

Cómo se imprime la electrónica del futuro: tintas, sensores y dispositivos flexibles

José Antonio Ávila Niño^{1*} y Francisco Javier Ibarra Villegas²

¹ SECIHTI - Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ A.C., Unidad Jalisco

² Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ A.C., Unidad Jalisco

* Dirección para correspondencia: jose.avila@ciateq.mx

Una de las tecnologías emergentes en la manufactura de dispositivos electrónicos es la impresión de tintas. Esta tecnología se ha desarrollado en los últimos años y se considera una posible alternativa para la producción en masa de circuitos integrados, los cuales, de manera convencional, se fabrican mediante técnicas de litografía o ablación láser. Estos procesos implican múltiples etapas y generan una cantidad considerable de residuos contaminantes (Tan *et al.*, 2022).

En contraste, las técnicas de impresión se basan en procesos más simples, que generalmente constan de tres etapas principales: la fabricación de la tinta, la impresión del material y un posproceso térmico conocido como curado. Estas tintas están formadas por nanopartículas de materiales metálicos o semiconductores dispersas en un solvente, el cual es fundamental para su adecuada deposición, aunque no forma parte del dispositivo final.

El objetivo principal de la electrónica impresa radica en su capacidad para fabricar dispositivos flexibles, ligeros, de bajo costo y con menor impacto ambiental, mediante el uso de tintas con nanopartículas metálicas que permiten la formación

de películas delgadas altamente conductoras para componentes electrónicos (Sudheshwar *et al.* 2023).

Esta nueva área de la electrónica, que consiste en imprimir mediante diferentes técnicas las tintas para formar películas de distintos materiales necesarios para la fabricación de componentes electrónicos, como metales, semiconductores y aislantes, es una alternativa para desarrollar componentes flexibles y de bajo costo, lo cual puede impulsar el Internet de las Cosas, una red de elementos capaces de procesar y transmitir información a través de una red de comunicación. El enfoque de la electrónica impresa permitirá desarrollar dispositivos capaces de adaptarse a diversas superficies no necesariamente planas para conectar distintos objetos en una sola red.

En particular, las tintas empleadas en esta tecnología consisten en suspensiones coloidales de nanopartículas con diámetros menores a 100 nanómetros, utilizadas en la fabricación de resistencias, capacitores, transistores, sensores y pistas conductoras (Khan *et al.*, 2014).

Una ventaja adicional de estas técnicas es la amplia variedad de sustratos sobre los cuales pueden depositarse las tintas, incluyendo polímeros, textiles, papel, algodón e incluso parches adheribles a la piel. Esto permite la fabricación de dispositivos electrónicos ultraligeros y de bajo costo a gran escala. En comparación, la electrónica convencional basada en silicio presenta limitaciones, ya que este material es rígido y sus procesos de fabricación suelen ser costosos y

energéticamente demandantes. Por ello, en los últimos años se han explorado alternativas basadas en materiales flexibles, como los polímeros sintéticos.

Entre las aplicaciones de estas tecnologías se encuentra la fabricación de dispositivos electrónicos de uso cotidiano, como las pantallas orgánicas emisoras de luz (OLED, por sus siglas en inglés), cuyos píxeles emiten luz de forma independiente gracias a capas de materiales orgánicos, que se denominan así porque su principal elemento es el carbono.

El uso de tecnologías de impresión en electrónica permitirá que los dispositivos se adapten a diversas superficies y objetos, impulsando el desarrollo del Internet de las Cosas. Se ha estimado que la expansión de este paradigma requerirá dispositivos para sensar la concentración iónica o de biomoléculas en fluidos humanos, lo que hace que su fabricación mediante técnicas convencionales resulte costosa y favorezca el uso de técnicas de impresión (Cui, 2016).

Se espera que, en un futuro cercano, la electrónica impresa forme parte de la vida cotidiana (Suganuma, 2016). Entre sus posibles aplicaciones se encuentran pantallas flexibles, superficies inteligentes con sensores integrados, techos con celdas solares y dispositivos biomédicos portátiles, como parches capaces de monitorear variables fisiológicas (temperatura, presión o glucosa) en tiempo real. En la Figura 1 se presenta un esquema de una habitación que contiene una pantalla OLED y un e-paper (periódico electrónico), ambos flexibles y fabricados mediante técnicas de impresión. Además, se utiliza un sensor de temperatura basado en

polímeros orgánicos y lámparas LED basadas también en polímeros semiconductores luminiscentes.



Figura 1. Esquema de posibles aplicaciones de dispositivos electrónicos impresos, los cuales, gracias a su flexibilidad, pueden adaptarse a múltiples superficies.

Entre los sustratos más utilizados para la impresión de dispositivos se encuentra la poliimida, un polímero sintético seleccionado por su flexibilidad y resistencia a altas temperaturas (hasta aproximadamente 400 °C). Esta característica es relevante, ya que muchas tintas metálicas requieren procesos de curado cercanos a los 300 °C.

Las técnicas de impresión de tintas son técnicas aditivas que reducen los tiempos de producción y generan pocos residuos, ya que operan bajo el principio *drop-on-demand*, lo que significa que todas las gotas de tinta pueden ser aprovechadas. Esto implica un uso más eficiente de los materiales y un menor consumo energético en comparación con técnicas sustractivas como la litografía, en las que se elimina material no deseado mediante procesos de revelado.

Las técnicas *drop-on-demand* para la fabricación de dispositivos impresos representan una ventaja ambiental, ya que prácticamente no generan residuos y el impacto energético en la fabricación es mucho menor en comparación con las técnicas de fabricación de dispositivos convencionales basados en silicio, como la fotolitografía o la epitaxia, siendo la fabricación de chips de silicio un punto crítico en materia ambiental (Zikulnig *et al.* 2025). Sin embargo, la electrónica impresa no reemplaza a la electrónica convencional basada en silicio en aplicaciones que requieren alta conductividad o funcionamiento a muy alta frecuencia. Su nicho se encuentra en dispositivos de baja complejidad y frecuencia de operación moderada, como sensores y algunos dispositivos de radiofrecuencia. Esto se debe principalmente a dos factores: el tamaño mínimo de fabricación (del orden de decenas de micrómetros en electrónica impresa frente a decenas de nanómetros en silicio) y las propiedades eléctricas de los materiales empleados, especialmente los semiconductores orgánicos, cuya conductividad es inferior a la del silicio debido a que la estructura molecular de los materiales orgánicos donde ocurre el transporte de cargas es amorfa, lo cual no favorece la conductividad del material.

La electrónica impresa es una respuesta a la necesidad de fabricar dispositivos electrónicos que presenten flexibilidad mecánica, bajo costo de fabricación y que puedan tener una interacción directa con sistemas biológicos y sensores biológicos, esto último debido a que muchas tintas poliméricas presentan reacciones electroquímicas al contacto con muchos analitos (Kaushal *et al.* 2023).

Una de las técnicas más recientes en este campo es la impresión por chorro de aerosol (AJP, por sus siglas en inglés, *Aerosol Jet Printing*), que permite fabricar dispositivos con alta resolución y sobre diversos tipos de sustratos, en particular aquellos que son flexibles. A pesar de que la mayoría de las técnicas de impresión se consideran *drop-on-demand*, algunos investigadores no consideran a la impresión AJP como tal, ya que esta consiste en un flujo fijo de aerosol, el cual puede no ser totalmente aprovechado como parte del dispositivo debido a pausas en la impresión o interrupciones en la deposición por la naturaleza del diseño de impresión. Sin embargo, la cantidad de residuos sigue siendo considerablemente menor a la de técnicas como la fotolitografía, donde además del material de interés, se generan residuos derivados del uso de resinas fotosensitivas, reveladores y ácidos, estos últimos usados en la etapa de grabado (Khan *et al.* 2014).

Impresión por chorro de aerosol

La impresión por chorro de aerosol (AJP) es una técnica de manufactura aditiva que permite la deposición controlada de nanotintas sobre una amplia variedad de

sustratos, incluyendo materiales rígidos, flexibles y superficies con geometrías complejas (Secor, 2018). Gracias a su precisión, es adecuada para la fabricación de dispositivos electrónicos como sensores y biosensores (McKibben *et al.* 2024).

El proceso inicia en un atomizador ultrasónico, donde la tinta es sometida a ondas de energía que generan una neblina compuesta por gotas micrométricas; a este proceso se le denomina aerosolización.

Las tintas suelen consistir en nanopartículas metálicas dispersas en un solvente, junto con aditivos como aglutinantes (generalmente polímeros), dispersantes o emulsificantes, que ajustan sus propiedades reológicas.

El aerosol se transporta mediante un gas portador, típicamente nitrógeno, hacia el cabezal de impresión.

En el cabezal, un segundo flujo de gas, denominado gas de enfoque, confina el aerosol y forma un chorro estrecho y controlado. Este mecanismo permite depositar material con resoluciones del orden de 10 micrómetros (Figura 2). El cabezal de impresión permanece fijo, mientras que el sustrato se desplaza sobre una plataforma con movimiento en los ejes x - y , controlada mediante software de diseño asistido por computadora, lo que permite fabricar distintos patrones electrónicos.

La combinación de alta resolución, compatibilidad con diversos sustratos y capacidad para adaptarse a geometrías complejas convierte a la técnica AJP en una herramienta relevante para el desarrollo de dispositivos electrónicos que requieren precisión en la deposición de materiales.

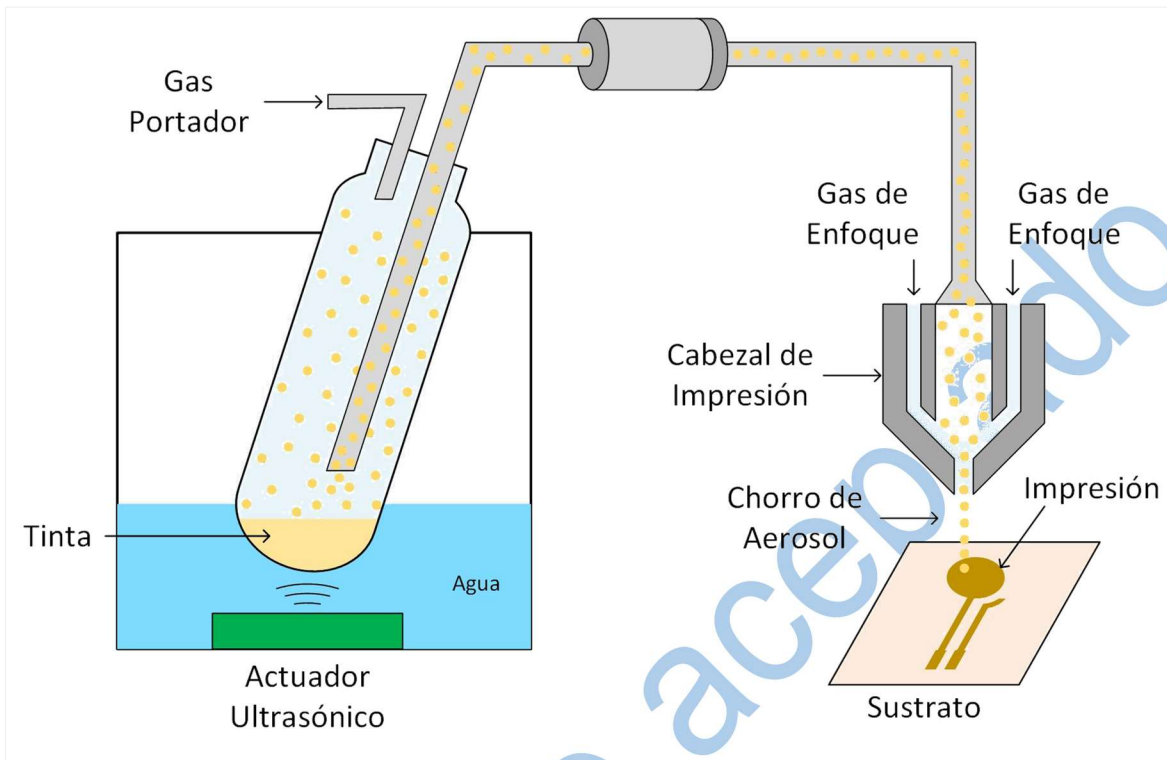


Figura 2. Esquema del proceso de impresión por chorro de aerosol con atomización ultrasónica. En la figura se aprecia el proceso de atomización de la tinta, el cual se debe a que un actuador ultrasónico genera la energía necesaria a través del agua para descomponer la tinta en pequeñas partículas, y junto con el gas portador, se genera el aerosol, que se conduce mediante otro flujo de gas (gas de enfoque) hacia el cabezal de impresión y finalmente a la boquilla, donde se imprime el chorro de aerosol.

Fabricación de electrónica impresa en CIATEQ A.C.

En el Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ A.C.), Unidad Jalisco, se dispone de una impresora por chorro de aerosol marca Optomec, capaz de trabajar con tintas de viscosidades entre 1 y 1000 centipoises, un rango más amplio que el de otras técnicas de impresión.

En el laboratorio de Diseño de Impresión Digital se emplean tintas de nanopartículas metálicas, como plata y oro, para la fabricación de electrodos y pistas conductoras, así como tintas basadas en carbono y polímeros semiconductores. Esto ha permitido el desarrollo de dispositivos electrónicos flexibles, como sensores y transistores, con aplicaciones en el monitoreo de variables fisiológicas, entre otras.

Actualmente, se desarrollan sensores para fluidos corporales integrados en parches adheribles a la piel. La Figura 3 muestra un prototipo de electrodos de carbono impresos mediante la técnica AJP en CIATEQ y depositados en un apósito de fijación adherido a un brazo humano.

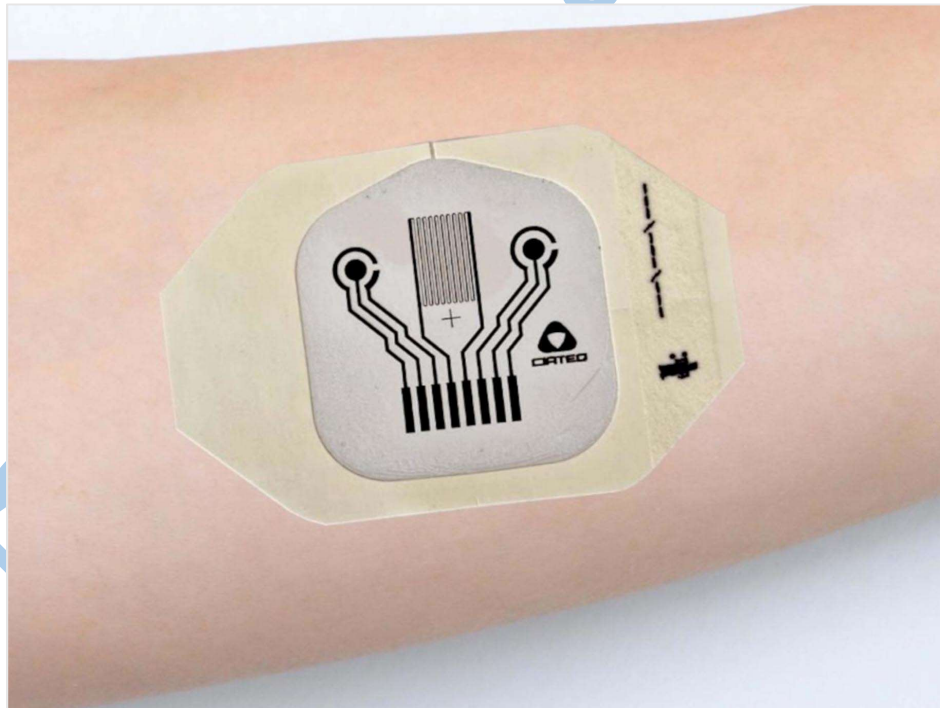


Figura 3. Impresión de pistas conductoras basadas en carbono sobre un parche adherible (CIATEQ, Unidad Jalisco). Fuente: <https://ciateq.blogspot.com/2024/12/del-laboratorio-la-piel-como-los.html>.

Conclusiones

Las técnicas de impresión, incluyendo la impresión por chorro de aerosol, representan una alternativa para la manufactura de dispositivos electrónicos con menor consumo de materiales y potencial reducción de costos. Estas tecnologías permiten la fabricación de dispositivos electrónicos flexibles que pueden integrarse en objetos cotidianos.

Estos dispositivos, debido a la naturaleza de los materiales orgánicos, son mecánicamente flexibles, por lo que pueden adaptarse a muchos objetos cotidianos. Estas técnicas de impresión tendrán aplicaciones en parches sensores para anomalías en fluidos biológicos, empaques con información electrónica, sensores táctiles y en robótica blanda (soft robotics), esta última muy importante, ya que reemplazaría sensores rígidos que limitan la movilidad de los robots.

El desarrollo de la electrónica impresa dependerá del avance en materiales, procesos y escalabilidad industrial, así como de la colaboración entre distintos sectores científicos y tecnológicos para su implementación en aplicaciones reales.

Referencias

Tan HW, Chong YYC, Kuo CN *et al.* (2022) 3D printed electronics: Processes, materials and future trends. *Progress in Materials Science* 127:100945.

Khan S, Lorenzelli L and Dahiva R (2014) Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review. *IEEE Sensors Journal* 15:3164-3185.

Cui Z (2016). *Printed electronics: materials, technologies and applications*. John Wiley & Sons.

Suganuma K (2014) *Introduction to printed electronics* (Vol. 74) Springer Science & Business Media.

Secor EB (2018) Principles of aerosol jet printing. *Flexible and Printed Electronics* 3:035002.

Zikulnig J, Carrara S and Kosel, J (2025) A life cycle assessment approach to minimize environmental impact for sustainable printed sensors. *Scientific Reports* 15:10866.

Kaushal JB, Raut P and Kumar S (2023). Organic electronics in biosensing: a promising frontier for medical and environmental applications. *Biosensors* 13:976.

Sudheshwar A, Malinverno N, Hischier R *et al.* (2023). Identifying sustainable applications for printed electronics using the multi-perspective application selection approach. *Journal of Cleaner Production* 383:135532.

Khan S, Lorenzelli L and Dahiya RS (2014) Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review. *IEEE Sensors Journal* 15:3164-3185.

McKibben N, Curtis M, Maryon O *et al.* (2024). Formulation and aerosol jet printing of nickel nanoparticle ink for high-temperature microelectronic applications and patterned graphene growth. *ACS Applied Electronic Materials* 6:748-760.

Manuscript accepted