TEMA 33

CÁLCULO MECÁNICO DE UN CONDUCTOR DE CABLE

33.1. DATOS DEL CABLE.

Se trata de un cable de aluminio-acero de las siguientes características:

Designación		LA-250
Composición	Aluminio	30 x 3,15 mm
	Acero	7 x 3,15 mm
Secciones	Aluminio	234 mm^2
	Acero	54,6 mm^2
Sección total		288,6 mm^2
Sección equivalente de cobre		150 mm^2
Diámetro del alma de acero		9,45 mm
Diámetro del cable		22,05 mm
Módulo de elasticidad		8.000 $kg.mm^{-2}$
Coeficiente de dilatación por ºC		$17,7.10^{-6}$
Carga de rotura		10.163 $kg.km^{-1}$
Pesos	Aluminio	653 $kg.km^{-1}$
	Acero	430 $kg.km^{-1}$
	Total	1.083 $kg.km^{-1}$
Resistencia eléctrica a 20ºC		0,12 $\Omega.km^{-1}$

Se supone que el cable se va a utilizar en una línea aérea de 132 kV de tensión, que está situada a 1.000 de altitud sobre el nivel del mar (zona C).

El vano teórico se considerará de 300 m.

De acuerdo con el Reglamento de Líneas, las condiciones más desfavorables serán las de sobrecarga de manguito de hielo de $0,36.\sqrt{d}$ $kg.m^{-1}$, a la temperatura de -20ºC.

El coeficiente de seguridad ha de ser como mínimo de **2,5**, tomaremos **3**[1].

La tensión máxima, según la hipótesis **C)** es:

$$T_C = \frac{10163}{3} = 3.388\ kg$$

33.2. CÁLCULO MECÁNICO EN LAS HIPÓTESIS REGLAMENTARIAS.

Hipótesis C). Sobrecarga de manguito de hielo de 0,36.√d kg.m^{-1}. Temperatura de -20º C.

$$\theta_C = -20ºC$$

$$T_C = \frac{10163}{3} = 3.388kg \quad ; \quad t_C = \frac{3388}{288,6} = 11,74\ kg.mm^{-2}$$

Peso propio ..... $p = 1,083\ kg.m^{-1}$

Hielo ..... $p_h = 0,36\sqrt{22,05} = 1,690\ kg.m^{-1}$

Peso aparente ..... $p_c = 2,773\ kg.m^{-1}$

El coeficiente de sobrecarga, es:

$$m_c = \frac{p_c}{p} \quad ; \quad m_c = \frac{2,773}{1,083} = 2,56$$

El peso por metro de longitud y milímetro cuadrado de sección, es:

$$\omega = \frac{p}{S} \quad ; \quad \omega = \frac{1,083}{288,6} = 0,00375\ kg.m^{-1}.mm^{-2}$$

El valor de la constante $K = t_c - [a^2 m_c^2 \omega^2 . \frac{E}{24.t_c^2}]$, es:

[1]Art. 27 *Conductores. 1 Tracción máxima admisible*. La tracción de los conductores y cables de tierra no resultará superior a su carga de rotura, dividida por 2,5 si se trata de cables; o dividida por 3 si se trata de alambres; considerándolos sometidos a la hipótesis de sobrecarga siguiente en función de las zonas de sobrecarga definidas en el artículo 17.

$$K = 11,74 - [300^2.2,56^2.0,00375^2.\frac{8000}{24.11,74^2}] = -8,32$$

La flecha vertical, es:

$$f_c = \frac{a^2.\omega}{8.t_c}.m_c \quad ; \quad f_c = \frac{300^2.0,000375}{8.11,74}.2,56 = 9,20\ m$$

Hipótesis adicional.

Esta hipótesis no suele ser necesario calcularla, pero vamos a considerarla para generalizar el cálculo.

El artículo 27, apartado 1, del Reglamento de Líneas, dice textualmente:

En las zonas B y C, en el caso de que pudiera presentarse sobrecarga de viento superiores a las de hielo indicadas, bien fuese por preverse sobrecarga de viento de valor excepcional o por tratarse de cables huecos o con rellenos, además de la hipótesis de máxima tensión fijada anteriormente y con el mismo coeficiente de seguridad se considerará la siguiente:

Hipótesis adicional: Se considerarán los conductores y cables de tierra sometidos a su propio peso y a una sobrecarga de viento. Esta sobrecarga se considerará aplicada a una temperatura de -10° C en zona B, y -15° C en zona C. El valor de esta sobrecarga será fijado por el proyectista en el caso de preverse sobrecarga excepcionales de viento.

Empezamos por determinar la sobrecarga de viento excepcional, a que se refiere el citado artículo, cuyo valor hacemos igual al producido por el hielo.

En este caso al tratarse de una línea que está situada en la zona **C**, la sobrecarga del manguito de hielo está definida por la expresión: $0,36.\sqrt{d}\ kg.m^{-1}$.

En el caso más frecuente que la hipótesis de hielo sea más desfavorable que la de viento, el cálculo mecánico del cable se hará partiendo de las condiciones de sobrecarga de hielo, y en función de éstas habrá que plantear la ecuación de cambio de condiciones, para pasar a las de otra hipótesis cualquiera, con o sin sobrecarga.

Designamos por *ad* el subíndice de las magnitudes correspondientes a la hipótesis adicional, y con el subíndice ***c*** a las de la hipótesis de hielo, ya que estamos en la zona **C**, por tanto se verifica:

$$m_{ad} = m_c = 2,56$$

Pero como,

$$m_{ad} = \frac{p_{ad}}{p} \quad ; \quad p_{ad} = p.m_{ad} \quad ; \quad p_{ad} = 1{,}083.2{,}56 = 2{,}77 \ kg.m^{-1}$$

Puesto que:

$$p_{ad} = \sqrt{p2 + p_{v\,ad}^2} \quad ; \quad 2{,}77 = \sqrt{1{,}083^2 + p_{v\,ad}^2}$$

$$p_{v\,ad} = 2{,}55 \ kg.m^{-1}$$

Es decir que el viento de carácter excepcional que sea capaz de producir la equivalencia de la hipótesis de hielo, tiene que producir un peso aparente del cable de 2,55 kg.m^{-1}.

El peso buscado será el correspondiente a un viento que ejerza una presión P (kg.m^{-2}) que se determinará a partir de la ecuación:

$$p_{v\,ad} = P.d$$

siendo d el diámetro del cable expresado en metros. Sustituyendo lo valores en la expresión anterior resulta:

$2{,}55 = P.0{,}02205 \quad ; \quad P = 116$ kg.m^{-2}

En el siguiente cuadro se resumen los casos que se pueden presentar:

Presión del viento en la hipótesis adicional	**Relación entre los coeficientes de sobrecarga**	**Hipótesis más desfavorable**
Igual a 116 kg.m^{-2}	$m_{ad} = m_c$	Son equivalentes a la adicional y la C) de hielo.
Mayor que 116 kg.m^{-2}	$m_{ad} > m_c$	La adicional.
Menor que 116 kg.m^{-2}	$m_{ad} < m_c$	La C) de hielo.

Como los datos meteorológicos de los observatorios vienen expresados en velocidades de viento, y no en presiones de **kg.m^{-2}**, conviene expresar en **km.h^{-1}** la velocidad del viento capaz de producir una presión de **116 kg.m^{-2}**.

Según la Tabla 29.1, un viento que dé lugar a una presión de **116 kg.m^{-2}** en un cable con un coeficiente 0,6, tiene una velocidad comprendida entre **160** y **170 km.h^{-1}**.

Este viento se considera excepcional en el lugar en que nos encontramos. Por tanto, la hipótesis adicional sólo se tendrá en cuenta cuando las condiciones climatológicas de la zona así lo aconsejen.

Flecha máximas.

El Reglamento Técnico de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta tensión 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:

En zonas A, B y C:

D) Hipótesis de viento.- Sometidos a la acción de su peso propio y una sobre carga de viento, según el artículo 16, a la temperatura de +15º C.

E) 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 + 50º C.

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

De acuerdo con lo anterior, se calculan las flechas para las hipótesis D), E) y F), siendo necesario hacerlo también en está última, puesto que la línea hemos supuesto que se halla situada a más de 1.000 metros de altitud sobre el nivel del mar.

Hipótesis D). Sobrecarga de viento de 50 kg.m^{-2}. Temperatura de 15º C.

$\theta_D = 15ºC \quad \Delta\theta = \theta_D - \theta_c \;;\; \Delta\theta = 15 - (-20) = 35ºC$

Peso propio ..... $p = 1{,}083\ kg.m^{-1}$

Viento ..... $p_v = 50.0{,}02205 = 1{,}103\ kg.m^{-1}$

Peso aparente ..... $p_D = \sqrt{p^2+p_v^2} \;;\; p_D = \sqrt{1{,}083^2+1{,}103^2} = 1{,}546\ kg.m^{-1}$

Coeficiente de sobrecarga:

$$m_D = \frac{p_D}{p} \quad ; \quad m_D = \frac{1,55}{1,083} = 1,43$$

Ecuación de cambio de condiciones:

$$t_D^2.[t_D - (K - \alpha.E.\Delta\theta)] = a^2\omega^2\frac{E}{24}.m_D^2$$

$$t_D^2.[t_D - (-8,32 - 17,7.10^{-6}.8000.35)] = 300^2.0,00375^2.\frac{8000}{24}.1,43^2$$

$$t_D^2[t_D + 13,28] = 863$$

Las tensiones unitaria t_D, y total T_D, son:

$$t_D = 6,59\ kg.mm^{-2} \qquad T_D = 6,59.288,6 = 1902\ kg$$

El coeficiente de seguridad, es:

$$\frac{10163}{1902} = 5,34$$

La flecha inclinada, es:

$$f_D = \frac{a^2.\omega}{8.t_D}.m_c \quad ; \quad f_D = \frac{300^2.0,000375}{8.6,59}.1,43 = 9,15\ m$$

La proyección vertical y horizontal de esta flecha inclinada, se calcula a continuación.

El viento inclina el plano que contiene la catenaria que dibuja el cable un ángulo **i**, definido en función de coeficiente de sobrecarga $\mathbf{m_D}$ por la expresión:

$$\cos i = \frac{1}{m_D} \quad ; \quad \cos i = \frac{1}{1,43} = 0,701 \quad ; \quad i = 45,51^\circ = 45^\circ 30' 36''$$

En consecuencia, la proyección vertical de la flecha inclinada f_D es:

$$f_{Dv} = f_D.\cos i \quad ; \quad f_{Dv} = 9,15.\cos 45^\circ 30' 36'' = 6,42\ m$$

Y la proyección horizontal:

$$f_{Dh} = f_D sen\, i \quad ;fDh = 9{,}15.sen\, 45º30'36'' = 6{,}54\ m$$

Hipótesis E). Sin sobrecarga. Temperatura de 50º C.

$$\theta_E = 50ºC \quad \Delta\theta = \theta_E - \theta_c \quad ; \quad \Delta\theta = 50 - (-20) = 70ºC$$

El coeficiente de sobrecarga, es:

$m_E = 1$ (no hay sobrecarga)

La ecuación de cambio de condiciones:

$$t_E^2.[t_E - (K - \alpha.E.\Delta\theta)] = a^2\omega^2\frac{E}{24}.m_E^2$$

$$t_E^2.[t_E - (-8{,}32 - 17{,}7.10^{-6}.8000.70)] = 300^2.0{,}00375^2.\frac{8000}{24}.1^2$$

$$t_E^2[t_E + 18{,}23] = 422$$

Las tensiones unitaria t_E, y total $T_{E,}$ son:

$$t_E = 4{,}325 kg.mm^{-2} \qquad T_E = 4{,}325.288{,}6 = 1248\ kg$$

El coeficiente de seguridad, es:

$$\frac{10163}{1248} = 8{,}14$$

La flecha vertical, es:

$$f_E = \frac{a^2.\omega}{8.t_E}.m_c \quad ; \quad f_E = \frac{300^2.0{,}000375}{8.4{,}325}.1 = 9{,}75\ m$$

Hipótesis F). Sobrecarga de manguito de hielo de $0{,}36\sqrt{d}$ kg.m^{-1}. Temperatura de 0ºC.

$$\theta_F = 0ºC \quad \Delta\theta = \theta_F - \theta_c \quad ; \quad \Delta\theta = 0 - (-20) = 20ºC$$

El coeficiente de sobrecarga, es:

$$m_F = m_c = 2{,}56$$

La ecuación de cambio de condiciones, es:

$$t_F^2.[t_F - (K - \alpha.E.\Delta\theta)] = a^2\omega^2\frac{E}{24}.m_F^2$$

$$t_F^2.[t_F - (-8{,}32 - 17{,}7.10^{-6}.8000.20)] = 300^2.0{,}00375^2.\frac{8000}{24}.2{,}56^2$$

$$t_F^2[t_F + 11{,}15] = 2765$$

Las tensiones unitaria t_F, y total T_F, son:

$$t_F = 11{,}138\ kg.mm^{-2} \quad T_F = 11{,}138.288.6 = 3214\ kg$$

El coeficiente de seguridad, es:

$$\frac{10163}{3214} = 3{,}16$$

La flecha vertical, es:

$$f_F = \frac{a^2.\omega}{8.t_F}.m_c \quad ; \quad f_F = \frac{300^2.0{,}000375}{8.11{,}138}.2{,}56 = 9{,}69\ m$$

Hipótesis G). Sin sobrecarga. Temperatura de 15º C. Tensión de cada día.

$$\theta_G = 15ºC \quad \Delta\theta = \theta_G - \theta_c \quad ; \quad \Delta\theta = 15 - (-20) = 35ºC$$

El coeficiente de sobrecarga, es:

$m_G = 1$ (no hay sobrecarga)

La ecuación de cambio de condiciones, es:

$$t_G^2.[t_G - (K - \alpha.E.\Delta\theta)] = a^2\omega^2\frac{E}{24}.m_G^2$$

$$t_G^2.[t_G - (-8{,}32 - 17{,}7.10^{-6}.8000.35)] = 300^2.0{,}00375^2.\frac{8000}{24}.1^2$$

$$t_G^2[t_G + 13{,}28] = 422$$

Las tensiones unitaria t_G, y total T_G, son:

$$t_G = 4{,}828\ kg.mm^{-2} \qquad T_G = 4{,}828.288{,}6 = 1393\ kg$$

El coeficiente de seguridad, es:

$$\frac{10163}{1393} = 7{,}30$$

La flecha vertical, es:

$$f_G = \frac{a^2.\omega}{8.t_G}.m_c \quad ; \quad f_G = \frac{300^2.0{,}000375}{8.4{,}823}.1 = 8{,}74\ m$$

El coeficiente TCD está definido por la expresión:

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

Por tanto:

$$TCD = \frac{1393}{10163}.100 = 13{,}70\ \%$$

Es decir, que la tensión de cada día T_G = 1393 kg, es el 13,70 % de la carga de rotura (10163 kg), valor menor que el 18% que se considera admisible para una línea sin protección contra vibraciones con cables de aluminio-acero.

Hipótesis I) . Sobrecarga de viento de 50 kg.m^{-2}. Temperatura de -5º C.

$$\theta_I = -5ºC \quad \Delta\theta = \theta_I - \theta_c \quad ; \quad \Delta\theta = -5 - (-20) = 15ºC$$

El coeficiente de sobrecarga, es:

$$m_I = m_D = 1{,}43$$

La ecuación de cambio de condiciones, es:

$$t_I^2.[t_I - (K - \alpha.E.\Delta\theta)] = a^2\omega^2\frac{E}{24}.m_I^2$$

$$t_I^2.[t_I - (-8,32 - 17,7.10^{-6}.8000.15)] = 300^2.0,00375^2.\frac{8000}{24}.1,43^2$$

$$t_I^2[t_I + 10,44] = 863$$

Las tensiones unitaria t_I, y total $T_{I,}$ son:

$$t_I = 7,03\ kg.mm^{-2} \quad T_I = 7,03.288,6 = 2029\ kg$$

El coeficiente de seguridad, es:

$$\frac{10163}{2029} = 5,01$$

La flecha inclinada, es:

$$f_I = \frac{a^2.\omega}{8.t_I}.m_c \quad ; \quad f_I = \frac{300^2.0,000375}{8.7,03}.1,43 = 8,58\ m$$

Coeficientes de seguridad del conductor.

Los coeficientes de seguridad del conductor en las hipótesis reglamentarias acabadas de calcular son:

Hipótesis reglamentarias	Coeficientes de seguridad
C)	3 (Mínimo)
D)	5,34
E)	8,14 (Máximo)
F)	3,16
G)	7,30
I)	5,01

Resumen de las flechas máximas.

De acuerdo con el Reglamento[2] , las flechas máximas calculadas según las distintas hipótesis son las siguientes:

Hipótesis reglamentarias	Flechas máximas en metros
C) Hipótesis de sobrecarga de hielo de $0{,}36\sqrt{d}$ kg.m^{-1}. Temperatura de - 20º C	$f_c = 9{,}20$
D) Hipótesis de viento. Peso propio y sobrecarga de viento a la temperatura de 15ºC	$f_D = 9{,}15$
E) Hipótesis de temperatura. Peso propio, a la temperatura máxima previsible, no inferior a 50º C	$f_E = 9{,}75$
F) Hipótesis de hielo. Peso propio y sobrecarga de hielo correspondiente a la zona, y a la temperatura de 0º C	$f_F = 9{,}69$
G) Hipótesis sin sobrecarga. Temperatura de 15º C. Tensión de cada día.	$f_G = 8{,}74$
I) Hipótesis de viento. Temperatura de - 5º C.	$f_I = 8{,}58$

En consecuencia la mayor flecha es $f_E = 9{,}75$ m

33.3. TABLA DE REGULACIÓN DEL CABLE.

Las líneas están formadas por un conjunto de vanos de longitudes distintas entre sí, en consecuencia la regulación hay que hacerla en función del vano ideal de cada tramo comprendido entre dos apoyos de anclaje.

Por tanto, las longitudes de vano que figuran en la tabla de regulación se corresponden con los vanos ideales que puedan existir a lo largo de la línea.

La tabla en la que figuran tanto las tensiones como las flechas correspondientes, se calcula para todas las temperaturas que se pueden presentar en la zona donde se encuentre ubicada la línea. En este caso se ha obtenido para temperaturas que oscilan entre - 20º C hasta 50º C, con intervalos de cinco en cinco grados.

Las longitudes de los vanos se considerarán desde el mínimo ideal de regulación que se suponga que pueda haber hasta el máximo.

[2] Artículo 27, apartado 3, del Reglamento Técnico de Líneas Aéreas de Alta Tensión.

Estos vanos suelen considerarse de cincuenta en cincuenta metros, o con variaciones menores, si se quiere obtener una precisión mayor.

La tabla se obtiene fácilmente tal como a continuación se explica.

Supongamos que el cable se hubiese calculado para un vano de 300 metros de longitud, y que para él se han determinado ya las tensiones y flechas desde la temperatura de -20º C hasta la de 50º C, inclusive.

Puesto que para cada temperatura la tensión ha de ser uniforme, sea cual sea la longitud de los vanos del tramo limitado por dos apoyos de anclaje, el cálculo de las distintas flechas se realiza teniendo en cuenta que la flecha correspondiente a un determinado vano es proporcional al cuadrado de la longitud del mismo.

En efecto, para dos vanos cualesquiera de longitudes $\mathbf{a_1}$ y $\mathbf{a_2}$, sus flecha serán respectivamente:

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

Sí se dividen miembro a miembro, resulta:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{a_1^2}{a_2^2}$$

Despejando f_2, resulta:

$$f_2 = f_1.[\frac{a_2}{a_1}]^2$$

Si $\mathbf{f_1}$ es la flecha ya calculada antes para el vano $\mathbf{a_1 = 300}$ metros, según se ha supuesto, y a una temperatura cualquiera $\boldsymbol{\theta}$, la fórmula que se acaba de ver permite determinar la serie de flechas $\mathbf{f_2}$ a la misma temperatura $\boldsymbol{\theta}$ para la serie de vanos de longitudes $\mathbf{a_2, a_3, ..., a_n}$.

Para obtener la tabla de tensiones y flechas de regulación, hay que calcular previamente, la tabla de cálculo siguiente.

TABLA DE TENSIONES Y FLECHAS PARA UN CABLE DE ALUMINIO-ACERO DE SECCIÓN 288,6 mm^2 (VANO DE 300 METROS)

Temperatura en grados centígrados θ^o	*K*	*$\Delta\theta = \theta - \theta_c$*	*$K - \alpha E \Delta\theta$*	*$t^2[t-K-\alpha E\Delta\theta] = a^2\omega^2 E/24.m^2$*	*t $(kg.mm^{-2})$*	*$T=tS$ (kg)*	*$f=a^2\omega m/8t$ (m)*
-20	-8,32	0	-8,320	421,9	5,51	1590,2	7,66
-15	-8,32	5	-9,028	421,9	5,41	1561,3	7,80
-10	-8,32	10	-9,736	421,9	5,30	1529,6	7,96
-5	-8,32	15	-10,444	421,9	5,25	1515,2	8,04
0	-8,32	20	-11,152	421,9	5,15	1486,3	8,19
5	-8,32	25	-11,860	421,9	5,00	1443,0	8,44
10	-8,32	30	-12,568	421,9	4,91	1417,0	8,59
15	-8,32	35	-13,276	421,9	4,82	1391,1	8,75
20	-8,32	40	-13,984	421,9	4,75	1370,9	8,88
25	-8,32	45	-14,692	421,9	4,65	1342,0	9,07
30	-8,32	50	-15,400	421,9	4,60	1327,6	9,17
35	-8,32	55	-16,108	421,9	4,52	1304,5	9,33
40	-8,32	60	-16,816	421,9	4,45	1284,3	9,48
45	-8,32	65	-17,524	421,9	4,40	1269,8	9,59
50	-8,32	70	-18,232	421,9	4,32	1246,8	9,77

TABLA DE TENSIONES Y FLECHAS DE REGULACIÓN DE CABLE DE ALUMINIO-ACERO DE SECCIÓN 288,6 mm^2

Temperatura	***Longitud de los vanos en metros***												
	50	***100***	***150***	***200***	***250***	***300***	***350***	***400***	***450***	***500***	***550***	***600***	***650***
-20	***21***	***0,9***	***1,9***	***3,4***	***5,5***	***7,7***	***10***	***14***	***17***	***21***	***26***	***31***	***36***
-15	0,2	***0,9***	***2***	***3,5***	***5,4***	***7,8***	***11***	***14***	***18***	***22***	***26***	***31***	***37***
-10	0,2	***0,9***	***2***	***3,5***	***5,5***	***8***	***11***	***14***	***18***	***22***	***27***	***32***	***37***
-5	0,2	***0,9***	***2***	***3,6***	***5,6***	***8***	***11***	***14***	***18***	***22***	***27***	***32***	***38***
0	0,2	***0,9***	***2,1***	***3,6***	***5,7***	***8,2***	***11***	***15***	***18***	***23***	***28***	***33***	***38***
5	0,2	***0,9***	***2,1***	***3,8***	***5,9***	***8,4***	***12***	***15***	***19***	***23***	***28***	***34***	***40***
10	0,2	***1***	***2,2***	***3,8***	***6***	***8,6***	***12***	***15***	***19***	***24***	***29***	***34***	***40***
15	0,2	***1***	***2,2***	***3,9***	***6,1***	***8,8***	***12***	***16***	***20***	***24***	***29***	***35***	***41***
20	0,3	***1***	***2,2***	***4***	***6,2***	***8,9***	***12***	***16***	***20***	***25***	***30***	***36***	***42***
25	0,3	***1***	***2,3***	***4***	***6,3***	***9,1***	***12***	***16***	***20***	***25***	***31***	***36***	***43***
30	0,3	***1***	***2,3***	***4,1***	***6,4***	***9,2***	***13***	***16***	***21***	***26***	***31***	***37***	***43***
35	0,3	***1***	***2,3***	***4,2***	***6,5***	***9,3***	***13***	***17***	***21***	***26***	***31***	***37***	***44***
40	***0,3***	***1,1***	***2,4***	***4,2***	***6,6***	***9,5***	***13***	***17***	***21***	***26***	***32***	***38***	***45***
45	***0,3***	***1,1***	***2,4***	***4,3***	***6,7***	***9,6***	***13***	***17***	***22***	***27***	***32***	***38***	***45***
50	***0,3***	***1,1***	***2,4***	***4,3***	***6,8***	***9,8***	***13***	***17***	***22***	***27***	***33***	***39***	***46***

Así por ejemplo, la flecha de regulación correspondiente al vano de 450 m de longitud, y a la temperatura de 20º C, será:

$$f = 8{,}88.[\frac{450}{300}]^2 = 20{,}00\ m$$

Como observación, diremos que para el vano de cálculo, 300 m, y a la temperatura de 15ºC, la tensión será de 1.391,1 kg, que es la hipótesis G), *tensión de cada día*.

Esta coincidencia se da por haber supuesto que en dicha hipótesis G), la temperatura es, precisamente de 15ºC. De no haber sido así, no se hubiese dado.

34.4. OBSERVACIONES A LA TABLA DE REGULACIÓN.

La tabla de regulación ha sido calculada para la temperaturas comprendidas entre -20ºC y 50ºC, con vanos que van de 50 a 650 m de longitud.

En realidad, la tabla basta calcularla para las temperaturas y vanos se que vayan a utilizar en la práctica.

Es fácilmente comprensible que a temperaturas de -20ºC, las brigadas de tendido no estarán trabajando en el campo, al menos en España.

Si el vano máximo que vaya a haber en la línea es, por ejemplo del orden de 600 m, será suficiente limitar a esta longitud la de los vanos a incluir en la tabla.

Como orientación diremos que en nuestro ejemplo, sería probablemente suficiente calcular la tabla para temperaturas comprendidas entre 5ºC y 50ºC, con vanos desde 100 hasta 450 metros.

Las previsiones de cada caso son las que deberá tener en cuenta el proyectista para redactar con mayor o menor amplitud la tabla de regulación de tensiones y flechas.

33.5. DISTANCIA DE LOS CONDUCTORES AL TERRENO, DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES ENTRE SÍ Y ENTRE ÉSTOS Y LOS APOYOS.

En nuestro ejemplo se trata de una línea de 132 kV de tensión, por tanto la distancia de los conductores al terreno, según el Reglamento[3] será:

$$Distancia\ al\ terreno = 5{,}3 + \frac{U}{150}$$

Por tanto:

$$Distancia\ al\ terreno = 5{,}3 + \frac{132}{150} = 6{,}18\ m$$

La de los conductores entre sí, la determinaremos también según estipula el Reglamento[4],

$$Distancia\ entre\ conductores = K\sqrt{f + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Teniendo en cuenta que:

Peso del conductor ..... 1,083 $kg.m^{-1}$
Sobrecarga del viento ..... 1,1025 $kg.m^{-1}$

Ángulo de oscilación de los conductores,

[3] Artículo 25, apartado 1 del Reglamento Técnico de Líneas Aéreas de Alta tensión.

[4] Artículo 25, apartado 2 del Reglamento Técnico de Líneas Aéreas de Alta tensión

$$tang\ i = \frac{1,1025}{1,083} = 1,0180 \quad ; \quad i = 45,51^{\circ} <> 45^{\circ}30'36''$$

Al estar el ángulo comprendido entre 40º y 65º, y tratarse de una línea de 1ª categoría se toma para K el valor 0,65.

La longitud de la cada de suspensión es del orden de 1,70 m, por tanto:

$$Distancia\ entre\ conductores = 0,65\sqrt{9,75 + 1,70} + \frac{132}{150} = 3,08\ m$$

Es decir, que 3,08 m es la distancia mínima de seguridad entre conductores.

Con el ángulo de oscilación de 45º 30' 36", la separación mínima entre los conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos, según el Reglamento[5] no deberá ser inferior a:

$$\text{Distancia entre conductores y accesorios} = 0,1 + \frac{U}{150}$$

En nuestro caso:

$$\text{Distancia entre conductores y accesorios} = 0,1 + \frac{132}{150} = 1\ m$$

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

Veamos cuales son los vanos máximos admisibles en función de la distancia real entre conductores.

A título de orientación diremos que las distancias reales que suelen adoptarse en las líneas son las siguientes :

Tensión de la línea en kilovoltios	Distancia real entre conductores en metros
132220380	De 5 a 6 De 7 a 8 De 9,5 a 12

En nuestro ejemplo, hemos supuesto que la tensión es de 132 kV, por tanto de la expresión:

[5]Artículo 25, apartado 2 del Reglamento Técnico de Líneas Aéreas de Alta tensión

$$K\sqrt{f + \lambda} + \frac{U}{150}$$

Se deduce:

$$f = \left[\frac{D - \frac{U}{150}}{K}\right]^2 - \lambda$$

Con vano de apoyos con cadenas de suspensión, y con los siguientes datos:

D = 5 m ; K = 0,65 ; U = 132 kV ; λ = 1,70 m

Se tiene:

$$f_{máx\ adm} = \left[\frac{5 - \frac{132}{150}}{0,65}\right]^2 - 1,70 = 38,476\ m$$

Y por tanto, el vano máximo admisible será:

$$a_{máx\ adm} = a\sqrt{\frac{f_{máx\ adm}}{f_{máx}}} \quad ; \quad a_{máx\ adm} = 300\sqrt{\frac{38,476}{9,75}} = 595,96\ m$$

Con vano entre apoyo con cadenas de amarre, y con los siguientes datos:

D = 5 m ; K = 0,65 ; U = 132 kV ; λ = 0 m

Se tiene:

$$f_{máx\ adm} = \left[\frac{5 - \frac{132}{150}}{0,65}\right]^2 = 40,17\ m$$

Y por tanto, el vano máximo admisible será:

$$a_{máx\ adm} = a\sqrt{\frac{f_{máx\ adm}}{f_{máx}}} \quad ; \quad a_{máx\ adm} = 300.\sqrt{\frac{40,17}{9,75}} = 608,93\ m$$

En resumen, y para los datos que se han supuesto, los vanos máximos admisibles en función de la distancia real entre conductores, son:

Vano entre apoyos	Vanos máximos admisibles en función de la distancia real entre conductores; metros
Con cadenas de suspensión	595,96
Con cadenas de amarre	608,93

Es decir del orden de los 600 metros.

Ahora bien, no basta con determinar los valores de los citados vanos, sino que hay que calcular también cuál será el vano máximo admisible en terreno llano con el apoyo que se prevea para la línea.

Supongamos que éste tenga una altura de suspensión de 18,80 m.

La altura mínima de los conductores ha de ser, según se calculó, de 6,18 m, que como medida de prudencia tomaremos 7 m.

De aquí se deduce, que en el caso de flecha vertical máxima admisible, disponemos de una longitud de,

$$18{,}80 - 7 = 11{,}80\ m$$

Que corresponde a un vano máximo admisible en terreno llano,

$$a_{máx\ adm} = 300.\sqrt{\frac{11{,}80}{9{,}75}} = 330\ m$$

Algo mayor que el del cálculo (de 300 m), pero de este orden de magnitud.

Los cálculo son pues admisibles, y el vano de 300 m que se supuso, puede ser aumentado hasta los 330 m, quedando los conductores en éste caso como mínimo a 7 m del suelo, altura mayor que la reglamentaria de 6,18 m.