número de actividades que realizamos a diario utilizando herramientas tecnológicas nos expone a un riesgo constante de pérdida o uso indebido de los datos, en muchos casos por desconocimiento o mal uso. Esta realidad hace necesaria una revisión de la actual normativa de protección de datos personales, cuya creación es muy anterior al desarrollo de muchos dispositivos wearables inteligentes.

El tratamiento de datos personales y la libre circulación de los mismos en la Unión Europea debe responder a lo dispuesto en la Directiva 95/46/CE [17] y en la Directiva 2002/58/CE [18]. Los responsables del tratamiento de datos con sede en Europa deben cumplir esta normativa. Estas previsiones son de aplicación a todos los participantes en la línea de producción de un producto: fabricantes y desarrolladores de aplicaciones, al considerarlos responsables del tratamiento de datos de carácter personal en alguna de las diferentes fases del proceso.

Se ha analizado en más detalle el caso particular de los exoesqueletos, respecto a los cuales existe más normativa pues se les aplica parte de la normativa existen para robots de asistencia. La siguiente tabla resume la normativa aplicable a exoesqueletos a nivel nacional e internacional.

Tabla 2. Resumen de normativa aplicable a exoesqueletos

<b>Ámbito nacional</b>	<b>UNE-EN ISO 22523:2007</b> Prótesis de miembros externos y órtesis externas. Requisitos y métodos de ensayo (ISO 22523:2006)
	<b>UNE-EN ISO 9999:2012V2</b> Productos de apoyo para personas con discapacidad

	<b>UNE 111912:1990</b> Prótesis y órtesis. Aspectos médicos. Descripción malformaciones congénitas de los miembros
	<b>UNE 111909-1:1990, UNE 111909-2:1990 y UNE 111909-3:1990</b> Prótesis y órtesis. Vocabulario.
	<b>UNE-EN ISO 11469:2017</b> Plásticos. Identificación genérica y marcado de productos plásticos.
	<b>UNE-EN 22768-1:1994</b> Tolerancias generales. Parte 1: tolerancias para cotas dimensionales lineales y angulares sin indicación individual de tolerancia.
	<b>Real Decreto 1591/2009</b> , de 16 de octubre, por el que se regulan los productos sanitarios.

Ámbito internacional	<b>ISO 13485:2016</b> Medical devices -- Quality management systems -- Requirements for regulatory purposes. (Productos sanitarios. Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos para fines reglamentarios es la norma global para los sistemas de gestión de calidad para dispositivos médicos).
	<b>ISO 13404:2007</b> Prosthetics and orthotics -- Categorization and description of external orthoses and orthotic components
	<b>ISO-13482</b> Robots and robotic devices -- Safety requirements for personal care robots. Sistema de gestión de la calidad aplicable para dispositivos médicos
	<b>ISO 8549-1:1989</b> Prosthetics and orthotics -- Vocabulary -- Part 1,2,3: General terms for external limb prostheses and external orthoses
	<b>ISO 8551:2003</b> Prosthetics and orthotics. Functional deficiencies. Description of the person to be treated with an orthosis, clinical objectives of treatment, and functional requirements of the orthosis
	<b>ISO 14155:2011</b> Clinical investigation of medical devices for human subjects -- Good clinical practice
	<b>ISO 22523:2006</b> External limb prostheses and external orthoses -- Requirements and test methods
	<b>ISO 11469:2016</b> Plastics -- Generic identification and marking of plastics products
	<b>ISO/TR 20218-1:2018</b> Robotics -- Safety design for industrial robot systems -- Part 1: End-effectors
	<b>ISO 9787:2013</b> Robots and robotic devices -- Coordinate systems and motion nomenclatures
	<b>ISO/TR 20218-2:2017</b> Robotics -- Safety design for industrial robot systems -- Part 2: Manual load/unload stations

#### 3.2.1.4 DEFINICIÓN Y ANÁLISIS DE REQUISITOS

Se ha realizado también en esta primera tarea un análisis y selección de diferentes funcionalidades y capacidades que pueden considerarse en dispositivos wearables. Siguiendo la metodología MoSCoW, a cada requisito se le asignó una prioridad: Must have (imprescindible), Should have (conveniente), Could have (deseable) o Would have (opcional). La asignación fue realizada en base

a las conversaciones con los usuarios potenciales. Los requisitos identificados estaban agrupados según los siguientes aspectos:

- *Condiciones ambientales de operación del dispositivo:* Requisitos sobre el entorno en que se va a encontrar el dispositivo. Temperaturas de operación, protección IP e IK, antivandálico, resistencia a ciertos materiales, lavado, etc.
- *Aspectos físicos / mecánicos.* Especificaciones de diseño mecánico incluyendo la forma de integración en prendas o la forma de fijarlo en el cuerpo del usuario. Dimensiones y peso, flexibilidad o rigidez necesarias, tallas, métodos de fijación en prendas, ser extraíble, ser enrollable, ...
- *Procesado de datos y gestión de recursos.* Especificaciones relacionadas principalmente con capacidades de procesamiento del sistema y sobre los datos que se van a utilizar. En función de la aplicación el dispositivo puede precisar altas capacidades de procesamiento, o capacidades básicas. Proporcionar una excesiva capacidad puede implicar un mayor consumo energético innecesario.
- *Estado del dispositivo y capacidad sensorial.* Capacidades del sistema para determinar su estado de funcionamiento y el del entorno. Chequeo interno (batería, carga, comunicaciones), medidas de temperatura, humedad, vibración, orientación, movimiento, GPS, señales corporales (pulsaciones, ECG,...), consumo de sensores, precisión, sensibilidad,..
- *Interacción con el usuario.* Especificaciones sobre como el usuario interactúa con el dispositivo. Uso de LEDs, pantallas OLED, buzzer, comprensión del lenguaje, ...
- *Capacidad de actuación.* En algunos casos, el dispositivo puede actuar mediante motores u otro tipo de actuador. Será clave el rendimiento del actuador, consumo en estado estacionario, precisión, rango de operación,...
- *Comunicación con otros dispositivos.* El dispositivo debe poder comunicarse con otros sistemas, como dispositivos móviles o servidores IoT por ejemplo. En función de la aplicación puede requerir una comunicación de corta distancia (BT, WiFi) o de larga distancia, como las que proporcionan las redes WAN (Wide Area Network), ahora muy desarrolladas para bajo consumo en su aplicación en IoT.
- *Alimentación y consumo energético.* Especificaciones sobre el sistema de alimentación y orientadas a la reducción del consumo. Posibilidades de incluir energy harvesting, autonomía de batería, modos de ahorro de energía, opciones de carga, letargo durante el almacenaje, ...
- *Capacidades de programación y software.* Entornos de desarrollo disponibles, uso de sistemas operativos, protocolos y funcionalidades necesarias en el dispositivo,...

### 3.2.2 Tarea 1.2 Definición de casos de uso y especificaciones

#### 3.2.2.1 SELECCIÓN DE CASOS DE USO

La selección inicial se ha realizado teniendo en cuenta el análisis del contexto actual realizado en la tarea anterior, tanto a nivel de estudio de la bibliografía científico-técnica como del estudio de mercado.

Se han identificado aplicaciones concretas definiendo el caso de uso y la funcionalidad esperada de cada demostrador. Además, para cada propuesta de demostrador se han considerado casos de uso adicionales que podrían ser aplicables con pequeñas modificaciones en el diseño, pero compartiendo la misma tecnología de base.

La selección final de demostradores se ha realizado teniendo en cuenta los intereses de las empresas del panel de usuarios del proyecto: seguridad industrial, sector médico y deportes / bienestar, para conseguir maximizar el impacto del proyecto en el tejido empresarial asturiano. Asimismo, se ha buscado que los demostradores incluyan tanto el campo de wearables textiles como el de wearables rígidos o semi-rígidos.

A continuación se describen brevemente los 7 casos de uso seleccionados inicialmente. En la tabla se resumen las características principales de cada uno de ellos.

Tabla 3. Resumen de casos de uso definidos en el proyecto WINTEI

Caso de uso	Nombre	Tipo de wearable	Sector		
			Salud	Deporte	Industrial
1	SMART ARM	Flexible	✓	✓	✓
2	SMART ARM PRO	Rígido	✓		✓
3	SMART GLOVE	Flexible		✓	✓
4	EPITERM	Flexible	✓		✓
5	HMITEXT	Flexible		✓	✓
6	SMART SHOE	Rígido	✓	✓	
7	SUNPROT	Rígido		✓	✓

#### 3.2.2.1.1 Caso de uso 1: "SMART ARM"

Esta aplicación pertenece al campo de wearables para monitorización del movimiento humano y se implementará en un sistema de wearable flexible sobre textil o polímero. El objetivo es monitorizar la trayectoria del movimiento de un brazo y procesar la información, bien en el propio wearable o en un sistema externo, proporcionando feedback al usuario.

El caso de uso principal se incluye en el sector salud, en concreto en el de la rehabilitación de pacientes que han sufrido algún tipo de traumatismo. En las terapias de rehabilitación es habitual la realización de ejercicios, que son definidos por el fisioterapeuta, y el paciente debe repetir de forma autónoma posteriormente en su domicilio. El sistema ha de ser capaz de detectar las trayectorias del brazo y avisar al usuario si se producen desviaciones respecto a las pautas marcadas.

Se han identificado otros casos de uso adicionales en el sector salud, ya que puede ser extendido al uso en extremidades inferiores. En el sector deporte para la monitorización de movimiento en deportistas de alto nivel como corredores o ciclistas. En el sector laboral, para la monitorización de movimientos en ciertas profesiones que requieren levantamiento de cargas o la monitorización postural de trabajadores en oficinas.

#### 3.2.2.1.2 Caso de uso 2: “SMART ARM PRO”

Esta aplicación pertenece al campo de wearables con sensores y actuadores, que incluye varias funcionalidades desde la monitorización del movimiento humano hasta la asistencia en el movimiento. Se puede considerar una ampliación del caso de uso anterior, pero en este caso el sistema es rígido y debe aportar suficiente resistencia mecánica para ejercer fuerzas sobre el paciente. Además de monitorizar la trayectoria del movimiento de un brazo, en este caso el sistema puede actuar ejerciendo una fuerza bien a favor o en contra del movimiento.

El caso de uso principal se incluye en el sector salud. Al igual que el caso anterior, la aplicación principal es para la rehabilitación de pacientes que han sufrido algún tipo de traumatismo. En este caso el sistema ofrece una resistencia mecánica al movimiento regulable, de modo que durante los ejercicios de rehabilitación se incrementa la fuerza a ejercer por el paciente, ayudando así a una recuperación más rápida.

Se identifican casos de uso adicionales que incluyen la adaptación a otras partes del cuerpo humano como las extremidades inferiores. Además, si el actuador ejerce la fuerza a favor del movimiento en lugar de en contra, puede usarse para asistir en el movimiento a pacientes con movilidad reducida (sector salud), o para ayudar en ciertas tareas como el levantamiento de cargas o la realización de operaciones en posturas poco cómodas (sector industrial).

#### 3.2.2.1.3 Caso de uso 3: “SMART GLOVE”

Esta aplicación pertenece al campo de wearables flexibles. Se trata de integrar en un guante un dispositivo para medir la carga de modo que pueda estimarse de forma rápida y fiable la fuerza aplicada por el usuario con sus manos. La aplicación principal es en el sector industrial.

En el caso de uso principal, el usuario es un operario que debe transportar cargas pesadas. El sistema integrado en el guante puede estimar el peso que va a ser levantado y transportado y enviar una alerta en caso de que el esfuerzo a realizar sea superior a un cierto umbral previamente establecido. Se podría considerar opcionalmente el envío de alertas externamente a un supervisor de planta o responsable de Prevención en la empresa.

Como casos de uso adicionales, el sistema se podría complementar con un sistema de monitorización postural (en espalda y piernas) que puede alertar en el caso de tratar de elevar cargas pesadas con una postura incorrecta. En el sector deportes, una aplicación adicional sería su extensión a un calcetín, plantilla o pedal de modo que se monitorizara la fuerza ejercida por un ciclista durante el pedaleo.

#### 3.2.2.1.4 Caso de uso 4: “EPITERM”

Esta aplicación propone la medida de degradación en elementos de protección individual (EPIs) específicos para el aislamiento térmico de trabajadores en profesiones con elevado estrés térmico. Se trata de poder medir en tiempo real el estado real de la prenda de aislamiento y poder alertar de forma preventiva de su sustitución por un nuevo EPI. Se incluye en el campo de los wearables textiles, y podría aplicarse a chaquetas térmicas o guantes.

El caso de uso principal se basa en la detección de pérdida de aislamiento en trajes para operación en altas temperaturas, como por ejemplo en altos hornos, o bien en guantes. La integración de dispositivos de este tipo en varias zonas podría permitir conocer el aislamiento térmico de forma global. La información puede ser registrada y servir para alertar al propio usuario o bien ser enviada

externamente para alertar a otros servicios en caso de previsión de un riesgo, para proceder así a la sustitución del EPI por uno nuevo.

Se identifican otros casos de uso adicionales en el sector industrial / profesional: Puede integrarse en ropa para bomberos, con requisitos similares a los de los profesionales de altos hornos o calderas. La integración en guantes puede servir también para la estimación de temperaturas de piezas que son manipuladas. Por ejemplo en el caso de mantenimiento de motores térmicos, calderas, tuberías con altas temperaturas, etc, el guante puede indicar una estimación de la temperatura exterior.

#### 3.2.2.1.5 Caso de uso 5: "HMITEXT"

Esta aplicación se centra en la integración de botoneras táctiles en textiles para el control de distintos equipos que podrían ser portados por el usuario o bien externos, por ejemplo en el marco de la industria 4.0 podría ser de gran interés como equipo para interacción hombre-máquina (HMI) totalmente integrado. En general, el sistema es de utilidad en aplicaciones en las que el usuario necesita controlar ciertas funcionalidades de un dispositivo sin llegar a acceder directamente al mismo.

Consideramos como uso principal el control funciones interactivas hombre-máquina en un dispositivo móvil desde una botonera integrada en textil.

Este dispositivo presenta varios casos de uso adicionales en el sector ocio / deportes, que incluyen el control de sistemas audio, teléfonos móviles o cámaras integradas sin necesidad de acceder directamente a los dispositivos.

#### 3.2.2.1.5.1 Caso de uso 6: "SMART SHOE"

Esta aplicación se basa en la integración de diferentes sensores en suelas de calzado, utilizando sistemas wearables de formato rígido o semi-rígido. Mediante su integración en calzado de seguridad podría utilizarse tanto para el control de accesos, utilizando sensores RFID, como para la medida de los esfuerzos realizados durante el desempeño diario.

En el caso de uso principal consideramos una suela de calzado de seguridad específica para control de accesos que abriría las puertas automáticamente a usuarios autorizados, y medida de esfuerzos. El sistema contiene además un dispositivo para el procesado de los datos adquiridos y envío de alertas.

En este caso se identifican los siguientes casos de uso adicionales: En el sector industrial, además del caso descrito, se considera el desarrollo de una alfombrilla de hombre muerto complementaria al calzado, que puede controlar una máquina haciendo que se detenga cuando el operario no está sobre la alfombrilla. En el sector deportes, en concreto, ciclismo, el calzado deportivo podría integrar sensores de fuerza para estimar la fuerza aplicada en el pedaleo y comunicársela al usuario o entrenador. En el sector salud, podría utilizarse para el análisis de la pisada en pacientes en rehabilitación.

#### 3.2.2.1.6 Caso de uso 7: "SUNPROT"

Esta aplicación se centra en el desarrollo de wearables rígidos en prevención de riesgos laborales. En concreto, está orientada a la monitorización de la radiación UV recibida mediante la integración de sensores de UV en cascos.

En el caso de uso principal se pretende monitorizar la radiación UV recibida por trabajadores en exteriores, por ejemplo en el sector de la construcción. El casco contendría el sensor UV y un dispositivo para enviar alertas al propio usuario o bien al supervisor o responsable de PRL.

Como caso de uso adicional, en el sector deporte, este mismo sistema podría ser aplicable a cascos para ciclistas, y en el sector ocio podría integrarse en viseras o camisetas, pasando a una versión de wearable flexible sobre textil.

### **3.2.2.2 DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES**

Una vez realizada una primera definición de los casos de uso, se han definido para cada uno de los demostradores las especificaciones concretas deseables, usando como base los requisitos generales definidos en la tarea 1.1.

### **3.2.3 Tarea 1.3 Diseño conceptual de demostradores**

En esta tarea se han realizado diseños conceptuales para cada demostrador en base a las especificaciones definidas en la tarea anterior. Estos diseños están formados por bocetos preliminares del sistema demostrador y esquemas electrónicos iniciales, donde se detallan las funciones de los distintos bloques implicados. Se presenta aquí un breve resumen de estos diseños.

#### **3.2.3.1 DISEÑO DE CONCEPTO PARA DISPOSITIVO SMART ARM**

El dispositivo SMART ARM está diseñado para colocarse de forma sencilla en la articulación del codo y permitir y guiar en la realización de ejercicios con esta articulación.

El dispositivo se integrará en una manga textil, incluyendo parte en la zona del brazo y parte en la zona del antebrazo para poder monitorizar el movimiento relativo entre ambas partes, tal y como se muestra en la Figura 8.

El diseño mecánico conceptual en este caso se ha centrado en los siguientes aspectos:

- Posicionamiento de los distintos componentes en el textil
- Estructura de capas de los distintos materiales e integración entre ellos
- Selección preliminar de materiales para cumplir con las especificaciones mecánicas.

Los componentes para medir la posición del brazo no necesitan estar en contacto directo con la piel por lo que se elige una configuración de superposición de los componentes a una camiseta preexistente fabricada con un material muy elástico como puede ser el nylon.

Se requiere un mínimo de dos acelerómetros que serán posicionados en las ubicaciones marcadas en la Figura 101 9, conectados por pistas elásticas que puedan conformarse al textil de base.

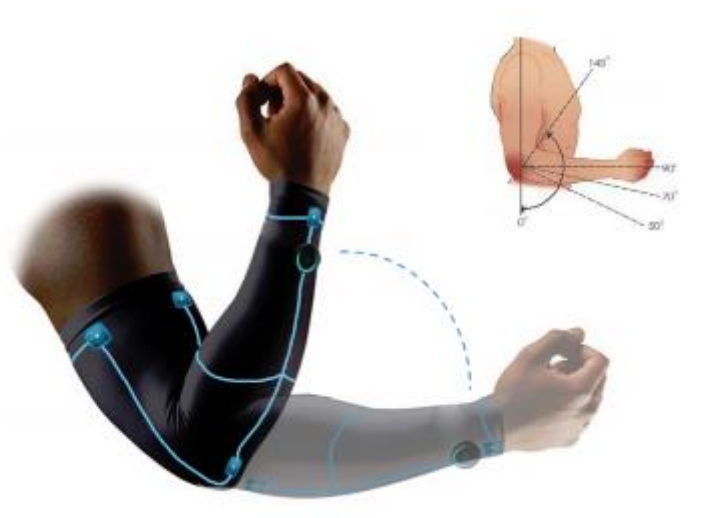


Figura 8. Movimientos en la realización de ejercicios y colocación de SMART ARM

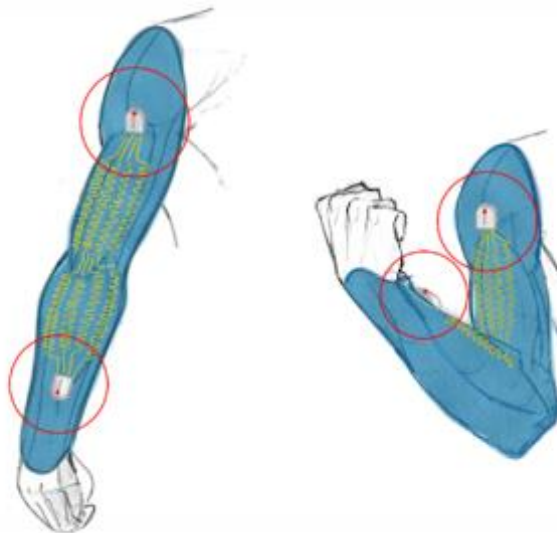


Figura 9. Situación prevista para los componentes electrónicos y para el trazado de pistas conductoras

El dispositivo SMART ARM integra una electrónica que mide la orientación del brazo y antebrazo y en función de ello y de la programación de ejercicios, indica al usuario si la ejecución del ejercicio es correcta. El dispositivo podría incluir la posibilidad de elección entre varios programas. La siguiente figura muestra un esquema conceptual de la electrónica para este dispositivo.

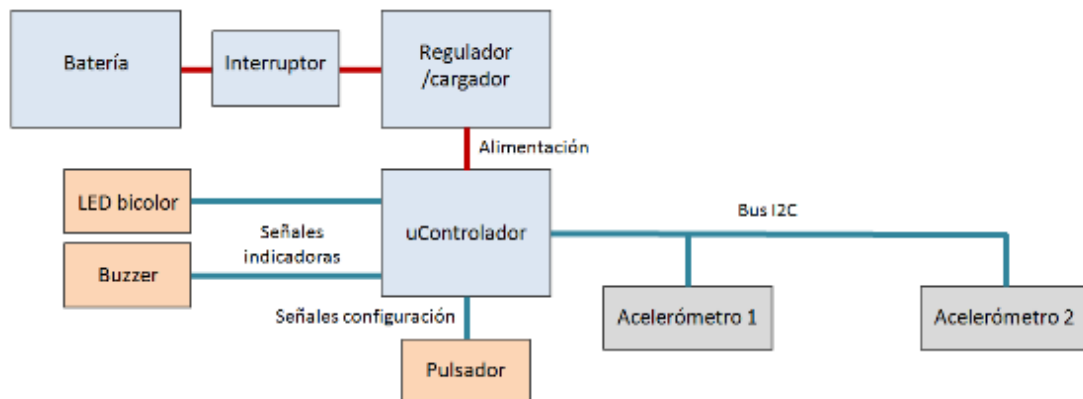


Figura 10. Diagrama de bloques de demo SMART ARM

### 3.2.3.2 Diseño de concepto para dispositivo SMART ARM PRO

Este sistema comparte las funcionalidades del sistema SMART ARM e incorpora la actuación en una articulación mediante un motor.

Los componentes electrónicos estarán integrados en una estructura rígida con una articulación a la altura del codo. Parte de la electrónica estará en la zona del brazo y otra parte en la zona del antebrazo. La Figura 11 muestra la colocación del dispositivo en el brazo, mientras que la Figura 12 muestra el posicionamiento de cada componente y un boceto inicial de la geometría que podría tener el dispositivo.

En este caso el sistema requiere aportar una resistencia estructural que permita ejercer una fuerza sobre el brazo. En la configuración preferente el circuito será impreso sobre un material que posteriormente pueda ser termoconformado para lograr adaptarse a la geometría del brazo.



Figura 11. Colocación del dispositivo SMART ARM PRO en el brazo

Se considerarán diferentes dimensiones de brazo para realizar un tallaje adecuado para una amplia gama de usuarios. En cuanto a la articulación, se fabricará a medida utilizando otras tecnologías como la fabricación aditiva.

Al igual que en el caso anterior, será necesario alojar en la parte superior del antebrazo una pequeña PCB donde puedan integrarse los componentes rígidos de mayores dimensiones como la batería. El actuador, formado por un motor con reducción se encontrará a la altura de codo.

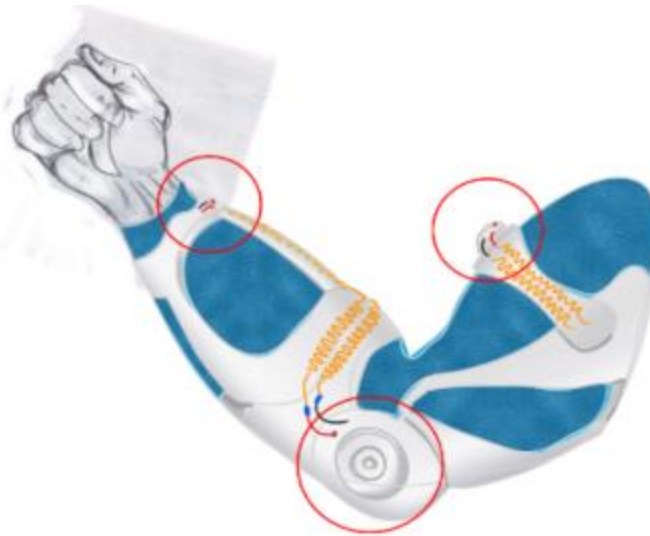


Figura 12. Situación de componentes electrónicos y trazado de conexiones

El esquema conceptual para la electrónica es el siguiente.

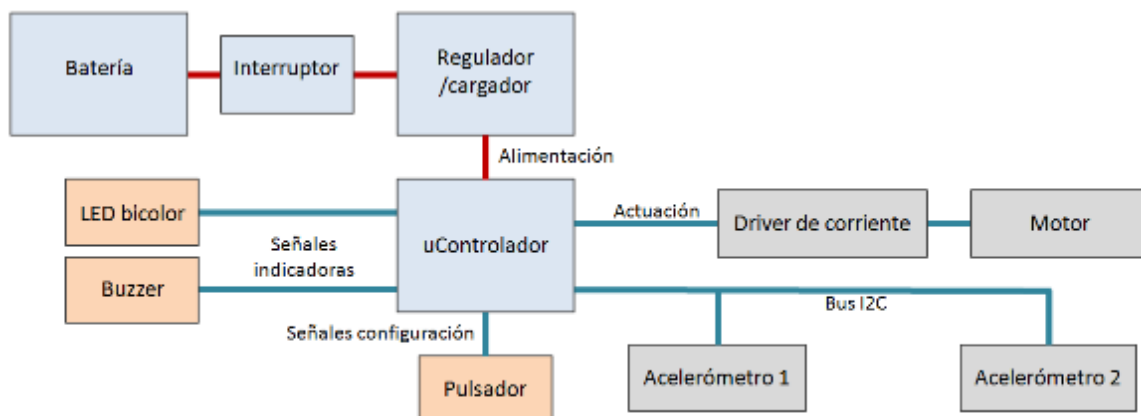


Figura 13. Diagrama de bloques de demo SMART ARM PRO

### 3.2.3.3 DISEÑO DE CONCEPTO PARA DISPOSITIVO SMART GLOVE

El concepto de sistema es un guante en el que se integran sensores de fuerza o presión en varios puntos de la palma o de la parte interior de los dedos. Con estos sensores se pretende estimar el peso que se coge en una manipulación de carga.

Los componentes electrónicos estarán integrados en un par de guantes tal y como muestra la Figura 14. El boceto inicial con el posicionamiento de cada componente y pistas conductoras en el guante

se muestra en la Figura 15. En este caso los sensores no requieren estar en contacto directo con la piel ni tampoco con el exterior, por lo que se ha considerado como configuración óptima el alojar toda la electrónica entre el textil interior del guante y el exterior, de modo que los textiles puedan actuar también como capas protectoras adicionales.

En este caso los componentes rígidos de mayor tamaño se alojarán en una pequeña cápsula que será colocada a la altura de la muñeca. Las conexiones entre los componentes integrados en esta cápsula y los demás componentes serán ubicadas en la zona entretejidos de modo que no serán visibles.



Figura 14. Diseño conceptual del posible aspecto del demostrador SMART GLOVE (vista de la palma)



Figura 15. Situación de componentes electrónicos y trazado de pistas conductoras

Cada guante dispondrá de los mismos componentes. Mediante una comunicación entre ellos, uno de los guantes actúa de máster y el otro de esclavo. El máster obtiene las medidas de ambos guantes y decide la respuesta al usuario.

La siguiente figura presenta un esquema conceptual de esta electrónica.

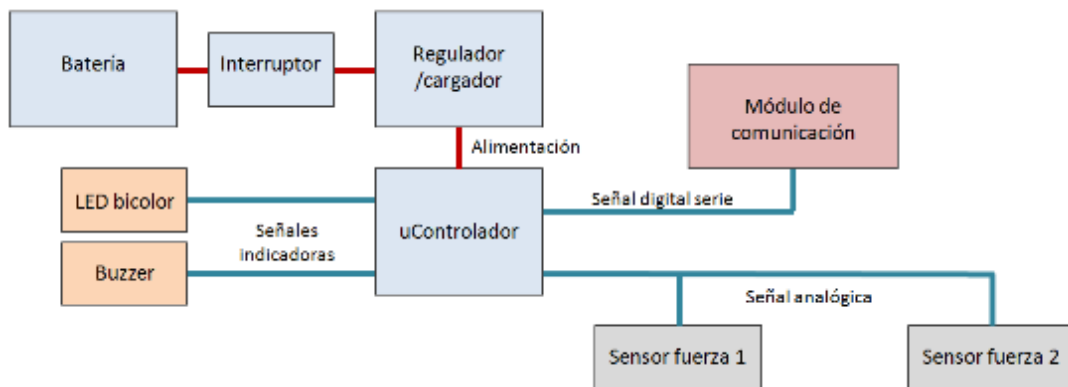


Figura 16. Diagrama de bloques de demo SMART GLOVE

### 3.2.3.4 DISEÑO DE CONCEPTO PARA DISPOSITIVO EPITERM

El dispositivo de medida de degradación debe ser capaz de medir la temperatura en varios puntos de la protección EPI, de modo que pueda estimar la capacidad de aislamiento en la protección y comunicar al usuario una detección de desgaste de forma sonora, o transferir esa información mediante algún medio de comunicación a otro sistema (durante la fase de pruebas).

En este caso el sistema ha de contar con sensores de temperatura a distintos niveles en las diferentes capas de tejido de la prenda. La Figura 17 muestra el diseño conceptual inicial con las posibles zonas de medida, mientras que la Figura 18 muestra en más detalle la ubicación de los distintos componentes.

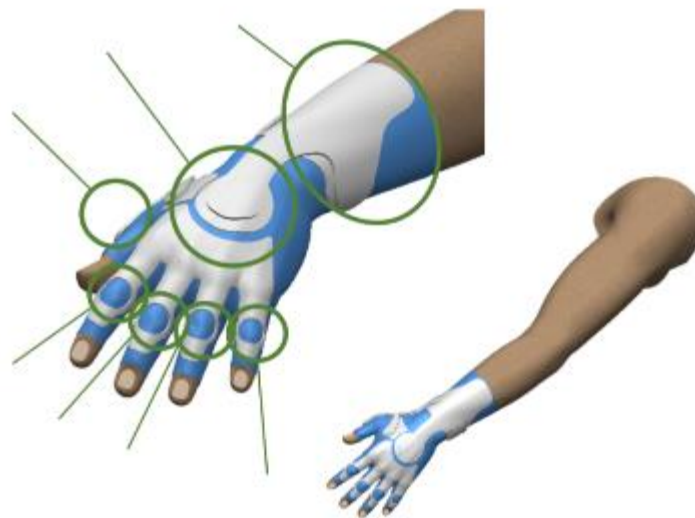


Figura 17. Diseño conceptual del modo de uso y posibles zonas de medida en demo EPITERM



Figura 18. Situación de componentes electrónicos en el textil

Los elementos de este sistema y el esquema conceptual de interacción entre ellos se muestran en la siguiente figura.

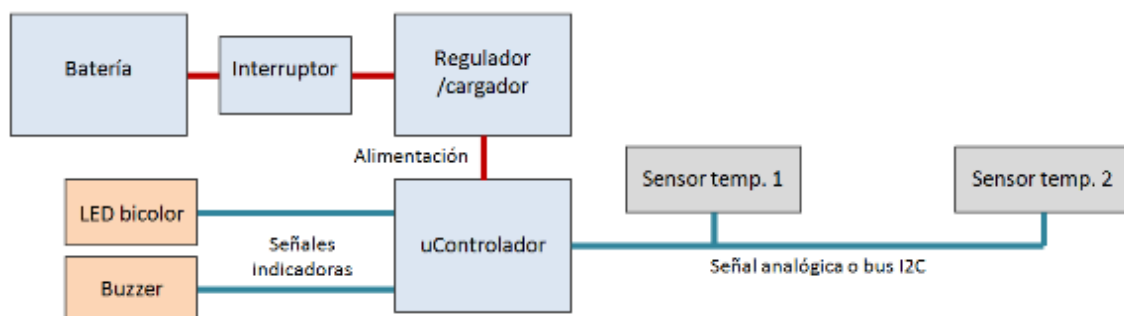


Figura 19. Diagrama de bloques de demo EPITERM

### 3.2.3.5 DISEÑO DE CONCEPTO PARA DISPOSITIVO HMITEXT

El dispositivo de control remoto en textil es un elemento que realiza parte de la función de interfaz de usuario para otro dispositivo padre, que será un dispositivo móvil. El dispositivo presentará al usuario unos pulsadores para el control de las funciones de audio, sin necesidad de otros sensores o actuadores. El sistema se conectará al dispositivo móvil mediante cable USB, de modo que deje libre el canal Bluetooth por si hay una comunicación con otro dispositivo como un altavoz o auriculares BT.

La electrónica de procesado, conexión para la alimentación y acondicionamiento de señales, estará integrada en la prenda por el interior. Los pulsadores de control deben estar en la parte exterior de la prenda para permitir su activación. El dispositivo puede integrarse en una manga por ejemplo, cerca de la muñeca para un fácil acceso con la otra mano, y contará también con un cable USB que lo conecta al dispositivo móvil en un bolsillo. La chaqueta podrá diseñarse también para zurdos colocando el dispositivo de control en la manga derecha.

Las siguientes figuras muestran el diseño conceptual inicial de la prenda así como la posible ubicación de los distintos elementos.



Figura 20. Diseño conceptual de prenda para demo HMITEXT



Figura 21. Posible disposición de componentes electrónicos y trazado de pistas de conexión

La siguiente figura muestra un esquema con los componentes de la electrónica.

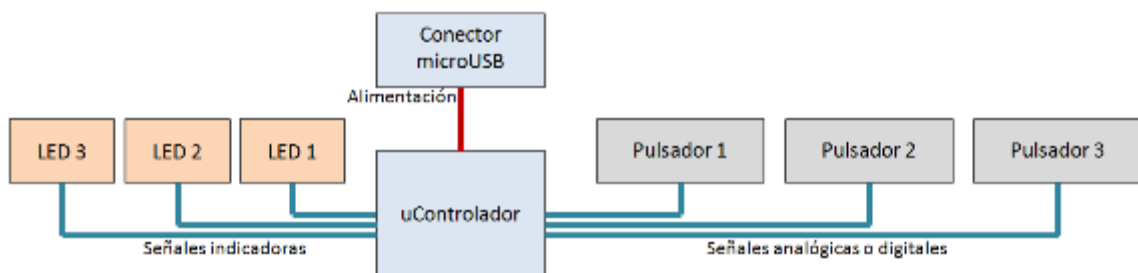


Figura 22. Diagrama de bloques de demo HMITEXT

### 3.2.3.6 DISEÑO DE CONCEPTO PARA DISPOSITIVO SMART SHOE

En este caso se trata de un dispositivo que no precisa de interfaz de usuario, salvo para el encendido, y sí precisa una comunicación inalámbrica para la transmisión de información a un sistema de decisión o registro. Como funcionalidad se puede considerar la medida de fuerza en un punto de la planta del pie, que puede servir para determinar acciones o posiciones del usuario.

Los elementos a integrar se van a distribuir en diferentes ubicaciones en el calzado. La alimentación, procesado y comunicaciones requiere componentes que estarán más seguros integrados en el textil del calzado, por ejemplo en la parte del talón, mientras que los sensores o antenas están mejor situados por ejemplo en una plantilla o en la propia suela del zapato, para contar con un área mayor.

En la Figura 23 se muestra el boceto inicial del calzado incluyendo la suela y la ubicación de la electrónica rígida, con el circuito de alimentación y procesado, en la parte del talón.



Figura 23. Situación externa de electrónica e interna de sensores en el calzado SMART SHOE

Se considera el dispositivo integrado en un solo calzado, y no en los dos que forman un par. El concepto para la electrónica se muestra a continuación.

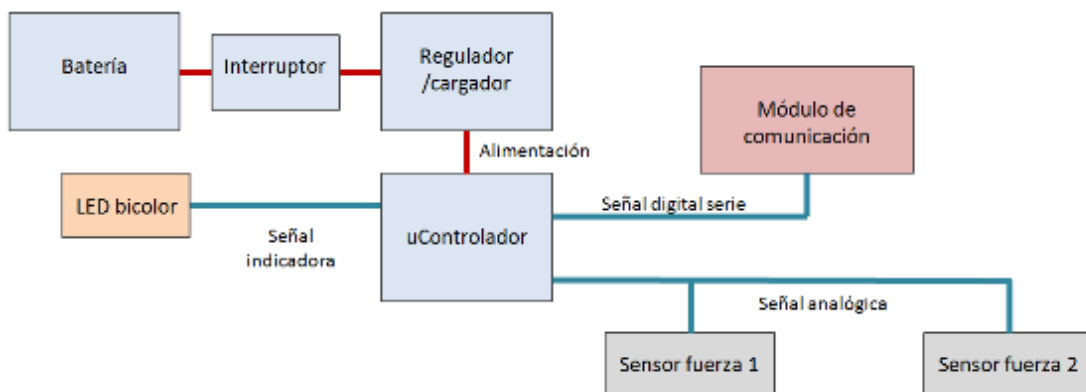


Figura 24. Diagrama de bloques de demo SMART SHOE

### 3.2.3.7 DISEÑO DE CONCEPTO PARA DISPOSITIVO SUNPROT

Se trata de un dispositivo para la medida de la exposición a radiación UV que estará integrado en un casco rígido, para su uso por trabajadores en exteriores. El sistema no requiere interfaz de usuario salvo para el encendido.

En este demostrador la ubicación de los sensores UV tiene que ser en el exterior del casco para poder recibir la radiación solar, mientras que el resto de componentes se integrarán en el interior del mismo. En este caso el circuito se conformará para adaptarlo a la geometría del casco, utilizando para ello un molde con la misma forma que el propio casco. En una fase posterior podría pensarse en fabricar de un solo paso el casco con la electrónica integrada utilizando también termoconformado o bien sobreinyección.

La Figura 25 muestra el diseño conceptual del demostrador con la ubicación de sensores y circuito.



Figura 25. Diseño conceptual del demostrador SUNPROT

Los componentes electrónicos necesarios para desarrollar este demostrador serían los mostrados a continuación.

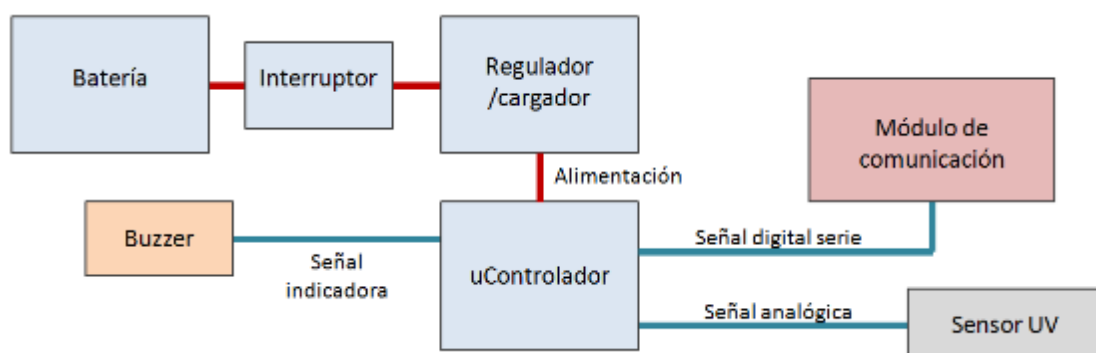


Figura 26. Diagrama de bloques de demo SUNPROT

### 3.2.3.8 SELECCIÓN DE DEMOSTRADORES

La selección final de demostradores se ha realizado en base a las entrevistas realizadas con los distintos usuarios potenciales de las tecnologías propuestas. Se ha intentado también que la

selección represente todos los sectores de interés así como las 2 tecnologías principales del proyecto: wearables textiles y wearables rígidos.

Los demostradores SMART ARM y SMART ARM PRO se seleccionan ambos por tener un amplio número de aplicaciones tanto en el sector salud como el industrial y de deportes. Entre los conceptos restantes de tipología flexible, se elige el demostrador HMITEXT de nuevo por su amplio rango de aplicaciones posibles. Finalmente, de los dos demostradores de tipología rígida restantes (suela y casco), descartamos el casco pues al ser un elemento de protección individual (EPI) cualquier modificación en el mismo supone la certificación completa de nuevo del sistema lo que conllevaría una complejidad adicional en el diseño del nuevo producto y una ralentización en los plazos de cara a su futura explotación. Se selecciona por tanto el concepto SMART SHOE, con aplicaciones de interés tanto en salud como en el sector industrial. En la siguiente tabla se resume la selección llevada a cabo.

Tabla 4. Resumen de demostradores seleccionados en el proyecto WINTEI

Demo	Caso de uso	Nombre	Tipo de wearable	Sector		
				Salud	Deporte	Industrial
1	1	SMART ARM	Flexible	✓	✓	✓
2	2	SMART ARM PRO	Rígido	✓		✓
3	5	HMITEXT	Flexible		✓	✓
4	6	SMART SHOE	Rígido	✓	✓	✓

Los 4 demostradores seleccionados son implementados en los hitos 4 y 5 del proyecto.

### 3.3 HITO 2. DESARROLLO DE PROCESO R2R SOBRE SUSTRATO ELÁSTICO

#### 3.3.1 Tarea 2.1. Selección de materiales y componentes

Para el desarrollo de los circuitos elásticos se han seleccionado en primer lugar sustratos elásticos, tanto poliméricos como textiles, con distintos grados de elasticidad. En segundo lugar se han identificado tintas conductoras que permitan la impresión de electrodos elásticos. Estos pueden conseguirse en parte mediante el diseño en forma de meandro, y en parte, mediante el uso de materiales intrínsecamente elásticos, que permitan una cierta elongación sin perder sus propiedades mecánicas y eléctricas. Finalmente, se ha seleccionado una variedad de distintos componentes electrónicos en base a criterios como factor de forma y distribución de los pads de conexión, así como adhesivos para la integración y conexión robusta de los componentes a los circuitos previamente impresos.

##### 3.3.1.1 SUSTRATOS

**Sustratos textiles.** En la revisión de la literatura científica y el estado del arte a nivel comercial, se han encontrado ejemplos de wearables impresos sobre una gran variedad de textiles, desde algodones, linos y otros tejidos basados en fibras naturales, hasta tejidos sintéticos fabricados con fibras poliméricas. Se han seleccionado varios textiles compuestos por combinación de algodón, licra y/o poliéster, buscando por un lado que el material tuviera cierta elasticidad y por otro que permitiera su impresión con tecnologías serigráfica e inkjet. Todos los tejidos seleccionados en el proyecto son capaces de soportar temperaturas de hasta 200°C durante tiempos inferiores a 5 minutos.

**Sustratos polímeros.** Entre los polímeros más comúnmente utilizados como sustratos en circuitos impresos elásticos se encuentran el poliuretano termoplástico (TPU) o los siloxanos como el polidimetilsiloxano (PDMS). El TPU presenta varias ventajas entre ellas una buena resistencia a la abrasión, posibilidad de ser termoformado facilitando por ejemplo su integración en un textil, y elevada energía superficial, lo que favorece una buena impresión con buena adhesión entre el material conductor y el sustrato. El PDMS presenta como ventaja una elevada elasticidad, pero sin embargo su energía superficial hace que sea necesario realizar tratamientos superficiales previos para permitir la adhesión de la tinta. Además el PDMS no se suministra en formato film sino que requiere como paso anterior la fabricación del film mediante colada tras la mezcla de dos componentes. Se han seleccionado y adquirido finalmente sustratos TPU suministrados en lámina o film con diferentes espesores, entre 50 y 150 micras.

##### 3.3.1.2 TINTAS CONDUCTORAS Y DIELECTRICAS

La composición de una tinta viene determinada por el método de impresión al que va destinada y por las exigencias que se demandan al producto impreso. En general todas las tintas están compuestas por un material activo (pigmento, partícula conductora, etc.) y un vehículo para transportar el material activo, que suele estar compuesto por una mezcla de resinas, disolventes y aditivos.

Una de las propiedades más importantes de las tintas en combinación con los sustratos es el poder humectante (también llamado a veces mojabilidad). El poder humectante es la propiedad de un líquido de expandirse adhiriéndose a la superficie de un sólido. Si la tinta no tiene suficiente poder

humectante no se expandirá, dando lugar a una impresión discontinua en forma de gotas inconexas.

Para la fabricación de los circuitos elásticos se han seleccionado tintas conductoras y dieléctricas. Las tintas conductoras son utilizadas para trazar las pistas conductoras que conectan los distintos elementos del circuito. Las tintas conductoras más comunes son las basadas en nanopartículas metálicas, generalmente de plata ya que presenta una elevada estabilidad química y elevada conductividad. También existen tintas de oro con propiedades ligeramente superiores a la plata, o de níquel o cobre. Las tintas dieléctricas pueden usarse para imprimir circuitos complejos en los que las pistas han de cruzarse, actuando esta capa como aislante en los puntos de cruce. También puede usarse como recubrimiento de textiles o polímeros previo a la impresión de tintas conductoras para facilitar el proceso, o bien posterior para actuar de capa protectora.

En este proyecto se han seleccionado y probado tintas de plata de diferentes fabricantes, para su uso mediante proceso serigráfico o mediante impresión inkjet.

**Tintas para serigrafía.** Estas tintas, generalmente denominadas pastas, poseen valores de viscosidad muy elevados (de hasta 50 Pa-s), por lo que requieren en su composición una gran cantidad de aglutinantes poliméricos, además de solventes y partículas activas. Se han seleccionado pastas de los fabricantes Dupont y Dicotec, específicamente desarrolladas para fabricar pistas elásticas, que contienen en sus formulaciones resinas elásticas.

**Tintas para inkjet.** Estas tintas pueden ser de base agua o base solvente. Las tintas de base solvente permiten conseguir muy buena calidad de impresión, durabilidad de la imagen, y además son compatibles con múltiples sustratos con tiempos de curado muy rápidos, por lo que han sido la formulación preferente durante años. Algunas desventajas son que requieren un mayor mantenimiento de los equipos (bloqueo de boquillas por secado de la tinta dentro de los cabezales) y que en muchos casos contienen productos tóxicos o poco deseables desde un punto de vista medioambiental. Las tintas de base agua son más respetuosas con el medioambiente, y son las más utilizadas en las aplicaciones de consumo (impresoras desktop), al ser además mucho más económicas y poder ser vaporizadas fácilmente en la impresión ink-jet térmica. En aplicaciones industriales son menos utilizadas debido a que requieren sustratos porosos o tratados específicamente para poder asegurar la adhesión de la tinta. Además, muchos cabezales industriales piezoeléctricos son incompatibles con tintas de base agua. Por este motivo se ha optado por centrarse en tintas de base solvente. En las tintas que contienen partículas, como es el caso de muchas tintas conductoras o activas, otro parámetro a tener en cuenta es el tamaño máximo de las partículas. En el caso de la impresión ink-jet se recomienda que el tamaño de partícula no supere 1/50 del diámetro de la boquilla de los inyectores. Para seleccionar las tintas inkjet utilizadas en este proyecto se han seguido las recomendaciones de los principales fabricantes, SunChemical y Genesink.

### 3.3.1.3 RECUBRIMIENTOS

Para el tratamiento de los textiles previo a la impresión con tintas activas se han seleccionado varios barnices comúnmente utilizados para esta aplicación, del fabricante MG, y pertenecientes a tres familias de materiales diferentes: siliconas, acrílicos y uretanos. Todos ellos pueden utilizarse además como recubrimiento posterior para la protección de los circuitos. De hecho este es su uso habitual en aplicaciones electrónicas en las industrias automotriz, marina, aeroespacial, aviación,

comunicaciones, instrumentación y equipos de control industrial que involucran altas temperaturas, humedad o ambientes agresivos. Los tres materiales presentan cierta elasticidad y han sido utilizados en trabajos previos como recubrimientos de textiles para la impresión con tintas conductoras [19].

#### 3.3.1.4 ADHESIVOS CONDUCTORES

Los adhesivos conductores son adhesivos que contienen partículas conductoras de modo que facilitan la unión mecánica y la conexión eléctrica entre dos superficies conductoras. Pueden sustituir a la soldadura en muchas aplicaciones, principalmente aquellas en las que se requiere un proceso menos agresivo y de baja temperatura.

Los adhesivos pueden ser isotrópicos, cuando conducen en todas las direcciones uniformemente, o anisotrópicos, cuando conducen únicamente en una dirección, la perpendicular a las superficies a unir (dirección Z).

Los adhesivos conductores contienen partículas metálicas distribuidas uniformemente en una matriz adhesiva que actúa de vehículo. Las distintas formulaciones se optimizan para lograr diferentes propiedades en los adhesivos conductores, como puede ser mejorar la flexibilidad del mismo para adaptarlo a sustratos flexibles o a la unión de componentes con coeficientes de expansión térmica muy diferentes. Otros adhesivos se formulan para reducir la temperatura o tiempo de curado o para maximizar la conducción, según los requisitos de cada aplicación.

Se ha seleccionado tres adhesivos conductores diferentes para su evaluación en el proyecto, y además se ha elegido un adhesivo dieléctrico que puede ser utilizado como underfill, para mejorar la unión mecánica entre los componentes y los sustratos.

#### 3.3.1.5 COMPONENTES ELECTRÓNICOS

Se han seleccionado componentes electrónicos con diferentes funciones para el diseño de los circuitos. Estos componentes son de reducido tamaño y de montaje superficial (SMD), de modo que su montaje no requiere en general la perforación del sustrato. Los tipos de componentes seleccionados son los siguientes:

**Componentes pasivos** (resistencias, condensadores y conectores). Se han seleccionado principalmente modelos de resistencias con valores resistivos de diferentes órdenes de magnitud y con diferentes encapsulados (1206, 0805, 0603). La selección de diferentes encapsulados permite evaluar la complejidad para integrar componentes de diferentes tamaños, y su posterior comportamiento en funcionamiento frente a las variaciones de forma del sustrato.

**Componentes activos** (Diodos y transistores). Estos componentes, junto con los componentes pasivos son usados para múltiples funciones básicas en circuitos, como amplificación, limitación, filtrado, etc. Se ha seleccionado un modelo de diodo (1206) y dos modelos de transistor con encapsulados diferentes (SOT23 y SOT323).

**Procesadores** (Microcontroladores). Se han escogido procesadores de tipo microcontrolador que disponen de un reducido encapsulado pero con un patillaje relativamente espaciado (8SOIC y 6SOT23). Son componentes de solo 6 u 8 patillas que disponen de pocas conexiones de entrada y salida, pero con una amplia flexibilidad para el diseño de circuitos con funcionalidades sencillas.

**Sensores.** Se han seleccionado sensores de temperatura, humedad y acelerómetros ya que son un buen ejemplo para la medida de magnitudes sin contacto con componentes de reducido tamaño. El acelerómetro permite obtener información de la orientación de los objetos en el espacio y también de los movimientos que efectúa, siendo el sensor principal para la monitorización del movimiento de personas, uno de los principales usos de los wearables.

**Elementos de señalización** (LEDs y buzzer). Estos componentes forman parte del denominado interfaz de usuario, ya que ayudan a la interacción con el usuario. Los elementos de señalización son actuadores, y su función es informar al usuario. Se han considerados dos tipos: LEDs para emitir señales visuales y Buzzer para emitir señales sonoras.

**Componentes de activación de usuario** (pulsadores e interruptores). Estos componentes forman la otra parte del interfaz de usuario, los que permiten que éste se comunique con el circuito de una forma táctil. Se ha seleccionado modelos con diferentes tamaños para evaluar su comportamiento sobre el sustrato y la facilidad de interacción.

**Componentes para la comunicación inalámbrica.** La función de estos componentes es poder establecer una comunicación con otros sistemas electrónicos, como pueden ser dispositivos móviles, ordenadores u otros dispositivos wearables. Se han escogido componentes para trabajar en las frecuencias 868MHz y 2.4GHz. Esta última es la utilizada en una red de comunicación WiFi.

### 3.3.2 Tarea 2.2. Diseño de circuitos elásticos

Uno de los puntos fundamentales del proyecto es la fabricación de circuitos elásticos que puedan ser conformables a la anatomía del cuerpo humano o posteriormente integrados en piezas semirígidas para la formación de estructuras adaptadas como los exoesqueletos. Para lograr la formación de pistas conductoras elásticas se han seguido dos estrategias en paralelo. Por un lado, se han seleccionado materiales conductores elásticos intrínsecamente, tal y como se ha descrito en la sección anterior. Por otro lado, se ha realizado un diseño de conductores con geometrías de meandro que permiten alcanzar un mayor grado de elasticidad, pues las tintas conductoras elásticas existentes en la actualidad no aportan la elasticidad necesaria en muchas aplicaciones. Esta segunda vía implica un mayor esfuerzo en el diseño, para lograr que la deformación que puedan sufrir los circuitos elásticos no altere la conductividad de las mismas, lo que requiere un cálculo de las elongaciones esperadas durante el uso o postprocesado del circuito al integrarlo en el producto final. En la Figura 27 se muestra de manera simplificada la utilización de pistas en forma de meandro para el diseño de circuitos elásticos deformables.

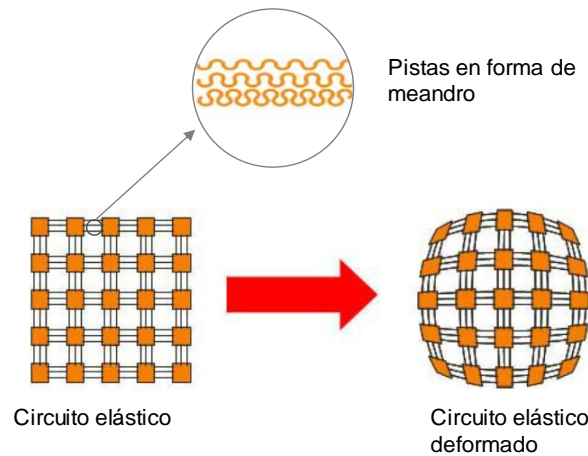


Figura 27. Circuitos elásticos con pistas en forma de meandro

### 3.3.2.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE MEANDROS

La geometría en forma de meandro se usa a menudo para reducir la rigidez de estructuras mecánicas. Los meandros pueden tener diferentes formas incluyendo sinusoidal, zig-zag, trapezoidal o herradura. Se han utilizado en muchas aplicaciones en las que se desea reducir el módulo elástico de una estructura y a la vez mantener las propiedades del material conductor o semiconductor.

Los meandros en curva se comportan mejor que los que contienen esquinas, pues en las esquinas la amplitud del estrés es mucho más elevada y puede dar lugar a rupturas. Por este motivo hemos optado por seleccionar la geometría en forma de herradura como base para el diseño de los meandros. Esta geometría consiste en secciones de circunferencia concatenadas tal y como se muestra en la Figura 28. Los parámetros de diseño principales son el ángulo  $\alpha$ , el radio  $R$  y el ancho de pista  $w$ .

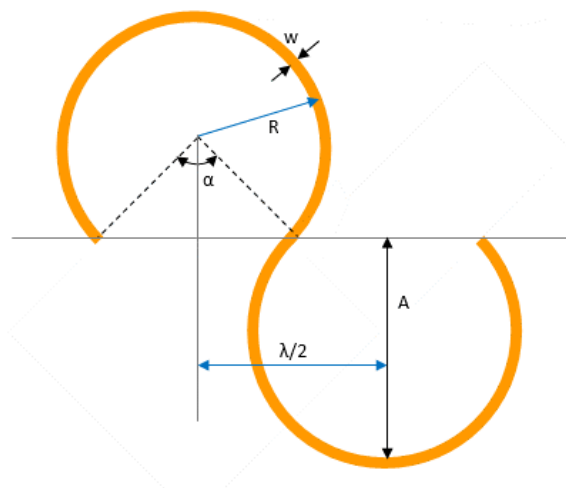


Figura 28. Geometría en forma de herradura y parámetros de diseño principales

Un diseño adecuado ha de asegurar que el estrés local en todos los puntos del conductor se mantiene siempre por debajo del punto de ruptura del mismo. Los factores a tener en cuenta son

las deformaciones esperadas, la variación en la conductancia y las dimensiones de los pads de los componentes que se pretenden conectar con las pistas.

Incluso utilizando geometrías en curva, los puntos de máximo estrés están en los puntos más extremos de las pistas, en los que la curvatura es máxima. Esto ha sido corroborado en diferentes simulaciones con elementos finitos tales como las publicadas en [20] y mostradas en la Figura 29.

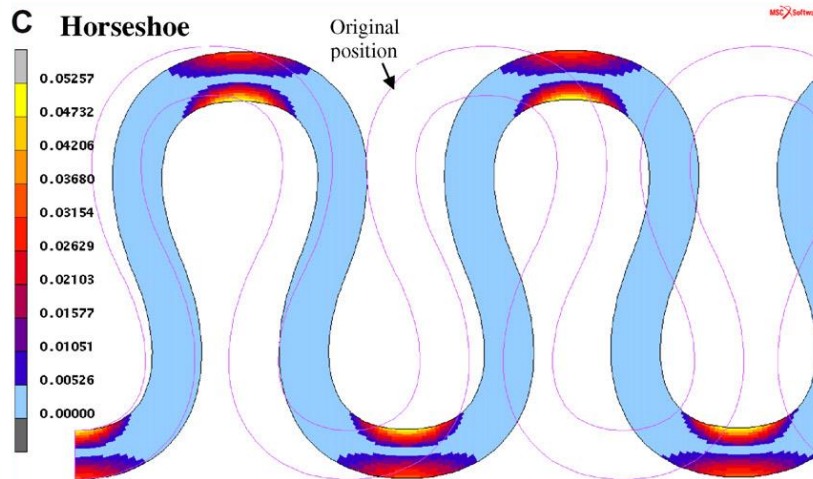


Figura 29. Distribución de tensiones en diferentes zonas de la pista según el estudio publicado en [20]

### 3.3.2.2 ESTUDIO DE INFLUENCIA DEL ÁNGULO DEL MEANDRO

Se ha diseñado un conjunto de meandros con forma de herradura con radio fijo, en el que se varía el ángulo  $\alpha$  y el ancho de la pista. En la Figura 30 se muestra el conjunto diseñado para este estudio, que se ha implementado en una pantalla de serigrafía y ha servido a su vez para optimizar los parámetros de impresión con distintas pastas serigráficas. En la Tabla 5 se muestran los parámetros asociados a cada tipología de meandro.

Tabla 5. Parámetros de conjunto de meandros con radio fijo  $R = 3$  mm. Los parámetros  $\alpha$ ,  $w$  y  $\lambda$  vienen indicados en la Figura 28 mientras que  $L_i$  indica la longitud de un arco.

Referencia	$\alpha$ (°)	$w$ (mm)	$L_i$ (mm)	$\lambda$ (mm)
A	180	1	9,42	12,00
B	120	1	12,57	10,39
C	80	1	14,66	7,71
D	180	0,75	9,42	12,00
E	120	0,75	12,57	10,39
F	80	0,75	14,66	7,71
G	180	0,5	9,42	12,00
H	120	0,5	12,57	10,39
I	80	0,5	14,66	7,71

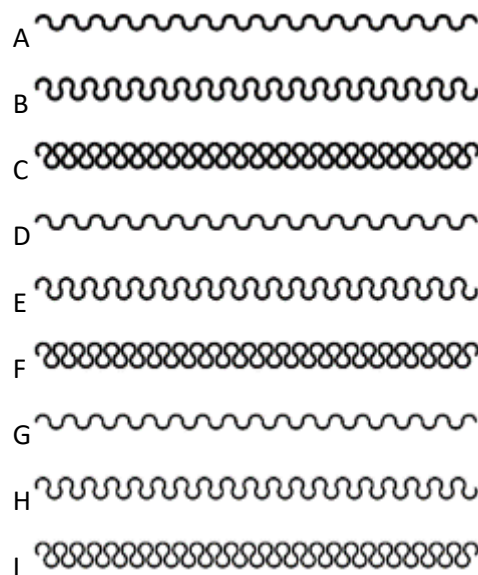


Figura 30. Sistema de meandros con forma de herradura y distintos parámetros de diseño

Como conclusión de este estudio tras la evaluación de las probetas impresas, se considera que las pistas en meandro mejoran significativamente la elasticidad de las pistas impresas y, en general, para la mayoría de las aplicaciones, es suficiente con utilizar ángulos de meandro de 180° para no aumentar innecesariamente la resistencia total de las pistas.

### 3.3.2.3 DISEÑO DE CIRCUITOS PARA PROBETAS

Se han diseñado circuitos sencillos que permitan evaluar diferentes parámetros de diseño, como ancho y espesor de pistas, y diferentes reglas para el trazado, como radios de curvatura en cambios de dirección, forma de meandros y otros trazados orientados a la impresión sobre materiales elásticos. El diseño de circuitos está también orientado a probar componentes electrónicos con diferentes tipos de conexión. La imagen siguiente muestra algunos de los diseños realizados utilizando meandros.

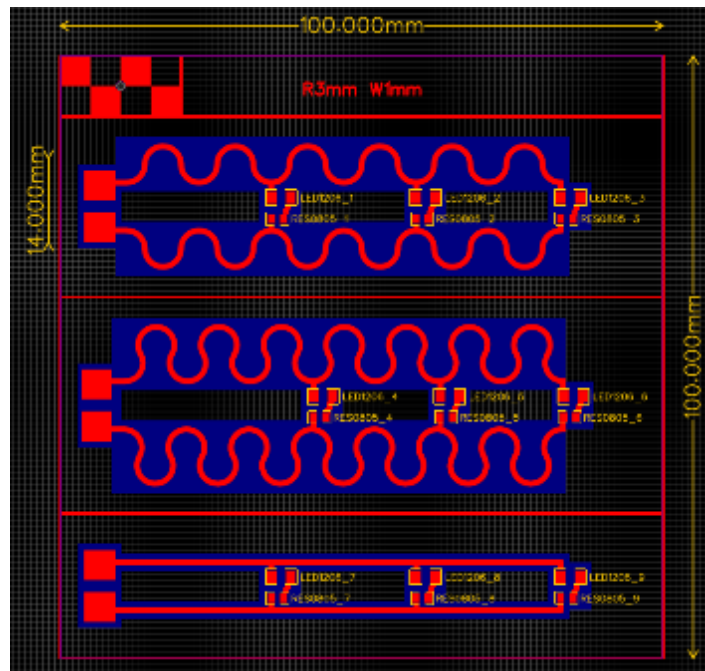


Figura 31. Probeta para la alimentación de tres pares LED-resistencia mediante pistas de tipo meandro

Para la evaluación de la conductividad de pistas y adhesivos conductores, y la capacidad de pegado también de adhesivos no conductores, se ha diseñado una probeta que permite el montaje de componentes con diferentes encapsulados de montaje superficial (SMD 1206, 0805 y 0603).

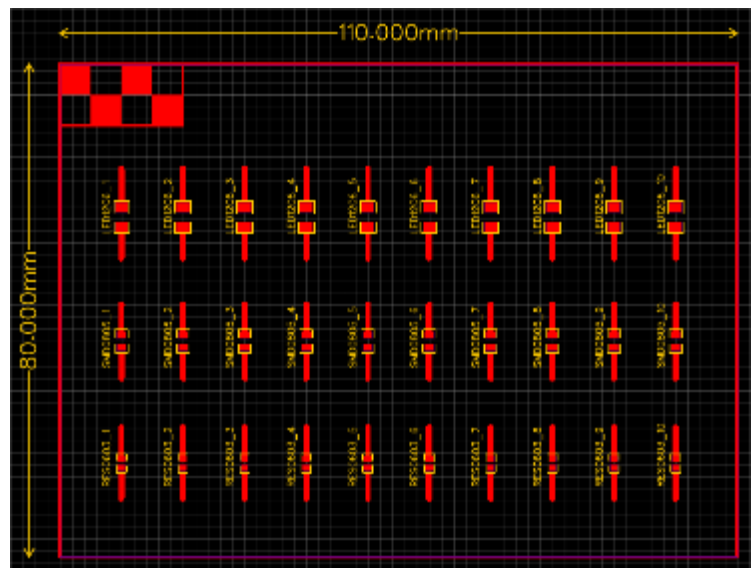


Figura 32. Probeta para la evaluación de materiales y montaje de componentes electrónicos versión 3x10

### 3.3.3 Tarea 2.3. Optimización de impresión y sinterizado sobre sustrato elástico

Para lograr el paso del proceso de fabricación de circuitos flexibles a la fabricación de circuitos elásticos en la línea roll-to-roll se requiere abordar dos vías en paralelo:

- Por un lado, es necesario **optimizar el control de la tensión del sustrato y mejorar la precisión** de los equipos de posicionamiento de componentes y la sincronización entre los módulos para asegurar un buen alineamiento, ya que el uso de sustrato elástico implica una mayor probabilidad de que se produzcan desviaciones o deformaciones que afecten a una menor precisión en el posicionamiento.
- Por otro lado, es necesario utilizar nuevos materiales con distintas propiedades que directamente afectan a los procesos y requieren por tanto una optimización de los parámetros de proceso. En concreto, es necesario optimizar los siguientes procesos:
  - Impresión/recubrimiento de materiales elásticos con nuevas propiedades (reología, composición) sobre sustratos elásticos.
  - Sinterizado de pistas sobre sustratos de baja temperatura y con baja estabilidad dimensional
  - Optimización de proceso pick&place para posicionamiento de componentes sobre sustrato elástico y dispensado de adhesivos conductores

La metodología para la optimización de los procesos de impresión/recubrimiento y sinterizado se basa en seguir un procedimiento secuencial en el que en una primera fase se realizan **los ajustes de máquina**, llevando a cabo mejoras en el control del movimiento, tensión y alineamiento del sustrato, mientras que en una segunda fase se llevan a cabo los **ajustes de parámetros de proceso** como pueden ser velocidades, tiempos, presión, temperatura, etc., para obtener los parámetros óptimos con los nuevos conjuntos de materiales. La optimización en este caso se realiza utilizando uno o dos parámetros de control principales como pueden ser la resistencia eléctrica o la inspección visual. El proceso de optimización se realiza para distintos conjuntos de materiales sirviendo los resultados finales como evaluación de los mismos.

En esta tarea T2.3 los esfuerzos se centran en los ajustes de control del movimiento del sustrato, así como en la optimización de los parámetros de los procesos de impresión, recubrimiento y sinterizado, mientras que la tarea T2.4 se centra en los ajustes para lograr un mejor posicionamiento de componentes con los nuevos materiales, usando el proceso de pick&place.

#### 3.3.3.1 AJUSTES EN EL CONTROL DEL SUSTRATO

El sistema de control de sustrato se encarga del movimiento general del sustrato y la aplicación de procesos sobre éste como el efecto corona. Sus elementos principales son los sistemas de bobinado-desbobinado, sistemas de alineamiento y sistema de efecto corona.

Los ajustes se han realizado usando un sustrato elástico TPU de 100 micras de espesor y 300 mm de ancho.



Figura 33. Imagen de la línea roll-to-roll con sustrato elástico TPU de 300mm de ancho

El control del funcionamiento de estos elementos de la línea se realiza desde un PLC (Programmable Logic Controller). Para el control del sustrato flexible se ha desarrollado un programa que permite obtener la velocidad de avance del sustrato necesaria al mismo tiempo que se controla la tensión del sustrato elástico. El programa permite también el rebobinado del sustrato.

Para obtener el control de tensión, el principal aspecto es el ajuste de parámetros del controlador (servo) de cada motor (en los módulos a principio y final de línea). El control del sustrato permite establecer además tiempos de parada del sustrato de forma periódica. Este modo de trabajo con paradas periódicas es necesario para la impresión con serigrafía plana, ya que el sustrato debe estar quieto mientras se realiza la impresión. También es útil para la ejecución de trayectorias de dosificación de adhesivos y posicionamiento de componentes con el robot en algunos casos.

Para ajustar el movimiento global del sustrato es necesario tener en cuenta los requisitos de todos los procesos que van a tener lugar en la línea R2R: impresión inkjet, serigrafía, pick&place y sinterizado. El sinterizado afecta ya que mientras se imprimen pistas conductoras, o se colocan componentes, otros circuitos estarán simultáneamente atravesando el horno de curado con unas restricciones de tiempo establecidas (tiempo mínimo de curado) que han de tenerse en cuenta.

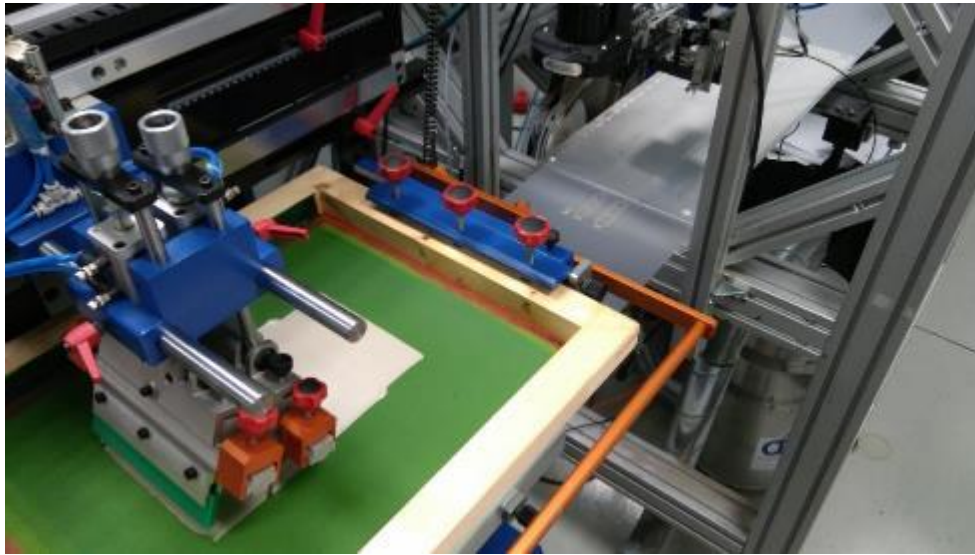


Figura 34. Parada del sustrato para la impresión serigráfica

Para el control de impresión con serigrafía plana, el PLC solo precisa un pulso de señal que al activarse produce que el módulo realice todo el proceso de impresión de forma automática, quedando a la finalización de cada impresión a la espera de una nueva señal desde el PLC.

En el caso de impresión inkjet el PLC debe proporcionar dos señales digitales: una para indicar el instante de comienzo de la impresión, y otra, formada por un tren de pulsos de frecuencia variable, para indicar la frecuencia a la que se deben proyectar las gotas de tinta. La frecuencia del tren de pulsos está directamente relacionada con la velocidad del sustrato, de modo que esta relación debe programarse y ajustarse en el programa del PLC.

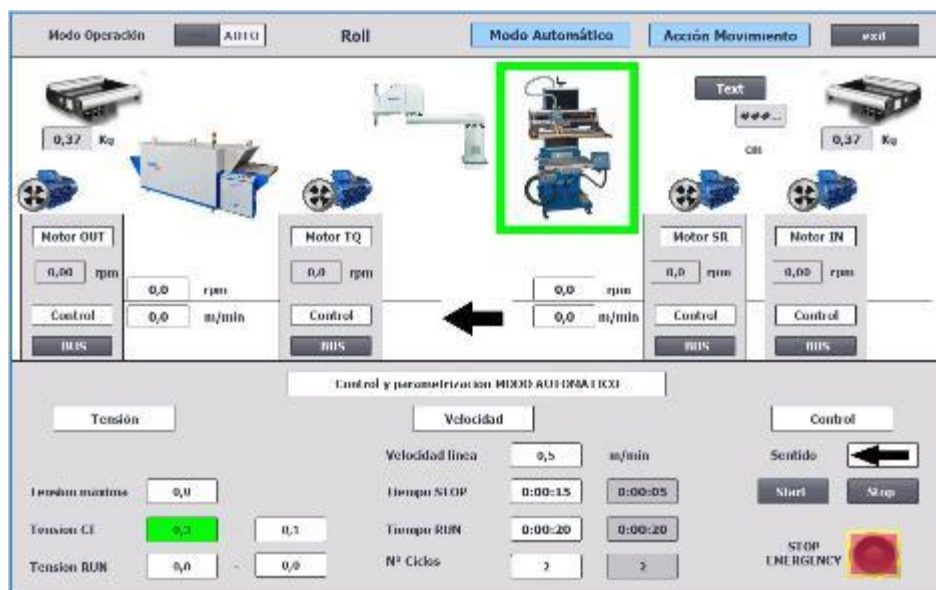


Figura 35. Interfaz de usuario programada para el control del sustrato en velocidad y tensión

Por otro lado, la línea R2R dispone de un sistema de visión para el control de alineamiento y calidad a la salida de los procesos de impresión. El sistema está formado por una cámara de visión

SmartCAM NI-1774C, y para el alineamiento en el módulo de serigrafía se utiliza una mesa de vacío y un servo para el desplazamiento de esta mesa de vacío. Desde el PC Central se obtienen los resultados del procesado con visión y se puede controlar la actividad de la cámara.

Para la realización de los procesos con sustrato flexible, el sistema de bobinado y desbobinado controla la velocidad y tensión del sustrato, y también controla el alineamiento de forma automática. El alineamiento se controla al comienzo y final de la línea, de modo que en posiciones intermedias el alineamiento puede tener desvíos.

El sistema SmartCAM permite monitorizar el alineamiento del sustrato a la salida de la zona de impresión. Si la posición lateral del sustrato sale fuera de un rango establecido, el sistema puede alertar a las diferentes unidades de control de procesos (PC y PLCs). El algoritmo proporciona también el ángulo de inclinación del sustrato. La siguiente figura muestra una imagen en el proceso de identificación del borde del sustrato.

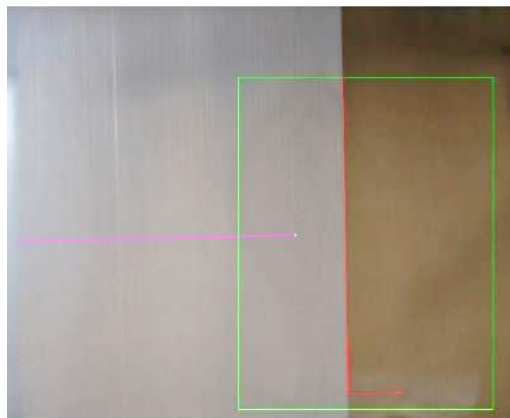


Figura 36. Imagen proporcionada por la cámara durante el proceso de obtención de la posición del borde de sustrato

### 3.3.3.2 AJUSTES DE PARÁMETROS DE PROCESOS DE IMPRESIÓN / RECUBRIMIENTO

**Ajustes de parámetros de procesos de recubrimiento.** Se han evaluado varios materiales para el recubrimiento de textiles de cara a facilitar su impresión con tecnología ink-jet. La impresión con serigrafía no requiere, en general, incluir capas previas al ser las pastas mucho más viscosas y depositarse una mayor cantidad de las mismas.

Se realizaron varias pruebas depositando recubrimientos de uretano, acrílico y silicona de forma manual (utilizando pintado con pincel) o mediante esprayado (prueba con barniz tropicalizado), con idea de ajustar los parámetros del proceso automático en una segunda fase. Los resultados obtenidos, sin embargo, no mostraron una mejora en la conductividad de las pistas impresas, por lo que no se prosiguió con esta vía.

**Ajustes de parámetros de proceso de impresión serigrafía.** Las impresiones con serigrafía plana se realizaron con el equipo AC550 integrado en la línea roll-to-roll. El proceso se basa en empujar la tinta por medio de una rasqueta haciendo que atravesase una pantalla que presenta aberturas sólo en las zonas de interés según el patrón de impresión deseado.

Los ajustes se realizaron utilizando un sustrato polimérico y la pasta conductora de Dupont. Una vez seleccionada la pantalla de serigrafía (con un mallado de 100hilos/cm), siguiendo las

recomendaciones del fabricante, se han de ajustar los parámetros de proceso, entre los que destacan: ángulo de la rasqueta, altura de la pantalla, presión de la rasqueta y velocidad de la rasqueta. Todos ellos son dependientes de la pantalla seleccionada, así como del tipo de pasta y de la geometría del patrón que se desea imprimir. El ajuste de parámetros se hace de forma experimental partiendo del conjunto utilizado típicamente en este equipo con otras pastas de serigrafía.

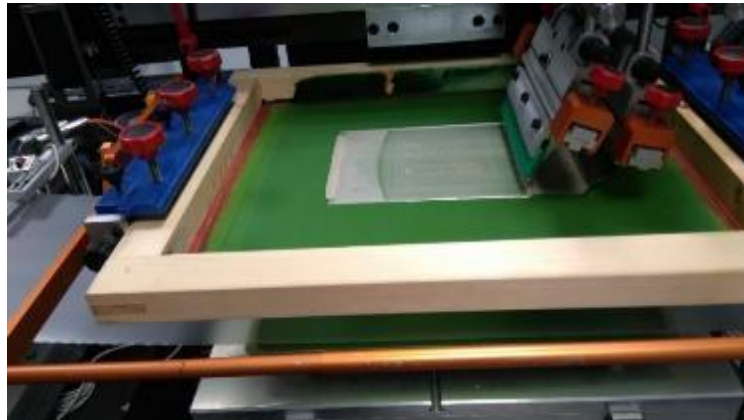


Figura 37. Impresión serigráfica de probetas

La viscosidad de las tintas es muy similar en todos los casos por lo que los parámetros de proceso obtenidos para la primera tinta han sido válidos para las demás.

**Ajustes de parámetros de proceso de impresión por inkjet.** Para obtener un ajuste más más preciso y rápido de parámetros, se ha utilizado la impresora fuera de línea del fabricante Dimatix. Esta impresora tiene además la ventaja de utilizar cabezales desechables. Se han realizado pruebas de impresión sobre tejidos de hilo y varios sustratos de TPU. Las tintas utilizadas han sido en primer lugar SunChemical y posteriormente Genesink.

En este caso los parámetros de configuración y ajuste del proceso son los siguientes: Modelo de cabezal de impresión, según resolución y tamaño de gota necesarios; Distancia entre sustrato y cabezal de impresión; Forma de onda y voltaje, que indica a la máquina cómo deben ser los pulsos eléctricos que generan la proyección de la gota en cada aguja del cabezal. Cuando se imprime en la línea roll-to-roll, hay que configurar también la velocidad de avance de la línea y la frecuencia de proyección de gotas.



Figura 38. Impresión inkjet de patrón sobre textil durante el proceso de ajuste

### 3.3.3.3 AJUSTES DE PARÁMETROS DEL PROCESO DE SINTERIZADO

El proceso de sinterizado juega un papel clave para lograr una buena conductividad de las pistas impresas tanto por serigrafía como por inkjet. En el sinterizado los disolventes se evaporan y las nanopartículas de plata se sueldan entre sí formando una estructura conductora continua. A mayor temperatura generalmente mayor es la conductividad alcanzada. Sin embargo, temperaturas muy elevadas pueden dañar los sustratos, deformándolos y alternando sus propiedades.

La línea R2R dispone de varios sistemas de curado, como son un horno multifunción (infrarrojos, ultravioleta y térmico) y una lámpara fotónica. Dado que los materiales seleccionados se sinterizan con la radiación proporcionada por el horno multifunción (infrarrojos y térmico), no se ha utilizado el curado con lámpara fotónica.

El curado/sinterizado se realiza considerando entonces dos parámetros: la temperatura y el tiempo de curado. Las tintas y pastas utilizadas permiten el curado a diferentes temperaturas, de modo que cuanto menor es la temperatura, mayor debe ser el tiempo de curado. Por otro lado, los sustratos pueden tener una temperatura límite a partir de la cual el sustrato es dañado. Para los sustratos TPU la temperatura límite es de 120 grados. En el caso de tejidos esta temperatura puede ser superior, pero para evitar riesgos de que hilos se puedan soltar y llegar a partes calefactoras, dado que hay una ventilación de convección, se ha optado por considerar la misma temperatura límite de 120 grados. Con este parámetro fijado, se han realizado numerosas pruebas para seleccionar los tiempos de curado más adecuados para cada combinación de materiales de impresión. Se han utilizado en estas combinaciones sustratos textil y TPU, y tintas/pastas de serigrafía e inkjet.

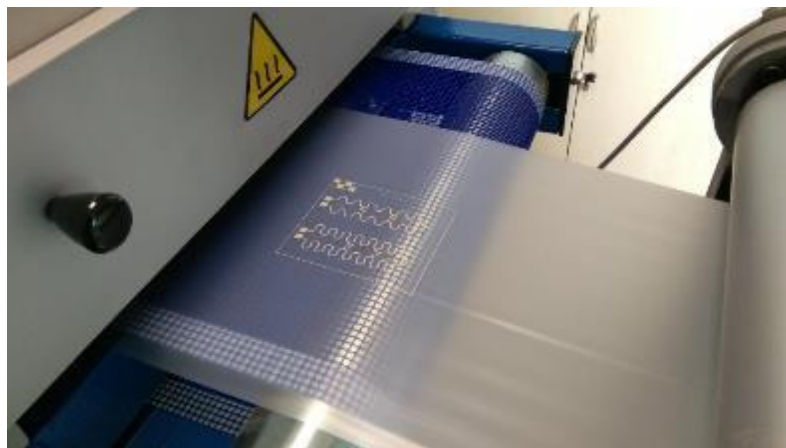


Figura 39. Sinterizado en línea R2R

### 3.3.3.4 MUESTRA DE PROBETAS FABRICADAS

Las siguientes imágenes presentan una muestra de probetas fabricadas utilizadas para la evaluación de los procesos de impresión y curado.

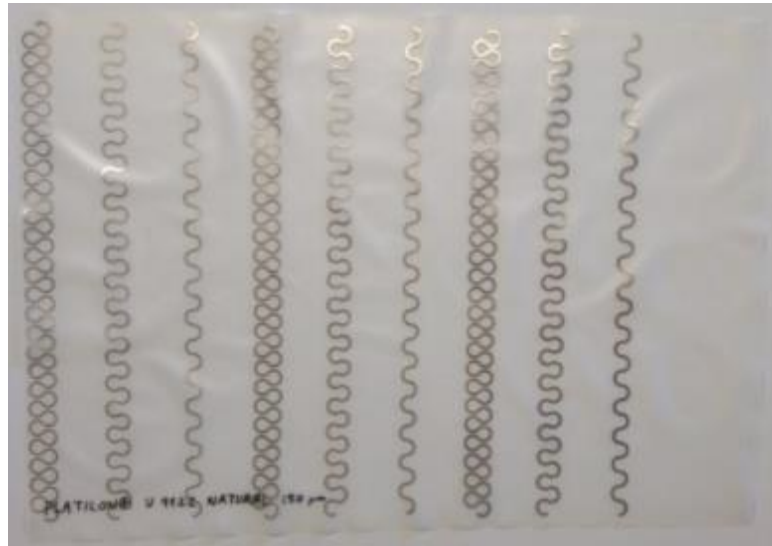


Figura 40. Impresión serigráfica de meandros con tinta Dupont sobre TPU

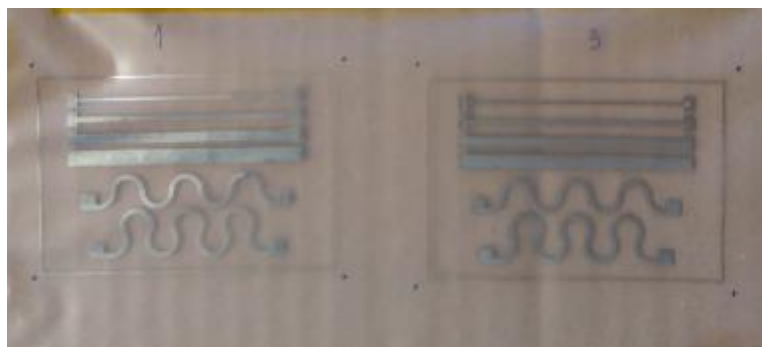


Figura 41. Probetas ink-jet con tinta Genesink sobre TPU.

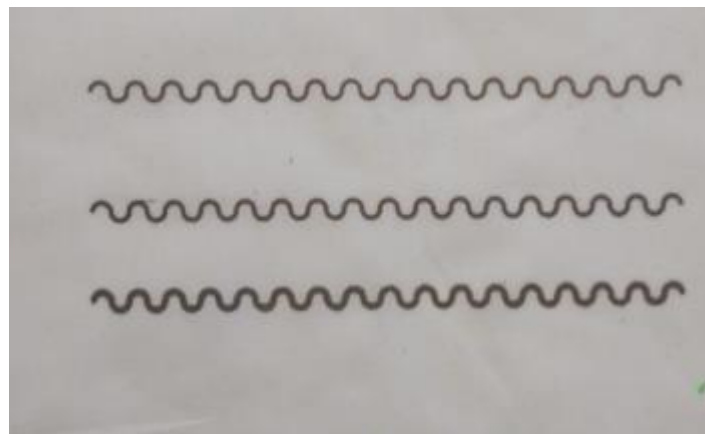


Figura 42. Impresión serigráfica con tinta Dupont sobre tejido elástico.

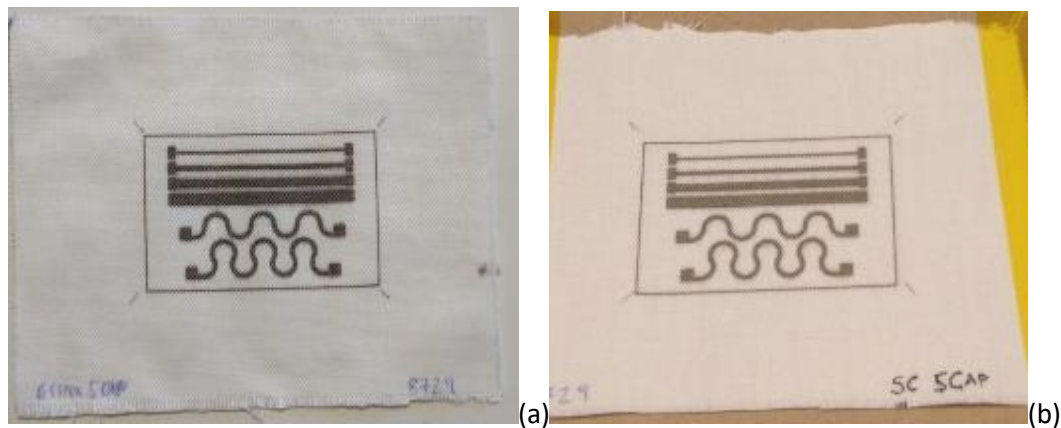


Figura 43. Probetas con tintas Genesink (a) y Sun Chemical (b) sobre tejido elástico referencia 8729. Impresión de cinco capas.



Figura 44. Impresión de pistas con tinta Genesink sobre diferentes barnices (uretano, silicona y acrílico) depositados en tejido elástico.

### 3.3.3.5 CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS DE PISTAS IMPRESAS

Para valorar la calidad de la impresión y optimizar los parámetros, se utiliza como principal indicador la medida de la resistencia eléctrica de las pistas impresas tras el sinterizado y su variación con la elongación. Otros indicadores son la inspección visual y la adhesión y cohesión de las pistas impresas.

**Inspección visual.** La inspección visual es el primer parámetro de control a la hora de ajustar los procesos de impresión y sinterizado. En ocasiones a simple vista se puede observar si la temperatura ha sido excesiva (zonas de sustrato deformadas), insuficiente (la pasta no está del todo curada y presenta zonas húmedas) o si los parámetros de impresión han sido adecuados para lograr una impresión nítida, bien definida y continua.

**Medidas de resistencia eléctrica.** En general las combinaciones tinta-sustrato evaluadas permiten obtener una buena calidad de la impresión, admitiendo repetidas capas, aunque luego algunas de éstas no proporcionen conductividad suficiente. La medida de la resistencia eléctrica es el indicador clave para ajustar los tiempos de sinterizado. También se ha utilizado para el análisis de las geometrías de meandro. Para este estudio se midieron las resistencias eléctricas para meandros

con distintas geometrías impresos mediante serigrafía, llevando a cabo el cálculo de resistencia lineal y resistencia de capa teniendo en cuenta la longitud real de la pista.

**Medidas de resistencia eléctrica con elongación.** Para realizar estas medidas se ha utilizado una mesa óptica que permite fijar un extremo del sustrato impreso y desplazar progresivamente el otro extremo controlando la distancia elongada y la resistencia total de la pista.

**Medida de adhesión/cohesión de pistas.** Las medidas de adhesión se realizan de forma cualitativa utilizando una cinta adhesiva normalizada de 3M, que se pega sobre las pistas y posteriormente se despega de forma manual a un ángulo de 180º con respecto al plano de impresión. Se han obtenido adhesiones adecuadas en la mayor parte de los conjuntos tinta-sustrato tras la optimización de los parámetros de proceso.

### 3.3.4 Tarea 2.4. Integración de componentes

En este caso los ajustes de parámetros se centran principalmente en la programación del robot pick&place que va a llevar a cabo tanto el dispensado de adhesivos como el posicionamiento de los componentes. A nivel de ajuste de proceso se optimiza el tiempo de dispensado de adhesivos según su reología y el tamaño de los pads de los componentes a interconectar.

#### 3.3.4.1 AJUSTES EN EQUIPO PICK&PLACE Y PROGRAMACIÓN

La celda robotizada disponible en la línea R2R contiene, además del robot, un sistema de microposicionamiento, alimentadores de componentes, electroválvulas para dosificación, sistemas de visión y elementos de iluminación.

Los elementos de la celda se controlan a través del controlador del robot, de modo que los ajustes para la fabricación de circuitos se realizan durante la programación del robot. En el programa del robot se incluyen las posiciones de colocación de componentes, velocidades, tiempos de dosificación de materiales, activación de alimentadores, parámetros de visión, y otros parámetros que afectan a cómo se depositan los materiales y se posicionan los componentes.

Cuando las pistas de un circuito ya están impresas, el sistema robotizado permite la dosificación de materiales y la colocación de componentes sobre un sustrato fijo o en movimiento. Este módulo robotizado se utiliza para depositar adhesivo conductor sobre los pads del circuito, y adhesivo no conductor en la posición central de componentes. A continuación, el robot coloca los componentes electrónicos sobre los adhesivos dispensados. De esta forma, al entrar en el siguiente paso en una fase de curado de adhesivos, los componentes electrónicos quedan fijados al circuito electrónico.

Para realizar el proceso, por un lado es necesario generar para cada circuito los archivos GERBER que contienen la posición de los pads donde depositar adhesivo conductor, y por otro lado, el archivo pick&place con las coordenadas y orientación para la colocación del componente. Por otro lado, es necesario configurar y ajustar los siguientes parámetros del proceso: Presión del aire para la dosificación de adhesivos; Tiempo de dosificación del material, dependiente del material, aguja y de la presión de aire seleccionada; Altura del sustrato, de los componentes y del espacio entre aguja y sustrato; Velocidad de avance de la línea.

La programación del robot para la dosificación de adhesivos y para la colocación de componentes electrónicos sobre un circuito impreso puede ser una tarea compleja y de larga duración si el usuario debe crear un programa desde cero, y definir todos los puntos donde hay que depositar

material y poner componentes. IDONIAL dispone de una aplicación de desarrollo propio que genera la mayor parte del programa del robot de forma automática, a partir de los archivos GERBER y pick&place, además de algunos parámetros de ajuste, como espesor de sustrato, altura de componentes, y el tiempo de dosificación. La siguiente imagen muestra la ventana de diálogo de esta aplicación.

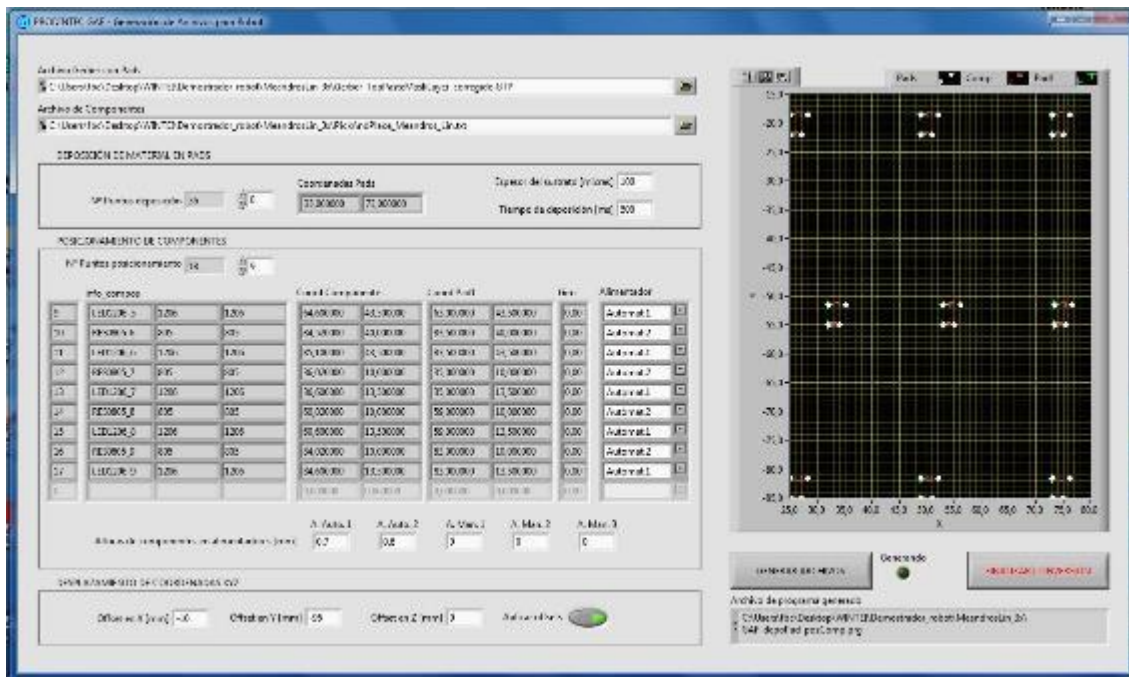


Figura 45. Interfaz de control de sistema pick&place

**Calibración de herramientas y puntos de captura de componentes**

El programa del robot obtenido debe ser comprobado experimentalmente y ajustado, ya que el movimiento de fijación de elementos del cabezal, como son las jeringuillas de adhesivo, hace que los puntos de referencia cambien y tengan que ser recalibrados. Actualmente el cabezal dispone de una herramienta de vacío para coger componentes y de una herramienta de dosificación con jeringuilla.

Para realizar la calibración de herramientas del robot y de puntos de recogida de componentes, y para la comprobación de la correcta captura de componentes mediante vacío, la celda robotizada cuenta con un sistema de visión situado próximo a los alimentadores de componentes. El sistema dispone de una cámara en color de alta resolución y de una óptica que permite el ajuste variable de aumentos. Con este sistema se pueden obtener imágenes de los componentes y de los extremos de las agujas de vacío y de deposición. Los algoritmos de visión artificial implementados permiten obtener el centroide del componente o aguja y su orientación en el espacio.



Figura 46. Sistema de visión en la zona de alimentadores

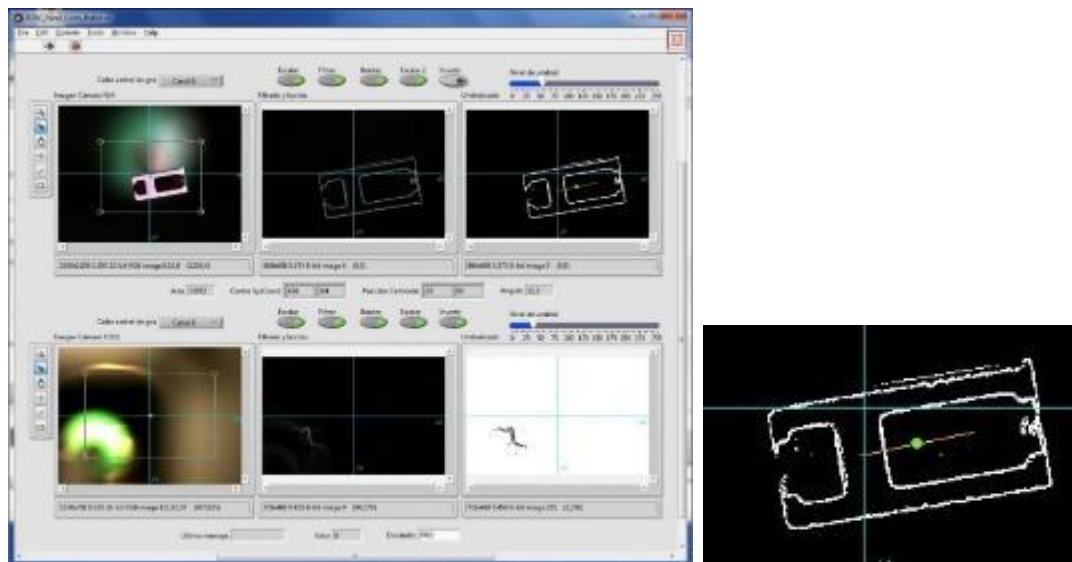


Figura 47. Capturas del interfaz del sistema de visión al analizar un LED visto inferiormente

### 3.3.4.2 AJUSTES DE PARÁMETROS DE PROCESO DE DISPENSADO

Una vez programadas y calibradas las posiciones del robot, el ajuste de parámetros se basa en optimizar el tiempo de dispensado según el tipo de adhesivo conductor y de componente a integrar en el circuito. La presión de dispensado se mantiene constante ya que su ajuste es manual y no puede modificarse desde el control central de la línea.

A continuación se ajusta el tiempo de dispensado. Si el tiempo es excesivo, la cantidad de adhesivo conductor suministrada es elevada y se pueden producir cortocircuitos. Mientras que si el tiempo es demasiado bajo, la adhesión del componente al sustrato no será suficiente y la resistencia de contacto será demasiado elevada. El tiempo de dispensado dependerá de la reología del adhesivo y del tamaño de los pads de conexión del componente, así como de la distancia entre ellos. Cuando la distancia es muy pequeña resulta mucho más crítico evitar cortocircuitos, incluso a costa de lograr una resistencia de contacto más elevada.

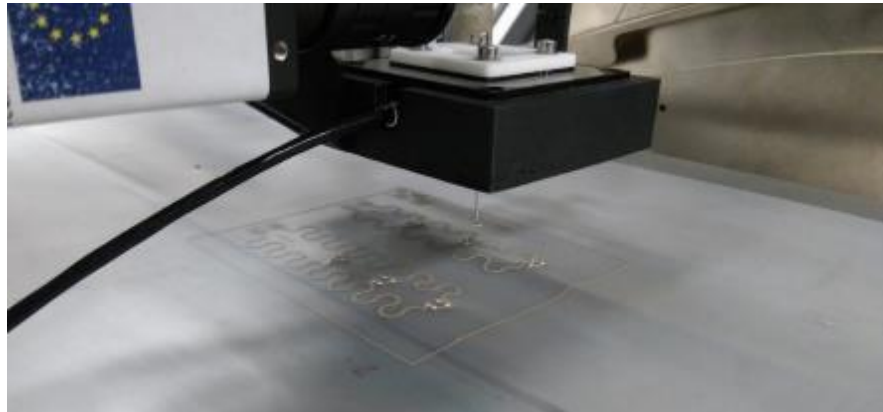


Figura 48. Robot pick&place posicionando componentes sobre circuito probeta

En las siguientes imágenes se presenta una muestra de probetas fabricadas utilizadas para la evaluación del proceso de interconexión de componentes.

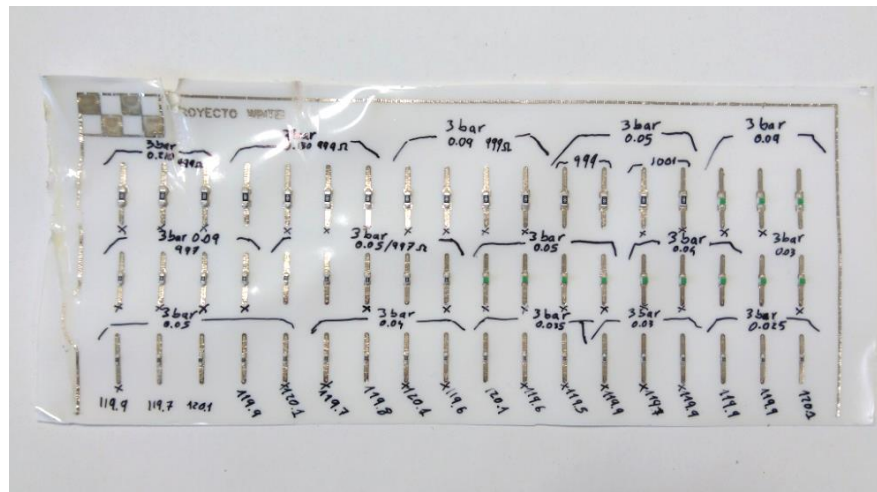


Figura 49. Probeta para evaluación de adhesivos impresa con tinta Sun Chemical sobre TPU.

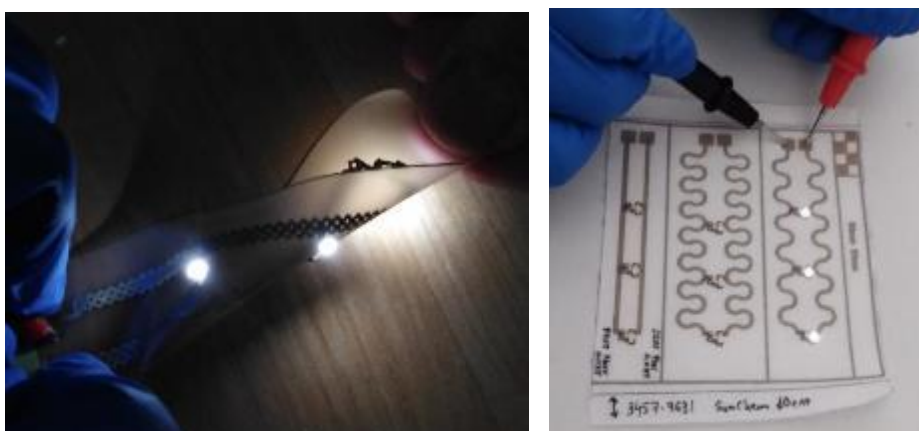


Figura 50. Probetas con LEDs interconectados con adhesivos conductores sobre pistas impresas sobre polímero TPU y textil

### 3.3.4.3 CARACTERIZACIÓN DE PROBETAS CON INTERCONEXIÓN DE COMPONENTES

La caracterización de probetas para optimizar el proceso de interconexión de componentes sobre las pistas impresas se ha realizado mediante dos tipos de medidas.

**Medida de cortocircuitos.** Se ha realizado un análisis del cortocircuitado de componentes por dispensado incorrecto o excesivo de adhesivo conductor. Los resultados ayudan a definir el tiempo máximo admisible para lograr resultados adecuados.

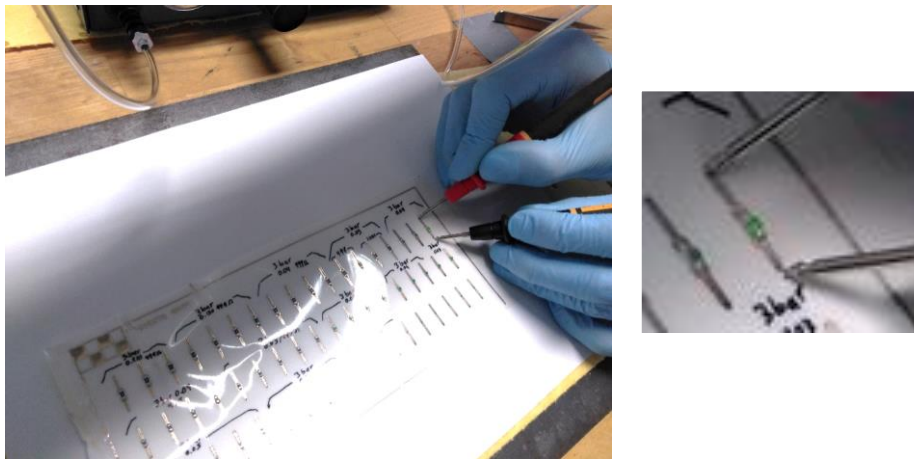


Figura 51. Comprobación de conectividad de LED durante los ajustes de parámetros de dispensado de adhesivo conductor

**Resistencia de contacto.** Para la medida de la resistencia de contacto se utilizan componentes de diferentes encapsulados y se mide la resistencia entre la pista en el punto más próximo al componente y sobre el pad del propio componente cuando está accesible.

Tabla 6. Resultados de medidas de resistencia de contacto promedio y desviación estadística

Tipo de componente	R (mΩ) promedio	ΔR (mΩ) desv. Est.
1206	182	166
0805	74	37
0603	55	39

Los resultados obtenidos son adecuados y comparables a los obtenidos mediante la soldadura de componentes a pistas de cobre convencionales en PCBs (que se encuentran en el rango 10-60 mΩ).

**Medida de adhesión de los componentes a las pistas.** Al igual que para la adhesión de las pistas impresas al sustrato, se utiliza como método de medida cualitativo la cinta adhesiva de celofán 3M normalizada para este ensayo. Se comprueba que todos los componentes superan la prueba.

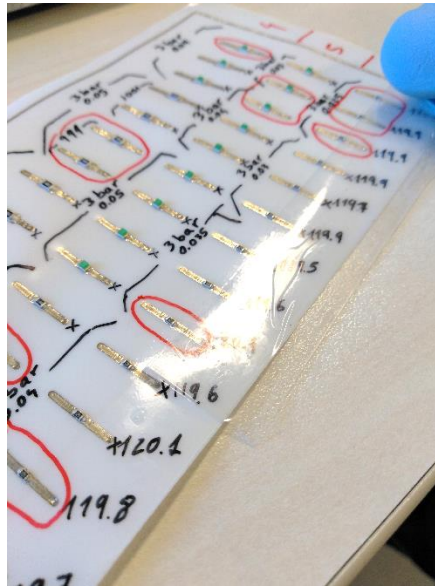


Figura 52. Medida cualitativa de adhesión de componentes utilizando cinta adhesiva normalizada

Los resultados de la evaluación del proceso de interconexión de componentes mediante el sistema pick & place han sido satisfactorios con todos los adhesivos y componentes evaluados. En particular, los resultados han sido óptimos cuando el adhesivo conductor se complementa con un adhesivo dieléctrico que no sólo refuerza la adhesión y robustez de las probetas sino que además evita la formación de cortocircuitos.

### **3.4 HITO 3. DESARROLLO DE PROCESOS DE INTEGRACIÓN EN PRODUCTO**

Este hito se centra en el desarrollo de procesos adicionales que permitan la integración del circuito impreso sobre sustrato elástico en un producto wearable. En concreto, se han analizado y desarrollado: soluciones de conexionado entre partes flexibles y rígidas; procesos para el encapsulado de los circuitos y su separación del sustrato inicial; y el conformado en piezas rígidas.

#### **3.4.1 Tarea 3.1. Selección de conectores y proceso de conexión**

Los conectores son necesarios para conectar el circuito elástico con partes externas del sistema, bien para alimentar el circuito, bien para el envío de señales en ambas direcciones. Desde el punto de vista mecánico la interfaz entre la parte flexible y rígida del sistema es una de las más frágiles y por eso es necesario implementar soluciones de conexionado que permitan una fijación robusta y estable. En esta tarea se ha llevado a cabo una búsqueda de posibles soluciones y se han estudiado los procesos de conexión asociados.

##### **3.4.1.1 DEFINICIÓN DE REQUISITOS DE CONECTORES**

Para la selección de los conectores se han definido los siguientes requisitos:

- Fácil integración en conjunto wearable. En concreto, es necesario que cuente con dimensiones pequeñas y que sea apto para distintos sustratos poliméricos o textiles.
- Compatible con elementos electrónicos externos. Compatible con las potencias y corrientes eléctricas típicas de los elementos que se han preseleccionado en el diseño conceptual de los demostradores.
- Proceso de montaje del conector que pueda ser automatizado e integrado en la línea roll-to-roll a corto-medio plazo.
- Conforme a normativa internacional de CEM.
- Robustez mecánica. El conector debe aportar integridad para ser manipulado sin que se desmonte, y además superar los ensayos mecánicos que se definen en la tarea 6.1.

##### **3.4.1.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES**

En base a estos criterios, se ha realizado una búsqueda de productos existentes que podrían ser utilizados para esta aplicación. En la Figura 53 se muestran múltiples ejemplos. Entre estos, destacan los conectores LIF (low insertion force), ZIF (zero insertion force), conectores para montaje superficial que requieren fuerzas de inserción bajas o nulas, y conectores para crimpado que se basan en la perforación del sustrato con la pista impresa con la pieza conectora rígida. Algunos de los conectores llevan carcasas de plástico integradas para una mayor protección de la unión, en otros casos esta carcasa es a la vez la que ejerce una fuerza de retención en el cable para mantenerlo en la posición deseada mediante un cierre.

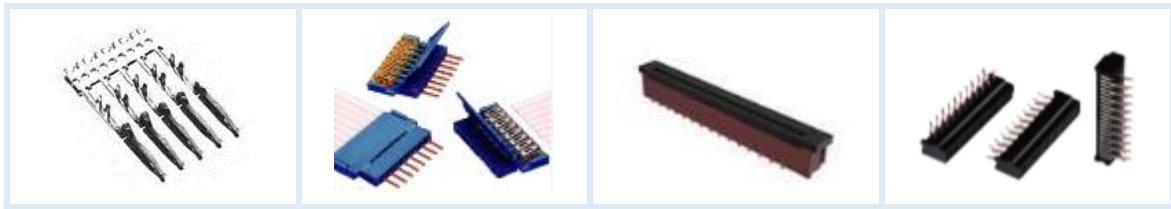


Figura 53. Diferentes tipos de conectores seleccionados para la unión de interfaces flexibles y rígidas

Se han examinado además diferentes espaciados teniendo en cuenta las separaciones estándar utilizadas habitualmente en electrónica, para evaluar las más adecuadas en electrónica impresa.

### 3.4.1.3 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Con los conectores seleccionados se han fabricado numerosas probetas para la validación de los mismos. Las probetas consisten en una serie de líneas conductoras impresas sobre distintos sustratos y conectadas a diferentes tipos de conectores que requieren distancias de separación entre pistas (pitch) estandarizadas. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 54.

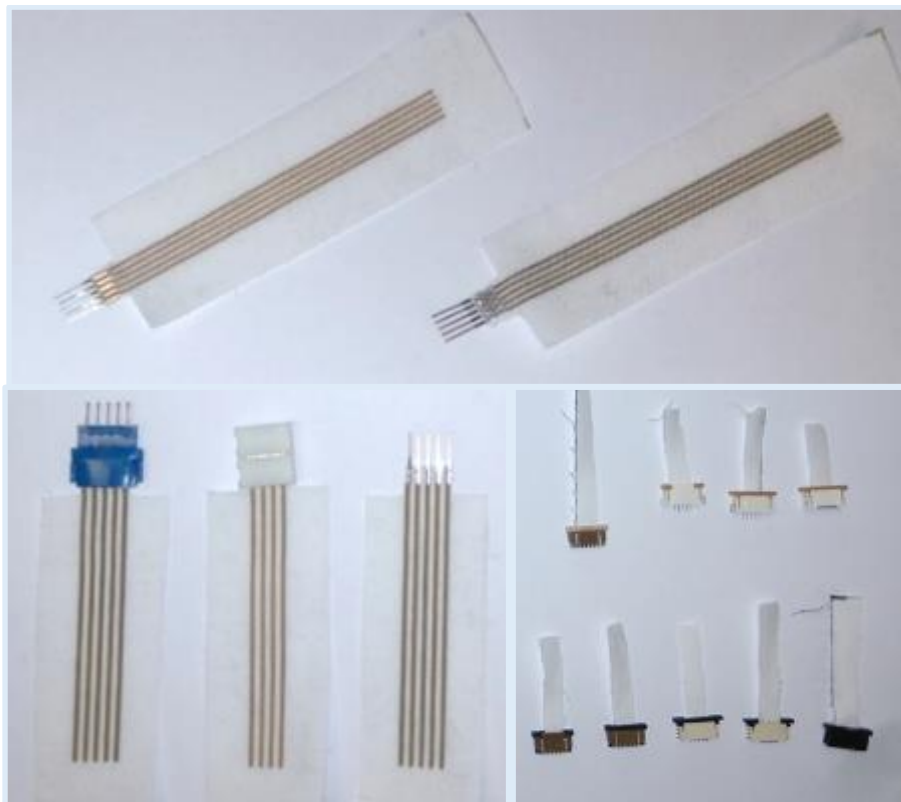


Figura 54. Ejemplos de probetas con distintos tipos de conectores integrados en sustratos textiles

Se ha medido la resistencia de contacto de las probetas fabricadas obteniendo en todos los casos valores inferiores a 1 mΩ.

### 3.4.1.4 SOLUCIONES DE CONEXIONADO DIRECTO

Otra solución de conexionado analizada consiste en la unión directa mediante adhesivo conductor de las dos partes conductoras: las pistas impresas en el sustrato elástico y el cable que emerge de la PCB rígida, sin necesidad de utilizar un conector. Esta solución presenta como ventaja las

menores dimensiones de la unión y menor coste, al evitar un componente adicional como es el conector. Como desventaja, es una solución menos robusta y estable frente a tensiones externas, y que además viene asociada a un incremento en la resistencia de contacto que no es viable en todas las aplicaciones. Otra desventaja es que una vez realizada la conexión ya no puede deshacerse, por lo que se dificulta la reparación o sustitución de partes dañadas del sistema si las hubiera.

Se ha incluido también en la tarea el estudio de soluciones de conexionado entre dos circuitos flexibles (flex-flex), que se requiere en algunos casos cuando el área del dispositivo es mayor que el área disponible en los equipos de trabajo. Al igual que en el caso anterior, se unen aquí directamente las pistas conductoras de dos sustratos flexibles aplicando adhesivo conductor elástico. La unión se puede reforzar posteriormente con un adhesivo dieléctrico. La siguiente figura muestra el depósito de adhesivo conductor en pistas sobre TPU y la superposición de pistas en el ensamblado.

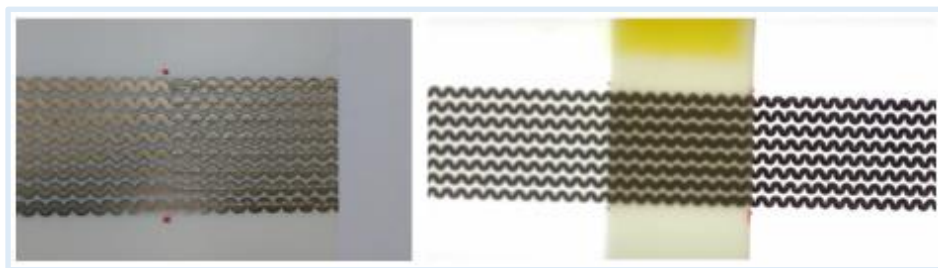


Figura 55. Conexión flex-flex de pistas conductoras con adhesivo conductor

### 3.4.2 Tarea 3.2. Optimización de procesos de laminado y troquelado

Esta tarea se centra en los procesos necesarios para la protección de los circuitos de posibles agresiones externas, mediante sistemas de laminado o encapsulado. Se estudia además el troquelado para separar los circuitos del sustrato original en la línea roll-to-roll y cortarlos a la medida requerida para su integración en el dispositivo wearable.

#### 3.4.2.1 SELECCIÓN DE MATERIALES Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE ENCAPSULADO

Para el laminado (o más en general, encapsulado) de los circuitos, se utilizan materiales poliméricos que actúan como barrera frente a la humedad, y además protegen mecánicamente los circuitos y componentes, por ejemplo, frente a tensiones externas que puedan producir despegue de componentes, rotura de los sustratos, arañazos, etc.

Se han analizado tanto encapsulantes líquidos, que se pueden dispensar mediante diferentes procesos disponibles en la línea R2R, como encapsulantes en forma de film, que se pueden laminar a los sustratos en la laminadora en línea mediante la aplicación simultánea de presión y temperatura.

Entre los encapsulantes líquidos, se han considerado materiales de curado térmico y curado ultravioleta, dispensables mediante serigrafía, pulverización o dispensado TPD (jeringa más válvula neumática). Se ha usado como requisito principal que presenten elasticidad una vez curados para

que puedan ser estirados o conformados junto con el resto de materiales del ensamble. Además, los materiales deben ofrecer una buena protección frente a agresiones externas.

Para cada uno de estos materiales líquidos se han optimizado los parámetros de proceso, obteniendo probetas que han superado satisfactoriamente la inspección visual, al estar libres de defectos como arrugas, burbujas o delaminaciones.

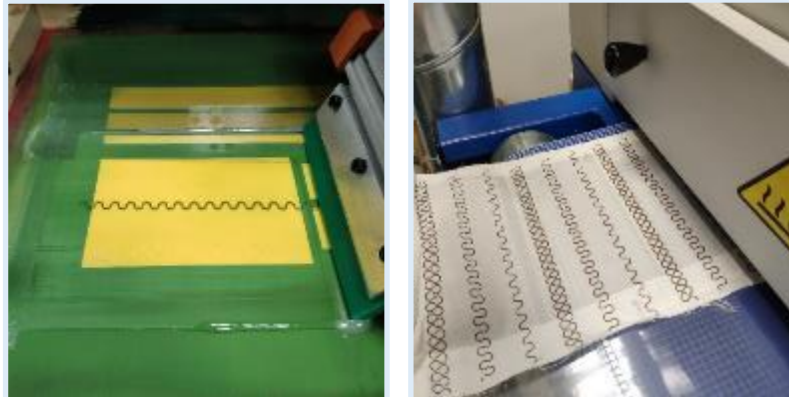


Figura 56. Encapsulado mediante recubrimiento serigráfico



Figura 57. Encapsulado mediante recubrimiento por spray

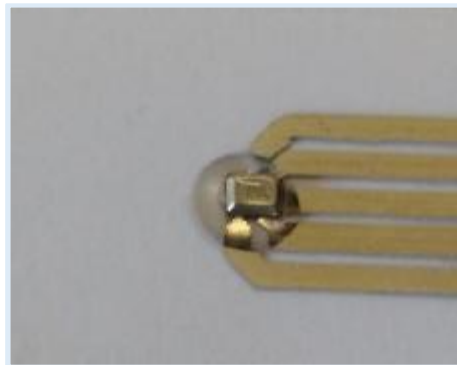


Figura 58. Dispensado con jeringa a presión de adhesivo globtop de curado ultravioleta

En el caso de uso de encapsulantes en forma de film que pueden ser laminados al sustrato, el film se lamina en la laminadora roll-to-roll disponible en IDONIAL, ajustando los parámetros de velocidad, temperatura y presión de los rodillos. En una primera etapa se ha desarrollado el proceso para laminar circuitos sin componentes, formados únicamente por pistas conductoras. Seguidamente se han introducido circuitos con componentes observando que la presión de los rodillos es adecuada para hacer que el film se ajuste al sustrato en toda la superficie y al mismo tiempo no dañar los componentes, que siguen operativos tras el laminado.



Figura 59. Laminado de films protectores

### 3.4.2.2 OPTIMIZACIÓN DE PROCESO DE TROQUELADO

Finalmente, se ha puesto en marcha el proceso de troquelado en la línea R2R. Para ello se ha diseñado y fabricado un útil con forma de plancha y rectángulo de esquinas redondeadas en relieve para el corte de distintos sustratos. El útil se adhiere al cilindro magnético y se regula la presión entre los cilindros de corte y soporte así como la velocidad de la línea. En la Figura 60 puede observarse el equipo de troquelado integrado en la línea R2R así como un detalle del útil integrado en el equipo.

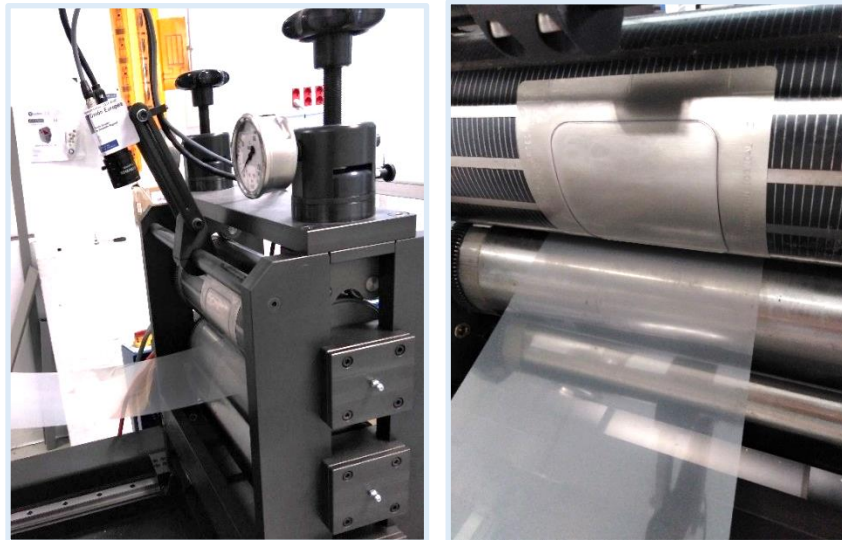


Figura 60. Equipo para troquelado integrado en línea R2R y detalle de útil diseñado y fabricado para el corte de probetas rectangulares

### 3.4.3 Tarea 3.3. Adaptación de procesos de fabricación circuitos elásticos para termoconformado

El termoconformado es el proceso que permitirá integrar circuitos flexibles sobre superficies rígidas. En este proceso, el circuito, con un diseño inicialmente plano, es deformado para adaptarse a una superficie rígida que presenta un relieve más o menos complejo, pasando de ser una superficie 2D a una superficie 2.5D (superficie libre en el espacio 3D). Si no se considera esta adaptación en la fase de diseño, pueden producirse roturas en el trazado de pistas o el despegado de componentes. Por otro lado, el proceso de termoconformado aplica condiciones de temperatura y presión sobre el circuito que éste debe soportar, y por tanto los procesos y materiales utilizados en la fabricación del circuito deben ser seleccionados y ajustados para fabricar un circuito que soporte dichas condiciones. Además, es necesario que los materiales utilizados sean termoconformables, es decir que mediante la aplicación de calor y presión puedan cambiar su forma permanentemente.

En esta tarea se han analizado los materiales y diseños necesarios para la fabricación de circuitos conformables así como los parámetros de proceso más adecuados y se han fabricado probetas que posteriormente se han termoconformado en la tarea 3.4.

Esta tarea se realiza en paralelo con la tarea 3.4, pues los materiales seleccionados para el termoconformado se evalúan como sustrato de impresión y las impresiones aquí realizadas se evalúan para el termoconformado, de modo que se ha mantenido una comunicación directa y constante entre los equipos de trabajo de ambas tareas.

#### 3.4.3.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

En primer lugar se ha realizado un estudio de materiales para el proceso de termoconformado. La bibliografía indica que el material óptimo es el poliestireno. Otros materiales que pueden resultar adecuados son el ABS y el policarbonato. Se han adquirido láminas de estos tres materiales (poliestireno, ABS y policarbonato) con diferentes espesores para la realización de pruebas.

### 3.4.3.2 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE IMPRESIÓN Y SINTERIZADO

Una vez adquiridos estos materiales, se han realizado impresiones de patrones y circuitos con la impresora ink-jet directamente sobre estos sustratos. En todos los casos la impresión se puede realizar adecuadamente, aunque se observa la formación de bordes poco definidos en algunos casos, lo que indica una dispersión excesiva de la tinta sobre la lámina. El efecto se puede reducir parcialmente con el ajuste de los parámetros del proceso de impresión ink-jet (función de onda, distancia entre cabezales y sustrato, temperaturas de cartucho y mesa).

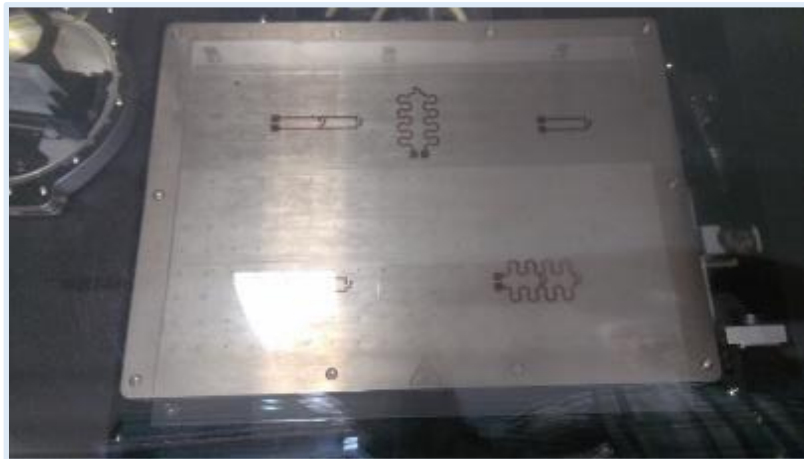


Figura 61. Impresión ink-jet de circuitos probeta sobre sustrato policarbonato transparente

El sinterizado de la tinta sobre estos materiales es complejo, ya que todos presentan una temperatura de transición vítrea similar a las temperaturas de sinterizado. Esto implica que el sinterizado puede producir deformaciones importantes en el sustrato, que posteriormente pueden dificultar el conformado, sobre todo si se alcanzan temperaturas superiores a las temperaturas objetivo en el control del horno, como ocurre en ocasiones durante la rampa inicial de calentamiento.

Se han aplicado dos soluciones simultáneas para el proceso del curado, obteniendo así resultados satisfactorios:

- Por un lado se ha utilizado un marco metálico que mantiene en su posición los bordes del sustrato durante el sinterizado, evitando que se eleven o deformen estos bordes



Figura 62. Sinterizado de circuitos impresos sobre policarbonato y sobre ABS

- Por otro lado se ha trabajado en conseguir un mayor control de la temperatura para evitar el sobrepaso sobre la temperatura objetivo del sinterizado que es de 120°C. Para evitar este sobrepaso se realizan dos acciones, primero se modifica el perfil de modo que una fase de precalentamiento tiene por objetivo alcanzar 110°C en lugar de 120°C. Con solo esta acción, partiendo de una baja temperatura sigue produciéndose el sobrepaso aunque con menor temperatura de pico. La segunda acción es lanzar el perfil de temperatura con el horno vacío, para mantener este en 120°C aproximadamente, y en el momento de introducir el sustrato y comenzar el sinterizado conseguir partir de una temperatura inicial más próxima al objetivo. La Figura 63 muestra el resultado obtenido en el control, con una temperatura en la zona central entre 115 y 125 grados y temperaturas máximas en los laterales menores de 135 grados.

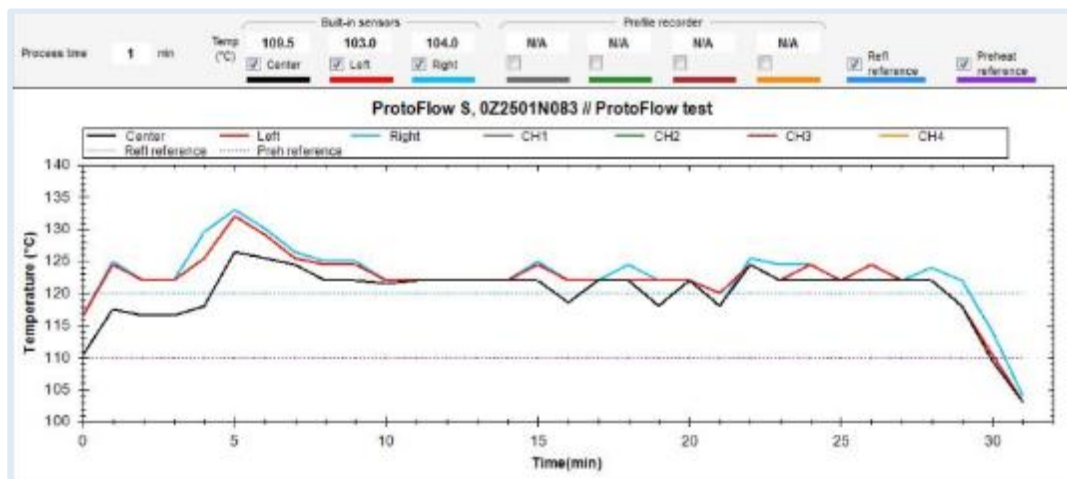


Figura 63. Perfil de sinterizado con temperatura inicial próxima al objetivo y temperatura central con bajo sobrepaso

Cuando el proceso es realizado con el horno en la línea piloto, el horno mantiene constantemente la temperatura objetivo, sin pérdidas o cambios al introducir y sacar el sustrato. De esta forma obtenemos una menor deformación, utilizando aun así la lámina metálica que evita la deformación de los bordes del sustrato



Figura 64. Ejemplo de impresión sobre ABS mostrando una ligera deformación tras el sinterizado

### 3.4.3.3 REGLAS DE DISEÑO

El principal elemento a tener en cuenta en el diseño para el termoconformado de cualquier circuito es la posición relativa entre el circuito y los moldes. Es necesario realizar un ajuste de la posición del circuito y la posición del molde, para que la posición final del circuito en la pieza sea la deseada. Para ello pueden utilizarse marcas fiduciales que permitan la alineación de la lámina a conformar y los moldes.

Los circuitos deben diseñarse teniendo en cuenta su posición sobre cada pieza. Se han aplicado para ello algunas de las reglas de diseño utilizadas en el diseño de circuitos elásticos.

- Se han diseñado los circuitos con pistas de anchura 1mm, de modo que el posible estiramiento pronunciado en ciertas zonas no expanda todo el ancho de pista, permaneciendo zonas planas con mejor conductividad.
- Se han diseñado pistas con meandros para proporcionar mayor conductividad en el estiramiento por termoconformado cuando el radio de curvatura es pequeño.
- La situación de los componentes electrónicos de estos circuitos debe coincidir con áreas planeas o de poca curvatura.
- La situación de conectores de los circuitos debe estar alejada de zonas de curvaturas angulares y convexas que puedan impedir o dificultar el conexionado de cableado externo.
- Cuando sea posible, se orientarán los componentes en el circuito de modo que la dirección de mayor dimensión del componente coincida con la dirección de menor curvatura. Esto favorece que no se desprende el componente.

La siguiente figura muestra el diseño con la incorporación de circuitos. Se trata de circuitos sencillos de uno o dos LEDs con sus respectivas resistencias de limitación de corriente. Las áreas rectangulares son para un contacto directo con cables de alimentación y para la comprobación de conductividad, y también para la fijación de conectores de alimentación de los circuitos.

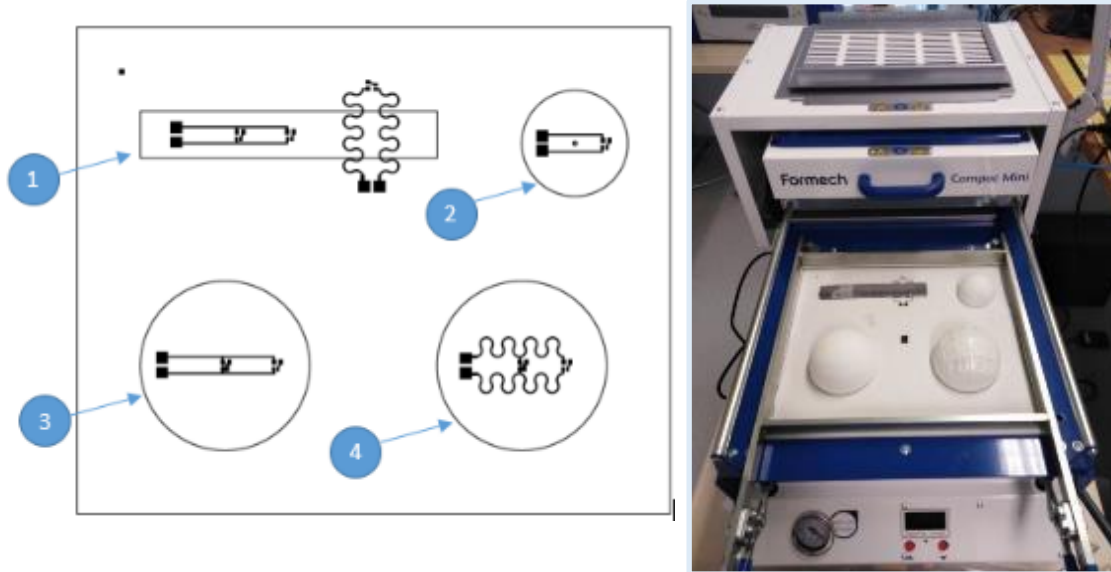


Figura 65. Plantilla impresa de colocación de moldes en la plancha de la termoconformadora. 1. Cilindro, 2. Esfera de 50 mm lisa 3. Esfera de 80 mm cuadrados negativos 4. Esfera de 80 mm lisa.

En cuanto a las deformaciones a sufrir por las pistas, el ensayo experimental resulta más adecuado que la simulación teórica de las deformaciones, ya que estas dependen no sólo de la geometría del molde y disposición de las pistas, sino también de las propiedades de los materiales y parámetros de proceso (tiempo y temperatura de calentamiento). Una simulación realista de este proceso sería un proyecto en sí mismo.

#### 3.4.3.4 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Teniendo en cuenta lo aprendido se han fabricado una serie de probetas para su posterior termoconformado. Se han incluido también en algunas de ellas componentes (LEDs, resistencias) pegados con adhesivos conductores y conectores externos para su alimentación. Los resultados pueden observarse en la Figura 66 y la Figura 67.



Figura 66. Ejemplos de probetas de circuitos impresos sobre distintos materiales (de izquierda a derecha poliestireno, policarbonato y ABS) para su posterior termoconformado

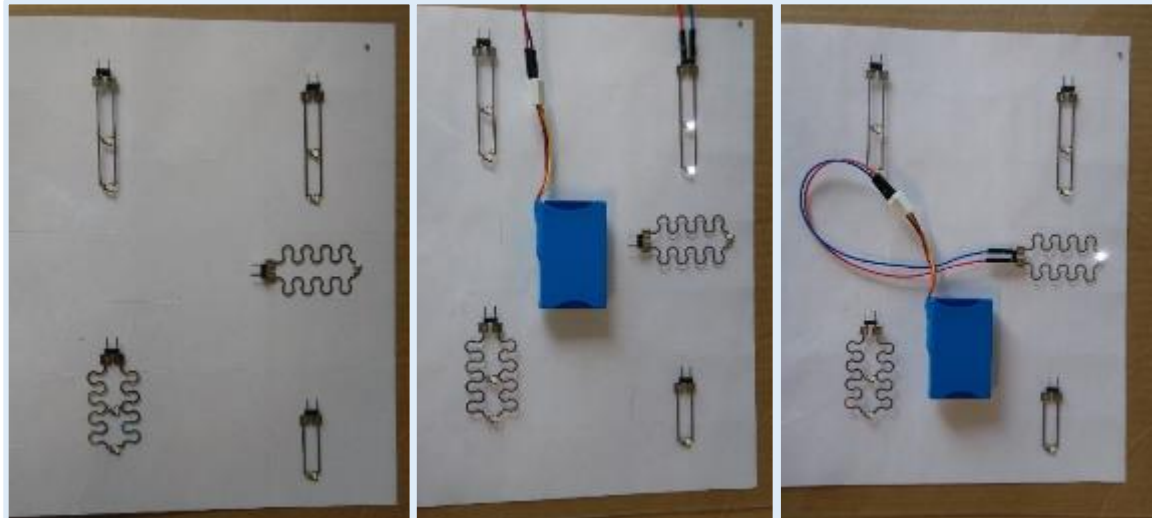


Figura 67. Probeta sobre policarbonato incluyendo LEDs y conectores externos

### 3.4.4 Tarea 3.4. Termoconformado y pruebas de concepto

En esta tarea se ha desarrollado un proceso de termoconformado para la deformación de circuitos elásticos. En primer lugar se ha estudiado el proceso de termoconformado con distintos conjuntos de materiales y se han optimizado los parámetros de proceso en todos los casos. A continuación se han desarrollado diferentes moldes y se ha estudiado la influencia de la geometría del molde en el proceso de conformado. En la siguiente fase, se han introducido circuitos electrónicos en el equipo de conformado con distintas configuraciones, llevando a cabo un análisis de deformaciones.

#### 3.4.4.1 ANÁLISIS DE PROCESO E INFLUENCIA DEL TIPO DE MATERIAL

Se ha analizado el proceso de termocoformado y el papel de los parámetros de proceso. El equipo utilizado es una termoconformadora de sobremesa Fromech Compaq disponible en IDONIAL. Se ha adquirido como utillaje una ventana reductora para poder procesar materiales de menores dimensiones para el estudio del proceso y la fabricación de probetas.

El proceso se basa en dar forma a una lámina plástica por medio de calor (120 °C a 180 °C) y vacío (600 a 760 mmHg) utilizando un molde con la geometría deseada.

El proceso consta de las siguientes fases:

- *Calentamiento.* En primer lugar se aplica calor al material a conformar utilizando una fuente de infrarrojos. Con el fin de conseguir unos resultados de termoformado óptimos y utilizando cualquier material, es esencial que la lámina se caliente de manera uniforme en toda su superficie y grosor. El equipo utilizado cuenta con calentadores de cuarzo cuya masa térmica es menor que las de los calentadores cerámicos convencionales, lo que hace que el tiempo de respuesta y la homogeneidad sean mayores. El tiempo de calentamiento se debe ajustar en función del tipo de material y su espesor.
- *Moldeo.* Una vez que el material ha alcanzado el estado plástico se puede aplicar el vacío para proceder al formado de la lámina. De este modo se expulsa el aire existente entre la lámina y el molde mediante una bomba de vacío en seco. La bomba de vacío debe ser capaz de mantener una presión diferencial de aproximadamente 27 pulgadas de mercurio. Al

mismo tiempo se separa la lámina de la fuente de calor para iniciar el proceso de solidificación del material.

- *Enfriamiento y desmoldeo.* Una vez baja la temperatura se retira el vacío y se extrae de la máquina la lámina conformada junto con el molde. Posteriormente una vez enfriado totalmente se procede a separar la lámina conformada del molde de forma manual.

El parámetro principal a controlar en el proceso es el tiempo de calentamiento. Cuando el tiempo de calentamiento es excesivo se produce descolgamiento del material antes de poner la lámina en contacto con el molde, lo que produce pliegues y defectos en la pieza, además de una superficie rugosa similar a la piel de naranja. Por otro lado, si el tiempo es demasiado bajo la lámina no podrá conformarse, y si el vacío no es suficiente la pieza no tendrá suficientes detalles definidos. En la Figura 68 se muestra un ejemplo de optimización de proceso con una lámina de poliestireno de 1.5 mm.

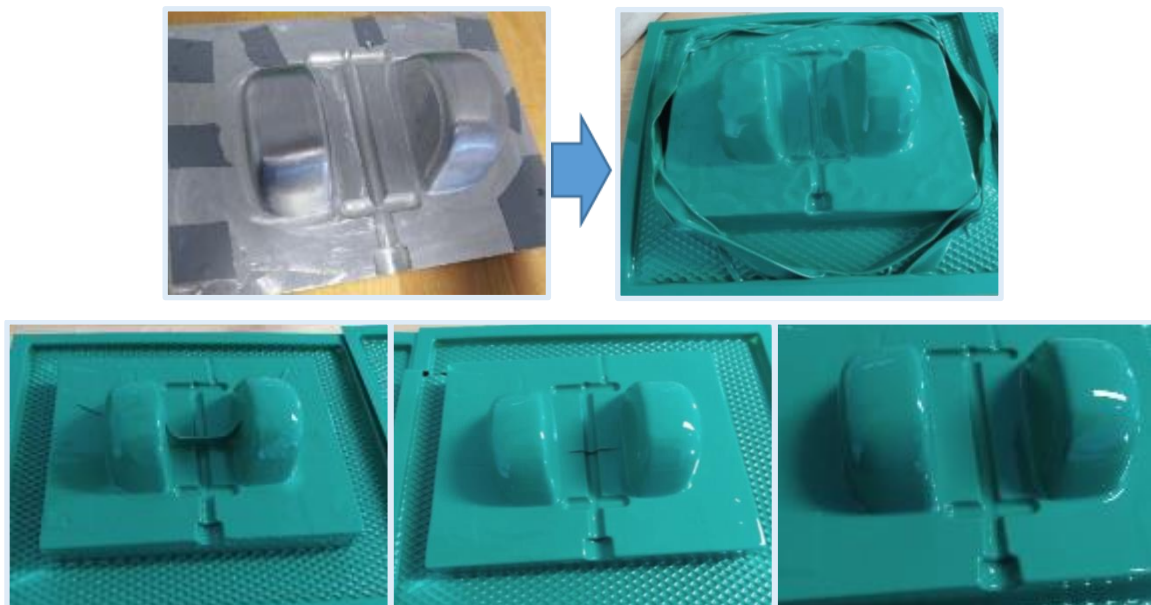


Figura 68. Optimización de proceso de conformado

#### 3.4.4.2 INFLUENCIA DEL MOLDE

Se ha analizado la influencia de la geometría del molde en el proceso de conformado. Se han diseñado para ello varios moldes con geometrías sencillas y se han fabricado en poliamida por fabricación aditiva.

Una restricción característica del proceso de termoconformado es que la pieza debe ser desmoldable, lo que implica que los moldes deben ser más anchos en la base y más estrechos en la parte superior. Esta diferencia forma lo que se denomina el ángulo de desmoldeo o de salida, que debe ser de 3 grados como mínimo. Los moldes no deben tener zonas afiladas que puedan cortar el material y deben contar con orificios de ventilación en las superficies más difíciles de desmoldear.

Por otro lado, es necesario correlacionar la geometría del molde con el espesor de la lámina a utilizar. Cuando el material tiene poco espesor los moldes han de tener poca profundidad, pues de otro modo el material al estirarse puede llegar a romperse.

Se ha estudiado también la realización de moldes con diferentes texturas para analizar la capacidad del proceso de replicar pequeños detalles. Los moldes se han diseñado en Solid Works con diferentes tamaños y patrones, y se han fabricado en poliamida por fabricación aditiva (Figura 69). El espesor de los moldes es de 3 mm en las esferas lisas y entre 1 y 3 mm en las texturizadas.



Figura 69. Moldes fabricados en poliamida

Se analiza el proceso de termoconformado con estos moldes utilizando los materiales seleccionados anteriormente. Los resultados son satisfactorios aunque se obtiene una ligera deformación en las zonas de bajo relieve de los moldes, lo que hace que también las piezas conformadas sufran deformaciones. Se observan además algunas dificultades en el desmoldeo de la pieza. Tras estas pruebas se concluye que los moldes deben tener un espesor mínimo de 3 mm en todas las zonas, y que sería conveniente que contaran con piezas de agarre para facilitar el desmoldeo manual.

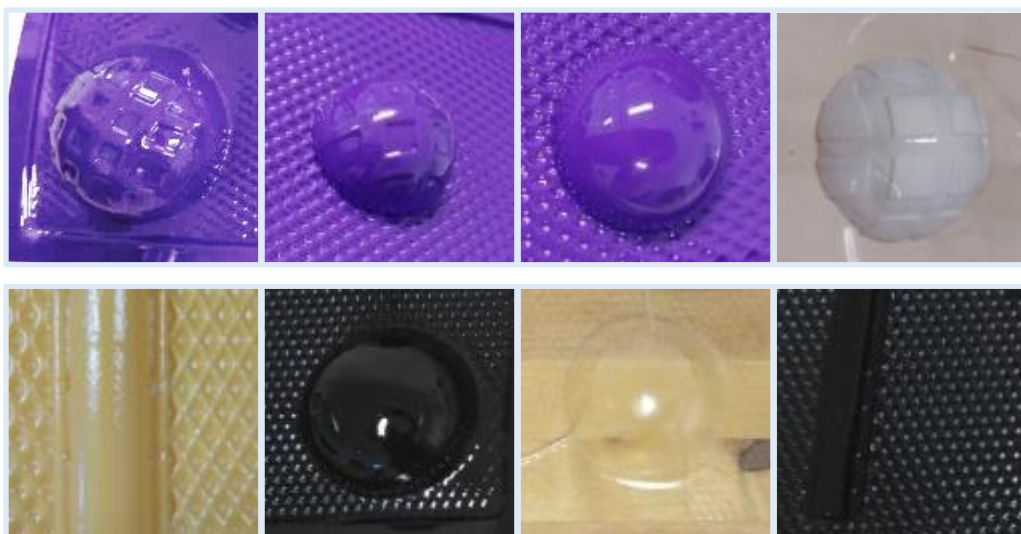


Figura 70. Ejemplos de piezas fabricadas con distintas texturas de molde y materiales

Para el análisis de deformaciones se ha impreso sobre una lámina conformable una cuadrícula que permitirá posteriormente analizar las desviaciones esperadas en un circuito impreso. Los resultados se muestran en la Figura 71. Se observa que la deformación no tiene lugar únicamente en la zona de la lámina en contacto con el molde si no en prácticamente la totalidad de la misma. Por otro lado, al realizar varias pruebas se concluye que las deformaciones no son siempre iguales si no que van a depender del espesor del material y el tiempo de calentamiento.

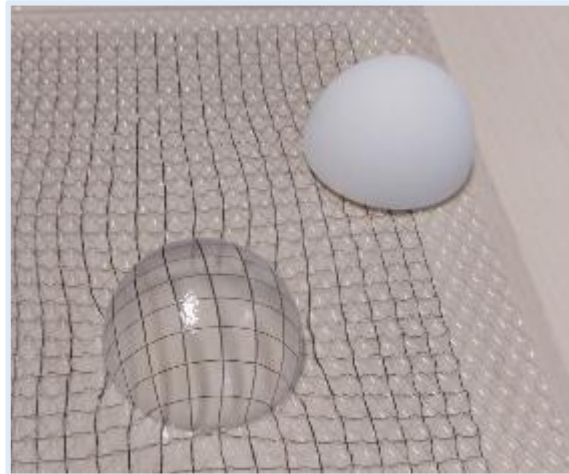


Figura 71. Análisis de deformaciones con lámina de policarbonato y molde esférico

#### 3.4.4.3 DESARROLLO DE PROCESO DE TERMOCONFORMADO DE CIRCUITOS IMPRESOS

Se fabrican diferentes probetas que incluyen circuitos impresos sencillos, preparados en la tarea 3.3. Los resultados en láminas de policarbonato impreso, mostrados en la Figura 72, son satisfactorios aunque únicamente para films con espesor de 1 mm o más. En los otros casos el material presenta un espesor demasiado fino por lo que las piezas conformadas no tienen suficiente robustez mecánica para la mayoría de las aplicaciones.



Figura 72. Termoconformado de circuitos sobre policarbonato

Con las impresiones realizadas en poliestireno y en ABS los resultados son óptimos. Se ha llevado cabo satisfactoriamente el conformado de piezas con pequeños circuitos que incluyen pistas conductoras, tal y como se muestra en la Figura 73 y la Figura 74.

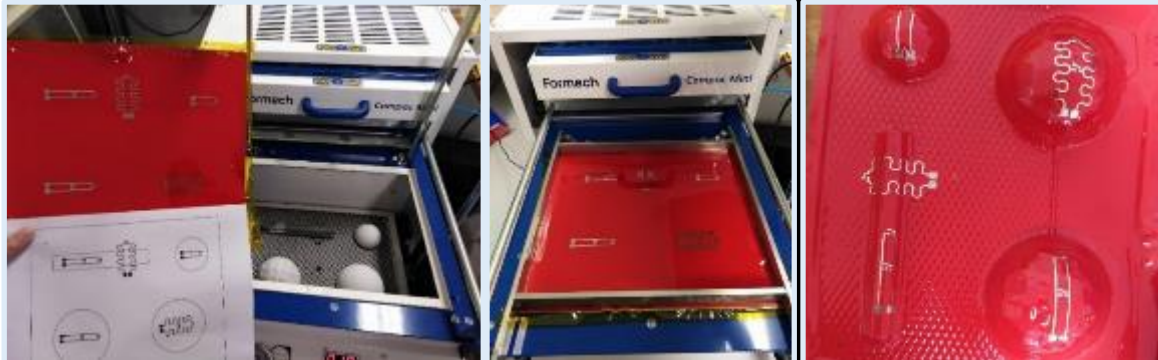


Figura 73. Termoconformado de circuitos sobre poliestireno



Figura 74. Termoconformado de circuitos sobre ABS

Finalmente, se ha procedido a conformar circuitos que incluyen también pequeños componentes electrónicos adheridos mediante adhesivo conductor al sustrato, y no únicamente pistas conductoras. En concreto, se han utilizado circuitos con LEDs, resistencias y conectores. Los resultados de estos demostradores pueden observarse en la Figura 75.

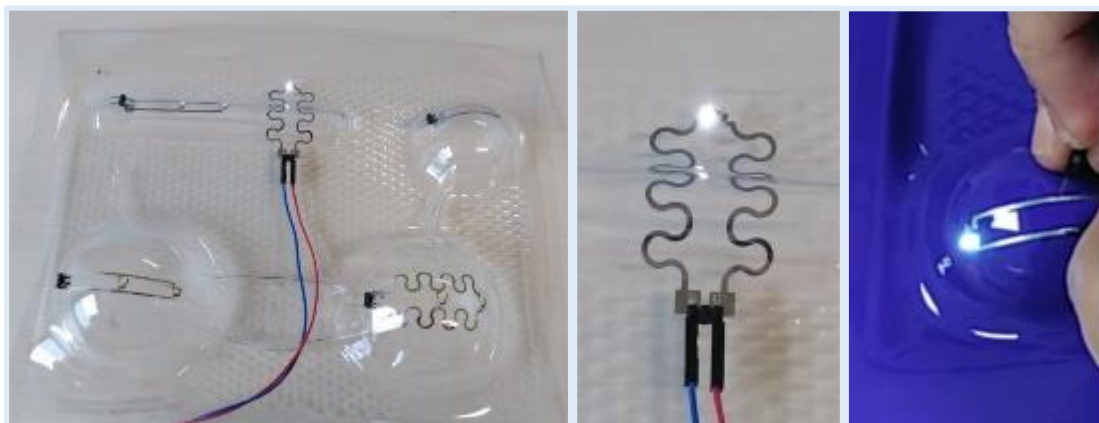


Figura 75. Termoconformado de circuitos con componentes electrónicos

### 3.5 HITO 4. DEMOSTRADORES DE WEARABLES TEXTILES

Una vez que en los hitos anteriores se han adaptado y mejorado los procesos para la fabricación de circuitos sobre sustratos elásticos y su integración, en este hito se ha procedido a diseñar y fabricar dos prototipos demostradores de acuerdo a los diseños conceptuales desarrollados en el Hito 1. Los dos demostradores a desarrollar son:

- *Demo 1: SMART ARM.* Se trata de un dispositivo para monitorizar el movimiento humano, en concreto la trayectoria de un brazo, a implementar sobre sustrato flexible. La aplicación principal en el sector salud es la de la rehabilitación de pacientes tras traumatismos o accidentes cardiovasculares. El sistema es capaz de detectar las trayectorias del brazo y avisar al usuario si se producen desviaciones respecto a las pautas marcadas por un especialista.
- *Demo 3. HMITEXT.* Se centra en la integración de botoneras táctiles en textiles, para el control de distintos equipos que podrían ser portados por el usuario o bien externos, con aplicación por ejemplo como equipo para interacción hombre-máquina.

#### 3.5.1 Tarea 4.1. Diseño mecánico de detalle

En esta tarea se realiza el diseño de elementos mecánicos de los demostradores, así como de la integración de la electrónica sobre la prenda, incluyendo la definición del medio de fijación del circuito elástico a la prenda.

Para ambos demostradores, la fase de diseño mecánico se inicia en el análisis del diseño conceptual realizado en la primera anualidad del proyecto. Se decide seleccionar prendas comerciales en las que integrar los wearables, en lugar de confeccionarlas en su totalidad. De este modo el resultado tiene una apariencia más profesional y se ahorran recursos en la confección del wearable.

##### 3.5.1.1 DISEÑO DEL DEMOSTRADOR SMART ARM

La tarea se inicia con la selección de un textil comercial tipo manga que incluya tanto zona del brazo como zona del antebrazo para poder monitorizar el movimiento relativo entre ambas partes.

Para realizar el diseño del wearable sobre esta prenda, existen dos opciones. Por un lado, se puede intentar obtener una ocultación total del circuito; por otro, se puede presentar la electrónica de una forma vistosa y con una estética agradable. Se ha optado por esta segunda vía, ya que si se ocultan en exceso los componentes electrónicos los prototipos son menos efectivos como demostradores visuales de las tecnologías empleadas.

El diseño mecánico se realiza en paralelo con el diseño electrónico, y requiere como inputs las dimensiones y volúmenes de los componentes electrónicos a integrar en el wearable. A su vez, el equipo de trabajo de diseño mecánico impone restricciones y criterios que se deben tener en cuenta durante el diseño electrónico. Es por ello que ambos equipos de desarrollo han trabajado en constante comunicación y realizándose varios bucles de diseño durante la ejecución de estas tareas.

Para el demostrador SMART ARM se ha realizado una búsqueda de mangas textiles para deporte, seleccionando varias en distintos tejidos y tamaños. Este tipo de mangas se utilizan para la

realización de deportes aportando calor y/o compresión. Están fabricadas en tejidos técnicos de gran elasticidad y transpirabilidad.



Figura 76. Mangas textiles seleccionadas para SMART ARM

Además del soporte de la manga textil, el demostrador SMARTARM incluye los siguientes elementos:

- Electrónica para control del movimiento de la muñeca. Placa de pequeñas dimensiones conteniendo un acelerómetro.
- Electrónica para control del movimiento del hombro y electrónica de potencia. Placa de dimensiones ligeramente superiores, donde además de acelerómetro se incluye batería y microprocesador como elementos principales.
- Pistas de conexión impresas sobre sustrato elástico. Se ha optado por utilizar un sustrato polimérico elástico como el poliuretano.
- Conectores en ambos extremos del film con pistas impresas para conectar a las placas electrónicas.
- Envoltentes para alojar ambas placas electrónicas. Han de ser diseñadas con las dimensiones mínimas que puedan alojar la electrónica.

Se ha diseñado el trazado de pistas conductoras que unirán ambas placas de circuito, y que serán impresas sobre sustrato elástico. Para evaluar la conexión directa entre tramos de pistas impresas, este elemento de conexión estará formado por la unión de dos tramos, impresos según el diseño que se muestra a continuación y que está formado por ocho pistas paralelas formadas por meandros de diámetro aproximado de 1,2mm y pistas de 1mm de ancho. La longitud de cada tramo es de 281mm.

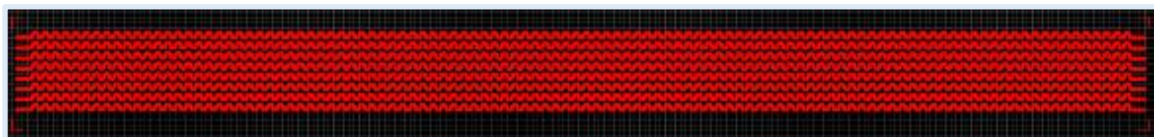


Figura 77. Diseño de pistas para la conexión de placas del demostrador

Para el diseño de las envolventes se utiliza el diseño CAD de las placas electrónicas que han de integrarse en el demostrador, con los conectores seleccionados. Teniendo en cuenta estos volúmenes, y todos los orificios que ha de llevar la envolvente para el paso de los distintos conectores, se diseñan las envolventes mostradas en las siguientes imágenes.

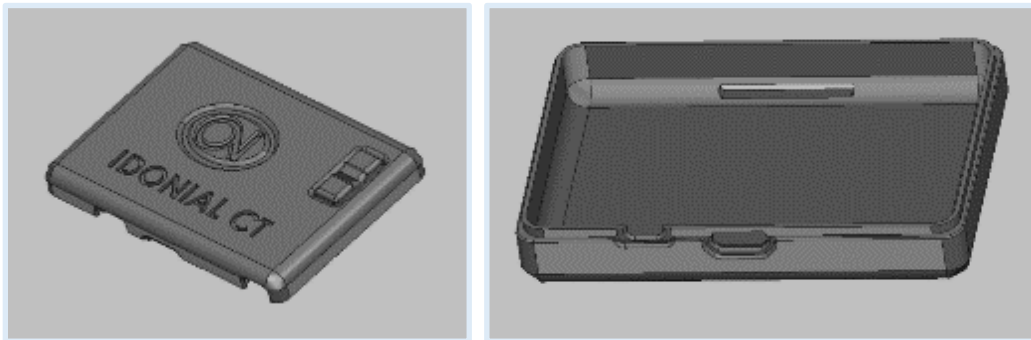


Figura 78. Diseño CAD 3D de envolvente para placa electrónica SHOULDER del demostrador SMART ARM

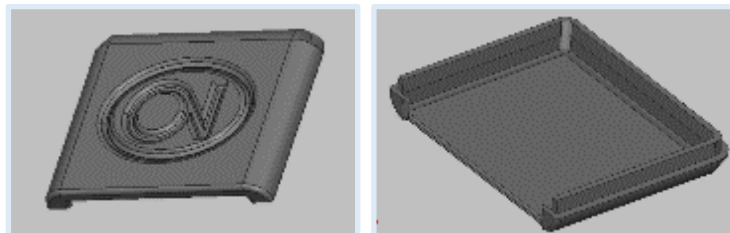


Figura 79. Diseño CAD 3D de envolvente para placa electrónica WRIST del demostrador SMART ARM

El diseño mecánico se centra finalmente en el posicionamiento de los distintos componentes en el textil.

La posición de los acelerómetros ha de ser la adecuada para poder medir trayectorias que puedan ser interpretadas adecuadamente en el software del demostrador, pero el posicionamiento exacto no es crítico. Además, se persigue la comodidad del usuario que utilice la manga SMART ARM durante por ejemplo una secuencia de entrenamiento terapéutico.

Teniendo en cuenta estos factores se realiza finalmente el CAD 3D completo con el diseño del demostrador que se muestra en la Figura 101.

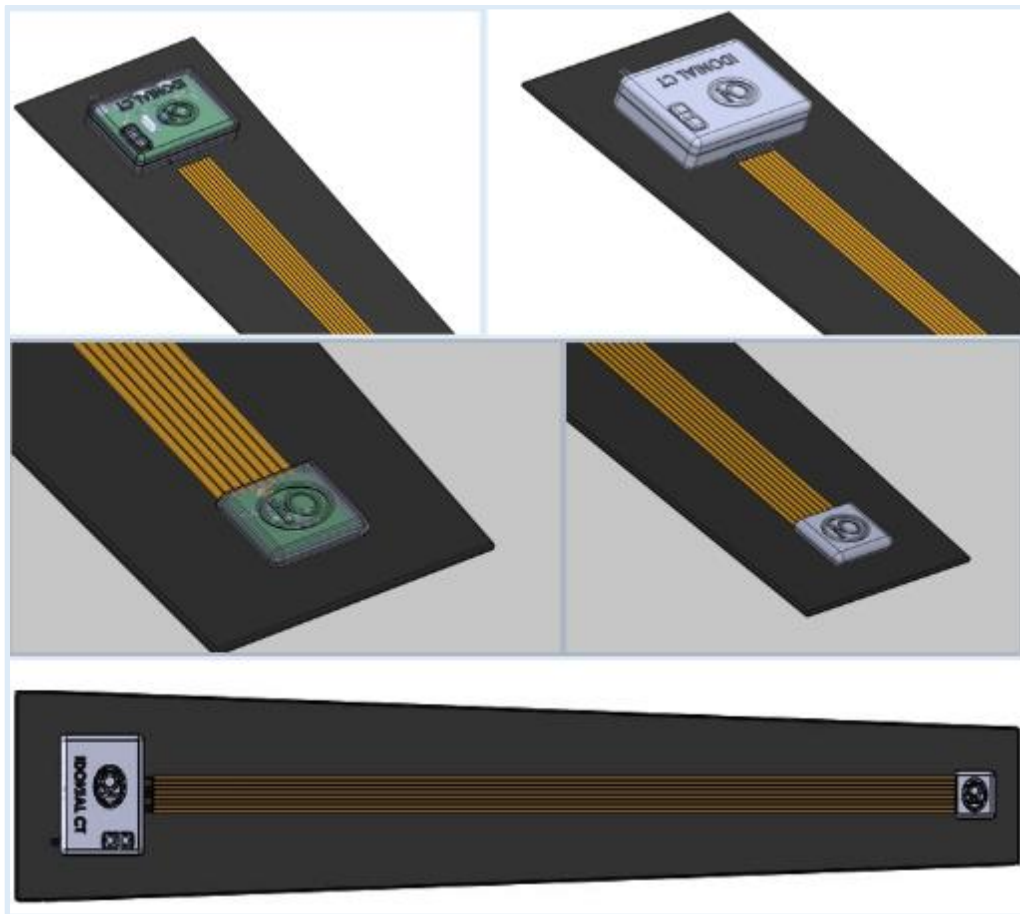


Figura 80. Diseño de detalle del demostrador SMART ARM

De cara a la integración final de los componentes en la prenda, se elige la opción de laminado de la pista impresa a la manga, y el pegado de las envolventes mediante adhesivo.

### 3.5.1.2 DISEÑO MECÁNICO DEL DEMOSTRADOR HMITEXT

Al igual que en el caso anterior, la tarea se inicia con la selección de un textil comercial, en este caso una chaqueta de trabajo.

Se ha optado también en este caso por mostrar la mayor parte posible de componentes para que los demostradores puedan hacer ver el funcionamiento de una forma más clara, aun teniendo en cuenta que en un producto más cercano a mercado es preferible ocultar los componentes electrónicos para dotarles así de una mayor protección frente al desgaste.

El diseño mecánico se realiza en paralelo con el diseño electrónico y de forma iterativa. En concreto para el caso de los pulsadores se realizaron varios diseños y en distintos materiales para lograr la solución deseada con un nivel máximo de integración en la chaqueta.

Para la selección de una chaqueta comercial en la que integrar el demostrador, se ha buscado una chaqueta representativa de varias profesiones, siendo de alta visibilidad, con costuras selladas, varias capas de abrigo y un bolsillo interior para el teléfono.



Figura 81. Prenda comercial seleccionada como soporte para el demostrador HMITEXT

El diseño final del demostrador HMITEXT incluye los siguientes elementos además del soporte de la chaqueta de trabajo:

- Circuito de interacción impreso con pulsadores capacitivos y LEDs
- Electrónica de control y procesado. Realiza la conexión para la alimentación y transmisión, y el acondicionamiento de señales. Estará integrada en la prenda por el interior.
- Dispositivo externo capaz de comunicarse con el wearable. Se ha seleccionado un móvil con conector USB tipo C que permita también la alimentación del wearable.
- Conector para los circuitos electrónicos. Se ha optado por utilizar un cable plano ya que en este caso la chaqueta tiene un grosor considerable con múltiples capas por lo que hay espacio suficiente para alojar el cable, que además va oculto.

Se ha diseñado el circuito de interacción para realizar una detección capacitiva de la pulsación, integrando dos zonas táctiles. El diseño es para una impresión en sustrato flexible, por lo que se ampliaron el ancho de las pistas y la longitud de los tramos de conexión.

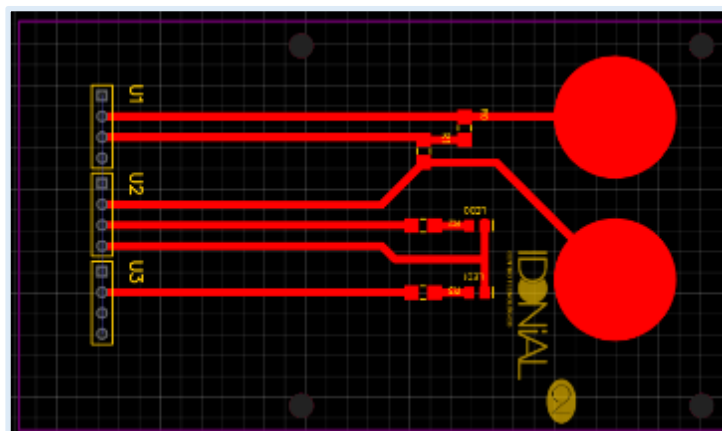


Figura 82. Diseño de circuito de interacción

Finalmente, se ha llevado a cabo el diseño mecánico de detalle del demostrador teniendo en cuenta la posición de cada elemento en el wearable. La posición de los pulsadores se selecciona teniendo

en cuenta aspectos ergonómicos que permitan el pulsado de los mismos con la realización de un movimiento natural del brazo derecho hacia el brazo izquierdo. Se ha optado por dejar vistos los pulsadores capacitivos aunque se comprueba su correcto funcionamiento por debajo de la tela exterior de la chaqueta. El diseño final se muestra en la Figura 108.



Figura 83. Diseño de detalle del demostrador HMITEXT

De cara a la integración, se laminará el circuito impreso directamente sobre el tejido externo de la chaqueta, realizando un corte en la misma para permitir el paso de parte del circuito y su conexión al cable interno que a su vez estará conectado al dispositivo externo de control (móvil).

### 3.5.2 Tarea 4.2. Diseño electrónico de detalle

En esta tarea se realiza el diseño electrónico de los circuitos que forman los demostradores. Se parte del diseño conceptual electrónico realizado en la tarea 1.3 en la que se han establecido los bloques constituyentes.

#### 3.5.2.1 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL DEMOSTRADOR SMART ARM

El demostrador SMART ARM está formado por una placa de control situada en la zona del hombro, y una placa auxiliar situada en la muñeca, unidas por pistas conductoras sobre sustrato textil.

En la placa auxiliar se emplea un acelerómetro para estimar la orientación de la muñeca, tres LEDs (dos rojos y uno verde) para la interacción con el usuario y un conector que permite alimentar los componentes electrónicos y comunicarse con la placa de control.

La placa de control integra otro acelerómetro para estimar la orientación de dicha placa que será alojada en el antebrazo. La "inteligencia" del sistema se implementa en un ATmega328P. Esta placa se puede alimentar desde el conector microUSB a 5V o bien desde la batería que lleva incorporada. Desde dicho conector USB también se puede realizar la carga de la batería a través del gestor. La alimentación de los elementos electrónicos es a 3,3 V por lo que se agrega a la placa un regulador de tensión para obtener esta tensión de alimentación. Para permitir encender/apagar el dispositivo se añade un interruptor que permite cortar la alimentación de las placas. Además, para la interacción con el usuario, se han añadido un par de botones y un zumbador. Finalmente, al igual que en la placa auxiliar se utiliza un conector estándar de ocho elementos separados 2.54 mm para

comunicarse con la placa auxiliar y también tiene un conector de dos elementos para una salida UART. El circuito también posee un conector para permitir la programación del microcontrolador incorporado. En la siguiente figura se muestran los diseños de detalle realizados.

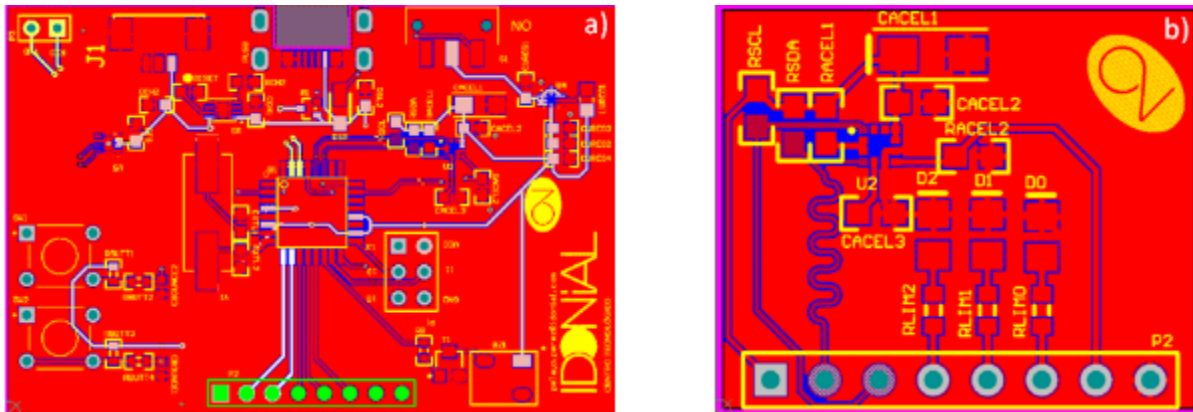


Figura 84. PCBs diseñadas para el dispositivo SMART ARM, a) Placa de control y b) Placa auxiliar.

### 3.5.2.2 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL DEMOSTRADOR HMITEXT

Este dispositivo consta de una placa de control, que lleva a cabo la comunicación con un teléfono móvil, y un circuito de interacción con el usuario, en el cual se encuentran los botones y varios LEDs de aviso.

La placa de control consta de dos conectores: Un conector tipo USB-C que permite que el dispositivo al que se conecte alimente la placa de control y no se necesite disponer de una batería o una conexión a una fuente de alimentación. El otro conector, formado por tres conectores estándar de cuatro pines con separación de 2,54 mm entre pines, es necesario para conectar las señales de la placa de control con el circuito de interacción empleando.

La “inteligencia” de la placa de control se implementa en un microcontrolador ATtiny y la adaptación de señales para la comunicación con el móvil u otro dispositivo USB se lleva a cabo a través de un integrado FTDI. Además, en dicha placa se añade un conector para permitir la programación del microcontrolador de la placa.

El circuito de interacción, realizado sobre sustrato elástico integrado en textil, consta de un par de botones capacitivos y un par de LEDs de bajo consumo, uno verde y otro rojo. Su diseño es el mostrado en la figura 82.

En la siguiente figura se muestran los diseños de detalle realizados en su primera versión, incluyendo una versión de circuito de interacción para su fabricación en PCB.

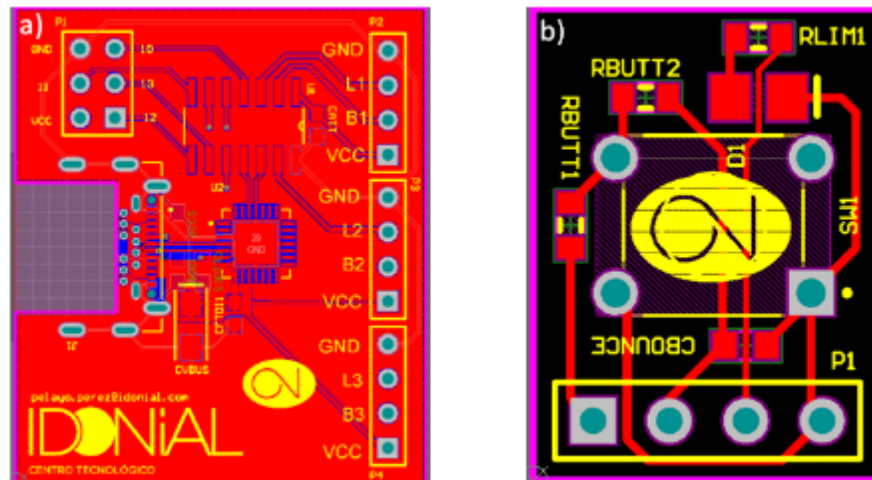


Figura 85. PCBs diseñadas para el dispositivo HMITEXT, a) Placa de control y b) Placa de interacción.

### 3.5.3 Tarea 4.3. Fabricación de circuitos elásticos para demostradores

En esta tarea se lleva a cabo la fabricación de los circuitos diseñados sobre sustratos elásticos utilizando las tecnologías y materiales más apropiados según los resultados obtenidos en los hitos anteriores del proyecto, y siguiendo los diseños desarrollados en las tareas 4.1 y 4.2.

Los circuitos flexibles han sido impresos mediante inkjet sobre sustrato TPU con tinta de plata. El curado se ha realizado en el horno fuera de línea para el curado de las impresiones, y en el horno de la línea piloto para el curado de las uniones entre tramos de conexión y entre circuitos flexibles.

#### 3.5.3.1 CIRCUITOS ELÁSTICOS PARA DEMOSTRADOR SMART ARM

En el caso del demostrador SMART ARM se ha fabricado una banda de conexión formada por la unión de dos tramos impresos como los mostrados en el apartado anterior. Estos tramos de 281mm se han cortado y unido para obtener una conexión de 430mm. La unión se ha realizado utilizando adhesivo conductor depositado en uno de los tramos, y a continuación, utilizando una lámpara para ver la superposición de pistas al trasluz, se han unido los tramos. La siguiente figura muestra varios pasos en este desarrollo.

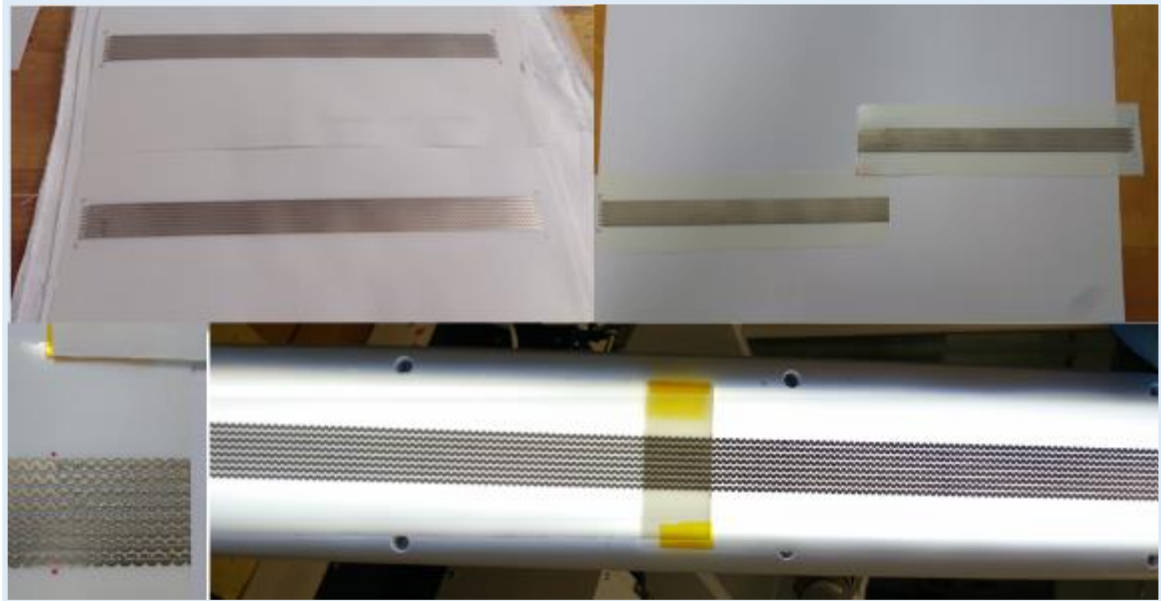


Figura 86. Unión de tramos de conexión para el demostrador SMART ARM usando adhesivo conductor y superposición de pistas

En los extremos del tramo obtenido se han añadido conectores de tipo hembra de 8 contactos, para la conexión con las placas del sistema. El adhesivo conductor ha sido curado en el horno de la línea piloto a 120 grados durante 20 minutos.



Figura 87. Integración de conectores y curado de adhesivo en tramos de conexión para el demostrador SMART ARM

### 3.5.3.2 CIRCUITOS ELÁSTICOS PARA DEMOSTRADOR HMITEXT

En el caso del demostrador HMITEXT, el circuito electrónico de botones capacitivos y LEDs para la función de interfaz de usuario se ha fabricado y montado utilizando impresión inkjet y fijando LEDs, resistencias y conectores con adhesivo conductor. La siguiente figura muestra la versión final del circuito flexible de interacción de usuario fabricado.

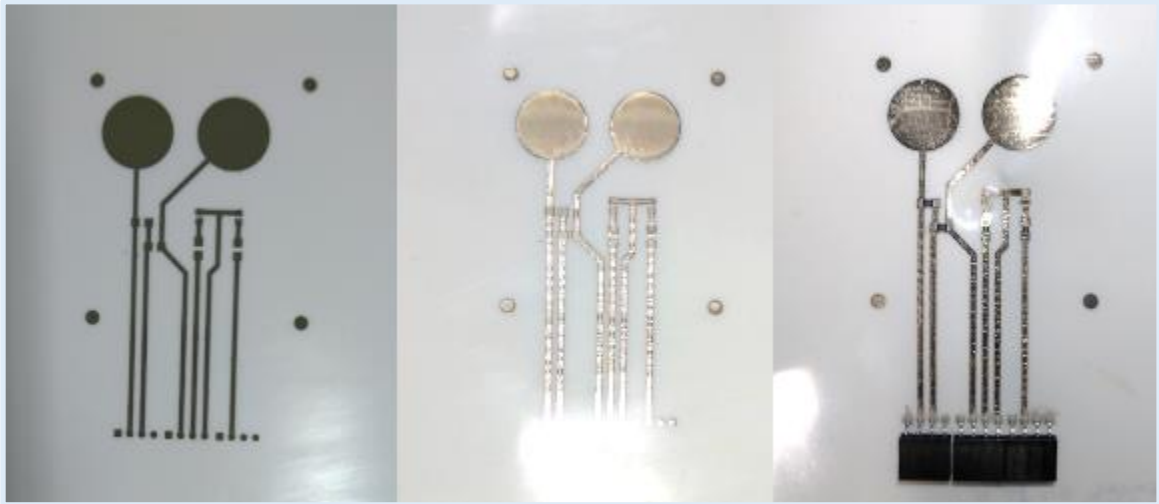


Figura 88. Diferentes pasos en la fabricación del circuito de interacción en formato flexible para demostrador HMITEXT (pistas impresas, pistas curadas, componentes integrados)

### 3.5.4 Tarea 4.4. Desarrollo electrónico

Esta tarea engloba la implementación de toda la electrónica de los demostradores, que incluye la fabricación de elementos externos (circuitos no impresos) y la programación de componentes.

#### 3.5.4.1 FABRICACIÓN DE ELEMENTOS EXTERNOS

En primer lugar, se procede a la adquisición de todos los componentes electrónicos necesarios, y posteriormente se lleva a cabo la fabricación de las PCBs rígidas y el montaje de todos los componentes sobre las mismas. El montaje se realiza en el laboratorio de electrónica de IDONIAL utilizando para ello soldadura manual y el equipo de soldadura por refusión con ayuda al posicionamiento ERSA HR550 financiado en el Programa Asturias 2018-2020, expediente IDI/2018/000074.

En el caso del demostrador SMART ARM, debido a la mayor complejidad de la placa de control y la densidad de componentes, el proceso de ensamblado y soldadura ha tenido mayor dificultad. Ambas placas se han fabricado en PCBs con espesor de 200 micrómetros, obteniendo unas características semirrígidas que permiten doblarlas ligeramente para adaptarlas a su ubicación en el brazo y en la muñeca.

La placa de control del demostrador HMI TEXT es una PCB rígida de espesor 1,6mm. La soldadura de componentes ha sido también compleja debido al encapsulado de algunos de sus componentes.

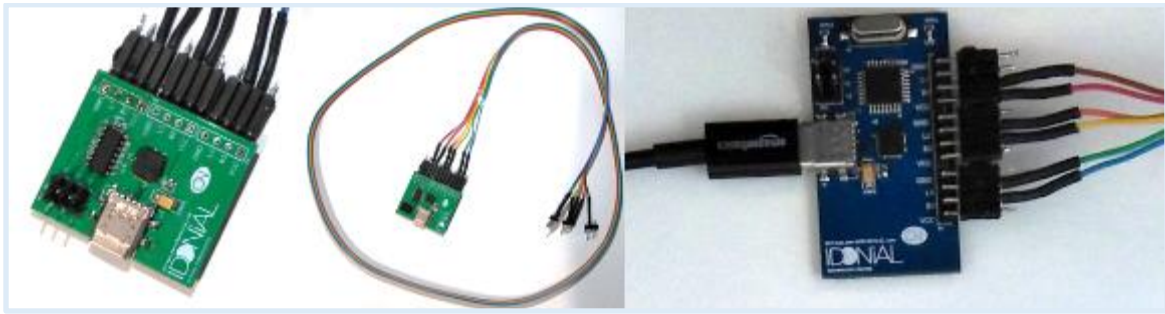


Figura 89. Placas de circuitos fabricadas para el demostrador HMITEXT



Figura 90. Equipo de soldadura por refusión ERSA HR550

### 3.5.4.2 PROGRAMACIÓN

Se realiza la programación de los circuitos integrados que miden y controlan las señales del sistema, y se comunican con otros subsistemas, obteniendo así el sistema funcional listo para su integración.

#### ***Desarrollo de software para demostrador SMART ARM***

La placa de control tiene dos botones, uno sirve para encender/apagar la placa de control (con pulsaciones largas), y para comenzar y finalizar la ejecución. El otro sirve para incrementar el número del programa que se desea ejecutar. Una vez encendido el dispositivo, seleccionado el programa a ejecutar y pulsado el botón de comienzo, el dispositivo debe comprobar que el programa se ejecute de manera adecuada. Se envían señales sonoras (zumbador) y/o luminosas (LEDs) hacia el usuario para notificarle cuando ha de comenzar a ejecutarlo, cuando finaliza y si se está realizando de manera correcta.

La estimación de la posición del brazo y la muñeca se realiza a través de la información proporcionada por los acelerómetros que se encuentran en la placa de control y en la placa auxiliar. Los posibles ejercicios a realizar y que se pueden seleccionar se encuentran preprogramados en el

microcontrolador de la placa de control, es decir, los movimientos permitidos en la realización de dicho ejercicio, así como las repeticiones y las tolerancias permitidas.

Una vez finalizado el ejercicio, el sistema queda a la espera de una nueva selección de programa y a la pulsación del botón de comienzo. En la siguiente figura se muestra un flujograma sencillo del funcionamiento del sistema.

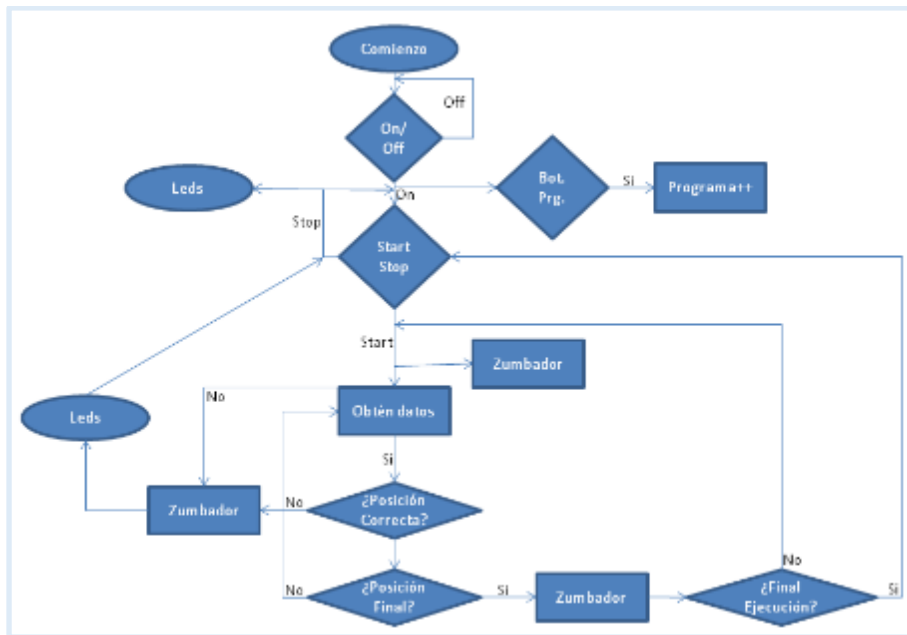


Figura 91. Flujograma implementado en la placa de control del SMART ARM

### Desarrollo de software para demostrador HMITEXT

Una vez fabricadas y ensambladas la placa de control y la placa de interacción con el usuario se procede a la implementación del *software* para llevar a cabo las funciones básicas del demostrador. El programa implementado debe llevar a cabo la comunicación con el dispositivo móvil a través del conector USB-C conectado a la placa, permitiendo el envío de eventos (pulsaciones de botones) y recepción de comandos (encendido/apagado de los LEDs). La Figura 92 muestra un flujograma simplificado de la implementación.

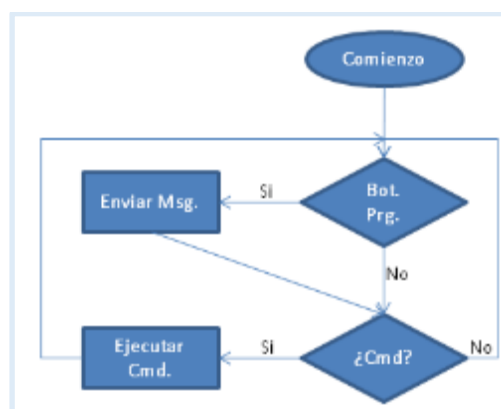


Figura 92. Flujograma implementado en la placa de control de HMITEXT

El envío y la recepción de comandos se realizan mediante comunicación serie. Los comandos que se pueden enviar a la placa de control son <ON, x> que permite encender el LED x en la placa de interacción y el comando <OFF, x> que permite apagarlo. Además, si se pulsa alguno de los botones la placa de control envía la notificación <P, z> donde z representa el número asignado al botón pulsado.

### 3.5.5 Tarea 4.5. Integración en prototipos

Finalmente, en esta tarea se lleva cabo la integración de todos los componentes en los demostradores finales. Esto incluye por un lado la fabricación de envoltentes, la adquisición de accesorios o prendas, la conexión de los circuitos electrónicos flexibles y rígidos y la unión o laminado de los mismos a las prendas.

#### 3.5.5.1 INTEGRACIÓN DE DEMOSTRADOR SMART ARM

Para la realización de la tarea en primer lugar se ha procedido a adquirir los materiales necesarios seleccionados en la tarea 4.1 que en este caso incluyen varias mangas textiles. Se han fabricado las envoltentes para los circuitos electrónicos utilizando el equipo de fabricación aditiva en poliamida disponible en IDONIAL.

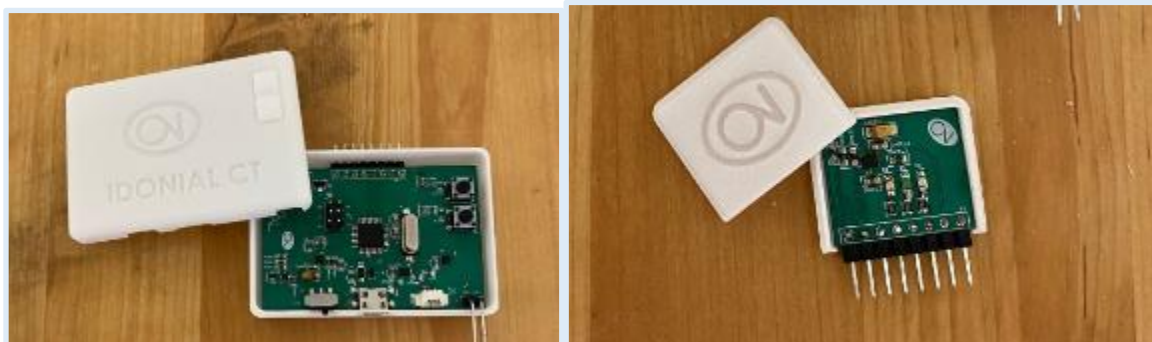


Figura 93. Envoltentes fabricadas en poliamida para el demostrador SMART ARM con placas integradas

Finalmente en esta tarea se procede a laminar los circuitos impresos elásticos reales para el SMART ARM a la manga textil y a integrar las envoltentes con la electrónica externa y conectarlas a la parte flexible con los conectores seleccionados. Los resultados se muestran en la siguiente figura.



Figura 94. Aspecto final del demostrador SMART ARM

### 3.5.5.2 INTEGRACIÓN DE DEMOSTRADOR HMI TEXT

En este caso se ha procedido a adquirir los materiales necesarios seleccionados en la tarea 4.1 que incluyen una chaqueta de trabajo, un cable USB tipo C y un móvil con capacidad de alimentar el circuito pasivo.

En el caso de la chaqueta, se realizó el diseño mecánico para montar el circuito sobre un primer sustrato que posteriormente es unido a la chaqueta mediante laminado. Se realizaron algunos ensayos iniciales para verificar el aspecto posible del demostrador con los conectores visibles.

Puesto que la electrónica de control va oculta y protegida por la propia prenda, se optó por no fabricar envoltente en poliamida, sino simplemente proteger la placa PCB con un recubrimiento conformal de poliuretano aplicado mediante spray.

Finalmente se ha procedido a conectar los componentes del demostrador HMITEXT (mostrados en la Figura 95) y a integrarlos en la chaqueta de trabajo.



Figura 95. Componentes del demostrador HMITEXT

Para la integración en la chaqueta de trabajo se realiza un corte en el tejido externo, introduciendo parcialmente el circuito elástico y procediendo posteriormente a laminarlo a la chaqueta de forma manual mediante planchado. En el interior de la manga el circuito se conecta al cable plano que a su vez está conectado al móvil desde el que se reciben o envían comandos al circuito de la manga.

El resultado del demostrador puede observarse en la Figura 96.



Figura 96. Aspecto final del demostrador HMITEXT

### 3.6 HITO 5. DEMOSTRADORES DE WEARABLES RÍGIDOS / SEMIRÍGIDOS O HÍBRIDOS

En este hito se ha procedido a diseñar y fabricar dos prototipos demostradores de acuerdo a los diseños conceptuales desarrollados en el Hito 1:

- *Demo 2: SMART ARM PRO.* Se trata de un dispositivo para monitorizar y ayudar en el movimiento de un brazo. La aplicación principal en el sector salud es la de la rehabilitación de pacientes tras traumatismos o accidentes cardiovasculares. Este sistema comparte algunas funcionalidades del sistema SMART ARM, e incorpora la actuación en una articulación mediante un motor. Una diferencia fundamental con SMART ARM es que este sistema se integra sobre elementos rígidos.
- *Demo 4. SMART SHOE.* El objetivo es utilizar el calzado para obtener información sobre la actividad del usuario. El dispositivo no precisa de interfaz de usuario, salvo para el encendido, y sí precisa una comunicación inalámbrica para la transmisión de información a un sistema de decisión o registro. Como funcionalidad se puede considerar la medida de fuerza/peso aplicados en dos puntos de la planta del pie, que puede servir para determinar acciones o posturas del usuario. Por otro lado el calzado incluye una etiqueta RFID. Mediante un dispositivo lector RFID desarrollado en este proyecto es posible detectar la presencia del calzado. Esto puede utilizarse en un sistema de identificación o de control de acceso de personas.

#### 3.6.1 Tarea 5.1. Diseño mecánico de detalle

En esta tarea se realiza el diseño de elementos mecánicos de los demostradores, y el diseño de la integración de la electrónica sobre estas partes mecánicas. Para ambos demostradores, la fase de diseño mecánico se inicia en el análisis del diseño conceptual realizado en el primer hito del proyecto. En esta tarea se ha llevado a cabo la selección de elementos comerciales, el diseño en detalle de elementos mecánicos y de la distribución física de circuitos, el diseño de circuitos termo-conformados, y el diseño para la integración de todos los elementos para formar cada demostrador. En los siguientes sub-apartados se describen con más detalle estos trabajos y resultados obtenidos.

##### 3.6.1.1 DISEÑO DEL DEMOSTRADOR SMART ARM PRO

Se comienza indicando brevemente los componentes de este demostrador, para a continuación mostrar todas las fases del desarrollo del mismo.

El diseño final del demostrador SMART ARM PRO incluye los siguientes elementos físicos que deben integrarse de forma conjunta:

- Una estructura articulada formada por dos piezas diseñadas según reglas antropométricas para adaptarse exteriormente al brazo de un usuario.
- Un actuador lineal con motor paso a paso y alimentación a 12V, y un conjunto de dos barras metálicas para proporcionar mayor rigidez frente a los esfuerzos generados por el actuador.
- Electrónica para el control del movimiento situada en el hombro. Este circuito se encarga de procesar la información de los sensores y controlar el actuador de la articulación.

Dispone de acelerómetro, batería y microprocesador como elementos principales. Se ha desarrollado un programa para este circuito de control.

- Electrónica para captación del movimiento de la muñeca. Este circuito de pequeñas dimensiones dispone de un acelerómetro y varios LEDs, y se comunica con la placa anterior.
- Pistas de conexión impresas sobre sustrato termoconformado. Llevan las señales hacia y desde el codo a los dos circuitos anteriores y al driver del motor.
- Conectores de montaje superficial con pitch 2,54mm y 8 vías, para conectar a las placas electrónicas con las pistas de circuito termo-conformadas.
- Envoltentes para alojar las placas electrónicas en el hombro y en la muñeca.
- Un driver para el control del motor que puede ser alimentado mediante fuente de alimentación conectada a la red o mediante batería de 12V. Actúa a partir de órdenes recibidas por la electrónica de control de movimiento. Este driver y su alimentación no se montan sobre la estructura del demostrador.

El diseño de la estructura articulada se inicia con el estudio antropométrico necesario sobre la estructura del brazo humano. El diseño mecánico se ha realizado en paralelo con el diseño electrónico, y ha requerido como inputs las dimensiones y volúmenes de los componentes electrónicos a integrar en el demostrador. De la misma forma, el diseño mecánico impone restricciones y criterios que se deben tener en cuenta durante el diseño electrónico. Es por ello que los equipos de desarrollo mecánico y electrónico han trabajado en constante comunicación y realizándose varios bucles de diseño durante la ejecución de estas tareas. Una vez que se han ido definiendo los diferentes componentes electrónicos y electromecánicos que serán montados en el demostrador, se ha podido completar el diseño del exoesqueleto, la estructura mecánica articulada. Para una primera comprobación de este diseño, se realizó una maqueta del sistema mecánico articulado a escala 1:2, permitiendo así un ahorro en los materiales de fabricación.

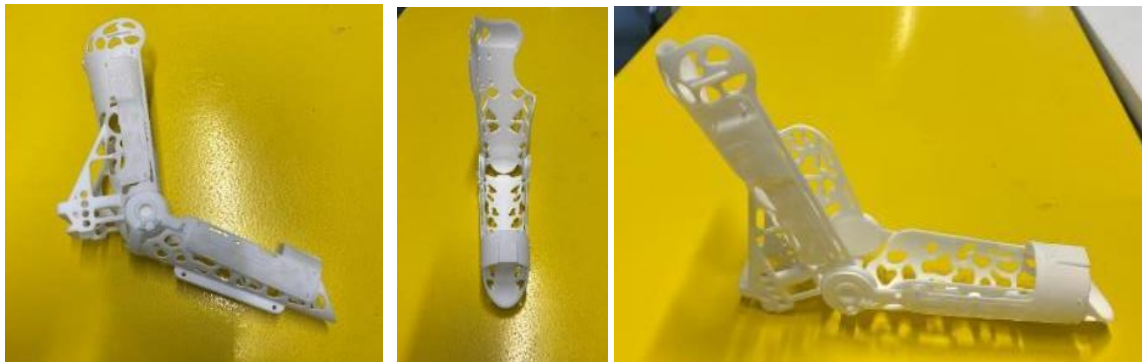


Figura 97. Maqueta del diseño a escala 1:2 del demostrador SMART ARM PRO

Para el diseño de las envoltentes, se parte del diseño CAD de las placas electrónicas que han de integrarse en el demostrador, con los conectores seleccionados. Teniendo en cuenta sus volúmenes y todos los orificios que ha de llevar la envoltente para el paso de los distintos conectores se diseñan las envoltentes mostradas en las siguientes imágenes.

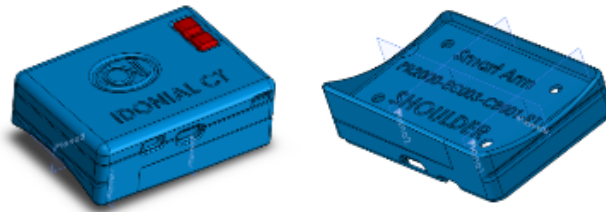


Figura 98. Diseño CAD 3D de envoltorio para placa electrónica SHOULDER del demostrador SMART ARM PRO

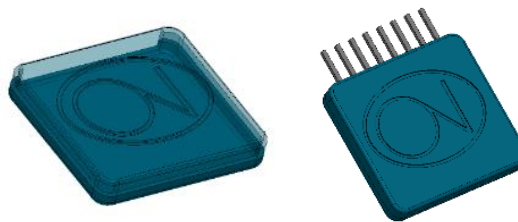


Figura 99. Diseño CAD 3D de envoltorio para placa electrónica WRIST del demostrador SMART ARM PRO

Se ha diseñado el trazado de pistas conductoras que unirán las distintas placas de circuito, y que serán impresas sobre sustrato flexible para posteriormente realizar el termo-conformado. El diseño consta de dos circuitos de pistas, uno para la parte superior del brazo, y otro para el antebrazo. La siguiente figura muestra estos diseños.

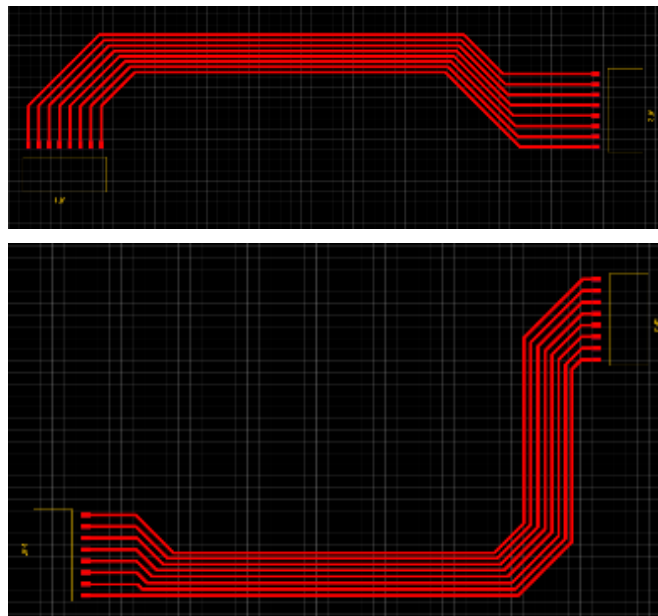


Figura 100. Diseño de pistas para la conexión con la placa de control y con los elementos en la zona de la articulación (superior) y para la conexión del cableado en la articulación con la electrónica sensorial en la muñeca (inferior)

Además de la selección de materiales y estructura para cada elemento del wearable, el diseño mecánico se ha centrado también en el posicionamiento de los distintos componentes sobre la estructura mecánica articulada. La posición de los acelerómetros ha de ser la adecuada para poder medir trayectorias que puedan ser interpretadas adecuadamente en el software del demostrador,

si bien el posicionamiento exacto no es crítico. Además, se busca la comodidad del usuario que utilice el dispositivo SMART ARM PRO durante, por ejemplo, una secuencia de entrenamiento terapéutico. Teniendo en cuenta los diferentes factores se realiza finalmente el CAD 3D completo con el diseño del demostrador que se muestra a continuación.

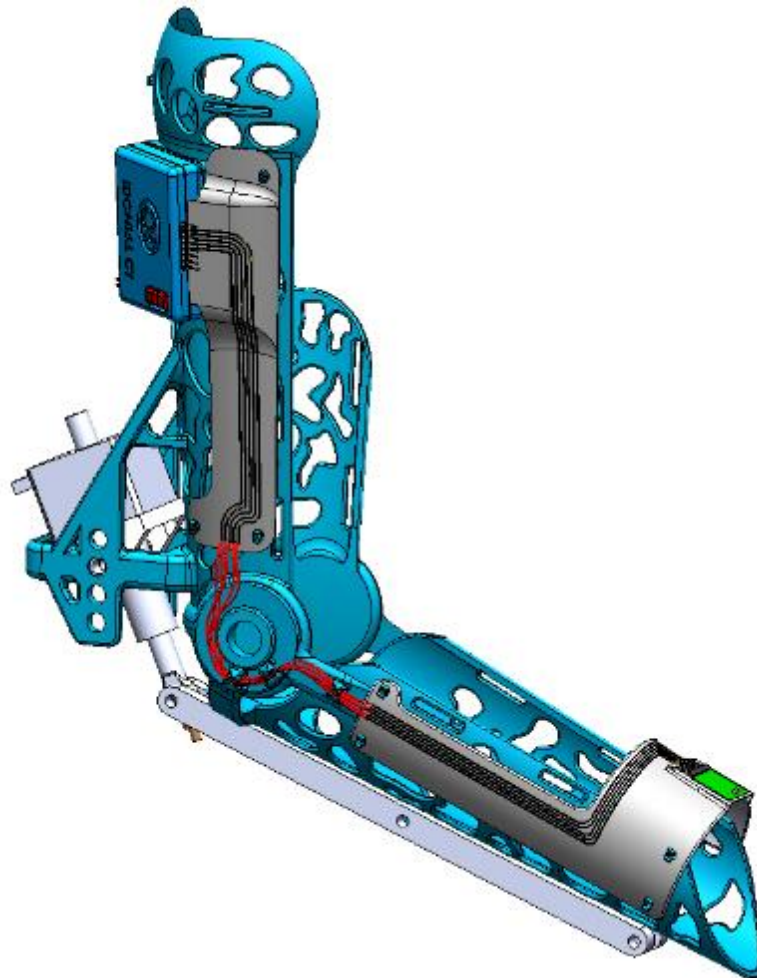


Figura 101. Diseño de detalle del demostrador SMART ARM PRO

De cara a la integración final de los componentes en la estructura, se elige la opción de pestañas para fijar las partes termo-conformadas con pistas impresas, el pegado de la envolvente en la muñeca, y el atornillado para la envolvente de la electrónica de control en el hombro.

### 3.6.1.2 DISEÑO MECÁNICO DEL DEMOSTRADOR SMART SHOE

El diseño mecánico se inicia con la selección del tipo de calzado comercial sobre el que se desarrollará el demostrador. Se ha optado por un calzado de seguridad industrial que incluya una plantilla interna para aislar mejor los elementos del interior del calzado. Estos elementos del interior son comerciales y no es necesaria una demostración continua de su aspecto. El circuito termo-conformado sí se encontrará en el exterior para permitir su observación de aspecto y funcionamiento. En este demostrador el diseño electrónico depende en gran parte del diseño mecánico ya que la distribución de componentes electrónicos en el circuito de control debe tener en cuenta la curvatura de la superficie termo-conformada.

Como se indicaba anteriormente, el primer paso ha sido la selección de un calzado comercial en el que integrar el demostrador. Para ello se ha realizado una estimación del espacio que requerirán los sensores y tag RFID, y el circuito electrónico de control. Se ha considerado como mejor opción utilizar un calzado de seguridad industrial, sin tener la altura de una bota de seguridad. La altura de este calzado en la zona del talón supera los 40mm permitiendo la integración del circuito. La suela de este calzado es relativamente rígida frente a otras opciones y facilita la fijación de los sensores y tag RFID.



Figura 102. Calzado comercial seleccionado como soporte para el demostrador SMART SHOE

Por otro lado, el demostrador también incluye una alfombrilla para suelo con una antena que es capaz de detectar y leer el dato de identificación contenido en el tag RFID.

Además del calzado seleccionado, el diseño del demostrador SMART SHOE incluye en su conjunto los siguientes elementos:

- Sensores de presión/fuerza y tags RFID comerciales integrados en el interior del calzado.
- Circuito termo-conformado de procesado y transmisión de datos, alimentación y acondicionamiento de señales, que estará integrado en el exterior del calzado.
- Dispositivo externo capaz de comunicarse con el wearable mediante comunicación WiFi. Para demostraciones se utiliza un PC portátil.
- Cable plano y conector para la conexión entre los sensores y el circuito de control termo-conformado.
- Alfombrilla con antena RFID y circuito lector de tarjetas sobre sustrato termo-conformado para la detección e identificación del calzado.

El diseño mecánico del sistema afecta al diseño electrónico de los circuitos. Considerando la forma que tendrán los circuitos termo-conformados, se ha trabajado en esta tarea en la definición de la distribución de los componentes del circuito, de modo que los componentes se sitúen en áreas planas del sustrato termo-conformado.

***Diseño mecánico del circuito de control termo-conformado y conexión de sensores***

Este circuito se va a fijar en el talón del calzado. Para ello se va a termo-conformar usando como molde una pieza curva en su parte central, y plana en la zona más externa tal y como se muestra en la figura inferior.

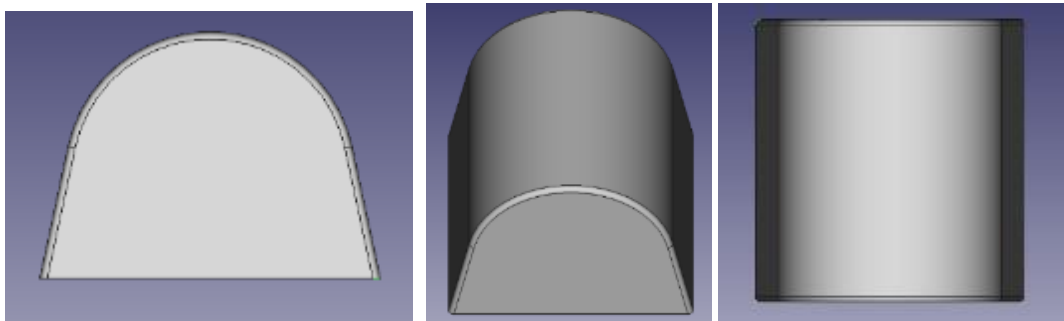


Figura 103. Diseño del molde para termo-conformar el circuito de control

Para que el diseño electrónico se pueda adaptar a esta forma curva, se ha diseñado una distribución de los componentes electrónicos como se muestra en la siguiente figura. Salvo la batería, que se conecta por cable, los componentes del circuito se encuentran en los laterales, que corresponden con zonas planas del circuito termo-conformado.



Figura 104. Diseño de distribución de componentes electrónicos sobre el área del circuito electrónico

Se planteó también como alternativa a este primer diseño hacer la parte central del circuito plana (añadiendo una placa plana en la parte superior del molde), de modo que se concentren todos los componentes sobre esa región plana. Para probar también esta alternativa se realizó el diseño de la distribución de componentes que se muestra en la siguiente figura. La batería ya no se situaría en el centro, sino en un lateral de la pieza termo-conformada.

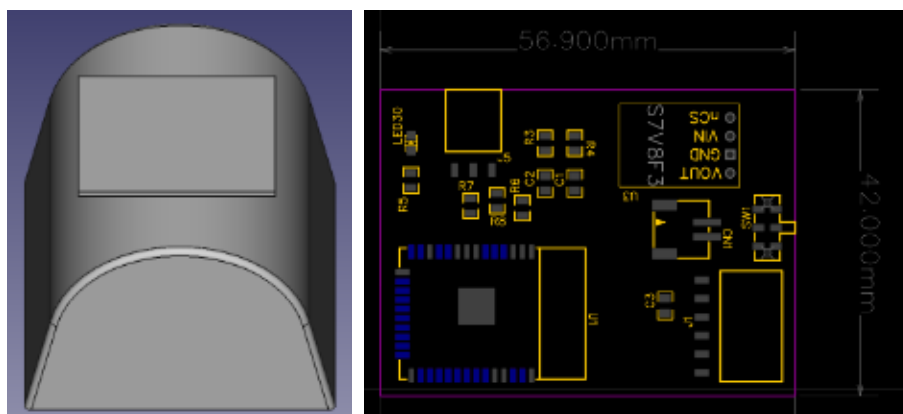


Figura 105. Molde utilizado para obtener una zona central plana y diseño alternativo de distribución de componentes electrónicos

Los sensores de presión son fijados en el interior del calzado, y para su conexión al circuito de control es necesario un cable de tres hilos. Para que estas conexiones y el cable no causen molestias al usuario, se realizan las conexiones con los sensores en la zona central de la planta. El cableado saldrá del interior por el lateral izquierdo (considerando el uso en un pie derecho), hacia el conector de tres vías del circuito de control. La siguiente figura muestra este concepto para el conexionado.

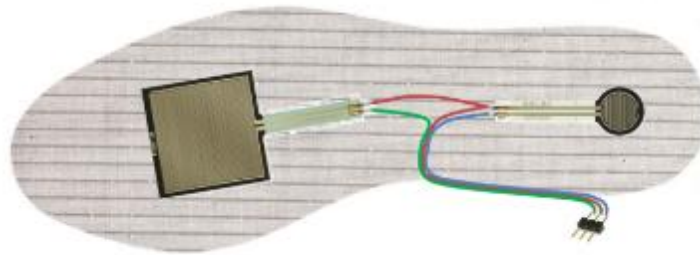


Figura 106. Diseño de conexiones y cableado para sensores de presión

#### ***Diseño mecánico del circuito lector RFID para detección e identificación***

Este circuito se situará próximo a una antena RFID bajo una alfombrilla. El sustrato del circuito se conformará utilizando como molde una forma de paralelepípedo. De esta forma, el circuito estará en el interior de la pieza termoconformada. El diseño electrónico de este circuito debe encajar en el área sin quedar excesivamente próximo a las paredes. Para ello se ha definido un área de menor tamaño para la distribución de los componentes del circuito. El diseño del molde y de la distribución de componentes se muestra en la siguiente figura.

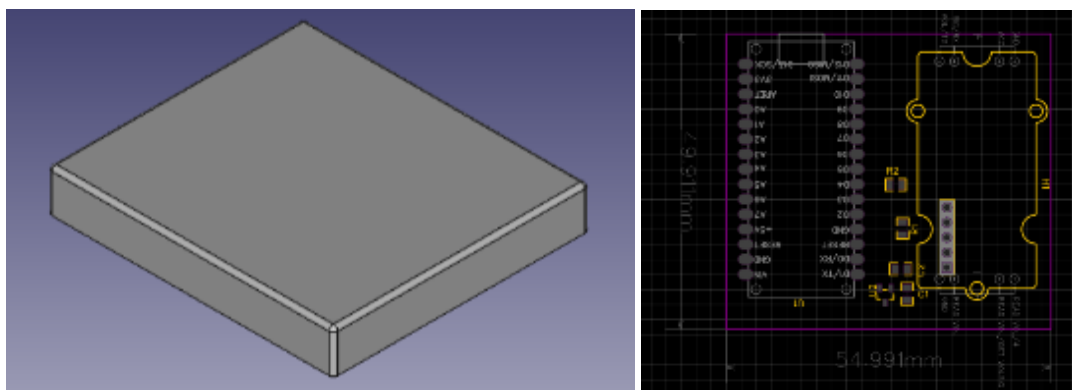


Figura 107. Diseño del molde para termoconformar y diseño de distribución de componentes electrónicos para el circuito del lector RFID

Se ha diseñado una antena RFID de cinco espiras con dimensiones aproximadas de 100x100mm. Para su conexión con el circuito lector se usará un conector de 6 vías que permitirá hacer pruebas de detección usando de una a las cinco espiras disponibles. La antena se situará bajo una alfombrilla de goma para una mayor protección.

Finalmente, se ha llevado a cabo el diseño mecánico de detalle del demostrador teniendo en cuenta la posición de cada elemento en el zapato. La posición de la placa externa se selecciona teniendo en cuenta aspectos ergonómicos que permitan el pulsado del encendido fácilmente, colocando el interruptor en la parte derecha. La conexión entre esta placa y los sensores del interior del zapato se realiza en la parte superior izquierda de la placa, de modo que el conector quede próximo al

borde lateral del zapato, en una zona de menor altura relativa. El sensor de mayor área se coloca en la parte delantera y el sensor de menor área en la parte trasera, donde apoya el talón del usuario. El diseño final se muestra en la siguiente figura, utilizando para estos bocetos las dimensiones inicialmente estimadas de los diferentes componentes.

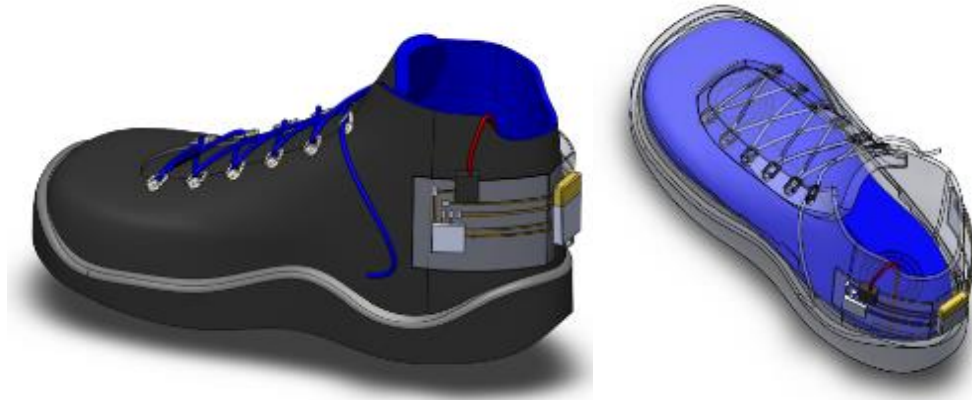


Figura 108. Diseño del demostrador SMART SHOE

Para esta integración, se realiza el pegado de sensores directamente sobre el interior del calzado. El circuito de control impreso termo-conformado se fijará en el exterior del calzado utilizando materiales que permitan fácilmente su desmontaje, como puede ser cinta de velcro o cinta adhesiva. Para la lectura del tag RFID del zapato, se utilizará una alfombrilla de goma y el circuito de lectura RFID conformado en su propia envoltente, que se situará a unos 200mm de la alfombrilla.



Figura 109. Diseño de elementos del lector RFID del demostrador SMART SHOE

### 3.6.2 Tarea 5.2. Diseño electrónico de detalle

En esta tarea se realiza el diseño electrónico de los circuitos que forman los demostradores con estructura rígida o termoconformada, así como los de los componentes electrónicos alojados fuera de las estructuras. Se parte del diseño conceptual electrónico realizado en la tarea 1.3, en la que se han establecido los bloques constituyentes.

#### 3.6.2.1 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL DEMOSTRADOR SMART ARM PRO

El sistema SMART ARM PRO es una evolución del demostrador SMART ARM al cual se le incorpora un motor paso a paso para realizar el movimiento de la articulación del codo. Por lo tanto, el SMART

ARM PRO lleva una placa de control, situada en la zona del hombro, una placa auxiliar para medir la inclinación en la zona de la muñeca y también una placa de control del movimiento del motor situada en una parte externa al brazo. En la Figura 110 se puede ver el diagrama de bloques del sistema completo.

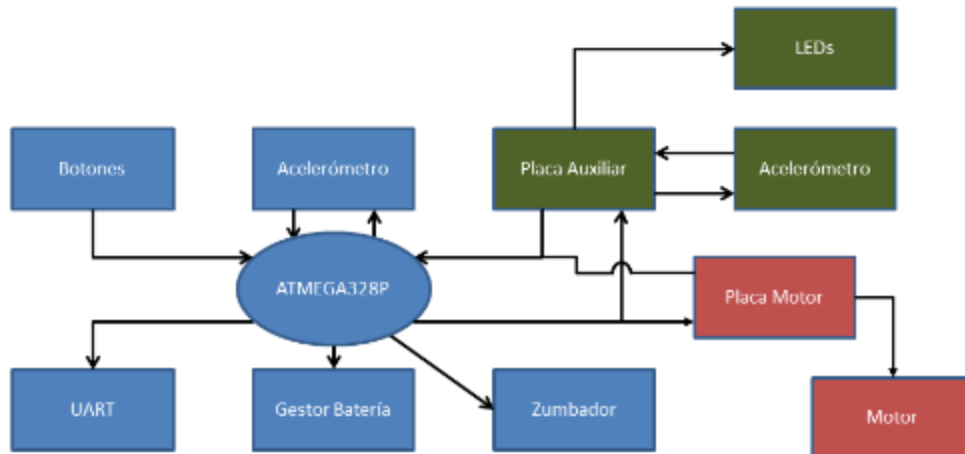


Figura 110. Diagrama de bloques del sistema del SMART ARM PRO.

La placa de control es la encargada de procesar los datos que le llegan de los acelerómetros del sistema (uno se encuentra en la propia placa de control y otro en la placa auxiliar de la muñeca), de coordinar el movimiento del motor y la interacción con el usuario a través de los botones. La placa también incorpora un conector micro USB que permite alimentar directamente el sistema y también realizar la carga de la batería a través del gestor de batería incorporado en la placa. Para la interacción con el usuario se añaden 2 botones que permiten encender/apagar la placa con pulsaciones largas del botón (al menos 2 segundos) o bien comenzar/detener el ejercicio con pulsaciones más cortas del botón. El otro botón permite seleccionar el ejercicio que se desea realizar. Además, se ha añadido un zumbador para proporcionar al usuario información sobre cuándo debe comenzar el ejercicio o si se ha producido algún error.

La placa auxiliar incorpora un acelerómetro de tres ejes cuya información se usa para tratar de estimar la orientación de la muñeca y, además, posee un conector de 8 pines de 2,54 mm de separación entre pines para su conexión con el resto del sistema.

La placa de control del motor incorpora una fuente de alimentación autónoma para la conexión directa a la red eléctrica. El sistema también puede trabajar sin esta fuente de alimentación y utilizando una batería de 12V. El sistema de control del motor se encarga de recibir las órdenes de la placa de control principal y enviar las señales adecuadas al driver que controla el motor para obtener el movimiento deseado. En la Figura 111 se muestran los diseños realizados.

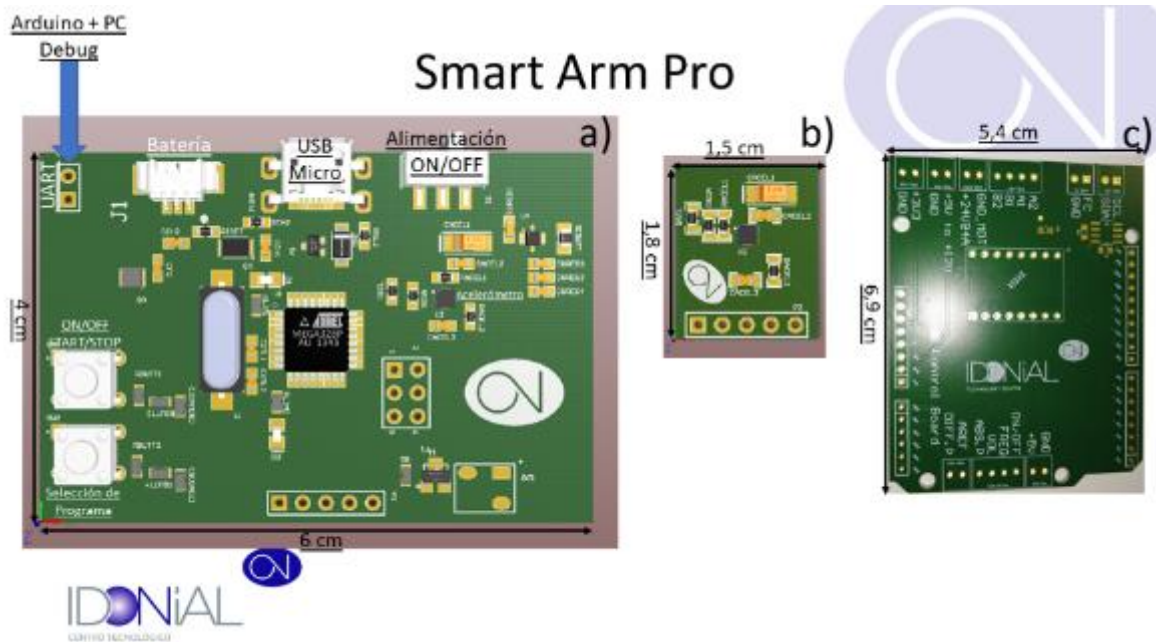


Figura 111. PCBs diseñadas para el dispositivo SMART ARM PRO, a) Placa de control, b) Placa auxiliar y c) Placa de control del motor paso a paso.

### 3.6.2.2 DISEÑO ELECTRÓNICO DEL DEMOSTRADOR SMART SHOE

El demostrador SMART SHOE consta de varios circuitos que podemos considerar como dos subsistemas con funciones diferentes:

- *Sistema de monitorización de presión.* Su función es medir la presión sobre el suelo ejercida por el usuario en uno de los pies, y transmitir esta información de forma inalámbrica para su monitorización en un dispositivo con pantalla. Este subsistema está formado por dos sensores de presión alojados en el interior del calzado y un circuito de control que mide y transmite la información.
- *Sistema de detección e identificación.* Su función es detectar la presencia del usuario al pisar sobre una alfombrilla e identificar al usuario mediante tecnología RFID. El subsistema RFID está formado por una etiqueta/tag RFID comercial con identificador único que se integra en el calzado, y un circuito lector de RFID sobre sustrato termo-conformado.

Una vez seleccionados los componentes de cada sistema, se realiza el diseño de esquemas de los circuitos. A partir del esquema se realiza el diseño de circuitos, los cuales serán impresos.

A continuación se detallan los resultados del diseño electrónico de ambos subsistemas.

#### ***Diseño electrónico del sistema de monitorización de presión***

Este sistema se ha diseñado tratando de utilizar un bajo número de componentes, de modo que la fabricación del circuito termo-conformado pueda resultar más robusta. Los componentes principales que forman este circuito son los siguientes:

- *Módulo microcontrolador con WiFi integrada.* Este módulo programable dispone de conversores analógico-digital (ADC) para la medida de los sensores de presión y nivel de batería, y permite además la comunicación WiFi con otros sistemas.

- *Módulo de Regulación.* Permite obtener a partir de la tensión variable de la batería una tensión de alimentación constante de 3,3V para alimentar el módulo controlador.
- *Interruptor de dos posiciones.* En la posición de encendido la batería se conecta al módulo de regulación y se alimenta el sistema. En la segunda posición, permite usar un cargador para la batería.
- *LED indicador, conectores* (para batería, sensores y cargador/programación), *varias resistencias y condensadores.*

A partir de este diseño esquemático se ha realizado el diseño de la distribución de componentes y a continuación el trazado de pistas. El fichero GERBER de la capa TOP (que contiene pistas conductoras y pads) será el utilizado para obtener el fichero de imagen para la impresión inkjet del circuito. La imagen siguiente muestra el diseño obtenido para el circuito en su versión larga, sin componentes en la zona central.



Figura 112. PCB diseñada para la monitorización con el demostrador SMART SHOE

Como se comentó anteriormente, se realizó también una versión alternativa del circuito más compacta para ser impresa en un área reducida. El diseño de esta segunda versión se muestra en la siguiente figura.

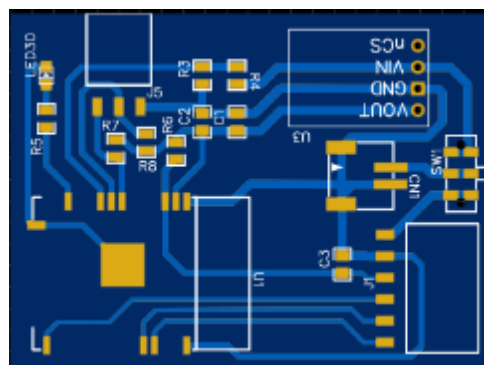


Figura 113. PCB de área reducida como opción alternativa para el termoconformado.

### ***Diseño electrónico del sistema de detección e identificación***

El sistema RFID se ha diseñado también tratando de utilizar un bajo número de componentes y con pads de conexión relativamente separados para facilitar la fabricación del circuito sobre un sustrato termoconformado. Los componentes principales que forman este segundo circuito son los siguientes:

- *Módulo microcontrolador.* Se comunica con un PC mediante conexión USB. Esta conexión permite también la alimentación de todo el circuito RFID, por lo que no se precisa batería.

Este módulo programable dispone de un segundo bloque de comunicación serie UART que es el que permite la comunicación al mismo tiempo con el módulo RFID.

- *Módulo RFID.* Este módulo integra el transceptor PN532 para comunicaciones sin contacto a 13,56MHz. El módulo incorpora además un conector de antena UFL que nos permite probar diseños propios de antena.
- *Regulador de tensión.* Debido a que el módulo RFID funciona con 3,3V de alimentación, en lugar de los 5V proporcionados por el puerto USB, es necesario incluir un regulador que genere 3,3V a partir de 5V. Se ha seleccionado un regulador con encapsulado SOT23-3, de pequeño tamaño pero con los pad de conexión bastante separados para facilitar la integración en el circuito termoconformado.
- Los otros componentes utilizados son *condensadores y resistencias* necesarios para el funcionamiento del regulador anterior y adaptación de señales.

A partir del diseño esquemático se ha realizado el diseño de la distribución de componentes y a continuación el trazado de pistas. La siguiente figura muestra el resultado de este diseño.

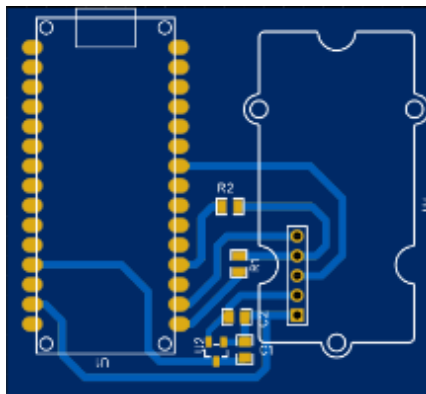


Figura 114. PCB diseñada para la detección RFID en el demostrador SMART SHOE.

### 3.6.3 Tarea 5.3. Fabricación de circuitos termoconformados para demostradores

En esta tarea se lleva a cabo la fabricación de los circuitos mediante su impresión y el posterior termoconformado. Se explica a continuación con más detalle los diferentes trabajos que se realizan en esta operación.

**Generación de archivos de impresión.** El diseño de circuitos termina con la obtención de los archivos en formato GERBER. A partir de estos archivos deben obtenerse los archivos de imagen que precisa la impresora inkjet que se utiliza en la fabricación. Por otro lado, al aplicar el termoconformado se produce una deformación y estiramiento del sustrato. Para realizar la generación de archivos de imagen y para permitir un escalado previo de la imagen en las direcciones X e Y que reduzca el efecto de la deformación prevista, se ha desarrollado una aplicación para ordenador PC. La siguiente imagen muestra su interfaz principal.



Figura 115. Aplicación para convertir archivos GERBER a archivos de imagen para impresión

**Impresión y curado de pistas conductoras.** Los circuitos para cada demostrador han sido impresos en diferentes sustratos (policarbonato y ABS) con tinta de plata del fabricante SunChemical. Se ha utilizado para ello la impresora inkjet Dimatix fuera de línea, y se han impreso 6 capas de material conductor en cada circuito. El curado de la tinta se ha realizado con un perfil de temperatura que alcanza los 120°C y tiene una duración de 30 minutos.

**Termoconformado del material.** Para el termoconformado del material se ha utilizado la máquina de termoconformado Formech. En función del sustrato utilizado se mantienen diferentes tiempos para su calentamiento antes de subir el molde y aplicar el vacío. Debido a la deformación que se genera sobre todo en los circuitos más complejos, se ha realizado también el termoconformado con esta máquina pero sin aplicar el vacío. En este caso no se utiliza una lámina de sustrato completa, sino que debe recortarse primero el área que se quiere deformar, y debe adaptarse parcialmente esta área de sustrato al molde. Al aplicar el calor en la máquina, la lámina se deforma sin estiramiento.

**Pegado de componentes y curado de adhesivos.** Una vez que las pistas conductoras están impresas, se puede proceder al dispensado de adhesivos y la colocación de componentes. Hemos utilizado adhesivo conductor para la conexión eléctrica entre pistas y conexiones de componentes, y adhesivo dieléctrico en zonas no metálicas, para mejorar el pegado del componente. Una vez colocados los componentes, hay que curar los adhesivos. Este curado se ha realizado a 120° durante 30 minutos. Temperaturas mayores podrían producir la deformación del sustrato.

En los siguientes apartados se exponen los resultados obtenidos para ambos demostradores. En el primer caso los circuitos a termo-conformar son pistas entre dos conectores. En el segundo demostrador los circuitos son más complejos, con componentes de diferentes tipos, y la deformación y estiramiento del sustrato en el proceso han complicado más su desarrollo.

### 3.6.3.1 CIRCUITOS TERMOCONFORMADOS PARA EL DEMOSTRADOR SMART ARM PRO

En el caso del demostrador SMART ARM PRO se han fabricado dos piezas semirígidas termoconformadas para la transmisión de señales entre la placa de control, la placa del driver y la placa auxiliar fijada en la zona de la muñeca. Se ha utilizado un sustrato flexible de policarbonato de espesor 250 micras. Debido a este bajo espesor, tras el termoconformado el material mantiene cierta flexibilidad. Esto se ha seleccionado así para favorecer el montaje y desmontaje de los elementos, sobre todo en la parte de la muñeca cuando se introduce el brazo del usuario. Las siguientes figuras muestran varios pasos en el proceso de fabricación de estos circuitos.

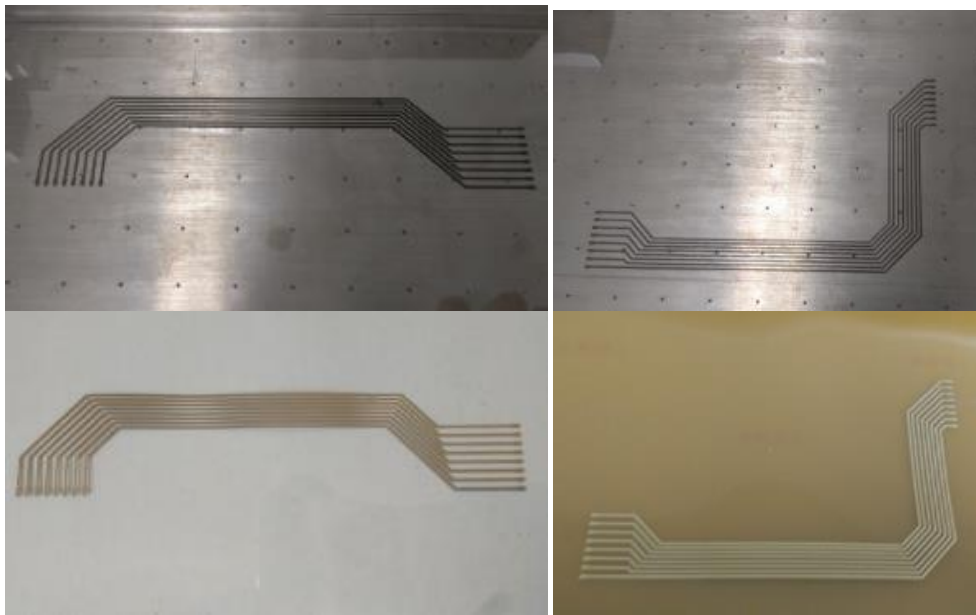


Figura 116. Pistas impresas (superior) y curadas (inferior) sobre policarbonato para el demostrador SMART ARM PRO



Figura 117. Circuitos termo-conformados en el demostrador SMART ARM PRO

### 3.6.3.2 CIRCUITOS TERMOCONFORMADOS PARA EL DEMOSTRADOR SMART SHOE

En el caso del demostrador SMART SHOE se han fabricado dos circuitos termo-conformados de mayor complejidad. Por un lado el circuito que se sitúa en la parte exterior del calzado, para la captura y transmisión de información sensorial, y por otro lado el circuito para la identificación RFID del calzado.

Ambos circuitos han sido fabricados estudiando y probando diferentes opciones. Se presentan primero los resultados con el circuito termoconformado para la monitorización de sensores y seguidamente el circuito lector RFID.

***Desarrollo del circuito monitor de fuerzas termoconformado***

Se ha fabricado este circuito según las dos opciones consideradas en la fase de diseño. Una versión con pistas largas en la zona central y componentes a los lados, y una segunda versión que concentra el circuito en la parte central del talón del calzado.

El primer objetivo ha sido fabricar estas versiones de circuito utilizando vacío en el termoconformado. Se imprimieron los circuitos sobre sustrato policarbonato de espesor 1mm. Dada la inclinación de las paredes laterales del molde, se seleccionó este espesor de material para evitar roturas al aplicar el vacío. Los resultados obtenidos en el termoconformado no fueron válidos debido a las deformaciones que produce el proceso en las partes del circuito que necesitan más precisión (donde se sitúa el microcontrolador). Hacer un escalado previo no proporcionó precisión suficiente ya que las deformaciones producen una curvatura de las pistas y de la situación de los pads de contacto de los componentes, que no permite la posterior fijación y conexión del componente.

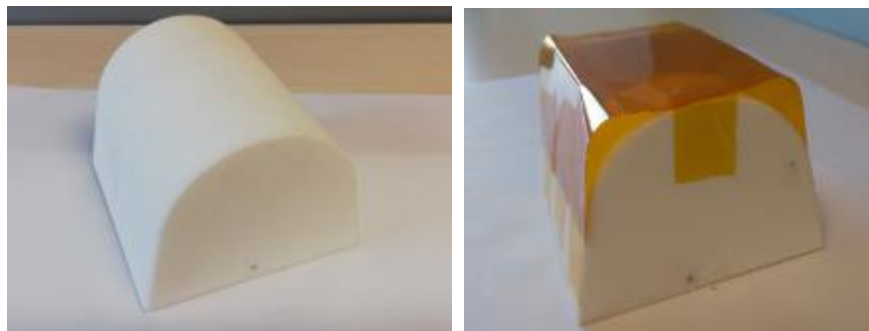


Figura 118. Moldes utilizados en el termoconformado para el circuito monitor en SMART SHOE

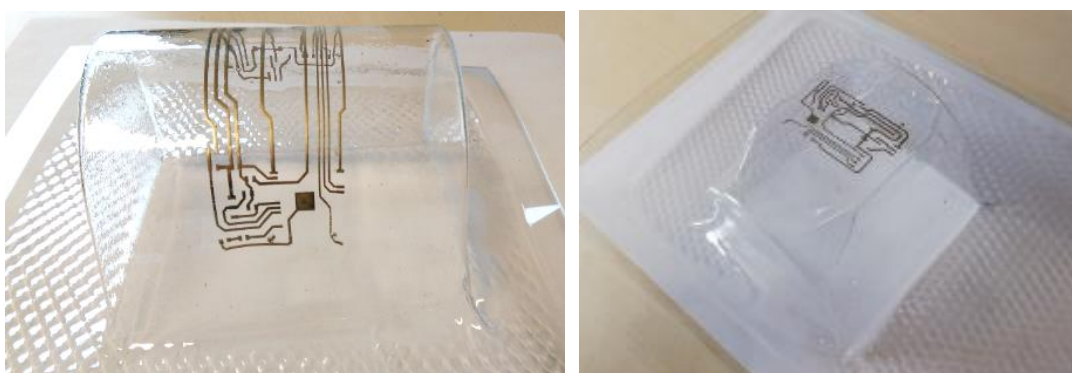


Figura 119. Termoconformado de circuitos con vacío en la versión larga (izquierda) y corta (derecha).

Por ello, se realizaron nuevas pruebas para tratar de termoconformar circuitos sobre el sustrato sin usar vacío. Para ello se utilizó una pieza de sustrato que con su flexibilidad permita una primera adaptación al molde antes de aplicar temperatura. Tras las primeras pruebas con diferentes sustratos se optó por imprimir el circuito en su versión larga sobre policarbonato, e imprimir la versión corta sobre ABS. El resultado más importante es que la zona en la que deben colocarse los componentes no sufre deformaciones en el proceso.

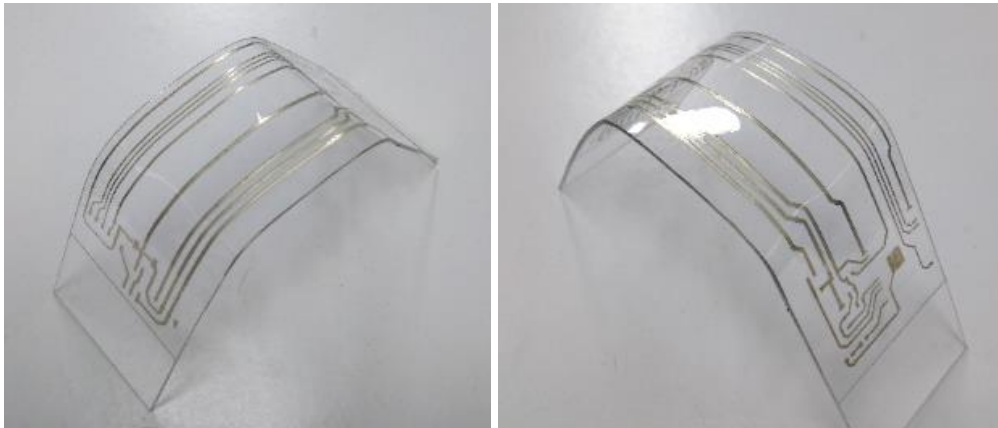


Figura 120. Circuito impreso en policarbonato de espesor 1mm.

Para la fabricación del circuito en su versión corta sobre ABS se ha optado por realizar primero el montaje y pegado de componentes, y posteriormente el termoconformado del circuito completo.

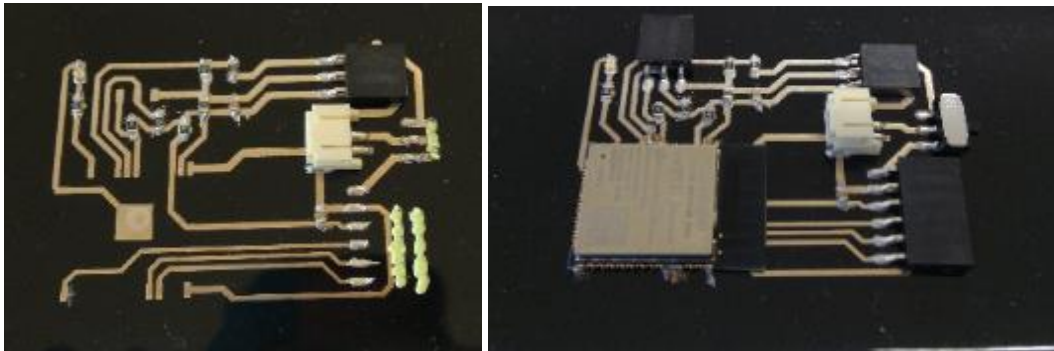


Figura 121. Montaje y pegado de componentes y curado de adhesivos.

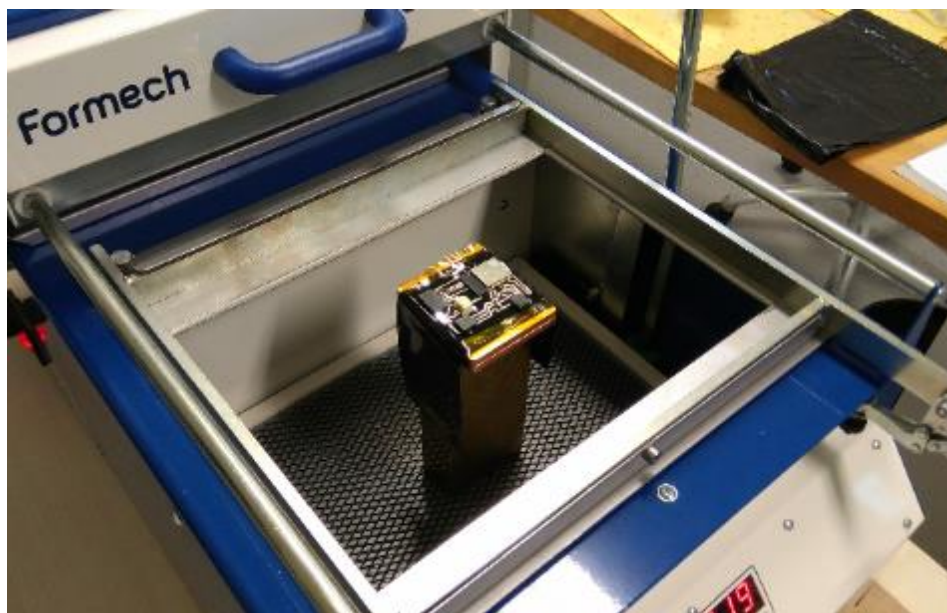


Figura 122. Termoconformado con un molde que proporcione mayor ángulo de pliegue.

### Desarrollo del circuito detector RFID termoconformado

Este segundo circuito del demostrador se ha diseñado y fabricado de modo que el propio sustrato sirviera de envoltorio y protección del circuito.

Como se muestra en las imágenes, tras pruebas iniciales de termoconformado sobre poliestireno, se imprimió el circuito RFID sobre policarbonato de 1mm de espesor y se realizó el termoconformado. A partir de las dimensiones finales del circuito debidas al estiramiento del material, se determinó un escalado y se generó un nuevo archivo de imagen de dimensiones más reducidas. Este fue impreso y termoconformado. En este caso las dimensiones obtenidas en el nuevo circuito han permitido el montaje de los componentes electrónicos. Este montaje se presenta en la descripción de la tarea 5.4.

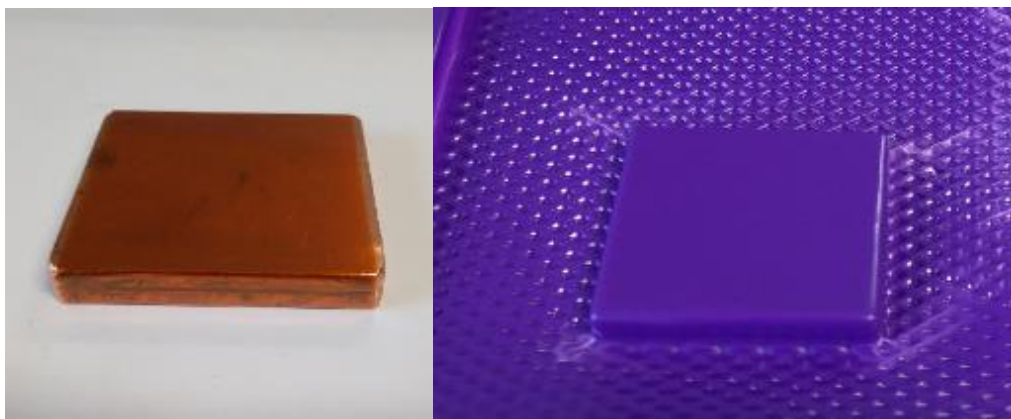


Figura 123. Molde utilizado y prueba inicial de termoconformado para circuito RFID del demostrador SMART SHOE

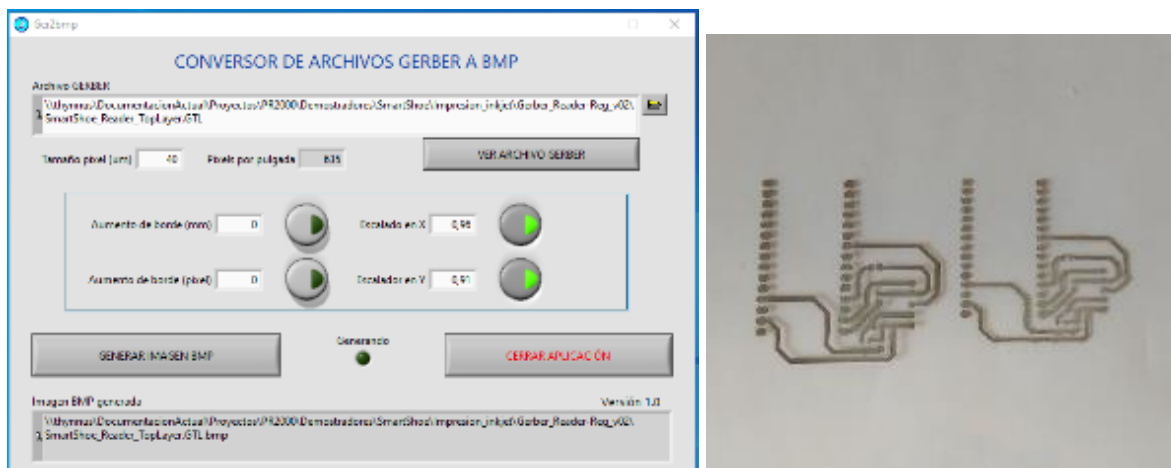


Figura 124. Izquierda: Generación de un nuevo archivo de imagen escalado para su impresión. Derecha: Circuito con sus dimensiones originales mayores y circuito impreso y curado con el escalado de reducción.

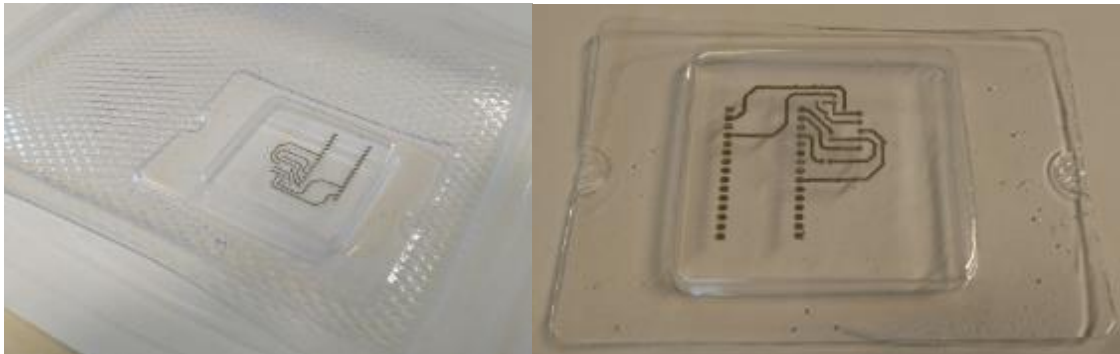


Figura 125. Circuito escalado termoconformado. Las pistas están impresas en la cara inferior e interior

### 3.6.4 Tarea 5.4. Desarrollo electrónico

Esta tarea engloba la implementación de toda la electrónica de los demostradores, que incluye las fases de fabricación y montaje de circuitos y su programación.

#### 3.6.4.1 FABRICACIÓN DE CIRCUITOS

En esta tarea se ha realizado la adquisición de los componentes electrónicos necesarios y el montaje de todos los componentes sobre las PCBs rígidas y circuitos termo-conformados. Este montaje se ha realizado en el laboratorio de electrónica de IDONIAL.

Los circuitos electrónicos del demostrador SMART ARM PRO tienen una alta complejidad y algunos de sus componentes son bastante miniaturizados, con distancias entre pads en el orden de las 200 micras. Por esta razón las placas de circuito impreso se han fabricado externamente sobre material FR4. En el caso de la placa de control y de la placa auxiliar con acelerómetro se ha utilizado material de 200 micras de espesor, y en el caso de la placa de control del motor paso a paso se ha utilizado material de espesor 1,6mm. La placa de control del motor paso a paso se ha diseñado para ser montada sobre una placa comercial con microcontrolador que permite programar la interfaz de interpretación de comandos recibidos por el bus I2C. Las siguientes imágenes muestran los circuitos fabricados para este demostrador.



Figura 126. Placas de circuitos fabricadas para el demostrador SMART ARM PRO (I)



Figura 127. Placas de circuitos fabricadas para el demostrador SMART ARM PRO (II)

Los circuitos principales para el demostrador SMART SHOE se han realizado sobre sustrato flexible para su posterior termoconformado. En general se han termoconformado primero las pistas impresas y a continuación se han montado los componentes, salvo en el caso del circuito impreso sobre ABS negro, en el que se han montado primero los componentes, tal y como se ha mostrado en la descripción de la tarea 5.3.

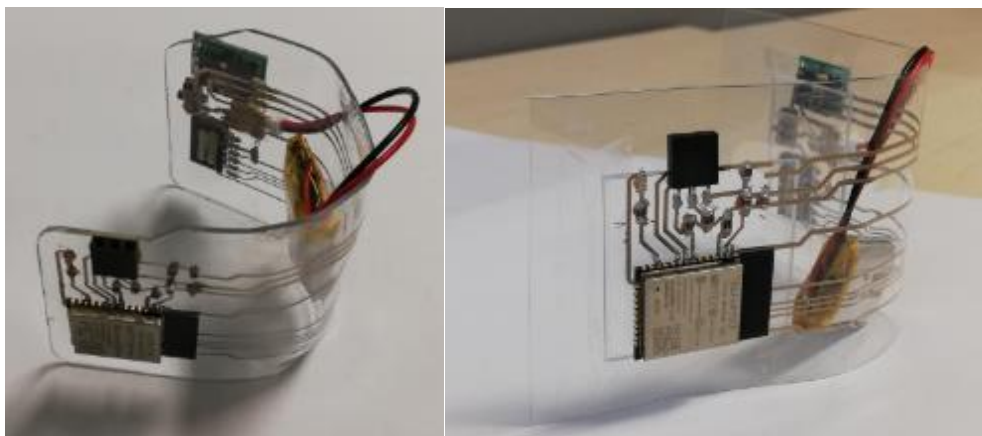


Figura 128. Placas de circuitos fabricadas para el demostrador SMART SHOE sobre policarbonato de espesor 1mm (izquierda) y espesor 500 micras (derecha).

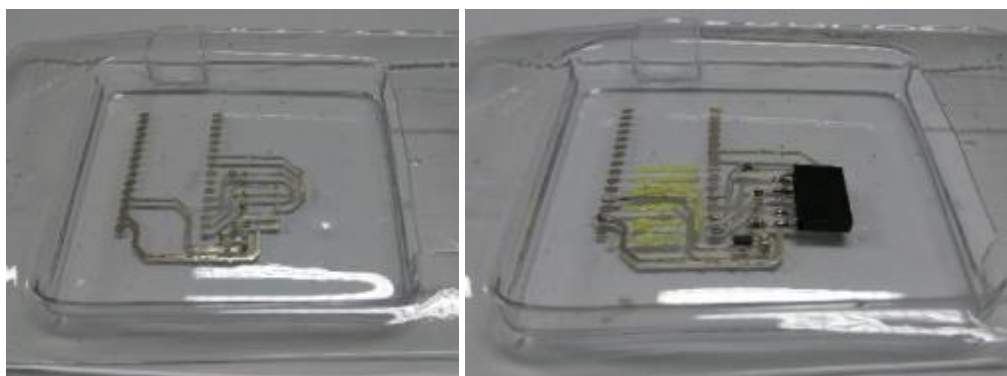


Figura 129. Circuito RFID con algunos componentes montados con adhesivos (superior)

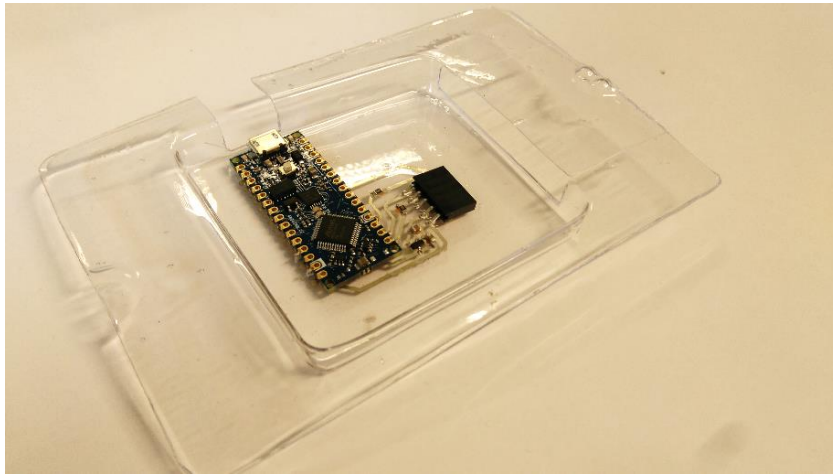


Figura 130. Circuito RFID con componentes montados y curado (inferior).

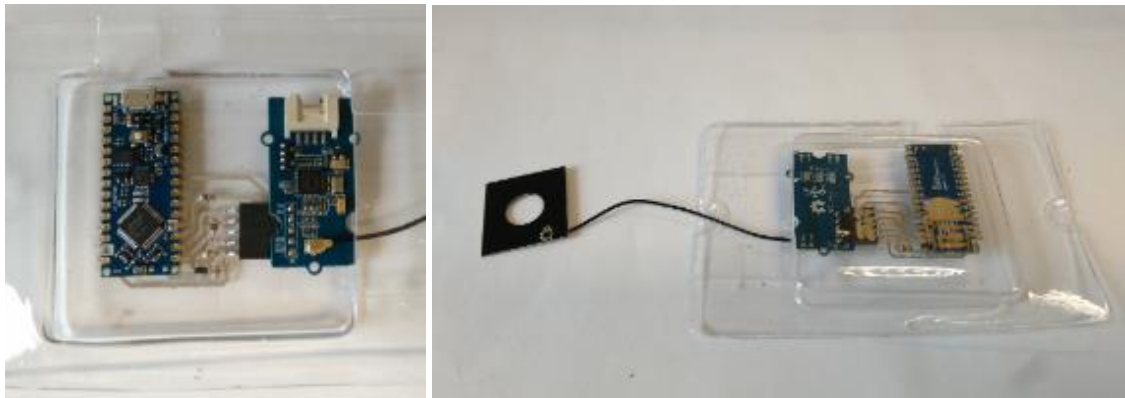


Figura 131. Circuito RFID con componentes adicionales necesarios para su funcionamiento. Derecha, el circuito con el sustrato sirviendo de envoltente protectora.

Por otro lado, se han montado los componentes adicionales que forman parte de estos circuitos. En el caso del circuito de monitorización, se ha soldado el cableado entre sensores de presión y conector.

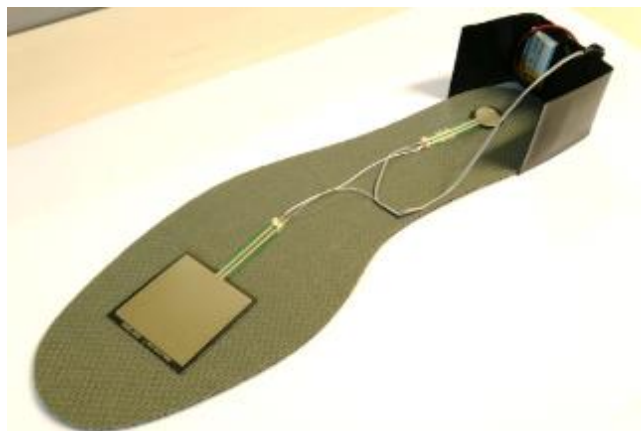


Figura 132. Conexión de sensores de presión del demostrador SMART SHOE.

En el caso del circuito RFID, se ha impreso y curado el diseño de antena RFID sobre policarbonato de 1mm y sobre Intexar. Se han montado conectores y un cableado para la realización de pruebas con estas antenas que permitan observar su capacidad de detección con el circuito RFID.

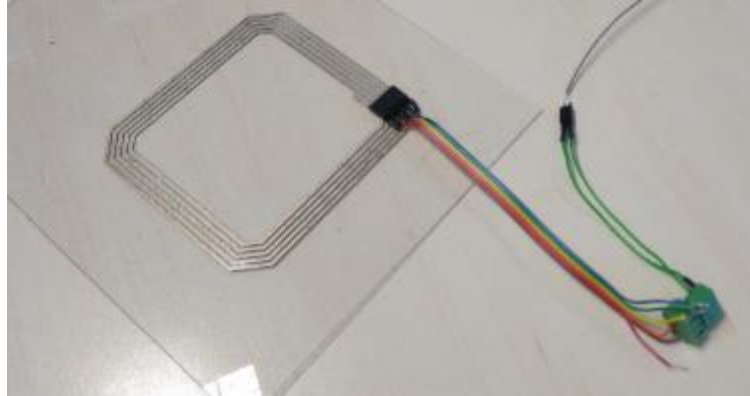


Figura 133. Cableado para la realización de pruebas experimentales.

#### 3.6.4.2 PROGRAMACIÓN

En la segunda fase de esta tarea se realiza la programación de los circuitos integrados que miden y controlan las señales de los sistemas demostradores. Esta programación permite realizar las primeras pruebas de funcionamiento de los circuitos y el ajuste de algunos parámetros y funcionalidades antes de la integración de todo el demostrador.

##### ***Desarrollo de software para demostrador SMART ARM PRO***

En este caso se han desarrollado dos programas, uno para la placa de control situada en el hombro y otro para la placa de control del motor. El programa de la placa de control es similar al desarrollado en el SMART ARM por lo cual se usa éste como punto de partida.

La placa de control es la encargada de recibir y procesar la información de los acelerómetros y botones y actuar en consecuencia. Además, coordina el movimiento que ha de realizar el motor para llevar a cabo cada uno de los ejercicios. Para ello, la placa de control tiene dos botones, uno sirve para encender/apagar dicha placa de control (con pulsaciones largas) además de comenzar y finalizar la ejecución, y el otro para incrementar el número del programa que se desee ejecutar. Una vez encendido el dispositivo, seleccionado el programa a ejecutar y pulsado el botón de comienzo, el dispositivo debe comprobar que el programa se ejecute de manera adecuada. Se emplean señales sonoras (zumbador) y/o luminosas (LEDs) para notificar al usuario cuando va a comenzar a ejecutar el ejercicio, el inicio del movimiento del motor, cuando finaliza y si se está realizando de manera correcta. La estimación de la posición del brazo y la muñeca se realiza a través de la información proporcionada por los acelerómetros que se encuentran en la placa de control y en la placa auxiliar.

Los posibles ejercicios a realizar y que se pueden seleccionar se encuentran pre-programados en el microcontrolador de la placa de control, es decir, los movimientos permitidos en la realización de dicho ejercicio, así como las repeticiones y las tolerancias permitidas. Una vez finalizado el ejercicio, el sistema queda a la espera de una nueva selección de programa y a la pulsación del botón de comienzo.

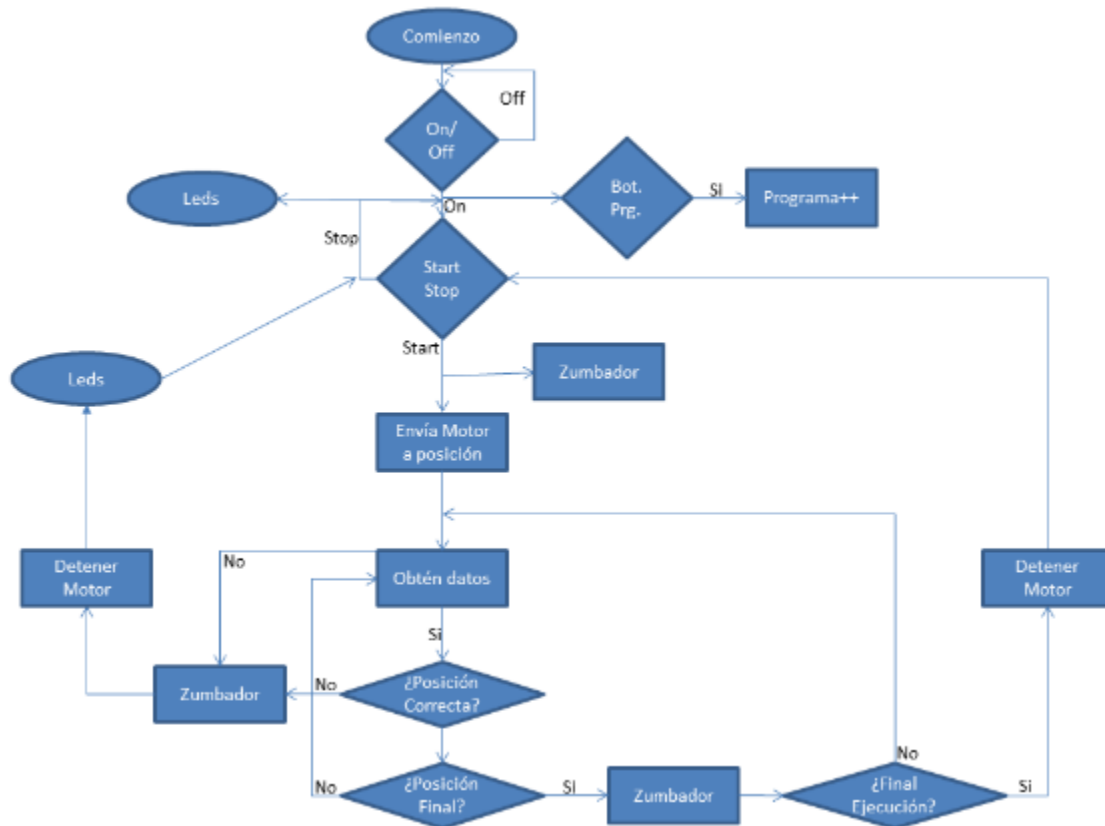


Figura 134. Flujograma implementado en la placa de control del SMART ARM PRO

La placa de control del motor es la encargada de recibir órdenes de movimiento del motor a través de comandos empleando el bus de comunicaciones I2C de los sensores externos a la placa de control principal. Por lo tanto, en la placa de control de motor se ha implementado un dispositivo esclavo I2C que está a la espera de que el dispositivo maestro (la placa de control del hombro) le envíe peticiones de movimiento o datos. Una vez recibida una petición de movimiento la placa de control procesa dicha información y genera las señales adecuadas para el driver. En este caso al controlar un motor paso a paso las señales que se envía al driver son un tren de pulsos indicando el número de pasos que se desea mover el motor y una señal digital que indica la dirección en la cual ha de moverse el motor.

#### **Desarrollo de software para demostrador SMART SHOE**

El desarrollo de software necesario para el demostrador SMART SHOE ha precisado tres programaciones:

- Programa para el microcontrolador del circuito monitor.
- Programa aplicación PC para la recepción y muestra de datos del monitor.
- Programa para el microcontrolador del circuito lector RFID.

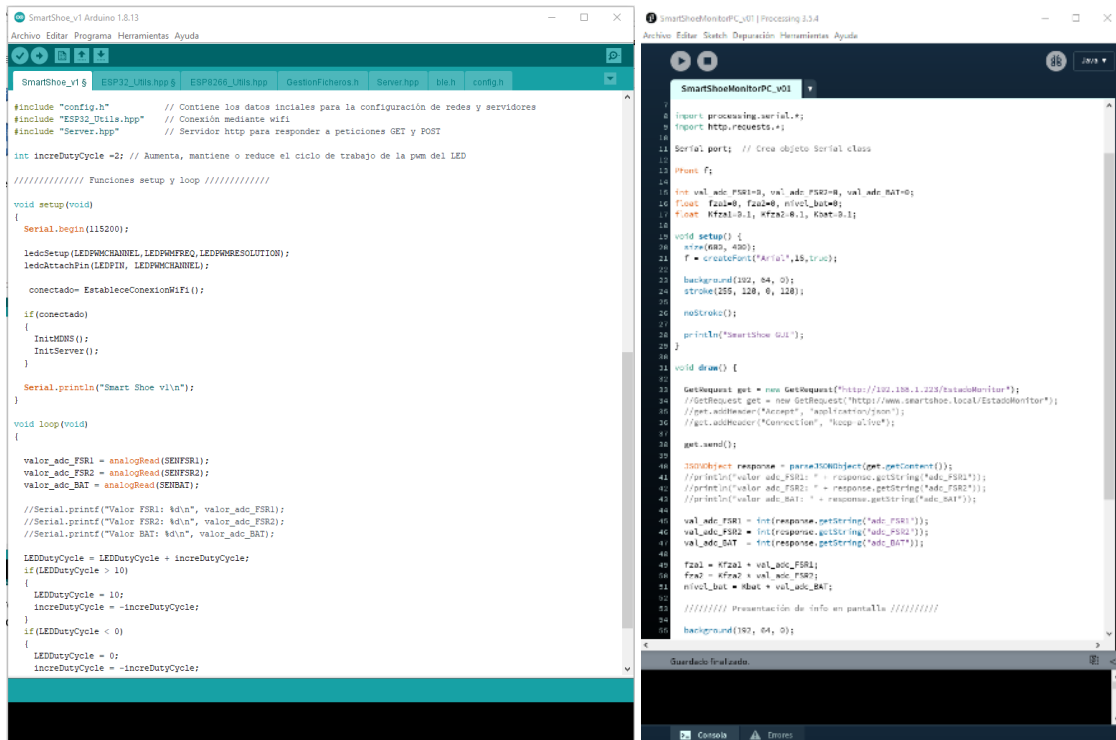
El microcontrolador del **circuito monitor** permite establecer comunicaciones WiFi. Dado que el circuito monitor no utiliza interfaz de usuario con pulsadores, no existen diferentes opciones o estados de funcionamiento. La tarea principal e iterativa del circuito es determinar los datos correspondientes a las medidas de los sensores y transmitir estos datos al dispositivo que se encuentre conectado de forma inalámbrica. La complejidad de la programación se encuentra

---

principalmente en la creación de la comunicación inalámbrica. Se ha incluido también un control del LED del circuito mediante PWM, de modo que durante el funcionamiento el LED parpadea con intensidad baja y variable para obtener un bajo consumo.

Se ha creado un programa para este módulo con el siguiente funcionamiento. Por un lado, cuando el dispositivo se enciende con el interruptor del circuito, el programa comienza con la configuración de puertos de entrada y lectura mediante ADCs, puerto de salida con PWM, y la configuración de comunicaciones. Por un lado inicializa comunicaciones serie a 115200 baudios por si se conecta mediante cable para la programación o depuración del módulo, y por otro lado inicializa la comunicación WiFi como punto de acceso. Esto quiere decir que el dispositivo crea su propia red WiFi, a la que se podrán conectar los dispositivos de lectura de datos. Una vez activado como punto de acceso, el programa crea un servidor web para la gestión de peticiones GET por dispositivos externos. Estas peticiones son las que solicitarán al micro que envíe datos de los sensores a los dispositivos externos conectados a su WiFi. Este servicio de peticiones trabaja de forma asíncrona, es decir, puede ocurrir en cualquier momento y no de forma periódica. Por otro lado, en un bucle principal del programa, el microcontrolador lee de forma periódica los sensores, almacena los datos en variables y modifica la iluminación del LED. Cuando llega una petición GET al servidor, el programa envía los últimos datos almacenados en las variables.

Se ha creado una aplicación PC para la recepción de los datos. El programa ejecuta un bucle principal en el que realiza tres tareas básicas. Primero envía la solicitud GET al servidor web del micro a través de la WiFi y espera la recepción de los datos. A continuación estima la fuerza o presión a la que corresponde el valor recibido desde el circuito monitor. Finalmente muestra en pantalla los valores recibidos del servidor y los valores de fuerza estimados. Como la estimación de fuerzas se realiza en la aplicación, el ajuste de los parámetros de conversión entre el dato del ADC y la estimación de fuerza, se puede realizar sin necesidad de reprogramar el microcontrolador.



```

SmartShoe_v1 $ ESP32_Lm1a.hpp $ ESP3266_Lm1a.hpp $ GestionFicheros.h $ Server.hpp $ ble.h $ config.h

#include "config.h" // Contiene los datos iniciales para la configuración de redes y servidores
#include "ESP32_Lm1a.hpp" // Conexión mediante wifi
#include "Server.hpp" // Servidor http para responder a peticiones GET y POST

int increDutyCycle = 2; // Aumenta, mantiene o reduce el ciclo de trabajo de la pum del LED

////////// Funciones setup y loop //////////
void setup(void)
{
    Serial.begin(115200);

    ledcSetup(LEDPMCHANNEL, LEDPMFREQ, LEDPMRESOLUTION);
    ledcAttachPin(LEDPIN, LEDPMCHANNEL);

    conectado = EstableceConexionWiFi();

    if (conectado)
    {
        InitMMS();
        InitServer();
    }

    Serial.println("Smart Shoe v1\n");
}

void loop(void)
{
    valor_adc_FSRI = analogRead(SENFSRI);
    valor_adc_FSR2 = analogRead(SENFSR2);
    valor_adc_BAT = analogRead(SENBAT);

    //Serial.printf("Valor FSRI: %d\n", valor_adc_FSRI);
    //Serial.printf("Valor FSR2: %d\n", valor_adc_FSR2);
    //Serial.printf("Valor BAT: %d\n", valor_adc_BAT);

    LEDDutyCycle = LEDDutyCycle + increDutyCycle;
    if (LEDDutyCycle > 10)
    {
        LEDDutyCycle = 10;
        increDutyCycle = -increDutyCycle;
    }
    if (LEDDutyCycle < 0)
    {
        LEDDutyCycle = 0;
        increDutyCycle = -increDutyCycle;
    }
}

SmartShoeMonitorPC_v01

import processing.serial.*;
import http.requests.*;

Serial port; // Cree objeto Serial class

PFont f;

int val_adc_FSRI=0, val_adc_FSR2=0, val_adc_BAT=0;
float fza1=0, fza2=0, nivolu_bat=0;
float kfza1=0.1, kfza2=0.1, kbat=0.1;

void setup() {
    size(600, 400);
    f = createFont("Arial", 15, true);
    background(192, 64, 0);
    stroke(255, 255, 0, 255);
    noStroke();
    println("SmartShoe GUI");
}

void draw() {
    GetRequest get = new GetRequest("http://192.168.1.222/EstadoMonitor");
    //GetRequest get = new GetRequest("http://www.smartshoe.local/EstadoMonitor");
    //get.addHeader("Accept", "application/json");
    //get.addHeader("Connection", "keep-alive");
    get.send();

    JSONObject response = parseJSONObject(get.getResponse());
    //println("valor_adc_FSRI: " + response.getString("adc_FSRI"));
    //println("valor_adc_FSR2: " + response.getString("adc_FSR2"));
    //println("valor_adc_BAT: " + response.getString("adc_BAT"));

    val_adc_FSRI = int(response.getString("adc_FSRI"));
    val_adc_FSR2 = int(response.getString("adc_FSR2"));
    val_adc_BAT = int(response.getString("adc_BAT"));

    fza1 = kfza1 + val_adc_FSRI;
    fza2 = kfza2 + val_adc_FSR2;
    nivolu_bat = kbat + val_adc_BAT;

    ////////// Presentación de info en pantalla //////////
    background(192, 64, 0);
}
    
```

Figura 135. Captura de los programas desarrollados para el circuito de monitorización y para la aplicación PC de recepción de datos en el demostrador SMART SHOE.

El **circuito lector RFID** integra un módulo con microcontrolador que debe ser programado para funcionar como interfaz de comandos entre un ordenador y el módulo de comunicación RFID. Este circuito lector RFID se ideó para estar fijo en una instalación, con alimentación mediante cable y sin batería. Se aprovecha la conexión USB con un ordenador para proporcionar esta alimentación y además realizar la comunicación mediante comunicación serie.

El programa realiza la siguiente ejecución. Primero define los puertos para las comunicaciones y para el control del LED que servirá de indicador de funcionamiento activo. Inicializa la comunicación serie con el ordenador a 115200 baudios, y la comunicación serie con el circuito integrado PN532 del módulo RFID. Una vez establecidas las comunicaciones, de forma periódica (cada 500 milisegundos) el microcontrolador consulta al módulo RFID si ha realizado alguna lectura. Si se ha producido la lectura, el microcontrolador recibe los datos, extrae el identificador de la tarjeta y envía el dato por el puerto serie al ordenador. En el ordenador se observan los datos recibidos en la pantalla utilizando una aplicación comercial para este tipo de comunicaciones. Concretamente se ha utilizado la aplicación Termite. No es necesario por tanto la programación de una aplicación PC para esta función.

```

SmartShoeReader_v3 Arduino 1.8.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

SmartShoeReader_v3.g
//Comunicación con Web Serial API: https://codealabs.developpez.com/codealabs/web-serial/#

#include <MF532.h>
#include <MF532.h>
#include <MF532Adapter.h>

MF532 mf532(MF532Adapter);
NfcAdapter nfc(mf532);

String tagId;

void setup() {
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

  Serial.begin(115200);
  while (!Serial) {}
  Serial.println("¡WELCOME! - SmartShoe - Lector RFID/NFC - 2020!");
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  nfc.begin();
}

void loop() {
  if (nfc.tagPresent()) {
    NfcTag tag = nfc.read();
    tag.print();
    Serial.println("-----");
    tagId = "TAG-ID: " + tag.getIdString() + "\n";
    Serial.println(tagId);
    delay(1000); //Para evitar que se repitan las lecturas
  }

  digitalWrite(LED_BUILTIN, !digitalRead(LED_BUILTIN)); //toggle led
  delay(500);
}

```

Figura 136. Captura del programa desarrollado para el circuito de lectura RFID del demostrador SMART SHOE.

### 3.6.5 Tarea 5.5. Integración en prototipos

En esta tarea se lleva cabo la integración de todos los componentes en los dos demostradores desarrollados en el hito 5. Esto incluye por un lado la fabricación de las partes mecánicas que forman estructura o envoltentes del sistema, la adquisición de accesorios o componentes auxiliares, y el montaje y la conexión de los circuitos electrónicos (rígidos y termo-conformados) comentados en los apartados anteriores.

#### 3.6.5.1 INTEGRACIÓN DEL DEMOSTRADOR SMART ARM PRO

La estructura articulada formada por dos piezas mecánicas ha sido fabricada en poliamida mediante fabricación aditiva. Una vez fabricadas estas piezas se ha comprobado su correcta adaptación con los otros dos elementos que forman la estructura articulada, las barras metálicas inferiores y el actuador lineal.

Por otro lado se ha procedido a fabricar en poliamida las envoltentes que se han diseñado en la tarea 5.1 y en la que se alojan las PCBs de este demostrador. El montaje de la envoltente fija sobre la parte superior del brazo ha permitido ajustar el diseño de las pistas impresas para la parte superior del brazo. Las piezas fabricadas en poliamida con la envoltente montada en la parte superior se muestran en las siguientes imágenes.

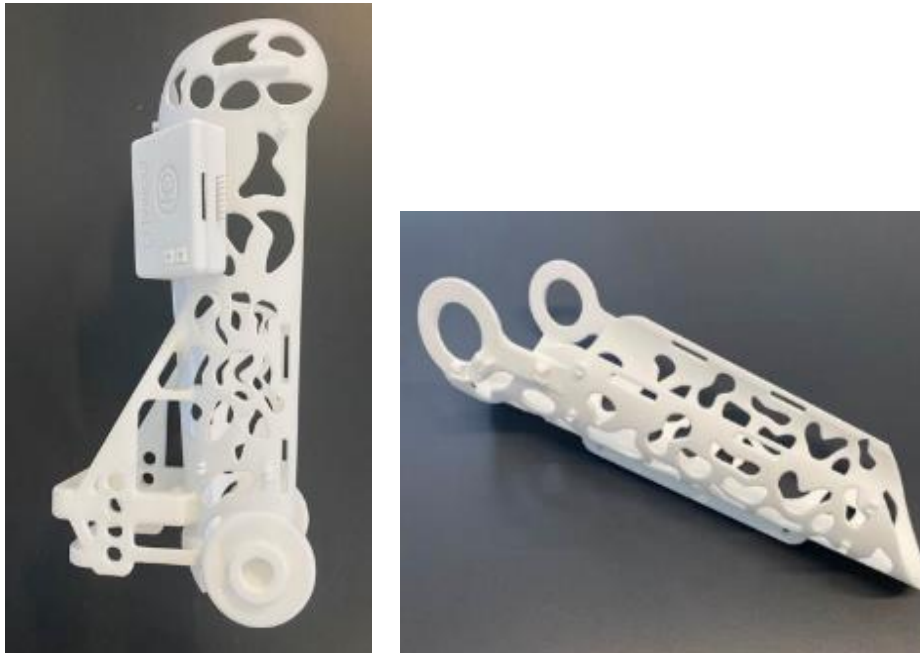


Figura 137. Partes mecánicas del brazo articulado fabricadas en poliamida para el demostrador SMART ARM PRO

Finalmente se procede al montaje de los circuitos impresos termo-conformados sobre la estructura del demostrador conectando las placas electrónicas. También se realiza el montaje del cableado en la zona de la articulación y la conexión con la electrónica del driver del motor. La siguiente figura muestra los resultados de esta integración, con el demostrador completado y preparado para las pruebas de ajuste de funcionamiento y de validación.

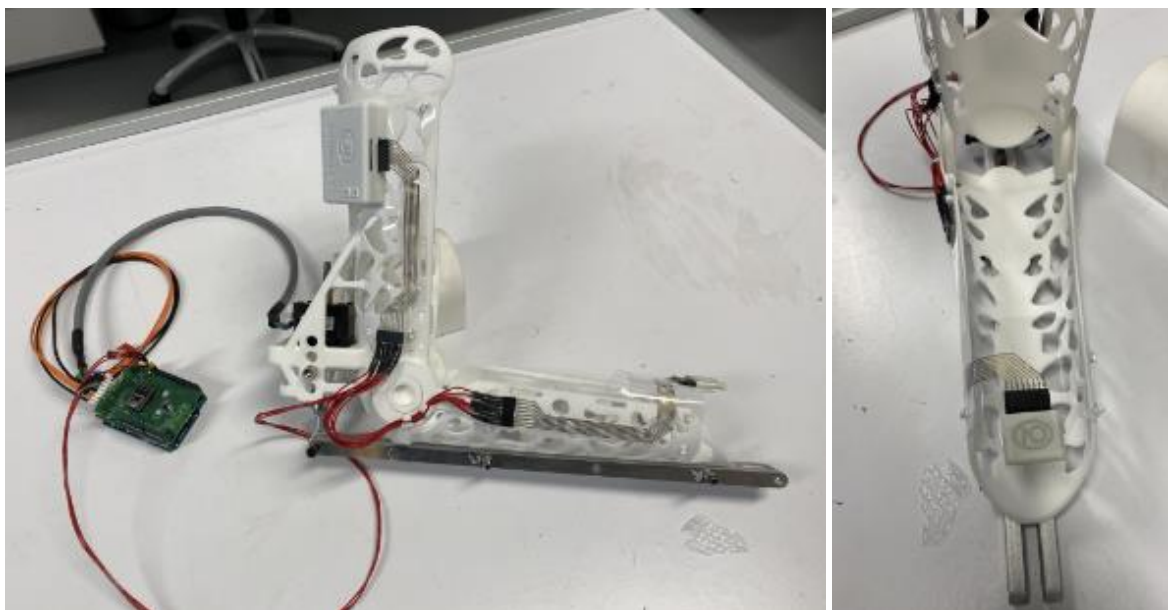


Figura 138. Aspecto final del demostrador SMART ARM PRO

### 3.6.5.2 INTEGRACIÓN DEL DEMOSTRADOR SMART SHOE

Para el demostrador SMART SHOE se han realizado dos integraciones. Por un lado la integración en el calzado de los elementos del sistema monitor, en la que se ha probado la integración de los diferentes circuitos termo-conformados, sobre policarbonato y sobre ABS. Por otro lado la integración de los componentes del lector RFID con una pequeña alfombrilla a efectos demostradores.

En la integración de los elementos en el calzado, los sensores se introdujeron dentro del calzado. Su posición es bajo una plantilla que incluye el propio calzado, aunque para efectos demostrativos y para las fotografías se han dejado estos componentes sobre la plantilla. Los circuitos termoconformados se fijan en la parte posterior del talón. La fijación se realiza de forma sencilla utilizando cinta adhesiva doble cara, que se adhiere bien al tener el calzado una textura plástica en esta zona. Las siguientes imágenes muestran la integración del circuito en policarbonato y en ABS sobre el calzado seleccionado para el demostrador.



Figura 139. Circuito de policarbonato (espesor 1mm) termo-conformado integrado en el calzado



Figura 140. Circuito sobre ABS termoconformado integrado en el calzado

Para la integración del circuito lector RFID, se recortó un área rectangular de alfombrilla de goma. Bajo esta alfombrilla se sitúa la antena RFID que se vaya a utilizar. La antena se conecta al circuito lector, que se ha dejado alejado de la alfombrilla.

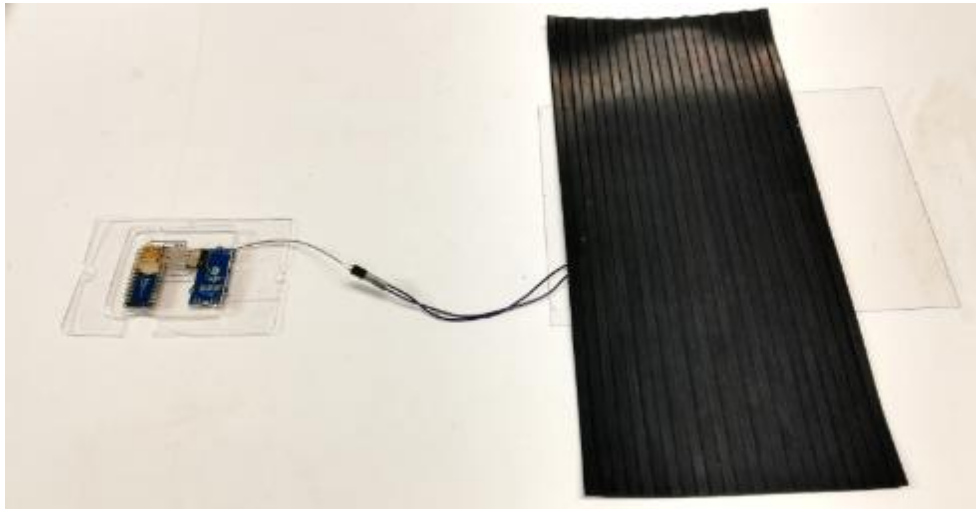


Figura 141. Circuito lector RFID termoconformado y área de lectura de etiquetas para el demostrador SMART SHOE

### 3.7 HITO 6. VALIDACIÓN

El objetivo del Hito 6 es llevar a cabo una validación detallada de los productos y los procesos desarrollados en los hitos anteriores. El Hito 6 está por tanto orientado a dar apoyo a los demás hitos y asegurar que los productos desarrollados puedan responder a las necesidades del mercado en cuanto a robustez y durabilidad, que son limitaciones de las tecnologías actuales y aspectos clave del proyecto.

#### 3.7.1 Tarea 6.1. Desarrollo de procedimientos de validación

En esta tarea se desarrollan los procedimientos con los que validar los productos desarrollados y que abarcan desde la validación funcional, hasta los ensayos de durabilidad, mecánicos y electromagnéticos. Los ensayos se realizan bien a probetas (especialmente en el caso de los ensayos destructivos) o bien a prototipos completos. Se mantiene en todo momento una comunicación directa con los equipos desarrollando los procesos y prototipos del proyecto.

##### 3.7.1.1 PROCEDIMIENTO Y EQUIPOS PARA VALIDACIÓN FUNCIONAL

La validación funcional de un producto es el primer paso para asegurar que el producto cumple con las especificaciones de diseño, asegurando que es válido para cumplir la función para la que fue concebido y que satisface las necesidades de los usuarios potenciales.

Se incluye en esta tarea tanto la verificación como la validación, entendiendo la verificación funcional como el conjunto de procedimientos para verificar que el sistema o subcomponentes del mismo realizan las diferentes funciones esperadas, y la validación, como los ensayos o simulaciones de distintos flujos de proceso que pudieran implementar usuarios con diversos perfiles.

Para la verificación funcional de los dispositivos electrónicos desarrollados los principales equipos de laboratorio a utilizar son el osciloscopio y el multímetro. El osciloscopio se emplea para analizar las señales temporales en los dispositivos para así poder validar las señales de sincronización y comunicación entre los distintos elementos del dispositivo. El multímetro se utiliza para comprobar la conductividad y conexionado de pines, las soldaduras y los niveles de alimentación en las placas de circuito impreso desarrolladas.



Figura 142. Fotografía de osciloscopio (parte superior) y multímetro (parte inferior) empleados en tareas de validación y verificación

### **3.7.1.2 PROCEDIMIENTO Y EQUIPO PARA VALIDACIÓN DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA**

La compatibilidad electromagnética (CEM) se define como la habilidad de un dispositivo electrónico de funcionar correctamente en su entorno, sin verse afectado por las perturbaciones generadas por otros equipos y a la vez no causar perturbaciones en otros equipos.

Antes de salir al mercado todos los productos tienen que cumplir con las directivas europeas que les son de aplicación pero para lograrlo es necesario, entre otras cosas, superar los ensayos de compatibilidad electromagnética. Para el caso de los equipos convencionales, como electrodomésticos o equipos industriales, existen normas específicas que les afectan, lo cual simplifica su proceso de marcado CE. Para el caso de nuevos dispositivos, como es el caso de los wearables, no existe normativa específica.

Los ensayos CEM se pueden dividir en dos grandes grupos, ensayos de inmunidad y de emisión. Los ensayos de inmunidad evalúan el comportamiento del equipo frente a interferencias simuladas en el laboratorio pero que van a ser similares a las que se tendrían en un entorno real. Los ensayos de emisión evalúan las interferencias emitidas por nuestro equipo.

Con la información que se dispone en la actualidad, los ensayos de inmunidad de aplicación a un dispositivo wearable serían:

- Descargas electrostáticas. UNE-EN610004-2
- Inmunidad a Campos Electromagnéticos Radiados. UNE-EN610004-3

Para el caso de emisión se tiene:

- Emisiones Radiadas. EN55011

Las normas de descargas electrostáticas se relacionan al contacto con la persona, por el uso de determinados tejidos, el cuerpo humano adquiere una carga electrostática, que es liberada en determinadas situaciones y que afecta a los sistemas electrónicos, llegando incluso a destruir ciertos componentes. El caso de la inmunidad a Campos Electromagnéticos lo que se busca es que el dispositivo sea inmune a las interferencias generadas por todos aquellos equipos que disponen de tecnologías de comunicación radioeléctrica. La tercera norma establece los límites máximos que puede emitir nuestro equipo al espectro radioeléctrico y que son evaluados dentro de una cámara semianecoica.

La evaluación de la conformidad de cada norma se realiza con equipamiento específico de laboratorio. Existen equipos comerciales para evaluar las normas vigentes, por ejemplo en la Figura 143 se muestra el receptor EMI ESU8, del fabricante Rohde&Schwarz, equipo utilizado para medir dentro de una cámara anecoica las interferencias procedentes de cualquier dispositivo según la UNE-EN55011 entre otras. Este equipo puede adaptarse a la medida de interferencias de un abanico muy grande de normas siempre que la frecuencia a medir este dentro del rango del equipo.

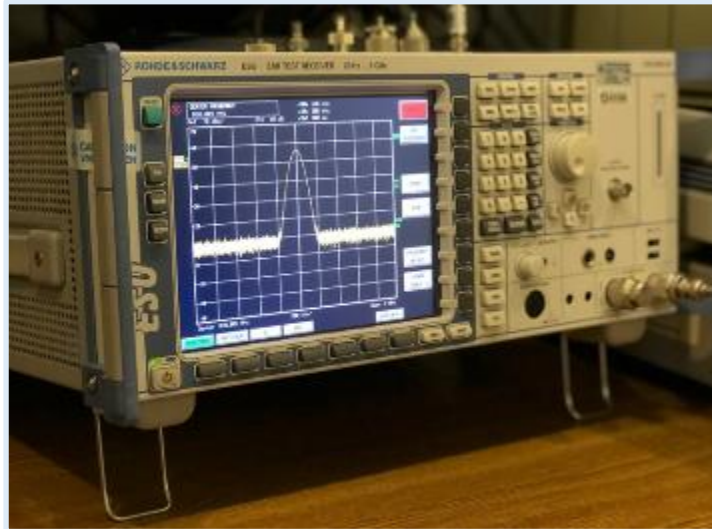


Figura 143. Equipo utilizado habitualmente para medida de interferencias electromagnéticas

Para la parte de inmunidad no se dispone de demasiada flexibilidad. Por lo general los equipos que existen en el mercado están pensados para unas pocas normas muy concretas. Desde el punto de vista práctico para los wearables, las normas de inmunidad se consideran insuficientes y por tanto la oferta de equipos de laboratorio para este fin también lo es. Por este motivo se ha decidido diseñar y fabricar un equipo a medida para esta aplicación.

#### **Diseño y fabricación de un equipo para ensayos electromagnéticos**

Se ha realizado el diseño de un prototipo de equipo de laboratorio que permita generar una serie de perturbaciones definidas a medida que permitan evaluar el comportamiento del wearable frente a éstas. El prototipo desarrollado a medida tiene una arquitectura semejante a la de un equipo comercial pero empleando un diseño abierto que permite diseñar ensayos a medida y modificar parámetros según se necesite.

La arquitectura del sistema se puede dividir en varias capas: i) interfaz de usuario (formado por una placa de desarrollo Raspberry pi y una pantalla táctil); ii) placa de control basada en microcontrolador PIC (hace de interfaz entre la Raspberry pi y la electrónica de potencia); iii) electrónica de potencia. La parte de electrónica de potencia se encarga de la generación de la perturbación a aplicar al equipo bajo ensayo. Se basa en la carga y descarga de un banco de condensadores con la ayuda de dos IGBTs (Insulate Gate Bipolar Transistor). Uno de ellos permite la carga del banco de condensadores y el otro permite su descarga. Las señales de activación de los IGBTs se generan en la placa de control por el microcontrolador PIC.

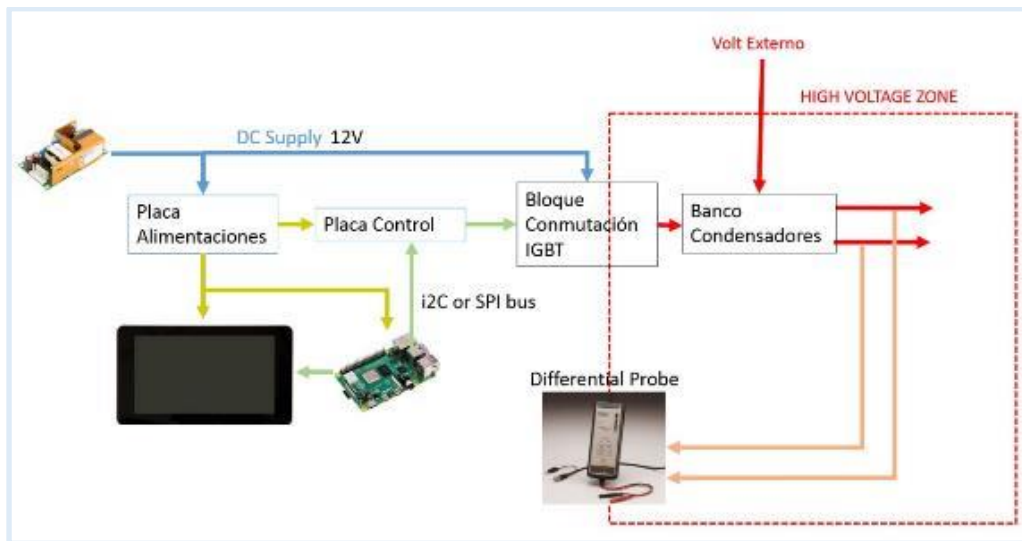


Figura 144. Arquitectura del equipo diseñado a medida para ensayos electromagnéticos

Una vez realizado el diseño de detalle de todos los componentes se ha procedido a fabricar todas las PCBs y montar sobre ellas los componentes necesarios. Se han integrado todos los elementos, incluida la pantalla para la interfaz de usuario, en una envolvente adecuada. El resultado puede observarse en la Figura 145 y en la Figura 146, en la que se muestran en el osciloscopio los transitorios generados por el equipo.



Figura 145. Equipo diseñado a medida para ensayos electromagnéticos

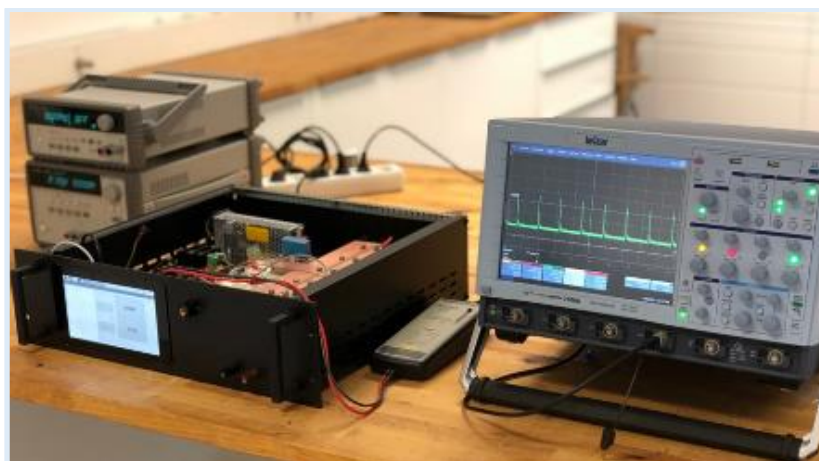


Figura 146. Detalle del equipo diseñado a medida para ensayos electromagnéticos.

### 3.7.1.3 PROCEDIMIENTO Y EQUIPO PARA VALIDACIÓN MECÁNICA

En esta tarea se han definido los procedimientos para llevar a cabo ensayos mecánicos a los componentes de los sistemas wearables. La caracterización mecánica tanto de los sustratos como de los componentes es uno de los procesos claves en el desarrollo de wearables, necesaria para asegurar la robustez mecánica de los mismos y su estabilidad en condiciones normales de operación.

Existen algunos ensayos descritos en la documentación desarrollada por la organización internacional IPC, centrada en mejorar la calidad de la industria electrónica. En el año 2017 se publicó la primera versión de la guía IPC-9204: Guideline on Flexibility and Stretchability Testing for Printed Electronics, que propone algunos métodos para la validación mecánica de dispositivos fabricados por electrónica impresa.

Los ensayos más representativos son los siguientes:

- *Ensayo de flexado.* Se pueden realizar sobre muestras flexibles o elásticas para comprobar que pueden enrollarse sobre cilindros de distintos diámetros.
- *Ensayo de tracción.* Su propósito es monitorizar el comportamiento de un dispositivo electrónico durante su tracción. Se monitoriza tanto la fuerza como la elongación y se continúa el ensayo hasta alcanzar la rotura, la elongación máxima para la aplicación, o la discontinuidad eléctrica.
- *Ensayo de fatiga* (o ensayo de tracción cíclico). En este caso se repite el ensayo de tracción hasta un límite de elongación predefinido durante un número definido de ciclos.

Para la realización de ensayos de tracción y fatiga se ha decidido fabricar un equipo a medida en IDONIAL por no contar con ningún equipo de ensayos que permita realizar este tipo de ensayos en el rango de parámetros requerido tal y como se detalla a continuación. Para ello se incrementó la partida inicialmente prevista para fungibles y accesorios para equipos de medida previa solicitud de cambios al organismo financiador.

#### ***Diseño y fabricación de un equipo para ensayos mecánicos***

Para la realización de los ensayos de tracción y fatiga, se ha desarrollado este equipo que permite el control de elongación y el registro en cada momento de esta elongación y de la fuerza ejercida. El equipo está formado por cuatro elementos principales:

- Un accionamiento lineal para la elongación de la muestra con sistema de medición de desplazamiento.
- Un sistema de medición de fuerza.
- Un sistema de control, adquisición y registro de datos.
- Una estructura bastidor y las mordazas de amarre de muestras

Para el accionamiento lineal se ha optado por emplear un actuador eléctrico que permite un control preciso de la dinámica del movimiento gracias a las curvas de aceleración programables. Se ha optado por un actuador que alcanza una fuerza de 200 N y un recorrido de 350 mm. El propio actuador permite conocer la posición en que se encuentra, no siendo necesario un sensor adicional para estimar la elongación de la muestra. Mecánicamente está formado por un carro móvil montado sobre un husillo de bolas, lo que facilita su integración. Por otro lado viene equipado con un driver que facilita su conexión al sistema de control y que se encarga de gestionar la parte de

potencia del equipo. Es operado con corriente continua y totalmente programable vía software, lo que le concede una enorme flexibilidad a un coste muy contenido.



Figura 147. Actuador eléctrico seleccionado para el accionamiento lineal

Para la medida de fuerza se ha optado por incluir una celda de medición externa. Se ha seleccionado un modelo que permite una carga de hasta 25 kg con una precisión de lectura de  $\pm 0,1\%$ .



Figura 148. Celda de medición de fuerza para equipo de ensayos mecánicos

El sistema de control diseñado consta de una electrónica y un software PC. La electrónica se ha dividido en dos placas para hacer el diseño más modular: placa de control y placa de soporte. En la **placa de control** se tiene el microcontrolador que envía las órdenes al driver del actuador lineal, controlando el movimiento del motor, y recibe e interpreta las señales procedentes del driver y de la celda de medición de fuerza. La placa se comunica con el software del PC para enviar los datos de medidas y recibir los comandos de configuración y ejecución del ensayo. La **placa de soporte** se encarga de conectar la placa del microcontrolador al driver y a la celda de medición de fuerza. Además, proporciona la tensión de alimentación de 3.3V de la placa de control a partir de una fuente externa de 24V. Esta fuente externa se utiliza debido a que la tensión de alimentación del driver es de 24V. El diseño de ambas placas se muestra en la Figura 149.

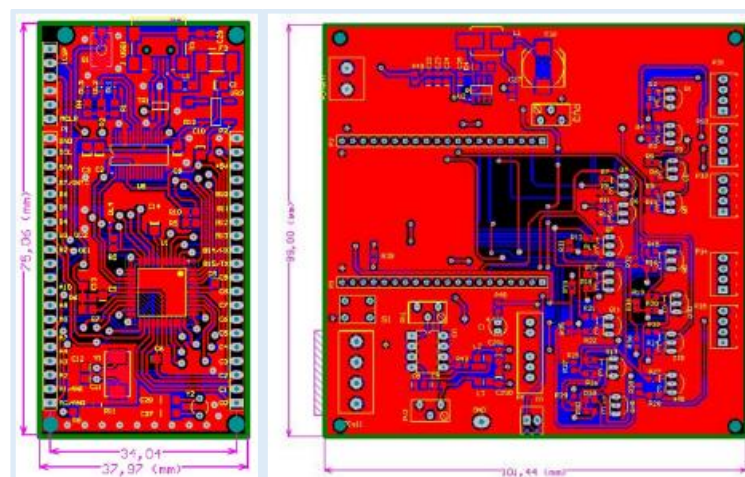


Figura 149. Diseño de la placa de control y placa de soporte

Ambas placas han sido fabricadas e introducidas en una envoltura junto con la fuente de alimentación, tal y como se muestra en la Figura 150.



Figura 150. Carcasa con las placas electrónicas y la fuente de alimentación

Por otro lado, se ha procedido al desarrollo del software de control del equipo que sirve de interfaz de usuario.



Figura 151. Software PC para control de equipo de ensayos mecánicos

Se ha desarrollado en paralelo la estructura bastidor y las mordazas de amarre de muestras. Sobre este bastidor se monta el actuador lineal, su driver, y el sensor de fuerza. Se ha realizado primero el diseño e integración de todos los componentes en un modelo CAD 3D detallado, mostrado en la Figura 152, y se han generado los planos para la fabricación de las diferentes piezas de la estructura y mordazas.

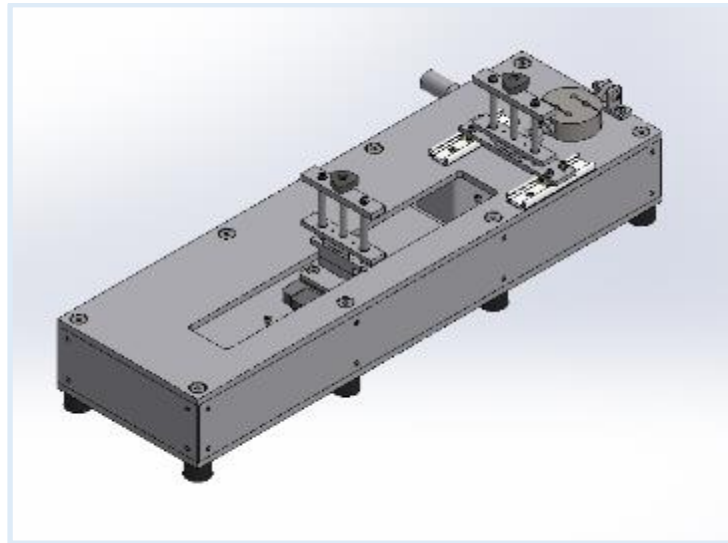


Figura 152. Modelo 3D del equipo de ensayos mecánicos

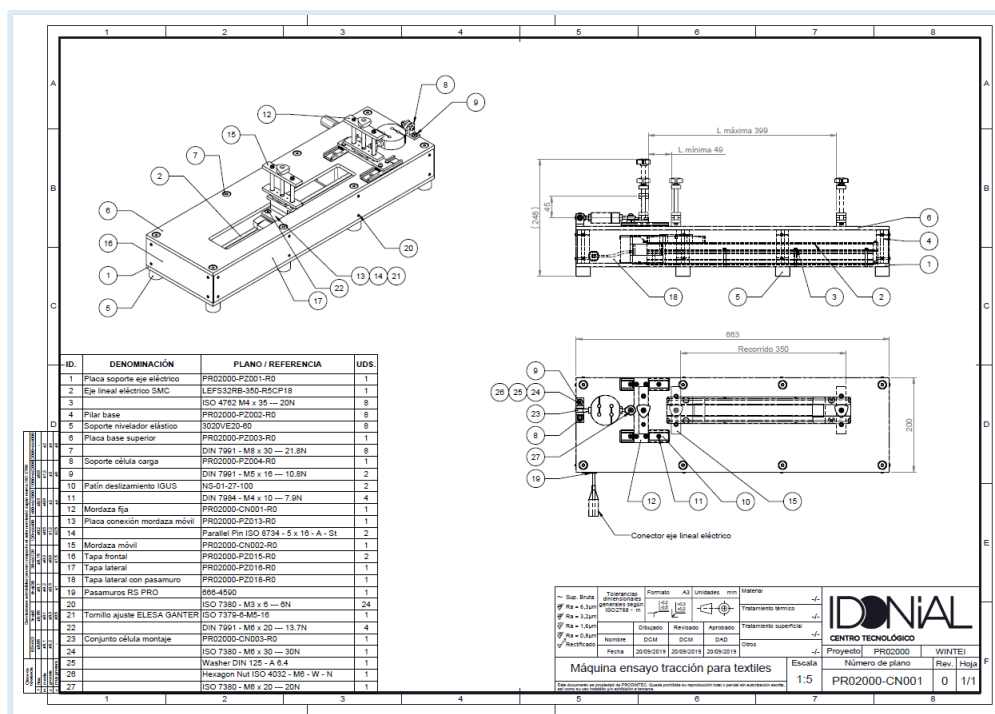


Figura 153. Plano de conjunto del equipo diseñado para ensayos mecánicos

Se ha procedido a la fabricación por mecanizado de las diferentes piezas y la adquisición de los componentes comerciales (accionamientos, guías, pomos, tornillería, etc.) para, una vez acopiados todos los materiales, proceder al montaje final del equipo.



Figura 154. Equipo para ensayos mecánicos diseñado y fabricado en IDONIAL

#### 3.7.1.4 PROCEDIMIENTO Y EQUIPOS PARA ENSAYOS DE DURABILIDAD

En este bloque se engloban principalmente los ensayos ambientales, que se realizan para simular el envejecimiento acelerado de un dispositivo y evaluar el proceso de deterioro de los materiales que lo componen y las interfaces entre ellos. En este grupo de ensayos se incluyen normalmente ensayos de exposición térmica, ciclos térmicos, exposición combinada a calor y humedad, niebla salina, exposición ultravioleta, o diferentes combinaciones o secuencias de ensayos. Antes y después de cada ensayo se realizan medidas de parámetros que definan la funcionalidad del dispositivo, así como inspección visual del mismo. En función de la aplicación, se definen unos valores aceptables de degradación o defectos visuales tras la secuencia de ensayos.

Muchos de estos tests se definen en la familia de normas IEC 60068 de Ensayos Ambientales. Algunos de los más utilizados son:

- Exposición a alta temperatura (HTS). Se realiza para ver el efecto de la temperatura como factor de estrés único y poder detectar modos de degradación activados térmicamente como la oxidación.
- Exposición a calor-humedad (HAST). Se usa para evaluar la durabilidad en entornos húmedos de componentes encapsulados.
- Exposición a calor-humedad cíclico. Se trata de una variante del test anterior en la que se reduce la temperatura y la humedad cíclicamente.
- Exposición a radiación solar. Se realiza para valorar la resistencia a la radiación solar (en especial ultravioleta) de los materiales poliméricos que integran el encapsulado y los sustratos de los dispositivos electrónicos.
- Inmersión en agua. Se realiza para valorar la estanqueidad del encapsulado y la capacidad del dispositivo de someterse a ciclos de lavado suaves.

IDONIAL cuenta con todos los equipos necesarios para realizar estos ensayos por lo que en este caso no ha sido necesario realizar adaptaciones ni desarrollar equipos específicos para los ensayos. En particular, están disponibles las cámaras de ensayos ambientales mostradas en la Figura 155 y la Figura 156.



Figura 155. Cámara Heareus de IDONIAL para ensayos de calor-humedad



Figura 156. Cámara QUV de IDONIAL para ensayos de calor-humedad

### 3.7.2 Tarea 6.2. Validación funcional

El objetivo de esta tarea es llevar a cabo la validación funcional de los demostradores y sus bloques constituyentes.

#### 3.7.2.1 VERIFICACIÓN FUNCIONAL DEL DEMOSTRADOR SMART ARM

La verificación se realiza en varias etapas. En primer lugar se realiza la verificación de cada uno de los elementos que componen el sistema. A continuación se procede a validar el conjunto, utilizando

un cableado convencional para la conexión. Finalmente, se realiza la verificación utilizando el conector basado en electrónica flexible.

Seguidamente se detallan de manera breve cada una de las pruebas atómicas que se han realizado:

- *Prueba de batería y gestor de batería.* Esta prueba consiste en conectar la batería cargada y comprobar que las tensiones en cada elemento de las placas son las adecuadas. Una segunda prueba con la batería es comprobar la carga de la misma por parte del gestor de batería.
- *Prueba del microcontrolador.* La prueba más sencilla para comprobar si funciona correctamente es crear un programa sencillo que cada cierto tiempo (en este caso se ha elegido cada segundo) cambie el estado lógico de una o varias de las salidas digitales. El resultado se comprueba con un osciloscopio y así se valida el correcto funcionamiento del microcontrolador.
- *Prueba de los botones.* La comprobación del funcionamiento de los botones mecánicos se realiza en dos etapas. La primera consiste en evaluar la tensión de salida del botón con un multímetro. En la segunda etapa se implementa un programa para detectar dicha transición en los pines del microcontrolador.
- *Prueba del acelerómetro.* La evaluación del correcto funcionamiento se realiza a través de un programa sencillo de comunicación entre el microcontrolador y el acelerómetro. Dicho programa se encarga de configurar el acelerómetro y hacer peticiones de los datos de aceleración instantánea por cada eje así como luego procesar dicha información.
- *Prueba del zumbador.* En este caso la validación del funcionamiento del zumbador se realiza enviando desde el microcontrolador una señal PWM a la entrada del driver que lo controla y se comprueba que emite sonido y que variando la frecuencia de la señal enviada el tono del zumbador varía también.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de todos los elementos individuales que conforman el dispositivo SMART ARM se procede a implementar la solución final. Las pruebas de validación, con la configuración mostrada en la Figura 157, han consistido en la realización de dos ejercicios sencillos pre-programados en el microcontrolador. El primero consiste en un movimiento suave de inclinación de la placa de control, partiendo de una posición inicial con la placa colocada en posición horizontal sobre una mesa y con el microcontrolador visible. Cuando el usuario pulse el botón de comienzo la placa generará un sonido para que el usuario comience el giro de la placa respecto a su lado más largo de la placa hasta la posición final, la placa en posición vertical formando un ángulo de 90° respecto a la mesa. Cuando se alcance la posición final se indica con un sonido y después de una pausa de un par de segundos se emite otro sonido para deshacer el giro y volver a la posición inicial. Si durante el movimiento el usuario realiza el giro demasiado rápido, la posición inicial, final no es la adecuada o se realiza algún movimiento no permitido la placa de control genera un pitido de error y se debe volver a la posición inicial y volver a pulsar el botón de comenzar el ejercicio.

El segundo ejercicio es igual que el primero con la diferencia de que en vez de utilizar la placa de control se emplea la placa auxiliar.



Figura 157. Foto del montaje de validación del SMART ARM

Una vez validado el funcionamiento básico del dispositivo SMART ARM en condiciones de laboratorio, se ha pasado a realizar la integración completa del demostrador (tarea 4.5) y posteriormente se ha repetido todo el proceso de verificación con el sistema final, obteniendo resultados también satisfactorios.

### 3.7.2.2 VERIFICACIÓN FUNCIONAL DEL DEMOSTRADOR HMITEXT

La verificación del demostrador HMITEXT se realiza también en tres etapas. En la primera etapa se valida la placa de control de forma independiente y su comunicación con el dispositivo externo. En la segunda etapa se realiza la conexión con una placa de interacción de control fabricada sobre PCB con tecnología convencional. Finalmente, en la tercera etapa se conecta al circuito de interacción sobre sustrato elástico impreso con las tecnologías y materiales desarrollados en el proyecto, verificando así el funcionamiento del demostrador final.

La alimentación y comunicación del dispositivo con el móvil se realiza a través del puerto USB-C y son las primeras comprobaciones a realizar. Para ello se conecta el HMITEXT a un móvil, con un puerto USB-C, empleando un cable corto de USB-C macho-macho. Al conectarlo el HMITEXT debería tener alimentación, esto se puede comprobar fácilmente con un multímetro comprobando la tensión a la entrada y salida del regulador de tensión. Una vez comprobado que todos los elementos de la placa están correctamente alimentados se procede a comprobar la comunicación entre el dispositivo HMITEXT y el móvil. Para ello se genera un programa sencillo en el HMITEXT que envía la cadena de texto fija cada 2 segundos empleando el FTDI como traductor de niveles de tensión para la comunicación a través del USB. En el móvil se utiliza una aplicación comercial para poder realizar la comunicación serie y poder recibir y enviar información. Una vez se ha cargado el programa en el ATtiny84 del HMITEXT y se tiene abierta la aplicación de comunicación serie en el móvil se comprueba que efectivamente se recibe dicha cadena. Para comprobar la comunicación en el otro sentido, es decir, entre el móvil y el ATtiny se añade en el programa la recepción de comandos. Por lo tanto, desde el móvil se le envía el comando <ON,0> y el ATtiny cambia el estado lógico de una de sus salidas de 0 a 1, que se puede comprobar este cambio de manera sencilla empleando un osciloscopio. Una vez realizadas estas dos pruebas con éxito se puede afirmar que la comunicación entre ambos dispositivos funciona de manera adecuada.

El siguiente paso consiste en conectar la placa de interacción. Se utiliza en primer lugar una placa semirrígida como placa de control para eliminar posibles fuentes de error asociadas al nuevo proceso de fabricación.

Para evaluar el correcto funcionamiento de los pulsadores, mecánicos y capacitivos, así como de los LEDs se desarrolla un programa para el microcontrolador ATtiny para que cuando se pulse uno de los botones se encienda un led. Una vez comprobado el correcto funcionamiento de todos los elementos de las placas desarrolladas se procede a la implementación del programa final del demostrador.

Finalmente, una vez cargado el programa en el ATtiny se procede a evaluarlo y verificar su correcto funcionamiento comprobando que responde correctamente a los comandos de encendido y apagado de leds así como a enviar (y que se reciba en el móvil) un comando cuando se pulsa alguno de los botones, tanto físicos como capacitivo.

Una vez validado el funcionamiento del sistema con la placa de control semirígida, se procede a la sustitución de la misma por una segunda versión en sustrato flexible y con botones capacitivos, ver Figura 158. Esta segunda versión permite una mejor integración de dicho elemento en los elementos textiles, comprobándose su correcto funcionamiento en condiciones de laboratorio.

Se realizan varias pruebas que han consistido en colocar elementos textiles sobre la placa de interacción flexible y comprobar que se detectan las pulsaciones de los botones capacitivos.

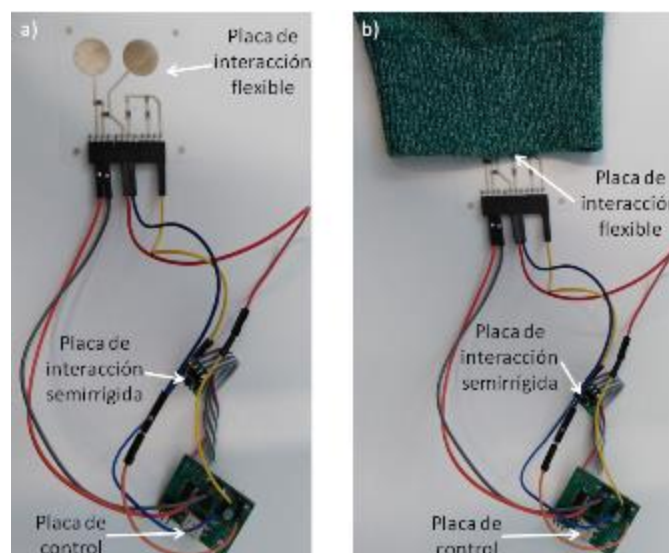


Figura 158. Fotos del montaje de verificación de HMITEXT en laboratorio, a) en vacío y b) con la placa de interacción flexible debajo de un elemento textil

A continuación se realizan pruebas de ajuste y comprobación del comportamiento del software, una vez conectado el sistema al móvil externo. Las siguientes imágenes muestran algunos ejemplos de estas comprobaciones. Se verifica que el sistema se comunica correctamente con el dispositivo móvil, los sensores detectan las pulsaciones y los LEDs muestran señales luminosas.

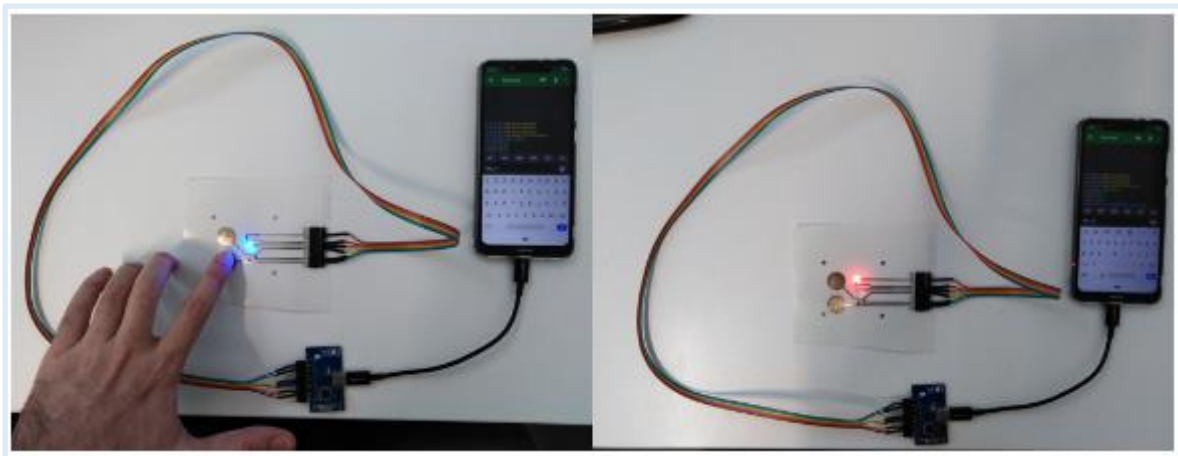


Figura 159. Pruebas de ajuste y comprobación del software del demostrador HMITEXT

En la última etapa de verificación se repiten las pruebas anteriores utilizando el demostrador final HMITEXT ya integrado en el wearable. Se procede a la comprobación de la correcta conectividad en pistas y conexiones con componentes y la robustez de los circuitos y del sistema en su conjunto, comprobando que el ensamblado de cada uno de los elementos es correcto. Finalmente se verifica el correcto funcionamiento del software y de los sensores y LEDs.



Figura 160. Verificación final de demostrador HMITEXT

### 3.7.2.3 VERIFICACIÓN FUNCIONAL DEL DEMOSTRADOR SMART ARM PRO

La verificación se realiza probando primero cada uno de los elementos y subsistemas que componen el sistema. Una vez integrados los sistemas en el demostrador final, se realiza de nuevo una verificación de funcionamiento.

Se indican brevemente cada una de las pruebas que se han realizado:

- *Prueba de ensamblaje y soldadura.* Esta es la primera prueba a realizar que consiste en una inspección visual y el uso del multímetro para comprobar que no existen cortos y todos los elementos se han soldado correctamente.
- *Prueba de tensión.* Esta prueba consiste en alimentar el dispositivo a través del USB y comprobar que las tensiones son las adecuadas en los puntos de comprobación existentes en la placa.
- *Prueba del microcontrolador.* La siguiente prueba consiste en comprobar el correcto funcionamiento del micro que es la parte más importante de la placa de control. Para ello se utiliza un programa sencillo de ejemplo que consiste en programar un pin de salida para iluminar uno de los leds de la placa auxiliar a un intervalo de tiempo fijo. Se ha de comprobar que tanto el encendido y apagado del led como el intervalo en el cual se produce que ha de coincidir con el programado.
- *Prueba de detección de elementos.* La siguiente prueba consiste en detectar los elementos de los buses I2C: existe un bus I2C para la placa de control y otro bus I2C para la comunicación con las placas externas. Esta detección de los elementos en el bus es un indicativo de que los chips están bien soldados y funcionando. Para ello se utiliza un pequeño programa que permite el escaneo del bus en busca de otros dispositivos.
- *Prueba de batería y gestor de batería.* Esta prueba consiste en comprobar que la batería se carga (si es necesario) cuando se alimenta desde el USB y además cuando se desconecta el USB la batería permite que la placa funcione correctamente.
- *Prueba de los botones.* Esta prueba se realiza en dos pasos, el primero consiste en medir con el multímetro la tensión antes de pulsarlo y después de pulsando, comprobando que se produce el salto de tensión esperado. El segundo paso consiste en realizar un pequeño programa en el microcontrolador en el cual se detecte y se procese esa pulsación del botón.
- *Prueba del acelerómetro.* La evaluación del correcto funcionamiento se realiza a través de un programa sencillo de comunicación entre el microcontrolador y el acelerómetro para obtener los datos del acelerómetro. Luego esos datos recibidos se envían por el puerto UART que, utilizando una placa adaptadora, se pueden visualizar en un PC y comprobar de esta manera que los datos recibidos son coherentes.
- *Prueba del zumbador.* Esta prueba es rápida y sencilla ya que simplemente se necesita implementar un programa que genera una señal PWM a la entrada del driver que lo controla y se puede escuchar el sonido generado por el zumbador. Cambiando la frecuencia del PWM se deberían escuchar tonos distintos producidos por el zumbador.
- *Prueba del driver y motor paso a paso.* El paso previo a las pruebas con el driver consiste en buscar información sobre el motor paso a paso para poder realizar la configuración del driver y el programa de control del motor. Los datos más importantes son la corriente máxima por fase del motor y el desplazamiento por cada paso. En este caso el modelo de motor utilizado es el LGA421S14-B-TJBA-038 que es un actuador lineal, en cuyo caso la corriente máxima por fase es de 1,4 A y un desplazamiento de 5  $\mu\text{m}$ /paso. De esta manera en el driver se puede configurar su limitador de corriente con el dato de la hoja de características del motor para no dañarlo y en el programa de control ya se conoce la relación entre la distancia de desplazamiento del émbolo y los pasos para así ajustar con

precisión los movimientos a realizar. El siguiente paso consiste en implementar un pequeño programa que genere una secuencia de pulsos y un pin de dirección que se envía al driver que a su vez transforma dicha información a movimiento del motor.

Una vez validado el funcionamiento básico del dispositivo SMART ARM PRO en condiciones de laboratorio, se ha pasado a realizar la integración completa del demostrador (tarea 5.5) y posteriormente se ha repetido todo el proceso de verificación con el sistema final, obteniendo resultados idénticos a los de la etapa 2.

### 3.7.2.4 VERIFICACIÓN FUNCIONAL DEL DEMOSTRADOR SMART SHOE

La verificación del demostrador SMART SHOE se realiza también en diferentes etapas. Por un lado se verifica la placa del circuito monitor de sensores de forma independiente para cada subsistema y su comunicación WiFi con un ordenador. Cuando el circuito y sensores han sido integrados en el calzado, se verifica el funcionamiento de nuevo de esta parte del demostrador final. Por otro lado se realiza el mismo tipo de pruebas con el circuito de lectura RFID, primero evaluando diferentes partes del sistema y finalmente todo el conjunto con la programación final.

Durante el desarrollo de estos circuitos se han realizado diferentes pruebas de verificación. Estas pruebas verifican el funcionamiento tanto a nivel electrónico como a nivel de la programación realizada. Las pruebas realizadas sobre el circuito monitor de fuerza han sido las siguientes:

- *Prueba de montaje de circuitos.* Esta prueba se realiza tras terminar cada circuito. Por un lado se comprueba visualmente que las pistas impresas no están cortadas y que los componentes tienen los pad pegados a las pistas. Con el polímetro se miden los valores de resistencia entre extremos de pistas y los valores entre pista y el pin de conexión del componente, para ver la resistencia tras el curado del adhesivo conductor.
- *Prueba de conexión de sensores.* Primero se comprueban las soldaduras en el cableado de los sensores y su conector (visualmente y con polímetro). Al presionar sobre cada sensor se observa como los valores de resistencia también varían.
- *Prueba de etapa de alimentación.* Con la batería conectada al circuito se comprueba primero el funcionamiento del interruptor. Con el interruptor en la posición que alimenta el circuito se comprueba que el módulo de regulación proporciona 3,3V de forma estable.
- *Prueba de carga de batería.* Cambiando la posición del interruptor y conectando un circuito cargador se puede comprobar si las conexiones están correctas para la carga.
- *Prueba de programación del microcontrolador.* El conector de seis vías se utiliza para la programación del módulo procesador. Con esta prueba se verifica la alimentación correcta y el funcionamiento de las conexiones para la comunicación con el PC de programación. Desde el ordenador carga un programa sencillo. Si no hay problemas en la carga el resultado de la prueba es satisfactorio.
- *Prueba de control de LED.* Se comprueba con un programa el control de la intensidad variable del LED.
- *Prueba de medida de tensión de batería.* El circuito dispone de dos resistencias formando un divisor de tensión para obtener una estimación del nivel de carga de la batería. En esta prueba se comprueba la función programada para la lectura del puerto y conversor ADC, y la conexión correcta de las resistencias del circuito.

- *Prueba de medida de sensores.* Igual que en el caso anterior, la prueba de lectura de estos sensores indica por un lado que los sensores y resistencias del circuito están bien montados y conectados, y por otro lado que la función de lectura programada en el código trabaja correctamente. Al hacer presión sobre los sensores, el valor leído es inversamente proporcional a la presión aplicada.
- *Prueba de generación de punto de acceso WiFi.* Esta prueba verifica que el módulo genera satisfactoriamente su propia red WiFi, y que los parámetros de configuración y funciones programadas son correctos. En esta prueba, una vez encendido el circuito, se comprueba que desde diferentes dispositivos móviles que aparece una red WiFi disponible llamada SMARTSHOE, y que podemos conectarnos a ella. Esta red no tiene acceso a Internet.
- *Prueba de activación del servidor web.* Con esta prueba se comprueba la programación realizada para lanzar un servidor web interno que permita al circuito recibir peticiones. Comprobamos el correcto funcionamiento del servicio web accediendo desde un dispositivo móvil conectado a la red SMARTSHOE, mediante la URL correspondiente. Con esta URL estamos ya lanzando al circuito la petición GET solicitando los datos de medida de sensores. La información que recibimos en el navegador es una cadena JSON con las lecturas de los ADCs comentados anteriormente.
- *Prueba de recepción de medidas desde PC.* Esta prueba nos permite verificar la programación realizada para el acceso al servidor web desde la aplicación desarrollada. La aplicación de forma periódica solicita los datos, interpreta la cadena recibida y muestra los datos por pantalla.
- *Prueba de estimación de peso y nivel de batería.* Una vez que los datos están disponibles en pantalla se realizan pruebas para el ajuste de factores de conversión que permitan pasar de los valores proporcionados por los ADCs, a los valores de las magnitudes que se están midiendo. Se han considerado modelos proporcionales, para los que ajustamos una constante para cada sensor. El objetivo es poder estimar con las medidas mostradas si una persona se encuentra de pie, mostrando una fuerza aproximadamente la mitad de su peso, si está sentada, mostrando un peso asociado a sus piernas, o tumbada (o caída), mostrando un peso muy bajo o mínimo, dependiendo del valor de las constantes.

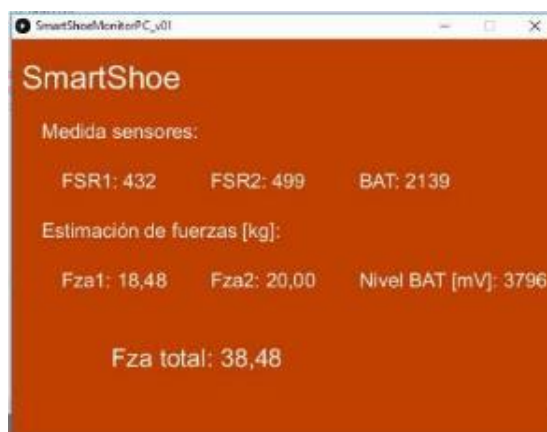


Figura 161. Pantalla de la aplicación monitor del demostrador SMARTSHOE

Las pruebas indicadas se realizaron durante el desarrollo de los circuitos prototipo y de la programación del circuito y aplicación PC. Una vez integrados los elementos en el demostrador final, se realizaron de nuevo las pruebas para comprobar que no se habían generado fallos y como verificación final de esta parte del demostrador, obteniendo resultados satisfactorios.

Para el circuito lector RFID se han realizado por un lado pruebas de comprobación del circuito termoconformado, pruebas de la programación y pruebas con diferentes antenas y etiquetas RFID. Las principales pruebas de comprobación realizadas son las siguientes:

- *Prueba de montaje del circuito.* Tras el montaje de componentes y curado de pistas y adhesivos se realiza esta prueba de verificación. Se comprueban visualmente y con medidas de resistencia con polímetro las pistas impresas y el pegado de componentes
- *Prueba de alimentación y regulación.* En esta prueba se verifica con el polímetro que al conectar el circuito a un PC, el regulador genera en su salida una tensión estable de 3.3V, y que esta tensión se mide también a la entrada del módulo RFID. Se comprueba también el encendido de un LED verde indicador de alimentación en el módulo del microcontrolador.
- *Prueba de programación y comunicación con PC.* Con el circuito conectado se realiza una primera programación con un programa sencillo.
- *Prueba de comunicación y detección con antena comercial.* En esta prueba se ha verificado la comunicación con el módulo RFID mediante dos líneas impresas en el sustrato y el correcto funcionamiento del módulo a partir de la alimentación del regulador. Se ha comprobado la detección de tags RFIDs utilizando una antena que acompaña a este módulo, y el funcionamiento correcto de la programación para la interpretación de los datos recibidos del módulo RFID y su transmisión al PC.
- *Pruebas de detección con antenas impresas y cableadas.* La antena comercial que acompaña al módulo RFID cubre un área muy pequeña en la que debería encontrarse el tag RFID a detectar cuando el usuario pise en la alfombrilla. Se ha seleccionado este módulo RFID por que incluye el conector para la antena (normalmente la antena está impresa en la placa del módulo), y por tanto nos permite experimentar con nuestros propios desarrollos de antena. Se han realizado varias pruebas de detección con las dos antenas fabricadas. La capacidad de detección varía con el número de espiras que tiene la antena, obteniéndose mejores resultados cuando se usan tres espiras. Utilizando tags de menor tamaño estas antenas no son capaces de hacer la identificación. La razón es que el valor resistivo de las pistas, aunque es bueno para otras aplicaciones y circuitos, resulta elevada para una antena RFID de 10 centímetros de lado. Se opta entonces por realizar una antena mediante cable aislado, de modo que para el mismo tamaño de antena la resistencia pasa de unos 127 ohmios a prácticamente a 0,3 ohmios. Se realizan pruebas de detección con la antena cableada sobre una nueva alfombrilla del mismo material que la anterior y se observa que también se obtiene el máximo alcance de detección con tres espiras, llegando aproximadamente a los 5 cm de longitud.

Una vez desarrollado el demostrador final del calzado y del lector RFID, se han realizado las comprobaciones finales de verificación. El resultado de detección más robusto se obtiene utilizando una antena cableada de tres espiras y la etiqueta RFID fijada en el exterior del calzado. Realizando pruebas con otros modelos de calzado de seguridad semejantes, el lector RFID si es capaz de

detectar una tarjeta RFID en el interior del calzado. El resultado es satisfactorio ya que el circuito de adaptación de antena que incluye el módulo RFID está diseñado para una antena de área pequeña y alcance máximo entorno a un centímetro. En un diseño de un producto final sería relativamente sencillo optimizar el circuito de adaptación de antena y la propia antena para obtener un alcance mayor y una mejor sensibilidad.

### 3.7.2.5 VALIDACIÓN DEL DEMOSTRADOR SMART ARM

El demostrador ha sido probado en su uso por personal de IDONIAL. Se ha utilizado como guía de este análisis las especificaciones-objetivo definidas en la fase de diseño conceptual del demostrador.



Figura 162. Realización de pruebas de validación del demostrador SMART ARM

Presentamos como muestra algunas de las observaciones recogidas en esta validación. En cada punto del siguiente listado se indica la especificación objetivo definida, y tras el símbolo de flecha (→) se indican las observaciones realizadas.

- El objetivo es ayudar a la realización de ejercicios con el brazo, siguiendo un programa fijo o permitiendo seleccionar entre varias opciones. → El demostrador permite la realización de ejercicios que se seleccionan entre diferentes opciones existentes.
- El sistema estará programado para supervisar la realización de ejercicios programados y avisar de desviaciones en la ejecución. → El sistema monitoriza la posición con los acelerómetros y genera pitidos cuando no se ejecuta bien una iteración del ejercicio.
- El sistema debe medir la orientación del brazo y antebrazo, respecto a la vertical y también relativa del antebrazo respecto al brazo superior. → Se realizan estas medidas durante la ejecución del ejercicio.

Como **producto para uso personal**, una mejora importante sería incorporar comunicación Bluetooth para permitir la conectividad con un dispositivo móvil del usuario, y mediante una app diseñada para este producto, el usuario podría registrar sus ejecuciones, ver avances, configurar tablas de ejercicios, etc. Como **producto para la rehabilitación**, quizás la conectividad a través de WiFi sería más conveniente, ya que en este caso un sistema web basado en servidor podría realizar el registro automático de los avances realizados por múltiples usuarios al mismo tiempo, y el personal de salud dispondría de la información de forma centralizada. La transmisión de datos permitiría configurar tablas o planificar nuevos

ejercicios con un sistema de gestión más profesionalizado. Además, la incorporación de una pantalla en la cual se muestre la configuración básica podría ser una mejora a realizar en el futuro ya que la información obtenida únicamente a través de pitidos es bastante básica. La incorporación de la pantalla mejoraría la usabilidad del dispositivo de manera notable y se ha visto su necesidad durante la realización de las pruebas.

- La fijación al tejido será mediante pegado o cosido o bien impresión directa sobre el mismo. → Las envolventes electrónicas han sido pegadas a la manga utilizando cinta de doble cara provisionalmente. Una mejor sujeción se obtendrá usando velcro. Se ha considerado también la posibilidad del cosido de cinta elástica, lo que precisa menos esfuerzo para liberar los circuitos. Las pistas conductoras se han impreso sobre Intexar, y este ha sido integrado en el tejido mediante la aplicación de temperatura y presión.
- El sustrato del circuito tendrá una flexibilidad que permita enrollado con radio mínimo de 3 cm. No se requiere resistencia al plegado. → Se han realizado pruebas de enrollado sobre un objeto cilíndrico de radio 3cm, y tras el desenrollado se ha comprobado que el demostrador sigue funcionando.
- El sustrato del circuito admitirá una elongación en zona sin componentes máxima del 10%. → La longitud de la zona de pistas flexibles es de 26,5cm entre conectores. Se han realizado pruebas de estiramiento del tejido hasta alcanzar y superar los 29,5 cm de longitud entre conectores y el demostrador sigue en funcionamiento.
- No dispondrá de pantalla. → En las pruebas se observa que disponer de una pantalla de reducido tamaño facilitaría la selección de ejercicios. La presentación o registro de resultados se realizaría mejor si dispusiera de conectividad móvil, no se considera útil una “mini pantalla” para esa presentación.
- No precisa memoria no volátil para guardar información en caso de apagado. → El usuario solo puede seleccionar opciones. En el caso de que hubiese que configurar algún parámetro del sistema por el usuario (parámetros en los ejercicios, configuración de comunicaciones, etc.) sí sería preciso integrar este tipo de memoria para almacenar la configuración.

### 3.7.2.6 VALIDACIÓN DEL DEMOSTRADOR HMI TEXT

Durante las pruebas realizadas para la validación de este segundo demostrador se han obtenido observaciones sobre el cumplimiento de las especificaciones objetivo. Se presentan a continuación algunas de estas observaciones, al igual que para el caso anterior.



Figura 163. Realización de pruebas de validación del demostrador HMI TEXT

- El objetivo principal es disponer de pulsadores para el control de un dispositivo comercial sobre una prenda. → El dispositivo implementa la opción de dos botones.
- El dispositivo debe poder comunicarse con un dispositivo móvil a través de una conexión USB. El dispositivo móvil de esta forma servirá también para alimentar al dispositivo flexible sobre la prenda. → El dispositivo se conecta a un móvil a través del USB tipo C que alimenta la PCB y la comunicación entre ambos se realiza también a través del USB empleando un puerto COM.
- El dispositivo estará en una prenda de vestir integrado por la parte interior, aunque los pulsadores debe ser accesibles funcionalmente desde el exterior. → En la validación del dispositivo se ha integrado en una chaqueta en la cual el dispositivo y el móvil se encuentran en un bolsillo interno y los pulsadores y leds en la parte externa.
- La fijación de la electrónica a la prenda será mediante pegado y/o cosido o bien impresión directa. → Para facilitar el desmontaje de forma sencilla, se utiliza el pegado con cinta de doble cara. El cosido de una o dos bandas elásticas en un producto comercial proporciona suficiente sujeción.
- El sustrato del circuito tendrá una flexibilidad que permita enrollado con radio mínimo de 5 cm. No se requiere resistencia al plegado. → La parte del circuito impresa sobre intexar se ha enrollado sobre un cilindro de radio aproximado de 5cm y tras la prueba el cilindro sigue en funcionamiento.
- Al ser una prenda exterior, el sustrato del circuito admitirá una elongación en zona sin componentes máxima del 3%. → El área impresa sobre TPU tiene un largo de 70mm. Se ha estirado este circuito una longitud mayor de 2,1mm (3%), y el circuito sigue en funcionamiento.

### 3.7.2.7 VALIDACIÓN DEL DEMOSTRADOR SMART ARM PRO

En la validación de este demostrador se comparten algunas observaciones indicadas en el demostrador SMART ARM, dado que parte de sus funcionalidades son semejantes.

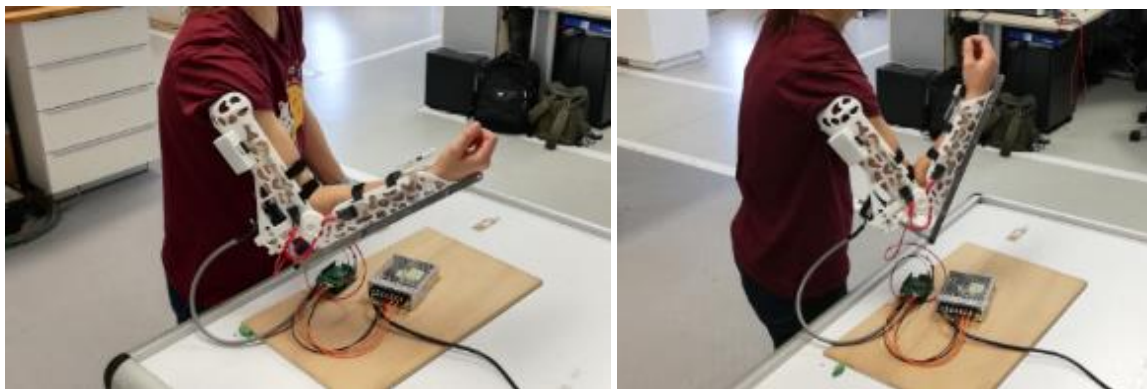


Figura 164. Realización de pruebas de validación del demostrador SMART ARM PRO

Una muestra de las observaciones recogidas durante la validación de este demostrador son las siguientes.

- El objetivo es ayudar a la realización de ejercicios con el brazo incorporando un actuador que fuerza a realizar un mayor esfuerzo. Los ejercicios siguen un programa fijo y el usuario podrá configurar la intensidad de la fuerza de oposición del actuador. → El demostrador ejecuta el movimiento de apertura y cierre del brazo presentando resistencia a la modificación del movimiento. El usuario realiza ejercicio bien oponiéndose a este movimiento, o bien tratando de acelerar este movimiento.
- El sistema estará programado para supervisar la realización de ejercicios programados y avisar de desviaciones en la ejecución. → La electrónica de control estima durante el ejercicio el ángulo de la articulación en función de los datos de los acelerómetros y avisa al usuario si la desviación supera un límite respecto al ángulo previsto en cada momento.

De igual forma que para el demostrador SMART ARM, una mejora importante sería incorporar comunicación inalámbrica (Bluetooth o WiFi) para la transmisión de datos a un dispositivo móvil, un ordenador o un servidor de datos, de modo que el usuario o un supervisor pueda registrar la ejecución de ejercicios y evaluar posteriormente la evolución en la realización de los ejercicios.

Por otro lado, la interfaz actual con dos pulsadores no permite ampliar las opciones de configuración del dispositivo. La incorporación de una pantalla y quizás algún pulsador adicional permitiría mejorar la usabilidad y el acceso a la configuración mediante árbol de menús.

- Debe ser robusto al montaje y desmontaje del brazo por el usuario → El montaje se realiza entre el usuario y otra persona para una mejor fijación. Para introducir el brazo es necesario soltar un lado de las fijaciones del circuito de la muñeca. La fijación mediante cuatro cintas de velcro, dos en el brazo y dos en el antebrazo proporcionan una fijación robusta.
- Los componentes electrónicos estarán integrados en un sistema articulado rígido que se fija en el brazo y antebrazo. → Se han fijado en la estructura articulada los circuitos de control principal y del sensor acelerómetro en la muñeca. El circuito driver se deja fuera de la estructura ya que tiene un mayor volumen y peso y se conecta con una alimentación adicional (fuente de alimentación o batería de 12V), que también implica un mayor peso y cableado. De esta forma solo el cable que une el driver con el motor es un peso adicional que debe soportar el usuario.
- El peso total del sistema con batería y componentes mecánicos incluidos será inferior a 1000 gramos. → El peso total del demostrador es de 920 gramos. No se incluye el peso de una fuente de alimentación o batería de 12V. De este peso, la parte que se monta sobre el brazo del usuario tiene un peso de 826 gramos. Gracias al uso de poliamida se ha obtenido una estructura articulada robusta y relativamente ligera.
- Los componentes rígidos del sistema tendrán una forma adaptada a la del brazo, con un espesor máximo de 1 cm y se realizarán con materiales con módulo de Young superior a 2000 MPa. → Las piezas de la estructura fabricadas en poliamida se adaptan bastante bien al brazo. Se ha identificado como mejora el reducir material en la parte superior (próxima al hombro) trasera, ya que este material tiende a “clavarse” en la zona de la axila de usuario si la posición del brazo es hacia el frente. Si el brazo se encuentra próximo al pecho (tipo cabestrillo) no se tiene esta molestia. La parte de estas piezas que envuelve al brazo no

supera el medio centímetro de espesor. La parte que sujeta el actuador tiene algún elemento estructural con anchura próxima al centímetro, para soportar los esfuerzos sobre el estator de motor.

- La autonomía será como mínimo de una hora de funcionamiento. La estimada para la realización de ejercicios. → La electrónica sobre el brazo tiene un consumo muy bajo, y la batería seleccionada permite varias horas de autonomía. En caso de utilizar una batería para la alimentación del driver, podría ser suficiente una batería recargable de litio de capacidad 5Ah.
- No dispondrá de pantalla. → No se ha integrado una pantalla, pero tras las pruebas se considera que una pantalla sobre la estructura facilitaría la configuración de ejercicios y la presentación de registros sobre la realización de ejercicios. Como alternativa estaría permitir la comunicación bluetooth con un teléfono móvil del usuario y que una aplicación sirva para estas mismas funciones, permitiendo una mayor capacidad de registro, planificación y posible interacción con información de otro tipo de ejercicios.
- Mediante un pulsador se seleccionará la fuerza de oposición. → Actualmente la fuerza del actuador se configura en el driver de motor, mediante un potenciómetro variable que permite regular la corriente máxima suministrada al motor.

### 3.7.2.8 VALIDACIÓN DEL DEMOSTRADOR SMART SHOE

Finalmente, las pruebas de validación de este cuarto demostrador han generado a partir de las especificaciones objetivo nuevas observaciones. Se presentan a continuación algunas de éstas.



Figura 165. Realización de pruebas de validación del demostrador SMART SHOE. Pruebas con el circuito monitor de fuerza (arriba) y con el circuito lector RFID (abajo)

- El objetivo es utilizar el calzado para obtener información sobre la actividad del usuario. → El objetivo planteado inicialmente era obtener información sobre el peso o fuerza de apoyo del usuario sobre el pie, para identificar su postura. En reuniones posteriores a la fase de diseño conceptual se consideró interesante incluir en el calzado la capacidad de permitir la identificación del usuario en diferentes puntos de una planta industrial (para control de accesos, control de presencia, etc). Se analizaron diferentes opciones y se optó por desarrollar un circuito de lectura de tags RFID que se encontraría situado en el suelo. El calzado integra una tarjeta o tag RFID, y el lector detecta la presencia e identifica al usuario. Este desarrollo, junto con la electrónica para la medida de fuerza han sido validados en esta fase.
- Para el registro de actividad, el dispositivo debe disponer de un sensor de fuerza y un medio de transmisión inalámbrico de corta distancia (Bluetooth, Wifi..). → El sistema dispone de dos sensores de fuerza colocados en el interior del calzado, para una estimación más estable e independiente de si el usuario se apoya en la parte anterior o posterior del pie. Para la transmisión inalámbrica el dispositivo utiliza una red propia generada y protocolo http mediante un servidor web. En el circuito de lectura RFID el sistema se alimenta y comunica mediante cable con conexión USB.
- Las dimensiones de la electrónica serán reducidas y en función de en qué parte se integran. → Se han realizado dos diseños de la electrónica. Se ha utilizado en las pruebas la versión que monta los componentes en los laterales del zapato. Los componentes electrónicos pasivos son de encapsulado 0805, y los demás se han seleccionado de modo que los pads estén separados entorno al milímetro para facilitar el uso de adhesivo conductor. El tamaño no es miniatura pero se ha tratado de optimizar el trazado de pistas (en solo una cara y sin puentes) para obtener las dimensiones reducidas.
- La autonomía será al menos de ocho horas de funcionamiento. La estimada para una jornada laboral. Depende también del registro de actividad que se quiera hacer. → El consumo del módulo WiFi es relativamente elevado cuando éste genera el punto de accesos WiFi. El consumo del sistema completo es de 140mA aproximadamente. Con las baterías actualmente seleccionadas de 500mAh, la autonomía que se obtiene no supera las 4 horas. La solución es seleccionar un modelo de batería de mayor capacidad (1200 ó 1500mAh por ejemplo) que pueda integrarse en el volumen disponible, o modificar levemente el diseño para permitir esta integración.

### 3.7.3 Tarea 6.3. Ensayos

El objetivo de esta tarea es implementar ensayos adicionales para la validación completa del sistema en diferentes condiciones de operación. La tarea abarca ensayos de compatibilidad electromagnética, ensayos mecánicos y ensayos de durabilidad.

#### 3.7.3.1 ENSAYOS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA

En esta tarea se han realizado ensayos de compatibilidad electromagnética (ensayos CEM) de dos tipos:

- *Ensayos de emisiones radiadas.* Estos ensayos se han realizado en las instalaciones CEMLab que IDONIAL comparte con la Universidad de Oviedo en el Campus de Viesques.
- *Ensayos de inmunidad conducida.* Ensayos que se realizan en el laboratorio de electrónica de IDONIAL con el equipo desarrollado a medida en este proyecto.

Los ensayos de emisiones radiadas evalúan las interferencias emitidas por el equipo en pruebas. Estos ensayos se realizan según la norma EN55011. Esta norma establece los límites máximos que puede emitir nuestro equipo al espectro radioeléctrico y que son evaluados dentro de una cámara semianecoica. El equipo principal para este tipo de ensayos es el receptor EMI ESU8, del fabricante Rohde&Schwarz, que mide las interferencias procedentes de cualquier dispositivo utilizando para ello una antena dentro de la cámara semianecoica. La posición de la antena se controla de forma automática durante el ensayo, junto con el giro de una mesa que sostiene el equipo, de modo que se observan las emisiones en todas las direcciones y con polarización vertical y horizontal.

La siguiente imagen muestra el equipamiento principal del CEMLab utilizado para estos ensayos.

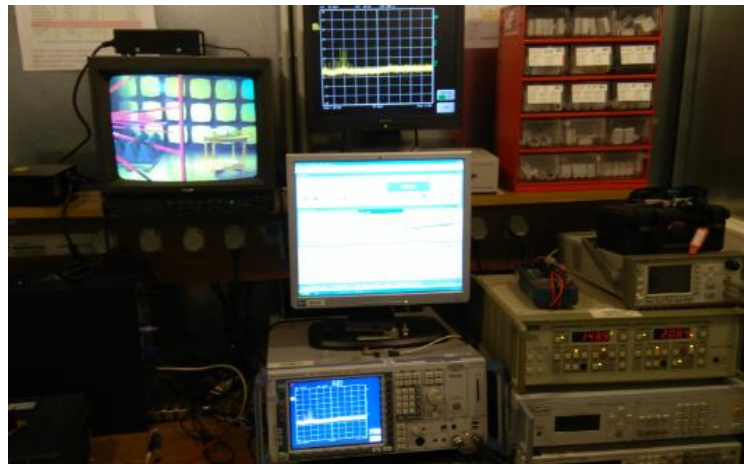


Figura 166. Imagen de la instrumentación utilizada en los ensayos de emisiones radiadas.

Para la realización de ensayos de inmunidad, se desarrolló el equipo a medida descrito anteriormente, que permite inyectar en los equipos a evaluar, señales de ruido e interferencias en un rango amplio de frecuencias y tensiones de pico. Dado que los equipos wearables están diseñados para trabajar en entornos de oficinas y laboratorio, sin elevadas señales de potencia, y estando alimentados por batería, se han seleccionado los siguientes parámetros iniciales para la simulación de señales de ruido o interferentes en estos entornos:

- Frecuencia: 2Khz
- Tensión de pico: 12V
- Duración del ensayo: 10 minutos.

Presentamos a continuación los resultados obtenidos en los ensayos CEM con los circuitos desarrollados para cada uno de los cuatro demostradores.

#### 3.7.3.1.1 [Ensayos CEM con demostrador SMART ARM](#)

##### ***Ensayo de emisiones radiadas***

Se realiza el ensayo con el demostrador completo colocado sobre la mesa giratoria. Las placas se prueban sin envolventes de poliamida.



Figura 167. Demostrador SMART ARM sobre mesa giratoria en la cámara de ensayos.

Los resultados obtenidos en el ensayo se presentan en las siguientes gráficas.

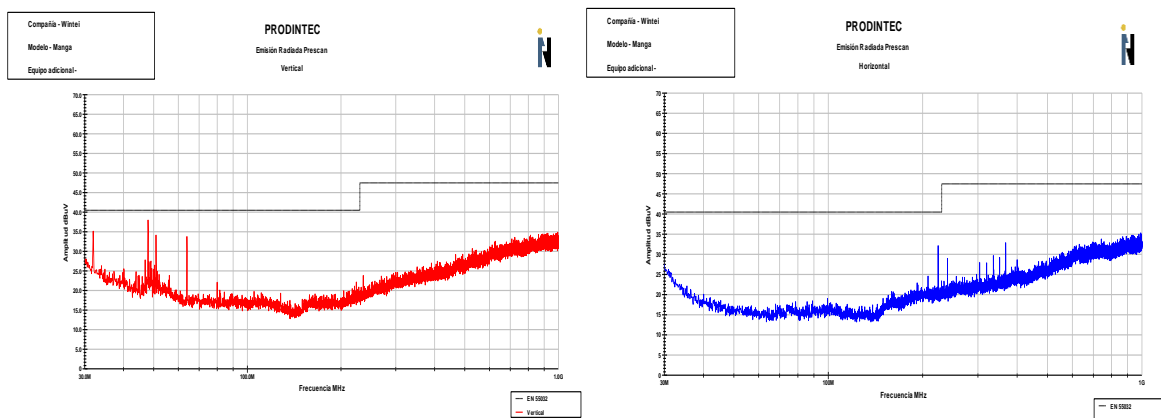


Figura 168. Emisiones radiadas demostrador SMART ARM: Componente vertical (izq) y horizontal (der).

El circuito no genera emisiones que superen los límites establecidos, si bien a frecuencias entorno a 50MHz aparecen algunos picos de emisión relativamente elevados.

### **Ensayo de inmunidad**

Se realiza el ensayo con el demostrador completo e inyectando las señales interferentes en el conector de la batería de alimentación. La figura siguiente muestra el montaje y la señal inyectada al circuito principal.



Figura 169. Realización de ensayo de inmunidad del demostrador SMART ARM.

Una vez finalizado el ensayo se conecta la batería y se observa que el demostrador funciona correctamente, con lo que el sistema pasa el ensayo de inmunidad.

### 3.7.3.1.2 Ensayos CEM con demostrador HMITEXT

#### **Ensayo de emisiones radiadas**

Se realiza el ensayo con el demostrador completo colocado sobre la mesa giratoria. Un teléfono móvil alimenta al dispositivo HMITEXT y se mantiene en comunicación con éste mediante protocolo serie.



Figura 170. Demostrador HMITEXT sobre mesa giratoria en la cámara de ensayos.

Los resultados obtenidos en el primer ensayo se presentan a continuación:

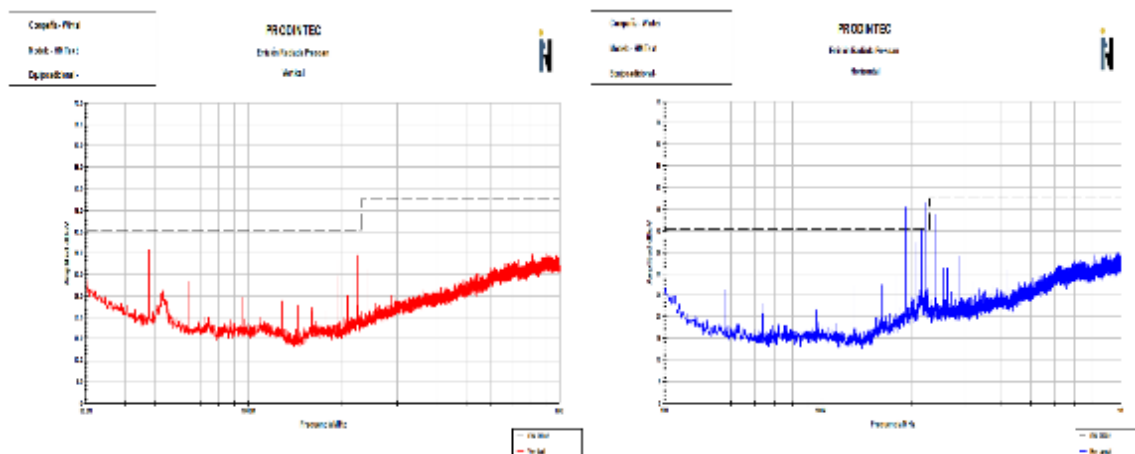


Figura 171. Emisiones radiadas demostrador HMITEXT: Componente vertical (izq) y horizontal (der).

Se observa como picos de radiación de la componente horizontal en las frecuencias centrales (200MHz) superan el límite permitido. Mediante varias pruebas se identifica que estas emisiones se generan en el cable plano utilizado.

Se realizan nuevos ensayos utilizando ferritas ensambladas en este cable. Estos se realizan con la ferrita atravesada por el cable y también dando una vuelta adicional al cable sobre la ferrita. El resultado es una reducción de emisiones que no es aún suficiente. Se deduce con ello que una nueva versión de este dispositivo debería utilizar cable apantallado, no necesariamente plano.

### **Ensayo de inmunidad**

Se realiza el ensayo de inmunidad sobre la placa de control utilizando pines de conexión de tierra (GND) y de alimentación (VCC) que están también conectados con los pines de alimentación del puerto USB de tipo C, de modo que permiten la conexión y alimentación con el teléfono móvil del demostrador. La siguiente figura muestra el montaje de ensayo realizado y las señales interferentes inyectadas superpuestas con la alimentación de 5V.

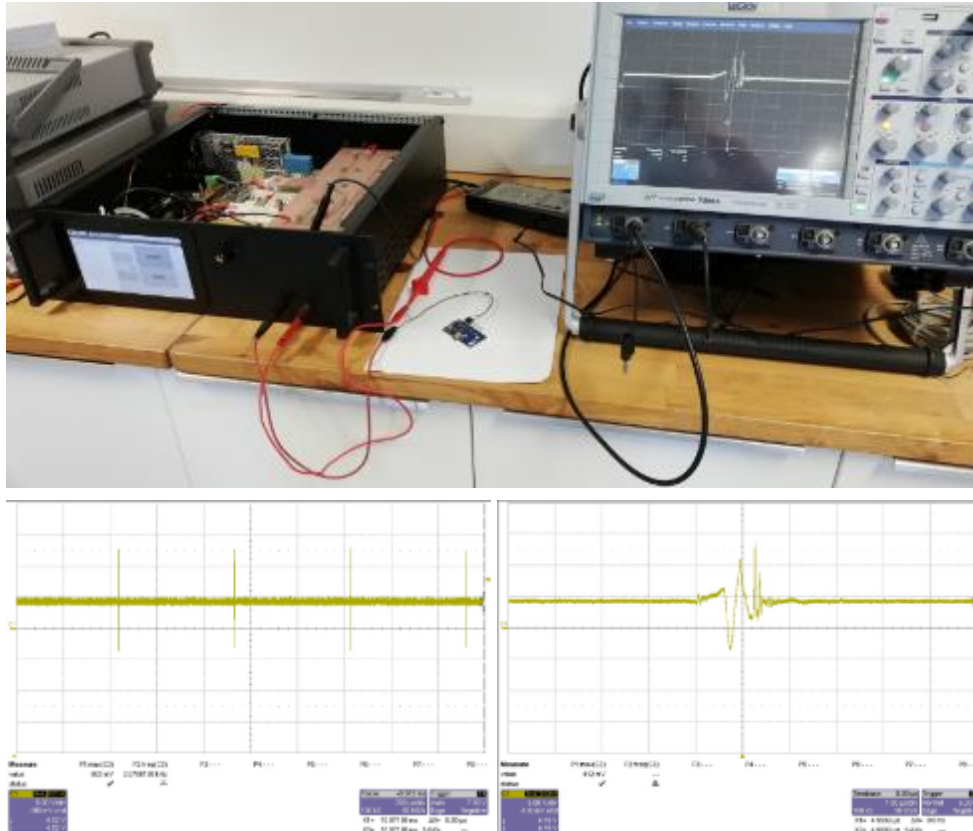


Figura 172. Realización de ensayo de inmunidad con el demostrador HMITEXT. (superior) montaje del ensayo, (inferior) secuencia de picos interferentes y ampliación temporal de uno de estos picos.

Una vez finalizado el ensayo se conecta el circuito al teléfono móvil y se comprueba que el circuito se alimenta y que se establece una comunicación serie normal entre estos componentes. El demostrador supera por tanto el ensayo de inmunidad.

#### 3.7.3.1.3 Ensayos CEM con demostrador SMART ARM PRO

##### **Ensayo de emisiones radiadas**

Se realiza el ensayo con el demostrador completo colocado sobre la mesa giratoria. La alimentación de las placas de control y acelerómetro se realiza mediante batería de 3,7V. La alimentación del controlador del motor se obtiene mediante una fuente de alimentación conmutada conectada a la red y que proporciona 12V.



Figura 173. Demostrador SMART ARM PRO sobre la mesa giratoria con alimentación de la red por cable.

Las gráficas siguientes muestran la emisión radiada utilizando alimentación de la red. Se observa que en la componente vertical se superan los límites de emisión permitidos en varios rangos de frecuencias por debajo de 80MHz.

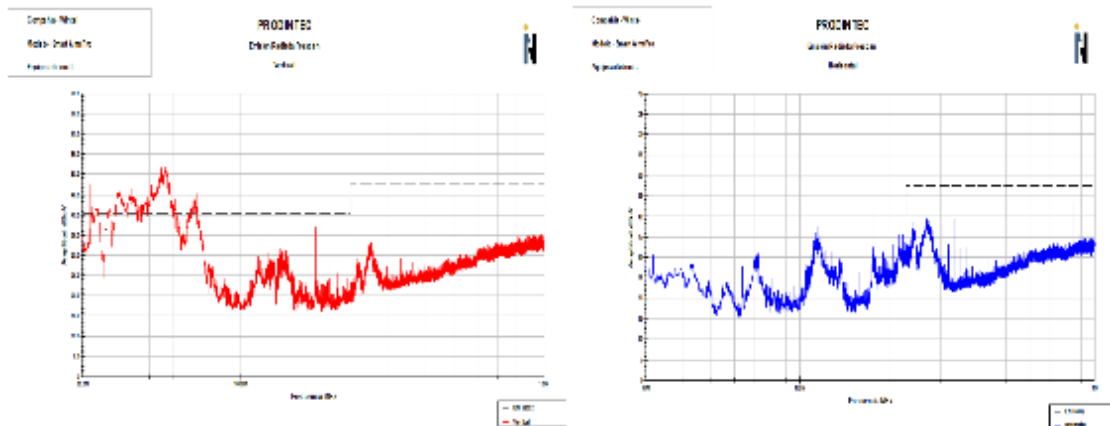


Figura 174. Emisiones radiadas con SMART ARM PRO alimentado desde la red: Componente vertical (izq) y horizontal (der).

Esta superación de los límites de emisiones se debe a la alimentación a través de la red. El dispositivo puede ser también alimentado en la parte del motor mediante batería de 12V. Se realiza entonces el ensayo sin conexión a red y usando una batería de 12V para la alimentación.

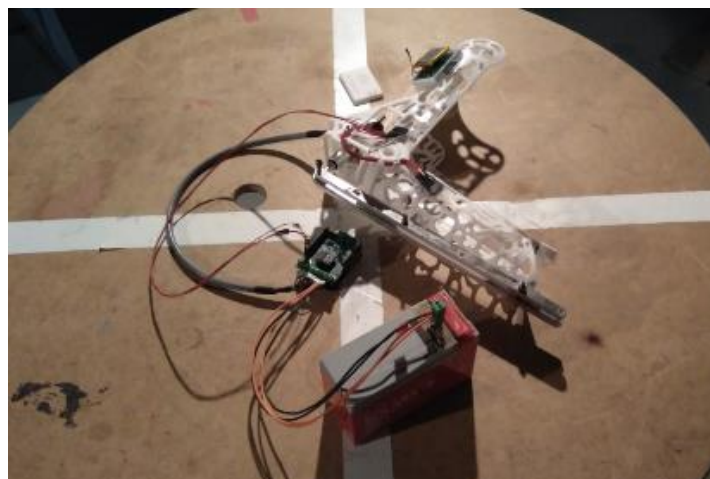


Figura 175. Demostrador SMART ARM PRO sobre mesa giratoria con alimentación por batería.

Los resultados son en este caso satisfactorios, con poca aproximación relativa a los límites de la norma. Las gráficas obtenidas son las siguientes.

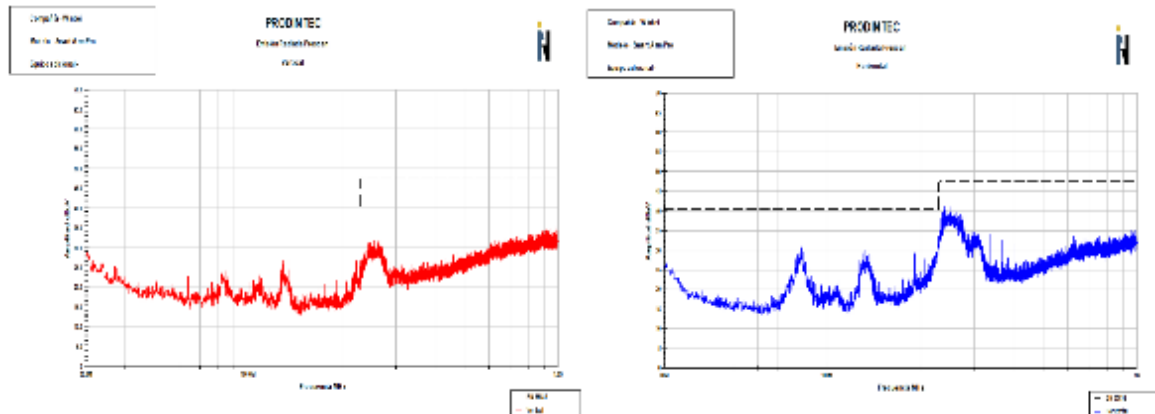


Figura 176. Emisiones radiadas con SMART ARM PRO alimentado por batería: Componente vertical (izq) y horizontal (der).

### Ensayo de inmunidad

Con el demostrador SMART ARM PRO se realizan dos ensayos. Por un lado, para los circuitos sobre la estructura articulada, alimentados a partir de batería de 3,7V, se inyecta la señal interferente como en los otros demostradores, con tensión de 12V. Para el circuito del driver del motor, que se alimenta mediante fuente de tensión o mediante batería, con tensión de 12V DC, se inyecta una señal interferente con tensión de 24V.

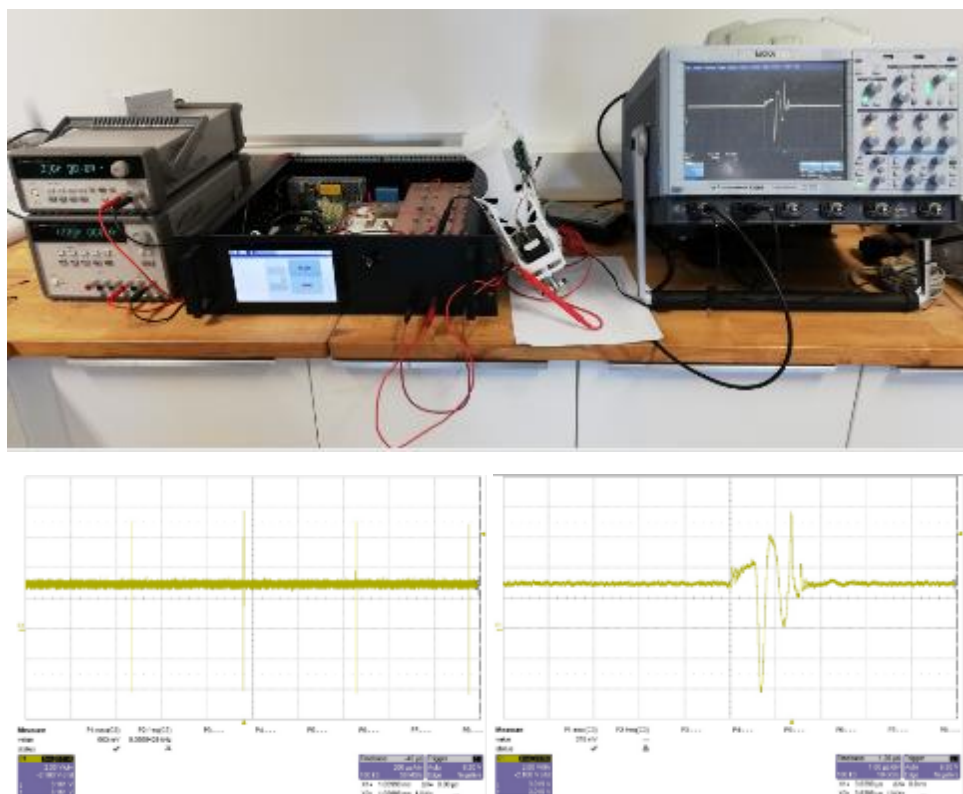


Figura 177. Realización de ensayo de inmunidad a circuitos sobre la estructura del demostrador SMART ARM PRO.

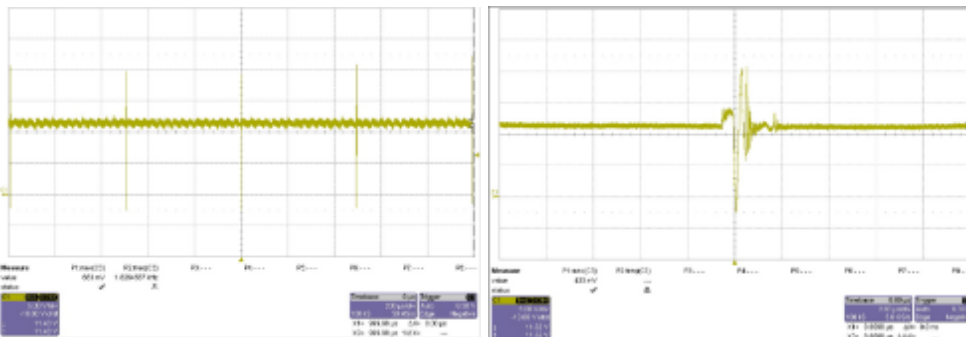


Figura 178. Realización de ensayo de inmunidad sobre el circuito del driver del demostrador SMART ARM PRO.

Una vez finalizados los dos ensayos se ha realizado el montaje del demostrador completo y se ha comprobado el correcto funcionamiento. El demostrador pasa el ensayo de inmunidad.

#### 3.7.3.1.4 Ensayos CEM con demostrador SMART SHOE

Para este demostrador se realizan dos ensayos diferentes. Por un lado el ensayo del circuito que mide la señal de los sensores y la transmite vía WiFi, y por otro lado el circuito de detección y comunicación RFID.

En el primer caso, el circuito es alimentado por batería. Se utiliza un ordenador portátil para establecer y mantener una transmisión de datos durante el ensayo. En el segundo caso el circuito se alimenta y comunica a través de un cable USB conectado al ordenador portátil. Se realizan diferentes opciones de funcionamiento, incluyendo por ejemplo el ordenador sin otros dispositivos para ver las emisiones que este genera.

##### ***Ensayo de emisiones radiadas para circuito monitor de sensores***

Se realiza el ensayo con el demostrador colocado sobre la mesa giratoria. La alimentación del demostrador es mediante batería de 3,7V. En las imágenes se ve primero la disposición del circuito. Junto con este se colocó también el ordenador sobre la mesa.



Figura 179. Demostrador SMART SHOE sobre la mesa giratoria (Circuito monitor de fuerza/presión)

Las siguientes gráficas muestran la emisión radiada del dispositivo en diferentes situaciones.

1- Emisión radiada del dispositivo transmitiendo datos al ordenador PC.

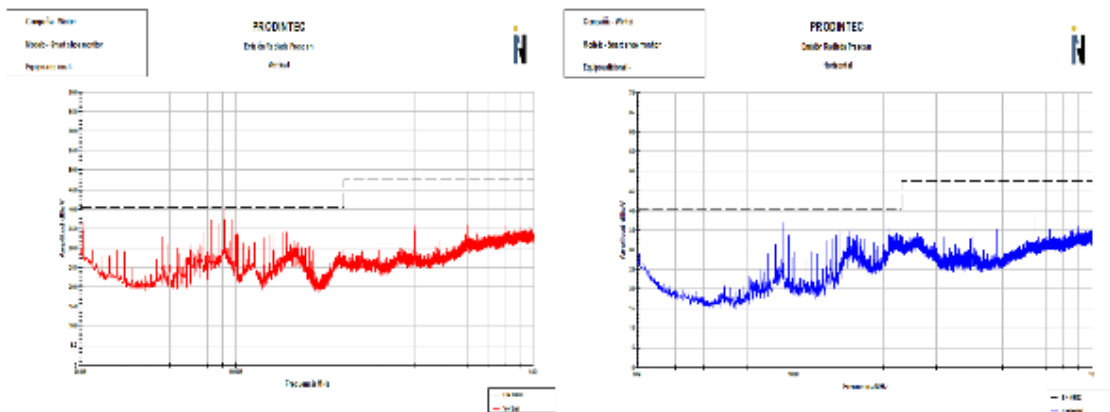


Figura 180. Emisiones radiadas demostrador SMART SHOE (monitor sensores) transmitiendo datos: Componente vertical (izq) y horizontal (der).

Los resultados están al límite de lo permitido. Hay que observar si los picos se deben al circuito o a la presencia del ordenador.

2- Solo el ordenador portátil. El circuito demostrador se encuentra apagado.

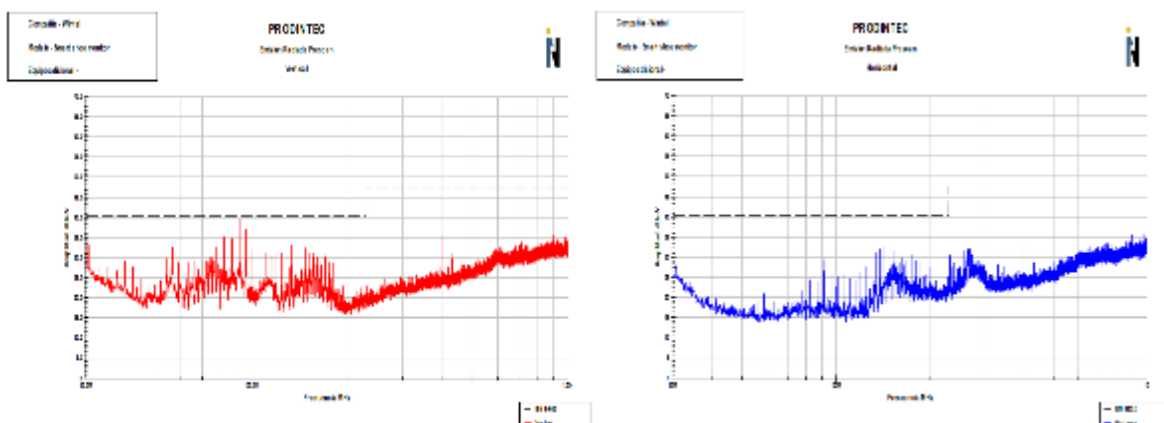


Figura 181. Emisiones radiadas solo por el PC para el demostrador SMART SHOE (monitor sensores): Componente vertical (izq) y horizontal (der).

Los resultados muestran que realmente es el ordenador el que genera emisiones en el límite permitido por la norma.

3-. Emisiones del circuito solo, sin ordenador presente. El circuito está generando su propia WiFi, pero no hay dispositivos conectados a ésta.

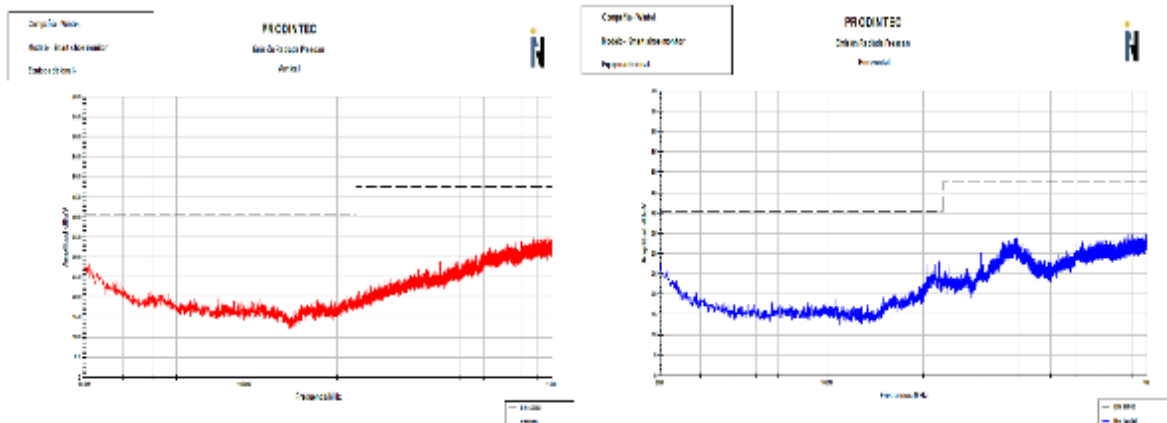


Figura 182. Emisiones radiadas demostrador SMART SHOE (monitor sensores) sin ordenador PC: Componente vertical (izq) y horizontal (der).

El circuito no genera emisiones radiadas importantes.

**Ensayo de emisiones radiadas para circuito de detección RFID del demostrador SMART SHOE**

Los ensayos para este circuito se realizan utilizando también en la prueba un ordenador portátil conectado al circuito de detección. El circuito, con antena incluida, y el portátil se colocan sobre la mesa. El ordenador se alimenta a través de su batería, no se conecta a la red.

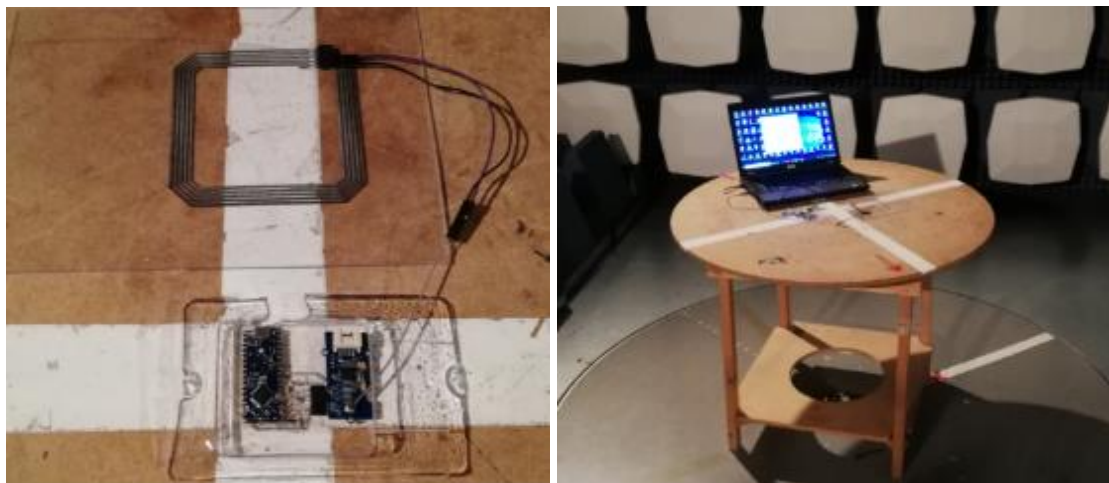


Figura 183. Demostrador SMART SHOE sobre la mesa giratoria (Circuito detector RFID).

Se realizan varios ensayos.

1-. Emisiones radiadas con un tag RFID detectado. Se produce comunicación RFID y comunicación serie entre circuito y ordenador.

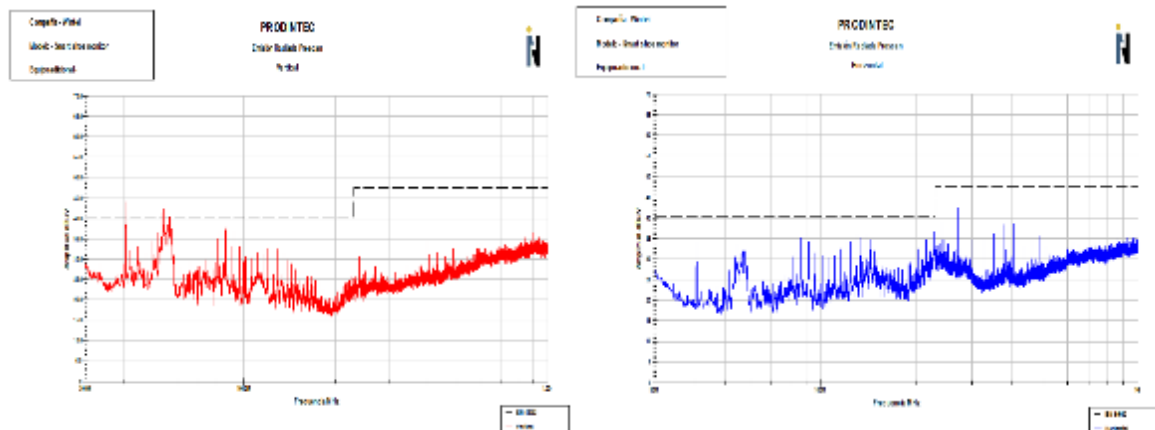


Figura 184. Emisiones radiadas demostrador SMART SHOE (detector RFID) con tag detectado: Componente vertical (izq) y horizontal (der).

2-. Solo el ordenador encendido. El circuito detector RFID se desconecta del ordenador, quedando sin alimentación.

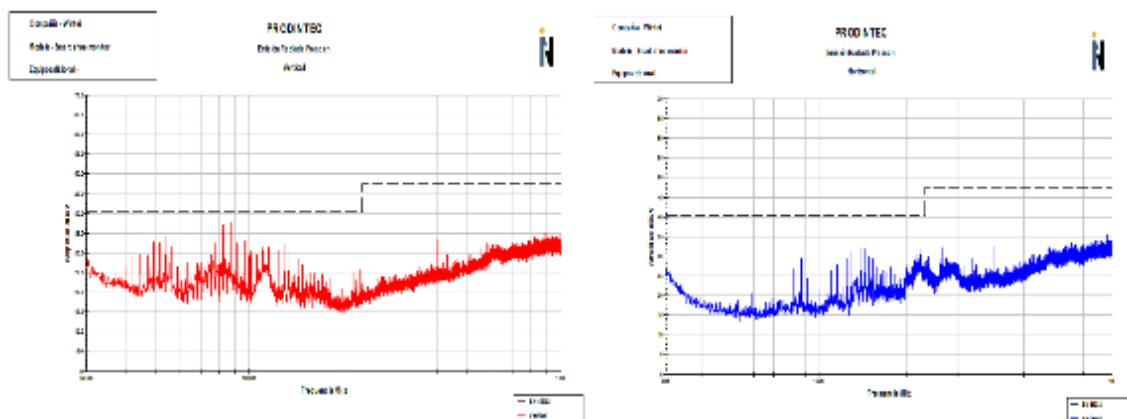


Figura 185. Emisiones radiadas por ordenador PC para el demostrador SMART SHOE (detector RFID): Componente vertical (izq) y horizontal (der).

Se observa en las gráficas que para la emisión con polarización vertical se superan los límites en los 40MHz y también entorno a los 55MHz. Esta emisión se debe a ruido generado por los procesadores de los circuitos que llega hasta la antena RFID y es transmitido. Esto se puede resolver en una nueva versión de producto realizando un circuito de adaptación de la antena que filtre estas señales. En el circuito actual de adaptación, que forma parte del módulo RFID, no es posible realizar estas modificaciones.

**Ensayo de inmunidad con circuitos del demostrador SMART SHOE**

El ensayo se realiza sobre los circuitos probando inicialmente el comportamiento de diferentes partes. En el caso del circuito monitor, se analiza primero la inmunidad del módulo de regulación, que se encarga de proporcionar alimentación al resto del circuito. Este módulo regulador atenúa en gran parte los picos de interferencias gracias a los condensadores de entrada de este circuito. El módulo supera el ensayo y se procede a realizar el ensayo con el circuito completo. Las siguientes imágenes muestran la realización y las señales observadas en la entrada del circuito.

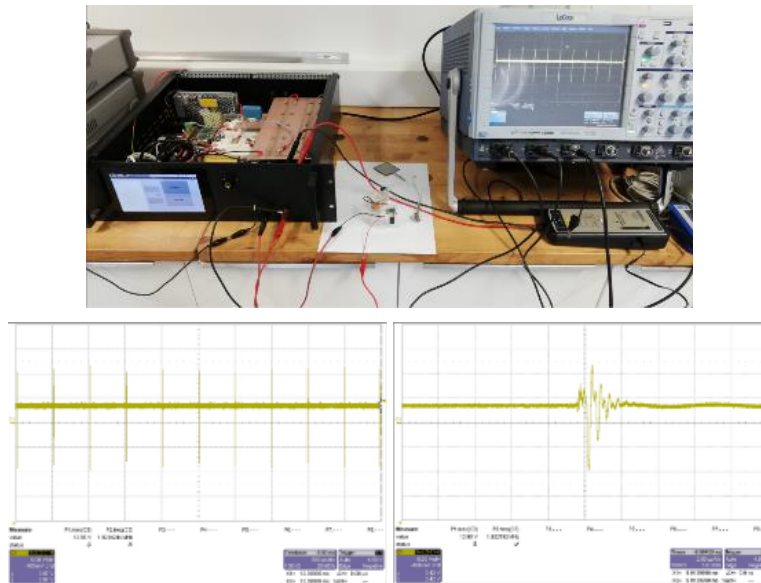


Figura 186. Realización de ensayo de inmunidad con circuito monitor del demostrador SMAR SHOE. (superior) montaje del ensayo, (inferior) secuencia de picos interferentes y ampliación temporal de uno de estos picos.

Durante el ensayo el circuito al estar encendido crea el nodo de red WiFi y desde un ordenador se recibe la información de los sensores y nivel de batería. El circuito supera el ensayo de inmunidad, funcionando correctamente mientras se inyectan interferencias.

Con el circuito lector RFID se realiza primero un ensayo para comprobar la inmunidad del módulo con microcontrolador, junto con el regulador de 3,3V. No se conecta el módulo RFID. Los componentes superan el ensayo y se realiza el montaje completo del circuito, añadiendo el módulo RFID y la antena comercial de pequeña área. En la figura siguiente se muestra este montaje y las señales de interferencia que se observan a la entrada del circuito (con alimentación de 5V) y a la entrada del módulo RFID, con 3,3V de alimentación.

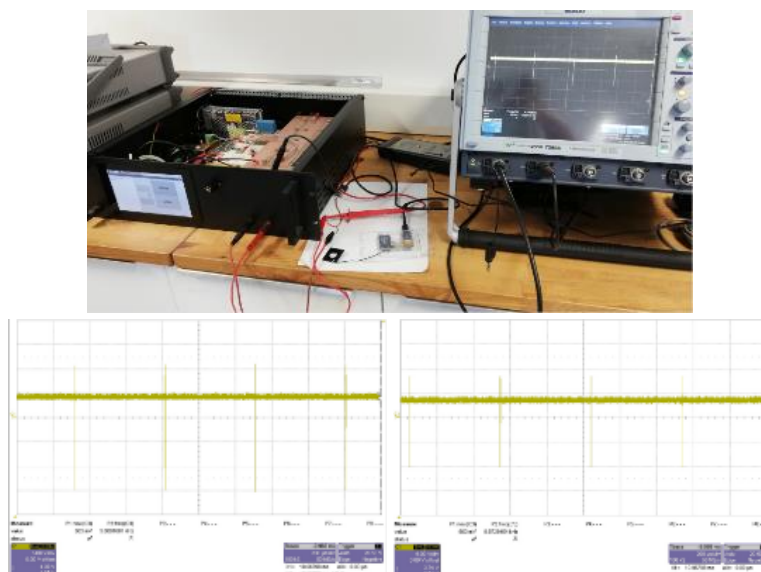


Figura 187. Realización de ensayo de inmunidad con circuito lector RFID del demostrador SMAR SHOE. (superior) montaje del ensayo, (inferior) secuencia de picos interferentes a la entrada de 5V y tras la regulación de 3,3V.

Una vez finalizado el ensayo se conecta el circuito a un ordenador y mediante comunicación serie se comprueba que todos los elementos del circuito funcionan correctamente. El circuito lector RFID ha pasado el test de inmunidad.

### 3.7.3.2 ENSAYOS MECÁNICOS

La máquina de ensayos desarrollada en el proyecto permite realizar diferentes ensayos de elongación de probetas, pudiendo realizar repeticiones de estiramiento de probetas, o ensayos de estiramiento hasta llegar a la rotura de la probeta. Este tipo de ensayos tiene su aplicación en este proyecto para evaluar principalmente la robustez de pistas impresas sobre sustratos flexibles y, por otro lado, para evaluar la robustez de las uniones entre pistas conductoras sobre material flexible y conectores comerciales seleccionados.

Los ensayos no llegan a realizarse sobre los sustratos que forman los propios demostradores, sino que se diseñan y fabrican probetas para estos ensayos. Las probetas están formadas por una impresión de tinta conductora (formando un área rectangular de 50mm x 10mm), dentro del área de sustrato que forma la probeta, con dimensiones 100mm x 30mm. Para la fabricación de estas probetas se han considerado varias combinaciones de materiales y componentes, es decir, combinaciones de sustratos, tintas, adhesivos y conectores. Dichas combinaciones se han seleccionado por ser las más prometedoras tras resultados obtenidos en tareas previas de este proyecto en las anualidades anteriores. Se han realizado probetas sobre tres sustratos que permiten estiramiento (textil, TPU platilon e intexar) y sobre tres sustratos semirígidos que permiten su termoconformado (policarbonato, ABS y poliestireno).

#### 3.7.3.2.1 Ensayos de tracción/elongación con probetas sin conector

El objetivo de estos ensayos es analizar el comportamiento de la conductividad de las tintas impresas sobre el sustrato al realizar una elongación forzada del sustrato. Se han realizado dos tipos de ensayos. Primero se ha sometido cada combinación de sustrato y tinta conductora a un estiramiento progresivo hasta alcanzar una fuerza de tracción elevada, una resistencia de fondo de escala en el polímetro (es decir, la pérdida de conductividad), o la rotura de la probeta. Este ensayo se realizó sobre sustratos estirables y semirígidos. Segundo, para las combinaciones con sustrato estirable, que pueden recuperar parcialmente su longitud inicial, se han realizado varias iteraciones de estiramiento y recuperación, hasta una longitud máxima seleccionada en función de los resultados del primer ensayo.

Los instrumentos utilizados para estos ensayos son un polímetro para la medida de resistencia eléctrica, y el equipo de ensayos de tracción desarrollado en este proyecto. El montaje de la probeta en el equipamiento se realiza como se observa en la siguiente imagen.



Figura 188. Montaje para la realización de los ensayos.

Para la medida de resistencia se ha optado por utilizar de forma manual las puntas de un polímetro, para evitar tensiones adicionales que producirían el usar pinzas sobre el sustrato. La medida de longitud de la muestra se obtiene mediante una regla fija en el equipo. La medida de fuerza es proporcionada por la aplicación de control de la máquina de tracción.

Presentamos a continuación los principales resultados y conclusiones obtenidas para cada tipo de probeta.

#### ***Ensayos sobre sustrato textil sin conector***

Se ha realizado el ensayo de elongación hasta que se ha superado una fuerza de tracción superior a 7kg que ha producido una rotura parcial de la probeta. La elongación alcanzada ha sido superior de 18mm sin perder la conductividad.



Figura 189. Ensayo de elongación sobre sustrato textil.

A partir de este resultado, con una nueva probeta se ha realizado un ensayo con un estiramiento repetitivo de 10mm. A partir del primer estiramiento la probeta no recupera la forma original, perdiendo la tensión cuando se reduce la longitud. Los resultados muestran por un lado como con cada iteración aumenta la resistencia al estirar la muestra, y por otro lado, como al medir resistencia cuando no está tensa la muestra, la resistencia es incluso mayor que cuando esta estirada. Este resultado puede ser debido a la deformación o curvatura generada al no estar tensa la muestra.

#### ***Ensayos sobre sustrato TPU Platilon sin conector***

El ensayo de elongación con probeta de sustrato platilon permite observar que la combinación de tinta y sustrato permite mantener cierta conductividad incluso con una elongación muy elevada. Se ha llegado a una elongación de 100mm sin pérdida de la conductividad, aunque ya con valores de kilohmios de resistencia. La fuerza de tensión soportada ha llegado también a 7kg y en la probeta se genera una deformación importante debida a esta tensión. Se observa también que el estiramiento no es homogéneo en la muestra, siendo menor en la zona central. Es decir, la resistencia aumenta principalmente en los extremos de la pista conductora impresa.

Dada la elevada capacidad de estiramiento, se ha realizado con otra probeta un ensayo de estiramientos repetidos hasta una elongación de 30mm sobre la longitud inicial de la probeta. Se observa cómo tras la primera iteración la probeta ya no se encuentra tensa al reducir la elongación, pero a diferencia del resultado con textil, la probeta sí recupera una buena conductividad, en el orden de unidades de ohmio.

### ***Ensayos sobre sustrato Intexar sin conector***

Con probetas usando Intexar como sustrato se han obtenido los siguientes resultados. En el primer ensayo de elongación, la probeta ha mantenido la conductividad hasta una elongación de 30mm aproximadamente, llegando entonces el valor de resistencia al fondo de escala de forma rápida al aumentar unos milímetros más la elongación. El sustrato no mantiene una tensión de fuerza elevada, sino que se estabiliza al estirarse en fuerzas por debajo del kg.



Figura 190. Ensayo de elongación sobre sustrato Intexar.

Para el ensayo de iteraciones de estiramiento, se optó por fijar una elongación máxima de 20mm, con vistas a obtener una resistencia en las iteraciones por debajo de los 50 ohmios. El resultado observado es que en pocas iteraciones la probeta pierde su conductividad cuando está estirada 20mm, llegando al fondo de escala en el valor de resistencia, pero por otro lado, al reducir la elongación, y aunque ya no vuelve a encontrarse tensa, si mantiene una buena conductividad de nuevo, en el orden de unidades de ohmio. Posiblemente la pérdida de conductividad sea debida también a falta de homogeneidad en el estiramiento, generándose zonas de pequeña área donde se produce la mayor parte del estiramiento y una pérdida muy elevada de conductividad, mientras que en la mayor parte del material se mantiene una buena conductividad. El Intexar es un material desarrollado para ser laminado sobre otros sustratos, como tejidos por ejemplo. En este caso, el sustrato sobre el que es laminado puede ayudar a que el estiramiento sea más homogéneo y con ello mantener mejor la conductividad de pistas impresas.

### ***Ensayos sobre sustrato policarbonato sin conector***

Se han realizado ensayos sobre sustratos para termoconformado para observar si tienen cierta capacidad de estiramiento (sin recuperación) o si se produce su rotura fácilmente frente a la tracción. El sustrato transparente de policarbonato de 250 micras por ejemplo ha demostrado que permite su deformación mediante tracción. El ensayo realizado con una probeta de este tipo ha alcanzado una elongación de casi 50mm, soportando una fuerza de hasta 39kg, y manteniendo un valor de resistencia por debajo de los 100 ohmios. Dado que el material no reduce su longitud al reducir la fuerza de tensión, no se realizan ensayos de elongación repetitivos.

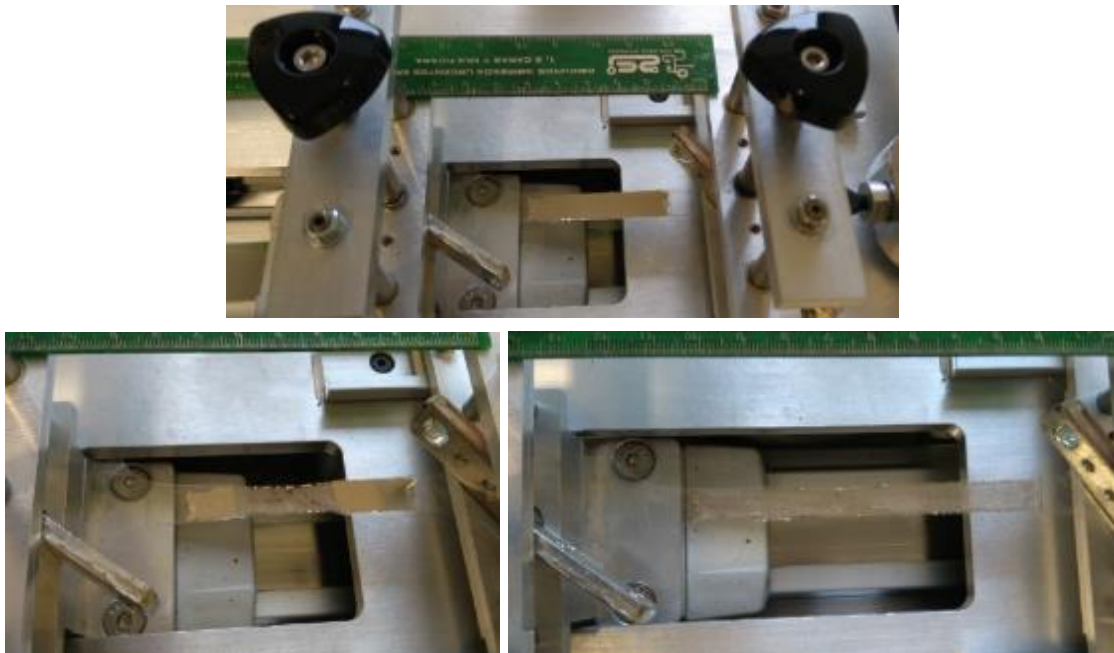


Figura 191. Ensayo de elongación sobre sustrato policarbonato.

#### ***Ensayos sobre sustrato ABS sin conector***

Los resultados con sustrato ABS de 250 micras han sido contrarios a los anteriores. En este caso el sustrato no ha permitido su estiramiento. Para un estiramiento de medio milímetro se han aplicado 13kg. Al tratar de obtener un estiramiento de 5mm se han alcanzado hasta 50kg de tensión y se ha producido la rotura de la probeta. Debido a la poca deformación generada, el valor resistivo de la pista conductora ha variado levemente con el primer estiramiento. Dado que la rotura no se ha producido en el interior de la parte conductora, el valor de resistencia tras la rotura ha sido igual al inicial.

#### ***Ensayos sobre sustrato Poliestireno sin conector***

Se ha probado a realizar el ensayo con sustrato Poliestireno de 1mm de espesor. El resultado ha sido la deformación de una pieza metálica que forma parte de uno de los agarres de la máquina de ensayos. Se ha fabricado de nuevo la pieza y sustituido pero no se ha tratado nuevamente de realizar el ensayo. El poliestireno es un material relativamente blando, pero debido a que el sustrato es de 1mm de espesor la fuerza necesaria para su estiramiento o deformación en este ensayo es muy elevada.

#### **3.7.3.2.2 [Ensayos de tracción/elongación con probetas con conector](#)**

Este grupo de ensayos de tracción tiene por objetivo comprobar la robustez de la unión entre el sustrato con impresión conductora y los conectores seleccionados para cada sustrato. Al conectarse dos conectores de una misma familia (el que está sobre el sustrato y el que correspondería a un cable o placa externa), existe una fuerza de tracción que soportan antes de desconectarse. En un primer ensayo con conectores, se comprueba si la unión entre el sustrato, tinta y conector es suficientemente robusta hasta alcanzar la fuerza que produce la desconexión del conector. Como esta fuerza de desconexión no es elevada, para algunas probetas se ha realizado un segundo ensayo

en el que fuerzas mayores se aplican en la unión entre conector y sustrato, y se observan los cambios en la conductividad y en la fijación del conector.

El montaje de las probetas para estos ensayos se ha realizado en función del modelo de conector. En los ensayos con conectores macho y hembra conectados, la medida de resistencia se realiza para cada una de las vías del conector (se han utilizado conectores de 4 vías). Posteriormente se determina el valor medio para las cuatro vías. Esto también se ha hecho con el conector de tipo Clincher en caso de hacer un segundo ensayo. Para los segundos ensayos con conectores de tipo pin sin hembra conectada, se agarra el conector con la mordaza metálica tocando todos los pines, y se realiza la medida de resistencia con la punta del polímetro tocando esta pieza metálica.

La medida de resistencia se realiza colocando la punta del polímetro próxima al conector pero sobre la zona con tinta conductora impresa, ya que el objetivo es ver la resistencia en la zona de unión entre conector y sustrato con tinta conductora.

Presentamos a continuación los principales resultados y conclusiones para estos ensayos con conector.

#### ***Ensayos sobre sustrato textil con conector***

Se han realizado ensayos con conector tipo Clincher y con pines de conexión crimpados.

El ensayo con conector Clincher (tipo hembra) ha proporcionado buenos resultados con bajos valores de resistencia hasta que se ha desconectado del conector macho. Aun así la medida ha sido compleja ya que el valor de resistencia era muy inestable, variando mucho al desplazar la punta del polímetro sobre la zona impresa. La fuerza de desconexión es muy baja, no llegando a ser observada por la célula de carga de la máquina de ensayos.

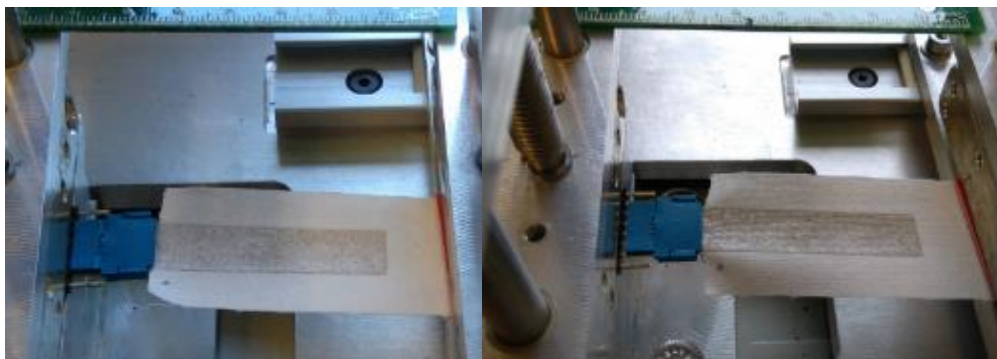


Figura 192. Ensayo de elongación sobre sustrato textil con conector Clincher.

El segundo ensayo se ha realizado con pines crimpados. Estos pines tienen un bajo grosor, por lo que su conexión con un conector de tipo hembra estándar para tira de pines es poco robusta. Consideramos que estos pines son más apropiados para la soldadura de cables directamente sobre ellos, lo que sí permite una conexión robusta con una elevada fuerza necesaria para la desconexión. Se ha realizado este ensayo fijando entonces los pines directamente a la mordaza de la máquina, y aplicando fuerza hasta la rotura del tejido.

El conector ha soportado hasta una fuerza de casi 6 kg antes de producirse el desgarro del tejido en uno de los pines. La resistencia del conjunto de conexiones se ha mantenido por debajo de 3 ohmios hasta el momento de la rotura.



Figura 193. Ensayo de elongación sobre sustrato textil con conector de pines.

#### ***Ensayos sobre sustrato TPU Platilon con conector***

Se han realizado dos ensayos utilizando conector tipo Clincher y un ensayo con conector de pines crimpados. Con este sustrato la medida de resistencia ha resultado más estable. En la medida utilizando conectores macho y hembra unidos, el conector ha mantenido una resistencia media por vía por debajo de 0,3 ohmios. Viendo la buena estabilidad, se ha realizado un segundo ensayo con este conector fijando el conector a la mordaza para así poder aplicar fuerzas superiores. Al aplicar fuerzas por encima de 1 kg se producen pliegues y aumenta la resistencia. Se ha detenido el ensayo al alcanzar una elongación de 20,5mm, y una resistencia media de 492 ohmios. Al reducir de nuevo la elongación a unos pocos milímetros, el valor medio de resistencia ha bajado hasta los 0,7 ohmios.



Figura 194. Ensayo de elongación sobre sustrato platilon con conector clincher fijando el conector directamente a la mordaza

El ensayo con pines crimpados ha soportado una fuerza de 1,79kg antes de producirse la pérdida de conductividad (llegando al fondo de escala), sin llegar a la rotura de la probeta. La elongación generada ha sido de 18mm.

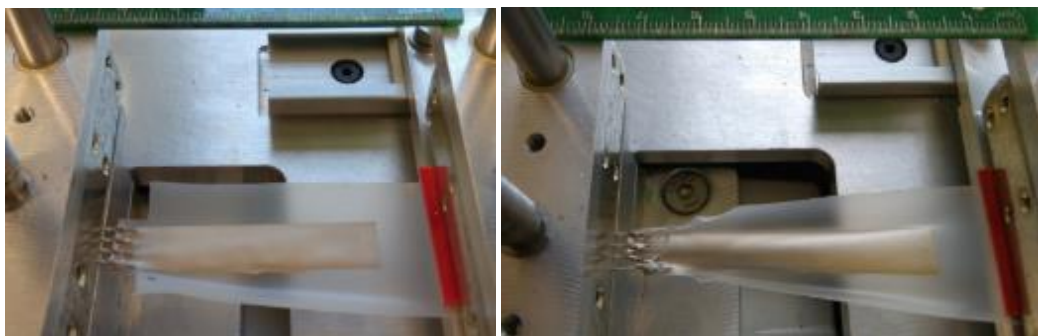


Figura 195. Ensayo de elongación sobre sustrato platilon con pines crimpados fijados directamente a la mordaza

### ***Ensayos sobre sustrato policarbonato con conector***

Sobre sustrato de policarbonato con conector de pines SMD horizontal se han realizado dos ensayos, el primero usando un conector hembra y aplicando fuerza hasta la desconexión, y el segundo fijando los pines del conector a la mordaza y aplicando fuerza hasta la rotura de la probeta. En el primer ensayo la fuerza de desconexión es pequeña, no llegando a detectarse por la célula de carga de la máquina de ensayos. La probeta no llega a estirarse en este caso y la desconexión se produce con un desplazamiento de 3,5mm. Mientras se mantiene la conexión la resistencia media por vía de conexión prácticamente no varía.

En el segundo ensayo, con los pines fijados, se produce la rotura de la probeta con un desplazamiento de 3,5mm. Con una fuerza aplicada de 4,79kg el conector todavía se mantiene fijo en el sustrato con una resistencia en la conexión menor de 5 ohmios.

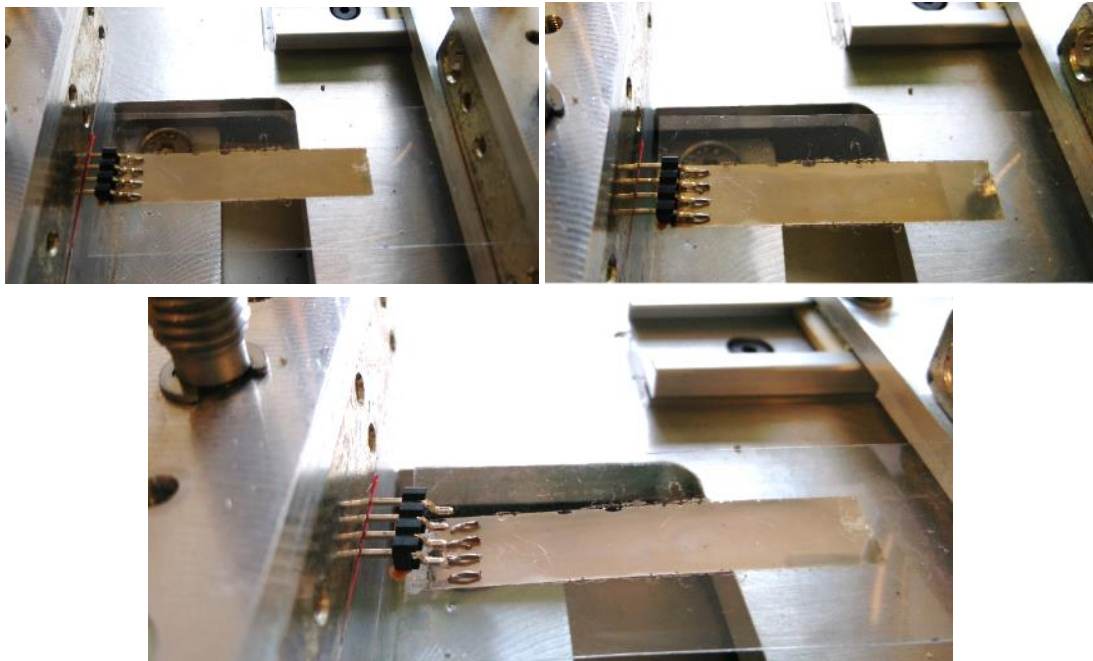


Figura 196. Ensayo de elongación sobre sustrato policarbonato con pines SMD fijos a la mordaza

### ***Ensayos sobre sustrato ABS con conector***

Con sustrato ABS de 250 micras se realizan también dos ensayos como en el caso anterior. Un primer ensayo con conector de pines conectado a un conector hembra, y un segundo ensayo con los pines del conector fijados a la mordaza que se desplaza.

En el primer ensayo de nuevo se obtiene la desconexión de conectores si apenas existir un cambio entre la resistencia entre conector y pista conductora sobre el sustrato.

En el segundo ensayo el conector soporta fuerzas de hasta 0,38kg antes de perderse la conexión en varias de las vías. Mientras se mantiene la conexión, la resistencia entre conector y pista conductora se mantiene con poca variación, siempre por debajo de 1 ohmio.

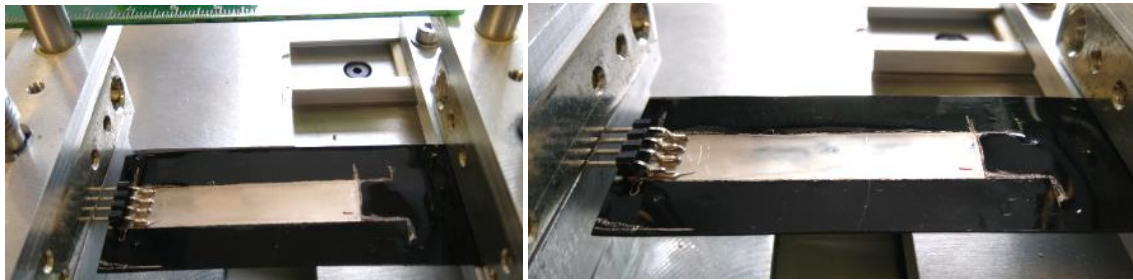


Figura 197. Ensayo de elongación sobre sustrato ABS con pines SMD fijos a la mordaza

### **Ensayos sobre sustrato Poliestireno con conector**

Con sustrato de poliestireno de 1mm de espesor se realiza primero el ensayo con conector macho y hembra unidos. La fijación del conector resistió sin problema hasta la desconexión del conector hembra, sin variación apreciable en la resistencia entre el conector de pines y la pista conductora sobre el sustrato. En el segundo ensayo, debido a la poca flexibilidad de este sustrato por su espesor de 1mm, el conector se despegó ya durante el montaje debido a las fuerzas generadas durante el apriete de la mordaza sobre los pines del conector.

#### 3.7.3.2.3 [Ensayos mecánicos de plegado y enrollado de pistas conductoras](#)

Este grupo de ensayos tiene por objetivo evaluar el comportamiento de la conductividad de pistas conductoras cuando el sustrato es deformado sin estiramiento. Se aplican dos tipos de deformaciones, por un lado el doblado o enrollamiento parcial con un radio de curvatura variable, y por otro lado el plegado del sustrato para formar un ángulo de 90 grados. En el caso de radio de curvatura se han considerado radios de 5mm, 10mm y 20mm.

Se han realizado ensayos con probetas sobre sustratos flexibles de tejido textil, TPU Platilon e Intexar, y sobre sustratos semirígidos de Policarbonato y ABS. Las probetas sobre poliestireno no soportan estos grados de plegado y enrollado debido al espesor de 1mm del sustrato. Las probetas de sustrato ABS de 250 micras no han soportado el plegado a 90 grados y tampoco el doblado con radio de curvatura de 5mm.

Se ha realizado cada ensayo mecánico sobre cuatro probetas de cada tipo de sustrato. A partir de las medidas de resistencia se determina la variación en el valor de resistencia debido a la deformación, y la variación relativa al valor de resistencia inicial en tanto por ciento. Finalmente se han obtenido los valores medios de estas variaciones relativas.

Se muestran algunas imágenes representativas de la realización de los ensayos.



Figura 198. Ensayo de enrollado y plegado sobre sustrato textil



Figura 199. Ensayo de enrollado y plegado sobre sustrato platilon



Figura 200. Ensayo de enrollado y plegado sobre sustrato intexar

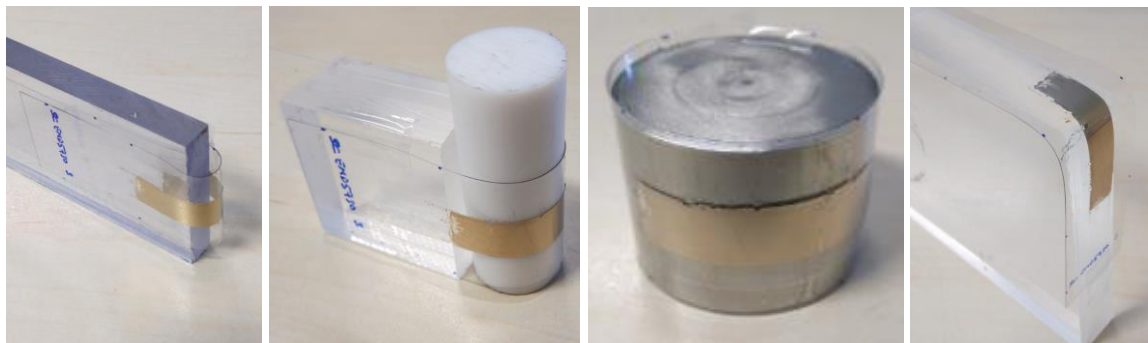


Figura 201. Ensayo de enrollado y plegado sobre sustrato policarbonato

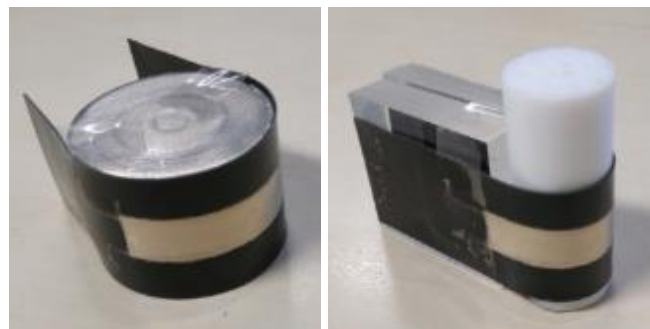


Figura 202. Ensayo de enrollado y plegado sobre sustrato ABS

Para estos ensayos los resultados son bastante semejantes en general. La variación en el valor de resistencia es pequeña si comparamos con los cambios sufridos en los ensayos de estiramiento.

Los mejores resultados, es decir, las variaciones menores, se obtienen con el tejido textil, el policarbonato, e incluso el ABS para los valores soportados de 4cm y 2cm. Las variaciones han sido

menores del 20%, lo que representa un incremento en el valor de resistencia prácticamente despreciable.

El sustrato TPU Platilon también proporciona unos buenos resultados, con variaciones relativas por debajo del 50%. En el caso de las probetas sobre Intexar, la variación relativa es mayor, entorno al 100%, que implica la multiplicación por dos en el valor de la resistencia. En ambos casos el valor de resistencia debido a la curvatura se mantiene en el mismo orden de magnitud que la resistencia inicial. Desde el punto de vista electrónico, estas variaciones no representan problemas para el desarrollo de circuitos digitales o circuitos analógicos convencionales. Podría tener cierto efecto con circuitos analógicos de alta precisión que requieran mantener una resistencia de valor fijo en ciertas pistas del circuito.

### 3.7.3.3 ENSAYOS DE DURABILIDAD

Los ensayos de durabilidad permiten exponer probetas, circuitos o demostradores a condiciones ambientales en exterior, condiciones de envejecimiento acelerado (exposición a radiación ultravioleta y exposición térmica prolongada, con o sin humedad), y simulación de ciclos de lavado. Dado que los materiales y procesos utilizados en la fabricación de PCBs (circuitos rígidos) y componentes electrónicos están técnicamente muy avanzados, no consideramos preciso evaluar con ensayos de durabilidad esta parte de los circuitos demostradores. Por otro lado, estos circuitos electrónicos y las envolventes que los protegen, no están diseñados con protección IP67 o IP68, que permitirían realizar ensayos con agua, simulando lluvia o lavados. Por lo que en caso de realizar ensayos con estos circuitos se evitarían los ensayos con agua o humedad.

Se considera que los ensayos de interés en este apartado son los que ponen a prueba los materiales y componentes utilizados en las partes formadas por electrónica impresa. Es decir, las partes con elementos de electrónica flexible y elástica, y las partes con electrónica flexible termoconformada.

Por esta razón, se han aplicado ensayos de durabilidad sobre probetas con diferentes combinaciones de sustratos (tejidos y plásticos), tintas conductoras y adhesivos conductores, que han permitido obtener anteriormente buenos resultados en la fabricación de los demostradores.

Los ensayos realizados sobre diferentes probetas son los siguientes:

- Envejecimiento acelerado: exposición a radiación ultravioleta
- Envejecimiento acelerado: exposición térmica prolongada (con o sin humedad)
- Ciclos de lavado

El objetivo de estos ensayos es:

- Observar cambio en la conductividad de pistas conductoras
- La posible degradación de sustratos y materiales
- La pérdida de adhesión de tintas, adhesivos y componentes con el sustrato.

#### 3.7.3.3.1 Muestras utilizadas en los ensayos

Se sometieron a ensayo los siguientes tipos de muestras:

- Conectores con tejido
- Conectores con Intexar
- Sustrato para termoconformado impreso

- Sustrato termoconformado con impresión
- Prueba adhesivos para componentes
- Probetas con circuitos encapsulados
- Tinta conductora sobre sustrato elástico
- Tropicalizado sobre tejido
- Pistas impresas sobre TPU 100  $\mu\text{m}$

#### 3.7.3.3.2 **Envejecimiento acelerado: Ensayo cíclico de clima húmedo y secado**

El ensayo cíclico se realizó tomando como referencia la norma 60068-2-52 (Ensayos ambientales. Parte 2: Ensayos. Ensayo Kb: niebla salina, ensayo cíclico (solución de cloruro sódico)), y se siguieron las condiciones descritas para la severidad 3, con una duración total de 168 horas:

- Cuatro ciclos de 24 horas, formado cada uno por 2 h de pulverización de niebla salina neutra seguido de 22 h a 40°C y 93% de humedad relativa.
- Tres ciclos de 24 horas a 23 °C y 50% de humedad relativa.

En la imagen siguiente se observa la posición de las muestras dentro de la cámara de corrosión.



Figura 203. Muestras en el interior de la cámara de corrosión.

A la finalización del ensayo, las muestras se lavaron con agua corriente, se aclararon con agua desionizada y finalmente se secaron en una primera etapa con aire comprimido para eliminar las gotas de agua, y una segunda etapa en una estufa a 55 °C durante 1 h.

A continuación, se realizó una evaluación visual de las muestras y una comprobación de la continuidad eléctrica de pistas utilizando un polímetro. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en el ensayo.

Tabla 7. Estado de las muestras tras el ensayo cíclico de clima húmedo y secado

Tipo de muestra		Codificación	Aspecto visual tras el ensayo y conductividad
<b>A</b>	<b>Conectores con tejido</b>		
A1	Pin	A1-1	Corrosión de los conectores. Pérdida de tinta en la zona de contacto con el conector en A1-1. Pérdida de conductividad en las pistas.
A2	Conector azul	A2-1	
A3	Conector blanco	A3-1	
<b>B</b>	<b>Intexar</b>		
B1	Pin	B1-1	Corrosión de los conectores. Pérdida de tinta sobre el sustrato en zonas descubiertas. Buena conductividad en los tramos con recubrimiento protector. Pérdida de conductividad por falta de tinta en tramos descubiertos. Sin conductividad en la interfaz con el conector.
B2	Conector azul	B2-1	
B3	Conector blanco	B3-1	
<b>C</b>	<b>Sustrato para termoconformado</b>		
C1	Transparente	C1-1	Desprendimiento de parte del circuito impreso.
C2	Negro	C2-1	Se mantiene una buena conductividad incluso con los desprendimientos en partes de la pista.
C3	Rojo	C3-1	Sin cambios significativos. Se mantiene buena conductividad
<b>D</b>	<b>Sustrato termoconformado tras impresión</b>	D	Sin cambios significativos. Se mantiene buena conductividad.
<b>E</b>	<b>Prueba adhesivos para componentes</b>		
E1	Sobre Intexar	E1-1	Aparente corrosión de los componentes.
E2	Sobre tejido	E2-1	La conductividad en las pistas se mantiene en E1-1 y ha empeorado en E2-1. Se ha perdido la conductividad en el adhesivo conductor en un número elevado de los componentes, sobre todo en las resistencias de menor tamaño.
<b>F</b>	<b>Probetas con circuitos encapsulados</b>		
F1	Sobre tejido	F1-1	Sin cambios significativos.
F2	Sobre intexar	F2-1	Mantienen su buena conductividad en ambos casos.

<b>G Tinta conductora sobre sustrato elástico</b>			
G1	Tejido	G1-1	Sin cambios significativos. Mantiene la conductividad en pistas anchas. Empeora en pistas que ya tenían baja conductividad, aunque buena en tramos cortos. Medidas inestables.
G2	Intexar	G2-1	Desprendimiento de parte del circuito impreso. Mantiene muy buena conductividad
G3	Platilon 150 µm	G3-A	Sin cambios significativos. Mantiene buena conductividad
<b>H Tropicalizado sobre tejido</b>			
H-A	A	HA-1	Sin cambios significativos
H-S	S	HS-1	Las pistas no conducen debido al tropicalizado
H-U	U	HU-1	

### 3.7.3.3.3 Envejecimiento acelerado: Ensayo de exposición a luz ultravioleta

Para la ejecución del ensayo de exposición a luz ultravioleta se siguió como referencia la norma UNE-EN 60068-2-5 (Ensayos ambientales. Parte 2-5: Ensayos. Ensayo Sa: Radiación solar simulada a nivel del suelo y guía para ensayos de radiación solar). Las muestras se expusieron a irradiación continua a 40 °C utilizando lámparas UVA-340, que emiten en un rango entre 295-365 nm, con una emisión máxima a 340 nm. La intensidad de radiación fue de 0.76 W/m<sup>2</sup>nm.

Se realizó una evaluación visual de las muestras y una comprobación de la continuidad eléctrica de pistas utilizando un polímetro. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en el ensayo.

Tabla 8. Estado de las muestras tras el ensayo de exposición a luz UV

Tipo de muestra		Codificación	Aspecto visual tras el ensayo y conductividad
<b>A Conectores con tejido</b>			
A1	Pin	A1-2	Cambio de color a Amarillo. Pérdida de conductividad en las pistas del tejido. Buena conductividad en los terminales de los conectores.
A2	Conector azul	A2-2	
A3	Conector blanco	A3-2	
<b>B Intexar</b>			
B1	Pin	B1-2	Cambio de color a Amarillo. Mejor conductividad en la zona protegida con valores de resistencia por debajo de 100 ohmios. Valores de cientos de ohmios o kiloohmios en la zona no protegida. Pérdida de conductividad en la interfaz con el conector.
B2	Conector azul	B2-2	
B3	Conector blanco	B3-2	

<b>C Sustrato para termoconformado</b>			
C1	Transparente	C1-2	Sin cambios significativos. Pérdida de conductividad en las pistas, aumentando su valor resistivo entre 3 y 10 veces.
C2	Negro	C2-2	
C3	Rojo	C3-2	
<b>E Prueba adhesivos para componentes</b>			
E1	Sobre Intexar	E1-2	Cambio de color a Amarillo. Muy buena conductividad en pistas impresas y en uniones con adhesivo conductor. En general valores de resistencia por debajo de 1 ohmio.
E2	Sobre tejido	E2-2	Sin cambios significativos. Elevada resistencia en las pistas, desde 100 ohmios a mega ohmios. Buena conductividad en el adhesivo conductor, por debajo de 1 ohmio.
<b>F Probetas con circuitos encapsulados</b>			
F1	Sobre tejido	F1-2	Cambio de color a amarillo.  Buena conductividad en las pistas conductoras, sobre todo en el caso de intexar (valores de 1,6 ohmios). Resistencia de 3,5 ohmios en las interfaces con adhesivo conductor.
F2	Sobre intexar	F2-2	
<b>G Tinta conductora sobre sustrato elástico</b>			
G1	Tejido	G1-2	Sin cambios significativos. La resistencia se mantiene en algunas pistas y en otras aumenta hasta el doble del valor inicial.
G2	Intexar	G2-2	Cambio de color a amarillo.  Se mantiene una buena conductividad en las pistas.
G3	Platilon 150 µm	G3-C	
<b>H Tropicalizado sobre tejido</b>			
H-A	A	HA-2	Sin cambios significativos. Las pistas no conducen debido al tropicalizado recubriendo las pistas.
H-S	S	HS-2	
H-U	U	HU-2	
<b>I Platilon 100 µm</b>			
I-A	A	I-A	Cambio de color a Amarillo. Se mantiene la buena conductividad de la pista.

#### 3.7.3.3.4 Ciclos de lavado: Ensayo de inmersión

El ensayo de inmersión pretende simular la exposición de las muestras a ciclos de lavado. Para ello, se tomó como referencia la norma IEC 60068-2-18:2017 (Ensayos ambientales. Parte 2-18: Ensayos. Ensayo R y guía: Agua), y se aplicaron las siguientes condiciones de ensayo:

- Altura de columna de agua: 0.32 m

- Temperatura: 30 °C
- Duración: 48 h

Para poder acomodar y asegurar la posición de las muestras en el fondo del baño de inmersión, se fijaron con silicona sobre una lámina de plástico, como se puede observar en la siguiente figura.

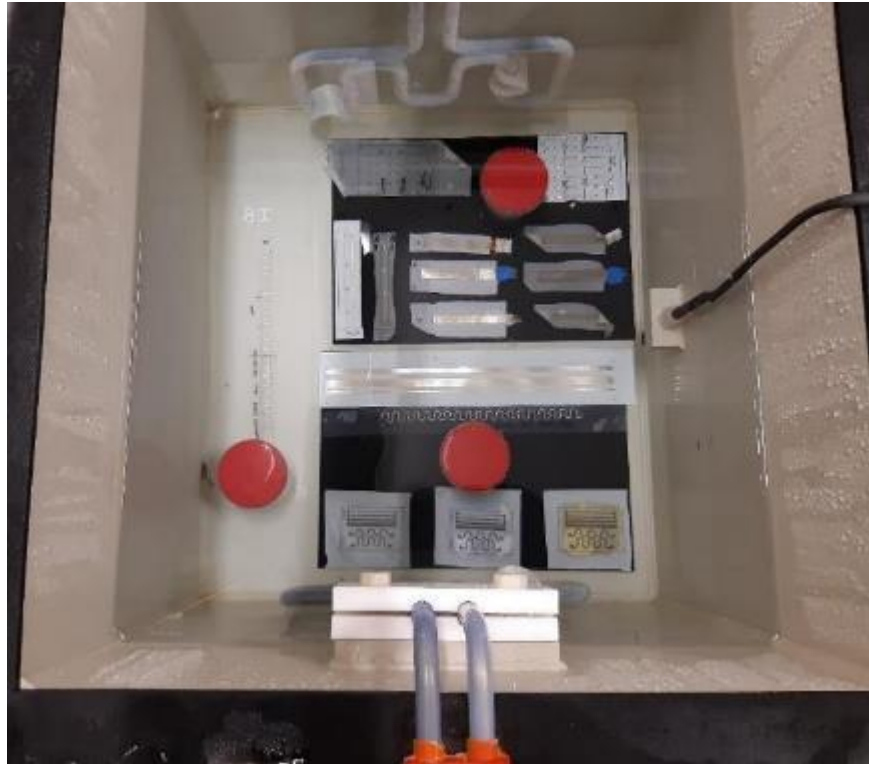


Figura 204. Muestras en el interior del baño de inmersión.

A la finalización del ensayo las muestras se secaron con aire comprimido a temperatura ambiente. Seguidamente se realizó la evaluación visual de las muestras y una comprobación de la continuidad eléctrica de pistas mediante polímetro. La siguiente tabla e imágenes presentan el estado de las muestras tras el ensayo.

Tabla 9. Estado de las muestras tras el ensayo de inmersión

Tipo de muestra	Inmersión	Aspecto visual tras el ensayo y conductividad
<b>A</b>	<b>Conectores con tejido</b>	
A1	Pin	A1-3
A2	Conector azul	A2-3
A3	Conector blanco	A3-3
<b>B</b>	<b>Intexar</b>	
B1	Pin	B1-3
B2	Conector azul	B2-3
B3	Conector blanco	B3-3

			Pérdida de la conductividad en varias de las pistas. Sin conductividad en la interfaz con el conector.
<b>E</b>	<b>Prueba adhesivos para componentes</b>		
E1	Sobre Intexar	E1-3	Sin cambios aparentes. En E1-3, menos de un ohmio en las pistas. En torno a 2 ohm en las interfaces. En E2-3, entre cien ohmios y varios kiloohmios en las pistas. Kiloohmios o Megaohmios en las uniones con adhesivo conductor.
E2	Sobre tejido	E2-3	
<b>F</b>	<b>Probetas con circuitos encapsulados</b>		
F1	Sobre tejido	F1-3	Ligero desprendimiento de parte del circuito impreso. Se mantiene buena conductividad en las pistas al descubierto.
F2	Sobre intexar	F2-3	Sin cambios aparentes. Buena conductividad en las pistas (menor de 3 ohmios) y en las uniones con adhesivo conductor.
<b>G</b>	<b>Tinta conductora sobre sustrato elástico</b>		
G2	Intexar	G2-3	Sin cambios aparentes. Se mantiene la buena conductividad en las pistas
G3	Platilon 150 µm	G3-B	
<b>H</b>	<b>Tropicalizado sobre tejido</b>		
H-A	A	HA-3	Sin cambios aparentes. Las pistas no conducen debido al recubrimiento tropicalizado de las pistas.
H-S	S	HS-3	
H-U	U	HU-3	
<b>I</b>	<b>Platilon 100 µm</b>		
I-B	B	I-B	Sin cambios aparentes. Se mantiene la buena conductividad en toda la pista.

## 4 CONCLUSIONES

Los esfuerzos realizados durante la primera anualidad del proyecto WINTEI se centraron por un lado en la definición de los demostradores del proyecto (Hito 1), y por otro, en el desarrollo del proceso de fabricación de circuitos elásticos (Hito 2).

Para la definición de los demostradores del proyecto, se realizó en primer lugar un análisis del estado del arte del campo de los wearables inteligentes. Se revisó la bibliografía científico-técnica para conocer las últimas tendencias en el sector y los tipos de producto que actualmente se están desarrollando. Asimismo, se analizaron productos ya disponibles en el mercado para los distintos sectores de interés en el proyecto: industrial, salud y deporte / ocio. Tras este análisis se llevó a

cabo la definición y priorización de requisitos para el desarrollo de smart wearables en el contexto del proyecto.

Tras este análisis, se identificaron 7 posibles casos de uso, y para cada uno de ellos se definió el diagrama con los actores más relevantes implicados en la aplicación. Se identificaron también posibles casos de uso secundarios que podrían abordarse en futuros proyectos utilizando tecnologías y diseños similares a los propuestos.

Para cada posible demostrador se definieron especificaciones detalladas y se llevaron a cabo los diseños conceptuales tanto mecánicos como electrónicos, incluyendo bocetos, diagramas de bloques y esquemas preliminares. Finalmente, se seleccionaron 4 casos de uso que formaron la base para los demostradores del proyecto:

- **Demo 1: SMART ARM.** Un dispositivo para monitorizar el movimiento humano, en concreto la trayectoria de un brazo que se implementa sobre sustrato flexible. La aplicación principal en el sector salud es la de la rehabilitación de pacientes tras traumatismos o accidentes cardiovasculares. El sistema es capaz de detectar las trayectorias del brazo y avisar al usuario si se producen desviaciones respecto a las pautas marcadas por un especialista.
- **Demo 2: SMART ARM PRO.** Se puede considerar una ampliación del caso de uso anterior, pero en este caso el sistema es rígido y debe aportar suficiente resistencia mecánica para ejercer fuerzas sobre el paciente. Además de monitorizar la trayectoria del movimiento de un brazo, en este caso el sistema puede actuar ejerciendo una fuerza bien a favor o en contra del movimiento.
- **Demo 3. HMITEXT.** Se centra en la integración de botoneras táctiles en textiles, para el control de distintos equipos que podrían ser portados por el usuario o bien externos, por ejemplo en el marco de la industria 4.0 podría ser de gran interés como equipo para interacción hombre-máquina (HMI) totalmente integrado.
- **Demo 4. SMART SHOE.** Este demostrador se basa en la integración de diferentes sensores en suelas de calzado, utilizando sistemas wearables de formato rígido o semi-rígido. Mediante su integración en calzado de seguridad podría utilizarse tanto para el control de accesos, utilizando sensores RFID, como para la medida de los esfuerzos realizados durante el desempeño diario.

En paralelo con las tareas anteriores, en la primera anualidad se desarrolló el proceso de fabricación de circuitos sobre sustratos elásticos. Para ello, se seleccionaron como sustratos preferentes varios tipos de textiles y sustratos poliméricos de base poliuretano termoplástico. Se identificaron y adquirieron distintos tipos de recubrimientos, tintas conductoras y dieléctricas tanto para imprimir con inkjet como con serigrafía, así como varios tipos de adhesivos y componentes electrónicos para la implementación de los circuitos.

Se realizó un análisis detallado de las ventajas de realizar pistas conductoras en forma de meandro para lograr una mayor elasticidad de los electrodos impresos y se llevó a cabo el diseño de múltiples circuitos, para usar como probetas en la evaluación de todos los procesos de fabricación implicados.

Los ajustes de proceso se centraron por un lado en la optimización del control del sustrato y control del proceso de impresión en la línea R2R, y por otro en la optimización de los parámetros específicos de cada proceso. Para la impresión se realizaron ajustes tanto en la impresión serigráfica como en la impresión inkjet, para adaptar los procesos a las nuevas tintas y pastas de impresión a utilizar en

combinación con los sustratos elásticos. Utilizando como indicadores de control principales la inspección visual y la medida de la resistencia eléctrica, se optimizó también el proceso de sinterizado para cada conjunto principal de materiales.

Se realizaron ajustes en el proceso de dispensado de adhesivos y el posicionamiento de componentes utilizando el robot pick & place. Las probetas se caracterizaron midiendo la resistencia de contacto entre el componente y la pista, y también se realizaron medidas cualitativas de adhesión. Los resultados obtenidos mostraron que el proceso de fabricación de circuitos electrónicos sobre sustrato flexible es viable con los materiales y los equipos disponibles.

Durante la segunda anualidad las actividades se concentraron por un lado en el desarrollo de procesos de integración de wearables, como el laminado, conexionado y termoconformado (Hito 3). Por otro lado, se llevó a cabo el desarrollo de dos demostradores de wearables en textil (Hito 4). En paralelo, se dedicó una importante parte de los recursos al desarrollo e implementación de procedimientos de validación (Hito 6).

Los procesos de integración abordaron de forma sistemática todos los aspectos necesarios para convertir un circuito impreso sobre sustrato elástico en un producto wearable. En primer lugar, se analizaron soluciones de conexionado y se encontraron elementos para llevar a cabo uniones robustas entre partes flexibles y rígidas de los sistemas. Se optimizaron además los procesos de laminado o encapsulado para proteger los circuitos de posibles agresiones externas y alargar así su vida útil. Además, se llevó a cabo el desarrollo de un novedoso proceso para termoconformado de circuitos impresos de cara a fabricar piezas rígidas tridimensionales con electrónica integrada, que sería aplicada para la fabricación de wearables rígidos en la tercera anualidad.

En la segunda anualidad, los demostradores elegidos fueron de base textil. Se llevó a cabo el desarrollo completo y fabricación de los dos demostradores seleccionados en la primera anualidad para este fin: la manga inteligente para monitorización del movimiento (SMART ARM), y la interfaz hombre máquina integrada en chaqueta de trabajo (HMITEXT). En ambos casos se realizó el diseño mecánico de detalle teniendo en cuenta todos los elementos a integrar y el posicionamiento óptimo para cada uno de ellos. Se diseñó toda la electrónica, incluyendo pulsadores, acelerómetros, LEDs, sistema de alimentación, comunicación, etc., para poder implementar todas las funcionalidades requeridas en los demostradores. Finalmente se procedió a fabricar y programar los sistemas y a integrarlos en los productos finales.

Se desarrollaron también procesos de validación detallados para permitir una validación exhaustiva de los demostradores. Se analizaron los ensayos y tests a realizar tanto para verificar la funcionalidad de los sistemas como para analizar aspectos mecánicos y electromagnéticos. En estos dos casos, además, se diseñaron y fabricaron equipos específicos al no existir equipos comerciales para ensayar este tipo de productos cuya presencia en el mercado aún es incipiente. Se analizaron también los ensayos climáticos necesarios para asegurar la robustez continuada de los productos en el tiempo, incluso sometidos a agresiones externas intensas como puede ser calor, humedad o radiación ultravioleta.

Se llevaron a cabo actividades de difusión y explotación de los resultados del proyecto entre las que destacan la participación en una jornada específica de wearables realizada en Asturias, y la preparación de varias propuestas para el desarrollo de nuevos proyectos en esta línea de trabajo.

---

Durante la tercera anualidad del proyecto las actividades se centraron por un lado en el desarrollo de dos demostradores de wearables con soporte rígido y usando termoconformado (Hito 5), y por otro lado en la realización de pruebas de validación funcional de demostradores y ensayos con probetas obtenidas sobre sustratos elásticos y termoconformados (Hito 6).

Se ha llevado a cabo el desarrollo completo y fabricación de los dos demostradores seleccionados en la primera anualidad para la evaluación de procesos de fabricación de wearables sobre sustrato rígido: El exoesqueleto con articulación motorizada (SMART ARM PRO), y el calzado con capacidad de detección RFID y medida de la presión sobre el suelo (SMART SHOE). En ambos casos se realizó el diseño mecánico de detalle teniendo en cuenta todos los elementos a integrar y el posicionamiento óptimo para cada uno de ellos. Se diseñó toda la electrónica, incluyendo sensores, sistemas RFID, acelerómetros, drivers y actuador lineal, sistema de alimentación, comunicaciones, etc., para poder implementar todas las funcionalidades requeridas en los demostradores. Finalmente se procedió a fabricar y programar los sistemas y a integrarlos en los productos finales.

Se han realizado pruebas y ensayos a los demostradores desarrollados en el proyecto para obtener una validación exhaustiva de éstos. Las pruebas han sido de validación de funcionamiento y validación de uso. Se han realizado ensayos de compatibilidad electromagnética (CEM), de tracción mecánica y plegado, y ensayos de durabilidad. Para los ensayos CEM y de tracción se han utilizado los equipos desarrollados en el proyecto.

Finalmente, se han llevado a cabo actividades de transferencia tecnológica de los resultados del proyecto con la preparación de varias propuestas para el desarrollo de nuevos proyectos en esta línea de trabajo.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kenry, Joo Chuan Yeo, Chwee Teck Lim, Emerging flexible and wearable physical sensing platforms for healthcare and biomedical applications, *Microsystems & Nanoengineering* (2016) 2, 16043.
- [2] Trung TQ, Lee NE, Flexible and stretchable physical sensor integrated platforms for wearable human-activity monitoring and personal healthcare, *Adv. Mater.* 2016, 28, 4338–4372.
- [3] Z. Zhu, T. Liu, G. Li, T. Li, and Y. Inoue, “Wearable Sensor Systems for Infants,” *Sensors*, vol. 15, no. 2, pp. 3721–3749, Feb. 2015.
- [4] Mazzoldi, A., de Rossi, D., Lorussi, F., Scilingo, E. P., & Paradiso, R. (2002). Smart textiles for wearable motion capture systems. *AUTEX Research Journal*, 2, 199-203.
- [5] De Rossi, D., Carpi, F., Lorussi, F., Mazzoldi, A., Paradiso, R., Scilingo, E. P., & Tognetti, A. (2003). Electroactive fabrics and wearable biomonitoring devices. *AUTEX Research Journal*, 3, 180-185.
- [6] W. Tao, T. Liu, R. Zheng, and H. Feng, “Gait Analysis Using Wearable Sensors,” *Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 2255–2283, Feb. 2012.
- [7] S. Tadano, R. Takeda, K. Sasaki, T. Fujisawa, and H. Tohyama, “Gait characterization for osteoarthritis patients using wearable gait sensors (H-Gait systems),” *J. Biomech.*, vol. 49, no. 5, pp. 684–690, Mar. 2016.
- [8] K. F. Lei, K.-F. Lee, and M.-Y. Lee, “A flexible PDMS capacitive tactile sensor with adjustable measurement range for plantar pressure measurement,” *Microsyst. Technol.*, vol. 20, no. 7, pp. 1351–1358, Jul. 2014.
- [9] Van Langenhove, L., & T. T. Institute (2007). “Smart textiles for medicine and healthcare: Materials, systems and applications”. Abington: Woodhead.
- [10] M. A. Invernale, Y. Ding, G. A. Sotzing, “All-Organic Electrochromic Spandex”, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2010, 2, 296 –300.
- [11] M. B. Schubert and J. H. Werner, “Flexible solar cells for clothing”, *Mater. Today*, 2006, 9, 42-50.
- [12] J Vanfleteren, F Bossuyt, B Plovie, “A new technology for rigid 3D free-form electronics based on the thermoplastic deformation of flat standard PCB type circuits”, 2016 12th International Congress Molded Interconnect Devices (MID).
- [13] F. Marcori, M. Antonipieri, I. Di Vora, S. Padovani, I. Riolino, “Study of MID Technologies for Automotive Lighting and Light Signaling Devices”, *Advanced Materials Research Vol 1038* (2014) pp 97-103.
- [14] *Wearable Technology 2018-2028: Markets, Players, Forecasts*, IDTechEx 2017.
- [15] *Wearable Technology 2014–2024: Technologies, Markets, Forecasts*, ResearchMOZ 2014.
- [16] Dehghani, M. and Dangelico, R.M. (2018) ‘Smart wearable technologies: state of the art and evolution over time through patent analysis and clustering’, *Int. J. Product Development*, Vol. 22, No. 4, pp.293–313.

- [17] [https://www.agpd.es/portalwebAGPD/internacional/textosynormas/textos\\_union\\_europea/textos\\_directivas/common/pdfs/B.4\\_Directiva\\_95-46-CE.pdf](https://www.agpd.es/portalwebAGPD/internacional/textosynormas/textos_union_europea/textos_directivas/common/pdfs/B.4_Directiva_95-46-CE.pdf)
- [18] [http://www.agpd.es/portalwebAGPD/canaldocumentacion/legislacion/union\\_europea/directivas/common/pdfs/B.6-cp--Directiva-2002-58-CE-protecci-oo-n-e-intimidad-en-comunicaciones-electronicas.pdf](http://www.agpd.es/portalwebAGPD/canaldocumentacion/legislacion/union_europea/directivas/common/pdfs/B.6-cp--Directiva-2002-58-CE-protecci-oo-n-e-intimidad-en-comunicaciones-electronicas.pdf)
- [19] M Suh , KE Carroll, E Grant, W Oxenham, Effect of fabric substrate and coating material on the quality of conductive printing (2013), Journal of The Textile Institute, 104:2, 213-222.
- [20] M Gonzalez, F Axisa, MV Bulcke, D Brosteaux, B Vandeveldel and J Vanfleteren (2008). Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits. Microelectron. Reliab. 48 825–32.