

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

FUNDADA Y SOSTENIDA POR EL CUERPO NACIONAL DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Redactor-Presidente... Excmo. é Ilmo. Sr. D. Leonardo de Tejada, Inspector general del Cuerpo.
Redactores..... Los Sres. Presidentes de las Comisiones regionales de Ingenieros.
 D. Antonio Sonier, Profesor de la Escuela de Caminos.
 D. Manuel Maluquer, Ingeniero del mismo Cuerpo, *Secretario*.
Colaboradores..... Todos los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

SE PUBLICA LOS JUEVES

Redacción y Administración: Puerta del Sol, 9, pral.

GRANDES TRANSPORTES DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El problema que hoy tan frecuentemente se presenta de determinar á qué distancia puede transportarse para su aprovechamiento una energía natural, como la de un salto de agua, se reduce á determinar la mayor tensión que, dado el estado actual de la industria, puede emplearse. El único inconveniente que tiene transportar una gran potencia á una gran distancia, es que el coste del cobre de la línea puede ser tan grande que el interés y amortización del capital empleado compense ó supere el coste del carbón para la producción de la energía en el punto de utilización; pero como el coste del cobre para la misma pérdida ohmica es inversamente proporcional al cuadrado de la tensión, se comprende que subiendo ésta lo necesario, pueda aquél disminuirse cuanto se quiera. Claro está que habría siempre un límite determinado por el menor hilo que presente la suficiente resistencia mecánica (3 mm. de diámetro, por ejemplo); pero el límite que esto impone, y que puede ser prohibitivo para pequeñas potencias, no lo es ya para las de algunos miles de kilowats, que son á las que nos hemos de referir.

Para estas grandes potencias el límite es la tensión que industrialmente puede emplearse, y que se impone, tanto por la construcción de los transformadores, cuanto por los fenómenos que se producen en la línea.

Hasta hace pocos años 5 ó 6.000 voltios eran considerados como un límite del cual no podía pasarse; pero se hizo en América el transporte del Niágara á 11.000 v., y los buenos resultados que se obtuvieron han motivado que se estudie experimentalmente el asunto, y á que se suba aún más la tensión. Así, en Mechanicville, se llegó á 12.000 v.; en Paderno, á 13.500; en Blue Lake, á 25.000; en Snoqualmie, á 29.000; y, según parece, en California, se ha pasado ya la tensión verdaderamente extraordinaria de 40.000 v.

Crean, sin embargo, los especialistas, entre ellos Scott, que puede llegarse industrialmente y sin inconveniente alguno á los 60.000 volts, que sería hoy día la tensión crítica, porque al excederla, las líneas se hacen luminosas, producen sonidos estridentes y fenómenos tales, que hacen imposible toda marcha regular.

Es fácil darse cuenta de la distancia que supone esta tensión. Supongamos para ello que se admite un peso de cobre por kw. de 25 kg. (unas 80 pesetas), que es moderado, y una pérdida ohmica de 0,2. Empleando corrientes trifásicas, y llamando x á la longitud, s á la sección del conductor, i á la intensidad eficaz en cada hilo y tomando $1,8 \times 10^{-6}$ ohm como resistividad del cobre, tendremos

$$3 \times 1,8 \times 10^{-6} \frac{x}{s} \times i^2 = 0,2 \times 1.000$$

$$i = \frac{1.000}{60.000 \sqrt{3}}$$

$$3 s x = 25.000$$

Eliminando éste, estas 3 ecuaciones s ó i , y determinando x , resulta $x = 200$ kilómetros. A esta distancia de transporte puede llegarse, si bien sólo para grandes potencias, pues que por una parte el coste de la línea, independiente del cobre, postes aisladores, etc., que es siempre proporcional á la longitud y no es superior á 2.000 pesetas por kw. para estas altísimas tensiones, se reparte entre la potencia transportada y grava extraordinariamente el kw. cuando aquélla es pequeña, y por otra parte, no queriendo emplear hilos de cobre de menor diámetro de 3 mm., la mínima potencia que se podrá transportar en las condiciones indicadas, será

$$P = \frac{600 \times 63}{25} = 1.500 \text{ kw.}$$

La línea para el transporte á 200 km. de éstos 1.500 kw. costaría

$$38 \times 3.000 + 2.000 \times 200 = 514.000 \text{ pesetas,}$$

ó sean

$$\frac{514.000}{1.500} = 340 \text{ pesetas por kw.,}$$

precio que será ó no conveniente, según las circunstancias del centro de utilización.

Algo podría disminuirse esta potencia de 1.500 km. desde el punto de vista que consideramos, empleando en vez del cobre el aluminio, como ya se ha hecho en Blue-Lake, El Niágara y Snoqualmie, puesto que este metal pesa la mitad á igualdad de conductibilidad que el cobre, y su resistencia mecánica es muy superior á la de éste á igualdad de peso; no es de creer, sin embargo, que se trate nunca de transportar á 200 km. una potencia de menos de 1.500 kw.

Vamos á dar una idea de las dificultades que presentan estas altísimas tensiones y de los resultados de las experiencias hechas en Telluride, Provo, Niágara y East-Pittsburg.

Generadores.—No se ha pasado hasta ahora en ellos de la tensión de 15.000 voltios; pero es muy probable que dentro de poco se llegue á los 30.000 v. Los generadores de 15.000 v., en efecto, han dado excelentes resultados, y en Paderno, por ejemplo, en donde hay máquinas Brown de esta tensión, se disparó una turbina haciendo girar al alternador á una velocidad doble de la normal y haciéndole producir sin avería una tensión próxima á 30.000 v. Es esto suficiente para que los Estados Unidos, dentro de poco, den máquinas de 30 y más miles de voltios. Las máquinas casi exclusivamente empleadas son las de inductor móvil, con polos radiales é inducido exterior fijo.

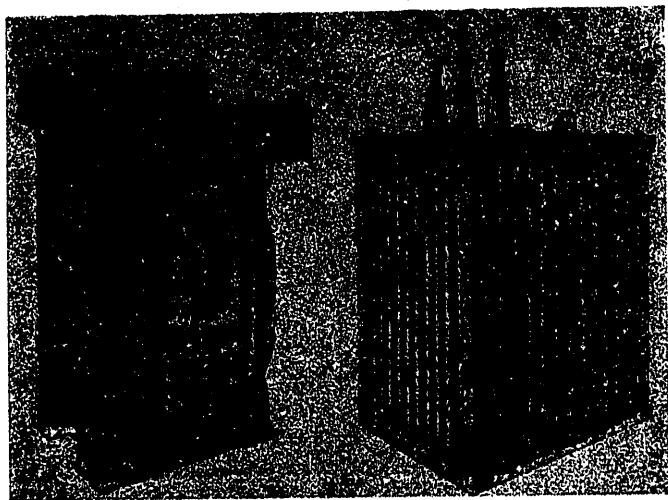
Claro es que estas máquinas de altísima tensión sólo se construyen para grandes potencias de 750 kilowats para arriba, pues que las más pequeñas no tienen suficientes espacios para el aislamiento necesario.

Transformadores.—Se han llegado á producir con transformadores hasta 133.000 voltios en Telluride, si bien esta tensión sólo pudo sostenerse algunos minutos porque saltó un arco entre

las bornas y el hierro, que rompió los tubos de vidrio que aislaban los terminales.

En 1891, para obtener una tensión de 10.000 v. en el transporte de San Bernardino á Pomona, se creyó necesario poner en serie 20 transformadores de 500 v. cada uno; pero al poco tiempo la Westing-house de Chicago bobinó un transformador para 60.000 v. que dió excelentes resultados, y desde entonces se ha hecho el tipo industrial. En él las bobinas primarias y secundarias son muy chatas y tienen muy pocas espiras. Cada bobina está aislada separadamente. Con esto queda muy reducida la diferencia de tensión entre las espiras de cada bobina y entre cada dos bobinas, y se obtiene una mayor superficie de enfriamiento, que es una de las dificultades de todo transformador de gran potencia, y más en los de altísima tensión, puesto que la resistencia de casi todos los dieléctricos disminuye con la temperatura.

Todos estos transformadores están sumergidos en aceite y en cajas provistas de tubos y disposiciones, que originan, por el mismo calor producido, corrientes de aire que enfrían el aceite. Se ha prescindido últimamente de la ventilación artificial con ventiladores ó corrientes de agua, por las complicaciones que esto originaba y por accidentes gravísimos que ocasionaría una interrupción en el funcionamiento de los mecanismos de ventilación.

Fig. 1.^a

La figura 1.^a muestra un modelo de transformador de 50 kw. á 60.000 v., construido por la Westing-house. En ella se ve la caja de ventilación.

Se comprenden las mil dificultades de detalle que ha sido necesario vencer para construir estos tipos; así que casi todos los materiales, sustancias aisladoras, tratamiento del hierro para que sea pequeña y constante con el tiempo la pérdida por histéresis, calidad del aceite, etc., etc., son secretos de fabricación. Estos transformadores tienen un excelente rendimiento, y la caída de tensión, aun con cargas inferiores, es muy pequeña.

Generalmente se construyen para corrientes de baja frecuencia, 25 á 40 ciclos, con el fin de reducir las pérdidas por histéresis y corrientes Foucault.

Aisladores.—Existe tal variedad en sus tipos, que es difícil la elección; en general, parece que no tiene ésta tanta importancia como en un principio se creyó, pues casi todos los ensayados han dado satisfactorios resultados, siempre que estaban bien contruidos.

Como sustancias, se han ensayado el vidrio y la porcelana.

Los aisladores de vidrio son más baratos que los de porcelana, pueden moldearse con formas más complicadas, y sin necesidad de ensayo se aprecia á simple vista cualquier defecto ó grieta en la masa. El vidrio, además como dieléctrico, tiene mucha mayor resistencia á la perforación que la porcelana. En cambio de estas ventajas, los aisladores de vidrio son mecánicamente más frágiles que los de porcelana, y el vidrio es mucho más higrométrico que el esmalte ó vidriado de la porcelana, teniendo, por lo tanto, una conductibilidad superficial muy superior. Esto

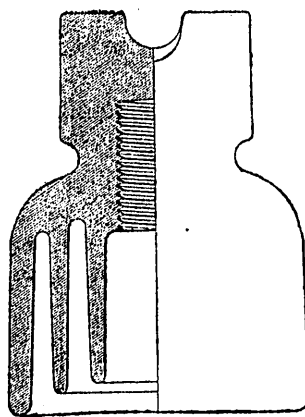
último ha sido causa de que se emplearan aisladores mixtos de vidrio y porcelana, en los cuales, campanas de esta sustancia, recubrían núcleos de vidrio, con lo cual se utilizaban las ventajas de los dos materiales, evitando sus inconvenientes. Estos aisladores mixtos, sin embargo, resultan caros, y parece, por los ensayos hechos en Telluride, que las propiedades higrométricas del cristal no tienen el inconveniente que en un principio se creyó, porque la superficie del aislador está siempre seca, cuando trabaja la línea, siendo insignificante la cantidad de energía eléctrica que esto consume.

Parece, pues, que los aisladores del porvenir serán de cristal; pero hasta ahora no tenemos noticias de que se hayan empleado en ninguna línea industrial.

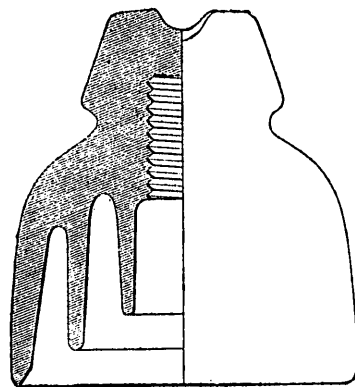
Indicaremos algunos tipos de aisladores con los informes que hemos podido adquirir sobre sus precios y las ventajas ó inconvenientes que á nuestro juicio presenta, suponiendo que se trate siempre de una porcelana perfectamente vitrificada, y que todos los aisladores se ensayen á una tensión doble de la de marcha, desechando los defectuosos.

Para tensiones hasta de 12 á 15.000 voltios, creemos puede usarse el tipo antiguo de triple campana, siempre que tenga un diámetro en la base de 12 cm., por lo menos, una línea de fuga de 30 á 40 cm. y un espesor de porcelana en el cuello (distancia entre el hilo y el soporte) de 1,5 cm. Este tipo, en efecto, es muy sólido; y resulta muy barato y dando al hierro que soporte el aislador una forma tal, que quede á una distancia vertical de 8 á 10 cm. del borde exterior del aislador, no creemos que sean de temer los circuitos cortos por la nieve que se deposite sobre el soporte.

Entre estos modelos indicaremos el de la figura 2.^a (que va á emplearse en Madrid para un transporte de energía desde Colmenar Viejo), que pesa 2 kg., y sólo cuesta 1,25 francos.

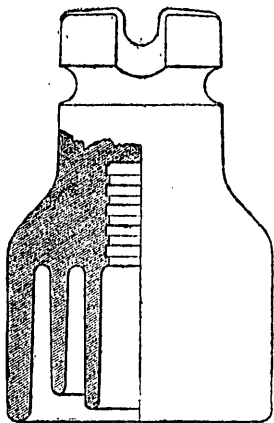
Fig. 2.^a

Del mismo tipo, pero mucho mejor estudiado, es el Brown de la figura 3.^a; pero este aislador, que pesa 3.691 gramos, resulta muy caro: 4,55 francos.

Fig. 3.^a

Para el transporte á Lancey, en el valle de Gresivandam, á

12.000 voltios, se ha empleado el tipo de la figura 4.^a En este tipo se ha aumentado la distancia entre el hilo y el hierro haciendo que éste no llegue a la altura de la garganta; pero esto, que indudablemente es una ventaja eléctrica, es un grave inconveniente mecánico, puesto que la porcelana trabaja a la tracción. Estos aisladores no creo prudente que se empleen como de amarre; y en regiones accidentadas, como son las que en general recorren los transportes de energía, es preciso amarrar el hilo en casi todos los aisladores. Este aislador, además, no parece muy bien estudiado; le encontramos mucha cabeza y muy poca base.

Fig. 4.^a

Los aisladores con aceite, que tan en boga estuvieron un tiempo, están ya definitivamente desechados, pues que el polvo y los insectos hacían la superficie del aceite conductora, y sabido es lo difícil de limpiar estos aisladores con frecuencia.

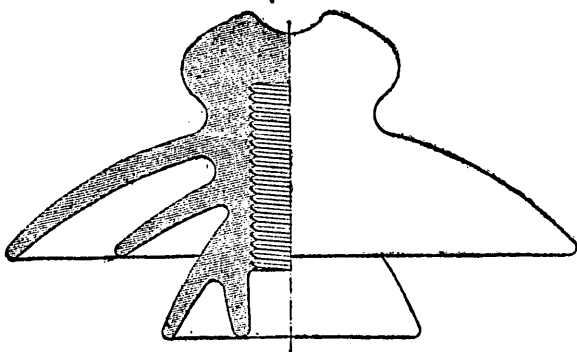
Se han ideado también aisladores con cámaras de aire, con el

Fig. 5.^a

fin de evitar que los remolinos entrasen en las campanas y depositasen las partículas de agua de la niebla. Estos aisladores, de los cuales la figura 5.^a es un modelo, resultan muy caros y frágiles, y las campanas también son muy propensas a llenarse de polvo ó insectos.

Creemos, pues, que para tensiones hasta de 12 á 15.000 voltios el tipo corriente de triple campana bien estudiado y con excelente porcelana es el más conveniente.

Para tensiones superiores hasta 25 ó 30.000 volts puede emplearse el tipo *delta* (figura 6.^a) En este aislador, como se ve,

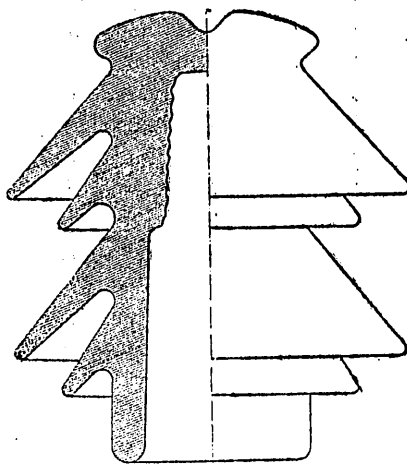
Fig. 6.^a

queda una gran distancia entre el borde de la campana exterior y la traviesa ó cruceta del soporte, y han resistido 100.000 voltios sin que se perfora la porcelana del cuello. Este aislador, que también se ha de emplear en el transporte indicado de Colmar á Madrid, pesa 2,68 kg., y cuesta 2,65 francos.

Al grupo que consideramos, pertenece también el aislador Paderno (figura 7.^a); pero el hierro no sube hasta la garganta, lo cual, como ya se ha indicado, me parece un grave inconveniente; además, este aislador cuesta 3,1 francos.

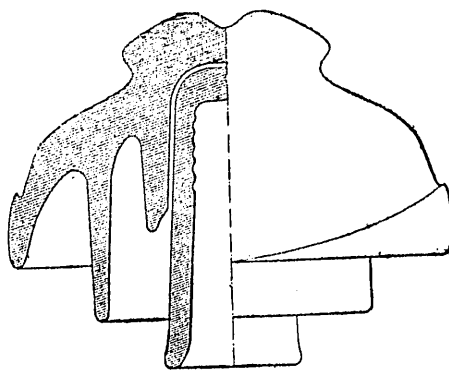
El llamado aislador «Massimo» (figura 8.^a) tiene, á mi juicio, también el mismo inconveniente y es aún más caro, 4,6 francos.

Es, sin embargo, un tipo bien estudiado y responde á la idea moderna de hacer los aisladores de dos fuerzas superpuestas con el

Fig. 7.^a

fin de aumentar la resistencia de perforación de la porcelana. Este aislador parece que da excelentes resultados en el transporte de Paderno á Milán.

Para tensiones superiores á 30.000 voltios no sabemos que haya aisladores industrialmente probados; parece que el tipo

Fig. 8.^a

haya de ser análogo al Massimo aún más grande, y con la pieza interior de vidrio en vez de porcelana.

Para estas altísimas tensiones se ha probado en Telluride suspender los aisladores de la traviesa en vez de colocarlos sobre ella, con el fin de impedir los depósitos de nieve bajo el aislador; pero la complicación á que esto ha dado lugar no ha generalizado el sistema.

En América, donde disponen á bajo precio de maderas excelentes, suelen hacer el soporte de madera (algarrobo, garrofo) herida en parafina, lo cual suministra un aislamiento complementario. Por la misma razón ponen también los aisladores sobre traviesas de madera; pero esta disposición no es conveniente para varias líneas trifásicas, porque aumenta la auto-inducción, con respecto al montaje en zig-zag.

En un próximo artículo nos ocuparemos de los pararrayos y de los fenómenos observados en las líneas de extra alta tensión.

ANTONIO GONZÁLEZ Y ECHARTÉ.

DINAMOS CONMUTATRICES

Cuando las aplicaciones de las corrientes alternativas comenzaron á extenderse, y particularmente cuando empezaron á emplearse éstas para la distribución de la fuerza motriz, fueron objeto de animada controversia las ventajas que ofrecían las corrientes continuas comparadas con las alternas simples ó polifásicas. Unas y otras tenían fervientes partidarios, y mientras los