Ing. Renato E. Salazar

División Técnica Energía Eléctrica y Fuerza Motriz

Empleo de conductores de acero galvanizado en líneas de transmisión y distribución de energía

I.--Introducción.

El presente estudio tiene por objeto determinar bajo qué condiciones los conductores de acero galvanizado pueden emplearse en forma ventajosa en la transmisión de energía eléctrica.

Estas condiciones pueden ser de índole eléctrica, económica o mecánica. entre las cuales, las más importantes, podrían definirse así:

1.° La regulación del voltaje de la línea debe ser aceptable;

2.° El mayor costo de la pérdida anual de energía originada por el empleo de un material de mayor resistencia eléctrica, debe estar compensado por el menor costo anual proveniente de una inversión menor; y

3.° La resistencia mecánica del conductor en estudio, no debe ser inferior a la de los conductores de tipo convencional (cobre o aluminio).

Respecto a la segunda condición, puede decirse que es evidente que, a igualdad de costo anual de la transmisión (pérdidas + costos del capital) con conductotores de cobre, por ejemplo, el empleo del conductor de acero es ventajoso económicamente, debido a su menor costo inicial.

Respecto a la tercera condición, puede decirse que el conductor de acero la satisface ampliamente, lo que deja margen todavía para una posible disminución de costo de las líneas debido al empleo de tramos de mayor longitud; pero no he considerado tal posibilidad en el presente estudio, por no ser siempre posible dicha economía debido a consideraciones de otro orden.

El estudio se ha hecho para el caso de líneas con consumo concentrado en su extremo receptor, por ser el caso más frecuente en nuestro país; siendo el caso de varios consumos concentrados en diferentes puntos, reducible al primero.

II.—Conclusiones.

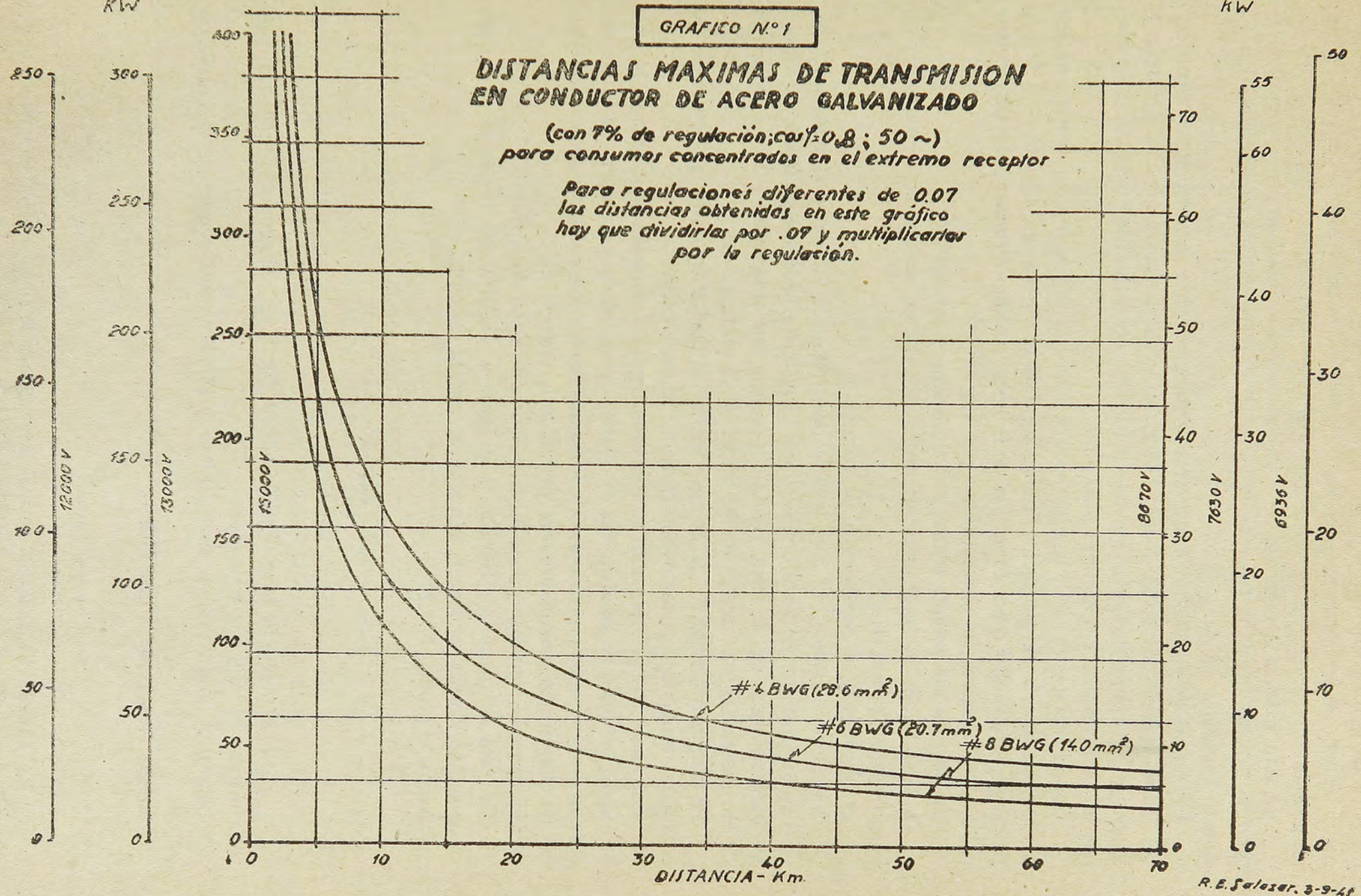
Mediante el gráfico N.° 1 es posible determinar la zona de posible aplicación de conductores de acero galvanizado corriente, ateniendo a las exigencias de regulación del voltaje. Este gráfico está hecho para tres secciones comerciales de con-

GRAFICO N.º 1

DISTANCIAS MAXIMAS DE TRANSMISION EN CONDUCTOR DE ACERO GALVANIZADO

(con 7% de regulación; cos f = 0,8 ; 50 ~)
para consumos concentrados en el extremo receptor

Para regulaciones diferentes de 0.07
las distancias obtenidas en este gráfico
hay que dividirlas por .07 y multiplicarlas
por la regulación.



ductores de acero corriente para tres voltajes de distribución, que son los más comunes dentro de los sistemas urbanos o rurales en nuestro país y para los voltajes al neutro respectivo, en caso de distribuciones monofásicas.

En este gráfico la potencia en Kw sería la potencia máxima por transmitir al final de la vida útil de la línea, en el caso de un consumo que experimente un crecimiento regular.

El empleo de conductores de aceros especiales para distribuciones eléctricas (1), como puede verse en el Anexo 1, conduce a curvas prácticamente idénticas a las del gráfico para distancias mayores a 10 Km., obteniéndose un notable mejoramiento para distancias inferiores a 10 Km.

Cuando en una línea de conductores de fierro la regulación del voltaje no sea posible mantenerla dentro de los límites aceptables, ya sea por aumento de la potencia por transmitir o por extensión de la línea, podrían recomendarse los siguientes medios sucesivos de mejoramiento por etapas:

a) Adoptar un sistema trifásico si el sistema es monofásico;

b) Instalación de condensadores series, en el caso de que el consumo es de bajo factor de potencia; y

c) Instalación de reguladores de voltaje.

Mediante el gráfico N.° 2 es posible determinar la sección y el material (acero o cobre) más conveniente desde el punto de vista económico cuando se conoce las características de la línea (voltaje, potencia por transmitir y factor de carga de esta potencia) y el precio medio anual de la energía.

El conductor de acero de 24 mm² marca la transición entre las dos zonas de aplicación económica de los conductores de acero y cobre.

Con estos dos gráficos sólo se pretende dar una solución aproximada al problema del empleo de conductores de acero, dependiendo gran parte de la aproximación en la elección o predicción de los datos requeridos, como ser: potencia máxima de transmisión, factor de carga, precio de la energía, etc.

El ejemplo siguiente puede ilustrar el uso de estos dos gráficos:

Se trata de transmitir 100 Kw. a 10 Km. a 13,2 Kv. El precio de la energía es de $ 0.40/Kwh y el factor de carga se estima en 40%.

Según el gráfico N.° 2

$$\frac{W\,f}{E} = 3{,}03$$

y para un precio de la energía de $ 0.40 por Kwh., el conductor recomendado estaría entre N.° 6 y N.° 8 de acero.

Según el gráfico N.° 1, para 10 Km. y 13,2 Kw, se recomienda el conductor N.° 6.

Luego, se adoptaría este último.

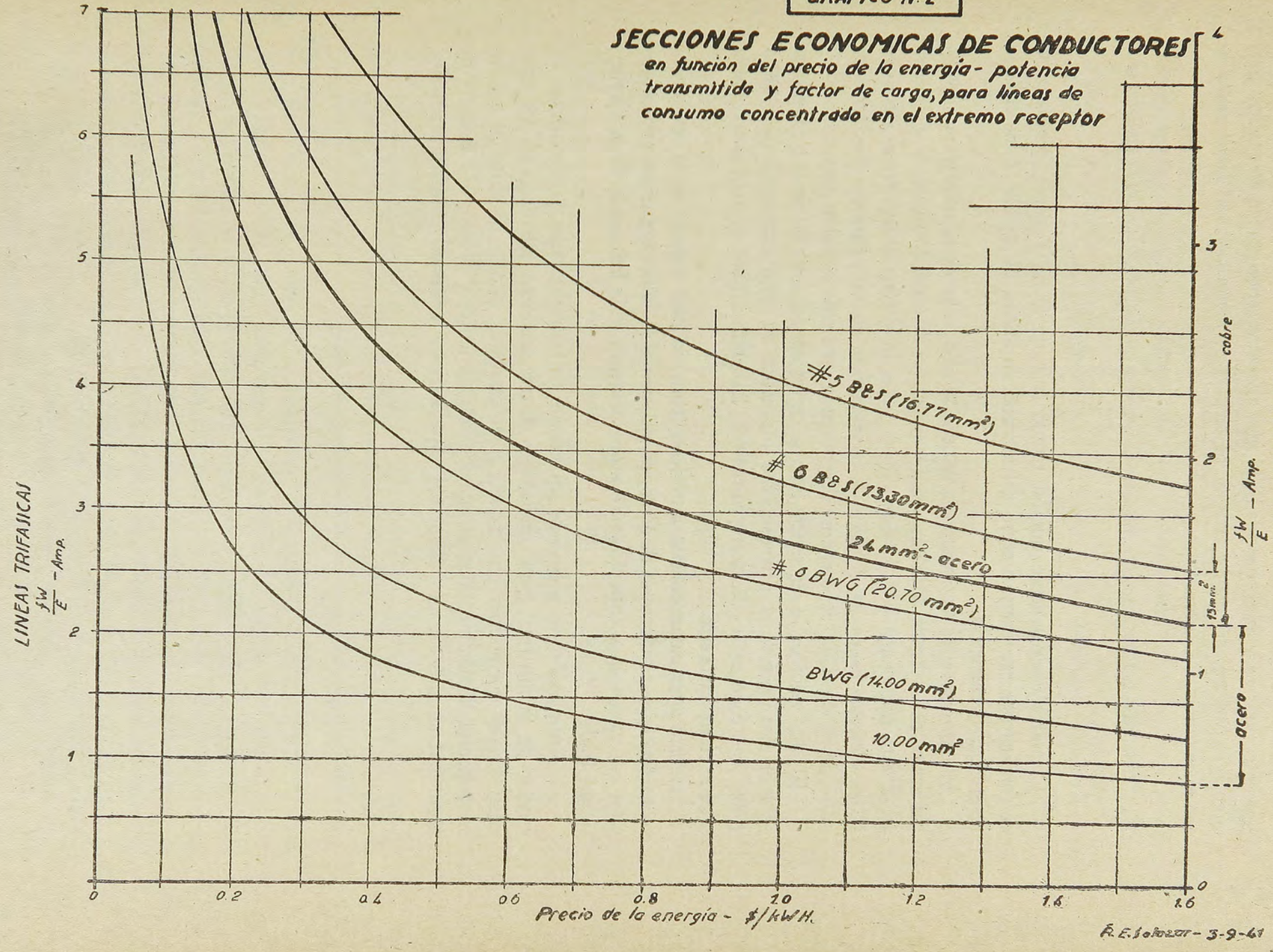
---

(1) Por ejemplo: El conductor «crapo» fabricado por la Indiana Steel and Wire Co. y el «Amerductor» fabricado por la United States Steel Co.

GRAFICO Nº 2

SECCIONES ECONOMICAS DE CONDUCTORES

en función del precio de la energía - potencia transmitida y factor de carga, para líneas de consumo concentrado en el extremo receptor



R. E. Salazar - 3-9-61

De la observación de estos dos gráficos, es posible concluir que el empleo de conductores de acero galvanizado es posible hacerlo con las ventajas económicas consiguientes, en mucho mayor escala de lo que aparentemente se cree en nuestro país cuando se prefiere, sin mayor estudio, el empleo de materiales más caros, como lo son el aluminio o el cobre.

III.—Límites de aplicación desde el punto de vista de la regulación del voltaje.

El mayor inconveniente que ha tenido hasta la fecha el empleo generalizado de conductores de fierro o acero galvanizado en líneas, es debido a su elevada resistencia y reactancia.

El alto valor de la resistencia se debe al alto valor de la resistividad propia del acero (del orden de 80 Ω/mm. para conductores de acero corriente) y al aumento de ésta ocasionada por el «skin effect» y por la histéresis magnética; estos dos últimos efectos hacen que el valor de la resistencia efectiva para un conductor de acero a una densidad de corriente determinada, sea más o menos incierta.

El alto valor de la reactancia interna de los conductores de acero o fierrro, se debe al alto valor de la permeabilidad magnética de estos materiales (μ = 100 a 1,000 para conductores de acero corriente). El «skin effect» es aquí despreciable y tiene efecto favorable.

Debido a las circunstancias anteriores, para adoptar valores de la resistencia y reactancia en conductores de acero, es indispensable atenerse a datos experimentales que tomen en cuenta el tipo de acero ensayado y la frecuencia de la corriente empleada.

A continuación se acompaña un cuadro de las resistencias y reactancias en función de la corriente, para conductores de tres secciones diferentes en dos tipos de materiales que podrían considerarse como extremos, esto es, un material que correspondería al alambre de acero galvanizado corriente, y el otro, al conductor de acero galvanizado (de tres alambres) especialmente diseñado para transmisiones.

CUADRO N.° 1

RESISTENCIAS Y REACTANCIAS INTERNAS DE CONDUCTORES DE ACERO GALVANIZADO A DIFERENTES CORRIENTES Y A 50 CICLOS

Tamaño	Corriente Amp.	Acero Corriente (1)		Acero especial (2)	
		Resistencia Ω/Km	Reactancia Ω/Km	Resistencia Ω/Km	Reactancia Ω/Km
N.° 4 BWG	1	5.00	1.02	5.00	0.86
28.8 mm²	2.5	5.63	1.25	5,05	0.92
	5	6.26	2.16	5.12	0.93
	10	8,25	3.52	5.23	1.05
	15	10.30	4.30	5.33	1.20
N.° 6 BWG	1	7.20	1.15	7.00	0.95
20.7 mm²	2.5	7.74	1.82	7.03	1.00
	5	8.65	2.72	7.09	1,06
	10	11.03	4.42	7.21	1.18
	15	12.81	5.32	7.39	1.30
N.° 8 BWG	1	10.60	1.62	10.60	1.02
14.0 mm²	2.5	11.20	2.50	10.65	1.09
	5	12.34	3.62	10.75	1.17
	10	15.25	5.75	10.92	1.26
	15	16.30	6.37	11.15	1.35

(1) Obtenidas de los gráficos dados por H. B. Dwight en «Transmission Line Fórmulas». Van Nostaand. 1925.

(2) Obtenidas de un promedio de datos por la «Indiana Steel y Wire Co. para el conductor «Crapo Htc-130» y por la United States Steel Co.» para el conductor «Amerductor S3».

Basado en los valores de la resistencia y reactancia obtenidas en el Cuadro N.° 1 para el acero doble galvanizado corriente, se ha calculado el gráfico N.° 1 que permite determinar la distancia máxima de transmisión con una regulación del voltaje determinada, para diferentes potencias a los voltajes de 15-13.2 y 12 Kv.

La regulación admisible adoptada fué de 7%. Se ha adoptado esta cifra como un valor medio prudente para la caída máxima de voltaje de la línea, en atención a los siguientes hechos:

Las líneas de que se trata serían líneas rurales, en donde una variación de voltaje de 7.5% en más o en menos (3) podría aceptarse como satisfactoria. Esto da una variación total de 15%.

(3) Según el Reglamento de Explotación de Servicios Eléctricos.

La caída de voltaje máxima en la red de baja tensión, se ha considerado de 3.5% y la regulación del transformador de bajada, de 4%.

Se ha supuesto que en el punto de alimentación de la línea existe una variación del voltaje no superior a 3%, ya sea porque se cuenta con un medio automático de regulación, o, porque es posible cambiar los «taps» en los transformadores de la línea Troncal en diferentes períodos del año.

Las variaciones máximas adoptadas para la red de baja tensión y punto de alimentación, no serán, en general, coincidentes con la de la línea, tampoco lo serán las de los transformadores de bajada en caso de existir más de uno. En atención a las consideraciones anteriores, se ha supuesto una asignación de las caídas de tensión en las diferentes etapas de distribución en la forma siguiente:

punto de alimentación	:	2 %
transformador	:	3.5 %
red de baja tensión	:	2.5 %
Total, menos línea	:	8 %
Quedando para la línea: 15 — 8 =		7 %

Hay que tener presente, además, que en general, el valor de 7% sólo se alcanzará, en unos pocos momentos, en los últimos años de la vida para la cual la línea ha sido diseñada. Cuando las condiciones de la regulación en los dispositivos adyacentes a la línea, sean diferentes, o las exigencias de la variación del voltajs en el consumo, sean otras, el gráfico N.° 1 puede aplicarse con las correccionee que en él se indican.

IV.—Límite de aplicación desde el punto de vista económico.

El límite de aplicación determinado por la exigencia de la regulación del voltage, se podría decir que constituye una «condición necesaria, pero nó suficiente» para el empleo ventajoso de los conductores de acero.

La segunda condición determinante sería la hecha desde el punto de vista económico. Esta se ha estudiado basándose en una comparación de costos anuales entre los conductores de acero y cobre (ver Anexo 2).

Mediante dicha comparación se ha estudiado cuál es la sección máxima de conductor de acero que es económicamente recomendable instalar. Esta sección está dada por la fórmula:

$$s_{ea} = s_{mc} \frac{\rho_a}{\rho_c} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\rho_c \delta_c p_c c_c}{\rho_a \delta_a p_a c_a}} \right] \qquad (1)$$

Las diferentes cantidades que aparecen en ella, están definidas y valorizadas en el Cuadro N.° 2.

Para el tipo de líneas a que nos estamos refiriendo, se podrían adoptar, dadas las condiciones metereológicas del país, los siguientes valores para s_{mc}:

13.3 mm² (N.° 6 B&S) para tramos hasta de 120 m (1)
10 » » » » 105 m (1)

Por estimarse más ventajoso el empleo de tramos de 120 m en el tipo de líneas a que me estoy refiriendo, se adoptará el valor de 13.3 mm² para s_{cm} en la fórmula 1.

En estas condiciones se tiene:

$s_{ea} = 1.80\, s_{mc} = 24$ mm² para acero corriente
$s_{ea} = 1.51\, s_{mc} = 20$ mm² para acero especial

CUADRO N.° 2

DESIGNACIONES Y VALORES DE LAS CANTIDADES QUE INTERVIENEN EN LA COMPARACIÓN ECONÓMICA ENTRE EL EMPLEO DE CONDUCTORES DE COBRE Y ACERO GALVANIZADO

Designación	Unidad	Símbolo	VALOR		
			Cobre	Acero corriente (1)	Acero especial (1)
Sección económica maxima para conductores de acero..	mm²	s_{ea}	—	—	—
Sección mecánica mínima.. para conductores de cobre.	mm²	s_{mc}	—	—	—
Resistencia específica.....	Ω/mm	ρ	$17.25/10^6$	$160/10^6$ (2)	$148/10^6$ (2)
Densidad	Kg/mm³	δ	$8.89/10^6$	$7.78/10^6$	$7.78/10^6$
Costo unitario.....	$/Kg	c	12 (3)	3.80 (3)	4.50 (3)
Factor anual del capital (4)	—	p	0.0567 (4)	0.0633 (4)	0.0633 (4)
		$\delta\rho cp$	$104.4/10^{12}$	$299/10^{12}$	$327/10^{12}$

(1) Se refieren a los mismos materiales estudiados en el Cuadro N.° 1.

(2) Se ha tomado el valor correspondiente al alambre N.° 6 con 2.5 Amp., interpolado del Cuadro N.° 1.

(3) Son precios medios de importación directa para el año 1940.

(4) Este porcentaje comprende 5% de interés del capital más un porcentaje calculado sobre la base de una depreciación líneal de 10% para el cobre y de 20% para el acero, en un período de 15 años. Se ha tomado el período de 15 años, como valor medio límite, pasado el cual, este tipo de líneas hay que rediseñarlas, ya sea por cambio del trazado, aumento de consumos, etc.

La depreciación tomada por el acero considera únicamente la desvalorización de este material motivada por el hecho de haber sido empleado en una línea; pero no considera ninguna causa por desgaste o corrosión del material mismo. Se considera que el alambre de acero doble galvanizado por fusión, no debe sufrir corrosiones en climas normales, esto es, en climas que no presenten la particularidad de ser húmedos en presencia de terrenos salinos.

(1) Esta relación está calculada bajo las siguientes bases: f/l = 0.2 (relación flecha — luz), fatiga admisible para el cobre: 1,550 Kg/cm², solicitación de viento horizontal de 60 Kg/m² en los alambres más peso propio de éstos.

Basado en los valores consignados en el Cuadro N.° 2, se ha calculado el Gráfico N.° 2 que permite determinar la sección y el material (acero o cobre) más económico por usar en una transmisión determinada, en función del precio medio anual del KWH transmitido y la potencia (o corriente media) máxima por transmitir.

ANEXO N.° 1

DISTANCIAS MÁXIMAS POR TRANSMITIR EN CONDUCTORES DE ACERO GALVANIZADO. CON UNA REGULACIÓN DEL VOLTAJE DETERMINADA

Se ha considerado una línea con únicamente resistencia y reactancia inductiva, ambas concentradas y un consumo extremo.

De acuerdo con el diagrama de vectores de la Fig. 1, se tiene:

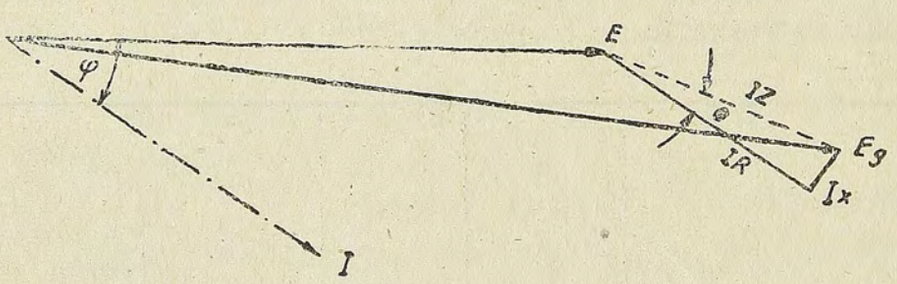


Fig. 1

$$I = \frac{E}{Z}\left[-\cos(\varphi-\theta) + \sqrt{\cos^2(\varphi-\theta) + q\,(2+q)}\right] \quad (2)$$

en que: q es la caída de voltaje de la línea en °/u del voltaje recibido.
E es el voltaje al neutro en el extremo receptor en volts.
I la corriente del consumo en Amps.
X la reactancia inductiva total a 50 ciclos en Ω.
Z la impedancia total a 50 ciclos en Ω.
$\cos\varphi$ factor de potencia del consumo.
$\cos\theta$ factor de potencia propio de la línea.

llamando:

$$-\cos(\varphi-\theta) + \sqrt{\cos^2(\varphi-\theta) + q\,(2+q)} = u \quad (3)$$

$$zl = Z \quad (4)$$

en que l es la longitud de la línea, se tiene:

$$l = \frac{uE}{zI} \quad (5)$$

Para la determinación de u y z, que son variables con la densidad de corriente, se ha hecho uso de los valores del Cuadro N.° 1 y se ha supuesto una reactancia externa de 0.44 Ω/km que corresponde a un distanciamiento equivalente de los conductores de 2 m.

En el Cuadro N.° 3 se han calculado las distancias máximas de transmisión en función de la potencia, para el voltaje de 13.2 KV. Relación que se ha dibujado en el grafico N.° 1. Para los voltajes de 15 y 12 KV, se ha hecho uso de la fórmula 5 y de los valores de z y u del Cuadro N.° 3.

CUADRO N.° 3

DISTANCIA DE TRANSMISIÓN EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA, PARA CONDUCTORES DE ACERO GALVANIZADO CORRIENTE

Tamaño	Gorrriente Amp.	Impedancia z Ω/km	Cos ($\varphi - \theta$) cos φ = .8	u q = .07	Distancia l E_1 = 13 200 Km	Potencia E_1 = 13200 KW
N.° 4 BWG	1	5.20	.9361	.075	110	18.3
28.8 mm²	2.5	5.89	.9470	.073	37.9	45.8
	5	6.75	.9565	.072	16.3	91.5
	10	9.14	.9619	.071	6.0	183
	15	11.31	.9781	.070	3.2	274
N.° 6 BWG	1	7.38	.9114	.076	78.5	18.3
20.7 mm²	2.5	8.05	.9367	.074	28.1	45.8
	5	9.20	.9578	.072	12.4	91.5
	10	12.05	.9744	.071	4.6	183
	15	14.03	.9759	.070	2.6	274
N.° 8 BWG	1	10.78	.9003	.077	54.5	18.3
14.0 mm²	2.5	11.55	.9265	.075	19.7	45.8
	5	13.00	.9478	.073	8.9	91.5
	10	16.50	.9668	.072	3.4	183
	15	17.60	.9699	,071	2.1	274

En las líneas monofásicas no se ha considerado el efecto de la corriente del neutro que circula por la tierra, quedando, por este motivo, los valores del gráfico N.° 1 con cierto margen de seguridad.

ANEXO N.° 2

COMPARACIÓN ECONÓMICA ENTRE CONDUCTORES DE ACERO GALVANIZADO Y DE COBRE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Esta comparación se ha hecho sobre la base del estudio del costo anual, para ambos conductores. Para estudiar la aplicación del acero galvanizado, sólo interesa aplicar la ecuación del costo anual para el año de mayor energía transmitida.

Se han considerado solamente dos términos en la fórmula del costo anual: el costo de la pérdida anual de energía y el costo anual del capital invertido.

$$C = 3 \frac{l \rho}{s} f_p^2 I^2 8760 \cdot 10^{-3} c_e + 3 l s p c \delta \qquad (6)$$

en que:

C es el costo anual proveniente de los dos términos ya mencionados en $.
l la longitud de la línea,
ρ la resistencia específica del conductor en $\Omega/_{mm}$.
s la sección transversal del conductor en mm^2.
c_e el costo de la energía en $/KWH.
δ la densidad del conductor en Kg/mm^3.
c el costo del conductor en $/Kg.
I la corriente máxima por transmitir en Amp.
f_p factor de carga anual de las pérdidas.
p factor anual de interés y depreciación del capital invertido.

El costo es mínimo cuando los dos factores del segundo miembro son iguales entre sí; de aquí que la sección que produce un C mínimo vale:

$$s_I = f_p I \sqrt{\frac{8760 \times 10^{-3} c_e \rho}{\delta c p}} \qquad (7)$$

y el C mínimo vale:

$$C_I = 6 l f_p I \sqrt{8760 \times 10^{-3} c_e c \rho \delta p} \qquad (8)$$

De acuerdo con el Cuadro N.° 2 es posible saber que el costo anual, cuando se usa la «sección más económica» de conductor, es más bajo para el cobre que para el acero; pero no es siempre posible usar la «sección más económica» cuando se trata de pequeñas corrientes. Existirá una sección, para cada uno de los dos materiales en estudio, pasado la cual no es posible disminuir, aun cuando la fórmula 7 indique lo contrario. Esta sección límite está fijada por condiciones de resistencia mecánica. Para el conductor de cobre, esta sección se produce a una menor corriente que para la sección de acero.

De aquí que, la corriente máxima por transmitir económicamente en un conductor de acero, se puede obtener igualando la ecuación 6 aplicada al cobre y a la mínima sección que es posible usar con este material (s_{mc}), con la ecuación 8 aplicada al acero:

$$I_1 = \frac{s_{mc}}{\rho_c \sqrt{8{,}76\, c_e}} \sqrt{\rho_a \delta_a c_a p_a} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\rho_c \delta_c p_c c_c}{\rho_a \delta_a p_a c_a}}\right] \qquad (9)$$

lo que reemplazado en la ecuación (7) aplicada al acero, da la «sección más económica máxima» que es conveniente usar en acero (s_{ea})

$$s_{ea} = s_{mc} \frac{\rho_a}{\rho_c} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\rho_c \delta_c p_c c_c}{\rho_a \delta_a p_a c_a}}\right] \qquad (1)$$

por otra parte se tiene que:

$$f_p I = s_1 \sqrt{\frac{\delta c\, p}{8.76\, \rho\, c_e}} \qquad (7)$$

esta ecuación se transforma en:

$$f_p I = .208\, s_1 \sqrt{\frac{1}{c_e}} \text{ para el cobre}$$

$$f_p I = .0367\, s_1 \sqrt{\frac{1}{c_e}} \text{ para el acero corriente}$$

suponiendo que:

$$f_p = 1{,}20\, f \qquad (10)$$

en que f es el factor de carga anual; para un consumo trifásico se tiene:

$$\frac{1.20\, f\, W}{\sqrt{3}\, E \cos \varphi} = K\, s_1 \sqrt{\frac{1}{c_e}} \qquad (11)$$

K = 0.208 para el cobre
K = 0.0367 para el acero corriente
W es la potencia máxima por transmitir en KW
E es el voltaje entre fases en KV

de aquí resulta, tomando $\cos\varphi = 0.8$:

$$\frac{f\,W}{E} = 0{,}239\ s_r \sqrt{\frac{1}{c_e}} \quad \text{para el cobre}$$

$$\frac{f\,W}{E} = 0{,}0425\ s_r \sqrt{\frac{1}{c_e}} \quad \text{para el acero corriente}$$

Mediante estas ecuaciones se ha calculado el gráfico N.° 2.

BIBLIOGRAFIA

Electrical propieties of galvanized steel conductors.—Electrical Journal (London). Octubre de 1928.
Steel conductors for power lines.—The Electrician (London). Febrero de 1929.
Why not series capacetors for distribution feeders.—Electrical World. Diciembre de 1932.
Electrical desing of rural lines—Electrical World. Dicsembre de 1932.
Voltage regulation for rural feeders.—Electrical West. Junio de 1935.
Specification for rural electric distribution pole lines.—TVA. Enero de 1937.
Transmission line formulas.—H. B. Dwigh6t.
Catálogos: «Crapo HTG - 130», Indiana Steel y Wire Co.
«Amerductor S - 3», United Stetes Steel Co.