

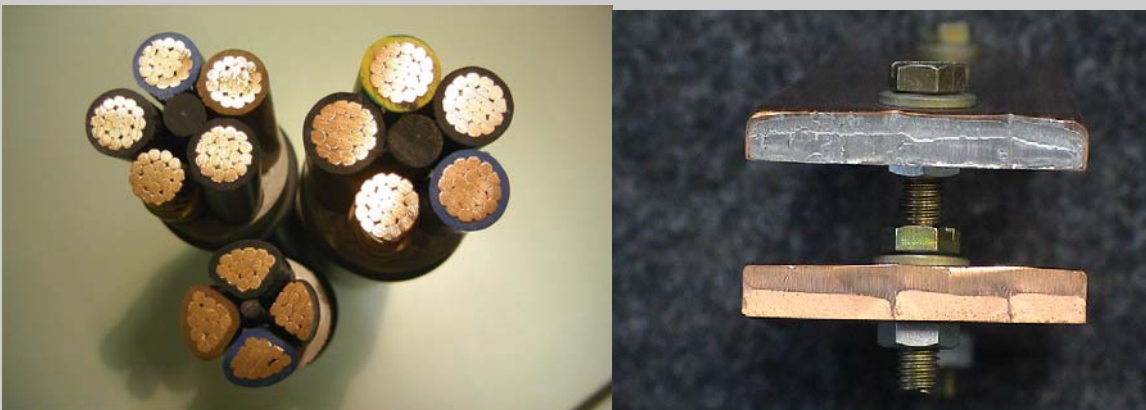
Conductores Eléctricos

Leonardo
ENERGY 
En Español

*Aplicaciones Prácticas de los
Conductores Eléctricos*

Stefan Fassbinder
European Copper Institute

Con la colaboración de Alejandro Pérez
Universidad Politécnica de Madrid



Con una conductividad alrededor del 60% de la del cobre, el aluminio se queda justo fuera del podio de los tres mejores metales conductores. La plata se lleva el oro, si se permite el juego de palabras, con la plata para el cobre y el bronce para el oro, que llega en tercera posición. El aluminio sigue detrás del oro para llevarse el cuarto puesto, pero muy por delante del resto de los demás metales conductores. Los conductores no metálicos (carbón, soluciones electrolíticas, polímeros conductores, superconductores, nanotubos) tienen todos sus aplicaciones específicas - a menudo en novedosas - y rara vez compiten con los metales.

Sumario

1	METALES: MATERIALES FAMILIARES Y VERSÁTILES.....	3
1.1	CONDUCTORES METÁLICOS: LA ELECCIÓN ESTÁ LIMITADA	3
1.2	MÁQUINAS ELÉCTRICAS	4
1.3	CABLES	5
1.4	¿QUÉ METAL PARA QUÉ TRABAJO?	8
2	CONDUCTORES NO METÁLICOS, ¿UNA ALTERNATIVA REAL?	11
2.1	UN MATERIAL PARA APLICACIONES ESPECIALES: CARBONO.....	11
2.2	IMPORTANCIA EN ELECTROQUÍMICA: CONDUCTORES LÍQUIDOS	11
2.3	POLÍMEROS ELÉCTRICAMENTE CONDUCTORES: ¿EL MATERIAL PARA LA NUEVA GENERACIÓN DE CABLES?	11
2.4	SUPERCONDUCTORES	14
2.5	CARBONO DE NUEVO: NANOTUBOS.....	15

1 Metales: materiales familiares y versátiles

1.1 Conductores metálicos: la elección está limitada

Con una conductividad alrededor del 60% de la del cobre, el aluminio se queda justo fuera del podio de los tres mejores metales conductores. La plata en primer lugar, después el cobre y en tercera posición el oro. El aluminio sigue detrás del oro para llevarse el cuarto puesto y se mantiene muy por delante del resto de los demás metales conductores (ver Tabla 1). Los altos precios del oro y de la plata hacen su uso en cables, conductores y máquinas eléctricas no económico, aunque tienen su aplicación como unión en circuitos integrados, donde se usan en cantidades minúsculas. Todos los demás elementos conocidos y compuestos, están por detrás de los cuatro mejores metales en términos de conductividad eléctrica; muchos de ellos presentan una conductividad casi nula. Las aleaciones, que son mezclas de diferentes metales, tienen una conductividad eléctrica mucho menor que los metales puros. Por lo tanto, los dos únicos metales que ofrecen alta conductividad a un precio razonable son el aluminio y el cobre, con el último imponiendo un rasero para los demás materiales. De acuerdo con los documentos publicados por el Instituto Alemán de Cobre (DKI), la conductividad del cobre utilizado para conducciones eléctricas (Cu-ETP-1, Cu-OF-1 o Cu-OFE) es de 58.58 MS/m¹. El IEC estándar ya era de 58.51 MS/m en 1925. Este valor corresponde al 101% del valor del International Annealed Copper Standard (IACS), que en 1913 fijó el estándar eléctrico de conductividad para cobre de ingeniería en 58.00 MS/m^{2 3}, el punto de referencia con el que el resto de los materiales conductores deben ser medidos.

Tabla 1: Valores de resistividad de materiales metálicos comparados con las resistividades de diferentes tipos de agua, suelos y rocas, que habitualmente son tratados como conductores cuando se habla de sistemas de puesta a tierra.

	$\Omega \cdot m$ (at 20°C)		$\Omega \cdot m$	
			from	to
Silver	0.0160 *10 ⁻⁶	Sea water	0.1	1
Copper (99.95%)	0.0175 *10 ⁻⁶	Tap water	5	100
Gold	0.0220 *10 ⁻⁶	Distilled / demineralized water	2000	100000
Aluminium	0.0270 *10 ⁻⁶	Ice	10000	100000
CuCrZr alloy	0.0375 *10 ⁻⁶	Garten soil, top soil, peatland soils	5	50
Tungsten	0.0550 *10 ⁻⁶	Porous limestone	30	100
Brass (CuZn37)	0.0645 *10 ⁻⁶	Wet concrete	30	100
Iron	0.1000 *10 ⁻⁶	Dry concrete	2000	10000
Stainless steel	1.0000 *10 ⁻⁶	Sand	200	2500
Lead	0.2080 *10 ⁻⁶	Gravel, crushed stone	2000	3000
Resistance wire (CuNi44Mn1)	0.4900 *10 ⁻⁶	Quartzite, weathered limestone	300	1000
Coal, graphite	40.0000 *10 ⁻⁶	Rock	1000	10000

El aluminio es un metal ligero con una densidad de entorno al 30% de la del cobre. Además, el precio de compra-venta del aluminio, que siempre está referido por unidad de peso (estrictamente hablando, por unidad de masa), está ligeramente, a veces significativamente, por debajo del precio del cobre. Sin embargo, la magnitud que determina los requerimientos en

Conductores Eléctricos

una aplicación particular es la sección transversal. Lo que cuenta es, por lo tanto, el volumen y no la masa (o el peso) de material. Aunque la mejor conductividad del cobre signifique que dos litros de cobre pueden reemplazar más de tres litros de aluminio, el cobre como material conductor equivale al doble de cantidad en aluminio. Entonces, ¿por qué en Europa occidental, por ejemplo, rara vez se utiliza el aluminio en las máquinas eléctricas? ¿O por qué las máquinas eléctricas que utilizan cobre son más ligeras y compactas que las diseñadas con aluminio (para la misma eficiencia)?



Figura 1: Rotores en jaula de ardilla hechos en cobre fueron exhibidos al público por primera vez en la Hanover Trade Fair en 2003

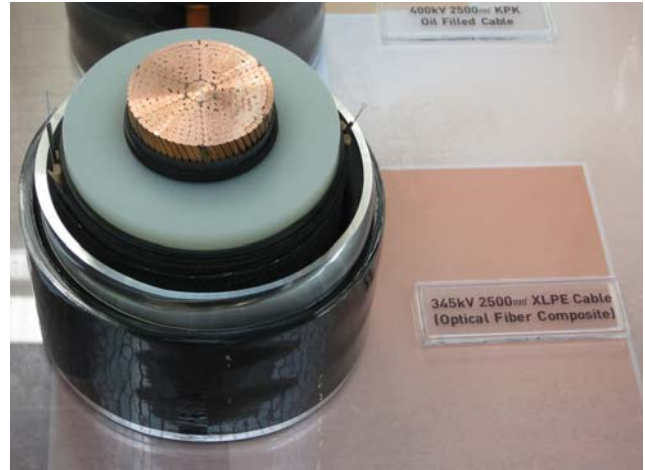


Figura 2: En cables de alta tensión el material aislante ocupa la mayor parte de la sección transversal, mientras que el material conductor ocupa mucho menos.

1.2 Máquinas Eléctricas

Considérese un motor eléctrico en el cual el aluminio es usado en lugar del cobre para los devanados. Si este motor quisiera ser técnicamente equivalente a uno bobinado con cobre (particularmente con respecto a la eficiencia), la densidad de corriente eléctrica debería ser reducida en un 40%, lo cual conduciría a un incremento del 64% de la sección del conductor. Esto provocaría un aumento del tamaño del núcleo laminado y del resto de componentes. Sin embargo, la lámina de metal utilizada para el núcleo laminado tiene también su precio de mercado, lo que esencialmente elimina el ahorro conseguido utilizando aluminio en vez de cobre en los bobinados. Como resultado, el trabajo se ha centrado a lo largo de unos cuantos años en fabricar el rotor en cobre.⁴ Estos nuevos rotores están disponibles comercialmente actualmente y ya han sido utilizados en las primeras aplicaciones prácticas (figura 1). El problema en obtener las jaulas de los rotores en cobre radica en la fundición, ya que su punto de fusión mucho más alto (1083 °C) que el del aluminio (660 °C). Esto conduce a una mayor degradación de los moldes. Afortunadamente, estos problemas ya han sido resueltos y hay moldes disponibles con la suficiente resistencia y durabilidad⁵.



Figura 3: Cables con recubrimiento mineral

Comparison of Dimensions

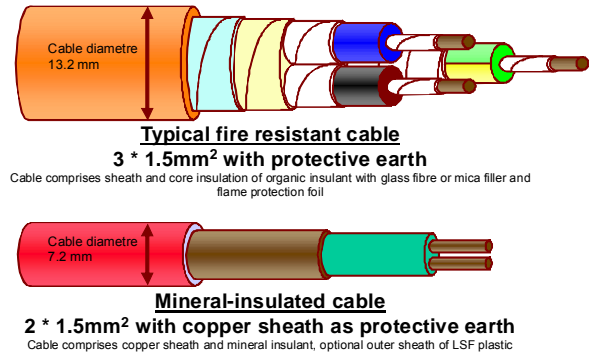


Figura 4: La estructura de los cables ignífugos con recubrimiento plástico y mineral

1.3 Cables

El espacio es un criterio determinante cuando se habla de cables. En un cable de baja tensión (BT) recubierto con plástico con una sección de hasta 10mm² por conductor (Figura 5) o en cables de alto voltaje (AT) (Figura 2), la mayor parte de la sección transversal es ocupada por el material aislante. Si se usa aluminio en vez de cobre como material conductor, la sección adicional es prácticamente despreciable en comparación.

Al menos esa es la situación para cables recubiertos convencionales. Los cables e instalaciones eléctricas con recubrimiento mineral (Figura 3) no son sólo completamente ignífugos, sino que además requieren mucho menos espacio (Figura 4) que los cables recubiertos convencionales. Por un tiempo, estos cables con recubrimiento mineral eran incluso equipados con una "funda" de aluminio, pero esto nunca cuajó y lo habitual sigue siendo la protección de cobre.



Figura 5: Incluso en instalaciones de edificios y cables de servicio, el material conductor aún es una pequeña porción de la sección total respecto a los materiales aislantes.



Figura 6: Solo en cables de baja tensión para altas intensidades el cable ocupa la mayor parte de la sección total transversal.

Y en la mayor parte de los países europeos, el cobre es utilizado predominantemente, si no exclusivamente, en las instalaciones eléctricas de edificios. Así que, ¿por qué la mayor parte de los estándares europeos no permiten el uso de conductores de aluminio con secciones transversales de hasta 16mm² o, en algunos casos, de hasta 10mm²?

Conductores Eléctricos

Hay tres razones principales:

- Aunque el aluminio es bastante dúctil, no lo es tanto como el cobre. Los extremos rígidos de los cables ubicados en las paredes, por ejemplo, como conexiones empotradas o tomas de corriente tienden a romperse después de ser dobladas repetidamente. Esto puede ser problemático si la fractura inminente se localiza en el interior del aislamiento y si el cable sigue siendo utilizado. En estos casos el fallo puede seguir sin detectarse hasta que el cable tiene que transportar una considerable corriente (cercana a su máximo de corriente admisible) y aunque esto puede suceder años antes de que esta situación aflore, cuando lo hace, el material conductor se fundirá en el punto de ruptura y pueden darse arcos eléctricos mantenidos. El aluminio también tiende a formar estas constricciones locales más fácilmente que el cobre y dado que tiene un menor punto de fusión y un menor coeficiente de conductividad térmica que el cobre, este tipo de fusión local puede ocurrir más a menudo en cables e instalaciones con conductores de aluminio. En el peor de los casos, esto puede causar una inflamación del aluminio y quemarse como si fuera un fusible.
- Cuando se expone al aire, la superficie del aluminio rápidamente queda recubierta por una dura y permanente capa de óxido que no conduce la electricidad, con lo que hace más complicado el contacto eléctrico. La formación de óxido en puntos donde los cables de aluminio terminan o se conectan, puede incrementar la resistencia eléctrica local del conductor. La elevada resistencia puede elevar las temperaturas con el riesgo de daño térmico a los materiales aislantes y su posible ignición. El cobre también sufre oxidación cuando se expone al aire, pero quizás sorprendentemente la capa de óxido no inhibe el contacto eléctrico, aunque los óxidos de cobre (CuO and Cu_2O) tienen conductividades 13 órdenes de magnitud inferiores al cobre elemental y difícilmente pueden clasificarse como conductores eléctricos.
- El aluminio tiene propensión a sufrir una lenta fluencia del material. Cuando se le somete a altas temperaturas, el material cederá con el tiempo. Un resultado de esto es que las originalmente apretadas conexiones pueden aflojarse gradualmente. Existe tecnología de conexión que puede solventar este problema y vale la pena invertir el coste y esfuerzo extra que hay que llevar a cabo en instalaciones que conllevan relativamente pocas conexiones eléctricas (p.ej. líneas de transmisión aéreas de alta tensión), pero no en más complejas redes ramificadas como aquellas que se pueden encontrar en el interior de los edificios.

Debido al segundo de los tres problemas mencionados anteriormente, las conexiones entre los extremos de los conductores de aluminio siempre deberían hacerse con contactos de unión atornillada fuerte. Desafortunadamente, el tercero de los problemas significa que estas uniones no son permanentes. Los contactos mediante muelles pueden ayudar, pero tienden a sufrir los problemas derivados de las capas de óxido que recubre al aluminio. En ambos casos, el resultado es un aumento lento de la resistencia de contacto en el punto de conexión y por lo tanto un aumento de la posibilidad de inflamación. Las regulaciones adquiridas continúan protegiendo las antiguas instalaciones de aluminio en Alemania de Este y en la mayor parte de los países de Europa de Este, pero la única protección real que está brindando este tipo de regulación es protección contra la amenaza de la mejora! Afortunadamente, actualmente hay métodos para asegurar el adecuado contacto eléctrico entre estas antiguas instalaciones "protegidas" y los sistemas eléctricos más nuevos. Estos

Conductores Eléctricos

conectores combinan contactos de muelles preparados con una pasta especial de contacto hecha a partir de grasa y partículas de metal. Cuando la conexión se realiza las partículas penetran la capa de aluminio existente mientras que la grasa protege el área de contacto de nueva corrosión.⁶

El cobre es también el material preferido en cables de alta tensión. Aunque la utilización de aluminio pudiera dar lugar solamente a un ligero aumento de la sección transversal total del conductor, los materiales aislante y la protección exterior necesaria para los cables de alta tensión son caros y la mayor área transversal del cable eliminaría el ahorro conseguido utilizando un material conductor más barato, en contraste con la situación de los cables de baja tensión (Figura6). También vale la pena recordar que el blindaje del cable siempre se hace de cobre, ya que es el único material adecuado para dicho efecto. Si se elige aluminio como material conductor, el tratamiento de los desechos de cable al final de su vida (bastante larga) de servicio conllevaría el paso añadido de la separación de los dos materiales.

Como material, el cobre puro tiene una vida de servicio prácticamente infinita. Puede ser reprocesado una infinidad de ocasiones sin perder ninguna calidad. Alrededor del 45% del cobre que se necesita hoy en día es generado a partir de chatarra, y los productos para los que se utiliza (cables, transformadores, tuberías de agua o desagüe) permanecerán en uso por un buen tiempo, con una media de 40 años. Sin embargo, hace cuarenta años, la demanda del cobre era solo la mitad de la que hay hoy en día. De donde se deduce que alrededor del 90% del cobre utilizado en aquel entonces aún se está utilizando. Esto es igualmente aplicable al aluminio y otros metales. Los metales no se consumen, se utilizan.

1.4 ¿Qué metal para qué trabajo?

Además de su conductividad eléctrica, el resto de propiedades tecnológicas importantes del cobre y del aluminio difieren tan significativamente (la densidad es un ejemplo obvio) que sus áreas de aplicación están y han estado siempre claramente diferenciadas (Figura 8). Y no ha cambiado mucho o parece que vaya a cambiar al respecto. El único desarrollo real nuevo en los últimos años ha sido la introducción de jaulas para rotores en cobre (Figura 1). Hay realmente solo tres, ahora cuatro, áreas en ingeniería eléctrica en las cuales el aluminio y el cobre están compitiendo en el mismo segmento de mercado:

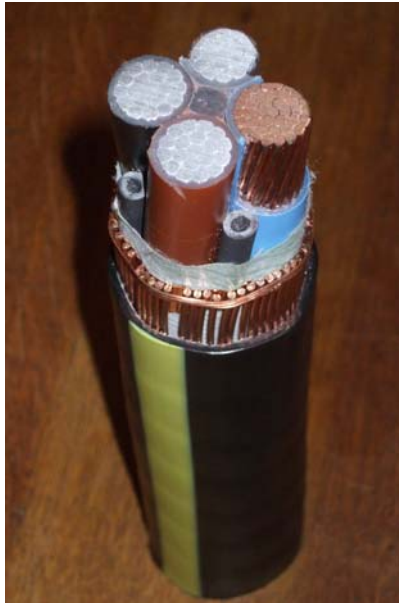


Figura 7: El cable subterráneo utilizado en la estación energética de Dietlikon en Suiza: una solución de compromiso que combina las propiedades tecnológicas del cobre y el precio del aluminio

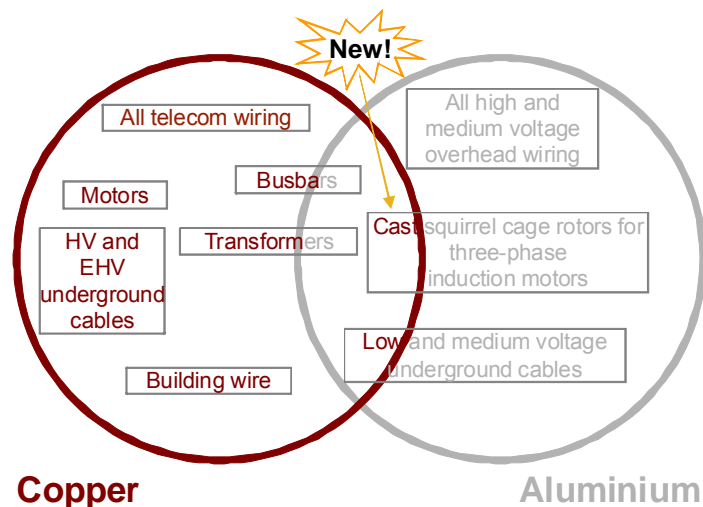


Figura 8: Usos prácticos del cobre y del aluminio en el sector de la ingeniería eléctrica: áreas en las cuales ambos metales pueden ser utilizados son escasas

- **Cables de media y baja tensión:** La decisión aquí es cuál es el menor de los dos males: ¿una mayor sección transversal de los cables o un mayor peso? En general, el cable de aluminio será sustancialmente más barato. Sin embargo, aún vale la pena recordar que el cable de cobre es más dúctil y menos susceptible de sufrir problemas de contactos eléctricos y ello ofrece un mayor margen de seguridad respecto al de un cable de aluminio. Debido a su menor sección transversal, el cable de cobre también resultará más fácil de instalar ya que la rigidez del cable depende del cuadrado de su sección transversal ¡y por ello de la cuarta potencia del diámetro! También es posible conseguir cables trenzados muy pequeños; el cable trenzado de aluminio sólo está disponible en secciones transversales de al menos 10mm² y los trenzados individuales aún son muy anchos comparados con aquellos equivalentes en cobre. Como resultado, los cables trenzados en aluminio más finos disponibles son considerablemente más rígidos que los más finos de cobre y esta diferencia puede crear algunas sorpresas en los costes. Sobre el papel, el conductor de aluminio bien puede ser

más barato de adquirir, pero no consigue compensar el coste extra y el esfuerzo invertidos en instalar cables de aluminio menos flexibles. Recientemente ha aparecido una combinación que es una solución de compromiso de Cu-Al y se está utilizando en la planta de producción de Dietlikon en Suiza como cable subterráneo de baja tensión en las redes de distribución (Figura 7). Un representante de la planta suiza de Dietlikon ofreció una presentación del producto subrayando el concepto después de ser invitado a asistir a una reunión del comité 712 del DKE "Seguridad de las instalaciones de tecnologías de la información, incluyendo uniones equipotenciales y puestas a tierra " (DKE: Comisión Alemana para las tecnologías Eléctricas, Electrónicas y de las Tecnologías de la Información). El de Dietlikon es el primer operador conocido de distribución que está convirtiendo su red a un sistema TN-S de cinco conductores de forma sistemática "un trabajo que por supuesto solo se lleva a cabo durante reparaciones, expansiones de la red y nuevas instalaciones. En este nuevo cable, los conductores de fase tienen la misma sección transversal que el conductor de neutro, lo que ayuda a conseguir una estructura de cable simétrica". Los conductores de fase están fabricados en aluminio, mientras que el de neutro del mismo diámetro es de cobre, permitiendo conducir una mayor corriente y con ello haciendo el cable más adecuado para hacer frente a los problemas de armónicos que tanto se discuten hoy en día. El cable de protección de tierra tiene en este caso una configuración de escudo envolvente de cable de cobre, lo que ofrece una mucho mayor simetría y estabilidad electromagnética que un quinto conductor convencional.

- **Transformadores:** El problema del espacio ocupado por el devanado no es tan crítico en los transformadores como en motores eléctricos, lo que hace que el uso del aluminio pueda al menos tenerse en consideración. De hecho, el principal canal de fugas, el espaciado entre los devanados de alta y baja tensión, debe ofrecer una cierta distancia por las siguientes tres razones: aislamiento, límite de la corriente de cortocircuito y refrigeración. Sin embargo, un transformador con devanados de aluminio será más grande si las pérdidas de potencia y el resto de los datos operacionales, como por ejemplo la tensión de cortocircuito, se deben mantener en el mismo nivel que en un transformador equivalente con devanados de cobre (después de todo, esto es lo que queremos decir cuando decimos que dos transformadores son equivalentes). Sin embargo, el peso total del mayor tamaño del transformador con devanados de aluminio podría ser ligeramente menor. Las diferencias en los costes de fabricación bien pueden compensarse y en la opinión de un buen número de empresas de fabricación, la elección del material conductor es principalmente una cuestión de la filosofía de la empresa.

Conductores Eléctricos

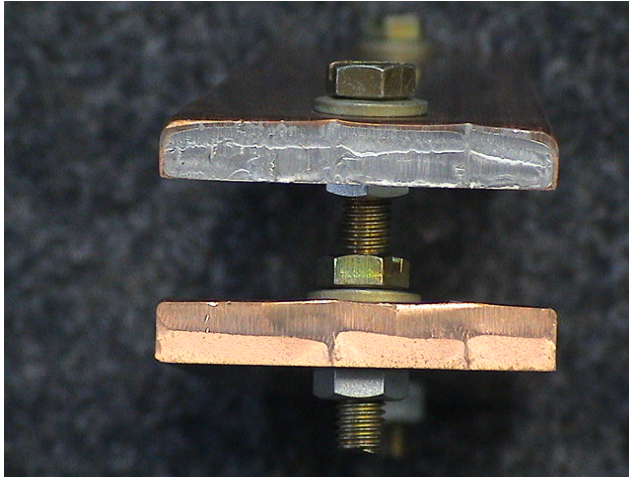


Figure 5: There are copper busbars, aluminium busbars ...

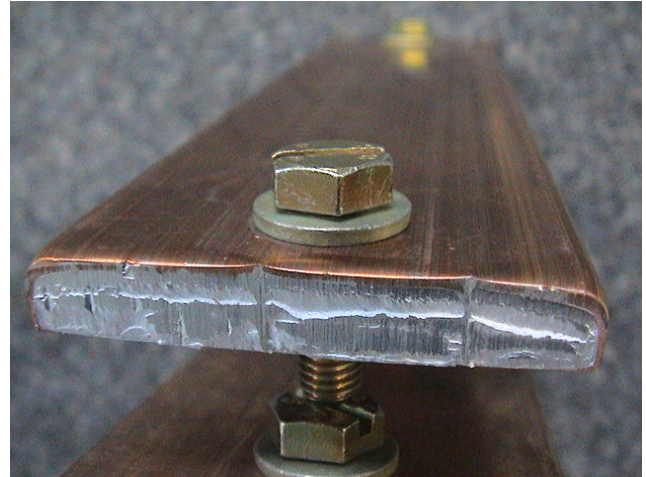


Figure 6: ...and copper busbars made of aluminium

- **Barras:** En esta aplicación, los requerimientos espaciales tienen incluso menor peso en el proceso de toma de decisiones, pero aún son un factor. En segundo lugar, las aplicaciones de barras se caracterizan por una gran cantidad de material conductor y una pequeña cantidad de material aislante en un pequeño espacio. Esto realza las diferencias en los precios del material. En tercer lugar, el gran número de conexiones eléctricas en este pequeño volumen significa que los problemas de colectividad asociados al aluminio son más pronunciados en dichas aplicaciones. Cuando se tienen en cuenta todos estos aspectos, estamos en un jaque mate y la cuestión de qué material seleccionar se convierte en casi filosófica. Sin embargo, es importante asegurarse de que los costes y los precios no se están confundiendo. Si el precio se toma como el principal criterio de selección, el aluminio generalmente se suele preferir. Pero si se tienen todos los costes en cuenta (incluyendo los costes operacionales), normalmente suele ocurrir que el no gana la carrera al cobre. El cobre parece que tiene mejor apariencia, de hecho algunas de las barras de aluminio disponibles tienen un recubrimiento de cobre, no para mejorar el contacto eléctrico (porque el taladrado, remachado y atornillado dañarán el recubrimiento de cobre), sino simplemente por razones estéticas. (Figura 9, Figura 10).
- Un nuevo área de aplicación son las **jaulas de rotor de cobre** (Figura 1): En esta aplicación, el factor crucial es la mayor conductividad eléctrica por unidad de volumen del cobre. Este factor por sí solo hace que merezca la pena utilizarlo a pesar de todos los problemas técnicos asociados con la fabricación de estos dispositivos.

El aluminio domina indiscutiblemente en los cables de alta tensión aéreos donde el espacio no tiene restricciones pero el peso es un factor determinante. La baja resistencia mecánica del aluminio requiere que el cable lleve un refuerzo con un alma de acero, pero esto no cambia el hecho de que los cables puedan ser producidos a bajo coste y que los dos materiales se puedan separar el uno del otro magnéticamente cuando se echan para chatarra.

2 Conductores no metálicos, ¿una alternativa real?

Los así llamados semiconductores como el germanio y el silicio, que en la tabla periódica son elementos situados entre los metales y los no-metales y los cuales son el corazón de los sistemas electrónicos que conocemos hoy en día y van más allá del objeto de este artículo. Pero semiconductores a parte, podemos preguntarnos si los metales son o no los únicos materiales capaces de conducir corriente. ¿O acaso existen otras sustancias que podrían ser útiles como conductores?

2.1 *Un material para aplicaciones especiales: Carbono*

Estamos familiarizados con los electrodos de grafito en cámaras de arcos eléctricos, y los electrodos de grafito se utilizan en lámparas de descarga. De hecho, la primera lámpara incandescente se produjo no con filamentos de tungsteno sino con filamentos hechos de carbono. Las escobillas de carbono se utilizan aún hoy en día para establecer contactos eléctricos con los segmentos conmutadores en máquinas de corriente continua. Se llaman escobillas porque sus predecesores estaban de hecho fabricadas de cobre trenzado y parecían pequeños cepillos. Pero el grafito tiene mejores propiedades de lubricación que el cobre. En las aplicaciones en las que la menor conductividad eléctrica del carbono planteaba un problema, hay disponibles composites de cobre y grafito sinterizados (Figura 11). Dado que estos materiales sinterizados no son aleaciones, no sufren la reducción de conductividad que típicamente acompaña a los procesos de aleación.

2.2 *Importancia en electroquímica: conductores líquidos*

Las soluciones electrolíticas se hacen habitualmente a partir de sales iónicas disueltas en agua en la cual los iones portadores de carga tienen libertad de movimiento. La disociación de las sales iónicas en el agua para generar fluidos conductores es la base de importantes procesos como la electrólisis o la generación de energía eléctrica en una batería. La conductividad eléctrica del suelo responde igualmente a este fenómeno, aunque sea muy baja y fuertemente dependiente del clima. Efectivamente, si se llevan a cabo mediciones de puesta a tierra después de un buen chaparrón se observará una notable disminución de la resistencia. Vale la pena enfatizar que los valores del límite de resistividad mostrados en la tabla 1 tienen todos incluido el factor 10^{-6} . Los valores de resistividad de los metales y aquellos a los cuales nos solemos referir como tierra por lo tanto difieren entre 6 y 12 órdenes de magnitud.

2.3 *Polímeros eléctricamente conductores: ¿el material para la nueva generación de cables?*

Los materiales plásticos que son conductores de la electricidad por ellos mismo (p.ej. polímeros orgánicos que son intrínsecamente conductores) son poco comunes. La mayor parte de los polímeros conductores (así llamados "polímeros conductivos") son plásticos que han sido inducidos a llevar corriente eléctrica por medio de aditivos como trozos de acero, fibras de acero, corpúsculos de cristal recubierto de plata, grafito o negro de carbón. La fracción de estos aditivos está normalmente limitada a un pequeño porcentaje en volumen para poder continuar explotando las propiedades del polímero orgánico en sí mismo. Como resultado, la conductividad eléctrica de estos materiales es al menos cuatro órdenes de magnitud inferior a los metales conductores, en algunos casos la conductividad se reduce

Conductores Eléctricos

hasta en 14 órdenes de magnitud. Estas relativamente bajas conductividades son adecuadas o incluso deseables ya que estos materiales se utilizan principalmente para descargar o prevenir la carga estática y para proteger de campos y ondas magnéticas y eléctricas de alta frecuencia. Cuando se llega a aplicaciones potenciales para polímeros conductores, los cables de energía y de transmisión de datos están difícilmente a la cabeza de la lista. Aunque un ponente en una reunión sobre el tema presentó un modelo de demostración en el cual una bombilla incandescente (intensidad estimada: 50mA) se conectaba a una batería vía una varilla de polímero eléctricamente conductor (sección transversal estimada: 10mm²). La densidad de corriente del conductor estaba, sin embargo, alrededor de tres órdenes de magnitud por debajo de la que hubiera sido con conductor de cobre o aluminio. Si este tipo de materiales van a reemplazar a los metales en determinadas aplicaciones, parece que va a ser en forma de finas láminas o extremadamente finas capas depositadas por deposición de vapor que están diseñadas para aportar una protección contra campos eléctricos. De hecho, dichas aplicaciones están ya bastante bien establecidas. Si la carcasa de plástico de un dispositivo que tiene que protegerse contra la emisión de radiación o protegerse contra los efectos de radiación incidente ya está (ligeramente) conduciendo, entonces se puede prescindir de este tipo de protección antiestática. Está por supuesto perfectamente justificado el preguntar por qué uno querría reemplazar una carcasa metálica por otra de plástico, cuando el metal de todas formas ofrece las propiedades de apantallamiento requeridas y cuando el plástico tiene que primeramente tratarse para hacerlo conductor mediante la adición de aditivos metálicos. La respuesta reside en la facilidad de extrusión de los polímeros de plástico y el mayor ámbito que ofrecen en términos de coloración y diseño. Pero, ¿quién sabe?, quizás los metales encuentren una forma de salvar esa distancia. Los polímeros intrínsecamente conductores se descubrieron hace alrededor de 25 años, con un polímero de ese tipo con una conductividad parecida a la del conductor metálico. El problema con estos materiales, sin embargo, es que no se pueden fundir, no se pueden moldear y son insolubles - convirtiéndolos en prácticamente imposibles de procesar. También son susceptibles de ser atacados por el oxígeno cuando se exponen a la intemperie y pierden bastante rápido su conductividad, lo que resulta en no solo una dependencia direccional sino que también varían fuertemente según el proceso de fabricación utilizado. Es obvio que esos materiales con estas propiedades nunca se seleccionarán en favor de los metales conductores, que ofrecen una muy superior procesabilidad y estabilidad. En un número de situaciones se ha probado que es posible mejorar las propiedades intrínsecas de los polímeros conductores, pero esto siempre ha conllevado una reducción de la conductividad eléctrica del material en varios órdenes de magnitud. Estos materiales son utilizados en las mismas áreas limitadas que los polímeros conductivos llenos, así denominados en función de la carga estática acumulada. Uno de esos materiales es el PEDT (Polietileno dioxitiopeno), que se usa para proporcionar recubrimientos antiestáticos para película fotográfica. Sin el recubrimiento del PEDT, la película acumularía carga estática durante el proceso de formación fotográfica. Si se permite su acumulación, la carga puede descargarse como un flash de luz que podría volver a exponer la película y arruinar la imagen original. La imagen final se vería como si se hubiera tomado en una tormenta.

Debería mencionarse que los polímeros eléctricamente conductores se han usado durante algún tiempo en sistemas de transmisión de potencia, específicamente en cables de alta tensión, donde los así llamado "semiconductores de capa" son introducidos una vez alrededor del conductor y otra vez entre el aislante interno y el recubrimiento exterior del cable, éste último sirviendo para proveer de control de campo de potencia. Esto permite mantener el campo eléctrico tan homogéneo como es posible y evita picos locales en el campo eléctrico que podrían causar descargas parciales y la gradual destrucción del cable, o del aislante.

Conductores Eléctricos



Figura 11: Las escobillas de grafito de un compuesto de cobre sinterizado son una alternativa a los cepillos de carbono puro



Figure 12: La estructura de un superconductor: El cobre es un componente esencial de los cables superconductores

A pesar de las actualmente limitadas aplicaciones de los polímeros conductivos, un visionario del Kabelwerk Brugg no fue disuadido de publicar un artículo en un panfleto informativo del IEC en el cual describía un escenario para "Redes de Potencia 2050", donde cada red se compone exclusivamente de cables que están hecho de polímeros conductivos que pueden por lo tanto ser fabricados en un solo proceso de extrusión. La excepcionalmente alta capacidad de aislamiento del material aislante (alrededor de 100kV/mm) podría aparentemente permitir que la alta tensión fuese utilizada en áreas residenciales. Los electricistas se estremecerían sin duda alguna ante tal perspectiva. La alta capacitancia de estos cables ciertamente colabora en la reducción de problemas electromagnéticos, pero los cálculos sobre los que se basa esta visión de futuro ignoran completamente las condiciones de fallo de estos cables y no tienen en cuenta un buen número de factores importantes.

2.4 Superconductores

La superconductividad es un fenómeno físico que exhiben ciertos materiales en los cuales a temperaturas inferiores a una temperatura crítica específica de cada material, los materiales pierden su resistencia óhmica convirtiéndolos en principio en posibles conductores de la electricidad sin pérdida de corriente. El descubrimiento de superconductores a alta temperatura hace algo más de 20 años dio lugar a un increíble aumento de la temperatura crítica desde los alrededor de 4K antes del descubrimiento hasta los 100 K después. En otras palabras, la distancia desde la temperatura crítica al cero absoluto aumentó en un factor de 25. En pocas palabras, se podría decir que el uso de superconductores en aplicaciones de repente se volvió 25 veces más fácil. Por el momento, para los así llamados superconductores a alta temperatura, el medio refrigerante es el nitrógeno líquido, el cual es mucho más barato de producir que el helio líquido que se necesitaba anteriormente. Pero 100 K es aún -173°C y el esfuerzo que requiere mantener esta temperatura es mucho. Pero este esfuerzo puede que valga la pena, particularmente en aplicaciones que explotan otra propiedad de los superconductores: su habilidad para conducir densidades de corriente aproximadamente 100 veces mayores que las de los metales, donde las densidades de las corrientes vienen limitadas por los efectos térmicos. Los semiconductores se utilizan para generar campos magnéticos extremadamente potentes para investigación en física nuclear y para diagnosis médica. También se utilizan en la construcción de maquinaria ligera para aplicaciones en las que el volumen o el peso son de crucial importancia. Durante mucho tiempo estas aplicaciones altamente especializadas permanecieron generalmente desconocidos para el gran público. Una asociación de industrias se ha establecido ahora en Alemania y está trabajando en la promoción de aplicaciones de los superconductores y mejoran el reconocimiento público de estos desarrollos técnicos. Las aplicaciones incluyen un sistema de propulsión para un buque de la marina y una turbina de 8MW. Los limitadores de corriente de cortocircuito en material superconductor también parece que vaya a revolucionar la ingeniería de redes energéticas. Además de la temperatura crítica, otro parámetro importante de cualquier superconductor es su densidad de corriente de saturación, que es la corriente a la cual la superconductividad colapsa tan repentinamente como aparece. La solución más simple a este problema consiste en un conductor metálico convencional (generalmente de cobre) que rodea el superconductor y que lleva la corriente durante un período de tiempo muy corto hasta que el cortocircuito ha terminado, con la corriente limitada por la resistencia óhmica del metal conductor.

Los numerosos artículos en los últimos años sobre el potencial que tienen los semiconductores en el ahorro energético deberían, sin embargo, ser tomados con un punto de escepticismo. Los componentes de las plantas de energía sobre los que hemos estado hablando, tales como cables subterráneos de extra alta tensión y grandes transformadores, ya tienen eficiencias bastante por encima del 99%. De hecho, un transformados de alta potencia ($>800\text{MVA}$) posee una eficiencia del 99.75% a plena carga, y del 99.8 a media

carga. En redes de distribución como las que hay en Alemania, Austria y Suiza, no más del 5% de la energía eléctrica se pierde a lo largo del camino entre las estaciones de generación eléctrica y el consumo doméstico, y la mayor parte de ese 5% se pierde en la altamente ramificada red de distribución de baja tensión. Los transformadores de distribución tienen eficiencias de "solo" un 98,5% a plena carga y del 99% cuando operan a la mitad de sus posibilidades. Incluso si las pérdidas del cobre a media carga son un cuarto de su valor bajo condiciones de carga completa, la energía necesaria para refrigerar el transformador hasta las temperaturas criogénicas de un superconductor se mantienen constantes. Un (relativamente grande) transformador de distribución con una salida nominal de, digamos, 1MVA y pérdidas de 15kW (o significativamente menos de 5kW cuando opera a media carga) debería mantenerse a una temperatura de 100K para conseguir algún tipo de ahorro energético. E incluso entonces, solamente las pérdidas del cobre serían eliminadas, no las pérdidas debidas al hierro que de hecho contribuyen significativamente a los costes de ciclo de vida del transformador.

Los cálculos realizados muestran que para conseguir un balance positivo de energías en un cable de alto voltaje subterráneo son necesarias potencias de transmisión de más de 5 GW. Ello corresponde a la generación total de cuatro plantas nucleares. Pero un cable de este tipo no existe simplemente porque no hay demanda de él y no parece que vaya a haberla en el futuro. El modelo de cálculo es, por tanto, puramente académico y no tiene utilidad práctica.

Ha habido también informes de ahorros energéticos de hasta el 50% si la turbina mencionada anteriormente se equipase con un generador superconductor. Para comenzar, la expresión "hasta el" no suele tener validez ya que solo especifica un extremo, en tanto que el otro extremo en la dirección opuesta y el valor medio no se mencionan. En segundo lugar, lo que significa es, por supuesto, una reducción en las pérdidas, lo que se traduce en un ahorro energético de alrededor del 1% de la energía generada. Los aerogeneradores operan típicamente a plena carga solo unas pocas horas al año. Lo más importante entonces es recordar que las pérdidas del cobre aumentan con el cuadrado de la carga, pero que la refrigeración para un material superconductor es una necesidad constante y debe ser mantenido incluso durante períodos sin viento, siendo la duración de estos períodos impredecibles. Pero también vale la pena recalcar que uno podría también ahorrar un 90% de las pérdidas utilizando conductores convencionales de cobre. La dependencia de la temperatura de la resistencia óhmica del cobre nos permitiría efectivamente crear un "superconductor 90%", pero nadie nunca haría esto, porque simplemente no vale la pena. Finalmente, destacar que las funciones de la superconductividad solo están al tope con corriente eléctrica continua, y solo parcialmente con alterna. Los intentos en el uso de superconductores para evitar las pérdidas óhmicas y con ello ahorrar energía están bien para artículos en periódicos o anuncios políticos, pero tienden a verse comprometidos en las realidades prácticas. Los superconductores, sin embargo, ofrecen aplicaciones extremadamente interesantes en áreas donde los conductores de cobre y plata no se pueden usar.

2.5 Carbono de nuevo: Nanotubos

Hace algunos años los periódicos nacionales comenzaron a escribir sobre algo llamado "nanotubos". Como el mismo nombre sugiere, los nanotubos son minúsculos tubos de grafito enrollado con diámetros de alrededor de 1mm. De acuerdo con estos artículos, estos nuevos nanotubos tienen todo tipo de propiedades beneficiosas, entre ellas "alta conductividad eléctrica". Pero, ¿qué es "alta"? La menor resistividad medida hasta ahora es de $0.34 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ – exactamente 20 veces mayor que la del cobre.

Los físicos parece que también han medido capacidades de conducción de corrientes extremadamente altas en estos nanotubos, con algunas de ellas llegando a

Conductores Eléctricos

10^{11} A/mm². ¿Cómo es esto posible? La respuesta radica en el diminuto tamaño de estos tubos, cuyos diámetros son seis órdenes de magnitud menores que los cables de una típica instalación eléctrica, queriendo decir que su sección transversal es de doce órdenes de magnitud menor. En lo relativo a la sección transversal, un nanotubo tiene por tanto 10^6 veces más superficie disponible que un cable convencional de cobre sobre la cual puede disipar calor - un valor similar al que se puede encontrar entre pequeños y grandes transformadores.^{vii} Sin embargo, si los nanotubos se unen para producir un conductor con una sección transversal de 1 mm^2 , la unión no tendrá mucha más área disponible que un cable convencional, como muestra el siguiente cálculo: un cubo de material "nanotubo" con una longitud de 1 m tiene una resistencia de $0.34 \cdot 10^{-6} \Omega$. Si pudiera ser fabricado, un "nanocable" de 1 m de largo y con un área transversal de 1 mm^2 tendría una resistencia de 0.34Ω . A la densidad de corriente mencionada anteriormente de 10^{11} A/mm² el "nanocable" debería llevar una corriente de 10^{11} A. Las pérdidas energéticas en este "nanocable" de 1 m de longitud serían de:

$$P = I^2 R = 10^{22} \text{ A}^2 \cdot 0.34 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 3.4 \cdot 10^{21} \text{ W} .$$

Todo ello sin mencionar que los nanotubos se destruirían en un nanosegundo. Pero, hasta ahora, esta cuestión no tiene relevancia práctica porque en primer lugar, nadie está pensando en serio el usar estos materiales como conductores eléctricos (se puede encontrar información sobre posibles usos de los nanotubos en el website dedicado a ello) y en segundo lugar, el más largo nanotubo creado hasta ahora es de solo 1 mm. Aunque pueda sonar bastante modesto por sí mismo, hablando de forma relativa, corresponde a una longitud de 1 km en un cable convencional de un diámetro de 1 mm. Y todos sabemos lo importante que es para los físicos ver las cosas relativamente.

¹ Information leaflet i4 'Kupfer / Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung' [*Copper: Deposits, extraction, properties, processing, use*], available from the German Copper Institute (DKI), Düsseldorf, Germany or at: www.kupferinstitut.de

² www.burde-metall.at/iacs.htm

³ www.copper.org/applications/electrical/building/wire_systems.html

⁴ www.copper.motor.rotor.org

⁵ Stefan Fassbinder: 'Eine runde Sache: Kupferrotoren' [*Turning to efficiency: Copper rotors*] in de, 20/2004, p. 68

⁶ Fritz Hengelhaupt: 'Kontaktverbessernde Wirkung von Kontaktpasten für die Elektro-Installation' [*The use of contact pastes in electrical installation work*] in de, vol. 15-16/2001, p. 38

^{vii} Stefan Fassbinder: 'Verteiltransformatoren – Teil 1: Warum überhaupt Transformatoren in Versorgungsnetzen?' [*Distribution transformers – Part 1: Why have transformers in distribution networks?*] in Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik, 1/2005, p. 79