TEMA 29

CÁLCULO MECÁNICO DE CABLES II

29.1. SOBRECARGAS EN LOS CABLES [1].

Un cable tiene su peso propio[2], expresado en **kg.m^{-1},** y a este peso se le pueden añadir dos tipos de sobrecargas:

① Sobrecarga debida al viento.
② Sobrecarga motivada por el hielo (manguito de hielo).

29.1.1. SOBRECARGA DEBIDA AL VIENTO.

La sobrecarga debida al viento constituye un problema muy complejo en el cálculo de los cables de una línea aérea. De una forma muy simplificada, se puede calcular dicha sobrecarga, para ello se definen los siguientes conceptos:

ω = Peso unitario del cable (kg.m^{-1}.mm^{-2}).
P = Presión del viento sobre la sección longitudinal del cable (kg.m^{-2})
d = Diámetro de la sección transversal del cable (m).
S = Sección transversal del cable (mm^2).

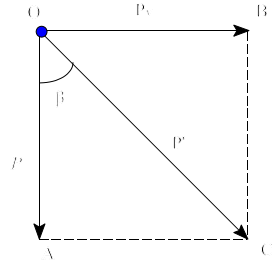


Fig. 29.1

La Fig. 29.1 representa el sistema de fuerzas unitarias sobre el cable, en las condiciones de sobrecarga del viento.

Siendo:

[1] Reglamento Técnico de Líneas Eléctricas de Alta Tensión (Art.14)

[2] Este dato debe tomarse de la información que facilita el fabricante

$$P_v = P.d \ (kg.m^{-1})$$

$$p = \omega.S \ (kg.m^{-1}) \qquad (29.1)$$

$$P' = \sqrt{P_v^2 + p^2} \ \ (kg.m^{-1}) \qquad (29.2)$$

También se puede expresar:

$$P' = \omega'.S = \sqrt{\omega^2.S^2 + P^2.d^2} \ \ (kg.m^{-1}) \qquad (29.3)$$

A **P'** se le denomina *peso aparente del cable en el caso de sobrecarga de viento*.

Para determinar la relación existente entre la velocidad del viento y la presión del mismo, existen una serie de fórmulas. Una muy utilizada es la siguiente:

$$P = 0{,}007.v^2.S \qquad (29.4)$$

En la que:

P = Presión debida al viento ($kg.m^{-2}$).

v = Velocidad del viento ($km.h^{-1}$).

S = Superficie del cable normal al viento (m^2)

En los cálculos se tomará como velocidad del viento **120 km.h^{-1}**, sin embargo esta velocidad se aumentará cuando la zona a considerar se encuentre sometida a vientos más fuertes hasta alcanzar **180 km.h^{-1}**.

Como los cables son superficies cilíndricas, las presiones que se obtengan de la aplicación de la expresión (29.4) se verán afectadas de un coeficiente **0,6** o **0,7**.

En la Tabla 29.1 se dan las presiones del viento a distintas velocidades se acuerdo con la expresión (29.4).

Tabla 29.1 Velocidades del viento y presiones del mismo sobre cables.

Velocidad del viento (km.h^{-1})	**Velocidad del viento (m.s^{-1})**	**Presión sobre superficies planas: P=0,007.v^2.*S* (para *S*=1 m^2) (Kg.m^{-2})**	**Presiones sobre superficies cilíndricas (Coeficientes de reducción)**	
			0,6	**0,7**
10	2,778	0,7	0,42	0,49
20	5,556	2,8	1,68	1,96
30	8,333	6,3	3,78	4,41
40	11,111	11,2	6,72	7,84
50	13,889	17,5	10,5	12,25
60	16,667	25,2	15,12	17,64
70	19,444	34,3	20,58	24,01
80	22,222	44,8	26,88	31,36
90	25	56,7	34,02	39,69
100	27,778	70	42	49
110	30,556	84,7	50,82	59,29
120	33,333	100,8	60,48	70,56
130	36,111	118,3	70,98	82,81
140	38,889	137,2	82,32	96,04
150	41,667	157,5	94,5	110,25
160	44,444	179,2	107,52	125,44
170	47,222	202,3	121,38	141,61
180	50	226,8	136,08	158,76
190	52,778	252,7	151,62	176,89
200	55,556	280	168	196

En el Reglamento Técnico de Líneas Eléctricas de Alta tensión se contemplan las presiones debidas al viento. En el artículo 16, se dice:

Artículo 16. Presiones debidas al viento.

Se considerará el viento de **120 km.h^{-1}** (33,3 m.s^{-1}) de velocidad. Se supondrá el viento horizontal, actuando perpendicularmente a las superficies sobre las que incide.

La acción de este viento da lugar a presiones que a continuación se indican sobre los distintos elementos de la línea:

✏ Sobre conductores y cables de tierra de un diámetro igual o inferior a **16 mm: 60 kg.m^{-2}**.

✏ Sobre conductores y cables de tierra de un diámetro superior a **16 mm: 50 kg.m^{-2}**.

✏ Sobre superficies planas: **100 kg.m^{-2}**.

✏ Sobre superficies cilíndricas de los apoyos, como postes de madera, hormigón, tubos, etc.: **70 kg.m^{-2}**.

✏ Sobre estructuras de celosías de cuatro caras, realizadas con perfiles metálicos normales:

Cara de barlovento, $160.(1 - \eta)$ kg.m^{-2}
Cara de sotavento, $80.(1- \eta)$ kg.m^{-2}

✏ Sobre estructuras de celosía de cuatro caras realizadas en perfiles cilíndricos:

Cara de barlovento, $90.(1 - \eta)$ kg.m^{-2}
Cara de sotavento, $45.(1- \eta)$ kg.m^{-2}

Las presiones anteriormente indicadas se considerarán aplicadas sobre proyecciones de las superficies en un plano normal a la dirección del viento.

Estos valores son válidos hasta una altura de **40 metros** sobre el terreno circundante, debiendo para mayores alturas adoptarse otros valores debidamente justificados.

El coeficiente **η** que interviene en las expresiones relativas a los apoyos de celosía es el *coeficiente de opacidad*, relación entre la superficie real de la cara y el área definida por su silueta. Las expresiones son válidas hasta **η = 0,5**, debiendo adoptarse el valor de la expresión correspondiente a **η = 0,5** para valores de **η** superiores.

No se tendrá en cuenta el efecto pantalla entre conductores ni aun en el caso de haces de conductores de fase.

29.1.2. SOBRECARGA MOTIVADA POR EL HIELO.

Cuando un cable se rodea de un *manguito de hielo* se produce sobre él un doble efecto:

☞ Se incrementa el peso del cable, al sumarse el peso del hielo a su propio peso.
☞ Aumenta la superficie para la acción del viento.

El Reglamento Electrotécnico no contempla la simultaneidad de ambas acciones, en consecuencia sólo se estudiará el primero de los efectos.

Si llamamos $\mathbf{P_h}$ al peso del manguito de hielo, expresado en $\mathbf{kg.m^{-1}}$, el peso aparente de cable, con esta sobrecarga es:

$$P' = P + P_h \quad (kg.m^{-1}) \qquad (29.5)$$

Siendo:

$P_h = 0{,}18.\sqrt{d}$ (kg.m^{-1}), si se trata de la Zona B.

$P_h = 0{,}36.\sqrt{d}$ (kg.m^{-1}), si se trata de la Zona C.

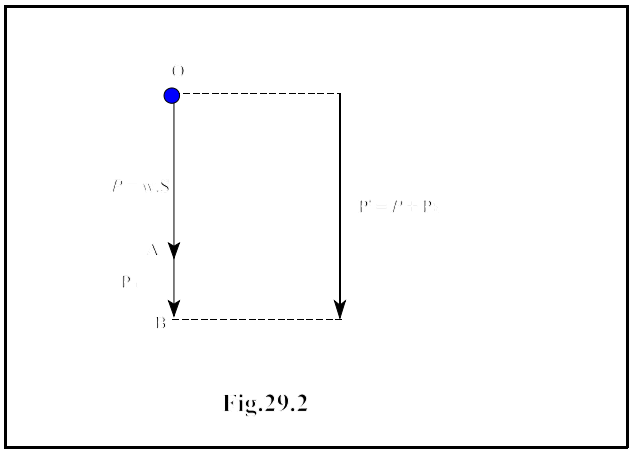


Fig.29.2

En el Reglamento Técnico de Líneas Eléctricas de Alta tensión se contempla las sobrecargas debidas al hielo, concretamente en el artículo 17, que dice:

Artículo 17. Sobrecargas motivadas por el hielo.

A estos efectos, el país se clasifica en tres zonas:

Zona A: La situada a menos de **500** metros de altitud sobre el nivel del mar.
Zona B: La situada a una altitud entre **500** y **1000** metros sobre el nivel del mar.
Zona C: La situada a una altitud superior a **1000** metros sobre el nivel del mar.

Las sobrecargas serán las siguientes:

Zona A: No se tendrá en cuenta sobrecarga alguna motivada por el hielo.
Zona B: Se considerarán sometidos los conductores y cables de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor:

$$P_h = 0{,}18.\sqrt{d} \quad (kg.m^{-1})$$

Siendo **d** el diámetro del conductor o cable de tierra en milímetros.

Zona C: Se considerarán sometidos los conductores y cables de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor:

$$P_h = 0{,}36.\sqrt{d} \quad (kg.m^{-1})$$

Siendo **d** el diámetro del conductor o cable de tierra en milímetros.

29.1.3. COEFICIENTE DE SOBRECARGA.

Se denomina *coeficiente de sobrecarga de un cable*, la relación que existe entre el peso aparente y su peso propio.

$$m' = \frac{P'}{P} \qquad (29.6)$$

En la Tabla 29.2 se resumen las expresiones que se utilizan para el cálculo del coeficiente de sobrecarga:

Tabla 29.2 Coeficientes de Sobrecarga

Sobrecarga:	Coeficiente de Sobrecarga (m'):
Viento	$\frac{\sqrt{P^2+P_v^2}}{P}$
Hielo	$\frac{P+P_h}{P}$

29.2. FLECHA DE UN CABLE.

La flecha de una cable es la máxima distancia vertical, entre la recta que une los extremos del cable, y el propio cable.

Bajo la acción del viento, el plano que contiene al cable forma un ángulo **β**, según se vio en

29.1.1. De acuerdo con la Fig.29.1:

$$\cos\beta = \frac{P}{P'} = \frac{\omega.S}{\omega'.S} = \frac{\omega}{\omega'} = \frac{1}{m'} \qquad (29.7)$$

De acuerdo con el Reglamento:

$m' = m_A$ Para la Zona A.

$m' = m_B$ Para la Zona B.

$m' = m_C$ Para la Zona C.

A la magnitud **OC** de la Fig.29.1, se la llama *flecha inclinada*, debida al viento.

La proyección vertical es:

$$OA = OC.\cos\beta = f'.\cos\beta \qquad (29.8)$$

Teniendo en cuenta (29.7) y (29.8), resulta:

$$OA = \frac{f'}{m'} \qquad (29.9)$$

Que es la proyección vertical de la flecha inclinada.

Pero como **m'** es siempre mayor que la unidad, se tiene:

$$f' > \frac{f'}{m'} \qquad (29.10)$$

Es decir, *el efecto del viento soplando horizontalmente es elevar el cable.*

En cuanto a la proyección horizontal de la flecha inclinada, según la citada Fig.29.1, resulta:

$$OB = OC.sen\beta \qquad (29.11)$$

Proyección horizontal de la flecha inclinada = Fecha inclinada .sen β

Proyección horizontal de la flecha inclinada = f '.sen β

29.3. RESOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE CAMBIO DE CONDICIONES.

Si se ordena la ecuación de cambio de condiciones (28.42) con respecto a potencias de $\mathbf{t_2}$, teniendo en cuenta que:

$$\omega_1 = m_1.\omega \quad ; \quad \omega_2 = m_2.\omega \tag{29.12}$$

resulta:

$$t_2^3 + t_2^2.[\alpha.E.(\theta_2 - \theta_1) - t_1 + \frac{a^2.m_1^2.\omega^2.E}{24.t_1^2}] = \frac{a^2.m_2^2.\omega^2.E}{24} \tag{29.13}$$

O bien:

$$t_2^2.[t_2 + \alpha.E.(\theta_2 - \theta_1) - t_1 + \frac{a^2.m_1^2.\omega^2.E}{24.t_1^2}] = \frac{a^2.m_2^2.\omega^2.E}{24} \tag{29.14}$$

La ecuación (29.14) es una ecuación de tercer grado de la forma:

$$t_2^2.(t_2 + A) = B \tag{29.15}$$

Que se resuelve una vez conocidos **A** y **B**:

Siendo:

$$A = \alpha.E.(\theta_2 - \theta_1) - t_1 + \frac{a^2.m_1^2.\omega^2.E}{24.t_1^2} = \alpha.E.(\theta_2 - \theta_1) - K \tag{29.16}$$

$$K = t_1 - \frac{a^2.m_1^2.\omega^2.E}{24.t_1^2} \quad ; \quad B = \frac{a^2.m_2^2.\omega^2.E}{24} \tag{29.17}$$

La ecuación (29.14) permite calcular el valor de la tensión del cable $\mathbf{t_2}$ para unas condiciones de temperatura $\boldsymbol{\theta_2}$ y sobrecarga $\mathbf{m_2}$, si se conoce la tensión $\mathbf{t_1}$ en condiciones de temperatura $\boldsymbol{\theta_1}$ y sobrecarga $\mathbf{m_1}$.

En cuanto a la flecha, se calcula a partir de la ecuación (28.35), ya que:

$$f_2 = \frac{a^2\omega_2}{8.t_2} \tag{29.18}$$

En la que:

$$\omega_2 = \omega.m_2$$

Por tanto (29.18) se puede expresar:

$$f_2 = \frac{a^2\omega}{8.t_2}.m_2 \qquad (29.19)$$

Bien entendido que $\mathbf{m_2}$ valdrá la unidad si no existe sobrecarga de viento o hielo.

29.4. VANO IDEAL DE REGULACIÓN.

Consideremos un tramo de línea aérea constituido por una serie de apoyos de alineación entre dos de anclaje, situados estos últimos en ambos extremos. Si todos los vanos del tramo se calculasen de forma independiente, debido a que sus longitudes son en general distintas así como los desniveles, etc, se producirían tensiones distintas en los tramos de cable correspondientes a vanos contiguos. Las cadenas de suspensión, de las que cuelgan los cables, no podrían absorber esas diferencias de tensado en los diferentes vanos, lo que ocasionaría inclinaciones en las cadenas respecto a la vertical. Para evitar esta circunstancia se recurre a tensar los cables de igual forma en todos los vanos del tramo, como se haría en un vano teórico llamado *vano ideal de regulación.*

En definitiva, es necesario que la tabla de regulación se calcule para que la tensión de los cables sea uniforme a lo largo del tramo de línea considerado.

La tensión de los cables en el tramo variará con las temperaturas, sobrecargas, etc., pero lo hará uniformemente a lo largo del mismo.

Por tanto, un vano ideal de regulación, correspondiente a un tramo de línea entre dos de anclaje, es aquel en el que se produce la misma variación de tensión, que las que se producen en el tramo de línea compuesto por varios apoyos de alineación.

La longitud del tramo se establece partiendo de la ecuación (27.43):

$$\alpha.(\theta_2 - \theta_1) + \frac{t_2 - t_1}{E} = \frac{a^2}{24}.(\frac{\omega_2^{\,2}}{t_2^{\,2}} - \frac{\omega_1^{\,2}}{t_1^{\,2}})$$

Multiplicando la ecuación (27.43) por **a**, resulta:

$$a.[\alpha.(\theta_2 - \theta_1) + \frac{t_2 - t_1}{E}] = \frac{a^3}{24}.(\frac{\omega_2^{\,2}}{t_2^{\,2}} - \frac{\omega_1^{\,2}}{t_1^{\,2}}) \qquad (29.20)$$

Combinando (29.20) con (28.40), resulta:

$$L_2 - L_1 = \frac{a^3}{24}.(\frac{\omega_2^2}{t_2^2} - \frac{\omega_1^2}{t_1^2}) = a.[\alpha.(\theta_2 - \theta_1) + \frac{t_2 - t_1}{E}] \qquad (29.21)$$

La ecuación (29.21), es la de cambio de condiciones, para un vano de longitud **a**.

La ecuación (29.21) se puede generalizar para el tramo de línea considerado, teniendo en cuenta que los vanos de alineación sucesivos tengan longitudes $\mathbf{a_1, a_2, ..., a_n}$. En efecto:

$$\sum_{j=1}^{n} (L_{j+1} - L_j) = \frac{1}{24}.[\frac{\omega_2^2}{t_2^2} - \frac{\omega_1^2}{t_1^2}].\sum_{j=1}^{n} a_j^3 \qquad (29.22)$$

$$\sum_{j=1}^{n} (L_{j+1} - L_j) = [\alpha.(\theta_2 - \theta_1) + \frac{t_2 - t_1}{E}].\sum_{j=1}^{n} a_j \qquad (29.23)$$

Igualando (29.22) y (29.23) y operando, se obtiene:

$$\alpha.(\theta_2 - \theta_1) = \frac{1}{24}.[\frac{\omega_2^2}{t_2^2} - \frac{\omega_1^2}{t_1^2}].[\frac{\sum_{j=1}^{n} a_j^3}{\sum_{j=1}^{n} a_j}] - \frac{t_2 - t_1}{E} \qquad (29.24)$$

Pero según (27.43), para un vano de longitud **a** igual a la suma, $\mathbf{a_1 + a_2 + ... + a_n}$, se verifica:

$$\alpha.(\theta_2 - \theta_1) = \frac{a^2}{24}.[\frac{\omega_2^2}{t_2^2} - \frac{\omega_1^2}{t_1^2}] - \frac{t_2 - t_1}{E}$$

Luego igualando esta ecuación con (29.24) resulta:

$$a^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_j 3}{\sum_{j=1}^{n} a_j}$$

O bien:

$$a = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} a_j 3}{\sum_{j=1}^{n} a_j}} \qquad (29.25)$$

La ecuación (29.25) es la que define el *vano ideal de regulación.*

En rigor, esta ecuación sólo se cumple si todos los apoyos están al mismo nivel.

De acuerdo con la recomendación UNESA 3.413A, el vano ideal de regulación se designará por $\mathbf{a_r}$.

Según la citada recomendación, se puede admitir para $\mathbf{a_r}$ el valor:

$$a_r = Vano\ medio + \frac{2}{3}.(Vano\ máximo - Vano\ mínimo)$$

29.5. TENSIÓN DE CADA DÍA.

En las líneas aéreas se ha podido comprobar de forma experimental que, cuanto más elevada es la tensión que tienen sus cables, mayor es la probabilidad de que se produzca el fenómeno de *vibraciones*. Estas vibraciones de deben a vientos suaves que producen ondas estacionarias de poca amplitud pero de alta frecuencia.

De aquí se dedujo que debían mantenerse las tensiones dentro de unos límites para evitar, en lo posible, este fenómeno.

En definitiva, de lo que se trata es de establecer cual deben ser los límites para evitar las averías por vibraciones.

De esta forma se llegó a un nuevo concepto, que se denominó *tensión de cada día (en inglés EDS: every day stress).*

Existen dos formas de definir la *tensión de cada día*:

1ª.- La tensión máxima admisible en un cable durante el período de tiempo más largo del año sin que experimente vibraciones eólicas.

2ª.- La tensión para la temperatura más frecuente coincidente con vientos suaves capaces de producir vibraciones.

La *tensión de cada día* se expresa en tanto por ciento de la carga de rotura del cable, y está ligada a una temperatura denominada *temperatura de cada día.*

La temperatura media de una lugar determinado, es la media aritmética de las registradas durante el día, máximas y mínimas y tomadas a las 6 y a las 18 horas. Se recomienda que se adopte las media de las temperaturas medias diarias registradas más de diez días al año.

Los valores admitidos para establecer el coeficiente de tensión de cada día, expresados en tanto por ciento de carga de rotura, quedan reflejados en la Tabla.29.2.

El coeficiente TCD (tensión de cada día) queda definido por la expresión:

$$TCD = \frac{\text{Tensión de cada día}}{\text{Carga de rotura}}.\ 100$$

Por tanto, si tomamos la hipótesis G)[3] y vamos a la Tabla 29.3, la tensión de cada día es:

$$TCD = \frac{1391}{10163}.100 = 13{,}7\%$$

Tabla 29.2 Valores del coeficiente Tensión de Cada Día (% de carga de rotura del cable)

Clase del Conductor	Líneas sin protección	Líneas con protección		
		Con haces de varillas de protección	Con antivibradores	Con haces de varillas de protección y antivibradores
Cobre	261718181113	-	-	-
Aluminio		-	-	-
Aldrey		-	26	-
Aluminio-acero		22	24	24
Acero con grapa rígida		-	-	-
Acero con grapa oscilante		-	-	-

Se ha comprobado que en este fenómeno influyen las características topográficas del trazado de las líneas, la existencia de obstáculos que puedan modificar y alterar la uniformidad e intensidad de los vientos suaves.

Si los cables se regulan según la primera columna de la Tabla 29.2, líneas sin protección, alejamos el peligro de las vibraciones, no precisándose, en un principio, la instalación dispositivos antivibradores.

Si los cables se regulan según las columnas de líneas con protección, hay que disponer antivibradores en el momento de construir la línea.

29.6. FLECHAS MÁXIMAS.

El Reglamento de Líneas establece en su artículo 27, apartado 3, que:

De acuerdo con la clasificación de las zonas de sobrecarga, definidas en el artículo 17, se determinará la flecha máxima de los conductores y cables de tierra en las hipótesis siguientes:

[3] La hipótesis G) es: Sin sobrecarga. Temperatura de 15 ºC. Tensión de cada día.

D) Hipótesis de viento. Sometidos a la acción de su peso propio y una sobrecarga de viento, según el artículo 16, a la temperatura de + 15ºC.

E) Hipótesis de la 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 + 50ºC.

F) Hipótesis del hielo. Sometidos a la acción de su peso propio y a la acción sobrecarga de hielo correspondiente a la zona, según el artículo 17, a la temperatura de 0ºC.

29.7. TABLA DE REGULACIÓN DEL CABLE.

Una línea aérea se puede dividir en un conjunto de tramos, comprendidos entre apoyos de anclaje. La regulación de los cables se hará en función del vano ideal, correspondiente a cada tramo. Las longitudes de los vanos, a efecto de regulación de cables, serán la que corresponda a cada tramo. Por tanto, la tabla en la que figuren las tensiones y las flechas, se calculará para las temperaturas que puedan producirse en el lugar en que se encuentre ubicada la línea (se suelen dar en intervalos de 5º).

El cálculo de las flechas de los distintos vanos de cada tramo, se calculan partiendo de la base que, para cada temperatura la tensión en el tramo es uniforme, con independencia de la longitud que pueda tener cada vano. En efecto para dos vanos de longitudes $\mathbf{a_1}$ y $\mathbf{a_2}$, sus flechas serán, respectivamente:

$$f_1 = \frac{a_1^2.\omega}{8.t}.m \quad ; \quad f_2 = \frac{a_2^2.\omega}{8.t}.m \qquad (29.26)$$

Dividiendo miembro a miembros (29.26) resulta:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{a_2^2}{a_1^2} \qquad (29.27)$$

O bien:

$$f_2 = f_1.\frac{a_2^2}{a_1^2} \qquad (29.28)$$

Si se parte de la flecha $\mathbf{f_1}$ calculada para un cierto vano, $\mathbf{a_1}$ y a una temperatura cualquiera $\boldsymbol{\theta_1}$ **(-20ºC)**, la expresión (29.28), permite determinar la serie de flechas $\mathbf{f_2}$ a la misma temperatura para los restantes vanos $\mathbf{a_2, a_3, ... , a_n}$.

Se empieza construyendo la Tabla 29.3, para un determinado vano (300 metros).

Tabla 29.3 Vano de 300 metros

Temperatura θ (ºC)	K *	$\Delta\theta = \theta - \theta_C = \theta - (-20)$	$K - \alpha E.\Delta\theta = -8{,}32 - 0{,}1416\Delta\theta$	$t^2[t - K - +\alpha E\Delta\theta] = 422$	t (kg.mm^{-2})	T=tS= t.288,6 (kg)	$f = a^2\omega.m^2/8t = 42{,}1/t$ (m)
-20	-8,32	0	-8,32	$t^2[t+8{,}320]=422$	5,51	1590	7,66
-15	-8,32	5	-9,028	$t^2[t+9{,}028]=422$	5,41	1561	7,80
-10	-8,32	10	-9,736	$t^2[t+9{,}736]=422$	5,3	1530	7,96
-5	-8,32	15	-10,444	$t^2[t+10{,}444]=422$	5,25	1515	8,04
0	-8,32	20	-11,152	$t^2[t+11{,}15]=422$	5,15	1486	8,19
5	-8,32	25	-11,86	$t^2[t+11{,}86]=422$	5	1443	8,44
10	-8,32	30	-12,568	$t^2[t+12{,}568]=422$	4,91	1417	8,59
15	-8,32	35	-13,276	$t^2[t+13{,}276]=422$	4,82	1391	8,76
20	-8,32	40	-13,984	$t^2[t+13{,}984]=422$	4,75	1371	8,88
25	-8,32	45	-14,692	$t^2[t+14{,}692]=422$	4,65	1342	9,08
30	-8,32	50	-15,4	$t^2[t+15{,}5]=422$	4,6	1328	9,17
35	-8,32	55	-16,108	$t^2[t+16{,}108]=422$	4,52	1304	9,34
40	-8,32	60	-16,816	$t^2[t+16{,}816]=422$	4,45	1284	9,48
45	-8,32	65	-17,524	$t^2[t+17{,}524]=422$	4,4	1270	9,59
50	-8,32	70	-18,232	$t^2[t+18{,}232]=422$	4,32	1247	9,77

(En este supuesto se parte de los siguientes datos: θ = -20ºC; S = 288,6 mm^2; T_C = 10163/3 kg; α= 17,7.10^{-6}; E = 8.000 kg.mm^{-2}; d= 22,05 mm; P = 1.083 kg.km^{-1}; P_h = 0,36.√d kg.m^{-1}: TCD = 13,7 %)

T_c = 10163/3 = 3387,6 Kg ; t_c = 3387,6/288,6 = 11,74 kg.mm^{-2}
peso propio..... p = 1,083 kg.m^{-1}
hielo .....p_h = *0,36.* √22,05 = 1,69 Kg.m^{-1}
peso aparente .....p_c = 2,773 kg.m^{-1}

Coeficiente de sobrecarga: m_c = 2,773/1,083 = 2,56

Peso por metro y milímetro cuadrado de sección: ω = 1,083/288,6 = 0,00375 Kg.m^{-1}.mm^{-2}

* $K = t_C - [a^2.m_C^2.\omega^2.E./(24.t_C^2]$; $K = 11{,}74 - 300^2.2{,}56^2.0{,}00375^2.8000/(24.11{,}74^2) = -8{,}32$

Tabla 29.4 Tensiones y flechas de regulación del conductores (Aluminio Φ = 288,6 mm^2. Manguito de hielo 0,36.√d kg.m^{-1} a -20ºC. Coeficiente de seguridad 3. Tensión máxima 3.388 kg. Vano 300 m. Tensión de cada día= 1.390 kg. Coeficiente TDC = 13,7 %).

Temperatura	Tensiones	FLECHAS EN METROS													
		LONGITUDES DE VANO EN METROS													
		50	*100*	*150*	*200*	*250*	***300***	*350*	*400*	*450*	*500*	*550*	*600*	*650*	*700*
-20	*1590*	0,21	0,85	1,91	3,40	5,31	***7,64***	10,40	13,58	17,19	21,22	25,68	30,56	35,87	41,60
-15	*1561*	0,22	0,86	1,95	3,46	5,40	***7,78***	10,59	13,83	17,51	21,61	26,15	31,12	36,52	42,36
-10	*1530*	0,22	0,88	1,99	3,53	5,51	***7,94***	10,81	14,12	17,87	22,06	26,69	31,76	37,27	43,23
-5	*1515*	0,22	0,89	2,01	3,56	5,57	***8,02***	10,92	14,26	18,05	22,28	26,96	32,08	37,65	43,66
0	*1486*	0,23	0,91	2,04	3,63	5,67	***8,17***	11,12	14,52	18,38	22,69	27,46	32,68	38,35	44,48
5	*1443*	0,23	0,94	2,11	3,74	5,85	***8,42***	11,46	14,97	18,95	23,39	28,30	33,68	39,53	45,84
10	*1417*	0,24	0,95	2,14	3,81	5,95	***8,57***	11,66	15,24	19,28	23,81	28,80	34,28	40,23	46,66
15	*1391*	0,24	0,97	2,18	3,88	6,06	***8,73***	11,88	15,52	19,64	24,25	29,34	34,92	40,98	47,53
20	*1371*	0,25	0,98	2,22	3,94	6,15	***8,86***	12,06	15,75	19,94	24,61	29,78	35,44	41,59	48,24
25	*1342*	0,25	1,01	2,26	4,02	6,28	***9,05***	12,32	16,09	20,36	25,14	30,42	36,20	42,48	49,27
30	*1328*	0,25	1,02	2,29	4,07	6,35	***9,15***	12,45	16,27	20,59	25,42	30,75	36,60	42,95	49,82
35	*1304*	0,26	1,03	2,33	4,14	6,47	***9,31***	12,67	16,55	20,95	25,86	31,29	37,24	43,71	50,69
40	*1284*	0,26	1,05	2,37	4,20	6,57	***9,46***	12,88	16,82	21,29	26,28	31,80	37,84	44,41	51,50
45	*1270*	0,27	1,06	2,39	4,25	6,65	***9,57***	13,03	17,01	21,53	26,58	32,17	38,28	44,93	52,10
50	*1247*	0,27	1,08	2,44	4,33	6,77	***9,75***	13,27	17,33	21,94	27,08	32,77	39,00	45,77	53,08

(Flecha de regulación para 15ºC y 100 m = $8,73.(100/300)^2 = 0,97$ m)

29.8. DISTANCIAS DE SEGURIDAD.

El Artículo 25 del Reglamento de Líneas dice:

1. Distancia de los conductores al terreno.

La altura de los apoyos será la necesaria para que los conductores, con la máxima flecha vertical, queden situados por encima de cualquier punto del terreno o superficies de agua no navegable a una altura mínima de:

$$5{,}3 + \frac{U}{150} \quad metros \qquad (29.29)$$

[4]

Con un mínimo de 6 metros.

[4] U es la tensión en la línea en kV.

En la hipótesis del cálculo de flechas máximas bajo la acción del viento sobre los conductores, se mantendrá una distancia inferior a un metro a la anterior señalada, considerándose en este caso el conductor con la desviación producida por el viento.

En lugares de difícil acceso, las anteriores distancias podrán ser reducidas en un metro.

Entre la posición de los conductores con su flecha máxima vertical, y la posición de los conductores con su flecha y desviación correspondiente a la hipótesis del viento a) del apartado 3 del artículo 27[5], las distancias de seguridad al terreno vendrán determinadas por la curva envolvente de los círculos de distancia trazados en cada posición intermedia de los conductores, con un radio interpolado entre la distancia correspondiente a la posición vertical y a la correspondiente a la posición de máxima desviación, en función lineal del ángulo de desviación.

2. Distancia de los conductores entre sí y entre éstos y los apoyos.

La distancia de los conductores entre sí sometidos a tensión mecánica, así como entre los conductores y los apoyos, debe ser tal que no exista riesgo alguno de cortocircuito ni entre fases ni a tierra, teniendo presente los efectos de las oscilaciones de los conductores debidas al viento y al desprendimiento de la nieve acumulada sobre ellos.

Con este objeto, la separación mínima entre conductores se determinará por la fórmula siguiente:

$$D = K.\sqrt{f + L} + \frac{U}{150} \quad metros \qquad (29.30)$$

en la cual:

D = Separación entre conductores, en metros.

K = Coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento, que se tomará de la tabla adjunta.

f = Flecha máxima en metros, según el apartado 3 del artículo 27 (Epígrafe 29.6)

L = Longitud en metros de la cadena de suspensión. En el caso de conductores fijados al apoyo por cadenas de amarre o aisladores rígidos L = 0.

U = Tensión nominal de la línea en kV.

[5]Art. 72 3 a) Hipótesis de viento. Sometidos a la acción de su peso y a una sobrecarga de viento, según el artículo 16, a la temperatura de + 15ºC.

Ángulo de oscilación	Valores de K	
	Líneas de 1ª y 2ª categoría	Líneas de 3ª categoría
Superior a 65º	0,70	0,65
Comprendido entre 40º y 65º	0,65	0,60
Inferior a 40º	0,60	0,55

Los valores de las tangentes del ángulo de oscilación de los conductores vienen dados por el cociente de la sobrecarga de viento dividida por el peso propio, por metro lineal de conductor, estando la primera determinada de acuerdo con el artículo 16.

La fórmula anterior corresponde a conductores iguales con la misma flecha. En el caso de conductores diferentes o con distinta flecha, se justificará la separación entre ellos, analizando sus oscilaciones con el viento.

En el caso de conductores dispuestos en triángulo o hexágono, y siempre que se adopten separaciones menores de las deducidas de la fórmula anterior, deberán justificarse debidamente los valores utilizados.

En zonas en las que puedan producirse formaciones de hielo sobre conductores particularmente importantes, se analizará con especial cuidado el riesgo de aproximaciones inadmisibles entre los mismos.

La separación entre conductores y cables de tierra se determinará de forma análoga a las separaciones entre conductores de acuerdo con los párrafos anteriores.

La separación mínima entre los conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos no será inferior a:

$$0{,}1 + \frac{U}{150} \quad metros \tag{29.31}$$

Con un mínimo de 0,2 metros.

En el caso de las cadenas de suspensión, la distancia de los conductores y sus accesorios en tensión al apoyo será la misma de la fórmula anterior, considerados los conductores desviados bajo la acción de una presión del viento mitad de la fijada para ellos en el artículo 16.

En el caso de emplearse contrapesos para reducir la desviación de la cadena, el proyectista justificará los valores de las desviaciones y distancias al apoyo.

29.9. VANOS MÁXIMOS ADMISIBLES EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA REAL ENTRE CONDUCTORES.

De la expresión (29.30) se deduce:

$$f = \left[\frac{D - \frac{U}{150}}{K}\right]^2 - L \qquad (29.32)$$

Que es la *flecha máxima admisible*, y por tanto, el vano máximo admisible vendrá definido a partir de este valor de la flecha, según la expresión (29.27):

$$a_{máx\ adm} = a \sqrt{\frac{f_{máx\ adm}}{f_{máx}}} \qquad (29.33)$$

Ahora bien, no es suficiente con determinar el valor anterior, sino que hay que calcular cuál será el vano máximo admisible en terreno llano con el apoyo que esté previsto colocar para la línea. Para lo cual hay que calcular la flecha máxima vertical admisible, restando a la altura de sustentación del cable, la altura mínima de los conductores respecto al terreno. La flecha máxima será la que corresponda a la hipótesis más desfavorable.