

PERSPECTIVA

SUSTITUTOS DEL COBRE EN LA ERA DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA



ÍNDICE



.....

PÁGINA 3
SOBRE GEM

PÁGINA 4
EDITORIAL

PÁGINA 5
INTRODUCCIÓN

PÁGINA 8
SUSTITUCIÓN POR GRAFENO

PÁGINA 11
SUSTITUCIÓN POR OTROS
MATERIALES

PÁGINA 13
CONCLUSIÓN

PÁGINA 14
BIBLIOGRAFÍA

PÁGINA 15
CONTACTO

SOBRE GEM

Somos una empresa de Ingeniería Industrial especializada en brindar apoyo a la industria minera en asuntos relacionados con gestión y economía. **Con más de 16 años de experiencia** y la exitosa implementación de más de **500 proyectos a nivel mundial**, nos destacamos por nuestra sólida trayectoria y compromiso con la excelencia en el sector.

GEM lidera la minería del **futuro** con soluciones innovadoras. Desde la gestión del cambio climático hasta la minería submarina y la lixiviación in-situ, GEM se compromete a promover prácticas sostenibles, colaborativas y responsables, siempre con un enfoque en el impacto social y ambiental.



Cambio climático



Colaboración



Data Science



Descarbonización



Evaluación Impacto Social



Lixiviación In Situ



Minería Espacial



Minería Submarina



Naturaleza



MENSAJE EDITORIAL

**POR PATRICIO FAÚNDEZ
PROJECT MANAGER**

La transición energética ha consolidado al cobre como un metal crítico para el desarrollo de vehículos eléctricos, redes de transmisión, sistemas de almacenamiento de energía y tecnologías digitales. Sin embargo, junto con este auge ha reaparecido un debate que ha sido recurrente en la historia de los recursos minerales: ¿es posible que surjan materiales capaces de sustituir al cobre en sus principales aplicaciones?

Este volumen de Perspectiva examina esta pregunta con una mirada técnica, revisando tanto los avances en materiales emergentes —como grafeno, nanotubos de carbono o superconductores— como el rol persistente de alternativas tradicionales, entre ellas el aluminio y sus compuestos. El análisis presentado identifica los espacios donde estos materiales podrían aportar ventajas funcionales, pero también muestra los límites que enfrentarían para igualar la combinación única de conductividad, peso y costo que ofrece el cobre.

Las estimaciones realizadas por GEM indican que el impacto agregado de la sustitución se mantendría acotado en la próxima década. Materiales avanzados seguirían presentes en nichos de alto valor, mientras que los sustitutos convencionales continuarían siendo relevantes solo en contextos muy específicos. En cualquier caso, la transición energética intensificaría la demanda de cobre refinado más rápido de lo que los sustitutos podrían desplazarlo.



Dado lo anterior, los principales desafíos de la industria del cobre frente a la transición energética no provienen de un riesgo de sustitución masiva —más allá de que algunos materiales puedan complementar y/o sustituir al cobre en nichos específicos—, sino de la capacidad real de aumentar la oferta minera para responder a una demanda en expansión. En este sentido, en la próxima década, las principales restricciones a la oferta serían principalmente geológicas, ambientales, sociales, técnicas y de costos: barreras que la industria deberá superar para asegurar el suministro de cobre refinado que requieren las redes eléctricas, la electromovilidad y las energías renovables.

INTRODUCCIÓN

El cobre es un insumo clave para la transición energética y tecnológica, con usos masivos en redes eléctricas, electrónica, transporte (especialmente en vehículos eléctricos) y energías renovables. Diversos estudios proyectan un aumento significativo —incluso explosivo— de la demanda de cobre en las próximas décadas, superando con creces la capacidad de producción actual.

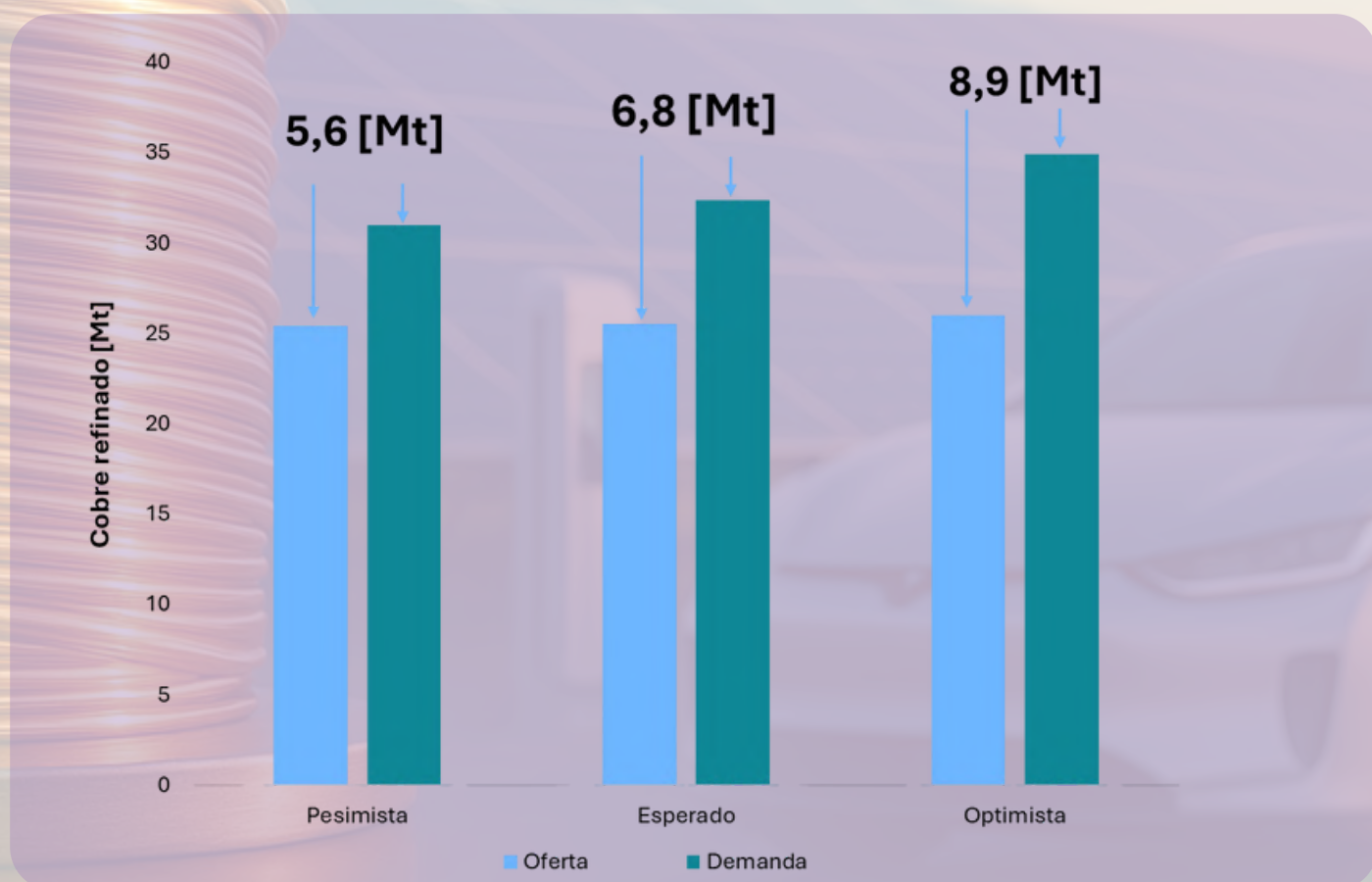
Según GEM, la demanda global de cobre refinado alcanzaría las 35 [Mt] anuales al 2035 en un escenario optimista (cero emisiones netas de CO₂ al 2050) y 31 [Mt] en un escenario pesimista (manteniendo las políticas vigentes). De acuerdo con Cochilco (2025), la demanda de cobre refinado en 2024 fue de 26 [Mt], lo que implicaría un incremento proyectado de 19%-35% hacia 2035.

Por su parte, la oferta de cobre refinado estimada por GEM para 2035 se ubicaría entre 25,5 [Mt] y 26,1 [Mt], según el escenario considerado. Esta estimación incorpora la producción de cobre mina firme (operaciones en curso y proyectos comprometidos) junto con la producción secundaria de cobre refinado.

Como se muestra en la **Figura 1**, esta oferta resultaría insuficiente para cubrir la demanda proyectada, generando una brecha de entre 5,6 [Mt] y 8,9 [Mt] en los escenarios pesimista y optimista, respectivamente. Dicho desbalance podría ser suplido únicamente mediante el desarrollo de nuevos proyectos mineros posibles y probables, por lo que se requerirían entre 5,6 [Mt] y 8,9 [Mt] adicionales de capacidad para satisfacer la demanda global hacia 2035.

A la vez, la producción minera crece lentamente: Cochilco (2025) proyecta un incremento de apenas 0,5% para 2025, lo que indica que la oferta difícilmente alcanzaría la demanda proyectada sin importantes inversiones y nuevos desarrollos en el sector. Ante este escenario de crecimiento limitado y la expectativa de precios elevados, resurge el debate sobre la posible sustitución del cobre, un fenómeno histórico que tiende a intensificarse cuando el mercado enfrenta restricciones de oferta o aumentos sostenidos de precios.

FIGURA 1. OFERTA Y DEMANDA DE COBRE PARA 2035



A lo largo del último siglo, el cobre ha sido parcialmente sustituido en diversas aplicaciones cada vez que su precio aumentó o surgieron tecnologías más eficientes. Los reemplazos más relevantes se dieron en cuatro ámbitos principales:

TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

El uso del aluminio en lugar del cobre en líneas aéreas de alta tensión ha sido una sustitución parcial pero extensiva. Desde mediados del siglo XX, el aluminio —particularmente en configuraciones como ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*) y AAAC (*All Aluminium Alloy Conductor*)— se convirtió en el estándar industrial para la transmisión eléctrica de alta tensión, debido a su menor peso, menor costo y conductividad adecuada para el servicio aéreo. Aunque el cobre siguió empleándose en secciones específicas (por ejemplo, conexiones o conductores de alta exigencia), la adopción del aluminio permitió reducir costos y facilitar el tendido de redes de gran longitud (Elkamehr, 2023).

TELECOMUNICACIONES

El desplazamiento del cobre por la fibra óptica en redes de larga distancia y, posteriormente, en buena parte de los sistemas de transmisión de datos y acceso, constituye una sustitución casi total, aunque aún persisten tramos de cobre en la llamada “última milla”. Este proceso comenzó en la década de 1980, impulsado por la necesidad de mayor capacidad y menor pérdida de señal, y se aceleró a partir de los años 2000 con la digitalización de las telecomunicaciones. De acuerdo con un análisis de Boston Consulting Group (2021), la transición desde redes basadas en cobre hacia sistemas de fibra óptica marca el cierre de una era tecnológica y plantea desafíos de modernización para las operadoras.

CONSTRUCCIÓN Y FONTANERÍA

En tuberías, canaletas, válvulas, monedas y otros usos estructurales, el cobre ha sido reemplazado mayoritariamente por plásticos (PVC, PEX) o metales más económicos (acero galvanizado, zinc), aunque no siempre completamente: en ciertas aplicaciones de alta especificación todavía se utiliza cobre. Este proceso comenzó a intensificarse a partir de la década de 1950, cuando el aumento del precio del metal impulsó a las industrias de construcción y manufactura a buscar materiales alternativos con menor costo y adecuada resistencia, tendencia documentada por diversos estudios técnicos sobre sustitución de cobre en esa época (Machinemfg, 2023).

EQUIPOS TÉRMICOS Y ELECTRÓNICOS

En disipadores térmicos y sistemas de refrigeración, se ha observado una sustitución parcial pero consolidada del cobre por materiales como aluminio y grafito pirolítico, impulsada por la búsqueda de soluciones más ligeras, económicas y fáciles de manufacturar, pero con una conductividad térmica suficiente para mantener el rendimiento. Estas láminas y compuestos de grafito, utilizados especialmente en electrónica de consumo y dispositivos de alta densidad térmica, ofrecen una conductividad en plano superior al cobre por unidad de masa, debido a su combinación de alta conductividad térmica y densidad reducida, lo que las ha posicionado como alternativas eficientes en productos compactos y de gran volumen de producción. Este proceso, iniciado hace más de una década, se considera una sustitución tecnológica madura, aunque continúa evolucionando con materiales avanzados —como grafitos orientados y compuestos carbono-metal— que podrían ampliar su alcance en los próximos años (Panasonic, 2025).



Estas sustituciones se concentraron en aplicaciones donde el cobre podía reemplazarse sin afectar sustancialmente el desempeño en la aplicación o donde, para una aplicación específica, surgieron tecnologías claramente superiores al cobre, como la fibra óptica. Esto redujo o limitó parcialmente el crecimiento del consumo en sectores como telecomunicaciones, fontanería y radiadores, pero no detuvo la expansión global de la demanda de cobre refinado: el desarrollo industrial y la electrificación abrieron nuevos usos donde el cobre siguió siendo insustituible por sus propiedades físicas.

En este sentido, el cobre destaca entre los metales por su combinación óptima de tres factores clave: conductividad eléctrica, densidad (peso) y costo. Es, después de la plata, el mejor conductor eléctrico, pero su menor costo y mayor disponibilidad, respecto a la plata, lo convierten en el material estándar en aplicaciones eléctricas e industriales. Además, ofrece una excelente conductividad térmica, buena resistencia a la corrosión y alta maleabilidad, lo que facilita su procesamiento y uso en una amplia variedad de entornos. Por estas razones, se le reconoce como el conductor con mejor desempeño técnico y económico de forma simultánea (Prysmian Group, 2024).

En la actualidad, la mayoría de las aplicaciones fácilmente sustituibles ya migraron hacia otros materiales. El cobre conserva su supremacía en aquellos usos donde combina alta conductividad eléctrica y térmica, fiabilidad y un costo competitivo. Incluso con un precio tres a cuatro veces superior al del aluminio, sólo alrededor de 1% del consumo global de cobre fue sustituido en 2020, y la tasa anual de sustitución se ha mantenido por debajo de 1,5% en los últimos años (ICA, 2022; BHP, 2024), reflejando la escasez de alternativas viables técnica y económicamente.

En las secciones siguientes, este informe analiza las aplicaciones donde el grafeno y otros materiales de carbono podrían sustituir al cobre, así como otros posibles competidores —como el aluminio, la plata o los superconductores— que podrían ganar terreno en distintos segmentos industriales. El objetivo es ofrecer una visión integrada del panorama de sustitución futura, identificando las áreas con mayor potencial tecnológico y los factores que podrían favorecer o limitar una transición material en las próximas décadas.

En sectores estratégicos como cables de energía, electrónica y maquinaria, el costo del cobre representa una fracción menor del valor total del sistema, por lo que el incentivo a reemplazarlo es limitado mientras las alternativas impliquen menor desempeño y/o mayor riesgo operativo. Además, la tendencia hacia una mayor eficiencia energética refuerza su posición: minimizar las pérdidas eléctricas en motores, transformadores y redes es prioritario, y el cobre ofrece una conductividad superior frente a sustitutos más baratos como el aluminio.

Dada la expectativa de una demanda creciente y la posible escasez relativa de cobre, surge naturalmente la pregunta sobre qué nuevas sustituciones podrían emerger y en qué medida podrían alterar el mercado. En particular, materiales avanzados como el grafeno, los nanotubos de carbono y otras innovaciones tecnológicas han despertado interés por su potencial para igualar o superar al cobre en determinadas propiedades eléctricas, térmicas o estructurales.



SUSTITUCIÓN POR GRAFENO

Desde su aislamiento en 2004 por Andre Geim y Konstantin Novoselov, el grafeno fue presentado como un material verdaderamente disruptivo: una lámina monoatómica de carbono que parecía capaz de transformar múltiples industrias gracias a propiedades físicas excepcionales. Por este descubrimiento, ambos científicos recibieron el Premio Nobel de Física en 2010 (The Royal Swedish Academy of Sciences, 2010). Existen más de 370.000 artículos de investigación y más de 150.000 patentes sobre cómo aplicar el grafeno, lo que pone en evidencia el alto nivel de expectativas que generó (Barkan et al., 2024).

Sin embargo —a pesar del entusiasmo y de los múltiples programas de apoyo público— su adopción comercial ha sido mucho más lenta de lo previsto, dado que enfrenta importantes desafíos de producción en volumen, integración en procesos industriales, y competencia con materiales ya establecidos (Barkan et al., 2024).

El grafeno —una lámina monoatómica de carbono— concentra propiedades físicas excepcionales que, en condiciones de laboratorio, lo posicionan como un posible sustituto del cobre en aplicaciones específicas. Su conductividad térmica alcanza entre 3.000 y 5.000 [W/m·K], es decir, hasta diez veces superior a la del cobre (~400 [W/m·K]). Asimismo, presenta una conductividad eléctrica intrínseca del orden de 10^6 – 10^7 [S/m], junto con movilidades electrónicas extremadamente altas que lo sitúan en el rango del cobre y otros metales altamente conductores (Pop et al., 2012). El grafeno destaca por sus propiedades mecánicas excepcionales: su módulo de Young, que mide la rigidez de un material, alcanza alrededor de 1 [TPa], lo que significa que es extremadamente difícil de deformar. Además, su resistencia a la tracción supera los 130 [GPa], lo que indica que puede soportar fuerzas de estiramiento sustanciales antes de romperse, por lo que supera ampliamente a los aceros en resistencia y rigidez por unidad de peso (Lee et al., 2008). Gracias a esta combinación de gran rigidez, alta resistencia y baja densidad, se ha convertido en un material muy prometedor para disipación térmica, recubrimientos protectores y capas funcionales que podrían complementar o incluso reemplazar al cobre en diversas aplicaciones.

No obstante, la adopción comercial del grafeno sigue siendo limitada. Cochilco advierte que, en el corto y mediano plazo, no se prevé un riesgo significativo de sustitución del cobre, ya que materiales como el grafeno o los nanotubos de carbono permanecen “mayoritariamente en etapas de I+D o en nichos de alto valor” (Rumbo Minero, 2021).

A partir de la evidencia experimental y comercial, se identifican algunos ámbitos de aplicación potencial. En electrónica de consumo, las láminas tipo grafito o grafeno se usan como heat spreaders por su conductividad en plano de 700–1.950 [W/m·K], muy superior a la del cobre por unidad de masa, lo que las hace ideales para equipos compactos donde el peso es crítico (Panasonic, 2025). En antenas impresas (RF/RFID) se han desarrollado prototipos funcionales con tintas de grafeno —flexibles, livianas y de bajo espesor—, que representan una alternativa más sostenible frente al cobre y la plata (Zhou et al., 2024). No obstante, la conductividad y eficiencia de radiación de estas antenas aún se encuentran por debajo de las metálicas convencionales, por lo que el desplazamiento efectivo de cobre sigue siendo limitado.



En blindaje electromagnético (EMI/RFI), los compuestos con grafeno muestran una alta eficacia de apantallamiento, lo que permite sustituir parcialmente las láminas metálicas en carcasas y pantallas, aunque el efecto agregado sobre la demanda de cobre es reducido, es decir, no implica una disminución significativa en el consumo total de cobre (Jovanović et al., 2023). En microelectrónica, el grafeno se emplea principalmente como capping o barrera sobre interconexiones de cobre, donde reduce la electromigración y mejora la confiabilidad, sin reemplazar al conductor principal (Yoon et al., 2015). En colectores de corriente para baterías de iones de litio, existen pilotos con aluminio recubierto en grafeno para mejorar la estabilidad y reducir peso, aunque su adopción industrial aún es incipiente (Shi et al., 2024). Finalmente, en conducción eléctrica ligera (líneas aéreas o bobinados), se explora el aluminio reforzado con grafeno, destinado a aumentar la conductividad específica; sin embargo, esto mejora el aluminio existente y no reduce directamente el consumo de cobre (Knych et al., 2022).

La **Tabla 1** resume los principales ámbitos de aplicación del grafeno como potencial sustituto del cobre, detallando cómo operaría el reemplazo, su nivel actual de desarrollo tecnológico y el horizonte estimado para su uso industrial. Estas fechas corresponden a estimaciones de GEM, elaboradas a partir de la información disponible en literatura científica y fuentes industriales, y buscan reflejar un momento tentativo en que cada tecnología podría alcanzar madurez comercial.

Cabe precisar que este horizonte temporal no implica necesariamente una sustitución total del cobre, sino más bien un punto en el que dichas tecnologías podrían comenzar a competir en el mercado, aunque sea cubriendo segmentos o nichos específicos dentro de él.

Como se observa en la **Tabla 1**, la sustitución del cobre mediante materiales basados en grafeno sigue siendo parcial, localizada y en desarrollo, concentrándose principalmente en gestión térmica en móviles y electrónica, recubrimientos protectores como las interconexiones en chips y circuitos impresos flexibles. En la mayoría de los casos, el grafeno actúa como complemento o mejora de materiales metálicos existentes —por ejemplo, en cables o barras de cobre con grafeno, colectores de corriente en baterías o líneas eléctricas reforzadas con grafeno— más que como un sustituto directo. Como resultado, su impacto global sobre la demanda de cobre se mantendría limitado y acotado a nichos tecnológicos específicos.

TABLA 1: POSIBLES SUSTITUTOS DEL COBRE CON MATERIALES BASADOS EN GRAFENO

APLICACIÓN	¿CÓMO REEMPLAZARÍA AL COBRE?	NIVEL DE DESARROLLO	AÑO TENTATIVO DE USO INDUSTRIAL	IMPORTANCIA PARA EL REEMPLAZO DEL COBRE
Antenas RF y RFID impresas	Películas de grafeno reemplazan el cobre en antenas ligeras y flexibles, usadas en etiquetas y dispositivos portables.	Laboratorio → primeras pruebas comerciales	2025 - 2028	Reemplazo parcial en dispositivos pequeños
Blindaje electromagnético (EMI/RFI)	Láminas de grafeno sustituyen el foil de cobre en pantallas y equipos electrónicos.	Nicho comercial (pruebas comerciales)	2025 - 2027	Reemplazo limitado a sectores específicos
Gestión térmica en móviles/electrónica	Grafeno reemplaza láminas de cobre como disipador de calor en algunos equipos.	En uso por marcas selectas	En uso y expansión	Reemplazo parcial, principalmente en electrónica de consumo
Líneas eléctricas o bobinados	Aluminio con refuerzo de grafeno busca igualar al cobre en conductividad y menor peso.	Proyecto piloto	2030 - 2035	Aún en desarrollo experimental
Cables o barras de cobre con grafeno	Mejora el cobre (más conductividad, menor resistencia) sin reemplazarlo.	Laboratorio → piloto	2028 - 2030 (a pilotaje)	Complementario, no sustituto
Interconexiones en chips	Grafeno reduce la resistencia y el desgaste en microchips.	Laboratorio avanzado	Posterior a 2030	Muy específico en demanda de cobre
Circuitos impresos flexibles	Tintas de grafeno sustituyen el cobre en sensores y componentes flexibles.	Laboratorio → nicho comercial	2025 - 2027	Reemplazo limitado, solo en aplicaciones de dispositivos electrónicos conectados o sensores
Colectores de corriente en baterías	Grafeno o aluminio recubierto con grafeno sustituyen al cobre para aligerar peso.	Laboratorio (prototipos iniciales)	2028 - 2032	Aún en desarrollo experimental
Aeronáutica	Grafeno reemplaza láminas de cobre para reducir peso en aviones.	Laboratorio (en evaluación)	Posterior a 2030	Reemplazo reducido de cobre, de bajo impacto. Debe pasar por años de pruebas y validaciones de seguridad



Con el fin de dimensionar cuantitativamente el posible alcance de estas sustituciones, GEM desarrolló una estimación propia basada en la estructura de uso del cobre y en la información disponible sobre aplicaciones emergentes de grafeno. Este ejercicio busca poner en contexto el potencial real de desplazamiento de demanda, considerando las proporciones de cobre utilizadas en los distintos segmentos industriales. La International Copper Association (ICA) estima que cerca del 70% del cobre mundial se destina a aplicaciones eléctricas y de comunicación; dentro de ese bloque, 44% corresponde a redes de energía y 14% a equipos eléctricos y electrónicos (ICA, 2023). Dado que las aplicaciones con grafeno se ubican casi por completo dentro de ese 14%, los cálculos sobre la sustitución de grafeno han de comparar la cantidad real de cobre usada y el número de equipos o sistemas en funcionamiento sobre una base de demanda global de aproximadamente 26 [Mt] de cobre refinado en 2024 (Cochilco, 2025).

El caso más cuantificable es la disipación térmica en dispositivos móviles. Si –como supuesto extremo– todo el cobre presente en smartphones fuera sustituible por láminas PGS/grafeno, usando alrededor de 17–26 [g] de cobre por aparato (CIC, 2023) y 1,24 mil millones de unidades despachadas en 2024 (IDC, 2025), el cobre total en esos equipos estaría entre 0,021 [Mt] y 0,032 [Mt], equivalente a 0,08%–0,12% del mercado. Este valor es un límite superior teórico (no un pronóstico), ya que las láminas térmicas no sustituyen todo el cobre del dispositivo (Panasonic, 2025).

La evidencia técnica revisada indica que, para los sub-usos como blindaje EMI/RFI, antenas impresas y sensores flexibles, interconexiones avanzadas (capas de capping o barrera sobre cobre), colectores de corriente (ánodos de Al + grafeno), conductores recubiertos con grafeno y materiales aeronáuticos que incorporan grafeno, los volúmenes de cobre por unidad son muy bajos y las tasas de adopción industrial siguen siendo moderadas y/o marginales (Liu et al., 2024; Fraunhofer ISI, 2024). Estos usos se concentran en nichos donde el grafeno aporta ventajas funcionales (menor peso, mejor disipación térmica, resistencia a la corrosión y flexibilidad), pero sin sustituir al cobre como conductor principal.

En base al juicio de GEM, el potencial total de sustitución combinada del cobre por grafeno en todos estos sub-usos, incluido el segmento de dispositivos móviles, se estima en menos del 0,5% de la demanda mundial de cobre en un horizonte de 10–15 años.



Esta estimación coincide con la visión de que el impacto del grafeno sobre el mercado del cobre sería marginal. En la misma línea, IDTechEx advierte que, pese al avance tecnológico y la expansión de la capacidad productiva, la demanda efectiva de grafeno sigue siendo reducida y su incidencia sobre los mercados de materiales tradicionales continúa siendo limitada (IDTechEx, 2022).

En cuanto a las limitaciones, el grafeno aún enfrenta barreras importantes de costo, escala y validación industrial. Recientes análisis estiman que el precio comercial del grafeno de alta pureza, producido por métodos como deposición química de vapor (CVD), varía entre 100 y 400 US\$/g [1], dependiendo de su pureza, forma y método de producción (The Budget Analyst, 2024). Esto contrasta con el cobre, cuyo precio por unidad de masa es varios órdenes de magnitud menor, lo que dificulta la sustitución directa en aplicaciones masivas. Además, los ciclos de certificación y compatibilidad industrial implican que, incluso con reducción de costos, la adopción sería progresiva.

En conclusión, el grafeno probablemente jugará un rol complementario y marginal más que sustitutivo del cobre, concentrándose en aplicaciones de alto valor —electrónica avanzada, sensores, industria aeroespacial— donde sus propiedades justifican el costo adicional. No obstante, su impacto volumétrico sobre la demanda global de cobre sería marginal, en línea con lo expresado por Cochilco, que no anticipa una amenaza de sustitución relevante por grafeno en la próxima década (Rumbo Minero, 2021).

[1] Esto aplica principalmente a aplicaciones donde la calidad de laboratorio es relevante. En otros casos, como el blindaje EMI, la conductividad no es un factor crítico y, por tanto, el precio podría ser sustancialmente menor.

SUSTITUCIÓN POR OTROS MATERIALES

Al

Diversos materiales alternativos (distintos del grafeno) también han sido desarrollados o mejorados en las últimas décadas con el objetivo de reducir el uso de cobre en aplicaciones eléctricas y electrónicas. Entre ellos destacan el aluminio conductor (Al), los alambres bimetálicos cobre-aluminio (CCA), los conductores compuestos con núcleos especiales (ACCC/ACSR), los superconductores de alta temperatura (HTS), los materiales con nanotubos de carbono (CNT), los compuestos polímero-metal y ciertas interconexiones avanzadas basadas en rutenio o cobalto. Cada uno de estos sustitutos responde a contextos técnicos específicos, usualmente vinculados a la reducción de peso, costo o pérdidas, más que a una sustitución estructural del cobre como conductor principal.

La **Tabla 2** sintetiza estos otros materiales sustitutos del cobre, siguiendo la misma lógica aplicada en la **Tabla 1**, pero enfocada en alternativas distintas al grafeno. Incluye los principales desarrollos identificados por GEM y su nivel de avance industrial, junto con un horizonte estimado de adopción basado en la información técnica y comercial disponible.

Como se observa en la **Tabla 2**, los sustitutos más consolidados corresponden al aluminio conductor y sus derivados, ampliamente utilizados en transmisión aérea y sistemas de baja densidad de corriente. Su baja densidad y menor costo, en comparación con el cobre, justifican su uso en líneas aéreas de transmisión, barras colectoras y cableado de baja densidad, donde el menor peso puede compensarse mediante un redimensionamiento del conductor. En particular, los cables ACCC, que combinan un núcleo de material compuesto con conductores de aluminio, aumentan la capacidad de transporte eléctrico sin incrementar el diámetro, ni el peso del conductor (CTC Global, 2023). Por contraste, los ACSR, con núcleo de acero, ofrecen mayor resistencia mecánica, pero a costa de un peso superior.

Los conductores bimetálicos Cu-Al (CCA), que combinan una capa superficial de cobre con un núcleo de aluminio, son empleados en aplicaciones de baja corriente o tolerancia térmica moderada —como ciertos cables coaxiales o bobinas automotrices—, pero su adopción permanece restringida por razones normativas y de desempeño (AECMSA, 2022). De forma similar, los superconductores de alta temperatura (HTS), aunque permiten transportar corriente con pérdidas mínimas, requieren refrigeración criogénica y mantienen costos muy elevados, por lo que su contribución en la próxima década sería marginal y acotada a proyectos piloto (ENTSO-E, 2025).

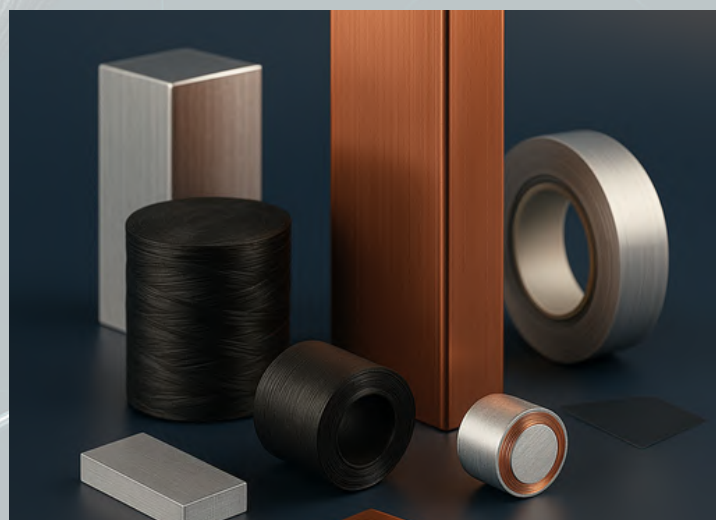
Entre los sustitutos emergentes, las fibras o alambres con nanotubos de carbono (CNT) y los compuestos polímero-carbono/metal han demostrado potencial para aplicaciones de blindaje o conectividad flexible, especialmente en sectores aeroespaciales y electrónicos. Sin embargo, ambos se encuentran aún en fases de desarrollo o uso de nicho, con niveles de madurez tecnológica intermedios y sin presencia significativa en el mercado masivo (Abdulhameed & Halim, 2023). En el ámbito de la microelectrónica, las interconexiones avanzadas basadas en rutenio o cobalto se han introducido en nodos de semiconductores de vanguardia para mitigar la electromigración en capas de cobre ultradelgadas, pero el volumen total de metal desplazado es mínimo a escala global (IMEC, 2023).

En conjunto, la información presentada en la **Tabla 2** confirma que la mayoría de los sustitutos distintos al grafeno se mantienen en fases de desarrollo o despliegue limitado, con impactos acotados a nichos tecnológicos específicos. Sobre la base del análisis técnico y la evidencia disponible, GEM considera que el potencial total de sustitución de cobre (incluyendo la sustitución por grafeno) hacia 2035 se ubicaría, en un rango de aproximadamente 2-5% de la demanda mundial —equivalente a unas 0,6 -1,6 [Mt] de cobre refinado sobre una demanda total proyectada de 32,4 [Mt] en el escenario esperado—.

Cabe destacar que BHP (2024) [1] proyecta que la sustitución y el *thriftifing* [2] combinados podrían alcanzar hasta cerca de un 5% de demanda de cobre refinado hacia la próxima década, disminuyendo luego a alrededor de 3% hacia 2050.

De acuerdo con el juicio experto de GEM, el escenario más probable se ubica dentro de este rango, aunque inclinado hacia su límite inferior, dado que una parte relevante del potencial considerado por BHP corresponde a optimizaciones incrementales más que a sustitución material directa. En este sentido, el impacto agregado sobre la demanda global de cobre se considera moderado y, en el largo plazo, incluso marginal, ya que el propio escenario de BHP muestra que hacia 2050 el efecto combinado de sustitución y *thriftifing* se reduciría a 3%, reforzando que el auge de la electrificación y las nuevas aplicaciones compensaría con creces cualquier sustitución marginal de cobre.

En síntesis, los sustitutos del cobre —especialmente el aluminio y sus compuestos— continuarían expandiéndose en aplicaciones específicas, pero no modificarían sustancialmente la estructura global de demanda de cobre. La mayoría de los desarrollos emergentes (superconductores, CNT, compuestos o interconexiones avanzadas) permanecen en etapas de validación o producción limitada y enfocados en aplicaciones de nicho. En conjunto, estos materiales ejercerán una presión marginal sobre el mercado del cobre en la próxima década, confirmando la visión general de que la sustitución sería gradual, acotada y compensada por el crecimiento estructural de la electrificación global.



[1] Según la Figura “Copper demand projected to grow ~70% through to 2050” de la página 11 de BHP (2024).

[2] Se refiere a la reducción del contenido de cobre en un producto mediante mejoras de eficiencia y/o rediseño tecnológico.

TABLA 2: POSIBLES SUSTITUTOS DEL COBRE CON OTROS MATERIALES

MATERIALES	¿CÓMO REEMPLAZARÍA AL COBRE?	NIVEL DE DESARROLLO	AÑO TENTATIVO DE USO INDUSTRIAL	IMPORTANCIA PARA EL REEMPLAZO DEL COBRE
Aluminio conductor (Al)	Se utiliza en ciertas líneas aéreas, barras colectoras y cableado donde el menor peso y costo justifican un redimensionamiento del conductor. No reemplaza al cobre en entornos compactos, urbanos o de alta densidad de corriente	Industrial extendido	En uso y expansión	Sustitución significativa pero limitada a contextos donde el volumen, peso o costo son determinantes. Requiere más material por su menor conductividad
Aluminio con núcleos compuestos (ACCC/ACSR)	Sustituye parcialmente a cables de cobre en transmisión aérea de media y alta tensión, usando núcleos especiales que permiten mayor capacidad sin aumentar peso	En despliegue industrial	En uso y expansión	Uso extendido en transmisión aérea específica, pero sin impacto en redes urbanas, subterráneas o de distribución final
Bimetálicos Cu-Al (CCA)	Combinan una capa superficial de cobre con núcleo de aluminio. Se emplean en aplicaciones donde se puede tolerar menor sección efectiva de cobre sin afectar la funcionalidad (p.ej. algunos cables domésticos o automotrices)	Industrial selectivo	En uso y expansión	Reemplazo funcional parcial en aplicaciones limitadas y de bajo voltaje. No sustituye al cobre en componentes críticos de alta corriente
Plata (Ag)	Se emplea sólo en sensores y antenas miniaturizadas donde se requiere máxima conductividad. Se justifica por su rendimiento eléctrico, pero es inviable económicamente a gran escala	Productos de nicho	2025 - 2030	Uso muy restringido a microcomponentes especializados. No sustituye al cobre fuera de electrónica de alta gama
Fibras o alambres con nanotubos de carbono (CNT)	Evalúan para sustituir cobre en cables extremadamente ligeros para uso aeroespacial, militar o robótica. Alcances actuales son experimentales	Piloto → primeras pruebas comerciales	2028 - 2035	Potencial futuro interesante con cambio tecnológico, pero sin presencia industrial relevante por ahora. Sustitución puntual y de alto costo
Compuestos polímero-carbono/metal	Reemplazan láminas o tramas de cobre en productos donde la flexibilidad, bajo peso y costo importan más que la conductividad (p.ej. textiles electrónicos o etiquetas)	Piloto → primeros usos industriales	2025 - 2030	Uso restringido a electrónica flexible de baja potencia. Sin capacidad de sustituir cobre estructural o de red
Grafito pirolítico u orientado	Sustituye placas de cobre como difusor térmico en algunos dispositivos electrónicos. No reemplaza la función eléctrica del cobre	Industrial extendido	En uso	Reemplazo puramente térmico, funcional pero sin efecto en la demanda de cobre como conductor eléctrico
Superconductores (HTS)	Se emplean en proyectos piloto de cables de alta capacidad con pérdidas mínimas. Requieren refrigeración criogénica y alta inversión	Piloto → primeras pruebas en red	2027 - 2035	Aplicación de nicho urbano o industrial; sin efecto amplio en redes tradicionales
Interconexiones con rutenio o cobalto (Ru/Co)	Sustituyen al cobre en capas atómicas de chips avanzados donde se requiere alta estabilidad electromigratoria	Laboratorio → piloto	2026 - 2032	Sustitución relevante sólo en semiconductores de última generación; sin impacto en el volumen total de demanda de cobre

Fuente: Elaboración propia GEM en base a (Czerwinski, 2024); (Mamatha *et al.*, 2024); (Hu *et al.*, 2025); (Jo *et al.*, 2025)

CONCLUSIÓN

El análisis de GEM muestra que, pese a la creciente diversidad de materiales con propiedades conductoras o térmicas comparables al cobre, las limitaciones técnicas, económicas y de escalabilidad restringen su potencial de sustitución a niveles marginales en el horizonte de 10–15 años.

En el caso del grafeno, si bien presenta una conductividad y resistencia sobresalientes, su costo elevado, baja disponibilidad industrial y largos ciclos de validación impiden su despliegue masivo. Las aplicaciones reales se concentran en nichos de alto valor —como electrónica avanzada, sensores o recubrimientos— donde actúa más como complemento funcional que como sustituto directo del cobre. De acuerdo con el análisis de GEM, su impacto agregado sobre la demanda global difícilmente superaría el 0,5% hacia 2035.

En cuanto a los otros materiales —aluminio y sus compuestos, CCA, superconductores, CNT y aleaciones avanzadas—, su contribución potencial sería algo mayor, pero igualmente acotada. Estos sustitutos responden a condiciones específicas de diseño o de costo, sin capacidad para desplazar al cobre en los grandes sectores de consumo (transporte eléctrico, redes de energía, infraestructura o maquinaria industrial). De acuerdo con el juicio experto de GEM, el efecto combinado de todos los materiales alternativos —incluido el grafeno— se ubicaría dentro del rango de 2–5 % de la demanda mundial de cobre refinado hacia 2035.

En todos los escenarios, el impacto global sobre el mercado del cobre se mantiene limitado, mientras que la expansión de la electrificación —particularmente en vehículos eléctricos, redes de transmisión y energías renovables— seguiría impulsando un crecimiento estructural de la demanda donde el cobre es insustituible por su combinación única de conductividad, fiabilidad y disponibilidad a gran escala.

En síntesis, las oportunidades de sustitución existen, pero operan en los márgenes del sistema. Ni el grafeno ni los materiales alternativos representan, en el mediano ni largo plazo, una amenaza real para la posición del cobre como metal crítico de la transición energética. De hecho, aunque parte de la demanda podría desplazarse hacia sustitutos específicos, estos solo cubrirían una fracción muy reducida del consumo global, insuficiente para compensar la creciente necesidad de cobre asociada a la electrificación, digitalización y expansión de las energías renovables.

Por ello, si en la próxima década no se desarrollan nuevos proyectos de extracción y refinación, es previsible que el precio del cobre aumente, reflejando un mercado más ajustado por el lado de la oferta. En este contexto, el desafío no radica tanto en sustituir el cobre, sino en asegurar una expansión productiva sostenible y estable, que garantice el suministro de un insumo esencial para la transición energética global.



BIBLIOGRAFÍA

Abdulhameed, A., & Halim, M. M. (2023). Electrical and thermal conductivity enrichment by carbon nanotubes: a mini-review, *Emergent mater* 6, 841–852.

Association of Electrical Cable Manufacturers of South Africa (AECMSA). (2022). Technical bulletin TB-26: Conductivity of aluminium and copper electrical conductors. Johannesburg, Sudáfrica: AECMSA. Recuperado de <https://www.aecmsa.co.za/wp-content/uploads/2024/06/TB-26-Final-2022.pdf>.

Barkan, T., Ratwani, C. R., Johnson, D., Thodkar, K., & Hill, C. (2024). Mapping the landscape for graphene commercialization. *Nature Reviews Physics*, 6(11), 646–647.

BHP Group Limited. (2024, 30 de septiembre). BHP Insights: How Copper Will Shape Our Future. Melbourne, Australia: BHP Group Limited. Recuperado de https://www.bhp.com/-/media/project/bhp1ip/bhp-com-en/documents/news/2024/240930_bhpinsights_howcopperwillshapeourfuture.pdf.

Boston Consulting Group (BCG). (2021, 22 de noviembre). The copper era is ending: The shift from copper networks to fiber-optic networks. Recuperado de <https://www.bcg.com/publications/2021/copper-networks-fiber-optic-network-shift>.

Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2025). Informe de tendencias del mercado del cobre: Proyección 2025–2026 (Segundo trimestre de 2025). Santiago, Chile: Cochilco. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/web/informe-de-tendencias-del-mercado-del-cobre-proyeccion-2025-2026-segundo-trimestre-de-2025/>.

Copper Information Center (CIC). (2023). Where is copper used in a smartphone? En Copper Alliance Knowledge Center. Recuperado de <https://help.copper.fyi/hc/en-us/articles/8807773839900-Where-is-copper-used-in-a-smartphone>.

CTC Global Corporation. (2023). Engineering transmission lines with ACCC® conductor. Irvine, California, Estados Unidos: CTC Global Corporation. Recuperado de https://ctcglobal.com/wp-content/uploads/2023/05/Engineering_Transmission_Lines_with_ACCC_Conductor.pdf.

Czerwinski, F. (2024). Aluminum alloys for electrical engineering: a review. *Journal of Materials Science*, 59(32), 14847–14892.

Elkamehr. (2023). Aluminum vs. copper in power lines: Cost-benefit analysis of AAC and ACSR. Recuperado de <https://elkamehr.com/en/aluminum-vs-copper-in-power-lines-cost-benefit-analysis-of-aac-and-acsr/>.

European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). (2025). High-temperature superconducting cables. En ENTSO-E Technopedia. Recuperado de <https://www.entsoe.eu/technopedia/techsheets/high-temperature-superconducting-cables/>.

Fraunhofer ISI. (2024, 1 de febrero). Graphene: How will the global market develop in the next years and which are possible applications? Recuperado de <https://www.isi.fraunhofer.de/en/presse/2024/presseinfo-04-graphen-weltmarkt-anwendungsfelder.html>.

Hamidon, M. N., Farnana, T. D., Hasan, I. H., Sali, A., & Isa, M. M. (2024). Printing of passive RFID tag antennas on flexible substrates for long read distance applications: Materials and techniques. *Journal of science: advanced materials and devices*, 9(4), 100778.

Hu, H., Wang, S., Zhang, Y., Wang, X., Lin, B., Zhang, S., ... & Lian, P. (2025). MXene-Based Electromagnetic Interference Shielding Materials: A Leap From Fundamental Research to Intelligent Customization. *Small*, 2505417.

IDTechEx. (2022, 28 de julio). IDTechEx assess the next commercial phase of the graphene market. Recuperado de <https://www.idtechex.com/en/research-article/idtechex-assess-the-next-commercial-phase-of-the-graphene-market/27297>.

International Copper Association (ICA). (2022). Copper's natural properties limit substitution. ICA. Recuperado de <https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2022/03/Coppers-natural-properties-limit-substitution.pdf>.

International Copper Association (ICA). (2023). Copper environmental profile: Life cycle assessment summary report (Global LCI Summary). Nueva York, Estados Unidos: International Copper Association. Recuperado de <https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2023/05/ICA-LCI-GlobalSummary-202305-F.pdf>.

International Data Corporation (IDC). (2025, 14 de enero). Smartphone shipments increased 6.4% in 2024. ChannelNews. Recuperado de <https://www.channelnews.com.au/smartphone-shipments-increased-6-4-in-2024/>.

Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC). (2023, 23 de mayo). Imec first to demonstrate conductor films on 300 mm wafers with lower resistivity than Cu and Ru. Recuperado de <https://www.imec-int.com/en/press/imec-first-demonstrate-conductor-films-300mm-wafers-lower-resistivity-cu-and-ru>.

Jo, S., Mikhanchan, A., Hong, S., Kim, S., Kim, S. G., Kim, S. M., ... & Hwang, J. Y. (2025). Highly conductive hybrid carbon nanotube fibers: Strategies and future directions for replacing copper with next-generation conductors. *Composites Part B: Engineering*, 112471.

Jovanović, S., Huskić, M., Kepić, D., Yasir, M., & Haddadi, K. (2023). A review on graphene and graphene composites for application in electromagnetic shielding. *Graphene and 2D Materials*, 8(3), 59–80.

Kappagantula, K. S., Smith, J. A., Nittala, A. K., & Kraft, F. F. (2022). Macro copper-graphene composites with enhanced electrical conductivity. *Journal of Alloys and Compounds*, 894, 162477.

Knych, T., Mamala, A., Kwaśniewski, P., Kiesiewicz, G., Smyrak, B., Gnielczyk, M., ... & Sieja-Smaga, E. (2022). New graphene composites for power engineering. *Materials*, 15(3), 715.

Kuo, C. Y., Zhu, J. H., Chiu, Y. P., Ni, I. C., Chen, M. H., Wu, Y. R., & Wu, C. I. (2024). Graphene-all-around cobalt interconnect with a back-end-of-line compatible process. *Nano Letters*, 24(6), 2102–2109.

Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *science*, 321(5887), 385–388.

Liu, W., Han, Y., Zhang, J., Zhang, C., & Ding, Y. (2024). Advancing Copper Wire Technology: Graphene/Cu Composites for Superior Conductivity and Strength. *Applied Sciences* (2076–3417), 14(20).

Machinemfg. (2023). Aluminum, copper and aluminum alloy conductors: A comparison. Recuperado de <https://www.machinemfg.com/aluminum-copper-and-aluminum-alloy-conductors-comparison/>.

Mamatha, G. M., Dixit, P., Krishna, R. H., & Kumar, G. (2024). Polymer based composites for electromagnetic interference (EMI) shielding: The role of magnetic fillers in effective attenuation of microwaves, a review. *Hybrid Advances*, 6, 100200.

Ostermann, M., Schodl, J., Lieberzeit, P. A., Bilotto, P., & Valtiner, M. (2023). Lightning strike protection: current challenges and future possibilities. *Materials*, 16(4), 1743.

Panasonic Corporation. (2025). Pyrolytic Graphite Sheet (PGS) – Thermal Management White Paper. Osaka, Japón: Panasonic Corporation. Recuperado de https://www.digikey.com/-/media/Images/Product%20Highlights/P/Panasonic%20Corporati-on/Thermal%20Management/Panasonic_PGS_White_Paper.pdf.

Pavlou, C., Pastore Carbone, M. G., Manikas, A. C., Trakakis, G., Koral, C., Papari, G., ... & Galiotis, C. (2021). Effective EMI shielding behaviour of thin graphene/PMMA nanolaminates in the THz range. *Nature Communications*, 12(1), 4655.

Pop, E., Varshney, V., & Roy, A. K. (2012). Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications. *MRS bulletin*, 37(12), 1273–1281.

Prysmian Group. (2024). Why use copper as an electrical conductor? Prysmian Group UK. Recuperado de <https://uk.prysmian.com/media/news/why-use-copper-as-an-electrical-conductor>.

Rumbo Minero. (2021, 24 de marzo). Cochilco no ve aparición de sustitutos para el cobre durante esta década. Recuperado de <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/cochilco-no-ve-aparicion-de-sustitutos-para-el-cobre-durante-esta-decada/>.

Shi, X., Zhang, Y., Zhang, H., Zhao, Z., Liu, B., Liu, J., ... & Li, L. (2024). Graphene Enables Aluminum Current Collectors of 5 V Class Battery. *Nano Letters*, 24(40), 12398–12405.

Song, R., Mao, B., Wang, Z., Hui, Y., Zhang, N., Fang, R., ... & He, D. (2023). Comparison of copper and graphene-assembled films in 5G wireless communication and THz electromagnetic-interference shielding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(9), e2209807120.

The Budget Analyst. (2024, 3 de febrero). What factors impact graphene cost? (Updated 2024). Recuperado de <https://thebudgetanalyst.com/2024/02/03/what-factors-impact-graphene-cost-updated-2024/>.

The Royal Swedish Academy of Sciences. (2010, 5 de octubre). The Nobel Prize in Physics 2010 – Press release. NobelPrize.org. Recuperado de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/press-release/>.

Wang, M., Tang, M., Chen, S., Ci, H., Wang, K., Shi, L., ... & Peng, H. (2017). Graphene-armored aluminum foil with enhanced anticorrosion performance as current collectors for lithium-ion battery. *Advanced Materials*, 29(47), 1703882.

Yoon, S. J., Yoon, A., Hwang, W. S., Choi, S. Y., & Cho, B. J. (2015, June). Improved electromigration-resistance of Cu interconnects by graphene-based capping layer. In 2015 Symposium on VLSI technology (VLSI Technology) (pp. T124–T125). IEEE.

Zhou, X., Leng, T., Pan, K., Liu, Y., Zhang, Z., Li, J., ... & Hu, Z. (2024). A sustainable approach towards printed graphene ink for wireless RFID sensing applications. *Carbon*, 218, 118693.

AUTORES



Patricio Faúndez
Gerente de Proyecto
pfaundez@gem-mc.com



María Jesús Ovalle
Ingeniera de Proyecto
mjovalle@gem-mc.com



María Francisca Rebolledo
Ingeniera de Proyecto
mfrebolledo@gem-mc.com

CONTACTO COMERCIAL POR ÁREAS DE PRÁCTICA



Isaac Paredes
Practice Leader Evaluación
iparedes@gem-mc.com



Manuel Cordero
Practice Leader Planificación
mcordero@gem-mc.com



Sebastián Faúndez
Practice Leader Analítica
sfaundez@gem-mc.com

CONTACTO COMERCIAL



Felipe Guzmán
Partner - Chief Financial,
Administration and
Marketing Officer
fguzman@gem-mc.com

Cu



**Chile: Las Condes 12.461,
torre 3, oficinas 805-806,
Las Condes, Santiago**



**Singapur: 9 Straits View, Marina One
West Tower, #05-07,
Singapur**

