

ELECTRÓNICA IMPRESA. “PRINTED ELECTRONICS”

JUAN MIGUEL IBÁÑEZ DE ALDECOA QUINTANA

La electrónica impresa o electrónica flexible es una tecnología emergente que permite fabricar circuitos y dispositivos electrónicos sobre sustratos flexibles como papel, plástico o textil, utilizando técnicas de impresión como serigrafía, *inkjet*, huecogrado o flexografía. No busca reemplazar a la microelectrónica tradicional de silicio rígido, sino complementarla en aplicaciones de bajo nivel de integración, destacando por su ligereza, delgadez y bajo coste. Basada en procesos aditivos, elimina etapas complejas como la fotolitografía o el grabado químico, lo que la convierte en una alternativa eficiente y versátil. Su principal fortaleza es la reducción de costes y tiempos de producción, especialmente gracias a los procesos de impresión en continuo (“*roll-to-roll*”), que permiten fabricar grandes volúmenes optimizando el uso de materiales y tintas funcionales. Esta tecnología es ideal para productos con márgenes ajustados y necesidades de producción escalable. Además, su capacidad para trabajar con sustratos flexibles permite desarrollar dispositivos que se adaptan a superficies curvas o plegables, ampliando su aplicabilidad.

La flexibilidad de los materiales permite aplicaciones innovadoras en sectores como textil inteligente, medicina personalizada, electrónica portátil, sensores ambientales y embalaje inteligente. Los dispositivos son delgados, ligeros y maleables, integrándose fácilmente en ropa, piel, muebles o envases sin perder funcionalidad ni diseño. Su fabri-

cación se basa en un equilibrio entre tinta funcional, sustrato y técnica de impresión, representado en el triángulo de la electrónica impresa (figura 1). La impresión directa reduce interconexiones y componentes, simplificando el diseño, y permite imprimir múltiples funciones en una sola pasada. La electrónica híbrida flexible, que combina componentes tradicionales con circuitos impresos, amplía aún más sus capacidades.

FIGURA 1
TRIÁNGULO DE LA ELECTRÓNICA IMPRESA: TINTA, SUSTRATO Y MEDIO DE IMPRESIÓN



SUSTRATOS

La impresión electrónica permite fabricar productos flexibles usando sustratos reciclables como papel, cartón, plásticos, etc. con tecnologías de impresión convencionales, logrando procesos más rápidos y económicos. Además, facilita diseños flexi-

bles e integrables usando materiales de bajo coste como textil, papel y plástico.

Papel

El papel se destaca como un sustrato orgánico con gran potencial para la electrónica impresa, especialmente en componentes de comunicación de tecnología plana. Sus principales ventajas radican en su bajo coste, la posibilidad de producción masiva y sus beneficios medioambientales derivados de su reciclabilidad. Además, es compatible con técnicas de fabricación en volumen como la serigrafía, inyección de tinta o huecograbado, permitiendo la creación de múltiples capas metálicas.

Sin embargo, el papel aún presenta importantes limitaciones técnicas que dificultan su estandarización como sustrato. Entre ellas se encuentran su rugosidad, elevada absorción de tinta, deformabilidad y baja resistencia térmica, factores que restringen su uso en determinadas aplicaciones. Superar estos retos exige un desarrollo continuo en las tecnologías de impresión de tintas conductoras, especialmente en aplicaciones como las etiquetas RFID.¹

La investigación actual se enfoca en la optimización de tratamientos del papel para mejorar propiedades como la hidrofobia y la adhesión, así como en el perfeccionamiento de los procesos de impresión, controlando parámetros como la viscosidad, el curado y la temperatura. Es fundamental la caracterización de sus propiedades eléctricas y electromagnéticas (constante dieléctrica, conductividad de tinta, tangente de pérdidas), empleando métodos como las capacidades de placas paralelas y resonadores planares. Desde 2001, la impresión electrónica en papel se ha investigado para transistores, sensores, pantallas, y más recientemente, para antenas RFID y filtros UHF²/microondas.

Para el éxito de estos desarrollos, el papel debe exhibir alta hidrofobia y bajas pérdidas electromagnéticas. Las tintas conductoras,

especialmente las aplicadas por huecograbado, deben alcanzar conductividades adecuadas para componentes de comunicaciones, siendo el tiempo de curado y la viscosidad de la tinta parámetros clave para sus propiedades eléctricas. En síntesis, el papel sigue siendo objeto de intensa investigación multidisciplinar para consolidarse como un sustrato eficaz y económico para una amplia gama de aplicaciones de electrónica impresa de gran volumen.

Plásticos

Los plásticos son fundamentales en electrónica impresa, sirviendo como sustratos o componentes funcionales. Los más comunes son PET (bajo coste, flexible, transparente), PI (alta resistencia térmica), PC (transparente y duradero), PEN (estabilidad térmica y mecánica mejorada) y PP (ligero y económico).

Sus ventajas incluyen flexibilidad, maleabilidad para dispositivos curvados o flexibles (pantallas OLED³, sensores, etiquetas), ligereza, bajo coste en masa y compatibilidad con procesos económicos y escalables como serigrafía e inyección de tinta.

Textiles

La electrónica impresa en textiles integra componentes electrónicos en fibras o superficies de tejidos, con aplicaciones en moda, salud y deporte. Se utilizan tintas conductoras con partículas de plata, cobre, grafeno o carbono, impresas en tejidos como algodón y poliéster tratados químicamente para mejorar adhesión. La serigrafía es la técnica ideal para producción a gran escala de circuitos conductores en textiles.

Metamateriales

Los metamateriales son estructuras artificiales con propiedades electromagnéticas

1 Identificación por Radiofrecuencia

2 Ultra Alta Frecuencia. Banda del espectro electromagnético comprendida entre 300 MHz y 3 GHz

3 Organic light-emitting diode

controlables, definidas por su estructura más que por su composición, y miniaturizadas respecto a la longitud de onda. Permiten obtener propiedades únicas y controlables, superando medios naturales.

TINTAS CONDUCTORAS

La impresión de tintas conductoras y dieléctricas sobre sustratos es un proceso aditivo y directo, que reduce tanto los costes de fabricación como el impacto ambiental. Se continúa desarrollando moléculas orgánicas e inorgánicas para tintas electrónicas, muchas de las cuales son más adecuadas que el silicio para aplicaciones de bajo coste y baja complejidad, como etiquetas RFID pasivas, sensores de bajo consumo, pantallas electroluminiscentes simples, envases y tejidos inteligentes.

Para evaluar tintas y tejidos dieléctricos, se utilizan estructuras tipo sándwich con planos conductores externos y materiales dieléctricos internos. Estas se emplean como sensores capacitivos para medir variables como presión, temperatura, humedad, movimiento y tacto. Su desempeño depende de la distancia entre planos y la permeabilidad magnética del dieléctrico, y son menos sensibles a la conductividad de los planos conductores, lo que mejora su comportamiento ante deformaciones.

Los fabricantes buscan desarrollar tintas conductoras, semiconductoras y aislantes para ampliar las posibilidades de la electrónica impresa. Mientras que las tintas conductoras ya tienen estabilidad y funcionalidad probadas, las aislantes y semiconductoras siguen en desarrollo. Destacan avances con semiconductores orgánicos como pentaceno y P3HT, y óxidos metálicos como IGZO, que acercan la electrónica impresa a aplicaciones más complejas como transistores de película delgada (TFT) y sensores de alta precisión.⁴

Las tintas, tanto orgánicas como inorgánicas, pueden modificarse para obtener propiedades de conductividad, semiconductoras o aislamiento. Las tintas metálicas

inorgánicas a base de nanopartículas son especialmente populares por su estabilidad, viscosidad adecuada y baja temperatura de curado, combinando funcionalidad con facilidad de impresión.

Se desarrollan también tintas electroluminiscentes, dieléctricas, semiconductoras y conductoras orientadas a superar las limitaciones del silicio, enfocadas en sensores para variables físicas y químicas como temperatura, humedad y gases (metano, CO₂, etanol, amoníaco, sulfuro de hidrógeno, oxígeno, ácidos nitroso y sulfhídrico, mercaptano y aminas biogénicas), con aplicaciones destacadas en calidad alimentaria. La figura 2, muestra tintas conductoras para el desarrollo de ropa inteligente.

FIGURA 2
TINTA CONDUCTORA



Fuente: Unas tintas capaces de conducir electricidad y que permitirán hacer ropa inteligente

La tinta conductora aplicada por huecograbado debe alcanzar conductividades adecuadas para componentes de comunicaciones como circuitos pasivos y antenas planas. La tecnología de electrónica impresa y tintas funcionales permite desarrollar sensores de variables físicas y químicas. El tiempo de curado y la viscosidad de la tinta (controlada mediante espesantes, nanopartículas de plata y polímeros) son parámetros clave para sus propiedades eléctricas. Para medir espesores de papel y tinta se usan espectroscopía infrarroja y balanzas de precisión, mientras que microscopías SEM y TEM permiten observar la morfología de nanopartículas. La conectividad de estas partículas, fundamental para el rendimiento, depende de la temperatura y condiciones de curado.

4 A Review of the Progress of Thin-Film Transistors and Their Technologies for Flexible Electronics

TÉCNICAS DE IMPRESIÓN

Cada técnica de impresión en electrónica impresa tiene particularidades que afectan el grosor de capa y requieren diferentes viscosidades de tinta, lo cual influye en la conductividad final. Por ello, se evalúan tintas conductoras, flexibles y estirables para sustratos flexibles. Se ha observado que la conductividad disminuye linealmente con el estiramiento, pero puede recuperarse si la deformación no sobrepasa cierto umbral, lo cual es clave para sensores y conexiones estables.⁵

La electrónica impresa, como tecnología emergente, integra avances de varias disciplinas y utiliza tintas conductoras y sustratos no basados en silicio, respondiendo a la demanda de dispositivos flexibles y de bajo coste. Aunque el silicio sigue siendo predominante, la adaptación de tecnologías de impresión ha abierto nuevas posibilidades.

El 60,8 % de cuota de mercado para impresión por contacto en 2023 incluye serigrafía, flexografía y huecograbado.⁶ La serigrafía lidera por su versatilidad, espesor de depósito, compatibilidad con distintos materiales y bajo coste.⁷

Actualmente, la investigación se centra en impresión "reel-to-reel" (R2R), especialmente tecnologías como *inkjet* y grabado, con tintas basadas en metales (plata, cobre) y óxidos (zinc). Estas se han probado sobre papel para componentes de RF y microondas, pero requieren caracterización física, eléctrica y dieléctrica completa.

También se están adaptando técnicas convencionales como offset para electrónica funcional. Las cinco técnicas clave actuales son: offset, flexografía, serigrafía, *inkjet* y huecograbado, elegidas por su presencia industrial o su potencial innovador.

Estas técnicas se agrupan en dos categorías principales: técnicas analógicas (serigrafía, huecograbado, offset, flexografía), que requieren máscaras o patrones físicos, implicando mayor coste inicial pero alta eficiencia en producción masiva, y técnicas digitales (*inkjet*), que no requieren patrones, ideales

para prototipos y series cortas, aunque son más lentas para grandes volúmenes.

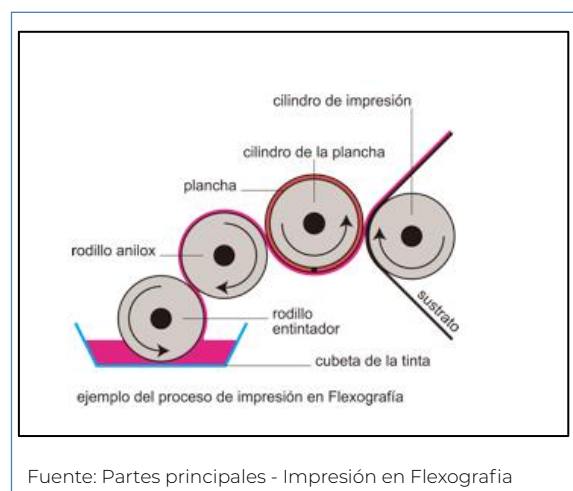
La elección depende del equilibrio entre coste, velocidad, volumen y aplicación final. No hay una técnica superior universalmente. Otro enfoque emergente es la impresión 3D con tintas funcionales, que permite objetos tridimensionales con circuitos embebidos, brindando gran libertad de diseño.

En resumen, la I+D en electrónica impresa se enfoca en adaptar técnicas gráficas y explorar nuevas rutas como la impresión 3D, con el objetivo de lograr una producción electrónica flexible, funcional y en gran escala. A continuación, se detallan las tecnologías principales.

Flexografía

Tal y como se muestra en la fig. 3, es una técnica de impresión analógica, parte de los sistemas "roll-to-roll". Se caracteriza por utilizar una plancha flexible (cliché) con las zonas a imprimir en relieve, a la que un rodillo anilox transfiere tinta desde un depósito. Posteriormente, este cliché imprime directamente sobre el sustrato mediante contacto y presión. Tras la impresión, se pueden usar métodos de secado como aire caliente, radiación ultravioleta o infrarrojos.⁸

FIGURA 3
PROCESO DE IMPRESIÓN MEDIANTE FLEXOGRAFÍA



5 La impresión electrónica: una realidad para el futuro de los tejidos inteligentes - Energías

6 <https://www.globenewswire.com/news-release/2024/03/27/2853059/0/en/Global-Printed-Electronics-Market-is-Poised-to-Reach-a-Valuation-of-USD-62-57-Billion-by-2032-Astute-Analytica.html>

7 Screen printing - Wikipedia

8 La impresión electrónica: una realidad para el futuro de los tejidos inteligentes - Energías

FIGURA 4
FLEXOGRAFÍA

Flexografía	
Categoría	Analógica (requiere máscara)
Resolución	Media
Velocidad	Alta
Viscosidad de tinta admisible	Baja a media
Grosor de capa depositada	Media
Coste inicial	Medio
Volumen de Producción / Escalabilidad	Excelente para producción en masa ("roll-to-roll")
Ventajas clave	Amplia variedad de materiales, alta velocidad
Limitaciones clave	Resolución media, sensibilidad a presión
Uso en I+D	Poco común
Uso comercial / Madurez	Usada en dispositivos portátiles y empaques inteligentes
Aplicaciones notables	Sensores, dispositivos vestibles, empaques inteligentes

Fuente: Elaboración propia

Esta técnica es conocida por su alta velocidad y su excelente escalabilidad para producción en masa, lo que la hace adecuada para grandes volúmenes. Es compatible con una amplia variedad de materiales y permite el uso de tintas de viscosidad baja a media, depositando una capa de grosor medio.

Entre sus limitaciones se encuentran una resolución media y su sensibilidad a la presión. A pesar de no ser muy común en investigación y desarrollo, la flexografía ya es utilizada comercialmente en aplicaciones como sensores, dispositivos portátiles (vestibles) y empaques inteligentes.

En la figura 4 siguiente se resumen las características principales de esta técnica de impresión:

Huecograbado

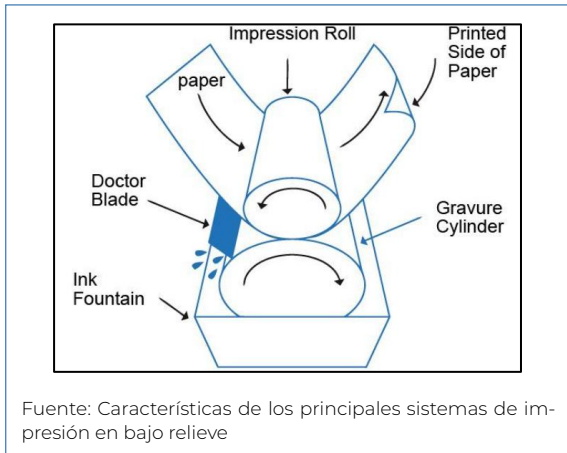
Tal y como se muestra en la figura 5, es un método de impresión analógico que opera bajo un sistema "roll-to-roll", similar a la flexografía, donde el sustrato se desplaza

continuamente. Su característica distintiva es que el patrón de impresión se graba directamente en el cilindro impresor. Este cilindro, que puede ser de acero o cerámico, contiene pequeñas celdas grabadas (mecánica o digitalmente por láser) que forman la imagen a transferir. Durante el proceso, el cilindro gira, recoge tinta directamente de un depósito, llenando las celdas, y una rasqueta (*doctor blade*) elimina el exceso de tinta para garantizar precisión y limpieza. Finalmente, el cilindro transfiere la tinta al sustrato mediante contacto, imprimiendo la imagen⁹.

El huecograbado ofrece ventajas significativas como una alta calidad de impresión, elevada velocidad y la capacidad de trabajar con tintas de baja viscosidad. Permite obtener un espesor variable de la capa de tinta, generalmente menor que la serigrafía, y una alta resolución, lo que la hace adecuada para aplicaciones que exigen precisión. Es muy eficiente para la producción masiva. Una de sus aplicaciones más prometedoras es la impresión de tintas conductoras sobre papel para la fabricación de componentes planares en sistemas de comunica-

9 La impresión electrónica: una realidad para el futuro de los tejidos inteligentes - Energías

**FIGURA 5
PROCESO DE IMPRESIÓN MEDIANTE
HUECOGRABADO**



ciones de RF¹⁰ y microondas, buscando miniaturización y buen rendimiento eléctrico. Para ello, se utilizan tintas conductoras basadas en nanopartículas de plata con propiedades reológicas adecuadas. Además, se explora su combinación con el diseño de metamateriales para lograr componentes

ultracompactos y multibanda, llevando la técnica a su límite en resolución y funcionalidad.

A pesar de sus ventajas, el huecograbado tiene un coste inicial mayor debido a la necesidad de grabar el cilindro impresor. Enfrenta retos técnicos como las limitaciones de resolución de los procesos de fabricación convencionales y las pérdidas dieléctricas y conductoras de los materiales, que pueden afectar el rendimiento de dispositivos resonantes como filtros. La puesta a punto y caracterización de esta tecnología es un desafío importante tanto para la investigación como para su transferencia industrial. Aunque es menos común en la investigación y desarrollo de electrónica impresa que otras técnicas como *inkjet*, es utilizada en la fabricación de prototipos complejos de antenas pequeñas y RFID sin chip.

En la figura 6 se resumen las características principales de esta técnica de impresión:

**FIGURA 6
HUECOGRABADO**

Huecograbado	
Categoría	Analógica (requiere máscara)
Resolución	Alta
Velocidad	Alta
Viscosidad de tinta admisible	Baja
Grosor de capa depositada	Media (menor que serigrafía)
Coste inicial	Alto
Volumen de Producción / Escalabilidad	Muy alta, eficiente en producción masiva
Ventajas clave	Alta calidad, miniaturización, ideal para RF/microondas
Limitaciones clave	Costoso, pérdidas dieléctricas, limitación de resolución convencional
Uso en I+D	Usada en prototipos complejos
Uso comercial / Madurez	Prometedora para RF y microondas
Aplicaciones notables	Componentes RF, antenas pequeñas, RFID sin chip

Fuente: Elaboración propia

FIGURA 7
OFFSET

Offset	
Categoría	Analógica (requiere máscara)
Resolución	Alta
Velocidad	Alta (explorada para gran volumen)
Viscosidad de tinta admisible	Baja
Grosor de capa depositada	Muy delgada
Coste inicial	Medio-alto
Volumen de Producción / Escalabilidad	Escalable, explorada para producción industrial
Ventajas clave	Alta resolución, antagonismo agua-tinta
Limitaciones clave	Requiere regulación precisa de tinta/agua, limitada con tintas funcionales
Uso en I+D	Raramente usada
Uso comercial / Madurez	Técnica tradicional adaptada a impresión electrónica
Aplicaciones notables	Circuitos finos, interconexiones, empaques inteligentes

Fuente: Elaboración propia

Offset

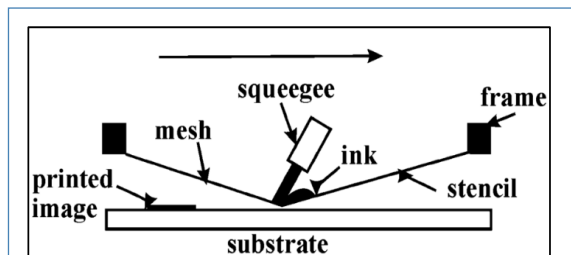
Se trata de la técnica más utilizada para publicación. También "roll to roll", se caracteriza en este caso por utilizar el antagonismo entre el agua y la tinta. El patrón es hecho con zonas hidrófobas donde se adhiere la tinta, mientras que en el resto de superficie la tinta será rechazada por el agua depositada. Este sistema necesita de una precisa regulación de la tinta y agua depositada. Antes de pasar al sustrato, la tinta se transfiere a un cilindro de goma que transferirá la imagen finalmente al sustrato final.

En la figura 7 se resumen las características principales de esta técnica de impresión:

Serigrafía

Tal y como se muestra en la figura 8, la serigrafía es una técnica de impresión analógica que se distingue por el uso de una máscara o malla micrométrica colocada entre el sustrato y la tinta. En este proceso, un desplazador (o rasqueta) empuja la tinta a través de las aberturas de la malla, las

cuales están definidas por el patrón que se desea imprimir. Este método implica una transferencia directa de tinta al sustrato mediante presión. A diferencia de los sistemas "roll-to-roll" como la flexografía o el huecogrado, la serigrafía es un proceso más lento.

FIGURA 8
PROCESO DE IMPRESIÓN MEDIANTE
SERIGRAFÍA

Fuente: Principle of the screen-printing process. | Download Scientific Diagram

Esta técnica es especialmente adecuada para la deposición de capas de tinta más gruesas en una sola pasada. Requiere el uso de tintas de alta viscosidad. Entre sus ventajas clave se encuentran su versatilidad en cuanto a tintas y sustratos, y su bajo

coste inicial. Es altamente escalable e ideal para la producción en masa. La malla utilizada puede variar en tupidez y grosor de hilo; cuanto más grueso sea el hilo, mayor cantidad de tinta deposita, aunque con menor definición en el perfil de la imagen impresa.¹¹

Sin embargo, la serigrafía presenta limitaciones en su resolución, la cual es considerada limitada o baja, especialmente con mallas gruesas. Su velocidad de producción es relativamente baja comparada con otras técnicas. Aunque se utiliza en investigación y desarrollo, no es la técnica principal en este ámbito. Comercialmente, la serigrafía es una tecnología líder en electrónica impresa por su versatilidad, capacidad de depósito espeso y eficiencia de costes, representando una cuota de mercado significativa (60.8% en 2023). Sus aplicaciones notables incluyen la fabricación de baterías, sensores, textiles inteligentes, circuitos flexibles y etiquetas RFID sin chip.

En la figura 9 se resumen las características principales de esta técnica de impresión:

Inkjet

Tal y como se muestra en la figura 10, la impresión *inkjet* (o inyección de tinta) es una técnica de impresión digital que se caracteriza por no requerir una máscara física ni un portador de imagen. A diferencia de las técnicas analógicas, la imagen se forma mediante la deposición controlada de gotas de tinta que se unen sobre el sustrato. Este es un proceso de deposición directa. Existen dos variantes principales: la continua, donde las gotas se generan constantemente y se redirigen o no al sustrato mediante un campo eléctrico; y la *Drop-on-Demand* (DOD), que es la más común en electrónica impresa y expulsa tinta solo cuando es necesario, utilizando presión mecánica, térmica o piezoeléctrica.

Los cabezales piezoeléctricos DOD permiten una alta resolución, un bajo consumo de tinta (de baja viscosidad) y un control preciso del área y el espesor de la capa, lo cual es fundamental para aplicaciones funcionales. Es la técnica más versátil porque no es necesario fabricar elementos físicos

**FIGURA 9
SERIGRAFÍA**

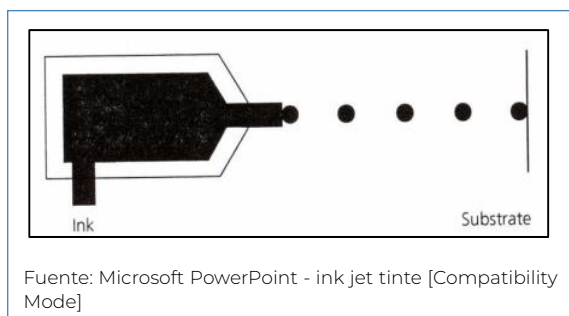
Serigrafía	
Categoría	Analógica (requiere máscara)
Resolución	Limitada (baja con mallas gruesas)
Velocidad	Relativamente baja
Viscosidad de tinta admisible	Alta
Grosor de capa depositada	Gruesa
Coste inicial	Bajo
Volumen de Producción / Escalabilidad	Alta, ideal para producción en masa
Ventajas clave	Versátil en tintas y sustratos, capas gruesas en una pasada
Limitaciones clave	Resolución limitada
Uso en I+D	Usada pero no principal
Uso comercial / Madurez	Madura y consolidada
Aplicaciones notables	Baterías, sensores, textiles inteligentes, circuitos flexibles, RFID sin chip

Fuente: Elaboración propia

¹¹ La impresión electrónica: una realidad para el futuro de los tejidos inteligentes - Energías

para cada impresión, solo se carga el fichero de imagen al programa. La impresión *inkjet* permite trabajar con sustratos flexibles como papel o plásticos, incluso con geometrías complejas, ya que no requiere contacto directo entre el cabezal y el sustrato. Es particularmente útil en la fase de prototipado, permitiendo pasar del diseño al dispositivo con un simple clic. Además, posibilita la deposición selectiva de capas de materiales conductores, aislantes o funcionales para crear estructuras multicapa, aplicando procesos de curado térmico o UV entre capas para estabilizar el material. El *clogging*, u obstrucción de los inyectores, es uno de los principales problemas en impresión *inkjet*, especialmente con tintas funcionales (conductoras, dieléctricas).

FIGURA 10
PROCESO DE IMPRESIÓN POR CHORRO DE TINTA (INKJET)



A pesar de sus ventajas, el *inkjet* es más lento que otras técnicas como el huecograbado. Su coste inicial es bajo a medio. Se utiliza muy comúnmente en investigación y desarrollo (I+D), y aunque su escalabilidad para producción industrial es limitada, ya se emplea comercialmente en sectores específicos. Las aplicaciones notables incluyen la fabricación de antenas RFID, pantallas OLED, filtros UHF y paneles solares, así como prototipos y textiles RFID. De hecho, la impresión por inyección de tinta es actualmente la técnica más común en I+D debido a su precisión y bajo desperdicio de material.

En la figura 11 se resumen las características principales de esta técnica de impresión:

ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA

La electrónica impresa es una tecnología emergente que ha experimentado un notable avance en los últimos 10 a 15 años gracias al desarrollo de tintas funcionales, sustratos flexibles y técnicas de impresión adaptadas a necesidades electrónicas. Aunque algunos principios datan de décadas atrás, su verdadera madurez tecnológica está aún en evolución, con múltiples aplicaciones en fases de validación o comercialización inicial. Un aspecto destacado de esta tecnología es el uso de nuevas moléculas orgánicas e inorgánicas. Algunas de ellas han demostrado un rendimiento superior al del silicio en ciertos contextos, como ocurre con los paneles solares impresos que superan en prestaciones a los de silicio amorfo, lo que augura un futuro prometedor para los dispositivos electrónicos flexibles y de bajo coste.

Esta tecnología es estratégica para Europa, dado que la electrónica convencional está todavía concentrada en EE. UU. y Asia. La electrónica impresa ofrece una oportunidad para que Europa lidere el segmento de producción personalizada y de bajo volumen, que no requiere la enorme inversión de las fábricas de microchips tradicionales.

Actualmente, la impresión por inyección de tinta (*inkjet*) es la técnica más común, especialmente en investigación y desarrollo debido a su precisión, bajo desperdicio de material y capacidad de imprimir sobre diferentes superficies. Sin embargo, se están explorando otras técnicas más escalables como el offset, con el fin de adaptar la electrónica impresa a procesos industriales de gran volumen. La madurez tecnológica (TRL) de esta tecnología varía ampliamente según la aplicación. En productos como etiquetas RFID impresas ya se ha alcanzado un nivel de madurez comercial (TRL 8-9), mientras que los sensores químicos impresos se encuentran en etapas intermedias de madurez tecnológica, entre TRL 5-7¹², y los circuitos lógicos totalmente im-

¹² TRL 5: Validación de componente/s en entorno relevante. TRL 6: Modelo o sistema en entorno relevante. TRL 7: Demostración de sistema prototipo en entorno operativo

FIGURA 11
INKJET

Inkjet (Inyección de Tinta)	
Categoría	Digital (no requiere máscara)
Resolución	Alta (precisión con cabezales DOD)
Velocidad	Lenta
Viscosidad de tinta admisible	Baja
Grosor de capa depositada	Control preciso por capas
Coste inicial	Bajo-medio
Volumen de Producción / Escalabilidad	Limitada (en exploración para producción industrial)
Ventajas clave	Precisión, sin contacto, bajo desperdicio, útil en geometrías complejas
Limitaciones clave	Velocidad lenta, depende de tinta especializada
Uso en I+D	Muy común
Uso comercial / Madurez	Usada industrialmente por empresas especializadas
Aplicaciones notables	Antenas RFID, OLEDs, filtros UHF, paneles solares, prototipos, textiles RFID

Fuente: Elaboración propia

presos aún están en fase experimental (TRL < 5¹³), limitados al laboratorio.

Organismos como IDTechEx, IEEE y Fraunhofer, junto a empresas como DuPont, Merck, Samsung, LG y BASF, están liderando la investigación y desarrollo en este campo. Las principales líneas de trabajo incluyen el desarrollo de tintas conductoras (plata, cobre, polímeros, grafeno), la mejora de propiedades eléctricas y mecánicas, y la expansión del rango de sustratos utilizados, desde papel hasta textiles y materiales biodegradables. Las técnicas de impresión más relevantes en electrónica impresa incluyen la serigrafía, *inkjet*, flexografía, offset, huecograbado y también impresión 3D. Cada técnica presenta ventajas y limitaciones dependiendo del tipo de tinta, sustrato y precisión requerida, lo que obliga a seleccionar cuidadosamente el método de impresión según la aplicación específica.

Dado el estado actual del arte, se consideran estas seis futuras direcciones de investigación:

1. Desarrollo de tintas funcionales avanzadas: investigación en nuevas tintas conductoras, semiconductoras y dieléctricas con propiedades mejoradas, enfocándose en sensores para aplicaciones como la calidad alimentaria.
2. Mejora y expansión de sustratos: optimización de papel y textiles mediante tratamientos para mejorar sus propiedades eléctricas y permitir la integración electrónica.
3. Perfeccionamiento de técnicas de impresión: avances en impresión *reel-to-reel*, *inkjet*, huecograbado (para RF/microondas y metamateriales) e impresión 3D con tintas funcionales.
4. Desarrollo de Electrónica Híbrida Flexible: integración de componentes rígidos (*chips*) en sustratos flexibles impresos, utilizando adhesivos conductores anisotrópicos (ECA) para superar limitaciones de temperatura.
5. Superación de desafíos técnicos y optimización: mejora de la resolución de fa-

13 TRL 4: Validación de componentes en laboratorio

bricación (buscando superar 5-10 μm) y reducción de pérdidas dieléctricas/conductoras con metamateriales, así como el desarrollo de "mini clean rooms" integradas.

6. Aplicaciones Clave y Herramientas de Diseño: impulso de aplicaciones como tags RFID totalmente impresos ("chipless"), embalaje inteligente ("smart packaging"), dispositivos vestibles ("wearables") y energéticos. Esto se apoya en el desarrollo de herramientas CAD¹⁴ especializadas con capacidad de simulación para optimizar el diseño.

MERCADO DE LA ELECTRÓNICA IMPRESA E HÍBRIDA Y APLICACIONES

La electrónica impresa representa una alternativa más sencilla y económica frente a la microelectrónica tradicional. Al evitar el proceso de montaje de componentes, reduce significativamente el tiempo y complejidad del diseño y la fabricación. En lugar de ensamblar componentes, los circuitos se imprimen por capas sucesivas de tinta, lo que acelera su fabricación. Aunque no reemplazará a la microelectrónica de silicio en aplicaciones de alta integración, sí resulta altamente competitiva en dispositivos sencillos o de bajo coste. Según proyecciones de IDTechEx¹⁵ el mercado global de electrónica impresa y flexible superará los 73 mil millones de dólares para 2025, y se espera que alcance 300 mil millones a largo plazo.

El mercado futuro de la electrónica impresa se divide en dos grandes ramas: orgánica e inorgánica, compartiendo aplicaciones como sensores, memorias, displays y circuitos inteligentes. Cada una está adaptada a diferentes materiales y necesidades, y se espera una expansión coordinada en distintos sectores industriales. Un reto importante es que la impresión electrónica y la electrónica en sí requieren ambientes muy diferentes. La impresión se realiza en entornos industriales convencionales, mientras que la electrónica exige condiciones limpias y controladas.

Para salvar esta brecha, se están desarrollando "mini clean rooms" integradas en las líneas de impresión, mucho más asequibles que las salas blancas convencionales.

Las "mini clean rooms" son una innovación crucial en el ámbito de la electrónica impresa, diseñadas para superar la brecha entre los requisitos ambientales de los procesos de impresión y la fabricación electrónica. Mientras que la impresión electrónica se lleva a cabo en entornos industriales convencionales, la producción de componentes electrónicos, incluso los impresos, a menudo exige condiciones limpias y controladas para asegurar la calidad y el rendimiento. Estas mini salas limpias se desarrollan para conciliar estas dos realidades, permitiendo que la electrónica impresa se integre de manera efectiva en líneas de producción estándar. Su principal ventaja radica en su capacidad para ser integradas directamente en las líneas de impresión y en su coste significativamente menor en comparación con las salas blancas convencionales, que son una inversión considerable utilizada en la microelectrónica de silicio. Este enfoque facilita una producción más económica y alineada con los objetivos de alto volumen y bajo coste de la electrónica impresa.

Actualmente, ya existen productos comerciales basados en electrónica impresa, como pantallas OLED, etiquetas RFID, paneles solares flexibles y circuitos inteligentes aplicables en numerosos sectores. Estas soluciones demuestran que la tecnología es viable, rentable y con gran potencial de crecimiento. En resumen, la electrónica impresa permite fabricar dispositivos electrónicos de forma más rápida, sencilla y barata, favoreciendo la personalización, la sostenibilidad y la producción local. Su evolución tecnológica y expansión comercial la posicionan como una pieza clave en el futuro de la electrónica.

Electrónica Híbrida flexible

La electrónica híbrida flexible representa una convergencia entre la electrónica convencional y las nuevas tecnologías im-

¹⁴ Diseño asistido por ordenador

¹⁵ RFID Label Printing : Flexible and Printed Electronics Applications - KYMC Printed Electronics Products Supplier

presas sobre sustratos flexibles. Consiste en integrar componentes electrónicos rígidos (como chips, sensores y circuitos integrados) sobre estructuras flexibles que emplean circuitos y antenas impresas. Esta combinación permite dispositivos que son ligeros, flexibles, funcionales y adecuados para aplicaciones portátiles, médicas, textiles inteligentes y embalajes activos.

A diferencia de la electrónica completamente impresa, que aún enfrenta limitaciones en cuanto a complejidad y rendimiento, la electrónica híbrida flexible propone una solución intermedia bajo el principio: "imprima lo que pueda, coloque lo que no pueda". De este modo, se imprimen interconexiones, sensores o antenas sobre sustratos plásticos, mientras que los componentes más sofisticados se integran posteriormente de forma híbrida. Esta estrategia mejora la viabilidad técnica y comercial de muchos dispositivos electrónicos innovadores.

Según IDTechEx¹⁶, se espera que el mercado global de la electrónica híbrida flexible supere los 3 mil millones de dólares para 2030, gracias a su aplicabilidad en sectores como dispositivos portátiles, automoción, salud, envases inteligentes y electrónica textil. La versatilidad de esta tecnología la convierte en una opción prometedora para cubrir necesidades no satisfechas por la microelectrónica tradicional ni por la electrónica totalmente impresa.

Uno de los principales desafíos técnicos de esta tecnología es la fijación fiable de componentes electrónicos sobre sustratos flexibles, que son más sensibles al calor y la deformación mecánica que los sustratos rígidos tradicionales. Los sustratos como el PET (polietilentereftalato) o PEN (naftalato de polietileno) no soportan las temperaturas de soldadura convencionales (≈ 250 °C), lo que descarta el uso de soldaduras SAC (estaño/plata/cobre) comunes en placas de circuito rígidas (FR4)¹⁷.

Para evitar daños térmicos en sustratos sensibles, se han desarrollado adhesivos conductores eléctricos anisotrópicos (ECA)

y soldaduras de baja temperatura, compatibles con procesos como impresión 3D, fabricación aditiva o rollo a rollo (R2R). Los ECA son clave en aplicaciones donde la soldadura convencional no es viable, como en la electrónica integrada en molde (IME), usada en interiores de automóviles con plásticos sensibles al calor. Este mercado se estima alcanzará 1.500 millones de dólares en 2032, reflejando el interés creciente en la electrónica híbrida. Además, los ECA permiten avances en textiles electrónicos y dispositivos ponibles, donde es crucial mantener flexibilidad y elasticidad. También son fundamentales en textiles electrónicos y dispositivos ponibles, donde se usan versiones elastoméricas¹⁸ que mantienen la conexión eléctrica pese al movimiento, habilitando sensores portátiles, parches médicos o ropa inteligente.

Aunque los ECA no tienen auto-alineación como la soldadura por reflujo, permiten conexiones eléctricas selectivas gracias a su curado solo en dirección vertical. Su aplicación localizada y precisa evita cortocircuitos laterales y facilita diseños de interconexión de alta densidad, compensando sus limitaciones mediante técnicas automatizadas de ensamblado.

En conjunto, la electrónica híbrida flexible no solo resuelve las limitaciones técnicas de la electrónica impresa pura, sino que también permite una transición práctica y comercialmente viable hacia dispositivos electrónicos flexibles de nueva generación, sin renunciar al rendimiento de los componentes tradicionales. El modelo híbrido también impulsa la reducción de costes, permite diseños más ligeros y delgados, y favorece la producción descentralizada y personalizada, gracias a su compatibilidad con técnicas de fabricación digital.

Finalmente, mientras que la electrónica basada en FR4 y soldadura convencional seguirá siendo dominante en aplicaciones rígidas y de alta densidad, la electrónica híbrida flexible está destinada a ocupar un lugar esencial en el ecosistema de tecnologías emergentes, especialmente

16 IDTechEx: Independent Market Intelligence on Emerging Technologies

17 PCB FR4: La guía del FR-4 para sus circuitos impresos

18 Alternativas de soldadura para la transición a la electrónica flexible e integrada - Revista Electrónica Convertronic - Noticias y

en dispositivos portátiles, conectividad IoT y sistemas interactivos para el consumidor. En conclusión, la electrónica híbrida flexible abre nuevas posibilidades para la fabricación electrónica en sustratos no convencionales, combinando lo mejor de dos mundos: la precisión y fiabilidad de los componentes tradicionales, con la ligereza, maleabilidad y bajo coste de la electrónica impresa flexible.

Aplicaciones

La electrónica impresa permite fabricar dispositivos electrónicos de bajo coste, ideal para mercados masivos y aplicaciones donde no se requiere la robustez de la electrónica convencional. Se enfoca en productos con mínimo coste por unidad, como etiquetas RFID impresas, que pueden reemplazar al código de barras mediante identificación automática a nivel de ítem (*item-level*), y sensores impresos de bajo coste, útiles en aplicaciones desechables como diagnóstico médico o monitoreo ambiental.

Sus aplicaciones abarcan dispositivos portátiles y vestibles con sensores biométricos, textiles inteligentes, pantallas OLED flexibles, dispositivos energéticos como baterías, supercondensadores y celdas solares flexibles, así como *smart packaging* con sensores ambientales, y sistemas IoT de bajo coste para trazabilidad y seguimiento.

En RFID, la electrónica impresa se centra en etiquetas a 13.56 MHz, buscando eliminar la conexión chip-antena para simplificar y abaratar el montaje, aunque no compite directamente con tecnologías UHF ni con etiquetas de baja frecuencia. Un sistema RFID consta de etiqueta, lector y *software* de gestión, y emplea protocolos anti-colisión. Estas etiquetas pueden ser seguras y personalizables, esenciales en sectores como farmacéutico, moda o joyería.

Una línea de desarrollo destacada es la de *tags* RFID sin chip ("*chipless*"), impresos por serigrafía, huecograbado o *inkjet* sobre papel o cartón. Aunque presentan retos técnicos, ofrecen ventajas en coste y simplici-

dad para aplicaciones de baja capacidad. También se desarrollan etiquetas RFID híbridas, donde se imprime parte del circuito y se añade un chip mediante hibridación, reduciendo procesos y permitiendo montaje directo sobre el sustrato. Este enfoque requiere mini salas limpias integradas a la línea de impresión, más económicas que las tradicionales.

En la fabricación de pantallas, sensores y circuitos flexibles, se usan sustratos delgados adheridos a soportes rígidos durante el proceso, que luego se separan, permitiendo producción en masa mediante técnicas como flexografía, huecograbado o laminado.

Además, la electrónica impresa se vincula con la electrónica orgánica, ya que muchas tintas funcionales se basan en polímeros o moléculas orgánicas, a diferencia de materiales como silicio o cobre. Estas tintas permiten desarrollar sensores para temperatura, presión, humedad o compuestos químicos. También se investiga la microencapsulación para integrar compuestos clave.

La tecnología incluye la impresión de componentes como LEDs¹⁹, celdas solares, sensores, transistores, baterías y memorias sobre sustratos rígidos o flexibles, mediante procesos clásicos (rotativas, huecograbado) o *inkjet*.

Herramientas CAD de diseño de circuitos microelectrónicos orientados a impresión electrónica

El diseño de circuitos para electrónica impresa requiere herramientas CAD especializadas, ya que presenta desafíos distintos al diseño convencional sobre sustratos rígidos de silicio. Estos incluyen el uso de sustratos flexibles, tintas funcionales y procesos aditivos, lo que impone restricciones geométricas, térmicas y mecánicas que deben ser consideradas.

Aunque *softwares* como Altium Designer, Eagle o KiCad pueden adaptarse parcial-

Actualidad Electrónica
19 Diodos emisores de luz

mente, se reconoce la necesidad de plataformas específicas que integren parámetros del proceso de impresión, como la viscosidad de las tintas, el espesor de las capas, las tolerancias de alineación y los efectos de deformación del sustrato. Además, estas herramientas deben facilitar la visualización y edición de patrones en formatos compatibles con equipos de impresión digital o analógica.

CONCLUSIONES

La electrónica impresa ha dejado de ser una promesa para convertirse en una plataforma sólida que revoluciona la integración de inteligencia electrónica. Gracias a su compatibilidad con materiales flexibles, reciclables y a técnicas de fabricación aditiva de bajo coste, permite diseños más sostenibles, personalizados y portátiles. Su valor no está solo en reemplazar tecnologías tradicionales, sino en habilitar nuevas aplicaciones como sensores en tejidos, dispositivos médicos desechables o etiquetas inteligentes. La electrónica híbrida flexible,

que combina lo impreso con lo convencional, lidera esta transformación, pese a desafíos técnicos aún pendientes, y se perfila como una opción clave para el futuro de la electrónica más allá del silicio.

En resumen, la electrónica convencional se basa en sustratos rígidos para PCBs²⁰, interconexiones de cobre grabadas y circuitos integrados complejos que ofrecen altas capacidades de procesamiento, pero con escasa adaptabilidad física. En contraste, la electrónica totalmente impresa destaca por su flexibilidad, ligereza y potencial de fabricación en masa sobre sustratos no tradicionales, aunque aún presenta limitaciones en cuanto a procesamiento y almacenamiento. La electrónica impresa está todavía en una etapa temprana, lo que la hace aún más emocionante.²¹

La electrónica flexible híbrida surge como un punto de convergencia entre ambos mundos: integra la estructura maleable y los procesos de impresión de la electrónica impresa con la potencia de los componentes tradicionales, dando lugar a sistemas inteligentes, portables y funcionales.

SOBRE EL AUTOR

Juan Miguel Ibáñez de Aldecoa Quintana es ingeniero industrial (especialidad electrónica) por la Universidad Pontificia Comillas (ICAI-ICADE). Actualmente ejerce su labor profesional como Ingeniero Industrial del Estado. Cuenta también con un Máster en Dirección de Sistemas y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones por la Universidad Politécnica de Madrid.

20 Printed Circuit Boards

21 <https://www.thinfilm.se/>