

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

NUEVO ÁBACO

PARA EL CÁLCULO DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA

El cuadro gráfico que incluye el presente número de la *Revista*, espero que sea de utilidad á sus lectores. Es numeroso el catálogo de ábacos semejantes, diseminados por las obras de electricidad. El insigne Blondel publicó muchos, hace años, en *L'Eclairage Électrique*; la conocida obra de Pacoret *La Technique de la Houille Blanche* inserta algunos de Blondel y otros de diversos autores; también tuvo su boga, hace algunos años, entre los lectores de obras francesas, el librito de Pionchon y Heilmann editado en Grenoble. Entre los autores americanos los hay que han publicado gráficos muy notables, pero su uso no resulta posible para nosotros por la perturbación y desorientación que nos producen sus bizarras unidades. En efecto, aunque respetan las unidades eléctricas internacionales, las secciones de conductores están reemplazadas por los números del calibrador Brown & Sharp, ó por encima del número 0000 de este calibrador las secciones las expresan en «circular mils», cuya traducción á milímetro cuadrado es muy incómoda. Además, las resistencias, reactancias, capacidades, etc., las refieren á 1.000 pies ó á la milla de longitud, todo lo cual cambia de tal manera nuestros hábitos, que no nos son de utilidad sus gráficos, por perder la cualidad esencial de rapidez y claridad.

En el uso de algunos ábacos, he notado—y seguramente ocurre así á muchos Ingenieros—que para numerosos casos prácticos resulta casi tan expeditivo acudir al cálculo numérico, pues el modo de operar es algo complejo y requiere atención cuidadosa, ó llevar, por ejemplo, una parte móvil sobre otra fija. En otros se pretende una precisión que, esencialmente, está vedada al método gráfico de representación. Algunos requieren, para la comparación de diversas soluciones, pasar de unos cuadros á otros, con pérdida de tiempo y riesgo de equivocaciones.

Las cualidades que, á mi juicio, reúne el presente ábaco, son:

1.^a Limitarse á casos prácticos, entendiéndose por éstos aquellos de longitudes de línea hasta 60 ó 70 kilómetros, tensiones hasta 40 ó 50.000 voltios, y frecuencias hasta 60 periodos por segundo.

2.^a No requerir instrucción alguna complicada para su uso, ni tampoco medios auxiliares, como hilos, reglas, etc. La inspección simple del ábaco muestra el modo de manejarlo.

3.^a Todas las líneas son rectas, lo que constituye una ga-

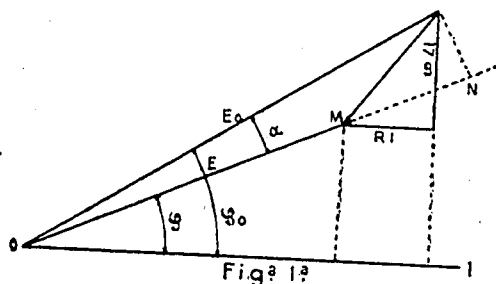
rantía suplementaria de exactitud del dibujo, y también las rectas que por su intersección han de determinar puntos, se cortan siempre bajo ángulos muy satisfactorios.

4.^a Pone en evidencia, con una sencilla ojeada, la influencia de la elección de frecuencia, de la distancia entre conductores, etc.

Expondré el método en que está basado el dibujo, lo cual permitirá comprender razonadamente su uso y dará medio, á quien así lo desee, de interpolar ó extrapolar.

En los casos prácticos, dentro de la escala antes indicada, la capacidad electrostática de las líneas aéreas puede despreciarse sin error digno de tenerse en cuenta, quedando sólo á considerar la resistencia óhmica y la autoinducción.

La caída de tensión puede entonces expresarse en voltios por amperio-kilómetro.



Dibujemos en esta hipótesis el diagrama clásico (fig. 1.^a) en el que, siguiendo la notación usual, representan:

- E tensión en el extremo de línea.
- E_0 tensión en el origen de línea.
- φ retraso de fase en el extremo de línea.
- φ_0 retraso de fase en el origen de línea.
- R resistencia óhmica de un conductor.
- ωL reactancia óhmica de un conductor.
- I intensidad de la corriente.

Siguiendo la observación que casi todos los autores hacen para el cálculo aproximado, podemos tomar como valor de E_0 su proyección ON sobre la dirección de E , con lo que se comete un error igual á $E_0 (1 - \cos \alpha)$, cuyo valor es muy pequeño y prácticamente despreciable, si como ocurre en la casi totalidad de los casos, y nosotros suponemos, la carga es inductora y nunca en avance de fase la intensidad sobre la tensión.

La caída de tensión MN será entonces la proyección sobre E del triángulo de impedancia:

$$MN = RI \cos \varphi + \omega LI \sin \varphi = I (R \cos \varphi + \omega L \sin \varphi).$$

Las consideraciones anteriores se refieren á un solo conductor con relación á un punto neutro.

Si la línea de transporte es monofásica, la caída de tensión será:

$$v = 2 I (R \cos \varphi + \omega L \sin \varphi),$$

y en el caso de ser trifásica,

$$v = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + \omega L \sin \varphi).$$

Bastará, pues, que el ábaco nos proporcione el medio de calcular el valor del paréntesis para un kilómetro de longitud, es decir, la caída de tensión por amperio-kilómetro en un conductor. La caída total se obtendrá después multiplicando el valor hallado por el número de amperios y por el de kilómetros, y, además, por el factor 2 ó el $\sqrt{3}$, según sea el caso.

Caída óhmica de tensión.—En el segundo cuadrante del cuadro gráfico se han dibujado varias rectas partiendo de O , de tal modo que la tangente trigonométrica del ángulo que forman con la línea vertical OO' sea igual al factor de potencia ($\cos \varphi$), que corresponde á la instalación receptora, variando de décima en décima desde 0,5 hasta 1. Si, por consiguiente, se toma en la vertical OO' á partir de O , el valor de la resistencia óhmica r por kilómetro de conductor, la horizontal trazada hasta encontrar á la recta que corresponde (según el valor de $\cos \varphi$), dará el sumando $r \cos \varphi$.

Para mayor claridad del dibujo y comodidad en el uso del gráfico se ha puesto la escala de resistencias (para 15°C . y resistividad de 0,0174) á la izquierda de aquél y, además, los números escritos son los de las secciones del conductor en milímetros cuadrados, que suelen siempre, entre nosotros, servir de entrada para el cálculo.

La línea de trazos indica el modo de operar para el ejemplo á que más adelante nos referimos, en el que los conductores tienen una sección de 50 milímetros cuadrados y $\cos \varphi = 0,8$. La caída óhmica de tensión por kilómetro y amperio es de 0,28 voltios.

Caída inductiva de tensión.—Para el cálculo del segundo término del paréntesis precisa, primeramente, el de ωL . Evitando la función de tres variables, he supuesto á la pulsación ω , para comodidad de cálculo, el valor correspondiente á 100 periodos por segundo, es decir, $\omega = 2\pi \times 100 = 628,3$.

Para valores de la frecuencia diferente de 100 bastará reducir proporcionalmente los valores que se obtengan correspondientes á esta última.

Para la frecuencia 100 periodos, el valor del factor ωL es:

$$\omega L = 628,3 \left[0,5 + 4,605 \log \frac{d}{r} \right] 10^{-4} \text{ henrios por km. (1)}$$

Así, para cada valor de la distancia d entre los conductores que forman la línea, ωL es una función logarítmica del radio r de estos conductores. Pero si en vez de tomar como abscisa el radio en cuestión se toma su logaritmo vulgar, ωL es una función lineal de dicho logaritmo:

$$\omega L = 628,3 [(0,5 + 4,605 \log d) - 4,605 \log r] 10^{-4}$$

De este modo se ha dibujado en el primer cuadrante un grupo de rectas que corresponden á valores de la distancia d entre conductores, escogidos en una escala desde 350 milímetros á 1.500 milímetros. Las abscisas se han tomado según la línea OO' (aunque para la claridad se hayan escrito á la derecha del ábaco) y aparecen, por la misma razón antes indicada, como si

fueran las secciones de los conductores en milímetros cuadrados, cuando en realidad son los logaritmos de los radios de estos conductores.

Todas las rectas son, naturalmente, paralelas, de coeficiente angular igual á $-628,3 \times 4,605 \times 10^{-4} = -0,2893$. Bastado, por consiguiente, determinar los dos puntos extremos de una de las rectas y uno sólo de cada una de las restantes, lo cual simplifica bastante las operaciones con relación al caso en que no se hubiera hecho la anamorfosis.

El valor ωL para una frecuencia de 100 periodos por segundo, está, pues, dado por la distancia horizontal entre OO' y las rectas de referencia. Si no se trata de la frecuencia de 100 periodos, sino de otra inferior f , como es el caso general, habrá que multiplicar el valor hallado por ωL por la relación $\frac{f}{100}$. Esta operación se hace en el gráfico trazando la vertical desde el punto correspondiente de la recta que en cada caso proceda, hasta la línea horizontal que limita el gráfico por debajo; el valor buscado es el segmento de vertical comprendido entre este límite y la recta inclinada que, partiendo de O , corresponde á la frecuencia. Es esta consecuencia de que dicho último haz de rectas se ha trazado de modo que la tangente del ángulo que forman con la horizontal es precisamente $\frac{f}{100}$.

Ya sólo falta, para obtener la caída inductiva de tensión, multiplicar por $\sin \varphi$ el valor obtenido para ωL . A este propósito se ha trazado, pasando por O , otro haz de rectas cuyo ángulo con OO' tiene por tangente $\sin \varphi$.

En virtud de lo dicho, el modo de usar la mitad derecha del cuadro, será:

1.º Entrar con el valor de la sección de los conductores y trazar una horizontal hasta su encuentro con la recta del haz paralelo que corresponda á la distancia fijada entre conductores.

2.º Desde el punto así hallado, una vertical hasta encontrar á la recta que proceda en el haz relativo á frecuencias.

3.º Desde este punto, otra vez horizontal, hasta la intersección con la recta que corresponda en el haz de factores de potencia; y

4.º Vertical hasta el límite inferior del cuadro.

Desde O hasta el punto así obtenido, leeremos la caída inductiva de tensión por amperio y kilómetro. La suma de este valor y del correspondiente á la caída óhmica, dará la pérdida total de tensión por amperio y kilómetro; suma que deberá multiplicarse por I , por la longitud de línea y por el factor 2 ó el $\sqrt{3}$, según el sistema sea monofásico ó trifásico.

Las líneas de trazos del ábaco muestran la aplicación al ejemplo siguiente:

Potencia trifásica en la llegada de línea.....	5.000 kv.
Tensión á la llegada.....	30.000 v.
Longitud de línea.....	45 kms.
Distancia entre hilos conductores.....	750 mm.
Frecuencia.....	50 periodos por 1"
Factor de potencia en la llegada.....	$\cos \varphi = 0,8$.
Sección de cada conductor.....	50 mm ² .

La intensidad es:

$$I = \frac{5.000.000}{\sqrt{3} \times 30.000 \times 0,8} = 120,3 \text{ amp.}$$

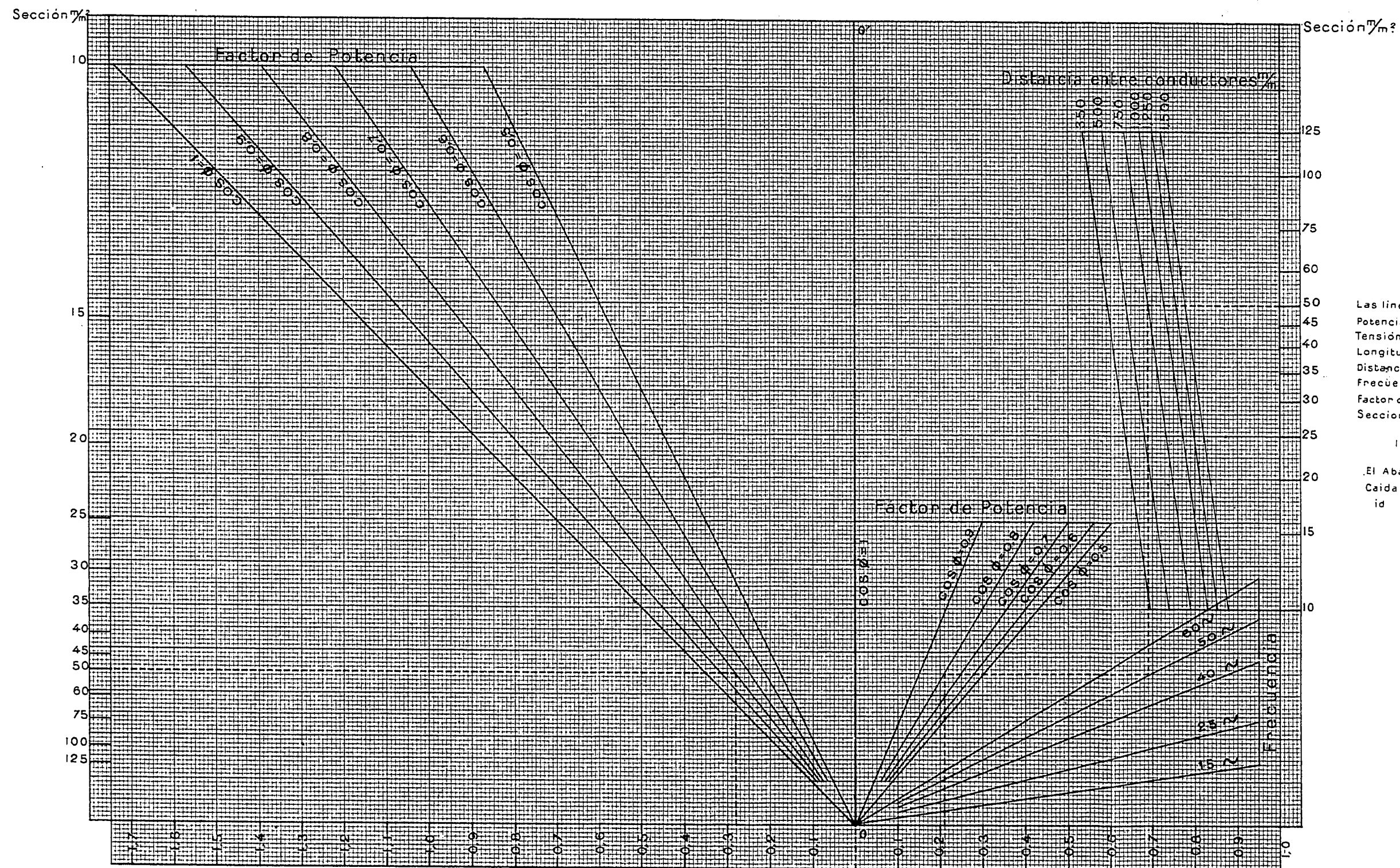
El gráfico indica que la caída óhmica de tensión es 0,28 voltios, y la caída inductiva 0,21 voltios. En total, 0,49 voltios por amperio-kilómetro.

La caída total de tensión será, pues:

$$v = \sqrt{3} \times 120,3 \times 45 \times 0,49 = 4.590 \text{ voltios.}$$

(1) Supuestos los conductores colocados simétricamente.

ABACO PARA EL CÁLCULO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA



EXPLICACIÓN

Las líneas.....muestran el uso del abaco aplicado al ejemplo:
 Potencia trifásica en el receptor.....5.000 Kw
 Tensión compuesta.....30.000 voltios
 Longitud de la línea.....45 Km
 Distancia entre conductores.....750 m
 Frecuencia.....50 periodos p.l.
 Factor de potencia en el receptor.....0.8 (cos φ)
 Sección de cada conductor.....50 mm²

$$\text{Intensidad } I = \frac{5.000.000}{\sqrt{3} \times 30.000 \times 0.8} = 120,3 \text{ amp}$$

El Abaco da:

Caída ohmica por amp. Km.....0,28 voltios
 id inductiva.....0,21 " " " " " "
 Total.....0,49 voltios

Caída total de tensión:

$$\sqrt{3} \times 45 \times 120,3 \times 0,49 = 4.590 \text{ voltios}$$

Regulación de tensión:

$$\frac{4.590}{34.590} = 13,2 \%$$

Pérdida en línea:

$$3 R I^2 = 680 \text{ Kw.} = 11,9 \%$$

Caída ohmica de tensión }
 Voltios por amp. Kilómetro }
 Para líneas monofásicas.....Caída total de tensión= 2 x Intensidad x Longitud x α.
 trifásicas.....id id = $\frac{2}{\sqrt{3}}$ x x α.

Si para comprobación calculáramos exactamente, según la figura 1.^a, la caída de tensión, el desarrollo de los cálculos sería el siguiente:

$$E_0 = \sqrt{(E \cos \varphi + RI)^2 + (E \sin \varphi + \omega LI)^2}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{E \cos \varphi + RI}{E_0}$$

$$E = \frac{30.000}{\sqrt{3}} = 17.321 \text{ voltios.}$$

$$E \cos \varphi = 17.321 \times 0,8 = 13.856.$$

$$E \sin \varphi = 17.321 \times 0,6 = 10.392.$$

$$RI = 0,348 \times 45 \times 120,3 = 1.884.$$

$$\omega LI = 0,345 \times 45 \times 120,3 = 1.867.$$

$$(E \cos \varphi + RI)^2 = 15.741^2 = 247.779.081.$$

$$(E \sin \varphi + \omega LI)^2 = 12.260^2 = 150.307.600.$$

$$E_0 = \sqrt{398.086.681} \quad \log E_0 = \frac{8,5999}{2} = 4,29995.$$

$$E_0 = 19.960 \text{ v.}$$

$$\text{Caída de tensión} = \sqrt{3} [19.960 - 17.321] = 4.571 \text{ voltios}$$

La concordancia con el valor hallado con el gráfico, igual á 4.590 voltios, es bien satisfactoria.

La caída de tensión proporcional, ó como suele decirse, la regulación, será:

$$\frac{2.639}{19.960} = 13,2 \text{ } \%$$

La diferencia de fase en el origen de la línea corresponderá á $\cos \varphi_0 = \frac{15.741}{19.960} = 0,788$. El ángulo φ es de $36^\circ 50'$ y el φ_0 de 38° .

El ángulo α de la fig. 1.^a vale, pues, solamente $1^\circ 10'$, cuyo $\cos \alpha = 0,9998$. El error cometido al suponer $\cos \alpha = 1$ (hipótesis en que nos hemos basado para dibujar el ábaco) es sólo, por consiguiente, en este ejemplo, de $0,02 \text{ } \%$.

La pérdida de energía es:

$$3 RI^2 = 3 \times 1.884 \times 120,3 = 680 \text{ kv.,}$$

que proporcionalmente representa:

$$\frac{680}{5680} = 11,9 \text{ } \%$$

El ábaco, como al principio anticipábamos, permite ver en seguida la influencia de la frecuencia que se elige; la del retraso de frase y de la distancia entre conductores. En él se ve claramente cómo las frecuencias bajas reducen considerablemente la caída inductiva de tensión.

Como es sabido, cuando se trata de modernos transportes de energía dedicada exclusivamente á motores y con un factor de potencia relativamente pequeño (ejemplo, los ferrocarriles eléctricos), se limita la frecuencia á 25, 15 y aun menos períodos por segundo.

Por último, el cuadro gráfico puede emplearse útilmente en los casos de líneas excepcionales, no para limitar el cálculo á su uso, sino á modo de comprobación de que no hay en los cálculos equivocaciones groseras, de igual manera que usamos la regla de cálculo para comprobar, con el mismo fin, operaciones numéricas complicadas.

L. S. CUERVO.

DATOS

REFERENTES A LA INFLUENCIA QUE HA EJERCIDO LA CONSTRUCCIÓN DEL CANAL DE URGEL EN LAS CONDICIONES DE AQUELLA COMARCA

POR D. CARLOS CARDENAL

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1).

El Canal de Urgel se terminó en el año 1862, pero hasta el año 1864 no se empezó la explotación del riego.

Población.

Los censos de 1860, 1887, 1900 y 1910 dan el resultado siguiente para los 46 municipios que se comprenden en la zona regable, incluso el de la capital de la provincia (Lérida) que también riega aunque en pequeña parte:

	Habitantes.
Año 1860.....	67.841
» 1887.....	73.560
» 1900.....	80.141
» 1910.....	90.741

En el primer período de veintisiete años, aumentó la población en 5.719 almas que representa un 8 por 100 correspondiendo por año un 3 por 1.000; en el segundo, de trece años, el aumento fué de 6.581, equivalente á un 9 por 100 y por año de 7 por 1.000; en el tercero, de diez años, correspondió un aumento de 13 por 100 y por año 13 por 1.000.

Antes del año 87 puede decirse que los riegos fueron embrionarios; después ha ido creciendo en proporción notable la utilización del agua y mejorando bastante los procedimientos de cultivo y paralelamente el aumento anual de población ha pasado de 3 á 7 y á 13 por 1.000.

Progresos del cultivo.

Se ha dicho que los riegos fueron embrionarios antes del año 87 del siglo pasado; esto y su progresivo aumento posterior, lo prueban las siguientes cifras tomadas de estadísticas de la Compañía de los Caminos de hierro del Norte.

	AÑOS		
	1886 Toneladas.	1900 Toneladas.	1912 Toneladas.
Peso de los abonos recibidos en las estaciones del ferrocarril de Zaragoza á Barcelona comprendidas en la comarca de Urgel, Bell-lloch, Mollerusa, Bellpuig y Anglesola.....	7,0	2.411,3	7.556,0
Idem íd. íd. en las del ferrocarril de Lérida á Tarragona Puigvert, Artesa, Juneda y Borjas.....	3,4	277,1	1.978,4
TOTAL.....	10,4	2.688,4	9.534,4

El paralelismo, pues, entre el aumento de población y el progreso en los procedimientos del cultivo, directamente relacionado con el consumo de abonos y por ende con la explotación del riego, no puede ser ni más evidente ni más notable.

(1) Memoria presentada al Congreso nacional de Riegos é industrias anejas de Zaragoza.