



Cálculo de líneas eléctricas aéreas

Cuestiones puntuales

ANTONIO BAUTISTA HERRERO

En este trabajo se hacen algunas sugerencias o matizaciones al cálculo de líneas aéreas en los siguientes puntos:

1º Los conductores de las líneas aéreas normalmente alcanzan temperaturas superiores a los 50°C. En un proyecto no debe descartarse que en algún momento tenga que transportar la intensidad máxima admisible que supondrá 75-80°. Utilizar la cifra 50 acarreará errores notables en los valores de las flechas máximas.

2º Posibilidad de calcular la tensión del cable en el vértice de la catenaria y en el punto de engrape cuya diferencia puede ser considerable en vanos singulares con desniveles pronunciados.

3ª Advertir del riesgo de rotura que se puede introducir si se equipan con cadenas de amarre postes de hormigón de esfuerzo débil.

4º Matizaciones sobre el cálculo de apoyos sometidos a la hipótesis adicional de mayor viento que el reglamentario.

de transporte de un conductor cuando alcanza la temperatura de 80°C en un ambiente de 35°C; velocidad del aire: 0,6 m/seg y con radiación solar. Las normas ASTM fijan la temperatura máxima del conductor en 75°C sobre un ambiente de 25°C; velocidad del aire: 0,6 m/seg y sin radiación solar. Las normas UNE no establecen, que sepamos, limitaciones de este tipo.

La cuestión que se plantea ahora es definir si en la línea que proyectamos se puede dar la posibilidad de que tenga que alcanzar la capacidad máxima de transporte, y con ella los 75-80°, o bien, la solicitud va a ser tan baja que no tiene objeto considerar temperaturas superiores a los 50°. Se puede alegar que en una línea de media tensión, generalmente con derivaciones, sólo podrá alcanzar los 75-80° el primer tramo. Esto puede ser cierto a corto plazo, pero en un futuro más o menos lejano, puede ocurrir, y ocurre

1. TEMPERATURA SUPERIOR A 50°C

El Reglamento Técnico de Líneas Aéreas de Alta Tensión (RLAT) vigente, dice en su art. 27.3 "Flechas máximas de los conductores. b) Hipótesis de temperatura. Sometidos a la acción de su peso propio, a la temperatura máxima previsible, teniendo en cuenta las

condiciones climatológicas y de servicio de la línea. Esta temperatura no será en ningún caso inferior a +50°C."

Cuando el conductor tiene que transportar potencias que exigen intensidades de corriente próximas al valor máximo admisible, su temperatura rebasa los 50°C. La norma DIN limita la capacidad

Tabla I
Flechas máximas a 50°C e incrementos a 75°C

Vanos	Temper.	100 m		150 m		200 m		250 m		300 m	
		50°	75°	50°	75°	50°	75°	50°	75°	50°	75°
LA 30	A	1,70	0,41	3,80	0,46	6,75	0,49				
	B	2,34	0,34	5,15	0,37	9,14	0,38				
	C	4,14	0,21	9,43	0,21	17,23	0,19				
LA 56	A	*1,59	0,42	3,28	0,51	5,69	0,56	8,80	0,59		
	B	1,96	0,40	4,11	0,44	7,11	0,48	11,01	0,49		
	C	3,12	0,27	6,89	0,29	12,31	0,29	19,53	0,30		
LA 110	A	*1,39	0,41	*2,63	0,53	*4,22	0,62	*6,18	0,70	*8,52	0,75
	B	*1,39	0,41	*2,63	0,53	*4,22	0,62	6,36	0,68	9,04	0,72
	C	1,62	0,39	3,57	0,49	6,30	0,48	9,83	0,50	14,21	0,49
LA 180	A	*1,45	0,40	*2,73	0,48	*4,38	0,62	*6,43	0,68	*8,88	0,74
	B	*1,45	0,40	*2,73	0,48	*4,38	0,42	*6,43	0,68	*8,88	0,74
	C	1,51	0,40	3,15	0,49	5,42	0,54	8,43	0,57	11,92	0,59

con frecuencia, que la cola de una línea se convierte en cabeza porque las necesidades de servicio exijan instalar una nueva subestación cerca de su punto final. Si se acepta este razonamiento, será recomendable considerar con carácter general la temperatura de 75-80° en el cálculo de flechas máximas de los conductores.

En la Tabla I ofrecemos los valores que alcanzan las flechas máximas a 50° y el incremento que supone la introducción de los 75°, en los conductores más utilizados en líneas de 2ª y 3ª categoría. La Tabla se ha realizado para las condiciones de tensión al límite estático-dinámico (tensión máxima del 33% de la tensión de rotura; $C_s = 3,03$, y tensión máxima del 15% de la tensión de rotura a 15°C; EDS 15%). Los casos en que la li-

mitación la establece el EDS están señalados con *. A la vista de los resultados puede resumirse que para vanos normales, la diferencia de flechas es del orden de 0,50 m. En todos los supuestos contemplados, la flecha a 75° es mayor que la que se obtiene en las hipótesis de viento reglamentario a 15° o hielo reglamentario a 0°C.

Si la temperatura a considerar en los cálculos mecánicos es la de 75°, también habría que tenerla en cuenta en los cálculos eléctricos, especialmente en líneas de 2ª y 3ª categoría con conductores de secciones pequeñas y medianas, en las cuales la resistencia kilométrica es un factor importante de la impedancia.

En la Tabla II damos los valores de las resistencias y de las impe-

Tabla II
Valores de R y Z a 20 y 75°C. Relación Z_{20}/Z_{75}

Conductor	R ₂₀	Z ₂₀	R ₇₅	Z ₇₅	Z ₂₀ /Z ₇₅
LA 30	1,075	1,143	1,314	1,368	0,83
LA 56	0,614	0,727	0,749	0,844	0,86
LA 78	0,426	0,577	0,520	0,650	0,89
LA 110	0,307	0,496	0,374	0,540	0,91
LA 145	0,242	0,456	0,295	0,489	0,93
LA 180	0,190	0,434	0,232	0,454	0,95

dancias a 20° y 75° de los conductores de al-ac más usuales. El cálculo de la impedancia se ha realizado para una reactancia media $X = 0,39 \Omega/\text{km}$.

La relación Z_{20}/Z_{75} representa la capacidad de transporte a 75° sobre el valor 1 para la capacidad a 20°C.

2. VANOS SINGULARES

Consideramos singular aquel vano que, teniendo una longitud mayor que la normal y/o un desnivel entre apoyos bastante pronunciado, merece estudiarse con más detalle que los vanos de series. Tendrá carácter de independiente, es decir, que los apoyos llevarán cadenas de amarre.

En el cálculo mecánico de conductores es norma general fijar u obtener una tensión máxima en el vértice de la catenaria ligeramente inferior a la máxima que admite el conductor, con coeficiente de seguridad $C_s = 3$ o $C_s = 2,5$, según se quiera omitir, o no, la 4ª hipótesis en el cálculo de apoyos de alineación y ángulo. Este margen de tensión que se deja a sentimiento es para cubrir la mayor tensión que se produce en el punto de engrape al apoyo, sin que el coeficiente de seguridad baje sensiblemente del mínimo reglamentario.

En la figura 1 damos los datos para un ejemplo de vano singular. La Tabla III, realizada con el programa TENSE5, presenta los resultados de todas las magnitudes que intervienen, incluida la tabla de tendido que corresponde.

De los resultados de la Tabla III destacamos que la tensión máxima en el vértice de la catenaria ha tenido que alcanzar un $C_s = 3,25$ para obtener un $C_s = 3$ en el apoyo superior. La diferencia de tensiones entre ambos puntos vale:

$$2130 - 1966,4 = 163,6 \text{ daN}$$

Esta diferencia es justamente el peso de un cable LA-180 cargado con el manguito de zona C y de una longitud igual a la flecha tomada en el apoyo superior a la temperatura de -20° con manguito, que no figura en la tabla pero que podemos valorar muy aproximadamente en 76,5 m.

$$76,5 \cdot 0,6625 \cdot 3,228 = 163,6 \text{ daN}$$

3. EL RIESGO DE INSTALAR CADENAS DE AMARRE EN POSTES DE ESFUERZO SECUNDARIO DEBIL

La línea de la figura 2 está situada en zona B. Las condiciones de tensado son: EDS = 9 %. Tensión máxima a -15° con manguito de hielo: $T_m = 532$ daN

El apoyo 2 se ha equipado con cadenas de amarre para evitar oscilaciones excesivas de las cadenas de suspensión. Está formado por un poste de hormigón de 400 daN de esfuerzo útil principal y 250 daN de esfuerzo secundario (coeficiente de seguridad 2,5 en los dos casos). El armado es una cruceta de bóveda que, al elevar el punto de aplicación de la car-

Fig. 1.
Vano singular

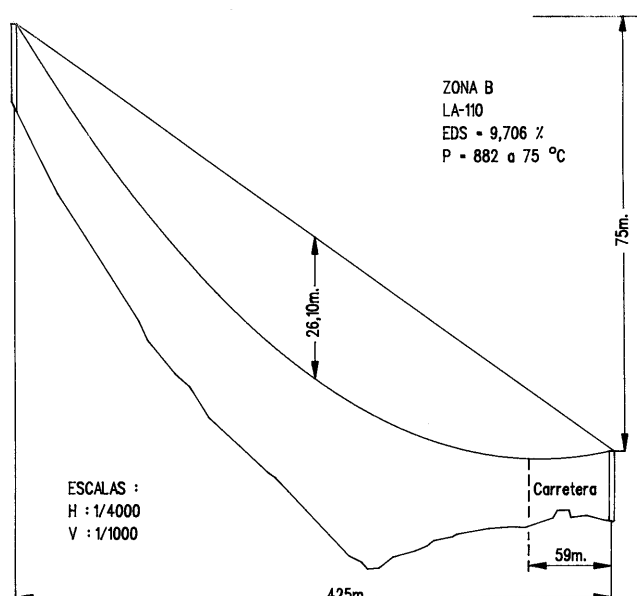


Tabla III
Estudio de vano singular. Zona C

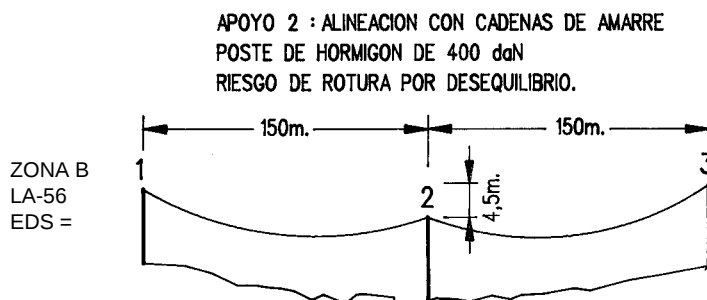
Conductor LA 180	Vano Número: 2	Apoyos Números: 1 y 2		Coefficientes de sobrecarga
DIAMETRO d = 17,50 mm	Tensión de rotura	Tr = 6390 daN		A viento mA = 1,636
SECCION S = 181,6 mm²		Módulo elástico E = 8000 daN/mm²		B hielo mB = 2,114
PESO P = 0,6625 daN/m		Coeficiente Dilatación α = 0,0000178 x °C		C hielo mC = 3,228

Vano horizontal: 425 m		Desnivel d = 75,0 m		Tensión límite en el apoyo superior S = 33,333% de Tr	
Tensión EDS a 15°C = 15% de Tr					
Tensiones	Relativas	Absolutas	Coef. de seg.	Abscisas	
Máxima en apoyo superior	S = 33,333 %	Ts = 2130,0 daN	CsS = 3,00	xs =	372,52
Máxima en el vértice	V = 30,772 %	Tv = 1966,4 daN	CsV = 3,25		
Eds a 15°C en vértice	EDS = 9,706 %	TE = 620,2 daN			
Máxima en apoyo inferior	I = 30,823 %	Ti = 1969, 6 daN	CsI = 3,24	xi =	-52,48
Flechas máximas	Apoyo inferior	Apoyo superior	Centro del vano	Abscisas	
Con viento a 15°C m	Fvi = 1,47	Fvs = 76,47	Fvm = 24,97	xvi =	-52,06
Con calor a 75°C m	Fci = 1,98	Fcs = 76,98	Fcm = 26,10	xcı =	-59,05
Con hielo a 0°C m	Fhi = 1,71	Fhs = 76,71	Fhm = 25,52	xhi =	-55,52

Parámetro de la catenaria de flecha máxima vertical $P = 882$

Tabla de tendido											
Temperaturas $^\circ C$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Apoyo inferior. Tensión daN	630,9	627,6	624,3	621,1	617,9	614,8	611,6	608,6	605,6	602,8	599,8
Apoyo inferior. Flecha m	1,16	1,21	1,26	1,31	1,36	1,42	1,47	1,53	1,58	1,63	1,69
Apoyo superior. Tensión daN	680,6	677,3	673,9	670,8	667,6	664,5	661,3	658,3	655,3	652,5	649,5
Apoyo superior. Flecha m	76,16	76,21	76,26	76,31	76,36	76,42	76,47	76,53	76,58	76,63	76,69
Centro del vano. Flecha m	24,20	24,33	24,46	24,59	24,72	24,85	24,98	25,10	25,23	25,35	25,48

Fig. 2.



ga, reduce el esfuerzo útil a 0,9, con lo cual los esfuerzos útiles reales son 360 daN en sentido transversal y 225 daN en el longitudinal.

De acuerdo con el art. 18.1 del RLAT debe soportar en la tercera hipótesis un desequilibrio del 8 % de la tracción total de los conductores, que supone:

$$Tr = 3 \cdot 532 \cdot 0,08 = 127,7 \text{ daN}$$

Coefficiente de seguridad

$$Cs = 225 \cdot 2,5 / 127,7 = 4,40 > 2,5$$

El poste cumple las condiciones reglamentarias. Sin embargo, es un hecho constatado que el manguito de hielo no se deshace y ni se desprende por igual ni al mismo tiempo en todos los vanos. Como consecuencia, en los apoyos con cadenas de amarre pueden producirse desequilibrios mucho mayores que el 8% reglamentario en los de alineación. Trataremos de cuantificar estos efectos en un ejemplo:

Supuesto: La misma línea de la figura 2, después de haber alcanzado temperaturas de varios grados

bajo cero y el correspondiente manguito de hielo, se está produciendo el deshielo y a 1°C el peso del manguito de hielo es de $0,10\sqrt{d}$ kg/m (el manguito reglamentario en zona B es $0,18\sqrt{d}$ kg/m). En este momento se desprende el manguito de uno de los vanos, mientras que en el otro permanece algún minuto. Con el programa TENSE5 obtenemos en la Tabla IV las tensiones con hielo y sin hielo.

Como los dos vanos son idénticos y los resultados serían los mismos, ha sido suficiente con estudiar un solo vano con las dos variantes, con hielo y sin hielo. Con hielo el conductor alcanza una tensión de 360,8 daN, y sin hielo, 161,2 daN.

La carga de desequilibrio transmitida al apoyo es:

$$3 (360,8 - 161,2) = 598,8 \text{ daN}$$

El esfuerzo de rotura del poste vale:

$$250 \times 0,9 \times 2,5 = 562,5 \text{ daN}$$

Tabla IV
Tensiones, flechas y parámetros. Zona especial desequilibrio

CONDUCTOR: LA 56		
DIAMETRO d = 9,45 mm	Tensión de rotura	Tr = 1.641 daN
SECCION S = 54,6 mm ²	Módulo elástico	E = 7.900 daN/mm ²
PESO P = 0,1853 daN/m	Coefficiente dilatación	$\alpha = 0,0000191 \times ^\circ\text{C}$

ACCIONES	Temps. °C	Velocidad viento km/hora	Hielo J/d J kg	Peso del hielo daN/m	Diámetro manguito mm	Presión viento daN/m	Coefficientes sobrecarga	pesp esp. hielo Pe = 0,65
Viento sin hielo	1	0	0,00	0,000	0,00	0,000	nev: 1.000	
Sólo hielo	1		0,10	0,301	0,00	0,000	meh: 2.624	

Series y Vanos independientes	Vano ideal o independiente	EDS. a 15°C % de Tr	Tensiones con viento			Tensiones con hielo			Flechas máximas			Parámetros de flechas		Vanos singulares (VS) Apoyo inferior			
			Apoyo super Ts daN	Vértice Tv daN	Coef. seguridad Cs	Apoyo super Ts daN	Vértice Tv daN	Coef. seguridad Cs	Viento Fv m	Calor 50 Fc m	Hielo 0° Fh m	Máxima verti P	Mínima ma P'	Tensiones Viento Ti daN	Hielo Ti daN	Des-nivel d m	Abscisa xi m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
l=1VS	150	9,00	162,2	161,2	10,11	363,9	360,8	4,51	3,53	4,21	3,78	669	870	161,4	361,7	4,5	-49

Tabla V
Tensiones, flechas y parámetros. Zona especial, hipótesis adicional

CONDUCTOR: LA 110		
DIAMETRO d = 14,00 mm	Tensión de rotura	Tr = 4.310 daN
SECCION S = 116,2 mm ²	Módulo elástico	E = 8.000 daN/mm ²
PESO P = 0,4243 daN/m	Coefficiente dilatación	$\alpha = 0,0000178 \times ^\circ\text{C}$

ACCIONES	Temps. °C	Velocidad viento km/hora	Hielo J/d J kg	Peso del hielo daN/m	Diámetro manguito mm	Presión viento daN/m	Coefficientes sobrecarga	pesp esp. hielo Pe = 0,65
Viento sin hielo	-10	180	0,00	0,000	0,00	1,852	nev: 4,478	
Sólo hielo	-15		0,18	0,660	0,00	0,000	meh: 2,556	

Series y Vanos independientes	Vano ideal o independiente m	EDS. a 15°C % de Tr	Tensiones con viento			Tensiones con hielo			Flechas máximas			Parámetros de flechas		Vanos singulares (VS) Apoyo inferior			
			Apoyo super Ts daN	Vértice Tv daN	Coef. seguridad Cs	Apoyo super Ts daN	Vértice Tv daN	Coef. seguridad Cs	Viento Fv m	Calor 75 Fc m	Hielo 0° Fh m	Máxima verti P	Mínima ma P'	Tensiones Viento Ti daN	Hielo Ti daN	Des-Nivel d m	Abscisa xi m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
l = 1	175	8,80	1.432,7	1.423,0	3,01	951,7	947,0	4,53	5,49	5,45	4,65	703	1.059				

Conclusión: Hay riesgo de rotura porque la carga longitudinal sobre el apoyo es mayor que su esfuerzo de rotura.

4. HIPOTESIS ADICIONAL

Si el proyectista prevé sobrecargas excepcionales de viento, deberá fijar su valor y realizar los cálculos para las temperaturas de -10°C en zona B y -15° en zona C (Art. 27.1 del RLAT).

En este caso queremos matizar que la sobrecarga de viento sobre el propio apoyo también debe tenerse en cuenta ya que, aunque su valor no sea muy importante en el conjunto de las cargas, tampoco es despreciable.

Ejemplo: En una línea situada en zona B y conductor LA-110 hay un apoyo de ángulo que soporta una desviación de 14° y un vano de viento de 175 m. Es un apoyo de celosía de la Recomendación Unea R.U. 6704 B, de 14 m, armado con cruceta recta en cogolla.

En condiciones de viento regla-

mentario (120 km/hora) los valores de las tensiones son:

-Tensión a 15° C: 15% de Tr. Límite estático dinámico.

-Tensión máxima a -15°C con hielo: Tm = 1.372 daN (Cs = 3,13).

-Tensión a -5°C y viento de 120 km/hora: Tv = 1.188 daN (Cs=3,62).

Viento sobre el conductor:

$$V = 0,014 \times 60 \times 0,98 = 0,823 \text{ daN/m}$$

Carga solicitante sobre el apoyo de ángulo de 14°:

$$Ts = 3 (2 \cdot 1.188 \cdot \text{sen } 7 + 0,823 \cdot 175 \cdot \cos^2 7) = 1.295 \text{ daN}$$

la carga resultante en la 2ª hipótesis es inferior; 1.075 daN.

Un apoyo C-2000 de 2.000 daN de esfuerzo principal neto, puesto que la presión del viento sobre el mismo ya está deducida, trabajará con un coeficiente de seguridad:

$$Cs = 2.000 \cdot 1,5 / 1.295 = 2.31$$

Hipótesis adicional a estudiar

Para una velocidad de viento de 180 km/hora a -10°C.

Teniendo en cuenta que la presión ejercida por el viento es proporcional al cuadrado de la velocidad, resulta que la relación entre 180 y 120 km/hora será:

$$r = 180^2 / 120^2 = 2,25 \text{ veces mayor}$$

La Tabla V nos da una tensión máxima de 1.423 daN en la hipótesis de viento y 947 daN en la de hielo.

Carga transmitida por los conductores al apoyo.

$$Ts = 3(2 \cdot 1.423 \cdot \text{sen } 7 + 0,823 \cdot 2,25 \cdot 175 \cdot \cos^2 7) = 1.998 \text{ daN}$$

para la cual valdría, muy justamente, el apoyo C-2000. Pero es que a esta carga le tenemos que sumar todavía la sobrepresión del viento sobre el propio apoyo.

La presión del viento normal sobre el apoyo, si no viene en catá-

logo tendremos que solicitarla al fabricante. Para poder seguir con el ejemplo vamos a fijar un valor aproximado de 140 daN para el apoyo C-2000 de 14 m. La sobrepresión de viento por encima de la normal, que ya está deducida, vale:

$$140 (2,25 - 1) = 175 \text{ daN}$$

que se la tendremos que sumar a la carga de 1.998 daN transmitida por los conductores, resultando

un total de 2.173 daN, para los cuales ya no es suficiente el apoyo C-2000 y habrá que instalar un C-3000.

Resulta obvio decir que la desviación de 14° ha sido elegida para que el resultado final exigiera el cambio de apoyo. Lo más normal será que, siendo de 1.000 daN los intervalos de esfuerzos, no sea necesario recurrir a un apoyo más fuerte. Pero, dicho esto, también es cierto que los datos del ejemplo pueden darse en la realidad.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] Reglamento Técnico de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión, del 28 de noviembre (1968).

[2] Bautista, A. y Lorenzo, J. "Programa Informático TENSE5", Versión 5.3, julio (1997).

