





Nanoantenas en textiles: un paso hacia la independencia de los cables.

Nanoantennas on textiles: a step towards independence from cables.

-  **Ramón Díaz de León-Zapata** es profesor del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí (México) (ramon.dd@slp.tecnm.mx) (<https://orcid.org/0000-0003-1029-288x>), Doctor.
-  **Francisco Javier González-Contreras** es profesor invitado del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí (México) (fjgonzal@ucf.edu), Doctor.
-  **Ariel Benjamín de la Rosa-Zapata** es profesor del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí (México) (ariel.dl@slp.tecnm.mx) (<https://orcid.org/0000-0002-0670-2842>), Doctor.
-  **Efrén Flores-García** es profesor del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí (México) (efren.fg@slp.tecnm.mx) (<https://orcid.org/0000-0002-9631-2134>), Doctor.

Resumen: Se presentan una breve revisión del tema general de nanoantenas y los resultados más recientes de un caso de aplicación donde se aprovecha un sustrato flexible para construir sobre él las nanoestructuras optoelectrónicas capaces de convertir la energía térmica del cuerpo, en energía eléctrica con el objetivo de alimentar circuitos electrónicos que pueden ir desde sistemas integrados de análisis bioquímico conocidos como laboratorios en un circuito integrado (lab-on-a-chip) hasta sistemas de carga de dispositivos asociados a la electrónica de consumo, como los teléfonos celulares. Con el fin de verificar la operación del diseño propuesto, se aplica el método de análisis numérico por el método del elemento finito, así como la caracterización eléctrica y térmica de los componentes que se pudieron fabricar. Todos estos estudios arrojan como conclusión la viabilidad de operación, fabricación y aplicación del caso de estudio aquí presentado.

Palabras clave: Aplicaciones de las nanoantenas, diseño electrónico, conversión de energía, optoelectrónica, sustrato flexible.

Abstract: A brief review of the general topic of nanoantennas is presented, as well as the most recent results of an application case where a flexible substrate is used to build on it optoelectronic nanostructures capable of converting the body's thermal energy into electrical energy with the aim of feeding electronic circuits that can range from integrated biochemical analysis systems known as laboratories on an integrated circuit (lab-on-a-chip) to charging systems for devices associated with consumer electronics, such as cell phones. In order to verify the operation of the proposed design, the numerical analysis method using the finite element method is applied, as well as the electrical and thermal characterization of the components that could be manufactured. All these studies lead to the conclusion that the operation, manufacturing and application of the case study presented here are feasible.

Keywords: Nanoantenna applications, electronic design, energy conversion, optoelectronics, flexible substrate.

Cómo citar: Díaz de León-Zapata, R., González-Contreras, F.J., de la Rosa-Zapata, A.B., Flores-García, E. (2025). Nanoantenas en textiles: un paso hacia la independencia de los cables. Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales, 7(13), pp. 64-71. <https://doi.org/10.56913/teceo.7.13.64-71>.

Recepción: 13-12-2024
Aprobación: 22-08-2025

Introducción

Desde el nacimiento de la mecánica cuántica el 7 de octubre de 1900, cuando el físico Max Planck descubrió que, al igual que la materia, la energía está hecha de partes y que existía lo que hoy llamamos "cuanto", comenzó una revolución entre los científicos de la época como Heisenberg, Schrödinger, Dirac, De Broglie, Pauli, Bohr y Fermi entre muchos otros que sentaron sólidas bases de lo que ahora conocemos como la teoría de la mecánica cuántica (Smith, 1991).

El concepto de "teoría" en la jerga popular suele tener una connotación de imprecisión o falta de rigurosidad científica, sin embargo, su significado (Moustafa, 2014) para la física es todo lo contrario pues es gracias a esa rigurosidad que una teoría es capaz de hacer predicciones, algunas de ellas contraintuitivas tales que desafían los pilares del conocimiento clásico o previamente establecido.

Son precisamente algunas de estas predicciones "descabelladas" que incentivaron a los científicos a demostrarlas experimentalmente y a los ingenieros y tecnólogos a aplicarlas para darles una utilidad práctica.

Entre algunas de esas sorprendentes predicciones, se encontraría la capacidad de amplificar la luz por la emisión estimulada de radiación (LASER) (Hitz et al., 2012), la capacidad de diseñar y fabricar átomos artificiales (Chakraborty, 1999), el entrelazamiento cuántico (Brody, 2020) o la existencia de otras partículas subatómicas como el bosón de Higgs (Lincoln, 2020), por mencionar sólo algunas.

Es precisamente la predicción de que sería posible la construcción de átomos artificiales que hoy se pueden fabricar a voluntad puntos cuánticos o nanoantenas con resonancias plasmónicas (Schasfoort, 2017) pero ¿Qué propiedades o capacidades tienen esas estructuras micro y nanométricas que las hace tan interesantes?

Por ejemplo, en el caso de los puntos cuánticos, hoy son utilizados para crear láseres semiconductores que encuentran aplicaciones desde colores ultra precisos en diodos emisores de luz (LED) para pantallas de televisión y luces de automóviles, hasta equipos de laboratorio en investigaciones médicas y espaciales (Chakraborty, 1999). Su síntesis resultó un logro tan relevante que se les ha otorgado el premio Nobel de química a los investigadores que los hicieron posibles (Viswanatha, 2024).

Por otra parte, de las nanoantenas (Toussaint Jr. et al., 2015) se aprovechan el fenómeno conocido como resonancia superficial plasmónica que amplifica el débil campo electromagnético que insidió originalmente en ellas tal como lo haría una antena convencional, con la importante diferencia que no se trata de ondas de radio sino campos electromagnéticos en régimen óptico, es decir, luz que puede ir desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

Es este último tema en particular, el de las nanoantenas, es el que será discutido enseguida para un caso aplicativo concreto, donde se aprovechan las propiedades recién descritas en conjunto con otros conocimientos de vanguardia como los sustratos flexibles (MacDonald, 2015) para ser colocadas en textiles y generar corriente eléctrica útil que alimentará circuitos o almacenará energía.

Caso aplicativo

Como se ha dicho en el capítulo anterior, tras haberse teorizado y posteriormente corroborado experimentalmente algunas propiedades de las micro y nano estructuras, una de las primeras aplicaciones que fueron concebidas, fue la de aprovechar la resonancia plasmónica superficial para crear antenas que, por sus dimensiones, son llamadas nanoantenas.

Como una primera aproximación intuitiva de la capacidad para captar y amplificar una señal electromagnética de las antenas macroscópicas (como las conocidas antenas de radio, televisión o celulares) se infirió que aquéllas de dimensiones nanométricas tendrían el mismo comportamiento en escalas correspondientes a la longitud de onda de la luz, pues esta también es una onda electromagnética, sólo que a escalas mucho menores que las correspondientes a la radiofrecuencia.

Sin embargo, la radiación electromagnética en régimen óptico (longitudes de onda nanométricas) son precisamente luz y esta, sabemos, presenta algunas propiedades únicas y por tanto diferentes a otros tipos de frecuencias.

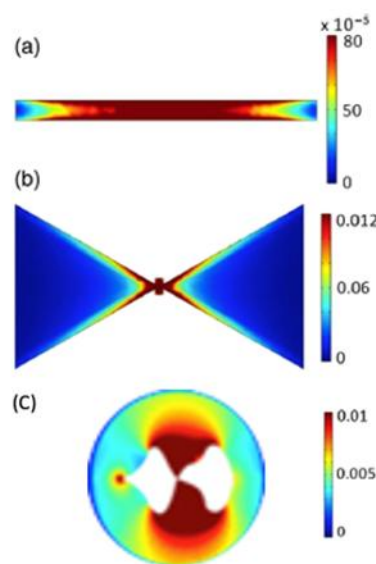
En antenas convencionales, el llamado dipolo recto (ver figura 1(a)) es la forma geométrica más básica y sigue siendo también la más eficiente, pero para el caso de nanoantenas, había la "sospecha" teorizada de que la geometría debía jugar un papel importante, de modo que se hicieron las primeras pruebas con formas geométricas distintas, como el dipolo "moño de corbata" (bow tie) (ver figura 1(b)) con lo que se demostró una mejora significativa en la eficiencia de la antena.

Otras geometrías fueron estudiadas, algunas de ellas tomadas de estudios realizados a macroantenas o antenas convencionales, mientras que otras obedecían la elección geométrica que toma ventaja de la forma en que se puede polarizar la onda electromagnética lumínica, como sería el caso de espirales circulares, espirales cuadradas, o hasta geometrías intencionalmente aleatorias, pero nunca se había realizado un estudio que verificara cuál geometría habría de ser la óptima.

Para encontrar esa geometría especial que aportara la máxima eficiencia, se decide aplicar, de entre varias técnicas matemáticas de optimización, aquella que emula la evolución de organismos vivos y que, a efectos de que resulten tiempos de evolución prácticos (recordando que ciertos procesos evolutivos duran millones de años), se apoyan esos cálculos con computadoras denominándose entonces "algoritmos evolutivos".

La figura 1(c) muestra el resultado de haber aplicado este algoritmo a una nanoantena y su comparativa con la geometría básica rectangular y la geometría moño de corbata, donde se corrobora que ese peculiar diseño que evoca las alas de una mariposa resultó ser más eficiente y que habría sido poco intuitivo suponer esa figura sin la aplicación de esas técnicas de optimización.

Figura 1. Intensidad en términos cualitativos del campo eléctrico en nanoantenas con geometría: a) rectangular o dipolo clásico, b) Moño de corbata (bow-tie) y c) obtenida por algoritmo evolutivo.



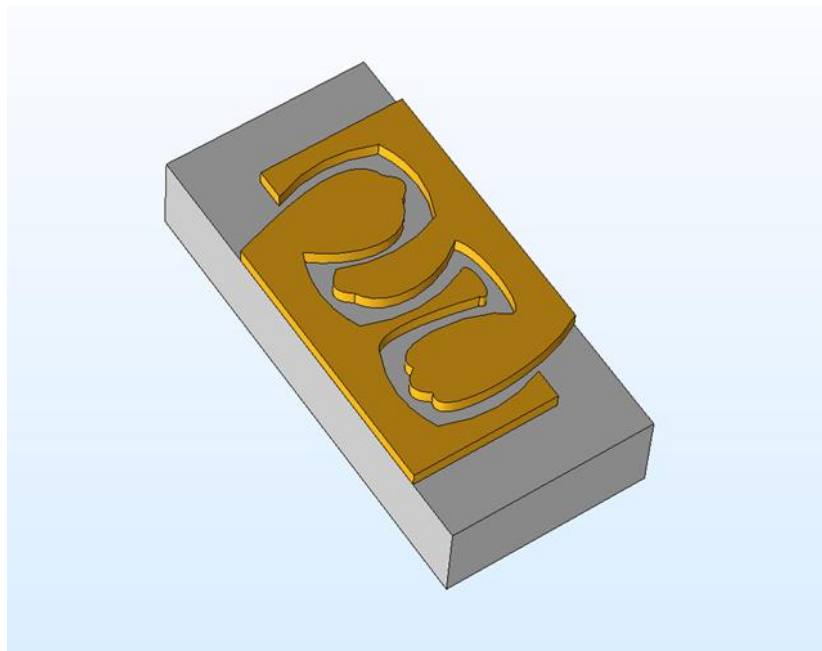
La siguiente propiedad que se puede aprovechar de la nanoantena, es el efecto Seebeck, que consiste en generar una corriente eléctrica como consecuencia del calentamiento entre dos

materiales distintos en contacto físico, de esta forma, se hace que uno de los lados de la antena sea de oro, mientras que el otro lo sea de óxido de titanio. A esta estructura completa, formada por la geometría optimizada y fabricada con dos materiales distintos, se le ha denominado Nanoantena Seebeck Evolutiva (NSE).

La capacidad de generar corriente eléctrica de las NSE permite suponer que puede almacenarse en capacitores y poder suministrar voltajes y/o corrientes controladas a circuitos electrónicos, sin la necesidad de baterías, por lo que la tarea ahora sería adaptar a estas nanoantenas, algún dispositivo de almacenamiento de carga.

Dado el éxito que significó la aplicación del algoritmo evolutivo a la nanoantena, se aplicó ahora para conocer la geometría óptima de un nanocapacitor interdigitado (ver figura 2).

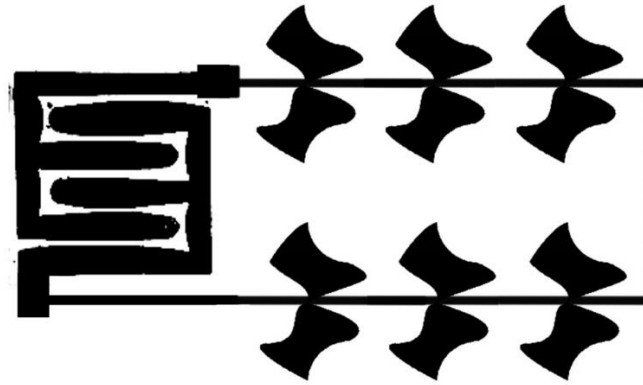
Figura 2. *Nanocapacitor interdigitado evolutivo.*



Habiendo comprobado que se cuenta con los dos elementos básicos de un circuito eléctrico para el almacenamiento de carga, y sabiendo que es posible fabricar dicho circuito sobre un sustrato flexible se vislumbra la capacidad de poder colocarlo en cualquier tipo de tela donde, ya sea por inducción electromagnética o por contacto directo en las terminales, se puedan alimentar cargas.

La figura 3 muestra el esquemático del circuito propuesto.

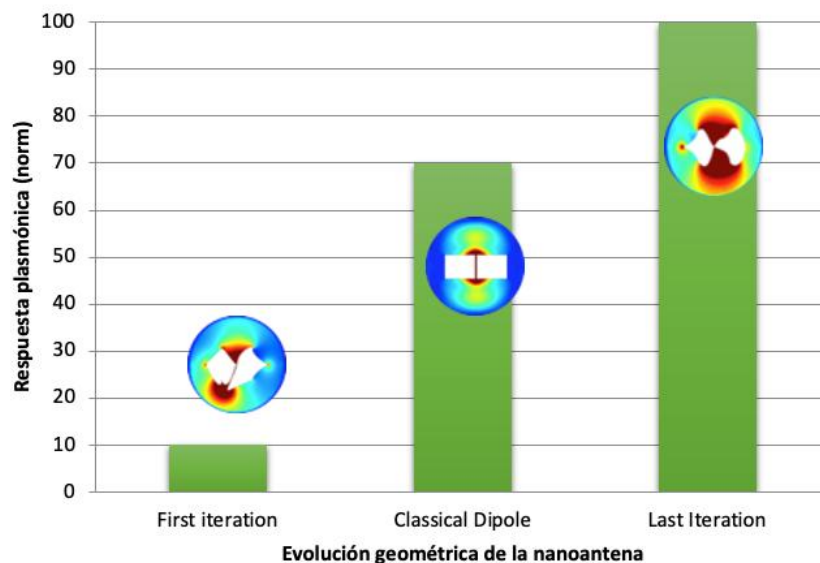
Figura 3. Esquemático del circuito eléctrico nanoantena Seebeck evolutiva-nanocapacitor interdigitado evolutivo.



Resultados y discusión

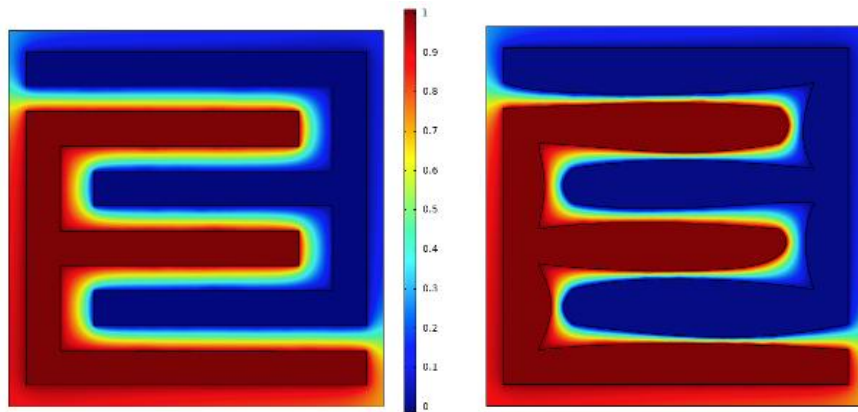
La figura 4 muestra los resultados comparativos entre la primera evolución de la nanoantena, el dipolo clásico y la última evolución, donde se detiene el algoritmo y la geometría proporciona la máxima eficiencia en la concentración de campo eléctrico.

Figura 4. Respuesta plasmónica (cualitativa) entre la primera geometría generada por el algoritmo evolutivo (izquierda), la geometría rectangular del dipolo clásico (centro) y la última evolución del algoritmo (derecha).



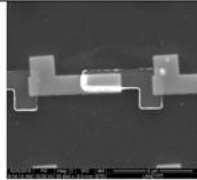
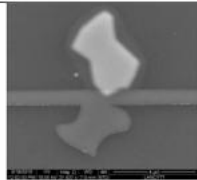
La figura 5 muestra la respuesta al campo eléctrico del capacitor interdigitado no evolutivo y su comparativa con su equivalente evolutivo.

Figura 5. Campo eléctrico en un capacitor interdigitado no evolutivo (izquierda) y el evolutivo (derecha).



La figura 6 muestra los dispositivos fabricados y su caracterización eléctrica.

Figura 6. Estructuras reales fabricadas por el método de litografía por haz de electrones y sus respectivas caracterizaciones eléctricas.

Nanoantenna	9x9 Array	Voc(V)	Isc(A)	Pmax(Watts)
CDN		0.03047	4.095E-7	3.125E-9
EDN		0.09194	1.209E-7	4.005E-9

Se han estudiado las propiedades de las nanoestructuras, se han diseñado y caracterizado por separado las nanoantenas y los capacitores por simulación numérica aplicando el método del elemento finito con el fin de verificar su funcionamiento y viabilidad de operación antes de su fabricación.

Una vez terminado el análisis computacional, se ha fabricado cada elemento del circuito y también por separado se les ha caracterizado eléctricamente, corroborando experimentalmente que se cumplen los resultados de las simulaciones numéricas.

El circuito completo es capaz de generar suficiente corriente eléctrica, tras convertir luz en el espectro infrarrojo que proviene del calor del cuerpo y almacenarla provisionalmente para poder ser luego entregada controladamente a un circuito que así lo demande, pudiendo así alimentar cargas sin necesidad de ser conectadas a baterías externas o tomas de corriente, lo da un paso hacia la independencia de los cables.

Referencias

- Brody, J. (2020). Quantum Entanglement. MIT Press.
- Chakraborty, T. (1999). Quantum Dots: A Survey of the Properties of Artificial Atoms. Elsevier Science.
- Hitz, C. B., Ewing, J. J., & Hecht, J. (2012). Introduction to Laser Technology. Wiley.
- Lincoln, D. (2020). The Large Hadron Collider: The Extraordinary Story of the Higgs Boson and Other Stuff That Will Blow Your Mind. Johns Hopkins University Press.
- MacDonald, W. A. (2015). Latest Advances in Substrates for Flexible Electronics. In Large Area and Flexible Electronics (pp. 291-314). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9783527679973.ch10>
- Moustafa, A. E. (2014). Definitions of Theory and Theory-Building Related Concepts. GRIN Verlag.
- Schasfoort, R. B. M. (2017). Handbook of Surface Plasmon Resonance. RSC.
- Smith, H. (1991). Introduction To Quantum Mechanics. World Scientific Publishing Company.
- Toussaint Jr., K. C., Roxworthy, B. J., Chen, H., Bhuiya, A. M., & Ding, Q. (2015). Plasmonic Nanoantennas: From Nanotweezers to Plasmonic Photography. Optics and Photonics, 2015(1).
- Viswanatha, R. (2024). Nobel Prize in Chemistry 2023. Resonance, 29(1), 69-81. <https://doi.org/10.1007/s12045-024-1738-1>