



Posibles sustitutos del cobre

DEPP 12/2020

Registro Propiedad Intelectual

© N° 2020-A-10550

Resumen Ejecutivo

El cobre reúne una serie de propiedades de conductividad eléctrica, térmica y ductilidad, entre otras, que le han permitido su uso en varias aplicaciones de índole urbana, industrial y doméstica. Sin embargo, existen materiales que en distinto grado presentan algunas de estas propiedades y que los convierten en posibles sustitutos. Actualmente estos son mayormente el aluminio, el acero inoxidable, el cinc, la fibra óptica y los plásticos. De estos materiales, el aluminio tradicionalmente ha sido el sustituto de mayor uso. A pesar de contar con propiedades técnicas en general inferiores al cobre, su precio ha sido históricamente significativamente menor, lo que ha actuado como un incentivo para la sustitución en el tiempo. Ahora bien, a través de un modelo empírico en un panel de países entre 1975 a 2019, vemos que a partir de un mayor precio relativo del cobre sobre el aluminio no es posible concluir que exista reemplazo de forma continua en el tiempo. Esto parece tener un correlato en la historia reciente. En efecto, durante la última década el precio del cobre ha fluctuado entre tres y cuatro veces el valor del aluminio, sin que esto se haya traducido en un alto nivel de sustitución.

De los otros materiales mencionados, cabe señalar que se ha visto su usabilidad en reemplazo del cobre en aplicaciones específicas, como es el caso de la fibra óptica en las telecomunicaciones, y los plásticos, acero inoxidable y cinc en distintos tipos de tuberías y cañerías. Sin embargo, la sustitución realizada en estas áreas ya ha sido en gran parte aceptada e interiorizada por el mercado, lo que naturalmente acota sus posibilidades de sustitución en el futuro.

Por último, es altamente relevante subrayar que existen otros materiales que aún están en etapas relativamente experimentales de desarrollo o bien con un uso industrial acotado, pero que eventualmente pueden actuar como sustitutos del cobre. En este estadio, destacan el grafeno y los nanotubos de carbono. Si bien ambos tienen propiedades técnicas de conductividad que pueden ser similares o incluso superiores a las del cobre, sus precios son significativamente mayores, razón por la cual su consumo a nivel comercial es actualmente inviable. Sin embargo, en base a actuales y futuras inversiones en investigación y desarrollo, es esperable que sus precios tiendan a la baja, lo que en el largo plazo podría representar una amenaza de sustitución para el cobre, especialmente en artículos electrónicos.

A corto y mediano plazo, sin embargo, no se vislumbra una amenaza significativa de sustitución del cobre por otros productos. Así, en base al avance tecnológico actual y la información recopilada sobre sus posibilidades futuras, esperamos para la siguiente década que en el contexto de una progresiva electrificación urbana e interurbana así como de los medios de transporte, entre otros sectores, el cobre seguirá siendo preferido como el conductor por excelencia a nivel mundial.

Tabla de contenidos

Resumen Ejecutivo	2
I. Introducción	4
II. El cobre: usos, factores y desarrollo de su sustitución	5
1. Usos del cobre	5
2. Factores que afectan la sustitución del cobre	6
a. Aspectos técnicos	6
b. Aspectos monetarios	7
c. Aspectos ambientales	7
3. Evolución reciente de la sustitución del cobre	8
4. Pérdidas y ganancias de sustitución	8
5. Sustitución por región geográfica	9
6. Sustitución por tipo de producto	10
III. Sustitutos del cobre	11
1. Aluminio	12
a. Comparación	12
b. Productos y sectores de sustitución	14
2. Fibra Óptica	16
a. Comparación	16
b. Productos y sectores de sustitución	17
3. Grafeno	17
a. Comparación	17
b. Productos y sectores de sustitución	17
4. Nanotubos de carbono	18
a. Comparación	18
b. Productos y sectores de sustitución	18
5. Plásticos	19
6. Otros	19
IV. El caso del aluminio	21
1. La importancia del precio	21
2. Evaluación de la sustitución a nivel de países	22
a. Modelo	22
b. Resultados	23
V. Expectativas	25
1. Sustitución negativa de cobre	25
2. Sustitución positiva de cobre	25
VI. Comentarios finales	27
VII. Anexo	29
VIII. Referencias	30

I. Introducción

En la discusión económica nacional, es de público conocimiento que el cobre es uno de los pilares de la economía chilena. Desde 2000 a 2019 -sólo considerando Codelco y al GMP-10¹- ha contribuido un 14% de los ingresos fiscales totales. De igual forma, ha representado durante el periodo de forma directa el 10% del PIB y el 50% de las exportaciones nacionales, incluyendo años de precios altos como 2006 y 2007 donde llegó a aportar el 20% del PIB y el 57% de las exportaciones. Más aún, entre 2008 y 2017 se estima que el efecto anual inducido considerando compras intermedias e inversión en capital alcanzó entre 0,28 y 0,62 pesos adicionales por cada peso de PIB directo generado por el sector (Cochilco, 2020).

Ante estos datos, es difícil minimizar la importancia que la minería del cobre tiene sobre la economía del país. Luego, resulta ineludible deducir que cualquier material que pueda reemplazar al cobre de forma total o incluso parcial representa una amenaza directa para el desarrollo futuro del país.

Lo anterior cobra una significancia histórica especial al considerar nuestro propio pasado. Durante el siglo XIX y comienzos del XX, la producción de salitre fue crucial en el desarrollo económico chileno. Sin embargo, a partir del auge del salitre sintético a fines de la Primera Guerra Mundial, las exportaciones y precios de venta comenzaron a decaer progresivamente, lo que, en conjunto con otros factores internos y externos, desembocó en una grave crisis económica y social en los años 20s y 30s del siglo XX.

La lección histórica que arrojó el reemplazo del salitre supone un desafío para la mirada que se tiene de la industria cuprífera nacional y como esta puede verse amenazada por eventuales sustitutos a nivel mundial. Para esto, resulta útil contar por una parte con una mirada histórica de que ha significado la sustitución que ya ha ocurrido en la industria del cobre y al mismo tiempo contar con una mirada atenta hacia el futuro sobre el desarrollo de materiales que podrían sustituir al cobre en áreas determinadas.

Atendiendo a ambos puntos, el presente trabajo se divide de la siguiente forma. Primero, haremos una breve discusión del uso del cobre, el desarrollo reciente de su sustitución y las variables que la guían. Luego, entraremos de lleno a revisar los sustitutos del cobre, incluyendo la comparación de sus propiedades en relación al cobre, los productos y sectores donde existe un mayor riesgo de reemplazo. Posteriormente, revisaremos desde un punto de vista econométrico el reemplazo del aluminio, en su calidad de sustituto de mayor uso, sobre el cobre en las últimas seis décadas. A continuación, discutiremos a nivel conceptual y teórico las expectativas futuras de sustitución para los materiales revisados. Por último, haremos algunos comentarios y reflexiones finales a partir de la información revisada.

¹ Corresponde a las siguientes operaciones privadas: Escondida, Collahuasi, Los Pelambres, Anglo American Sur, El Abra, Candelaria, Mantos Copper, Zaldívar, Cerro Colorado y Quebrada Blanca. Al 2019 representaron junto a Codelco el 79,4% de la producción de cobre nacional.

II. El cobre: usos, factores y desarrollo de su sustitución

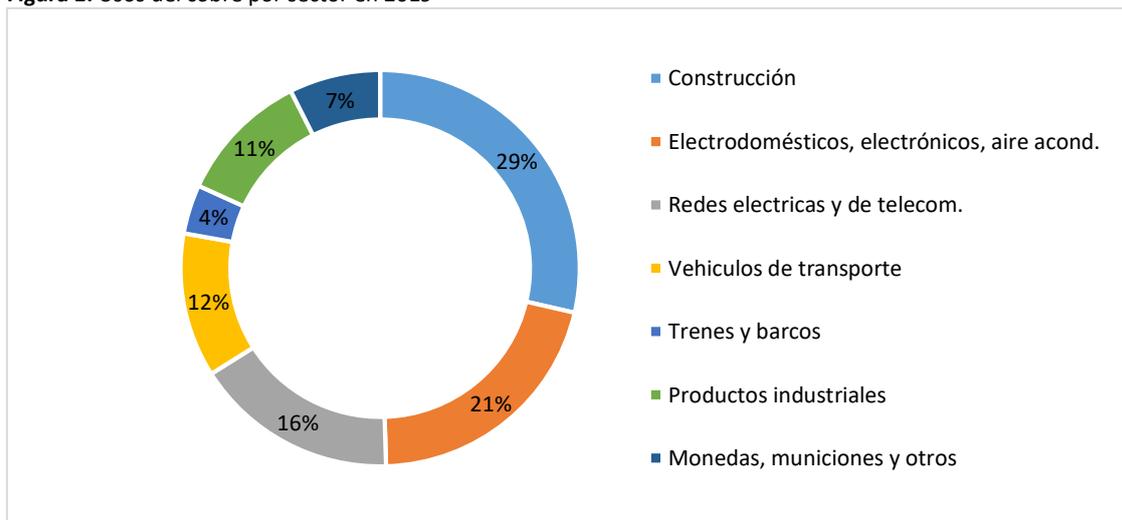
1. Usos del cobre

A nivel mundial el cobre es prácticamente reconocido como el conductor por antonomasia. En efecto, sus reconocidas propiedades de conductividad eléctrica y térmica, junto a su ductilidad, durabilidad y estabilidad química permiten que sea ampliamente usado en todo tipo de aplicaciones eléctricas. En paralelo, el hecho de que sus reservas están largamente distribuidas a nivel mundial, facilita su extracción y usabilidad a costos relativamente favorables frente a otras posibles alternativas.

Como resultado, el metal de cobre es empleado como el conductor por excelencia en un mundo que desde la segunda mitad del siglo XX ha avanzado vertiginosamente en una progresiva electrificación de ciudades completas, aplicaciones industriales y de uso personal y, especialmente con mayor fuerza en los últimos años, medios de transporte en general. En efecto, la necesidades de un mundo progresivamente tecnologizado e interconectado han sostenido e impulsado la demanda de cobre.

A nivel sectorial, como se observa en la figura 1 a continuación, el cobre es preponderantemente empleado en construcción (29%), seguido de la producción de electrodomésticos, electrónicos y sistemas de aire acondicionado (21%), redes eléctricas y de telecomunicaciones (16%), vehículos, trenes y barcos (16% en total), productos industriales (11%) y finalmente monedas, municiones y otros productos (7%).

Figura 1: Usos del cobre por sector en 2019



Fuente: GIEC (2020).

Es relevante tener en consideración esta categorización sectorial, en tanto que no sólo nos otorga una visión general de los sectores de mayor relevancia de la industria, sino que además nos entrega luces sobre aquellos sectores que resultarían particularmente sensibles ante la entrada comercial de algún posible sustituto.

2. Factores que afectan la sustitución del cobre

Se pueden distinguir tres categorías que afectan la sustitución de cobre: Primero, las propiedades técnicas del sustituto del cobre a emplear para una aplicación determinada (por ejemplo, su nivel conductividad térmica y eléctrica). Segundo, factores monetarios, donde incluimos en primer lugar el costo de adquisición (esencialmente el precio) y luego los costos de instalación, mantenimiento y reparación del sustituto. Finalmente, existe una tercera categoría de naturaleza más bien ambiental y eventualmente regulatoria que se expresa en dos principios: la búsqueda de una mayor eficiencia energética y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La tabla 1 a continuación lista los principales contenidos de cada categoría.

Tabla 1: Principales aspectos que afectan la sustitución de cobre

Técnicos	Monetarios	Ambientales
Conductividad eléctrica Conductividad térmica Peso (densidad) Estabilidad ante cambios de temperatura Ductilidad Durabilidad y resistencia a golpes	Precio relativo y volatilidad Costo de instalación Costo de mantenimiento Costo de reparación	Estándares de eficiencia energética Límites a las emisiones

Fuente: Cochilco.

a. Aspectos técnicos

En la mayoría de los aspectos técnicos el cobre lidera con cierto margen frente a otros materiales, lo que hace que sus posibilidades de sustitución sean más bien limitadas a menos que se busque sacrificar desempeño o eficiencia de uso. En este sentido, aun cuando algunos fabricantes puedan considerar que es conveniente sustituir el cobre, pueden estar presionados por las empresas a los que venden sus productos o bien por los consumidores finales para no efectuar el reemplazo.

De igual forma, las mayores propiedades de conductividad junto a su ductilidad permiten que en general pueda adaptarse a la tendencia global por dispositivos y aplicaciones electrónicas de menor tamaño. Si bien esto inevitablemente, supone una *pérdida por miniaturización* ante un menor uso de cobre (ICA, 2019), le concede al metal una importante capacidad adaptativa frente al desarrollo tecnológico.

Ahora bien, un aspecto técnico donde el cobre típicamente presenta desventajas frente a la mayoría de sus sustitutos es en que tiende a contar con un mayor peso para igual volumen, condición que puede ser particularmente perjudicial en industrias donde mayores pesos suponen pérdidas de eficiencia o mayores costos de transporte, como es el caso de la aeronáutica o la industria automotriz. En este sentido la tabla 2 a continuación muestra la máxima disposición a pagar a partir de la reducción de una libra en el peso del equipo por industria considerada según estimaciones de Harvey (2016). Si bien son aproximaciones altamente preliminares, ayudan a ilustrar el costo que supone el peso en algunas industrias.

Tabla 2: Máxima disposición aproximada a pagar por una libra menos en el peso del equipo

Industria	Máxima disposición aproximada a pagar (USD)
Fabricantes de satélites de gran escala	10.000
Fabricantes de satélites de media escala	5.000
Aviación comercial	300-3.000
Industria automotriz	<3

Fuente: Harvey (2016).

b. Aspectos monetarios

Por otra parte, en los aspectos de índole monetaria, el costo de adquisición dado por el precio juega un papel relevante que puede disuadir el uso del cobre a partir de dos variables. Primero, a medida que el cobre se hace más costoso en relación a posibles sustitutos, se generan mayores incentivos para su reemplazo. En segundo lugar, como advierte ICA (2020), mientras más volátil sea el precio del cobre, aumenta la incertidumbre sobre su proyección, lo que a su vez dificulta las proyecciones de costos de los fabricantes de productos de cobre. El solo hecho de que exista una alta incertidumbre puede incentivarlos a preferir sustitutos con precios menos variables, que permitan una mayor estabilidad en las proyecciones financieras de las compañías.

En paralelo al precio y su volatilidad, dentro de la categoría de factores monetarios existen una serie de costos asociados a la vida útil del producto que también pueden jugar un papel importante en la sustitución dependiendo de la industria y del usuario final del producto. Éstos son el costo de instalación, mantención y reparación (en caso de que sea factible). En la mayoría de los casos, el cobre presenta ventajas en tanto generalmente no requiere mantención ni reparación y su instalación es relativamente directa.

Típicamente la interacción de las categorías técnicas y monetarias -que a grueso modo se pueden contraponer como desempeño versus costo- incide en las decisiones de sustitución. Lan (2011) concluye que la sustitución de cobre ocurre mayormente en productos de bajo margen o bien productos de baja calidad, donde el desempeño no se valora con el mismo grado de importancia que la búsqueda por reducir los costos.

c. Aspectos ambientales

Finalmente, en los últimos años se ha hecho crecientemente importante una tercera categoría de una índole eminentemente ambiental que se expresa en dos principios: la búsqueda de una mayor eficiencia energética y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos factores tienden a favorecer al cobre en el campo de generación, distribución y transmisión eléctrica donde los sustitutos actualmente empleados presentan desventajas.

En una matriz energética alimentada por combustibles fósiles, mientras menor sea la conductividad eléctrica, mayor deberá ser la capacidad de generación y combustible usado (Reuters, 2011). Luego, al reemplazar el cobre por un sustituto de menor costo y conducción (como es el caso del aluminio), los ahorros en sustitución son mitigados por mayores costos ambientales y en consumo de combustibles. Como resultado, la aspiración por contar con un sistema energético menos contaminante y eficiente tiende a otorgar al cobre un mayor atractivo frente a sus sustitutos en aplicaciones eléctricas (Reuters, 2011 & ICA, 2019).

3. Evolución reciente de la sustitución del cobre

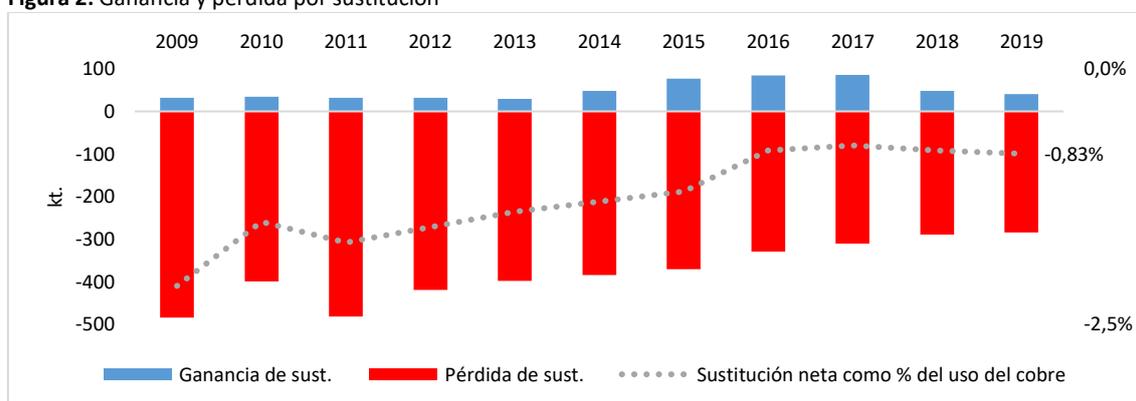
Durante la última década la sustitución del cobre por otros materiales se ha dado con una intensidad relativamente baja pero continua. Si bien no ha habido grandes innovaciones que permitan trabajar con otros materiales en reemplazo del cobre de forma rentable, constantemente hay esfuerzos en investigación y desarrollo que buscan su sustitución en campos determinados, típicamente en aplicaciones específicas.

Como contraparte, también existen áreas en los que el cobre ha ganado terreno. Es decir, espacios donde el cobre actúa como sustituto de otros materiales. Si bien el impacto de esta sustitución positiva es relativamente bajo sobre la demanda agregada del metal, igualmente es un factor a considerar al hablar de sustitución de cobre.

4. Pérdidas y ganancias de sustitución

En un esfuerzo por medir ambos impactos, la International Copper Association (ICA) comisiona anualmente la realización de encuestas y entrevistas a más de 100 asociaciones industriales y fabricantes de productos de cobre para consultarles por su uso y sustitución del metal. En la figura 2 se muestran los resultados de este trabajo, ilustrando las ganancias y pérdidas de sustitución del cobre², así como la sustitución neta (es decir, pérdidas menos ganancias de sustitución), entre los años 2009 y 2019. Como se observa, la pérdida ha tendido progresivamente a la baja desde 2011 en adelante, pasando de 482 kt. (1,64% del uso de cobre) a cerca de 284 kt. (0,97%) durante el periodo. Las ganancias por otra parte han fluctuado entre las 86 y 32 kt., alcanzando cerca de 40 kt. (0,14%) en 2019.

Figura 2: Ganancia y pérdida por sustitución



Fuente: ICA (2020).

² Cabe señalar que en este trabajo nos enfocamos en la sustitución de cobre ya refinado por otros materiales. Esto excluye la sustitución por chatarra de cobre, sea de uso directo por los fabricantes en el proceso de producción o bien aquella que provenga de productos de cobre ya usados. Tampoco nos enfocaremos la posible reducción en el uso de cobre por mejoras tecnológicas, ya sea por miniaturización de los productos, por el eventual auge del uso de cables de corriente directa en lugar de corriente alterna u otras causas.

Con todo, si bien hace una década atrás la pérdida neta por sustitución alcanzó niveles cercanos al 2% del uso anual del cobre, desde el 2011 ha tendido progresivamente a la baja y ya en los últimos cuatro años se ha mantenido relativamente estable, alcanzando un 0,83% durante 2019.

En general la tendencia a la baja en la sustitución se puede explicar por tres factores (ICA, 2020):

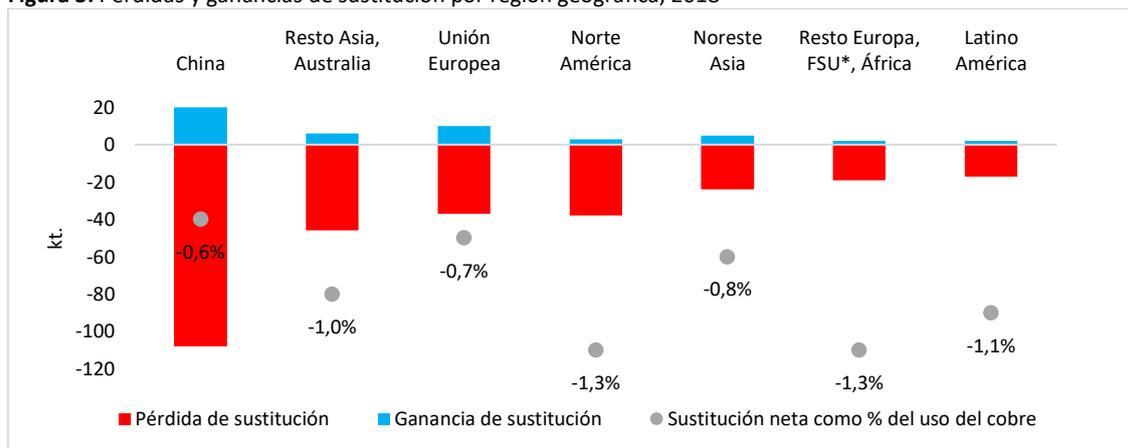
- No se han encontrado sustitutos suficientemente buenos en la transmisión de calor.
- Distintas aplicaciones de uso eléctrico, incluyendo motores eléctricos, están intensificando su uso de cobre y aleaciones de cobre para mejorar su desempeño.
- La búsqueda por una mayor eficiencia energética (ya sea por consideraciones regulatorias y/o criterios industriales) hace desventajoso sustituir al cobre por otros materiales con mayores pérdidas de conductividad eléctrica (como por ejemplo, el aluminio).

Así, la mayor parte de los usos del cobre siguen teniendo una exposición más bien limitada a la sustitución en tanto mantienen la mejor combinación desempeño-costos, especialmente cuando se requiere conductividad eléctrica, térmica y resistencia a la corrosión, precisamente las propiedades por las cuales es mayormente usado.

5. Sustitución por región geográfica

Si bien la tasa de sustitución en relación al uso alcanzó un 0,83%, ésta no se distribuye uniformemente entre los países. Atendiendo a esta distinción, en la figura 3 a continuación vemos la sustitución positiva, negativa y neta del cobre entre distintas regiones a nivel mundial.

Figura 3: Pérdidas y ganancias de sustitución por región geográfica, 2018



*FSU: Rusia y estados post-soviéticos.

Fuente: ICA (2019).

De la figura vemos que China es el país con el mayor uso de cobre a nivel mundial, de manera que no extraña que también tenga los mayores niveles absolutos de sustitución con 108 kt de pérdida y 20 kt de ganancia en 2018, dando así una sustitución neta de 88 kt, lo que equivale a 36% de la sustitución neta de cobre a nivel mundial en dicho año. Sin embargo, en términos

relativos a su uso de cobre, su proporción fue de apenas un 0,6%, lo que está por debajo del promedio mundial y de cualquiera de las otras regiones consideradas³.

Europa, el noreste de Asia y Norte América, regiones que concentran a países desarrollados, constantemente han realizado esfuerzos de sustitución a partir de la presión competitiva por disminuir los costos en sus productos. Sin embargo, como mencionamos previamente, para la mayoría de las aplicaciones no se han encontrado sustitutos que permitan un desempeño suficientemente aceptable.

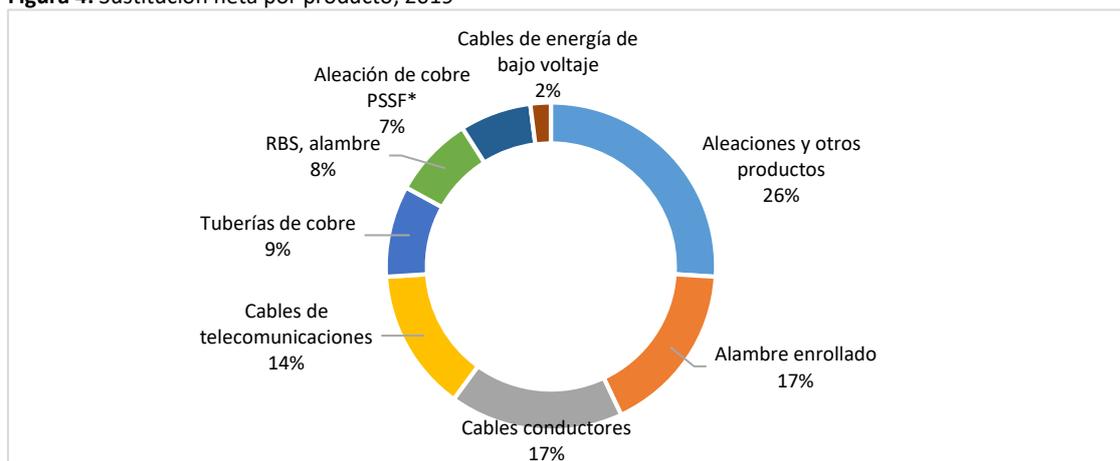
Australia y otros países de Asia fuera de las regiones ya mencionadas por su parte han experimentado un rápido crecimiento por lo cual la sustitución de cobre no ha sido una prioridad, principalmente considerando la fuerte demanda de cobre en generación, distribución y transmisión energética especialmente ante el rápido crecimiento de la India.

6. Sustitución por tipo de producto

El cobre suele comercializarse bajo la forma de productos semi-manufacturados que van desde distintos tipos de alambres, láminas, barras, tuberías hasta aleaciones de cobre con otros productos. Es precisamente en este nivel de producción donde el cobre tiende a competir con sus posibles sustitutos.

En este estadio, los productos que explican la sustitución neta de cobre, vemos en la figura 4 a continuación que estuvo principalmente impulsada por aleaciones, alambre enrollado y cables conductores, con cerca de un 60% del total del cobre sustituido en 2019.

Figura 4: Sustitución neta por producto, 2019



*PSSF: Plate, Sheet, Strip & Foil (planchas, láminas, tiras y hojas de cobre).

Fuente: ICA (2020).

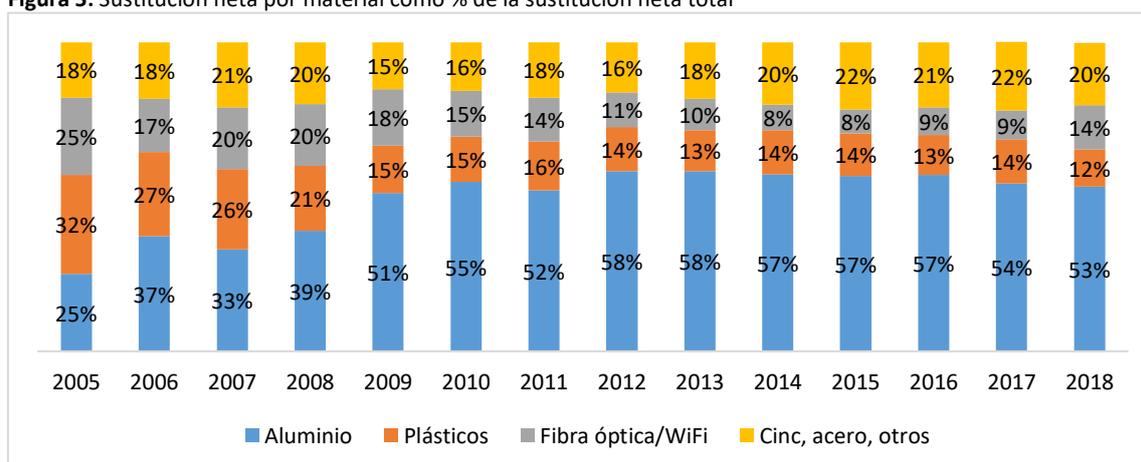
³ El hecho de esta baja sustitución relativa en China resulta llamativo a la luz de algunas proyecciones realizadas. Lan (2011) en particular estimó que la sustitución del cobre era más factible en China atendiendo a que una gran parte del consumo interno se componía de bienes de baja calidad ante lo cual la sustitución resultaba más factible y también debido a que China tenía criterios y regulaciones sobre el uso de materiales menos estrictos que otros. Sin embargo, vemos que a medida que China ha crecido en su desarrollo industrial, ha desarrollado bienes de mayor calidad y con estándares más delimitados sobre el uso de insumos, lo que posiblemente ha inducido en que la sustitución como proporción del uso no sea particularmente alta en China en comparación a otros países del mundo.

III. Sustitutos del cobre

Como sabemos, el cobre combina una serie de propiedades de conductividad eléctrica, conductividad térmica y ductilidad, entre otras, que le han permitido su uso en varias aplicaciones de índole urbana, industrial y doméstica. Sin embargo, existen materiales que en distinto grado presentan algunas de estas propiedades y que los convierten en posibles sustitutos. Actualmente estos son principalmente el aluminio, el acero inoxidable y el cinc, la fibra óptica y los plásticos.

La figura 5, a continuación, ilustra la participación de estos materiales en la evolución de la sustitución neta total entre 2005 y 2018. Como vemos, el aluminio es por lejos el sustituto de mayor uso con más de la mitad del total en cada año desde el 2009 en adelante.

Figura 5: Sustitución neta por material como % de la sustitución neta total



Fuente: ICA (2019).

Ahora bien, como discutimos en el capítulo anterior, la efectividad de la sustitución depende de las propiedades de cada material y cómo éstas pueden funcionar como reemplazos relativamente aceptables en áreas determinadas. En paralelo, desde un punto de vista económico, también resulta fundamental su costo de adquisición (es decir, su precio). Así, menores o mayores precios pueden incentivar o reducir la sustitución dependiendo del producto a ocupar y área de ocupación.

Atendiendo a este punto, la tabla 3 compara estos materiales en relación al cobre en dos aspectos: las principales propiedades en que compiten con el cobre y su costo de adquisición en relación al cobre. Finalmente, en la última columna se presentan los campos con mayor riesgo de sustitución a partir del reemplazo ya existente como de sus posibilidades futuras.

Tabla 3: El cobre en relación a sus sustitutos

Material	Principales propiedades donde compite con el cobre	Precio v. el cobre	Campos con mayor riesgo de sustitución
Aluminio	Conductividad eléctrica y térmica	Menor	Cableado eléctrico, electrónicos, medios de transporte, aire acondicionado, radiadores
Fibra Óptica	Transmisión de información	Mayor	Telecomunicaciones
Nanotubos de carbono	Conductividad eléctrica y térmica	Mayor	Electrónicos, medios de transporte, chips de circuito integrado
Grafeno	Conductividad eléctrica y térmica	Mayor	Chips de circuito integrado, telecomunicaciones
Plásticos	Ductilidad	Menor	Tuberías
Otros (Acero inoxidable, cinc, etc.)	Estabilidad química	Menor	Tuberías, válvulas, alcantarillas

Fuente: Cochilco en base a distintas fuentes de mercado.

Para el aluminio, los plásticos y otros materiales como el acero inoxidable y el cinc en general presentan un desempeño inferior al cobre. Sin embargo, los precios de estos sustitutos propenden a la baja. Por el contrario, la fibra óptica, los nanotubos de carbono y el grafeno tienden a tener un mejor desempeño en algunas aplicaciones pero a un mayor costo. De este modo, los fabricantes muchas veces suelen enfrentar un *trade-off* entre desempeño y costo al momento de evaluar la sustitución de cobre.

Por último, cabe señalar por cierto que el cobre tiene una densidad mayor a todas las alternativas mencionadas, lo que tiende a suponer un mayor peso, condición que puede ser desventajosa en algunos sectores como la aeronáutica o la industria automotriz, donde –como vimos en el capítulo 1- un mayor peso implica mayores costos de uso y menor autonomía.

A continuación, entraremos en mayor detalle en la comparación de cada uno de estos materiales, considerando además los productos y sectores en que ya han inducido sustitución o bien que presentan un alto riesgo de sustitución en el futuro.

1. Aluminio

a. Comparación

De entre los sustitutos del cobre, el aluminio es sin duda el más conocido dado su grado de reemplazo ya alcanzado en la práctica, como vimos en la figura 5. Desde un punto de vista técnico, el aluminio presenta una conductividad eléctrica y térmica menor al cobre, pero potencialmente aceptable dependiendo de la aplicación a usarse. En menor grado, también puede presentar condiciones relativamente aceptables de ductilidad y estabilidad ante cambios de temperatura, entre otras características que resumimos en la tabla 4 a continuación.

Tabla 4: Propiedades técnicas aproximadas⁴ y factores monetarios del cobre en relación al aluminio

Material	Cobre en relación al aluminio
Propiedades técnicas	
Conductividad eléctrica	~1,6 veces mayor
Conductividad térmica	~2 veces mayor
Estabilidad ante cambios de temperatura	~1,4 veces más estable
Ductilidad	Mayor
Tensión de rotura	~2,5 veces mayor
Peso (para igual volumen)	~3 veces mayor
Factores económicos	
Costo mantención	Menor
Costo reparación en caso de corrosión	Mayor
Precio anual (2010-2019)	~3-4 veces mayor
Desviación estándar mensual en el precio (2010-2019)	~4-5 veces mayor

Fuente: Cochilco en base a Lan (2011), Ced Greentech y otras fuentes de mercado.

El hecho de que la conductividad térmica y eléctrica del aluminio sea menor, normalmente implica usar una mayor cantidad para lograr niveles aceptables de conductividad, lo cual puede ser una dificultad en espacios pequeños. Por otra parte, el hecho de que su estabilidad ante cambios de temperatura y tensión de rotura también sea inferior supone un mayor riesgo de incendios si no se toman las precauciones de instalaciones y mantención necesarias.

Existen otros factores que hacen del cobre preferible al aluminio. En particular, tiende a ser un material de mayor durabilidad y resistencia y su costo de mantención y reparación en caso de corrosión es menor (el aluminio normalmente tiene que ser reemplazado en caso de corrosión mientras que el cobre puede desarrollar superficies de oxidación pero que no afectan la matriz del metal), lo que hace que en general la vida útil del cobre sea mayor.

Con todo, si bien el aluminio presenta un desempeño significativamente inferior al cobre, hay dos factores particularmente relevantes en los que el aluminio lleva la delantera. Por una parte, tiene un menor peso para igual volumen, lo que resulta especialmente útil en la industria aeronáutica y la automotriz donde los fabricantes buscan formas de reducir el consumo energético y así aumentar la autonomía⁵. Por otra parte, y este es típicamente el factor determinante que incentiva sustitución, es que su precio históricamente ha tendido a ser significativamente inferior.

En definitiva, vemos que en todas las propiedades técnicas -con la única excepción del peso- el cobre es preferible al aluminio. Sin embargo, en las variables de índole monetaria, destaca el diferencial de precios, con un precio anual del cobre entre 3 y 4 veces mayor al del aluminio durante la última década, lo que fundamentalmente es la variable que conduce los incentivos por sustitución (EY, 2013). Igualmente, vemos que la variabilidad en el precio del cobre es sustantivamente superior a la del aluminio con una desviación estándar mensual 4,71 veces mayor durante el periodo 2010-19, lo que podría también dar una preferencia al uso de aluminio sobre el cobre.

⁴ Estas dependen de condiciones de temperatura y ambiente de uso que se detallan en el Anexo.

⁵ Ahora bien, esta ventaja de un menor peso se ve parcialmente contrarrestada por la necesidad de emplear mayores cantidades dado que la conductividad es menor.

b. Productos y sectores de sustitución

Dadas sus propiedades de conductividad, el aluminio tiende a ser usado en reemplazo del cobre en la fabricación de cables eléctricos. En efecto, prácticamente la totalidad del cableado eléctrico que no usa cobre se elabora en base a aluminio.

Por otra parte, también existen combinaciones de aluminio y cobre, destacando los cables de aluminio recubiertos en cobre (*Copper Clad Aluminum, CCA*), los cuales proveen una alternativa viable en algunas aplicaciones manteniendo en un grado significativo las ventajas de los cables de cobre puro pero a un menor precio. Las proporciones de uso de aluminio en relación al uso de cobre en estos cables dependen naturalmente del grado de sustitución técnica requerida para el uso final del cable.

Estos cables han sustituido en varios grados al cobre en varios sectores, incluyendo la industria automotriz, sistemas de aire acondicionado, refrigeración y calefacción, la industria aeronáutica y edificaciones residenciales. A continuación haremos una somera descripción del impacto en cada una.

- **Industria automotriz**

Como vimos en la figura 1, la industria automotriz representa en torno al 12% del uso de cobre a nivel mundial. Esto se distribuye en una alta gama de aplicaciones, que van desde los motores hasta el cableado para su conducción eléctrica, entre otros aspectos.

En los 60s y 70s, principalmente con el fin de reducir el costo y peso de los vehículos, el cobre perdió terreno frente al aluminio en la fabricación de radiadores y en tuberías de precisión (EY, 2013), así como en sistemas de refrigeración y de aire acondicionado (Aluminium Insider, 2016). Si bien estas sustituciones ya son conocidas y en su mayor parte ya realizadas, los fabricantes de la industria automotriz constantemente buscan nuevas formas de sustitución. Durante la última década, por ejemplo, la Universidad Técnica de Múnich en colaboración con BMW buscó formas de reemplazar el cobre por aluminio en sus vehículos (UTM, 2011).

En paralelo, la japonesa Furukawa Automotive Systems, ha desarrollado sistemas de cableado de aluminio libres de corrosión, los cuales ya ha vendido a Honda para su uso en vehículos ligeros. En esta línea, otras empresas automotoras como Toyota y Leoni han realizado innovaciones similares (Reuters, 2016). Ahora bien, a pesar de estas innovaciones, es improbable que produzcan sustituciones en una escala masiva. En efecto, esperamos que el uso de cobre en los sistemas de cableado automotriz -que representan un consumo superior al millón de toneladas de cobre- mantenga su preponderancia por sobre el aluminio dadas sus mejores propiedades conductivas.

Ahora bien, considerando un precio del cobre de USD 3,5 la libra, si un vehículo eléctrico a batería usa en promedio unos 83 kg de cobre frente a unos 23 kg en vehículos de combustión interna (ICA, 2017), se traduce en un costo medio en consumo de cobre por auto eléctrico de USD 640 (en lugar de USD 177). Esto equivale a entre 2,6% y 4,3% del costo total de fabricación para vehículos cuyo costo está entre los USD 15.000 y USD 25.000 por unidad. En este punto, la pregunta que cabe hacerse es hasta qué punto los fabricantes van a tolerar un mayor precio del cobre antes de buscar sustituirlo por un material menos costoso como el aluminio.

- **Aire acondicionado, refrigeración y calefacción**

El cobre es un producto altamente usado en sistemas de aire acondicionado, refrigeración y calefacción. De acuerdo a estimaciones de ICA (2017), sólo los sistemas de aire acondicionados de uso residencial consumen más de un millón de toneladas de cobre refinado al año, lo que supone más de un 3,5% del uso agregado de cobre. A esto, le siguen unas 430 mil toneladas en sistemas de refrigeración comercial e industrial y los sistemas de enfriamiento y refrigeración variable suman otras 470 mil toneladas. Es decir, en suma estamos hablando de una proporción cercana al 7% del uso total de cobre.

Ahora bien, en esta industria el uso de aluminio en las bobinas de los sistemas de aire acondicionado y refrigeración ya es conocido y usado en distintos productos comerciales. Sin embargo, el hecho de que el aluminio posea una menor conductividad térmica, sumado a la necesidad de reemplazo en caso de corrosión, hace que el cobre siga siendo el material de preferencia, especialmente en fabricantes con mayor foco en el desempeño que en los costos.

- **Sistemas de generación eléctrica, incluyendo líneas de transmisión y distribución local**

Como vimos en la figura 1, el cobre en redes eléctricas y de telecomunicaciones equivale al 16% del uso de cobre a nivel mundial, representando un eje altamente significativo de la demanda del metal. Si bien el aluminio se ha usado en sistemas de transmisión y distribución de electricidad desde comienzos del siglo XX, en general se ha tendido a preferir el uso del cobre dado su menor costo de mantención y mayor seguridad en el suministro.

Ahora bien, la amenaza de sustitución es constante frente a innovaciones que permiten su uso de una forma relativamente estable y segura. En 2015 la compañía eléctrica japonesa Kansai Denryoku Kabushiki-gaisha inició el recambio de su red de distribución de Osaka, buscando reemplazar unos 140 mil km. de cableado de cobre por aluminio. De igual forma, en 2016 la Compañía de Electricidad de Arabia Saudita, SEC, estimó un ahorro de US\$ 640 millones solo por sustituir aluminio por cobre en su red de distribución eléctrica de media tensión (Reuters, 2016). En este contexto, Anixter (2018) y Daware (2018) sostienen que algunas empresas prefieren el aluminio por sobre el cobre en las redes de transmisión eléctrica.

Cabe señalar que el soterramiento de los cables de conducción eléctrica, tendencia predominante en las zonas urbanas de los países desarrollados, tiende a mitigar una desventaja específica del cobre frente al aluminio, que es su mayor peso. Así, como señala la EIA, el cobre es preferentemente usado en cableado subterráneo donde el peso no es un inconveniente y las condiciones técnicas superiores del cobre (e.g. resistencia a la corrosión, tensión de rotura) son requeridas.

Ahora bien, de acuerdo a estimaciones del organismo de acreditación internacional DNV-GL, el aluminio puede involucrar una menor inversión inicial pero, al considerar el ciclo de vida durante 50 años, la ventaja económica tiende a desaparecer. Sin embargo, de acuerdo a encuestas a varias empresas de servicios públicos realizadas por la propia DNV-GL (2015), los ejecutivos no parecen ser lo suficientemente conscientes de la superioridad técnica del cobre a lo largo del tiempo y tienden a asignar una alta importancia a los costos inmediatos de la inversión en capital

(CAPEX). De tal modo, concluye el reporte, la eventual preferencia por aluminio basado en menores costos iniciales se explicaría por un pensamiento de corto plazo.

En este contexto, si bien ha ocurrido reemplazo del aluminio por cobre en redes de transmisión urbanas, esto dista de ser una realidad masiva para todo el sector en tanto vemos que en la práctica las compañías eléctricas siguen favoreciendo el uso de cobre. Ahora bien, considerando que según estimaciones de la Administración de Información de Energía (EIA por sus siglas en inglés) de EE.UU. de que a un precio del cobre de USD/lb 3,5 el cobre representa en torno al 14% de los costos totales de inversión en red eléctrica frente a un 6% del aluminio, es razonable pensar que ante alzas significativas y sostenidas en el precio del metal podrían incentivar mayores esfuerzos en la sustitución.

- **Industria aeronáutica**

Probablemente en la aeronáutica la ventaja comparativa de un menor peso para igual volumen se hace más importante que en cualquier otro sector. Sin embargo, precisamente dada esta relevancia es que la industria ya ha realizado una gran parte de la sustitución posible, lo que deja un espacio limitado para que exista un alto nivel de reemplazo futuro.

- **Edificaciones residenciales**

El uso de aluminio para la conexión eléctrica en hogares tuvo su impulso inicial en los 60s y 70s –especialmente en EEUU- a partir de los altos precios del cobre. Sin embargo, debido a la ocurrencia de cortocircuitos y accidentes, esta tendencia no perduró hasta que se comenzaron a desarrollar cables de aluminio relativamente más seguros y con mayores precauciones de instalación. Con todo, dadas las propiedades de mayor material requerido, menor conductividad y los mayores costos de mantención, la mayoría de las edificaciones residenciales se sigue desarrollando con cableado de cobre.

2. Fibra Óptica

a. Comparación

En lo que respecta a transferencia de datos, la fibra óptica posee varios beneficios sobre el cobre incluyendo una mayor velocidad de transmisión, un mayor bando de ancha (lo que se traduce en una mayor tasa de transmisión de información) y una mayor distancia de transmisión con menor pérdida gradual de intensidad de flujo. Además, resulta inmune a la interferencia electromagnética.

Sin embargo, la fibra óptica no posee las propiedades de conductividad térmica y eléctrica del cobre, de manera que no puede competir con el metal en áreas que requieren de estas características. Esto también naturalmente la excluye de las aplicaciones PoE (*Power over Ethernet*) que proveen transmisión eléctrica y de información al mismo tiempo.

Con todo, dentro del campo de las telecomunicaciones donde sí compite con el cobre, cabe señalar que su precio es mayor, lo que tiende a disuadir su uso de un modo generalizado. Al mismo tiempo, la tensión de rotura de la fibra óptica es menos de la mitad de la del cobre, lo que la hace más frágil. Esto tiende a implicar un mayor cuidado y costo de instalación.

b. Productos y sectores de sustitución

La fibra óptica suele tomar la forma de cables a partir de fibras de sílice o plástico que transmiten luz. Esto permite que la información viaje mediante reflejos ópticos en lugar de señales eléctricas, como ocurre en el caso de los cables de cobre.

Dadas sus propiedades de transferencia de grandes cantidades de información a una alta velocidad, su sector por excelencia son las telecomunicaciones en centros de datos, conexiones entre edificios comerciales o incluso países, y sistemas comunicacionales industriales.

Sin embargo, existen varias aplicaciones dentro del campo de telecomunicaciones donde las propiedades más beneficiosas de la fibra óptica no se hacen particularmente necesarias en relación al uso de cableado de cobre. Por ejemplo, en redes operativas de tamaño mediano o pequeño o en la conexión de computadores personales.

3. Grafeno

a. Comparación

A medida que la tecnología avanza, los chips de circuito integrado en la industria de semiconductores tienden hacia tamaños cada vez menores, lo que plantea desafíos para el uso del cobre. En efecto, cuando las interconexiones requeridas deben ser de menor tamaño, el cobre se hace menos eficiente como conductor, disipa más calor y requiere un mayor consumo energético⁶.

Para sobrellevar estos inconvenientes, la industria está invirtiendo en la búsqueda de nuevos candidatos en reemplazo del cobre tradicional. Una alternativa es el grafeno, material que a temperatura ambiente presenta una conductividad eléctrica 68% superior al cobre, una conductividad térmica 10 veces mayor, una tensión de rotura más de 1.000 veces mayor y una densidad unas cuatro veces menor, lo cual lo hace más liviano (Corfo, 2015).

b. Productos y sectores de sustitución

Actualmente el grafeno no tiene un uso comercial significativo pero eventualmente, a través de nano cintas extremadamente delgadas, podría reemplazar las interconexiones energéticas en la mayoría de los electrónicos (EY, 2013). En este punto, si bien el cobre es usado en los chips de circuito integrado, en general no representa una parte importante de su consumo agregado, de manera tal que su eventual reemplazo no implicaría un golpe significativo al mercado. Sí existe

⁶ Curiosamente, estas consideraciones llevaron a que el cobre reemplazara al aluminio en los microprocesadores de IBM a partir de 1998, tendencia que con relativa rapidez fue seguida por toda la industria (IBM, 2017).

la posibilidad de que el grafeno pueda ser usado en otras aplicaciones en reemplazo del cobre, incluyendo en el campo de telecomunicaciones donde podría competir incluso con la fibra óptica. Sin embargo, en general estas alternativas aún no han sido altamente exploradas.

Con todo, resulta más probable que el grafeno se use en conjunción con el cobre en varias aplicaciones en lugar de reemplazarlo complemente⁷, especialmente considerando que aún existe una alta incertidumbre respecto de su oferta, tecnología de producción, costos y seguridad de uso (EY, 2013).

De todos estos factores, el precio del grafeno es un factor altamente disuasivo al momento de evaluar su reemplazo en aplicaciones de cobre. Actualmente, la producción tiene un costo estimado de USD 100 por gramo (RMIT University, 2019). Es decir, unas 100 veces más que el precio de la plata (metal con conductividad superior al cobre pero normalmente no usado dado su alto precio) y unas 15 mil veces el precio actual del cobre. En los últimos años ha habido esfuerzos de RMIT University (2019) por reducir su costo a 50 centavos por gramo, lo cual continuaría siendo extremadamente alto en relación al cobre. Si bien es altamente probable que estas reducciones continúen conforme avanza la tecnología, que el grafeno se convierta en un sustituto comercialmente competitivo del cobre sería una proyección aventurada en función de la información actual.

4. Nanotubos de carbono

a. Comparación

En una línea similar al grafeno, se encuentran los nanotubos de carbono. Además de pesar cerca de la décima parte en relación al cobre, cuentan con propiedades potencialmente superiores. En la nano-escala, algunos nanotubos tienen cinco veces la conductividad eléctrica del cobre y 15 veces su conductividad termal (Harvey, 2016). Al mismo tiempo, son resistentes a la corrosión.

b. Productos y sectores de sustitución

El uso masivo o comercial de cables de nanotubos de carbono en aplicaciones comerciales como automóviles y aviones aún es un prospecto desafiante debido a dos motivos. En primer lugar, el cableado en base a nanotubos es prohibitivamente costoso. En efecto, si bien sus precios han caído progresiva y significativamente en las últimas dos décadas, actualmente los nanotubos más económicos cuestan entre USD 100 y USD 200 por kilogramo (Vanderbilt University, 2018). Es decir, unas 15-30 veces el precio actual del cobre. Ahora bien, ante los continuos esfuerzos por I+D en el área, es altamente probable que los precios sigan cayendo.

⁷ Corfo (2015) identificó el desarrollo e interés comercial que vincula el uso de cobre y grafeno ya sea utilizando cobre para la producción de grafeno (como sustrato) o bien utilizando de forma combinada ambos materiales, especialmente en microelectrónica. Otros usos combinados identificados se relacionan con soluciones líquidas que mejoran la conductividad, celdas solares (mejora en la eficiencia de conversión), mejora de conductividad de cables eléctricos, fibra óptica, entre otros.

Así, a los precios actuales sólo puede ser usado en aplicaciones altamente sensibles al peso y con una elasticidad relativamente baja al costo, tales como satélites militares. Sin embargo, ya existen investigaciones y propuestas para reemplazar el cableado eléctrico en la industria aeroespacial. Lum y Slenski (2019) estiman que su uso podría reducir el peso del cableado eléctrico en base a cobre en hasta un 90%. Con todo, la aceptación de esta sustitución en las industrias donde un menor peso es un factor relevante dependerá fundamentalmente de cuál será la disposición a pagar de los fabricantes a fin de reducir el peso de las aplicaciones, como ilustramos de forma aproximada en la tabla 2.

En segundo lugar, si bien en una nano-escala las propiedades de los nanotubos son superiores al cobre, cuando millones de estos nanotubos son unidos para formar cables, su conductividad tiende a disminuir significativamente, incluso a niveles inferiores al cobre y aluminio en algunas aplicaciones (Lekawa-Raus et. al, 2014). Sin embargo, este es un desafío que eventualmente puede ser resuelto en base a esfuerzos por I+D en el área. En este contexto, también existen investigaciones para crear aleaciones de nanotubos de carbono y cobre, que podrían permitir un desempeño superior al del cobre puro. Sin embargo, como señalan Sundaram, Sekiguchi et. al., (2019) es aún un desafío pendiente de la industria.

5. Plásticos

El plástico naturalmente no comparte las propiedades de conducción eléctrica o térmica del cobre pero puede resultar útil en aplicaciones donde su alta ductilidad y maleabilidad permite su uso a costos menores y con condiciones de resistencia y durabilidad aceptables.

En cuanto a los productos de cobre a sustituir, se encuentran principalmente distintas aplicaciones de tubería industrial y doméstica y también en la fabricación de fibra óptica (aunque esto desde luego cabe en dicha categoría). En lo que respecta a los productos de tubería, se suelen emplear en sistemas de drenado, desagües y gasfitería, entre otros.

6. Otros

Otros materiales de sustitución van desde el acero inoxidable, el cinc, y también algunas aleaciones de cobre, incluyendo combinaciones de cobre con cinc, y cobre con estaño, que dan lugar al latón y al bronce respectivamente. Parte de estas aleaciones se usan en la fabricación de productos de uso de cotidiano, como las monedas, llaves y otros instrumentos.

Si bien varios de estos materiales comparten algunas de las propiedades de conductividad eléctrica del cobre puro, no son similares en sus medidas o magnitudes. Por ejemplo, dependiendo de la cantidad de cobre en la aleación, se considera en términos generales que el latón sólo llega a tener un tercio de conductividad del cobre mientras que algunas variedades de bronce sólo llegan a tener un 7% de la conductividad del cobre. Como tal, por lo general no son usados en aplicaciones de conductividad eléctrica⁸.

⁸ Sin embargo, puede haber casos en que la mayor fuerza de tensión del latón puede hacerlo preferible al cobre en la medida en que su área de uso sea incrementada para alcanzar la conductividad necesaria (Blue Sea, 2002).

Dadas la posibilidades de aleación y uso de estos materiales, tienden a emplearse en una amplia gama de productos que van desde herramientas de uso personal hasta tuberías, sistemas de gasfitería, radiadores, válvulas, techados, bajantes pluviales y canaletas, entre otros (Lan, 2011). De este modo, pueden reemplazar al cobre en distintas aplicaciones de tipo residencial, automotriz e industrial.

IV. El caso del aluminio

El aluminio ha sido por lejos el mayor competidor del cobre y también el material sobre el cual contamos con la mayor información histórica de comparación al cobre a lo largo del tiempo. Luego, al contar con mayor información, se hace factible realizar una comparación de largo plazo. Para esto, revisaremos el comportamiento de los precios de ambos productos y posteriormente evaluaremos la posible sustitución ocurrida a nivel de países.

1. La importancia del precio

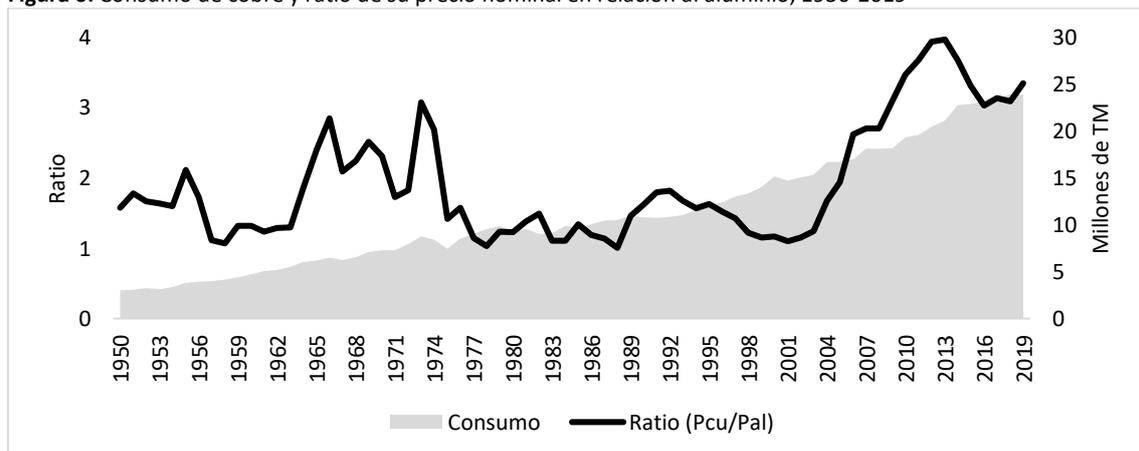
Como se ha discutido profusamente en el mercado, el precio relativo del cobre respecto del aluminio es el principal factor que explicaría la sustitución. En efecto, de acuerdo a EY (2013), cuando el ratio de precios entre el cobre y aluminio supera la proporción 3:1, la sustitución entre ambos comienza a tomar impulsos significativos.

En la figura 6 a continuación se ilustra el ratio anual entre ambos precios junto al consumo mundial anual de cobre desde 1950 a 2019. Como se observa, históricamente la relación entre ambos precios ha fluctuado entre la paridad -desde mediados de los 70s hasta la mayor parte de los 80s- hasta una relación 4:1 hacia comienzos de la segunda década del siglo XX -en el contexto del llamado superciclo del cobre.

Cabe advertir que desde 2009, el precio del cobre ha más que triplicado año a año el precio del aluminio, sobrepasando el ratio 3:1 (llegando incluso a 4:1 durante 2013) a partir del cual se vería un impulso relevante en la sustitución de acuerdo a EY. Sin embargo, como vimos en el capítulo 2 a partir de las encuestas de ICA, en los últimos años no ha habido una gran sustitución de aluminio por cobre.

Al mismo tiempo, el consumo agregado de cobre ha permanecido al alza en prácticamente la totalidad del periodo de estudio, tendencia que en general se ha hecho más pronunciada a partir de la década de los 90s. A la luz de estos antecedentes, no resulta aparente que exista una sustitución significativa de cobre por aluminio.

Figura 6: Consumo de cobre y ratio de su precio nominal en relación al aluminio, 1950-2019



Fuente: Cochilco en base a datos de la Bolsa de Metales de Londres y de WBMS.

Además de la discusión sobre el ratio de precios, el GIEC llegó a conclusiones similares a partir del diferencial de precios tras el superciclo del precio del cobre. Como se observa en la tabla 5 a continuación, entre USD/t. 5.000-8.000 existiría un empuje hacia la investigación y desarrollo para realizar sustitución, y ya con precios por sobre los USD/t. 10.000 los fabricantes y los usuarios finales cooperan en I+D para buscar la sustitución.

Tabla 5: Sustitución en la industria ante el rango de precio del cobre

Rango de precios (USD/t.)	Respuesta de la industria
<5.000	Algo de sustitución a partir de mejoras tecnológicas y de desempeño
5.000-8.000	Empuje en iniciativas de I+D pero los usuarios finales y manufactureros dudan en realizar esfuerzos para implementar los resultados en producción comercial
8.000-10.000	Ocurre sustitución adicional y las firmas avanzadas emprenden más investigación en el desarrollo de materiales
>10.000	Fabricantes y usuarios finales cooperan en I+D para encontrar nuevos materiales

Fuente: EY (2013) a partir de datos del GIEC.

Ahora bien, a fin de cuantificar la importancia relativa del precio del aluminio sobre la sustitución, podemos evaluar si el consumo de cobre responde a variaciones del precio del aluminio. *A priori*, se esperaría que disminuciones en el precio del aluminio ante un mismo precio del cobre tengan un efecto positivo sobre la demanda de cobre.

2. Evaluación de la sustitución a nivel de países

a. Modelo

Podemos revisar la importancia de los precios relativos a partir de un modelo de efectos fijos relativamente directo en el cual estimaremos la incidencia del ratio anual de precios entre el cobre y el aluminio sobre el consumo anual de cobre a partir de un panel de países entre los años 1975 y 2019, como se ilustra en la ecuación a continuación:

$$c_{it} = \beta_0 + \beta_1 p_{cu_t} + \beta_2 p_{cu_{t-1}} + \beta_3 ratio_t + \beta_4 ratio_{t-1} + \beta_5 de_{cu_t} + \beta_6 pi_{it} + \beta_7 us_t$$

Donde c es consumo de cobre (según series históricas de WBMS), p_{cu} es el precio del cobre, $ratio$ es la fracción entre el precio del cobre y del aluminio, de_{cu} es la desviación estándar mensual del cobre de cada año, pi es la producción industrial (según estimaciones del Banco Mundial) y us corresponde al US Dollar Index (a partir de series históricas de la Reserva Federal de EE.UU). Todos los datos de precios por su parte corresponden a datos históricos de la Bolsa de Metales de Londres. Los subíndices i y t representan al país y el periodo anual respectivamente. Con la excepción de la desviación estándar, todas las variables están en logaritmo.

A priori, esperamos que mientras mayor sea el ratio de precios, menos atractivo será el cobre frente a su posible sustituto, el aluminio, con lo cual habría una incidencia negativa en el

consumo de cobre. Como se observa, controlamos por el precio del cobre, la producción industrial de cada país (a partir de datos del Banco Mundial) a fin de considerar el desarrollo económico-industrial de cada jurisdicción, la variabilidad del precio del cobre (a partir de su desviación estándar) para considerar la incertidumbre inherente del mercado del cobre, y el precio del dólar (a partir del US Dollar Index) a fin de contar con una medida del impacto del tipo de cambio, particularmente en los países importadores.

Ahora bien, dado que el precio de un bien es el fruto de la interacción entre su oferta y su demanda, existe simultaneidad entre el precio y el consumo del cobre. Luego, realizar un análisis general donde el consumo agregado dependa del precio inevitablemente va a arrojar resultados sesgados. Ante esto, resulta conveniente realizar un análisis a nivel de países donde cada jurisdicción no tenga un consumo particularmente alto de cobre. El fundamento detrás es que variaciones dentro de un consumo relativamente bajo no tendrá una alta incidencia sobre el precio. Luego, trabajaremos un panel de países con un consumo inferior al 15% del consumo agregado de cobre, lo que excluye a EE.UU. desde 1950 a 2003 y a China desde 2000 a 2019⁹. A partir de esto, consideraremos un total de 69 jurisdicciones durante 45 periodos (1975-2019).

Por último, atendiendo al hecho de que la sustitución puede adquirir una mayor intensidad en países que cuentan con una industria automotriz -sea de fabricación y ensamblaje de vehículos o bien de fabricación de sus partes- haremos el análisis a modo general para las 69 jurisdicciones consideradas y luego considerando al subconjunto de las mismas que presenten -o hayan contado con- una industria automotriz en cada año del estudio, lo que arroja a 49 jurisdicciones.

b. Resultados

Los resultados del modelo se exponen en la tabla 6 a continuación separando por el total de países considerados y luego por aquellos países con industria automotriz.

Como era de esperar, el precio del cobre incide negativamente y de modo significativo al 10% sobre el consumo al considerar todas las jurisdicciones. Al considerar sólo las jurisdicciones con industria automotriz, el efecto negativo es significativo al 5% tanto en mismo año como en su rezaga en el año anterior. De igual forma, los efectos de la producción industrial y del US Dollar Index sobre el consumo son significativos, de una magnitud relativamente importante y van en las direcciones esperadas.

⁹ Otras jurisdicciones con un consumo de cobre relativamente importante durante los años considerados son la ex Unión Soviética, Japón y la ex Alemania Occidental, alcanzando un consumo anual promedio equivalente al 12,8%, 9,2% y 9,8% del total mundial respectivamente entre 1950 y 1990. Los demás países en general presentan un consumo comparativamente bajo, no superando el 5% del total en ninguno de los años de estudio.

Tabla 6: Estimación del modelo con Efectos Fijos

Variable	Todas las jurisdicciones	Sólo con industria automotriz
p_{cu_t}	-0.78 * (0.47)	-0.67 ** (0.27)
$p_{cu_{t-1}}$	-0.64 (0.42)	-0.63 ** (0.30)
de_{cu}	0.00 (0.00)	0.00 * (0.00)
$ratio_t$	0.39 (0.50)	0.02 (0.29)
$ratio_{t-1}$	0.09 (0.24)	-0.04 (0.20)
us_t	-2.51 ** (1.03)	-2.11 ** (0.97)
pi_{it}	1.59 *** (0.44)	1.69 ** (0.57)
c	-11.61 (12.06)	-15.50 (10.66)
N	69	46
R^2	0.2954	0.303

***p-value<0.01, **p-value<0.05, *p-value<0.1.

Errores estándar robustos en paréntesis.

Fuente: Cochilco.

Por otra parte, vemos que la desviación estándar del precio del cobre tiene un impacto prácticamente nulo, tanto al considerar todas las jurisdicciones como en sólo aquellas que cuentan con una industria automotriz. Sin embargo, sólo en esta segunda especificación se alcanza un efecto significativo. Esto sugiere que la variabilidad en el precio del cobre no parece haber sido un factor disuasivo en el consumo del mismo.

Sin embargo, en ninguno de los casos el impacto del ratio de precios resulta significativo ni tampoco cuenta con un impacto que se pueda calificar de alto. Es decir, no encontramos evidencia de que exista un alto efecto de sustitución al considerar el precio relativo del cobre en relación al aluminio de acuerdo a las especificaciones del modelo. Cabe señalar además que se obtuvieron resultados similares aún considerando más resagos en el ratio de precios.

Ahora bien, sabemos que en la práctica sí ha existido algo de sustitución y que los precios relativos son un factor importante en la incentivación de la misma. En consecuencia, el hecho de que el modelo no capte esta incidencia se atribuye a que probablemente existen otras variables que intervengan en el consumo de cobre y que distorsionen la medición de la sustitución.

Un factor adicional es que la sustitución no ha sido continua en el tiempo. En efecto, como señalamos previamente, en los última década no ha habido una gran sustitución de aluminio por cobre aun cuando el precio del cobre ha más que triplicado al del aluminio. Esto se puede interpretar a la luz de la historia como que el reemplazo impulsado por el mayor precio relativo del cobre ya fue mayormente realizado durante el siglo XX, dejando escasas posibilidades para la sustitución en los últimos años o incluso en el futuro.

V. Expectativas

1. Sustitución negativa de cobre

Actualmente no existe un alto riesgo de sustitución para el cobre en tanto no existen elementos para reemplazarlo de forma masiva en el corto y mediano plazo (DBS, 2018; Sverdrup et al, 2019). En esta línea, ICA (2019) estima que entre 2020 y 2024 el impacto de la sustitución negativa permanecerá en torno a las 280 kt. Es decir, en un nivel similar a lo visto en los últimos tres años.

Esto se debe por una parte a que entre los sustitutos altamente conocidos, como el aluminio, el acero inoxidable, el plástico y hasta cierto punto la fibra óptica, ya han sido usados de forma significativa en espacios ocupados por el cobre, acotando sus posibilidades futuras de sustitución. Por otra parte, los sustitutos menos conocidos, como el grafeno o los nanotubos de carbono, aún están en una senda de investigación y desarrollo para reducir su costo y ampliar sus aplicaciones al punto de hacerlos competitivos frente al cobre. En consecuencia, su uso a gran escala en reemplazo del cobre es improbable -al menos durante la siguiente década.

Sin embargo, la historia del cobre nos muestra que la investigación por sustituir el uso de cobre siempre está presente, ante lo cual la existencia de algo de sustitución es inevitable (ICA, 2020). La velocidad de la misma dependerá en gran parte de que tan fuerte sea el crecimiento del precio del cobre frente a sus competidores. Naturalmente, precios altos incentivarán mayores esfuerzos por investigación y desarrollo para su sustitución, lo que puede abrir nuevas posibilidades de reemplazo.

2. Sustitución positiva de cobre

Si bien no es el foco del presente trabajo, cabe señalar que hay sectores donde el cobre podría incrementar su participación a partir de la sustitución de otros materiales. En este punto, se hacen especialmente relevantes las propiedades antibacterianas del cobre, que permiten la eliminación de prácticamente la totalidad de las bacterias en menos de dos horas (Codelco, 2010).

Si bien estas cualidades bactericidas son conocidas desde la antigüedad, fueron especialmente reconocidas a partir de la certificación de la EPA en 2008¹⁰. Tras esta, ICA estimó que el cobre podría llegar a representar 500 kt adicionales por año sólo en el ámbito de la salud (Codelco, 2008). Luego, a comienzos de la década, Codelco (2010) estimó que el incremento potencial en la demanda de cobre asociada a sus propiedades antibacterianas se situaría entre las 550.000 y 1.000.000 de toneladas, considerando el reemplazo por una sola vez de los productos de mayor uso en geografías seleccionadas.

¹⁰ En 2008 la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos reconoció al cobre como el único metal con propiedades antimicrobianas, al aprobar el registro de más de 270 aleaciones del metal capaces de impedir la vida de bacterias y otros microorganismos, como hongos y virus (Codelco, 2010).

A partir del impacto de la pandemia Covid-19, las consecuencias podrían ser aún mayores en la actualidad, lo que podría dar cabida a su mayor uso en la industria médica, transporte de alimentos o en aplicaciones con alto flujo de personas, como tiendas, aeropuertos, escuelas y espacios públicos en general. Sin embargo, la velocidad de adopción del cobre en estas materias, así como de la posible demanda adicional derivada aún es incierta, especialmente considerando que en general no existen grandes planes concretos de su uso.

VI. Comentarios finales

Históricamente la sustitución de cobre por aluminio, fibra óptica, plásticos cinc, acero y otros materiales ha tenido un desarrollo y ocurrencia continua. En efecto, si bien han habido invenciones que han significado el reemplazo del cobre en áreas determinadas en periodos relativamente acotados -como el uso de aluminio en radiadores o el auge de la fibra óptica en telecomunicaciones- en general, la búsqueda por sustitución siempre ha estado presente en distintos grados.

Ahora bien, esta tendencia ha experimentado una marcada inclinación a la baja en los últimos años. Incluso en el caso del aluminio, el sustituto del cobre de mayor conocimiento, historia y uso, vemos que en general su nivel de reemplazo al cobre es relativamente bajo aun cuando su precio ha sido entre tres y cuatro veces inferior al del cobre en la última década.

¿Cómo explicamos esto? Una primera aproximación es que si bien el cobre se encuentra perpetuamente en un estado de amenaza ante la posibilidad de sustituciones, en general ya ha sido efectivamente reemplazado en las aplicaciones donde su sustitución resultaba factible con una mayor facilidad. Luego, la búsqueda por nuevos espacios de reemplazo se hace cada vez más compleja y requiere mayores inversiones en innovación y un mayor acopio de conocimiento. Como resultado, a pesar de los esfuerzos realizados en la búsqueda de sustitutos, el cobre sigue manteniendo su supremacía en sus áreas de excelencia, la conductividad eléctrica y térmica, a un costo que permite su uso de forma comercialmente rentable.

En paralelo, si bien los fabricantes buscan formas de reducir sus costos, también tienen cuidado en evitar provocar efectos adversos el desempeño de sus equipos y bienes. En este sentido, la sustitución de cobre por elementos de menor valor y conductividad, como el aluminio, significa un menor costo inmediato pero un menor desempeño a lo largo de la vida útil del producto, y este es un *trade-off* que muchas veces los consumidores, productores intermedios o los propios fabricantes iniciales no están dispuestos a aceptar. De igual forma, desde un punto de vista ambiental, la búsqueda de una mayor eficiencia energética supone la minimización de las pérdidas de transmisión y distribución eléctrica, aspecto en que el cobre lleva la delantera frente a sus competidores en el área.

Ahora bien, cabe señalar que existen sectores preponderantes en la demanda de cobre donde el costo del cobre representa una fracción significativa dentro de los costos totales, como es el caso de las redes eléctricas y en menor medida el mercado de vehículos eléctricos. En consecuencia, aumentos sostenidos y significativos en el precio del cobre frente al aluminio pueden generar incentivos para su sustitución en sectores específicos. Sin embargo, que estos incentivos se traduzcan en una sustitución real a la luz de la tecnología actual es un escenario que no resulta probable, al menos en el corto plazo.

En suma, ya con miras al futuro en base a las tecnologías y desarrollo de productos reciente, es improbable que el cobre llegue a ser sustituido significativamente durante la siguiente década. Ahora bien, sería errado concluir que esta tendencia necesariamente se mantendrá en el largo plazo. El auge de nuevos productos relativamente recientes en su uso como el grafeno y los

nanotubos de carbono cuentan con un potencial de sustitución que aún está etapas tempranas, y a medida que sus precios disminuyan podrían eventualmente resultar competitivos frente al cobre. Naturalmente, mientras más lejos proyectamos escenarios futuros, existe un mayor riesgo de incertidumbre en la sustitución.

VII. Anexo

Tabla 7: Comparación de propiedades entre el cobre y el aluminio

Característica	Aluminio	Cobre
Coefficiente de expansión per °C x 10 ⁻⁶ a 20°C	23	16,6
Conductividad térmica BTU ft/hr/ft ² /°F a 20°C	126	222
Conductividad eléctrica %IAS a 20°C	61	101
Fuerza tensil ib/in ² (suave)	12.000	32.000

Fuente: Lam (2011).

VIII. Referencias

- Aluminium Insider (2016), "Copper vs. Aluminium – substitution slows but continues". Disponible en: <https://aluminiuminsider.com/copper-vs-aluminium-substitution-slows-but-continues/>
- Anixter (2018), "Copper vs. Aluminum Conductors". Disponible en: https://www.anixter.com/en_gb/resources/literature/wire-wisdom/copper-vs-aluminum-conductors.html#:~:text=Aluminum%20has%2061%20percent%20of,when%20compared%20to%20copper%20conductors.
- Bolsa de Metales de Londres (varios años). Series de precio del cobre y del aluminio.
- Blue Sea (2002), "Electrical Conductivity of Materials". Disponible en: https://www.blueseas.com/resources/108/Electrical_Conductivity_of_Materials
- Codelco (2008), "Cobre, el primer material bactericida del mundo". Disponible en: https://www.codelco.com/cobre-el-primer-material-bactericida-del-mundo/prontus_codelco/2011-02-16/111901.html
- Codelco (2010), "Antimicrobial Copper: new market opportunities". Disponible en: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20111227/asocfile/20111227161526/codelco_antimicrobial_copper_shanghai_28jul2010.pdf
- Comisión Chilena del Cobre (2020), "Medición de los Encadenamientos productivos de la industria minera en Chile".
- CORFO (2015), "Grafeno, amenaza o complemento".
- Daware, K. (2018), "Types of Conductors Used in Overhead Power Lines". Disponible en: <https://peakdemand.com/types-of-conductors-used-in-overhead-power-lines/>
- DBS (2018), "Copper And Its Electrifying Future"
- DNV-GL (2015), "Copper in comparison with aluminum as common material in conductors of LV and MV cables". Disponible en: http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015_0026_final.pdf
- Harvey (2016), "Can Carbon Nanotubes Replace Copper?". Disponible en <https://www.assemblymag.com/articles/93180-can-carbon-nanotubes-replace-copper#:~:text=While%20it's%20unlikely%20that%20CNT,metals%2C%E2%80%9D%20Harvey%20points%20out.>
- IBM (2017), "One big wire change in '97 still helping chips achieve tiny scale"
- " <https://www.ibm.com/blogs/research/2017/11/20years-cuwires/>
- EY. (2013). The super-cycle hangover: the rising threat of substitution. Recuperado de [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/The_rising_threat_of_substitution_-_mining_and_metals/\\$FILE/ey-threat-of-substitution-sep2013.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/The_rising_threat_of_substitution_-_mining_and_metals/$FILE/ey-threat-of-substitution-sep2013.pdf)
- Masmatch (2018), "Aircraft Aluminium Grades". Disponible en: <https://matmatch.com/learn/material/aircraft-aluminium-grades>
- International Copper Association (2017A), "Copper's Role in the \$140 Billion HVAC(R) Market". Disponible en: <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2017/09/2017-09-HVACR-Factsheet-1.pdf>

- International Copper Association (2017B), "The Electric Vehicle Market and Copper Demand". Disponible en: <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2017/06/2017.06-E-Mobility-Factsheet-1.pdf>
- International Copper Association (2018), "Japan Takes Lead On Underground Cabling". Disponible en: <https://copper.com.au/news/general/japan-takes-lead-on-underground-cabling-2/>
- International Copper Association (2019), "Global Substitution Indicators". Disponible en: <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2019/04/dmm-global-substitution-indicators.pdf>
- International Copper Association (2020), "Substitution Survey 2020". Disponible en: <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2020/03/Substitution-Survey.pdf>
- Lekawa-Raus, A., Patmore, J., Kurzepa, L., Bulmer, J., Koziol, K. (2014), "Electrical Properties of Carbon Nanotube Based Fibers and Their Future Use in Electrical Wiring". Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adfm.201303716>
- Lum y Slenski (2019), "Replacement of copper wiring with carbon nanotubes in aerospace applications".
- Reuters (2016), "Auto, power firms save millions swapping copper for aluminum". Disponible en: <https://www.reuters.com/article/us-aluminium-copper-substitution/auto-power-firms-save-millions-swapping-copper-for-aluminum-idUKKCN0WH1RI>
- Reuters (2011), "Analysis: Copper's green appeal shields against substitution". Disponible en: <https://www.reuters.com/article/us-coppers-green-appeal-idUSTRE7732JF20110804>
- RMIT University (2019), "Branching out: Making graphene from gum trees". Disponible en: <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2019/jun/graphene-from-gum-trees>
- Sundaram, R., Sekiguchi, A., et. al. (2019), "Copper/carbon nanotube composites: research trends and outlook". Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6281931/>
- Sverdrup, H.; Olafsdottir, A. & Ragnarsdotti, K. (2019), "On the long-term sustainability of copper, zinc and lead supply, using a system dynamics model". Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590289X19300052>
- Universidad Técnica de Munich [UTM] citado en Science Daily (2011), "Aluminum to replace copper as a conductor in on-board power systems". Disponible en: <https://www.sciencedaily.com/releases/2011/02/110207124035.htm>
- Vanderbilt University (2018), "Pint cracks code to cheap, small carbon nanotubes". Disponible en: <https://news.vanderbilt.edu/2018/05/23/these-could-revolutionize-the-world-pint-cracks-code-to-cheap-small-carbon-nanotubes/>
- World Bureau of Metal Statistics (varios años), Estadísticas de consumo de cobre.

Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por:

Salathiel Andrés González Eyzaguirre
Analista de Estrategia y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya
Director de Estudios y Políticas Públicas

Diciembre / 2020