

MATERIALES QUE PIENSAN: ESTUDIO SOBRE EL CUO COMO MATERIAL INTELIGENTE

THINKING MATERIALS: A STUDY ON CUO AS A SMART MATERIAL

RESUMEN

En esta investigación, se explora el óxido de cobre (CuO) como un material inteligente con propiedades únicas que lo posicionan en la vanguardia de la innovación tecnológica. Mediante un enfoque integral que combina análisis teóricos y experimentales, se investigan las propiedades termocrómicas, piezoeléctricas y catalíticas del CuO. Los métodos de estudio incluyen técnicas avanzadas de caracterización, como microscopía electrónica. Los resultados revelan el potencial del CuO en diversas aplicaciones, desde sensores de temperatura hasta dispositivos de memoria no volátil y celdas solares. Además, se destacan las estrategias para aprovechar eficientemente estas propiedades en dispositivos inteligentes. Las conclusiones subrayan la relevancia del CuO como un material versátil y prometedor en las próximas generaciones de las tecnologías inteligentes, destacando su capacidad para responder y adaptarse a estímulos externos de manera eficaz y sostenible.

Palabras clave: CuO; materiales inteligentes; piezoelectricidad; materiales termocrómicos.

YULISSA CASTILLÓN PIÑA ¹,

SERGIO E. FLORES
VILLASEÑOR ¹

ALMA ESMERALDA GÓMEZ ²

MIGUEL ANGEL DE LEÓN
ZAPATA ³

1. Facultad de Metalurgia,
Unidad Norte, UAdeC.

2. Facultad de Ingeniería
Mecánica y Eléctrica, Unidad
Laguna, UAdeC.

3. Centro de Investigación
para la Conservación de la
Biodiversidad y Ecología de
Coahuila, UAdeC.

Correspondencia
sergio.villasenor@uadec.edu.mx

ABSTRACT

This research explores copper oxide (CuO) as a smart material with unique properties that position it at the forefront of technological innovation. Using a comprehensive approach that combines theoretical and experimental analyses, CuO's thermochromic, piezoelectric and catalytic properties are investigated. Study methods include advanced

Recepción de artículo
24 de junio de 2024.

Artículo aceptado
17 de septiembre de 2024.

characterization techniques such as electron microscopy. The results reveal the potential of CuO in diverse applications, from temperature sensors to non-volatile memory devices and solar cells. In addition, strategies to efficiently exploit these properties in smart devices are highlighted. The conclusions underline the relevance of CuO as a versatile and promising material in the next generations of smart technologies, highlighting its ability to efficiently and sustainably respond and adapt to external stimuli.

Keywords: CuO; smart materials; piezoelectricity; thermochromic materials.

INTRODUCCIÓN

En el mundo, los avances de la ciencia y tecnología van de la mano, con la mejora de los materiales porque sus propiedades han permitido dar soluciones eficientes a las necesidades presentes, en la actualidad los materiales que se usan comúnmente dentro de la industria presentan propiedades que no se pueden alterar de manera específica, motivo por el cual se da gran importancia al desarrollo de nuevos materiales los cuales sean capaces de responder a estímulos externos. El CuO ha emergido como un componente de interés significativo gracias a sus propiedades únicas y su capacidad para desempeñar roles clave en diversas aplicaciones tecnológicas. Este compuesto presenta características intrínsecas que lo categorizan como un material inteligente, exhibiendo propiedades termocrómicas, piezoeléctricas y memoria de forma, entre otras. La convergencia de estas propiedades ha generado un gran interés en comprender y aprovechar sus capacidades en la creación de dispositivos avanzados y soluciones tecnológicas.

No obstante las prometedoras propiedades del CuO, existen algunos desafíos en nuestra comprensión actual de su comportamiento y aplicación práctica, tales como la necesidad de optimizar procesos de síntesis, comprender mejor las interacciones a nivel nanométrico y



abordar cuestiones relativas a la estabilidad y durabilidad en entornos específicos de aplicación. La importancia de investigar el CuO como material inteligente radica en su potencial para revolucionar diversas áreas, desde la electrónica hasta la energía y la elaboración de sensores. Su capacidad para responder a estímulos externos, cambiar de fase y catalizar reacciones químicas abre un camino de posibilidades para el desarrollo de dispositivos más eficientes y sostenibles.

Dicho lo anterior, se plantea la hipótesis de que una comprensión más profunda de las propiedades y comportamientos del CuO permitirá optimizar su aplicación en dispositivos específicos, mejorando su rendimiento y funcionalidad. Los objetivos de esta investigación incluyen analizar las propiedades estructurales y funcionales del CuO, así como explorar aplicaciones prácticas en dispositivos inteligentes. Los alcances de este trabajo se centran en una investigación a nivel teórico, proponiendo métodos de síntesis mejorados y explorando aplicaciones potenciales en dispositivos específicos. Sin embargo, se reconoce que, debido a la complejidad del material y la gran diversidad de aplicaciones, este estudio puede tener limitaciones en términos de la generalización de los resultados obtenidos y la extrapolación directa a todas las áreas de aplicación. En resumen, se busca contribuir al entendimiento y aprovechamiento del CuO como material inteligente, abordando desafíos actuales y explorando nuevas fronteras en la aplicación de este material en dispositivos avanzados.

CONCEPTOS BÁSICOS

A lo largo de la historia de la humanidad, el uso de materiales ha sido fundamental en el desarrollo tecnológico. Desde la edad del cobre hasta la era digital, la evolución de los materiales ha sido un factor clave en el progreso humano.

Un material inteligente, también conocido como material avanzado o funcional, es un tipo de material que posee propiedades que pueden cambiar de manera reversible en respuesta a estímulos externos: cambios en temperatura, presión, luz, electricidad, campos magnéticos, pH o, incluso, estímulos mecánicos (Tamayo, 2022). Estas propiedades



cambiantes pueden ser diseñadas y controladas para cumplir con funciones específicas, entre ellas se contemplan la dureza, el color, la textura, la conductividad térmica y/o eléctrica y la resistencia al impacto, entre otras. El procedimiento que sigue un material inteligente consiste primeramente en colocar el material, aplicarle el estímulo y medir su respuesta, tal y como se observa en la Figura 1.

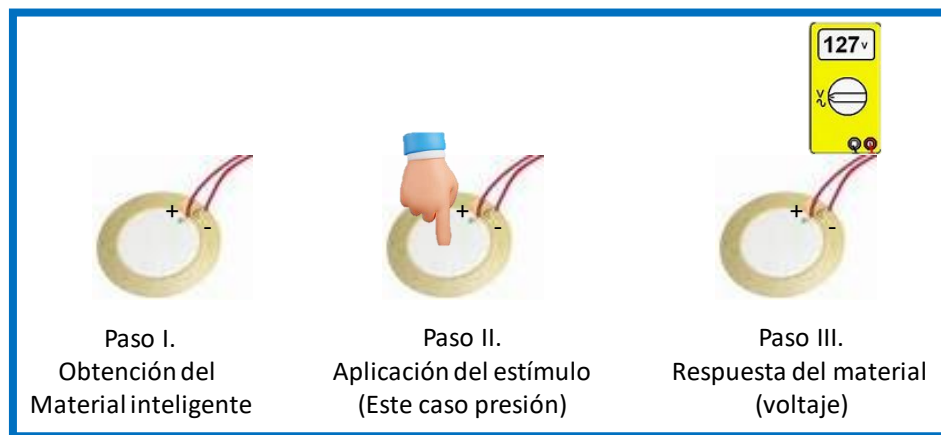


Figura 1. Esquema de acción de un material inteligente.

Existen distintos tipos de materiales inteligentes, entre estos se reconoce al óxido de cobre como un material altamente inteligente gracias a las distintas propiedades únicas que presenta y a las aplicaciones que pueden resultar al procesarlo.

El óxido de cobre es un compuesto inorgánico formado por un átomo de cobre y otro de oxígeno (Bhavyasree y Xavier, 2022). Se presenta en forma de un polvo color negro a rojo oscuro, dependiendo de las condiciones de síntesis y de la estructura cristalina (Figura 2).



Figura 2. Óxido de cobre.

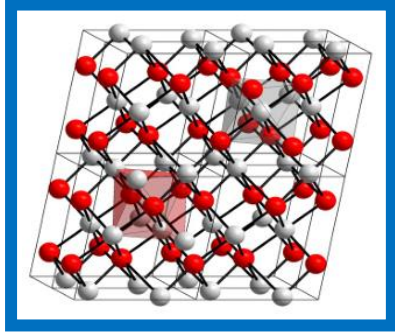


Figura 3. Estructura cristalina del óxido de cobre.

El óxido de cobre (II) pertenece al sistema monoclínico, con un grupo cristalográfico de $2m$ o $C2h$ (Ighalo y col., 2021). El grupo espacial de su celda unidad es $C2/c$, y sus parámetros de red se muestran en la Tabla 1 y la figura 4.

Tabla 1. Datos cristalográficos del cobre puro (Hermawan y col., 2020).

Grupo espacial	Sistema cristalino	Parámetros de celda
$C2/C$	Monoclínico	$a = 4.683$, $b = 3.4226$, $c = 5.1288$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta = 99.54^\circ$

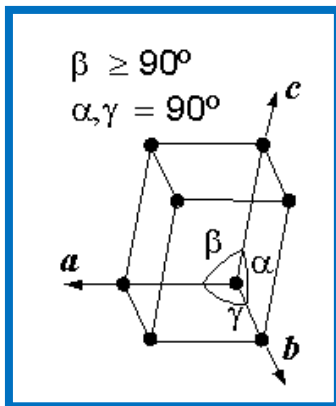


Figura 4. Estructura cristalográfica del óxido de cobre.

La tenorita es un óxido mineral de cobre (Figura 5), tiene un color gris opaco y se produce en la intemperie que se forma del sublimado volcánico (Moakhar y col., 2021).



Figura 5. Óxido mineral de cobre, tenorita.

El óxido de cobre tiene distintas características como, por ejemplo, su densidad es alta, alrededor de 6.3 g/cm^3 , punto de fusión de 1326°C aproximadamente, lo que indica su estabilidad térmica (Dulta y col., 2022). Es un semiconductor, lo cual significa que tiene una conductividad eléctrica intermedia entre un conductor y un aislante, exhibe una buena conductividad térmica, lo que lo hace relevante en aplicaciones donde se requiere transferencia de calor eficiente (Figura 6).

DESCRIPCIÓN DE PROPIEDADES

Es conocido que la propiedad de un material inteligente depende básicamente de su estructura cristalina, ésta es fundamental porque determina cómo se disponen y se relacionan entre sí los átomos en el sólido. En el óxido de cobre influye en sus propiedades y comportamientos debido a las interacciones específicas y establece la disposición regular y repetitiva de los átomos en el material.



Figura 6. Aplicación del óxido de cobre como intercambiador de calor.

Ya que la estructura del CuO es monoclinica, significa que los átomos de cobre y oxígeno están organizados de una manera específica en el espacio, lo que afecta directamente sus propiedades físicas y químicas (Naz y col., 2019). La forma en que los átomos están dispuestos en su estructura cristalina determina los enlaces químicos que son iónicos y covalentes, y su fuerza y naturaleza afectan las propiedades del material, además, puede experimentar transiciones de fase en respuesta a cambios de temperatura, presión u otros factores ambientales. Estas



transiciones afectan directamente las propiedades del material y es lo que lo hace inteligente (Figura 7).

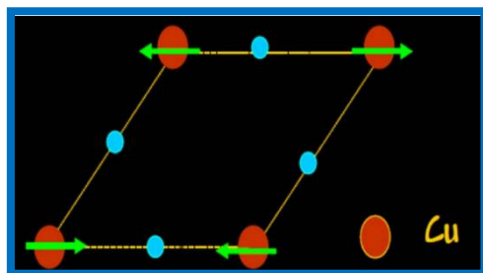


Figura 7. Movimiento de los átomos en la estructura.

La estructura cristalina también determina cómo el material interactúa con la luz. En el caso del CuO, su sensibilidad a la luz está relacionada con la forma en que los electrones en la estructura responden a la radiación electromagnética. También afecta la simetría del material, lo que es crucial para todo tipo de propiedades, tales como, termocrómicas, piezoeléctricas, catalíticas, su sensibilidad a la luz y la capacidad que tiene de cambiar su estructura cristalina.

PROPIEDADES TERMOCRÓMICAS

El termocromismo es un fenómeno óptico en el cual un material cambia de color en respuesta a cambios en la temperatura (Cao y col., 2021). Este cambio de color puede ser reversible,



Figura 8. Termocromismo del óxido de cobre.

y la intensidad y la velocidad del cambio dependen de las propiedades específicas del material y de las condiciones de temperatura. En el caso específico del CuO, este fenómeno se debe a cambios en su estructura cristalina y propiedades ópticas a medida que se modifica la temperatura. Cuando el CuO experimenta un aumento de temperatura, presenta una transformación en su estructura cristalina que afecta su absorbancia y reflectancia de la luz en diferentes longitudes de onda,



esta transformación puede resultar en un cambio observable en el color del material. A temperatura ambiente, se sabe que el CuO generalmente tiene un color negro a rojo oscuro. A medida que la temperatura aumenta, puede experimentar un cambio en su tonalidad, pudiendo llegar a mostrar colores más claros (Figura 8). Este cambio termocrómico puede ser reversible, lo que significa que el color original se restaura cuando el material vuelve a enfriarse. Se han explorado diversas aplicaciones, tal es el caso de Zoolfakar y colaboradores, quienes en 2013 reportaron la aplicación de dispositivos a base de óxido de cobre para sensar el vapor de etanol, detectando a este vapor por debajo de las 12.5 partes por millón (ppm) a temperaturas de entre 180 y 260 °C, (Zoolfakar y col., 2013). Además de actuar como sensores de vapores, también se puede destacar el trabajo de Zhou y colaboradores, quienes en 2022 reportaron el uso de óxido de cobre en compañía de zirconia para la elaboración de un material termocrómico, señalan los autores que este efecto termocrómico es derivado del cambio de oxidación que sufre el cobre al estar frente a un estímulo específico, por lo que al estar mezclado con zirconia se estabiliza la estructura y permite que el CuO pueda mantener su estructura cristalina por arriba de los 1000 ciclos, lo cual favorecería la aplicación, incrementando así su tiempo de vida (Zhou y col., 2022). Este comportamiento termocrómico específico lo convierte en un material interesante para aplicaciones donde se requiere la detección visual de cambios de temperatura.

PROPIEDADES PIEZOELÉCTRICAS

La piezoelectricidad es la capacidad de ciertos materiales para generar una carga eléctrica en respuesta a una deformación mecánica (Kim y col., 2021). En el caso del CuO este puede exhibir propiedades piezoeléctricas en formas específicas y bajo ciertas condiciones. En sistemas cristalinos no centrados, la asimetría en la dispo-



Figura 9. Sensores piezoeléctricos con óxido de cobre.

sición de los átomos puede dar lugar a la generación de una carga eléctrica cuando se aplica una presión mecánica o se produce una deformación en el material. El óxido de cobre, en ciertas configuraciones y formas, puede mostrar este comportamiento haciéndolo útil en la fabricación de sensores de presión (Figura 9) y dispositivos generadores de energía (Bairagi y col., 2022). Es importante destacar que no todas las formas y configuraciones del óxido de cobre exhiben propiedades piezoeléctricas. La presencia de ciertas estructuras cristalinas y la orientación específica de los cristales son factores cruciales que influyen en esta propiedad tan importante.

PROPIEDADES CATALÍTICAS

La capacidad que tiene el CuO para acelerar ciertas reacciones lo hace valioso en aplicaciones electroquímicas y en el desarrollo de celdas (Cao y col., 2021). Su acción catalítica se debe a su capacidad para interactuar con otras sustancias, facilitando y acelerando las reacciones sin sufrir cambios químicos permanentes durante el proceso. Algunas de sus aplicaciones catalíticas incluyen las reacciones de descomposición térmica de compuestos, las reacciones redox donde hay transferencia de electrones entre especies químicas, la síntesis orgánica para la oxidación de alcoholes o la síntesis de compuestos orgánicos, en los procesos industriales interactúa en la fabricación de dióxido de azufre, los procesos de hidrogenación y las celdas de combustible convirtiendo la energía química en energía eléctrica. La eficacia del CuO como catalizador depende de factores como su forma, tamaño de partícula (Figura 10) y la naturaleza específica de la reacción química.

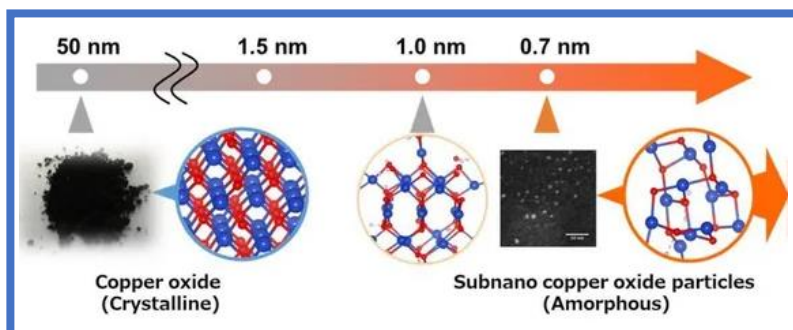


Figura 10. Escala nanométrica del óxido de cobre como catalizador.



PROPIEDADES FOTOSENSIBLES

La sensibilidad a la luz del CuO puede contribuir a su aplicación como material inteligente destacando algunas aplicaciones como la fotocatálisis, donde la luz, especialmente en el rango ultravioleta, activa las propiedades catalíticas del material, también puede utilizarse como material fotosensible para convertir la luz solar en electricidad mediante procesos fotovoltaicos, el CuO modificado puede emplearse en la fabricación de sensores de luz. Al tener la propiedad de cambio de fase, se puede permitir su uso en dispositivos de memoria no volátil (González y col., 2018) (Figura 11), estos dispositivos retienen la información incluso cuando se corta la energía.



Figura 11. Memoria RAM no volátil.

SENSIBILIDAD A LOS GASES

Este compuesto ha demostrado ser sensible a la presencia de gases específicos, como el dióxido de azufre (SO_2) y el monóxido de carbono (CO). Cuando estos gases interactúan, provocan cambios en las propiedades eléctricas del material como la resistencia eléctrica. Esta sensibilidad se basa en la adsorción y desorción de los gases presentes en el entorno. También se utiliza en la fabricación de sensores de gas (Figura 12), donde la variación en sus propiedades se traduce en una señal detectable. Estos sensores son cruciales en aplicaciones como la detección de emisiones industriales, la monitorización de la calidad del aire y la seguridad en entornos donde la presencia de ciertos gases puede representar un



riesgo (Siddiqi y Husen, 2020). Se aplica en la industria petroquímica, automotriz y seguridad ambiental.

NANOTECNOLOGÍA

La investigación a nivel nanotecnológico ha permitido la síntesis de nano-estructuras de CuO , lo que ha mejorado sus propiedades y su rendimiento en diversas aplicaciones. La nanotecnología permite la síntesis controlada de nano-estructuras de CuO , como nanotubos, nano-hilos, nano-partículas y nano-placas.

Estas nano-estructuras exhiben propiedades mejoradas en comparación con las formas a mayor escala, lo que las hace ideales para aplicaciones específicas y exhibe propiedades únicas en términos de conductividad eléctrica, actividad catalítica, sensibilidad a los gases y respuesta a la luz. Al presentar alta relación superficie-volumen mejora la interacción con el entorno, lo que resulta en una mayor sensibilidad y selectividad (Sonobe y col., 2020). Adquiriendo propiedades más avanzadas y utilizándolo en la fabricación de transistores y en aplicaciones médicas como la liberación controlada de fármacos (Figura 13), la detección temprana de enfermedades, celdas solares, dispositivos de almacenamiento y para la remediación de contaminantes mediante la catálisis nano-tecnológica.

Figura 12. Detector de dióxido de azufre.



Figura 13. Cápsula de óxido de cobre para la liberación de fármacos

SÍNTESIS DE ÓXIDO DE COBRE

Su síntesis puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas, y la elección de un método particular dependerá de la aplicación específica, el tamaño de partícula deseado y otros factores. Algunos métodos comunes son:



- Síntesis térmica o calcinación, es un método convencional que implica calentar sales de cobre, como el nitrato de cobre, a altas temperaturas (por encima de 400 °C).
- Precipitación química: involucra la adición de un reactivo precipitante, como hidróxido de sodio (NaOH), a una solución de una sal de cobre soluble. Figura 14.
- Hidrólisis: consiste en la reacción de un precursor de cobre (generalmente una sal) con agua a altas temperaturas.
- Método sol-gel: Implica la formación de un gel a partir de precursores de cobre y un agente gelificante, el gel se seca y se calcina para obtener el óxido de cobre. Las ventajas de este método permiten un control preciso del tamaño de partícula y una gran pureza en el producto final.
- El método de reducción térmica: se basa en la reducción de sales de cobre utilizando agentes reductores a altas temperaturas y después el cobre metálico formado se oxida.
- Microemulsión: se utiliza para la síntesis de nanoestructuras de CuO, involucra la formación de microemulsiones de precursores de cobre, que se someten a reacciones químicas para producir partículas pequeñas de CuO (Waris y col., 2021).

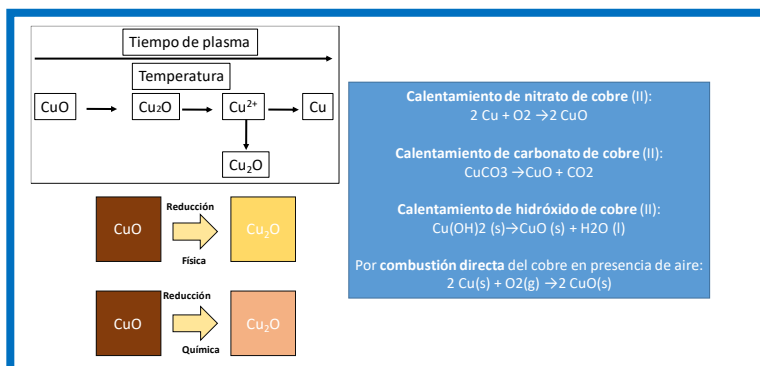


Figura 14. Rutas físicas y químicas para la obtención de óxido de cobre.

PROPIEDAD ANTIBACTERIANA

La propiedad antibacteriana del óxido de cobre es una característica destacada que contribuye a su papel como material inteligente en diversas aplicaciones, especialmente en entornos donde el control de la proliferación bacteriana es crucial. Al presentar propiedades bactericidas quiere decir que puede matar bacterias. El mecanismo de acción involucra la liberación de iones de cobre, que pueden dañar las membranas celulares bacterianas y afectar procesos metabólicos esenciales. Esta propiedad se extiende a una variedad de microorganismos, incluyendo bacterias Gram-positivas y Gram-negativas (Román y col., 2020). El CuO

también se incorpora comúnmente en recubrimientos y materiales para conferir propiedades antibacterianas. Esta propiedad se extiende a una variedad de microorganismos, incluyendo bacterias Gram-positivas y Gram-negativas (Román y col., 2020). El CuO también

se incorpora comúnmente en recubrimientos y materiales para

conferir propiedades antibacterianas. Esto se aplica en entornos como hospitales, donde la prevención de la propagación de infecciones es crítica, así como en la fabricación de implantes biomédicos, donde la prevención de infecciones es esencial. Los implantes recubiertos con CuO pueden ayudar a reducir el riesgo de infecciones asociadas con dispositivos médicos. También se utiliza en la prevención del biofouling, que es la acumulación de microorganismos en superficies sumergidas, como cascos de barcos y estructuras marinas. El CuO se ha utilizado en el desarrollo de textiles con propiedades antibacterianas (Figura 15), los cuales son especialmente útiles en la fabricación de ropa deportiva y otros productos donde la proliferación bacteriana puede ser problemática. Todo lo anterior quiere decir que esto no solo es una característica valiosa para aplicaciones biomédicas, sino que también



Figura 15.

Esponja de limpieza con nanopartículas de óxido de cobre.



CienciAcierta

tiene implicaciones importantes en la prevención de enfermedades y la mejora de la higiene.

APLICACIONES

A continuación, se observan las distintas aplicaciones de los estudios más recientes donde el óxido de cobre aparece como material inteligente (Tabla 2).

Tabla 2. Aplicaciones del óxido de cobre.

Año	Aplicación	Descripción
2022 (Dulta y colaboradores)	Actividad antimicrobiana	Se empleó un extracto de rizoma de <i>Bergenia ciliata</i> como agente reductor biofuncional en la síntesis ecológica de nanopartículas de óxido de cobre.
2021 (Tamayo y colaboradores)	Semiconductores	Se evaluó la influencia del tratamiento térmico con las propiedades estructurales y ópticas de las nanoestructuras de óxido de cobre.
2021 (Steinhauer y colaboradores)	Sensores de gas	Se evaluó el uso del óxido de cobre para el uso en sensores detectores de gas.
2021 (Waris y colaboradores)	Aplicaciones biomédicas	Realizaron una revisión del óxido de cobre obtenido por síntesis verde y las diversas aplicaciones biomédicas.
2021 (Letchumanan y colaboradores)	Aplicaciones biomédicas	presentación de una biosíntesis de nanopartículas de cobre/óxido de cobre a base de plantas para aplicación en biomedicina y toxicidad.
2021 (Ighalo y colaboradores)	Tratamiento de agua	Se utilizaron nanopartículas de óxido de cobre para su uso como adsorbente de diversos contaminantes en el agua
2021 (Siavash y colaboradores)	Fotocatalizadores	Se estudiaron las aplicaciones del óxido de cobre como fotocatalizador y una división fotoelectroquímica de agua mediante electrodos a base de CuO.
2021 (Yan Cao y colaboradores)	Citotoxicidad	Se realizó una síntesis verde de nanopartículas de ZnO-CuO para obtener propiedades de citotoxicidad.
2020 (Hermawan y colaboradores)	Sensores de gas	Se demostró que el CuO obtuvo un rendimiento como material prometedor para la detección de gases COV.
2020 (Salahuddin y colaboradores)	Descontaminante	Se sintetizaron nanopartículas de cobre y óxido de cobre a partir de varias especies de plantas para evaluar su uso en la degradación de colorantes orgánicos.



CONCLUSIONES

La investigación exhaustiva sobre el óxido de cobre ha revelado su versatilidad como material inteligente, destacando propiedades únicas que abarcan desde la sensibilidad a los gases hasta su capacidad para funcionar como fotocatalizador.

Los estudios han demostrado que el óxido de cobre no solo es capaz de responder a estímulos externos, como la luz y los cambios de temperatura, sino que también exhibe propiedades piezoeléctricas y de nanotecnología que amplían su aplicación en diversos campos tecnológicos.

Los métodos de síntesis, como la síntesis térmica, la precipitación y la nanotecnología, han permitido la manipulación precisa de las propiedades del óxido de cobre, generando nanoestructuras con características mejoradas y tamaños de partícula controlados.

La importancia del óxido de cobre como sensor de gases destaca su contribución significativa a la monitorización ambiental y la seguridad en la detección temprana de sustancias tóxicas, respaldando la gestión ambiental y la protección de la salud pública.

Su papel como fotocatalizador ha llevado a avances en la degradación de contaminantes, señalando su importancia en la búsqueda de soluciones sostenibles para la purificación del aire y el agua.

La capacidad del óxido de cobre para ser modificado a nivel nanométrico a través de métodos como el sol-gel ofrece nuevas perspectivas para aplicaciones en dispositivos nanoelectrónicos y nanomédicos, anticipando avances tecnológicos significativos.

La sensibilidad a la luz del CuO , aunque no fotocromática por naturaleza, se ha explotado en aplicaciones fotocatalíticas y en celdas solares, destacando su contribución a la generación de energía sostenible.

La continuación de la investigación se orienta hacia la comprensión más profunda de las propiedades piezoeléctricas y la mejora de la eficiencia en la síntesis de nanoestructuras de CuO , buscando impulsar aún más su aplicación en dispositivos avanzados.



La importancia estratégica del óxido de cobre en la tecnología moderna sugiere un futuro prometedor, donde la combinación de sus propiedades únicas y la continua innovación en métodos de síntesis pueden abrir nuevas posibilidades en electrónica, medicina y tecnologías medioambientales.

En resumen, la investigación exhaustiva sobre el óxido de cobre revela su destacada versatilidad como material inteligente con propiedades únicas. A lo largo del estudio se exploraron diversas aplicaciones, desde su sensibilidad a los gases y su capacidad como fotocatalizador hasta su respuesta a estímulos externos como la luz y los cambios de temperatura.

Los métodos de síntesis, como la nanotecnología y la síntesis térmica, permiten la manipulación precisa de sus propiedades, generando nanoestructuras con características mejoradas. La importancia del óxido de cobre como sensor de gases en la monitorización ambiental, su papel en aplicaciones nanoelectrónicas y nanomédicas, así como su contribución a la generación de energía sostenible, resaltan su papel crucial en la innovación tecnológica.

El estudio sugiere un futuro prometedor para el óxido de cobre, con la continua investigación enfocada en comprender más profundamente sus propiedades y mejorar la eficiencia en su síntesis, abriendo nuevas posibilidades en áreas como la electrónica, la medicina y las tecnologías ambientales.

REFERENCIAS

- Bairagi, S., Chowdhury, A., Banerjee, S., Thakre, A., Saini, A., Wazed-Ali, S. (2022). Investigating the role of copper oxide (CuO) nanorods in designing flexible piezoelectric nanogenerator composed of polyacrylonitrile (PAN) electrospun web-based fibrous material. *J Mater Sci: Mater Electron*. 33: 13152–13165. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08254-1>
- Bhavyasree, P., & Xavier, T. (2022). Green Synthesised copper and copper oxide based nanomaterials using plant extracts and their application in antimicrobial



- activity: review. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 5: 100249. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100249>
- Cao, Y., Dhahad, H. A., El-Shorbagy, M. A., Alijani, H. Q., Zakeri, M., Heydari, A., Bahonar, E., Šlouf, M., Khatami, M., Naderifar, M., Iravani, S., Khatami, S., & Dehkordi, F. F. (2021). *Green synthesis of bimetallic ZNO–CUO nanoparticles and their cytotoxicity properties*. *Scientific Reports*, 11(1): 23479 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02937-1>
- Dulta, K., Ağçeli, G. K., Chauhan, P. K., Jasrotia, R., Chauhan, P. K., & Ighalo, J. O. (2022). Multifunctional CUO nanoparticles with enhanced photocatalytic dye degradation and antibacterial activity. *Sustainable Environment Research*, 32: 2 (2022). <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00111-w>
- González V., O. F., Mutiz, J. J., & Urresta A., J. (2018). Síntesis y caracterización de catalizadores tipo Cu soportado en MgO, SiO₂, ZnO y Al₂O₃ aplicados a la hidrogenólisis del glicerol. *Revista ION*, 30(2): 31–41. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n2-2017003>
- Hermawan, A., Zhang, B., Taufik, A., Asakura, Y., Hasegawa, T., Zhu, J., Shi, P., & Yin, S. (2020). CUO Nanoparticles/Ti3C2TX MXENE Hybrid Nanocomposites for detection of toluene gas. *ACS applied nanomaterials*, 3(5): 4755-4766. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c00749>
- Ighalo, J. O., Sagboye, P. A., Umenweke, G. C., Ajala, O. J., Omoarukhe, F. O., Adeyanju, C. A., Ogunniyi, S., & Adeniyi, A. G. (2021). CUO nanoparticles (CUO NPs) for water treatment: A review of recent advances. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 15: 100443. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100443>
- Kim, S. J., Kim, S., Lee, J., Jo, Y., Seo, Y., Lee, M., Lee, Y., Cho, C. R., Kim, J., Cheon, M., Hwang, J., Kim, Y. I., Soon, A., Choi, M., Choi, W. S., Jeong, S., & Lee, Y. H. (2021). Color of Copper/Copper oxide. *Advanced Materials*, 33(15): 2007345. <https://doi.org/10.1002/adma.202007345>
- Letchumanan, D., Sok, S. P. M., Ibrahim, S., Siddik, Z. H., & Arshad, N. M. (2021). Plant-Based biosynthesis of Copper/Copper oxide nanoparticles: An update on their applications in biomedicine, mechanisms, and toxicity. *Biomolecules*, 11(4): 564. <https://doi.org/10.3390/biom11040564>
- Moakhar, R. S., Hosseini-Hosseinabad, S. M., Masudy-Panah, S., Seza, A., Jalali, M., Fallah-Arani, H., Dabir, F., Gholipour, S., Abdi, Y., Hariri, M. B., Riahi-Noori, N., Lim, Y., Hagfeldt, A., & Saliba, M. (2021). Photoelectrochemical Water-Splitting using CUO-Based electrodes for hydrogen production: a review. *Advanced Materials*, 33: 2007285. <https://doi.org/10.1002/adma.202007285>



- Naz, S., Gul, A., & Zia, M. (2019). Toxicity of Copper Oxide nanoparticles: A review study. *Iet Nanobiotechnology*, 14(1): 1-13. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.0176>
- O'Mahony S.M., Ren, W., Chen, W., Chong, Y. X., Liu, X., Eisaki, H., Uchida, S., Hamidian, M. H. Séamus, J.C.D. (2022). On the electron pairing mechanism of copper-oxide high-temperature superconductivity. *PNAS Physics*. 119(37): e2207449119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2207449119>.
- Resende, S.D.M. (2023). Nanopartículas de sílica mesoporosas SBA16 funcionalizadas com óxido de cobre: um potencial sistema para remoção de agrotóxicos em meio aquoso. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA. https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3469/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_2023009.pdf
- Román, L. E., Gomez, E. D., Solís, J., & Gómez, M. (2020). Antibacterial cotton fabric functionalized with copper oxide nanoparticles. *Molecules*, 25(24): 5802. <https://doi.org/10.3390/molecules25245802>
- Rydosz, A. (2018). The use of Copper oxide thin films in Gas-Sensing applications. *Coatings*, 8(12): 425. <https://doi.org/10.3390/coatings8120425>
- Schio, A.L. (2020). Síntese Mecanoquímica Nanopartículas de óxido de cobre (II) para a redução catalítica de nitroarenos em meio aquoso. Mestrado Acadêmico em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade de Caxias do Sul <https://repositorio.ucs.br/11338/6724>
- Siddiqi, K. S., & Husen, A. (2020). Current status of plant metabolite-based fabrication of copper/copper oxide nanoparticles and their applications: a review. *Biomaterials Research*, 24(1): s40824-020-00188-1. <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00188-1>
- Solomon, E. I., Jones, P. M., & May, J. A. (1993). Electronic structures of active sites on metal oxide surfaces: Definition of the copper-zinc oxide methanol synthesis catalyst by photoelectron spectroscopy. *Chemical Reviews*, 93(8): 2623-2644. <https://doi.org/10.1021/cr00024a003>
- Sonobe, K., Tanabe, M., and Yamamoto, K. (2020). Enhanced Catalytic Performance of Subnano Copper Oxide Particles. *ACS Nano*. 14 (2): 1804-1810. <https://doi: 10.1021/acsnano.9b07582>
- Spin L.S.M y Urbina M.L.A (2015). Estudio de la aleación inteligente con memoria de forma CU-ZN para determinar su aplicación industrial. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Mecánica <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/26234>
- Steinhauer, S. (2021). Gas sensors Based on Copper Oxide Nanomaterials: A review. *Chemosensors*, 9(3): 51. <https://doi.org/10.3390/chemosensors9030051>



- Tamayo, K., Marín, L., Gross, K., Amaya, C., Reyes, D., Lopera, W., & Gómez, M. (2022). Influencia del tratamiento térmico en las propiedades estructurales y ópticas de nanoestructuras basadas en óxidos de cobre. *Ingeniería Y Competitividad*, 24(1): e21611349. <https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.11349>
- Verma, N., & Kumar, N. (2019). Synthesis and biomedical applications of Copper oxide nanoparticles: an expanding horizon. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5(3): 1170-1188. <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.8b01092>
- Waris, A., Din, M., Ali, A., Ali, M., Afridi, S., Baset, A., & Khan, A. U. (2021). A comprehensive review of green synthesis of copper oxide nanoparticles and their diverse biomedical applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 123: 108369. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.108369>

