

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

I.T.I. Mecánica

**CÁLCULO MECÁNICO DE CONDUCTORES Y HERRAJES,
SEGÚN EL REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES
TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN
LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN**

AUTOR: Fernando Goñi Yeste

DIRECTOR: Departamento de Ingeniería Eléctrica

TUTOR: Fernando Soto Martos

Leganes, 27 de abril de 2009

INDICE

1. Introducción	pág.2
2. Objeto	pág.7
3. Normativa aplicada	pág. 8
4. Cálculo mecánico de conductores de líneas eléctricas	pág.9
4.1. Hilo homogéneo sometido a peso propio. Ecuación de la catenaria	pág. 9
4.2. Ecuación de la parábola	pág. 11
4.3. Análisis comparativo	pág. 13
4.4. Influencia de factores ambientales	pág. 14
4.5. Ecuación de cambio de estado	pág. 19
4.6. Resumen de hipótesis reglamentarias	pág. 22
5. Caso de las líneas aéreas de Alta Tensión	pág. 30
5.1. Cálculo del conductor en un vano entre dos apoyos.	pág. 30
5.2. Cálculo de los herrajes de sujeción.	pág. 33
5.3. Cálculo de herrajes de amarre.	pág. 36
6. Aplicación informática	pág. 38
6.1. Estructura de la aplicación	pág. 38
6.2. Entrada de datos	pág. 40
6.3 Salidas de resultados	pág. 42
7. Ejemplos prácticos	pág. 46
7.1. Ejemplo a resolver. Enunciado	pág. 46
7.2. Resolución teórica	pág. 47
8. Conclusiones	pág. 54
9. Bibliografía	pág. 55
ANEXOS	pág. 56
I. Ejemplos resueltos	pág. 56
II. Manual de usuario de la aplicación	pág. 66
III. Características de conductores	pág. 70
IV. Capturas de pantalla	pág. 71

1. Introducción.

El sistema productivo moderno se basa fundamentalmente en la utilización de la energía eléctrica. Esta utilización da lugar a lo que se ha dado en llamar Sistema Eléctrico, el cual se divide en tres partes que son:

- Generación
- Transporte
- Distribución

Por lo general los puntos de generación de energía eléctrica se encuentran alejados de los lugares de consumo, por esto es necesario transportarla hasta los centros de distribución de energía. A su vez, desde estos centros de distribución se hace necesario su transporte hasta los centros de consumo. En la actualidad tanto el transporte como la distribución de la energía eléctrica se realiza, fundamentalmente, a través de conductores eléctricos dispuestos en unas infraestructuras denominadas líneas. Según las necesidades impuestas por el volumen de consumo (grandes industrias), de la zona a donde esté destinada (centros urbanos) la energía y los lugares por los sea necesario trazarlas, las líneas variarán en tipo y tensión. Según esto las líneas se dividen, fundamentalmente, en dos tipos, líneas aéreas y líneas subterráneas.

1.1. Líneas Aéreas.

Las líneas aéreas se usan habitualmente para Alta Tensión (a partir 1 kV) y sus tensiones normalizadas son:

20 kV, 66 kV, 132 kV, 220 kV y 400 kV.

La red eléctrica española opera con corriente alterna trifásica, frecuencia de 50 Hz con tensión nominal entre fases superior a 1 kV.

Estas líneas se componen de conductores eléctricos suspendidos de apoyos por medio de cadenas de aisladores que componen los herrajes, los que sujetan el conductor son los herrajes de alineación y los que lo sujetan al apoyo son los herrajes de amarre. Los herrajes se seleccionan según el diámetro del conductor y el peso del cable, que es el peso propio del conductor además del peso de la sobrecarga que soporte según las condiciones climatológicas de la zona donde se sitúe la línea. El empleo de estas líneas es, fundamentalmente, para el transporte a grandes distancias y la distribución primaria. Como se puede suponer, el factor determinante en el diseño de estas infraestructuras, aparte del cálculo eléctrico, es el cálculo mecánico de las mismas.

El cálculo mecánico de líneas aéreas incluye los siguientes apartados:

a) Cálculo mecánico de conductores.

Los conductores más empleados actualmente para estos tipos de líneas son los de aluminio – acero, que a pesar de tener menor conductividad eléctrica, tienen una resistencia mecánica mejor que los de cobre y suponen una opción más económica.

En el cálculo mecánico de conductores es necesario conocer propiedades del conductor como su tensión de rotura para tenerla en cuenta a la hora de su tendido, su sección para calcular la carga que soporta el conductor sometido a sobrecargas, el módulo de elasticidad para calcular tensiones y el coeficiente de dilatación lineal del cual depende el comportamiento del conductor con la temperatura y por lo tanto si implica un aumento o disminución de la tensión mecánica en el mismo. La elección del conductor por su sollicitación mecánica depende en su mayor parte de la zona donde se sitúa la línea, que puede ser A, B ó C según la altura a la que se encuentre. La zona conlleva unas sobrecargas debidas a viento, hielo ó su acción conjunta determinadas, siendo la zona C la más desfavorable y la situada a mayor altura de todas.

Es siempre interesante utilizar conductores con la menor sección posible, ya que la magnitud de las sobrecargas que se van a estudiar (hielo y viento) depende proporcionalmente del diámetro del conductor, además dicho diámetro depende también de la cantidad de hielo que se deposite sobre el conductor. Pero hay tener en cuenta que también cuanto menor es el diámetro, menor es la tensión de rotura y por eso es muy importante comprobar que nuestro conductor soporta todo el espectro de tensiones a las que puede estar sometido durante su vida útil. Con respecto a este aspecto una opción interesante a emplear son los conductores comprimidos.

Hay que estudiar la tensión más desfavorable con la que se puede encontrar el conductor, ya que en las condiciones en las que el cable es tendido que son con temperatura mayor que 0°C y sin sobrecarga, la sollicitación mecánica se aleja bastante de la tensión límite que puede soportar el conductor. Al hacer el cálculo de la resistencia mecánica hay que tener cuidado con la flecha que tiene el conductor en todo momento, porque al disminuir la tensión sobre el mismo, que suele coincidir con el aumento de temperatura y la ausencia de sobrecarga, la flecha aumenta debido a la dilatación del cable, pudiendo sobrepasar la distancia de seguridad al terreno.

El criterio que se seguirá en este proyecto es que la tensión máxima de rotura (según coeficiente de seguridad) que soporta el conductor tendrá lugar en las condiciones más desfavorables de sobrecarga y temperatura (acción combinada de hielo y viento a la temperatura más baja posible).

También se tendrá en cuenta el criterio de flecha máxima del conductor, que se dará generalmente en condiciones de alta temperatura en el entorno donde se sitúa la línea y sin sobrecarga (según hipótesis reglamentarias).

Como parámetros en la geometría de un conductor suspendido entre dos apoyos se deben conocer el **vano (a)**, que es la proyección horizontal de la distancia entre los mismos, el **vano real (b)** que es la distancia de la recta que une ambos apoyos (coincide con el vano en el caso de apoyos al mismo nivel que es lo que se va a hacer en este proyecto) y la **flecha (f)** que es la máxima distancia vertical entre la recta que une los puntos de sujeción del conductor y éste.

Finalmente, el cálculo mecánico de conductores tiene la siguiente finalidad:

- Obtener la tensión mecánica con la que se debe tender un conductor, partiendo de unas determinadas condiciones de temperatura y sobrecarga y según la geometría del vano y las propiedades del conductor. Además una vez conseguido esto, ver las distintas tensiones a las que está sometido el conductor en otras condiciones de tensión y temperatura.
- Obtener la máxima flecha del conductor para los distintos casos que se plantean y comprobar la distancia al suelo, entre conductores, o a otros elementos.

Para el cálculo de lo primero, será necesario emplear la **ecuación del cambio de condiciones**, que asigna nuevos valores de tensión a unas nuevas condiciones de temperatura y sobrecarga en el conductor a partir de unas condiciones de temperatura y tensión mecánica iniciales.

Para el cálculo de lo segundo, se llegará a una expresión distinta para la flecha a partir de la ecuación de la catenaria. Se hará el planteamiento teórico para la ecuación de la catenaria gracias al uso de la herramienta informática.

b) Cálculo de herrajes.

Los conductores antes calculados se fijan a las torres de alta tensión mediante los herrajes. Estos dispositivos mecánicos se emplean además de para sujetar los conductores, para tensarlos y para ajustar la tensión a la que el conductor esté suspendido, según si en determinadas condiciones el conductor se contrae o se dilata.

Existen fundamentalmente dos tipos de herrajes:

- **De alineación:** son los empleados en zonas de mitad de línea, en lugares que no requieren una gran resistencia a la rotura.
- **De amarre:** se utilizan en los extremos de línea, y en torres intermedias donde es necesario aportar más rigidez a la línea para evitar la caída en serie de la línea por una sollicitación mecánica extraordinaria de la línea.

Como se menciona anteriormente, la forma de elegir los elementos de la cadena de herrajes es según el diámetro del conductor, para seleccionar las grapas de alineación y amarre, y la tensión para el resto de elementos.

Los herrajes son elementos que aparecen con coeficientes de seguridad altos, es decir, que están sobredimensionados con el fin de soportar sobrecargas puntuales. El criterio para ver que la cadena de herrajes soporta la tensión mecánica a la que se somete el conductor es buscar el elemento de la cadena que menos soporta y comprobar que supere dicha tensión mecánica en el cable.

c) Cálculo de apoyos.

Los conductores se sujetan en unos apoyos, y se tienden con una determinada tensión mecánica. Esta tensión según reglamento, no debe superar el cociente entre la tensión de rotura del conductor partido por tres.

. Según la función y la situación del apoyo se diferencian fundamentalmente en:

- **Apoyos de alineación:** en puntos intermedios de la línea.
- **Apoyos de anclaje:** sujetan la línea cada determinado número de apoyos.
- **Apoyos de ángulo:** se utilizan en los cambios de dirección de la línea
- **Apoyos de fin de línea:** son los que soportan el tense de toda la línea

Actualmente, la mayoría de estos apoyos de líneas de alta tensión son metálicos, aunque es frecuente ver en líneas de baja tensión apoyos de madera. Los apoyos metálicos son habitualmente galvanizados para evitar corrosión por su exposición al aire libre.

d) Cálculo de las cimentaciones.

La fijación de los apoyos al terreno se hace por medio de una cimentación de hormigón que está ideada para resistir sin desplazamientos los esfuerzos y momentos transmitidos por el apoyo y todos los elementos que soporta (conductores, crucetas herrajes etc.),

Para el dimensionamiento y cálculo es determinante la naturaleza y condiciones del terreno en donde se asiente dicha cimentación.

Cálculo de distancias de seguridad

Fuera de este apartado de cálculo mecánico se hará el cálculo de distancias de seguridad, en el que se estudiarán las siguientes distancias.

-Distancia al terreno: esta distancia no debe superar la distancia mínima que debe haber entre un conductor cualquiera y el suelo donde se sitúa la línea. Para este apartado será interesante comprobar las situaciones de flecha máxima.

-Distancia entre conductores: hay que vigilar la distancia entre conductores porque habrá casos en los que debido al viento éstos puedan entrar en contacto con el peligro que supone.

-Distancias al apoyo: estas distancias al apoyo dependiendo de si el herraje es de alineación o de amarre. Si es de **alineación** el valor de esta distancia será un parámetro dependiente de la tensión de la línea cuyo valor viene tabulado en el reglamento además de la consideración de lo que se desplazaría el conductor en el caso de aparición de viento. Si el herraje es de **amarre** el valor de la distancia al apoyo será directamente el valor tabulado mencionado anteriormente.

1.2. Líneas Subterráneas.

Se emplean fundamentalmente para la distribución local. La construcción de estos dos tipos se diferencia en las implicaciones mecánicas de su diseño, siendo estas de gran importancia para el caso de las líneas aéreas. Para el caso que nos ocupa no es relevante el análisis de las líneas subterráneas.

Este proyecto trata de los apartados a) y b) del punto 1.1, que corresponden al cálculo mecánico de conductores y de los herrajes, además del punto del reglamento donde se incluyen las consideraciones sobre las distancias de seguridad.

2. Objeto.

El objeto del presente proyecto se resume en los siguientes puntos:

- Conocer y analizar el cálculo mecánico de conductores y herrajes de líneas eléctricas aéreas.
- Creación de una herramienta informática para el cálculo mecánico de conductores y herrajes en líneas aéreas de Alta Tensión en los supuestos indicados en el RLAT de Miércoles 19 de marzo de 2008.
- Conocer la normativa aplicable.

3. Normativa aplicada.

UNE-EN 50189	2000	Conductores para líneas eléctricas aéreas. Alambres de acero galvanizado.
UNE-EN 50183	2000	Conductores para líneas eléctricas aéreas. Alambres de aleación aluminio – magnesio – silicio.
UNE-EN 50182	2002	Conductores para líneas eléctricas aéreas. Conductores de alambres redondos conductorados en capas concéntricas.
UNE 21018	1980	Normalización de conductores desnudos a base de aluminio, para líneas eléctricas aéreas.
UNE 207009	2002	Herrajes y elementos de fijación y empalme para líneas eléctricas aéreas de alta tensión.
UNE EN 61284	1999	Líneas aéreas eléctricas. Requisitos y ensayos para herrajes.

4. Cálculo mecánico de conductores de líneas eléctricas.

4.1. Hilo homogéneo sometido a peso propio (Catenaria).

Se denomina **catenaria** a la curva de equilibrio que adopta un hilo uniforme sometido a su propio peso. Se supone que éste vale p por unidad de longitud, es decir $p = -pk$. Tomando el eje z como vertical y el eje x horizontal, las ecuaciones de equilibrio con $F_x = 0$ y $F_z = -q$ resultan:

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \cdot \left(T \frac{dx}{ds} \right) = 0; \\ \frac{d}{ds} \cdot \left(T \frac{dz}{ds} \right) - p = 0. \end{cases}$$

De la primera ecuación:

$$T \frac{dx}{ds} = T_x = cte \Rightarrow T_x = T_0 = cte$$

Aplicando la regla de la cadena a la segunda ecuación de equilibrio,

$$\frac{d}{ds} \left[T \frac{dz}{dx} \frac{dx}{ds} \right] - p = 0,$$

y eliminando T a favor de T_0 ,

$$\frac{d}{ds} \left(T_0 \frac{dz}{dx} \right) - p = 0.$$

Reorganizando términos y aplicando de nuevo la regla de la cadena,

$$\frac{T_0}{p} \frac{d}{dx} \left(\frac{dz}{dx} \right) \frac{dx}{ds} = 1.$$

Llamando $c = T_0 / p$ (parámetro de la catenaria) y $z' = dz/dx$, y considerando

$$\frac{dx}{ds} = \frac{dx}{\sqrt{dx^2 + dz^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (z')^2}},$$

la ecuación se convierte en:

$$c \cdot \frac{\frac{d}{dx} \cdot z'}{\sqrt{1+(z')^2}} = 1$$

La primitiva de esta expresión es: $c \cdot \operatorname{senh}^{-1} \cdot (z')$. Integrando con la condición inicial que corresponde a situar el origen de abscisas en el vértice o punto de tangente horizontal,

$$z'|_{x=0} = 0$$

se obtiene

$$x = c \cdot \operatorname{senh}^{-1} \cdot z'$$

o bien, invirtiendo la relación

$$z' = \operatorname{senh} \frac{x}{c}$$

Integrando de nuevo con la condición inicial $z|_{x=0} = a$ resulta finalmente

$$z = c \cdot \operatorname{cosh} \frac{x}{c}$$

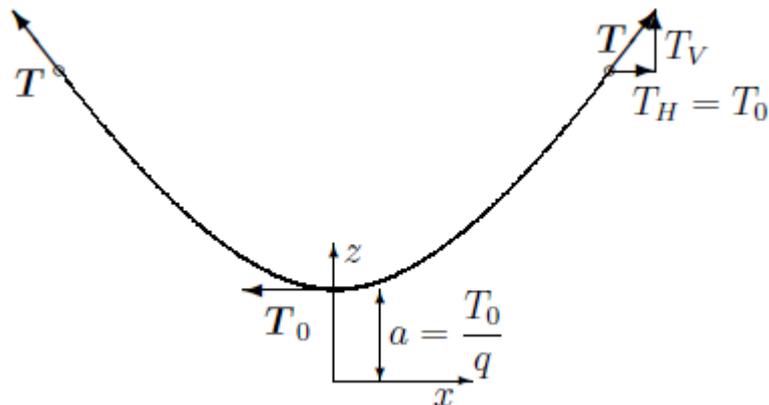


Figura 1. Configuración de un hilo sometido a su propio peso (catenaria)

Al coeficiente ‘a’ resultante del cociente de la tensión mecánica del conductor entre su peso, se le llamará ‘c’ para no confundirlo con el parámetro que indica el vano, y además se le conoce como parámetro de la catenaria. Al peso propio se le llamará ‘p’. Para vanos a nivel la flecha máxima, queda:

$$c = \frac{T}{p}$$

$$f_{catenaria} = z - c = c \cdot \cosh \frac{x}{2 \cdot c} - c = c \cdot \left(\cosh \frac{x}{2 \cdot c} - 1 \right)$$

El 2 que aparece en el denominador es resultado del desarrollo de McLaurin que se verá más adelante para el cálculo de la catenaria.

El parámetro en esta ecuación que indica el valor del vano es 'x', que para casos como el que se está estudiando de vanos a nivel será directamente 'a'.

La configuración de equilibrio puede verse en la figura anterior. Debido a las constantes de integración tomadas, el vértice de la catenaria corresponde a las coordenadas (x=0, z=a).

La tensión en un punto cualquiera, según la fórmula general para fuerzas conservativas y paralelas es:

$$T = p \cdot c \cdot \cosh \frac{x}{2 \cdot c}$$

Siendo las tensiones horizontales y verticales las siguientes:

$$T_v = p \cdot s = p \cdot c \cdot \sinh \frac{x}{c},$$

$$T_H = T_0 = p \cdot c$$

4.2. Ecuación de la parábola.

Partiendo de la ecuación para la catenaria para el punto más bajo de la curva antes escrita se obtiene:

$$z = c \cdot \cosh \frac{x}{2 \cdot c}$$

siendo 'a' la constante de la curva, también llamado como se ha mencionado anteriormente "parámetro de la catenaria" que es igual a $\frac{T}{p}$.

$T \equiv$ componente horizontal de la tensión

$p \equiv$ peso del conductor por metro lineal

Trasladando el eje de las x de forma que pase por el punto más bajo (a) de la curva, se obtiene lo siguiente:

$z = c \cdot \cosh \frac{x}{2 \cdot c} - c = c \cdot \left(\cosh \frac{x}{2 \cdot c} - 1 \right)$, que es la misma expresión que la que sale antes para vanos a nivel.

A partir de los desarrollos en serie para la función hiperbólica del coseno de McLaurin, y sustituyendo en la ecuación:

$\cosh = 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots$ tomando los dos primeros términos, considerando despreciables el resto nos queda:

$$z = c \cdot \cosh \frac{x}{c} - c = c \cdot \left(\cosh \frac{x}{c} - 1 \right) = c \cdot \left(1 + \frac{\left(\frac{x}{c} \right)^2}{2!} - 1 \right) = c + \frac{x^2}{2 \cdot c} - c = \frac{x^2}{2 \cdot c} = \frac{x^2}{2 \cdot \frac{T}{p}}$$

Siendo esta última la ecuación de la parábola. Se puede considerar una opción válida para puntos que no se alejen demasiado del eje vertical, que serían puntos en los que el vano es muy grande o muy inclinado.

Para el caso de vano a nivel, se sustituye 'x' por a/2 y se obtiene, siendo este 'a' la longitud del vano:

$$f_{parábola} = \frac{x^2}{2 \cdot \frac{T}{p}} = \frac{\frac{a^2}{2^2}}{2 \cdot \frac{T}{p}} = \frac{a^2 \cdot p}{8 \cdot T}$$

esta solución es aproximada ya que en la sustitución por la serie de McLaurin se ha omitido términos del desarrollo, pero aún así las soluciones no se alejan de la ecuación de la catenaria más que los errores que posteriormente se calcularán.

Según lo anterior, se puede obtener también la longitud de arco de catenaria entre el punto más bajo de la curva y un punto cualquiera de abscisas 'x', para ello se hace la aproximación para la serie del seno hiperbólico de McLaurin y se sustituye en la siguiente expresión:

$$c \cdot \sinh \frac{x}{c} = c \cdot \sinh \frac{x}{T/p}$$

y sabiendo que:

$$\sinh = x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots$$

tomando de nuevo los dos primeros términos, y siendo L la longitud de curva en un vano a nivel de longitud 2x, nos queda:

$$\frac{L}{2} = c \cdot \left(\frac{x}{c} + \frac{\left(\frac{x}{c}\right)^3}{3!} \right) = x + \frac{x^3}{6 \cdot c^2}$$

para el caso que se estudia, de vano a nivel, $x = \frac{a}{2}$, donde este 'a' es la longitud del vano, se sustituye en la última expresión:

$$\frac{L}{2} = x + \frac{x^3}{6 \cdot c^2} = \frac{a}{2} + \frac{\frac{a^3}{2^3}}{6 \cdot c^2} = a + \frac{a^3 \cdot p^2}{24 \cdot T^2}$$

Esta expresión se usará para obtener la ecuación de condiciones.

4.3. Análisis comparativo.

Para vanos menores de 300 metros y flechas menores del 6% del vano, se puede aproximar el valor que toma la flecha en una catenaria a una parábola, en la que se puede comprobar que en los puntos intermedios del vano, el error para la flecha es del orden de un 0,5% con respecto a los valores que toma para una catenaria. El error es de un 2% para flechas que sean un 10% del vano.

A continuación se muestra un ejemplo en el que se calculan las flechas correspondientes a un vano a nivel de 200, 300 y 400 metros, con conductor aluminio-acero de 54,6 mm², en zona A, a 50 °C sin sobrecarga:

Vano (m)	Constante (a) T/p	Flecha (m)		Error	
		Catenaria	Parábola	m	%
200	863	5,80	5,79	0,01	0,17
300	884	12,75	12,72	0,03	0,24
400	889	22,58	22,49	0,09	0,40

Para a= 200m

$$f_{parábola} = \frac{a^2 \cdot p}{8 \cdot T} = \frac{200^2 \cdot p}{8 \cdot T} = \frac{200^2}{8 \cdot 863} = 5,793742758 m$$

$$f_{catenaria} = c \cdot \left(\cosh \frac{x}{c} - 1 \right) = \frac{T}{p} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T/p} \right) - 1 \right) = 5,800228368 \text{ m}$$

Para a=300m

$$f_{parábola} = \frac{a^2 \cdot p}{8 \cdot T} = \frac{200^2 \cdot p}{8 \cdot T} = \frac{300^2}{8 \cdot 884} = 12,72624434 \text{ m}$$

$$f_{catenaria} = c \cdot \left(\cosh \frac{x}{c} - 1 \right) = \frac{T}{p} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T/p} \right) - 1 \right) = 12,7568086 \text{ m}$$

Para a=400m

$$f_{parábola} = \frac{a^2 \cdot p}{8 \cdot T} = \frac{200^2 \cdot p}{8 \cdot T} = \frac{400^2}{8 \cdot 889} = 22,49718785 \text{ m}$$

$$f_{catenaria} = c \cdot \left(\cosh \frac{x}{c} - 1 \right) = \frac{T}{p} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T/p} \right) - 1 \right) = 22,59223436 \text{ m}$$

Como se puede observar, para el vano superior a 300 m, el error sigue por debajo del 0,5% porque la flecha no supera el 6% de la longitud del vano, concretamente el 5,6%.

Por lo tanto la aproximación de la catenaria a una parábola es una opción válida, pero como ya se ha apuntado anteriormente, se obtendrán los valores de las flechas a partir de la ecuación de la catenaria gracias a las herramientas informáticas a las que cualquier usuario medio tiene acceso.

4.4. Influencia de factores ambientales.

Las líneas aéreas eléctricas, tienen como posible desventaja el situarse en contacto con el medio ambiente, al contrario de lo que ocurre con las líneas eléctricas enterradas.

Por esto, los conductores se ven sometidos a cargas adicionales, además de la del peso del propio conductor, provocado por diversos factores ambientales, que se particulariza en la acción del viento y del hielo individualmente o de forma combinada.

A la hora de determinar el valor de dichas sobrecargas, se tomarán en cuenta las diferentes situaciones establecidas en el actual reglamento, que posteriormente se comentará, para líneas eléctricas aéreas de alta tensión.

a) Sobrecarga de viento.

El estudio de la influencia que ejerce la presión del viento sobre los conductores es un tema complejo de tratar.

Se hace la suposición de que el viento se presenta horizontalmente, considerando como situación más desfavorable, y situación con la que se calcula en la práctica dicha sobrecarga, cuando el viento actúa en dirección normal a la dirección del conductor.

Por tanto se considera la carga por metro lineal de conductor, como la resultante entre la acción horizontal del viento, por metro lineal, que se denominará 'p_v' y el propio peso del conductor al que se le llamará directamente 'p', resultando de ello:

$$r = \sqrt{p^2 + p_v^2}$$

Esta resultante está contenida en un plano vertical normal al plano que define la dirección de la línea.

La curva que forma el conductor en estas condiciones, esta contenida en un plano definido por la recta de unión de los puntos de sujeción en los apoyos, y la dirección de la resultante anterior. La resultante total R de todos los esfuerzos a lo largo del vano, formará con la vertical un ángulo φ, de manera que:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p_v}{p}$$

Suponiendo que el esfuerzo del viento p_v, actúa con la misma intensidad a lo largo de todo el vano, lo que significa que en el caso de vanos con apoyos a distinto nivel, este esfuerzo de viento tiende a disminuir, durante el periodo que dure su acción, las consecuencias que son resultado del desnivel de dichos apoyos.

Esto ocurre de tal manera que si se pudiera llegar a considerar despreciable el peso propio del conductor frente a la acción del viento, se podría tomar como el caso de un vano a nivel con el conductor situado en un plano paralelo a la dirección del viento.

El desplazamiento de la curva del plano vertical por la acción del viento, es acompañado de un alargamiento de la longitud proyectada 'a' del vano, y una disminución del desnivel entre apoyos 'h', cumpliéndose que:

$$a' = K \cdot a ; \quad h' = h \cdot \cos \varphi ;$$

$$\text{siendo } K = \sqrt{1 + \frac{h^2}{a^2} \cdot \operatorname{sen}^2 \varphi}$$

Teóricamente, esto debería dar lugar a una corrección de las ecuaciones obtenidas para el supuesto de la curva situada en un plano vertical. Pero realmente la acción del viento no es estática, pues éste varía habitualmente a lo largo del conductor.

La curva de equilibrio del conductor no es en la práctica una curva plana contenida en el plano que pasa por los puntos de apoyo, y es paralelo a la fuerza que actúa sobre dicho conductor. El viento se presenta por ráfagas, lo que saca a la curva de ese plano. Por tanto las ecuaciones que se pudieran obtener no nos darían soluciones exactas.

Por esto se prefiere generalmente utilizar en el caso en que han de considerarse el esfuerzo del viento, las mismas ecuaciones que han sido deducidas con carácter general, para curvas contenidas en un plano vertical.

Al final, el método seguido en la práctica para el cálculo de la sobrecarga de viento es el siguiente:

P: presión del viento en kg/m^2 de sección longitudinal del conductor.

d: diámetro del conductor, en metros.

S: sección del mismo en metros cuadrados.

Y suponiendo el esfuerzo por unidad de longitud del viento la acción de aplicar la presión del viento sobre el diámetro de la sección del conductor:

$$p_v = P \cdot d \quad \text{en kg/m}$$

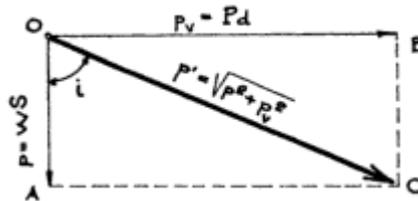


Figura 2. Peso aparente de un conductor con sobrecarga de viento

el peso por unidad de longitud sería:

$$p = \omega \cdot S \quad \text{en kg/m}$$

obteniendo la resultante:

$$p' = \sqrt{p^2 + p_v^2} \quad \text{en kg/m}$$

A la resultante p' se le llama peso aparente del conductor en el caso de sobrecarga de viento. Para relacionar la velocidad del viento con su presión sobre conductor, se coge la expresión que recoge el reglamento:

$q =$

$$= 60 \times \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \quad \text{daN/m}^2 \quad \text{para conductores de } d \leq 16 \text{ mm}$$

$$= 50 \times \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \text{ daN/m}^2 \quad \text{para conductores de } d > 16 \text{ mm}$$

La velocidad del viento viene expresada en km/h.

b) Sobrecarga de hielo.

A diferencia del viento, el hielo no aparece en todas las zonas donde se sitúe la línea, por lo tanto el cálculo de su sobrecarga dependerá de donde se sitúe la línea. El análisis de las distintas zonas se verá más adelante en consideraciones reglamentarias.

En el caso del manguito de viento es más fácil de ver vectorialmente cómo se comporta sobre el conductor, que es en la misma dirección y sentido que el peso propio del conductor. Por lo tanto, en este caso la resultante es directamente la suma de ambos esfuerzos sobre el conductor.

Por un lado se tiene el peso del manguito de hielo, p_h que se mide en kg/m y variará según se encuentre en la zona A, B o C, y depende además del diámetro del conductor sobre el que actúa.

Por otro lado se tiene otra vez el peso propio del conductor, que como se ha visto antes era:

$$p = \omega \cdot S \quad \text{en kg/m}$$

donde ω es la densidad del conductor, al igual que antes.

Al final se tiene que la resultante p' será:

$$p' = p + p_h \quad \text{kg/m}$$

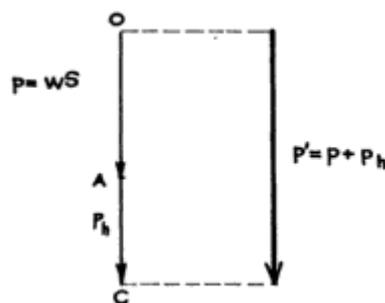


Figura 3. Peso aparente de un conductor con sobrecarga de manguito de hielo

c) Simultaneidad de hielo y viento.

El reglamento considera este caso como algo excepcional, pero resulta interesante al menos explicar cómo se estudiaría esta hipotética situación.

Ahora el viento actúa no solo sobre la superficie de conductor sino que además también lo hace sobre el espesor de hielo que haya en el mismo, por lo tanto la resultante de la presión del viento será:

$$p_v = P \cdot (d + 2e) \quad \text{kg/m}$$

donde 'd' es el diámetro del conductor y 'e' el espesor del manguito de hielo.

Este viento al igual que antes actúa horizontalmente en un plano normal al plano que sigue la dirección del conductor.

La acción vertical en este caso es también la ejercida por la suma del peso del conductor y del manguito de hielo:

$$p'_{\text{peso+hielo}} = p + p_h$$

Por lo que al final se obtiene una resultante que es el resultado de la suma vectorial de ambas resultantes:

$$p'_{\text{total}} = \sqrt{(p + p_h)^2 + p_v^2} \quad \text{kg/m}$$

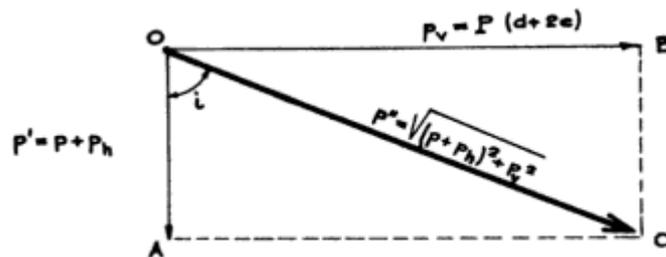


Figura 4. Peso aparente de un conductor con sobrecargas simultáneas de viento y manguito de hielo.

y las variables que intervienen son las conocidas:

$$p \equiv \text{peso propio del cable en kg / m}$$

$$p_h \equiv \text{peso del manguito de hielo en kg / m}$$

$$p_v \equiv \text{presión del viento sobre conductor y hielo en kg / m}$$

4.5. Ecuación de cambio de estado.

Esta ecuación nos servirá para hallar las tensiones que aparecen en un conductor para distintas hipótesis de viento, hielo y temperatura a partir de las condiciones más desfavorables a las que se pueda ver sometido dicho conductor.

Sea un conductor de sección 'S', módulo de elasticidad 'E' y coeficiente de dilatación lineal ' α ' tendido en un vano de longitud 'a'. Dicho vano estará situado a nivel es decir, que los apoyos están a la misma distancia del suelo.

Se llamará p_0 , t_0 , y T_0 a los valores iniciales de peso por metro lineal de longitud de conductor, temperatura y componentes horizontales de la tensión. Al variar los valores de p_0 y t_0 , variará también el valor de T_0 . Los valores finales para estos parámetros recibirán la nomenclatura de p , t y T respectivamente. Dichos valores serán el resultado que salga para las nuevas condiciones de equilibrio.

a) Caso de la parábola.

Según lo visto anteriormente, el valor de la longitud de un arco de parábola para un vano a nivel de longitud 'a' es:

$$L = a + \frac{a^3 \cdot p^2}{24 \cdot T^2}$$

por lo tanto la diferencia entre arcos para condiciones iniciales y finales será:

$$a + \frac{a^3 \cdot p^2}{24 \cdot T^2} - \left(a + \frac{a^3 \cdot p_0^2}{24 \cdot T_0^2} \right) = \frac{a^3 \cdot p^2}{24 \cdot T^2} - \frac{a^3 \cdot p_0^2}{24 \cdot T_0^2} = \frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{p^2}{T^2} - \frac{p_0^2}{T_0^2} \right)$$

La variación de la longitud del conductor debida a la temperatura es la que incluye el coeficiente de dilatación lineal del conductor. Haciendo la aproximación de que con la longitud del vano 'a' en lugar de la longitud del conductor no supone una variación apreciable a los efectos indicados, aun así se hará el programa de la manera más precisa posible, es decir, incluyendo la longitud 'L'.

$$\alpha \cdot a \cdot (\theta - \theta_0)$$

donde:

$\alpha \equiv$ coeficiente de dilatación lineal

$a \equiv$ longitud del vano en metros

$\theta \equiv$ temperatura final en °C

$\theta_0 \equiv$ temperatura inicial en °C

La variación de longitud del conductor debida al aumento de tensión es:

$$\frac{a}{S \cdot E} \cdot (T - T_0)$$

en esta expresión se ha hecho la misma aproximación que antes, pero como ya se dijo, en el programa aparecerá la longitud real (L) del conductor. Los parámetros que aparecen en ella son:

$a \equiv$ longitud del vano en metros

$S \equiv$ sección del conductor en mm^2

$E \equiv$ módulo de elasticidad en kg / mm^2

$T \equiv$ tensión final en el conductor en kg

$T_0 \equiv$ tensión inicial en el conductor en kg

Deberá cumplirse entonces que la variación de la longitud del arco sea igual a lo que varía ésta debido a la variación de temperatura más la variación de tensión.

$$\alpha \cdot a \cdot (t - t_0) + \frac{a}{S \cdot E} \cdot (T - T_0) = \frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{p^2}{T^2} - \frac{p_0^2}{T_0^2} \right)$$

A esta expresión es la que se denomina ‘ecuación de cambio de condiciones’, que nos permite calcular la componente horizontal de la tensión ‘T’, que sale para valores del peso unitario de conductor ‘p’, y temperatura ‘t’, partiendo de una situación de equilibrio con parámetros iniciales los mencionados con anterioridad.

Esta es la ecuación de cambio de condiciones referente a la parábola, por lo tanto las soluciones obtenidas serán aproximadas, pero en este caso el error será menor que para el caso de la flecha porque en la serie de McLaurin para la longitud, se empieza a despreciar términos a partir de la potencia a la quinta (debido al desarrollo del seno hiperbólico usado para el caso de la longitud) y además se plantea la ecuación como la diferencia de longitudes entre situaciones de equilibrio, luego el error cometido, como lo dicho anteriormente, es poco significativo.

De todas maneras en la programación de la aplicación informática, se hará para el caso de la catenaria, aplicando directamente el seno hiperbólico.

b) Caso de la catenaria.

En este caso se procede de igual forma al caso anterior, pero en este la longitud del arco de catenaria es la suma de las longitudes de arco desde el punto más bajo de la catenaria a los apoyos. Donde cada arco vale lo siguiente:

$$L = c \cdot \operatorname{senh} \frac{a}{2 \cdot c} = \frac{T}{p} \cdot \operatorname{senh} \frac{a \cdot p}{2 \cdot T}$$

En la expresión de más abajo se multiplica la ecuación de la longitud por 2, que corresponde a la suma de ambos semiarcos que componen el arco de la catenaria, y que por tanto es la longitud total del mismo.

Sustituyendo el valor real del arco por la longitud del vano usada para hallar la ecuación válida para la parábola. La longitud final será la suma de la longitud inicial mas la variación de longitud debida al cambio en la temperatura mas la variación de longitud debido al cambio tensión mecánica en el conductor. La expresión queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} L_1 + L_\theta + L_T = L_2 &\Rightarrow \frac{2 \cdot T_1}{p_1} \cdot \left(\operatorname{senh} \frac{a \cdot p_1}{2 \cdot T_1} \right) + \frac{2 \cdot T_1}{p_1} \cdot \left(\operatorname{senh} \frac{a \cdot p_1}{2 \cdot T_1} \right) \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) \\ &+ \frac{2 \cdot T_1}{p_1} \cdot \left(\operatorname{senh} \frac{a \cdot p_1}{2 \cdot T_1} \right) \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{S \cdot E} = \frac{2 \cdot T_2}{p_2} \cdot \operatorname{senh} \frac{a \cdot p_2}{2 \cdot T_2} \Rightarrow \\ \frac{2 \cdot T_1}{p_1} \cdot \left(\operatorname{senh} \frac{a \cdot p_1}{2 \cdot T_1} \right) \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \frac{(T_2 - T_1)}{S \cdot E} \right) &= \frac{2 \cdot T_2}{p_2} \cdot \operatorname{senh} \frac{a \cdot p_2}{2 \cdot T_2} \end{aligned}$$

4.6. Resumen de hipótesis reglamentarias.

-Prescripciones generales.

Campo de aplicación.

Las prescripciones técnicas aplicadas son las que deberán cumplir las líneas eléctricas de alta tensión con conductores desnudos, entendiéndose como tales las de corriente alterna trifásica a 50 Hz de frecuencia, cuya tensión nominal eficaz entre fases sea superior a 1 kV. De entre las tensiones nominales normalizadas se recomienda la utilización de las siguientes:

20 kV, 66 kV, 132 kV, 220 kV y 400 kV

La tensión de la línea, en kV, se designará por la letra U_n para la tensión nominal y U_s para la tensión más elevada.

-Materiales: conductores y conductores de tierra, herrajes y accesorios, aisladores y apoyos.

Conductores y conductores de tierra.

La sección nominal mínima admisible de los conductores de cobre y sus aleaciones será de 10 milímetros cuadrados. En el caso de los conductores de acero galvanizado, la sección mínima admisible será de 12,5 milímetros cuadrados.

-Requisitos mecánicos.

La carga de rotura de los conductores será calculada con la norma UNE-EN 50182.

-Cálculos mecánicos.

Cargas y sobrecargas a considerar.

Cargas permanentes.

Se consideraran las cargas verticales debidas al peso propio de los distintos elementos: conductores, aisladores, herrajes, conductores de tierra –si los hubiere-, apoyos y cimentaciones.

Fuerzas del viento sobre los componentes de las líneas aéreas.

Se considerará un viento mínimo de referencia de 120 km/h (33 m/s) de velocidad, excepto para categoría especial que será de 140 km/h (38,89 m/s). Fuerzas del viento sobre los conductores.

Fuerzas del viento sobre los conductores.

La presión del viento en los conductores causa fuerzas transversales a la dirección de la línea, además de las tensiones sobre los conductores. La fuerza del viento sobre un apoyo de alineación para cada conductor del haz vendrá definida por la siguiente expresión:

$$F_c = q \times d \times \frac{a_1 + a_2}{2} \text{ daN}$$

siendo:

d: diámetro del conductor, en metros

a_1, a_2 : longitudes de los vanos adyacentes, en metros. La semisuma de a_1 y a_2 es el vano de viento o eolovano, a_v .

q: presión del viento

$$= 60 \times \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \text{ daN/m}^2 \text{ para conductores de } d \leq 16 \text{ mm}$$

$$= 50 \times \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \text{ daN/m}^2 \text{ para conductores de } d > 16 \text{ mm}$$

Fuerzas del viento sobre las cadenas de aisladores.

La fuerza del viento sobre la cadena de aisladores será:

$$F_c = q \times A_i \text{ daN}$$

siendo:

A_i : área de la cadena de aisladores proyectada horizontalmente en un plano vertical paralelo al eje de la cadena de aisladores, m^2 .

$$q: \text{ presión del viento} = 70 \times \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \text{ daN/m}^2$$

Sobrecargas motivadas por el hielo.

A estos efectos el país se clasifica en 3 zonas:

- Zona A: la situada a menos de 500 metros de altitud sobre el nivel del mar.
- Zona B: la situada entre 500 y 1.000 metros de altitud sobre el nivel del mar.
- Zona C: la situada a una altitud superior a 1.000 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 conductores de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor: $0,18 \times \sqrt{d}$ daN por metro lineal, siendo 'd' el diámetro del conductor o conductor de tierra en milímetros.
- Zona C: se considerarán sometidos los conductores y conductores de tierra a la sobrecarga de un manguito de hielo de valor: $0,36 \times \sqrt{d}$ daN por metro lineal, siendo 'd' el diámetro del conductor o conductor de tierra en milímetros.

-Conductores.

Tracción máxima admisible.

La tracción máxima admisible de los conductores y conductores de tierra no resultará superior a su carga de rotura mínima dividida por 2,5 para conductores conductoradas, o dividida por 3 si se trata de conductores de un alambre, considerándoles sometidos a las hipótesis de sobrecarga de la siguiente tabla según la zona donde sea(A, B ó C).

ZONA A			
Hipótesis	Temperatura (°C)	Sobrecarga Viento	Sobrecarga Hielo
Tracción máxima de viento	-5	Mínimo 120 ó 140 km/h según la tensión de la línea	No se aplica
ZONA B			
Hipótesis	Temperatura (°C)	Sobrecarga Viento	Sobrecarga Hielo
Tracción máxima de viento	-10	Mínimo 120 ó 140 km/h según la tensión de la línea	No se aplica
Tracción máxima de hielo	-15	No se aplica	Según el apartado 3.1.3.
Tracción máxima de hielo+viento	-15	Mínimo 60 km/h	Según el apartado 3.1.3.
ZONA C			
Hipótesis	Temperatura (°C)	Sobrecarga Viento	Sobrecarga Hielo
Tracción máxima de viento	-15	Mínimo 120 ó 140 km/h según la tensión de la línea	No se aplica
Tracción máxima de hielo	-20	No se aplica	Según el apartado 3.1.3.
Tracción máxima de hielo+viento	-20	Mínimo 60 km/h	Según el apartado 3.1.3.

Tabla 1. Condiciones de las hipótesis que limitan la tracción máxima admisible.

- Comprobación de fenómenos vibratorios.

A la hora de calcular las tracciones mecánicas de los conductores y conductores de tierra deberá tenerse en cuenta la incidencia de posibles fenómenos vibratorios. La elección de una tracción adecuada a la temperatura ambiente y el uso de amortiguadores y separadores debidamente posicionados, ayudan a prevenir estos fenómenos.

Se recomienda que la tracción a temperatura de 15°C no supere el 22% de la carga de rotura, si se realiza el estudio y se instalan dispositivos amortiguadores, o que bien no supere el 15 % de la carga de rotura si no se instalan.

-Herrajes.

Los herrajes sometidos a tensión mecánica por los conductores y conductores de tierra o por los aisladores, teniendo un coeficiente de seguridad mecánica nunca inferior a 3 respecto de su carga mínima de rotura.

Las grapas de amarre del conductor deben soportar una tensión mecánica en el amarre igual o superior al 95 % de la carga de rotura del mismo, sin que se produzca su deslizamiento.

- Aisladores.

El criterio de fallo será la rotura o pérdida de sus cualidades aislantes, al ser sometidos simultáneamente a tensión eléctrica y sollicitación mecánica.

La característica resistente básica de los aisladores será la carga electromecánica mínima garantizada, cuya probabilidad de que aparezcan casos menores es inferior al 2%.

El coeficiente de seguridad mecánica no será inferior a 3. Si la carga de rotura electromecánica mínima garantizada se obtuviese mediante control estadístico en la recepción, el coeficiente de seguridad podrá reducirse a 2,5.

- Apoyos.

Los criterios de agotamiento a considerar en el cálculo mecánico de los apoyos, serán según los casos:

- a) Rotura (descohesión).
- b) Fluencia (deformaciones permanentes).
- c) Inestabilidad (pandeo o inestabilidad general).
- d) Resiliencia (resistencia a bajas temperaturas).

- Distancias mínimas de seguridad.

Las distancias internas son dadas únicamente para diseñar una línea con una aceptable capacidad de resistir las sobretensiones.

Las distancias externas son utilizadas para determinar las distancias de seguridad entre los conductores en tensión y los objetos debajo o en las proximidades de la línea. El objetivo es evitar el daño de las descargas eléctricas al público en general, a las personas que trabajan en las cercanías de la línea eléctrica y a las personas que trabajan en su mantenimiento.

Estas distancias se refieren a las líneas de transmisión que utilicen conductores desnudos. Cuando no se especifique que la distancia es horizontal o vertical, será tomada la menor distancia entre las partes con tensión y el objeto considerado, teniéndose en cuenta en el caso de carga con viento la desviación de los conductores en la cadena de aisladores.

Se consideran tres tipos de distancias eléctricas:

D_{el} : distancia de aislamiento en el aire mínima especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase y objetos a potencial de tierra en sobretensiones de frente lento o rápido. D_{el} puede ser tanto interna, cuando se consideran distancias del conductor a la estructura de la torre, como externas, cuando se considera una distancia del conductor a un obstáculo.

D_{pp} : distancia de aislamiento en el aire mínima especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido. D_{pp} es una distancia interna.

a_{som} : valor mínimo de la distancia de descarga de la cadena de aisladores, definida como la distancia más corta en línea recta entre las partes en tensión y las partes puestas a tierra.

Se aplicarán las siguientes consideraciones para determinar las distancias internas y externas:

- a) La distancia eléctrica D_{el} , previene descargas eléctricas entre las partes en tensión y objetos a potencial de tierra, en condiciones de explotación normal de la red.
- b) La distancia eléctrica D_{pp} , previene las descargas eléctricas entre fases durante maniobras y sobretensiones de rayos.
- c) Es necesario añadir a la distancia externa, D_{el} , una distancia de aislamiento adicional, D_{add} , para que en las distancias mínimas de seguridad al suelo, a líneas eléctricas, a zonas de arbolado, etc. se asegure que las personas u objetos no se acerquen a una distancia menor que D_{el} de la línea eléctrica.
- d) La probabilidad de descarga a través de la mínima distancia interna, a_{som} , debe ser siempre mayor que la descarga a través de algún objeto externo o persona. Así para cadenas de aisladores muy largas, el riesgo de descarga debe ser mayor sobre la distancia interna a_{som} que a objetos externos o personas.

Tensión más elevada de la red Us (kV)	Del (m)	Dpp (m)
3,6	0,08	0,10
7,2	0,09	0,10
12	0,12	0,15
17,5	0,16	0,20
24	0,22	0,25
30	0,27	0,33
36	0,35	0,40
52	0,60	0,70
72,5	0,70	0,80
123	1,00	1,15
145	1,20	1,40
170	1,30	1,50
245	1,70	2,00
420	2,80	3,20

Tabla 2. Distancias de aislamiento eléctrico para evitar descargas

En nuestro caso sólo se analizarán dos distancias, que son:

a) Distancias en el apoyo.

a.1) Distancias entre conductores.

La distancia entre los conductores de fase del mismo circuito o circuitos distintos debe ser tal que no haya riesgo alguno de cortocircuito entre fases.

La separación mínima entre conductores de fase se determinará por la fórmula siguiente:

$$D = K \cdot \sqrt{F + L} + K' \cdot D_{pp}$$

en la cual:

D= separación entre conductores de fase del mismo circuito o circuitos distintos en metros.

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

K'= coeficiente que depende de la tensión nominal de la línea K'=0,85 para líneas de categoría especial y K'=0,75 para el resto de líneas.

F= flecha máxima en metros, para las hipótesis que se especifican en el reglamento.

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.

D_{pp} : distancia mínima aérea especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido. Los valores de D_{pp} se indican en la anterior tabla de distancias de aislamiento eléctrico para evitar descargas.

Ángulo de oscilación	Valores de K	
	Líneas de tensión nominal superior a 30 kV	Líneas de tensión nominal igual o inferior a 30 kV
Superior a 65 °	0,7	0,65
Comprendido entre 40° y 65°	0,65	0,6
Inferior a 40°	0,6	0,55

Tabla 3. Coeficiente K en función del ángulo de oscilación.

En el caso de conductores diferentes o con distinta flecha, la separación entre los conductores se determinará con la misma fórmula y el coeficiente K mayor y la flecha F mayor de los dos conductores.

La separación mínima entre los conductores y sus accesorios en tensión y los apoyos no será inferior a D_{el} , con un mínimo de 0,2 m.

b) Distancias al terreno.

La altura de los apoyos será la necesaria para que los conductores, con su máxima flecha vertical según las hipótesis de temperatura y de hielo según la tabla de hipótesis, queden situados por encima de cualquier punto del terreno, senda, vereda o superficies de agua no navegables, a una altura mínima de:

$$D_{add} + D_{el} = 5,3 + D_{el} \quad \text{en metros,}$$

con un mínimo de 6 metros.

5. Caso de las líneas aéreas de Alta Tensión.

5.1. Cálculo del conductor en un vano entre dos apoyos.

Esto es una aplicación de lo anteriormente expuesto para el cálculo del conductor comprendido entre un apoyo, es decir, de la tensión necesaria a la que estará sometido dicho conductor y de la flecha que se genera en este para unos determinados condicionantes en el entorno. Para dicho cálculo se deben conocer previamente los siguientes datos:

- a) Se necesita saber el valor de la longitud del vano (a) y del desnivel entre apoyos (h) para empezar a calcular. Se supone el desnivel como la consecuencia de seguir el vano de izquierda a derecha, por lo tanto se considera positivo cuando se tiene el apoyo de la derecha situado a un nivel superior al apoyo de la izquierda y al revés.
- b) Hay que conocer la zona en la que se sitúa nuestro vano (A, B ó C), la cual determinará las posibles hipótesis reglamentarias a considerar para caso de hielo y viento.
- c) Se escoge de un catálogo de conductores el que se quiera utilizar en un principio para conocer propiedades como:
 - Peso propio del conductor (p) en kg/m.
 - Coeficiente de dilatación (α) en $^{\circ}\text{C}^{-1}$.
 - Módulo de elasticidad (E) en kg/mm^2 .
 - Tensión de rotura en kg. Según el reglamento la tensión máxima que debe haber en el conductor tiene que ser el valor de esta tensión dividido por 3. Este valor máximo de la tensión se dará en el apoyo más alto donde se sujeta el conductor.

Una vez se sepan éstos, se calcula el valor de la tensión máxima en el punto central del vano mediante la siguiente expresión:

$$T_m = \frac{1}{4} \cdot \left[(2 \cdot T_A - q \cdot h) + \sqrt{(q \cdot h - 2 \cdot T_A)^2 - 2 \cdot q^2 \cdot b^2} \right]$$

donde:

T_A : tensión en el punto más alto del conductor (cualquier apoyo en caso de vanos a nivel).

q : peso de conductor entre el punto más alto y el punto más bajo de la curva que describe.

h : desnivel entre apoyos.

b : longitud real del conductor.

La tensión total en cualquier punto del conductor, es el resultado de la suma entre la componente horizontal de la tensión y el peso de la longitud proyectada de conductor entre el punto más bajo de la curva y el punto sometido a estudio. Por lo tanto la diferencia de tensiones entre estos dos puntos será el peso de la longitud proyectada de conductor entre ellos.

Cuando se tenga un vano inclinado se trabajará considerando que el valor más alto de tensión se da en la sujeción del conductor al apoyo más alto, siendo el valor de ésta la que limite la tensión máxima que se puede dar en el conductor, que será como se ha dicho la tensión de rotura del conductor partida por 3.

A continuación se puede ver que la relación entre la tensión en el punto medio del vano (T_m) y el punto más alto de la curva descrita por el conductor, es la siguiente:

$$T_A = T_m + q \cdot d_a = T_m + q \cdot \left(\frac{h}{2} + f \right)$$

donde 'f' es el valor de la flecha que viene de la expresión:

$$f = \frac{T}{q} \cdot \left(\cosh\left(\frac{a/2}{T/q}\right) - 1 \right)$$

en este punto es necesario decir que 'T' es el valor de la componente horizontal de la tensión que viene de:

$$T = \frac{a}{b} \cdot T_m$$

Esto nos lleva a que teniendo un vano de longitud real (b) y desnivel (h), se deja el valor de la tensión en el punto más alto (T_A) fijo de manera que no se sobrepase la tensión máxima que cumpla con el reglamento, el valor a tomar para la tensión a tomar en el punto central del vano será el valor anterior de T_m .

Por supuesto, lo anterior ha de ser aplicado en las condiciones más desfavorables de sobrecarga y temperatura posibles en el conductor, que son las que originan las tensiones máximas en el conjunto.

Para el caso de un vano a desnivel, sería necesario calcular el vano de regulación, pero en el caso que nos ocupa en este proyecto sólo se tratará con casos a nivel por lo tanto el parámetro a utilizar en la ecuación de cambio de estado es directamente el valor de la longitud proyectada del vano (a). El paso siguiente es aplicar dicha ecuación de cambio de estado para el vano en cuestión. La tensión de partida será la dicha anteriormente

$T_A = \frac{T_{rotura}}{3}$ tomando como temperatura la mínima considerada para la zona y como sobrecarga la de hielo en las zonas en la que se pueda dar, o la de viento para el caso en que no.

De esta ecuación de cambio de estado se saca el nuevo valor de 'T' para las condiciones dadas, y a partir de dicho valor se obtiene el valor de la flecha. Si para esta flecha no se cumplen las condiciones reglamentarias de distancias de seguridad, se procederá de la siguiente manera:

- a) Subir los apoyos.
- b) Acortar el vano.
- c) Cambiar el conductor.

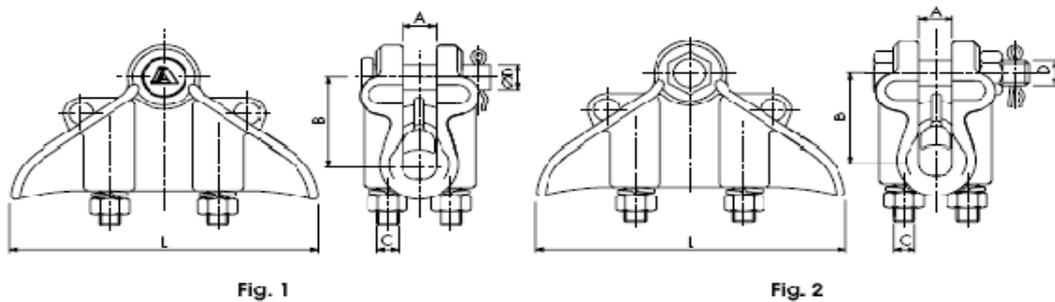
5.2. Cálculo de los herrajes de sujeción.

Los herrajes de sujeción son los encargados de soportar el peso del conductor sometido a su peso propio y las distintas sobrecargas de hielo y viento que pueda soportar en varios casos. La cadena de suspensión se compone de los siguientes elementos:

- Cadena de eslabones.
- Horquilla bola.
- Aisladores.
- Rótula y grapa de suspensión.

A continuación se muestra el catálogo empleado en el programa.

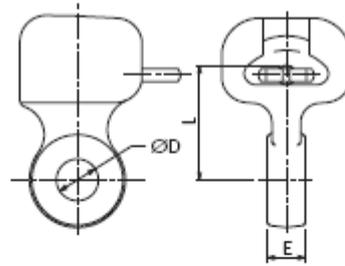
a) Grapa de suspensión para conductores de aluminio.



Ref.	Fig.	Conductor		mm					Estribos Nº	Par de apriete	Carga de rotura	Peso
		min.	max.	A	B	C	D	L				
GS-1	1	5	12	19	41	M-10	16	140	2	30	2.500	0,460
GS-1T	2	5	12	19	41	M-10	M-16	140	2	30	2.500	0,460
GS-2	1	12	17	19	50	M-12	16	170	2	30	6.000	0,850
GS-2T	2	12	17	19	50	M-12	M-16	170	2	30	6.000	0,850
GS-3	1	17	23	27	54	M-12	16	190	2	40	7.500	1,100
GS-3T	2	17	23	27	54	M-12	M-16	190	2	40	7.500	1,100
GS-4T	2	23	28	29	60	M-12	M-16	190	2	40	9.000	1,300
GS-5T	2	25	36	39	62	M-14	M-16	225	2	60	10.000	2,000

Figura 5. Catálogo de grapa de suspensión para conductores de aluminio-acero.

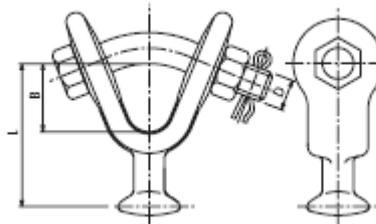
b) Rótula.



Ref.	Norma C.E.I	mm			Carga de rotura	Peso
		D	E	L		
R-11	11	17,5	16	42	5.000	0,220
R-16	16	17,5	16	50	12.500	0,550
R-16 / M-18	16	20,0	16	50	12.500	0,550
(1) R-16 / E	16	17,5	Max 45	50	12.500	0,650 Max

Figura 6. Catálogo de rótulas.

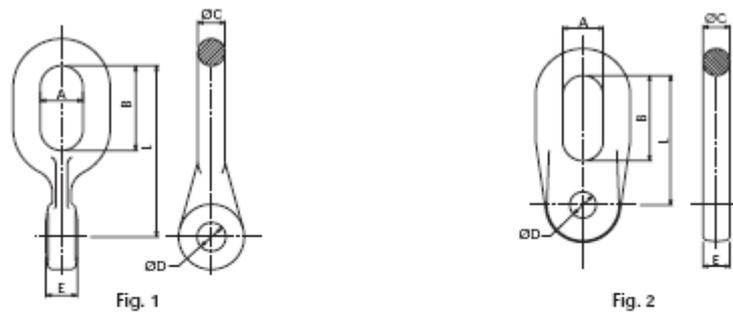
c) Horquilla-bola en V:



Ref.	Norma C.E.I	mm			Carga de rotura	Peso
		B	D	L		
HB-11	11	32	M-12	64	5.000	0,310
HB-16	16	35	M-16	75	12.500	0,660
HB-16/18	16	35	M-18	75	12.500	0,700

Figura 7. Catálogo de Horquilla-bola en V

d) Eslabones.



Ref.	Fig.	mm						Carga de rotura	Peso
		A	B	C	D	E	L		
ESR-16	1	26	52	16,5	17,5	14,5	105	12.500	0,475
ESR-16 / A	1	26	52	16,5	17,5	19	105	12.500	0,500
ESP-16	2	27	57	18	17,5	18	91	13.500	0,600
ESP-20	2	27	57	18	20	18	86	21.000	0,600

Figura 8. Catálogo de eslabones.

Nota: las unidades de carga de rotura vienen expresadas en daN y las de peso en kg.

Para seleccionar el herraje, el criterio lo impondrá el diámetro del conductor con el que se esté trabajando, y posteriormente se hará una comprobación del coeficiente de seguridad, comprobando que esté por encima de 3. El coeficiente a estudiar es el cociente entre la carga máxima de rotura del componente más débil de la cadena entre el peso aparente del conductor.

Por observar un ejemplo, para un conductor aluminio acero LA-180, se tiene un diámetro de 17,5 mm y por tanto los elementos de la cadena a usar serían en un principio los siguientes:

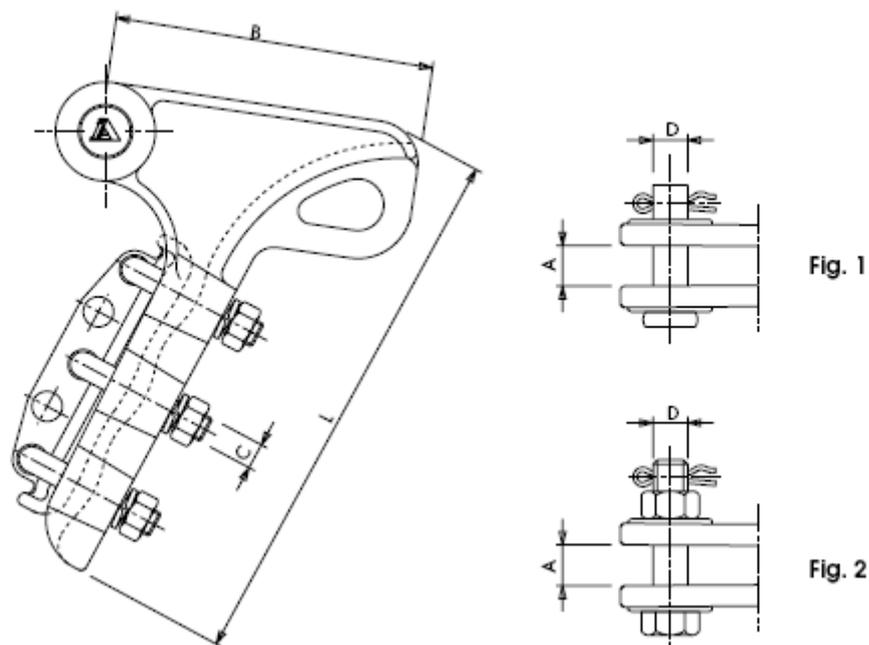
- Grapa de suspensión GS-3.
- Rótula R-11.
- Horquilla-bola HB-18.
- Eslabones ESR-16.

Los aisladores están mucho más sobredimensionados aún que estos elementos, por lo que no intervienen en este cálculo. En este caso el elemento de la cadena que limita la tensión que soporta el herraje de suspensión es la grapa de amarre, con un carga de rotura de 2.500 daN, que será la carga que habrá que comparar con el peso aparente del conductor y comprobar el coeficiente de seguridad.

5.3. Cálculo de herrajes de amarre.

El herraje de amarre es el encargado de soportar la tensión de tense del conductor en el apoyo, en este caso la tensión máxima que ha de soportar el conductor es la de tense en las condiciones más desfavorables (con lo que a la tensión mecánica se refiere) de hielo (y acción combinada de viento según lo requiera el caso) y temperatura. En condiciones bajas de temperatura el conductor se encuentra con mayor tensión debido a que se contrae como resultado de la acción de dicha temperatura sobre las propiedades mecánicas del conductor.

A continuación se muestra el catálogo empleado en el programa para el cálculo de la **grapa de amarre**:



Ref.	Fig.	Ø Conductor		mm					Estribos Nº	Par de apriete	Carga de rotura	Peso
		min.	max.	A	B	C	D	L				
GA-1-PE	1	6	12,5	19	80	M-10	16	120	2	25	3.500	0,400
GA-1	1	6	10	19	125	M-12	16	155	2	35	4.000	0,700
GA-1T	2	6	10	19	125	M-12	M-16	155	2	35	4.000	0,700
GA-2	1	10	16	20	145	M-12	16	245	3	45	6.500	1,300
GA-2T	2	10	16	20	145	M-12	M-16	245	3	45	6.500	1,300
GA-3	1	16	20	24	168	M-12	16	340	4	50	8.500	1,800
GA-3/22T	2	16	22	28	194	M-12	M-16	345	4	50	8.500	2,050
GA-3T	2	16	20	24	168	M-12	M-16	340	4	50	8.500	1,300
GA-4T	2	20	31	39	245	M-14	M-16	460	5	80	13.000	4,300

Figura 9. Catálogo de grapas de amarre.

En este caso, como anteriormente, el programa seleccionará el conductor a partir del diámetro del conductor para luego comprobar si cumple con el coeficiente mínimo de seguridad mecánica.

Para el caso del conductor de aluminio-acero LA-180 citado anteriormente, de diámetro 17,5 mm tendríamos que emplear el modelo GA-3. El cálculo del coeficiente de seguridad sería el cociente entre la carga máxima de rotura y la tensión máxima de tendido del cable en las condiciones más desfavorables que sería la carga de rotura del cable partido por 3 según establece el reglamento.

El usuario deberá seleccionar otro conductor si el resultado que se muestra por pantalla no cumple con el coeficiente de seguridad mecánica mínima mencionado anteriormente.

6. Aplicación informática

6.1. Estructura de la aplicación

El programa se trata de una hoja de Microsoft Excel con 9 pestañas en las que se escriben bases de datos y fórmulas, ayudándose de macros para la resolución de algún pequeño programa necesario para el funcionamiento de la aplicación.

A continuación se muestran una a una las pestañas que integran el programa. En el anexo se muestran algunas capturas de pantalla del mismo:

a) Pestaña “Conductores”.

Esta pestaña es una base de datos donde se han introducido 11 conductores de aluminio-acero que son los más usados actualmente en este tipo de instalaciones. A esta base de datos se hará referencia en otras partes del programa para obtener los datos requeridos en cada caso. Ver figura 18 en el Anexo.

b) Pestaña “Hipótesis”.

Se trata de otra base de datos donde se incluyen todas las hipótesis contempladas en el reglamento para la zona, cargas de viento, cargas de hielo y temperaturas del lugar donde se encuentra situada la línea. Ver figura 19 en el Anexo.

c) Pestaña “Entradas”.

En esta pestaña es donde se introducirán los datos requeridos por el programa como son: zona donde se sitúa la línea, vano, tensión eléctrica de la línea, coeficiente de seguridad e hipótesis de cálculo. Ver punto 6.2 del proyecto.

Aquí se incluye el botón que inicia el cálculo del caso seleccionado, además de la muestra por pantalla de un recuadro donde se incluyen los resultados del caso seleccionado como hipótesis de estudio.

En esta pestaña los resultados que se ven son los de tensiones, flechas y distancias de seguridad (Ver figuras 10, 11 y 12).

d) Pestaña “Tabla de resultados”.

Aquí aparece una tabla con los resultados de todos los casos que se han ido seleccionando y calculando en “Entradas” (Ver Figura 13).

e) Pestaña “Tabla de tendido”.

En esta pestaña se muestran la tabla y el gráfico de tendido para el conductor seleccionado y partiendo de la hipótesis inicial que se desee (Ver Figuras 14 y 15).

d) Pestaña “Cál. Flecha”.

Esta pestaña es una página de cálculos donde se han introducido las ecuaciones necesarias para el cálculo de la flecha. Esta pestaña se bloqueará porque no es necesaria para observar resultados. Ver figura 20 en el Anexo.

e) Pestaña “Gráfica”.

Aquí es donde el usuario podrá observar la forma que tiene la catenaria del caso seleccionado (Ver Figura 16).

f) Pestaña “Operaciones”.

Esta pestaña es esencial para el funcionamiento del programa porque incluye los cálculos de las tensiones, referencias a hipótesis y macros necesarias para la integridad del mismo. Ver figura 21 en el anexo.

g) Pestaña “Herrajes”.

En esta pestaña se incluyen las bases de datos de los herrajes a emplear, y mostrará por pantalla el herraje que se corresponde con el diámetro del conductor seleccionado anteriormente en “Entradas” así como el coeficiente de seguridad del mismo. Ver figura 21 en el anexo.

h) Pestaña “Distancias”.

Aquí se han introducido las tablas necesarias para el cálculo de las distancias de seguridad que debe mostrar por pantalla el programa, así como las expresiones incluidas en el reglamento para su obtención. Ver figura 22 en el anexo.

6.2. Entrada de datos

La entrada de datos se hace en la pestaña “Entradas”. El programa necesita como datos para hacer el cálculo de los parámetros requeridos los siguientes datos:

- Zona: A, B o C.
- Vano (en metros).
- Coeficiente de seguridad mecánico.
- Tensión eléctrica de la línea.

ENTRADA DE DATOS

LA-455

SELECCIÓN DEL CONDUCTOR

Sección(mm ²) Aluminio	Sección(mm ²) Acero	Sección(mm ²) Total	Equiv.Cu.(mm ²)	N° alambres y diam. Aluminio	N° alambres y diam. Acero	Diam. Exterior (mm)	Peso unitario (kg/km) Aluminio	Peso unitario (kg/km) Acero	Peso unitario (kg/km) Total	Carga de rotura (kg)	Resist. Eléct.20°C (ohm.km)	Coeficiente de dilatación (°C. ⁻¹)	Módulo de elasticidad (kg/mm ²)	
LA-455	402	52,2	454,5	253	54x3,08	7x3,08	27,72	1112	409	1,521	12640	0,0718	1,9E-05	7000

CARACTERISTICAS

ZONA

VANO m

COEFICIENTE SEGURIDAD MECÁNICO

TENSIÓN ELÉCTRICA DE LÍNEA kV

Traccion maxima de seguridad
(Carga de rotura / coeficiente de seguridad)

kg

Coeficiente de seguridad mecánica

Figura 10. Entrada de datos.

A continuación se introducen las hipótesis de estudio.

RESULTADOS PESOS APARENTES SEGÚN HIPÓTESIS

ACCIONES CONSIDERADAS							
I	Peso Propio Conductor		380,25 kg				
HIPOTESIS REGLAMENTARIAS TENSION MAXIMA ADMISIBLE							
ZONA			Ppropio kg	Fviento kg	Phielo kg	Paparente kg	Paparente kg/m
b	Ia	Tracción Máxima Viento (-10°C)	380,250	346,500	0,00	514,444	2,058
	IIa	Tracción Maxima de Hielo (-15°C)	380,250	0,000	0,000	380,250	1,521
	IIIa	Tracción Maxima de Hielo + Viento (-15°C)	380,250	152,366	236,924	635,704	2,543
HIPOTESIS REGLAMENTARIAS FLECHA MAXIMA							
ZONA			Ppropio kg	Fviento kg	Phielo kg	Paparente kg	Paparente kg/m
b	Ib	Flecha Maxima con Viento (15°C)	380,250	346,500	0,000	514,444	2,058
	IIb	Flecha Maxima a Temperatura (50°C)	380,250	0,000	0,000	380,250	1,521
	IIIb	Flecha Maxima con Hielo (0°C)	380,250	0,000	236,924	617,174	2,469

Hipotesis Estudio

Hipotesis Inicial

Ppropio: peso del conductor seleccionado para el vano escogido.

Fviento: fuerza del viento.

Phielo: peso del hielo.

Paparente: peso aparente del conductor sometido a sobrecargas.

Figura 11. Introducción de hipótesis.

En el desplegable con el nombre “Hipótesis inicial” se ha de introducir la hipótesis de partida deseada, y en el desplegable “Hipótesis de Estudio” se ha de introducir la hipótesis de la que se desee calcular los nuevos parámetros para la condición escogida.

Aquí ya se muestra por pantalla los resultados particulares del caso de estudio seleccionado.

Hipótesis inicial Tracción Maxima de Hielo + Viento (-15°C) INTRODUZCA LA LONGITUD DE LA CADENA AISLADORES (L) m

Hipótesis estudio Flecha Maxima con Hielo (0°C) **Nota 1: se puede aproximar esta longitud como la tensión de la línea en cm.**

Hipótesis de estudio	Tensión (kg)	Flecha (m)	Coef.seg.	Dist.Cond. (m)	Dist.Terreno (m)	Dist.Cond.Apoyo [Amarre](m)	Dist.Cond.Apoyo [Alineación](m)	Altura apoyo (m)
Flecha Maxima con Hielo (0°C)	3789,93	5,09	3,34	1,05	6,5	1,2	1,20	11,72

Nota 2: se aconseja elegir como hipótesis inicial la más desfavorable

Nota 3: en la hipótesis inicial se toma como tensión la máxima de seguridad

Figura 12. Salida de resultados.

En la pestaña “Gráfica” sale una muestra de la forma de la catenaria que determina la forma del conductor.

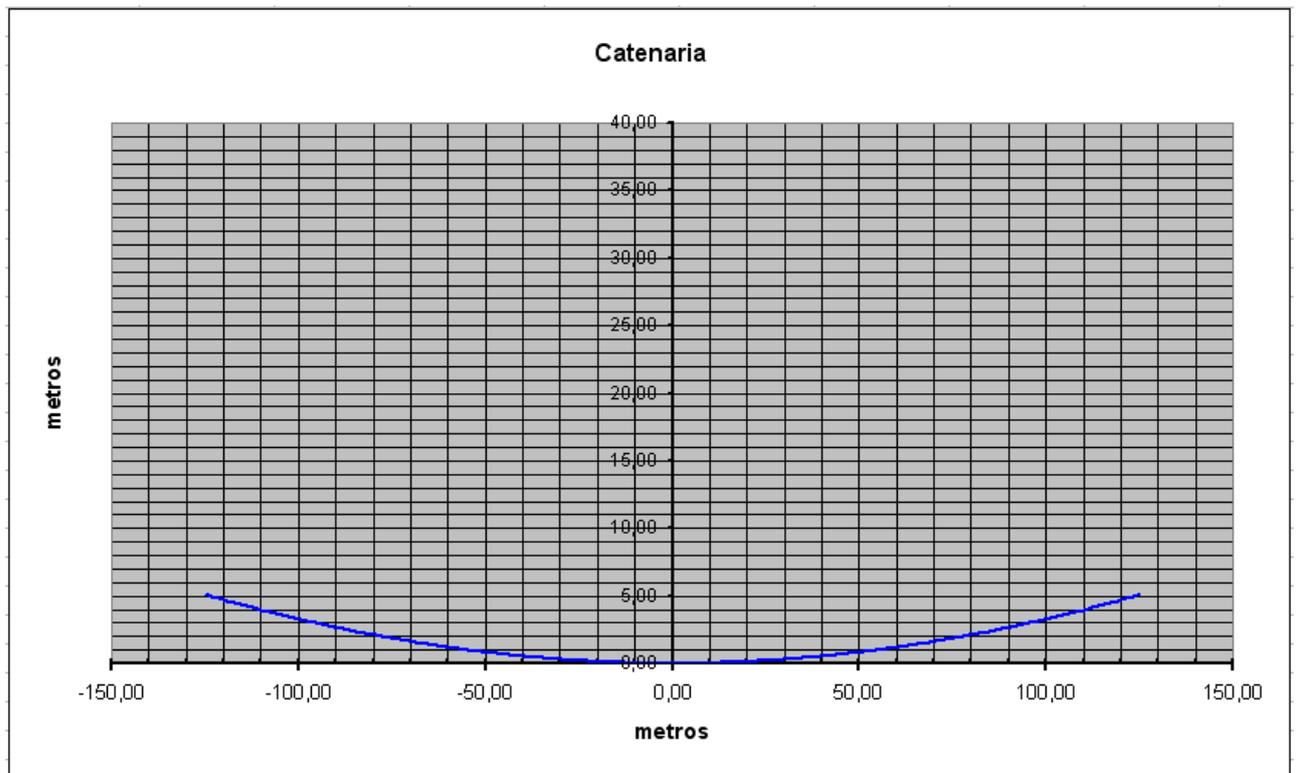


Figura 16. Catenaria.

Por último en la pestaña herrajes se puede observar el modelo de elemento de la cadena indicado para cada caso y su coeficiente de seguridad.

RESULTADOS HERRAJES

<u>ELEMENTO</u>		<u>COEFICIENTE DE SEGURIDAD MECÁNICA</u>
GRAPA DE SUSPENSIÓN	GS-3	11,17
RÓTULA	R-11	7,44
HORQUILLA-BOLA EN V	HB-11	7,44
ESLABONES	ESR-16	19,36
GRAPAS DE AMARRE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO	GA-3	3,99

Figura 17. Herrajes.

7. Ejemplos prácticos

7.1. Ejemplo a resolver. Enunciado

A continuación se expone un ejemplo práctico resuelto manualmente con las expresiones incluidas en los apartados 4.2 y 4.5 del proyecto.

Propiedades del conductor

Designación: Checa 79

Composición:

-Aluminio: 30x3,15 mm

-Acero: 7x3,15 mm

Secciones:

-Aluminio: 234 mm²

-Acero: 54,6 mm²

288,6 mm²

Sección total:

Sección equivalente de cobre:

150 mm²

Diámetro del alma de acero:

9,45 mm

Diámetro del conductor:

22,05 mm

Módulo de elasticidad:

8.000 kg/mm²

Coefficiente de dilatación por grado de temperatura (α):

17,7x10⁻⁶

Carga de rotura:

10.163 kg

Pesos:

-Aluminio: 653 kg/km

-Acero: 430 kg/km

-Total: 1.083 kg/km

La línea de 132 kV se sitúa en zona C según el reglamento por estar a más de 1.000 m sobre el nivel del mar. La longitud del vano teórico (a) es de 300 m. La hipótesis de sobrecarga de hielo será $0,36 \cdot \sqrt{d}$ kg / m a -20°C.

7.2. Resolución teórica

Por lo tanto la tensión máxima en las condiciones citadas sería, considerando el coeficiente de seguridad reglamentario:

$$T_1 = \frac{10.163}{3} = 3.388 \text{ kg} \quad t_1 = \frac{3.388}{288,6} = 11,74 \text{ kg / mm}^2$$

Peso propio: $p=1,083 \text{ kg/m}$

Hielo: $p_h = 0,36 \cdot \sqrt{22,05} = 1,690 \text{ kg / m}$

Peso aparente: $p_c = 1,083 + 1,690 = 2,773 \text{ kg / m}$

a) Caso de la parábola

$$f_{\text{parábola}} = \frac{a^2 \cdot p_c}{8 \cdot T_1} = \frac{300^2 \cdot 2,773}{8 \cdot 3.338} = 9,35 \text{ m}$$

Esta flecha corresponde al estado inicial. A continuación se calcula la flecha con sobrecarga de hielo, como en el caso anterior, pero a temperatura de 0°C. Para ello habrá que obtener el valor de la tensión para esta condición de temperatura. Para resolver esto, se hace uso de la ecuación de cambio de condiciones.

$$\alpha \cdot a \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \frac{a}{S \cdot E} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{a^3}{24} \cdot \left(\frac{p_2^2}{T_2^2} - \frac{p_1^2}{T_1^2} \right)$$

$$17,7 \times 10^{-6} \cdot 300 \cdot (0 - (-20)) + \frac{300}{288,6 \cdot 8.000} \cdot (T_2 - 3.338) = \frac{300^3}{24} \cdot \left(\frac{2,773^2}{T_2^2} - \frac{2,773^2}{3.338^2} \right) \Rightarrow$$

$$0,1062 + 1,30 \times 10^{-4} \cdot T_2 - 0,4337 = 1.125.000 \cdot \left(\frac{7,69}{T_2^2} - 6,901 \times 10^{-7} \right) \Rightarrow$$

$$0,4488 = \frac{8.651.250}{T_2^2} - 1,30 \times 10^{-4} \cdot T_2 \cong 3.170 \text{ kg}$$

La flecha final tendrá el siguiente valor:

$$f_{\text{parábola}} = \frac{a^2 \cdot p_c}{8 \cdot T_1} = \frac{300^2 \cdot 2,773}{8 \cdot 3.170} = 9,84 \text{ m}$$

La flecha lógicamente aumenta al dilatarse el conductor.

b) Caso de la catenaria

$$f_{catenaria} = a \cdot \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) = \frac{T_1}{p_c} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T_1/p_c} \right) - 1 \right) = 9,36 \text{ m}$$

Se puede ver que el resultado es similar al obtenido para el caso de la parábola. Además este valor está redondeado por exceso.

Para el caso en el que se pasa de -20°C a 15°C , se obtiene esta expresión:

$$\frac{2 \cdot T_1}{p_c} \cdot \sinh \frac{a \cdot p_c}{2 \cdot T_1} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)) + \frac{(T_2 - T_1)}{S \cdot E} = \frac{2 \cdot T_2}{p_c} \cdot \sinh \frac{a \cdot p_c}{2 \cdot T_2} \Rightarrow T_2 \cong 3170 \text{ kg}$$

La flecha en el nuevo caso será:

$$f_{catenaria} = a \cdot \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) = \frac{T_2}{p_c} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T_2/p_c} \right) - 1 \right) = 9,86 \text{ m}$$

Como se puede observar, la flecha sale similar al caso de la parábola por lo tanto el error que cometido en dicho caso es muy pequeño.

Hipótesis adicionales

A continuación se muestra la resolución de las otras hipótesis como es el caso de tracción de viento, otra hipótesis en la que aparezca simultáneamente la acción del hielo y el viento y otra en el que hay gran variación de temperatura. Todos estos casos se resuelven para las expresiones resultantes del caso de la catenaria.

a) Caso de tracción máxima de viento.

Temperatura inicial: $\theta_1 = -20^\circ\text{C}$

Temperatura final: $\theta_2 = 15^\circ\text{C}$

En este caso, en la nueva situación de 15°C no va a haber hielo, por lo que sólo aparece la tracción de viento indicada. La condición inicial sigue siendo la misma que anteriormente, es decir, un manguito de hielo a -20°C .

Ahora se recalcula el peso aparente del conductor debido a la acción combinada del peso propio y de la fuerza del viento. Se escoge una velocidad de viento (V_v) de 120 km/h de entre los que se contemplan en el reglamento.

$$p_v = 50 \times \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 = 50 \times \left(\frac{120}{120} \right)^2 = 50 \text{ daN/m}^2$$

estas unidades hay que expresarlas en las que se necesitan para usar la ecuación de cambio de condiciones, que son kg/m. Se aproximan los daN(10)N a kg, ya que 1 kg es 9,81 N. Estas aproximaciones no son relevantes en la práctica, porque se cuenta siempre con unos coeficientes de seguridad lo suficientemente altos como para que esto no afecte.

$$p_v = 50 \cdot d = 50 \cdot 0,02205 = 1,105 \text{ kg / m}$$

siendo el peso propio el mismo que antes, queda como peso aparente el siguiente:

$$p_c = \sqrt{p^2 + p_v^2} = \sqrt{1,083^2 + 1,1^2} = 1,55 \text{ kg / m}$$

Una vez se tiene esto, se entra con la tensión máxima de rotura del conductor partido por tres como tensión inicial, y los nuevos valores de peso y temperatura:

$$\begin{aligned} \frac{2 \cdot T_1}{p_c} \cdot \operatorname{senh} \frac{a \cdot p_c}{2 \cdot T_1} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)) + \frac{(T_2 - T_1)}{S \cdot E} &= \frac{2 \cdot T_2}{p_c} \cdot \operatorname{senh} \frac{a \cdot p_c}{2 \cdot T_2} \Rightarrow \\ \frac{2 \cdot 3338}{1,55} \cdot \operatorname{senh} \frac{300 \cdot 1,55}{2 \cdot 3338} \cdot (1 + 17,7 \cdot 10^{-6} \cdot (15 - (-20))) + \frac{(T_2 - 3338)}{288,6 \cdot 8000} &= \frac{2 \cdot T_2}{1,55} \cdot \operatorname{senh} \frac{300 \cdot 1,55}{2 \cdot T_2} \Rightarrow \\ T_2 &\cong 1871,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

A esta nueva tensión la flecha resultante será:

$$f_{catenaria} = a \cdot \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) = \frac{T_2}{p_c} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T_2/p_c} \right) - 1 \right) = 9,33 \text{ m}$$

En este caso aunque el conductor se dilata, el peso aparente sobre el mismo es 1,2 unidades menor, lo que lleva a que la flecha no sea tan grande como en el caso de la aparición del manguito de hielo.

b) Caso de acción combinada de hielo y viento.

Temperatura inicial: $\theta_1 = -20^\circ\text{C}$

Temperatura final: $\theta_2 = 0^\circ\text{C}$

La condición inicial sigue siendo la misma de manguito de hielo. A 0°C aparece una carga de viento por lo que el peso aparente del conductor varía de nuevo.

$$p_{hielo} = 0,36 \cdot \sqrt{22,05} = 1,69 \text{ kg / m}$$

$$p_{propio} = 1,083 \text{ kg / m}$$

El peso del viento sobre el conductor en este caso es el que actúa sobre la superficie de conductor y la de hielo que se ha depositado sobre el mismo, y por lo tanto hay que calcular la nueva sección equivalente.

$$A_{hielo} = \left(\frac{1,69 \text{ kg / m}}{750 \text{ kg / m}^3} \right) = 2,2533 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 2253,33 \text{ mm}^2$$

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{2253,33}{\pi} + \frac{22,05}{2}} = 26,98 \text{ mm}$$

La nueva acción del viento es:

$$p_{viento} = 50 \text{ kg / m} \cdot 0,02698 \text{ m}^2 = 1,35 \text{ kg / m}$$

La acción combinada de los tres elementos da como resultado el siguiente peso aparente del conductor:

$$p_c = \sqrt{(1,083 + 1,69)^2 + 1,35^2} = 3,084 \text{ kg / m}$$

Ahora se calcula la tensión y la flecha con las expresiones anteriores y queda:

$$T_2 = 3452,63 \text{ kg}$$

$$f_{catenaria} = a \cdot \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) = \frac{T_2}{p_c} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T_2/p_c} \right) - 1 \right) = 10,06 \text{ m}$$

Ahora al resultar la acción combinada de hielo y viento más grande que la condición inicial, la flecha resultante sale mayor que para casos anteriores aunque sólo un poco porque también influye que al subir la temperatura el conductor se dilata un poco.

c) Caso de variación de temperatura de -20° a 15° sin sobrecarga.

En este nuevo caso, en la condición final el peso al que estará sometido el conductor será solamente el de su peso propio, por lo tanto:

$$p_{propio} = p_c = 1,083 \text{ kg / m}$$

Obteniendo unos nuevos valores de tensión y flecha:

$$T_2 = 1367,05 \text{ kg}$$

$$f_{catenaria} = a \cdot \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) = \frac{T_2}{p_c} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T_2 / p_c} \right) - 1 \right) = 8,92 \text{ m}$$

Como se observa, al estar sometido el conductor a la única sollicitación del conductor, el aumento de flecha es el correspondiente al cambio de temperatura, pero no es tan importante como el debido a sobrecargas externas.

d) Caso de variación de temperatura de -20° a 50° sin sobrecarga.

Se incluye este caso para ver lo que ocurre cuando la variación de temperatura es muy importante. Se tendrá como peso aparente el peso propio de nuevo:

$$p_{propio} = p_c = 1,083 \text{ kg / m}$$

Y para el nuevo valor de 50° se obtiene:

$$T_2 = 1228,64 \text{ kg}$$

$$f_{catenaria} = a \cdot \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) = \frac{T_2}{p_c} \cdot \left(\cosh \left(\frac{a/2}{T_2 / p_c} \right) - 1 \right) = 9,93 \text{ m}$$

Se puede observar que este caso en el que el conductor pasa a unas condiciones de temperatura extremas es tan desfavorable para la flecha como el caso de acción combinada de hielo y viento, porque la acción de la temperatura sobre el conductor provoca un sensible aumento en la longitud del mismo, lo que se refleja en la gran bajada de tensión mecánica al que se ve sometido el mismo y por lo tanto el aumento de su flecha.

Cálculo de distancias de seguridad

A continuación se muestra el ejemplo del cálculo de las distancias de seguridad para el caso más desfavorable de los anteriormente expuestos (el caso B en esta ocasión). Se resolverán tres casos de los que aparecen en el reglamento como son: distancias entre conductores, distancias entre conductores y puesta a tierra y distancia entre el conductor y el terreno.

a) Distancias entre conductores.

Según el reglamento, la expresión de esta distancia es:

$$D = K \cdot \sqrt{F + L} + K' \cdot D_{pp}$$

en la cual:

D= separación entre conductores de fase del mismo circuito o circuitos distintos en metros.

K= coeficiente que depende de la oscilación de los conductores con el viento, que se tomará de la tabla adjunta(ver 4.6.4.a.1).

K'= coeficiente que depende de la tensión nominal de la línea K'=0,85 para líneas de categoría especial y K'=0,75 para el resto de líneas.

F= flecha máxima en metros, para las hipótesis que se especifican en el reglamento.

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.

D_{pp}: distancia mínima aérea especificada, para prevenir una descarga disruptiva entre conductores de fase durante sobretensiones de frente lento o rápido. Los valores de D_{pp} se indican en la anterior tabla de distancias de aislamiento eléctrico para evitar descargas.

- Para hallar el valor de K depende del ángulo que forma el conductor con los apoyos, que se obtiene a partir del valor y el ángulo que forman los vectores de sobrecarga que intervienen en este caso (la fuerza del viento con el peso propio y el del hielo).

$$\theta = \arctg\left(\frac{1,35}{2,773}\right) = 25,6^\circ$$

Para este caso de ángulo menor de 40° K=0,6

- Para caso de líneas que no sean de categoría especial, K'=0,75.

- La flecha máxima para este caso es F = 10,06 m.

- La longitud de la cadena de aisladores equivale en centímetros a la tensión de la línea, es decir, L = 132 cm.

- D_{pp} = 1,40 m que corresponde a la tensión más elevada de la línea, que es la que nos queda justo por encima de nuestra tensión en la tabla (145 kV).

Por lo tanto queda la distancia entre conductores la siguiente:

$$D = 0,6 \cdot \sqrt{10,06 + 1,32} + 0,75 \cdot 1,40 = 2,96 m = 3,1 m$$

b) Distancias entre conductores y puesta a tierra.

De la misma tabla que para el ejemplo anterior se obtiene D_{el} que para nuestro caso será 1,20.

c) Distancia entre el conductor y el terreno.

La altura de los apoyos tiene que ser lo suficientemente alta de manera que para las condiciones de flecha máxima la distancia al terreno sea de al menos el valor que sale de la siguiente expresión:

$$D_{add} + D_{el} = 5,3 + D_{el} = 5,3 + 1,2 = 6,5 m$$

Este valor debe ser como mínimo 6 metros según el reglamento. Por lo tanto el apoyo debe estar a una altura que será la suma de la distancia mínima al terreno, la longitud vertical de la cadena de aisladores y la flecha máxima.

$$h_{apoyo} = 6,5 + 1,32 + 10,05 \cong 17,9 m .$$

8. Conclusiones.

El resumen de lo que ha supuesto la elaboración del documento se puede expresar en los siguientes puntos:

- Se han analizado y estudiado los cálculos teóricos previos relativos al cálculo mecánico de conductores en lo que concierne al cálculo de tensiones mecánicas y flechas.
- Se ha estudiado y comprendido la normativa aplicable y el reglamento (RLAT) de 19 de marzo de 2008.
- Se ha realizado una herramienta informática a través de un documento Excel con macros de Visual Basic que haga el cálculo mecánico de conductores partiendo de los conocimientos adquiridos previamente.
- La elaboración de dicha herramienta informática ha servido para profundizar en conocimientos de Excel en materias como uso de base de datos o automatización de búsquedas, y métodos de programación con Basic que son aplicables a una futura actividad profesional.
- Se han realizado ejemplos sobre casos prácticos con esta herramienta informática, cuyos resultados han sido debidamente comprobados con el fin de dar validez a la aplicación.
- La herramienta puede ser utilizada bien para fines lectivos bien para fines laborales debido a su consistencia y a la precisión de sus resultados.
- La realización del proyecto ha servido para adquirir los conocimientos necesarios sobre cálculo mecánico de conductores y sobre el manejo de software y rutinas de programación, útiles para afrontar futuros proyectos que se puedan presentar en el desempeño de la actividad profesional.

9. Bibliografía.

Libros

- Checa, Luis María: “Líneas de transporte de energía”, 2ª Edición 1979. Ed. Marcombo.
- Moreno Clemente, Julián: “Cálculo de líneas eléctricas aéreas de alta tensión”, 2ª Edición ampliada 1988.
- Walkenbach, John: “Excel 2003. Programación con VBA”. Ed. Anaya.

Sitios web

- Página web del grupo Arruti. www.grupoarruti.com . Marzo 2009
- Página web de grupo ECN. www.ecn.es . Marzo 2009

Trabajos de alumnos

- Pérez Colino, Roberto: “Proyecto de línea eléctrica de alta tensión”. 2007
- Alcón Mesa, José Luis: “Proyecto de línea eléctrica de alta tensión”. 2007

Anexo I. Ejemplos resueltos.

A continuación se pueden ver los resultados que muestra el programa por pantalla a través de dos ejemplos.

a) Línea situada en zona C (más de 1000 m), de 132kV. La longitud de vano es de 260m.

Propiedades del conductor

Designación: LA-280

Composición:

-Aluminio:

26x3,44 mm

-Acero:

7x2,68 mm

Secciones:

-Aluminio: 241,7 mm²

-Acero: 39,4mm²

Sección total:

281,1 mm²

Sección equivalente de cobre:

152 mm²

Diámetro del conductor:

21,80 mm

Módulo de elasticidad:

7.700 kg/mm²

Coefficiente de dilatación por grado de temperatura (α):

19x10⁻⁶

Carga de rotura:

8.613,7 kg

Peso:

-Total:977 kg/km

La hipótesis de partida será la de hielo y viento a -20°C, y como hipótesis de estudio se tomarán las de 15°C y viento, 50°C sin sobrecarga y 0°C con hielo.

Hipotesis num.	Descripción	Tensión (kg)	Flecha (m)	Coefficiente Seguridad	Distancias entre conductores (m)	Distancia al terreno (m)	Distancia conductor-apoyo[Amarre] (m)	Distancia conductor-apoyo[Alineación] (m)	Altura mínima del apoyo (m)
Ib	Flecha Maxima con Viento (15°C)	1515,80	8,17	5,68	1,05	6,50	1,20	1,20	14,80
IIb	Flecha Maxima a Temperatura (50°C)	942,94	8,77	9,13	1,05	6,50	1,20	1,20	15,40
IIIb	Flecha Maxima con Hielo (0°C)	2637,02	8,53	3,27	1,05	6,50	1,20	1,20	15,16

TABLA DE TENDIDO DEL CONDUCTOR EN ZONA

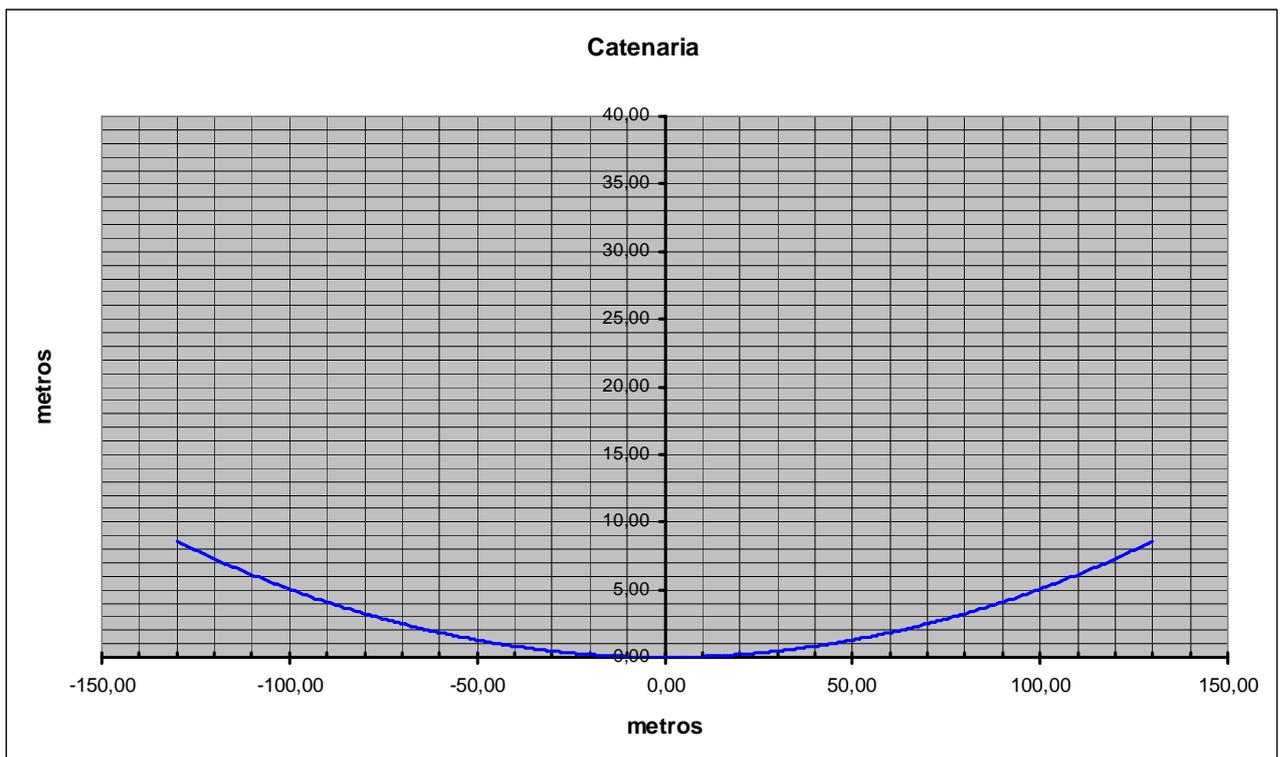
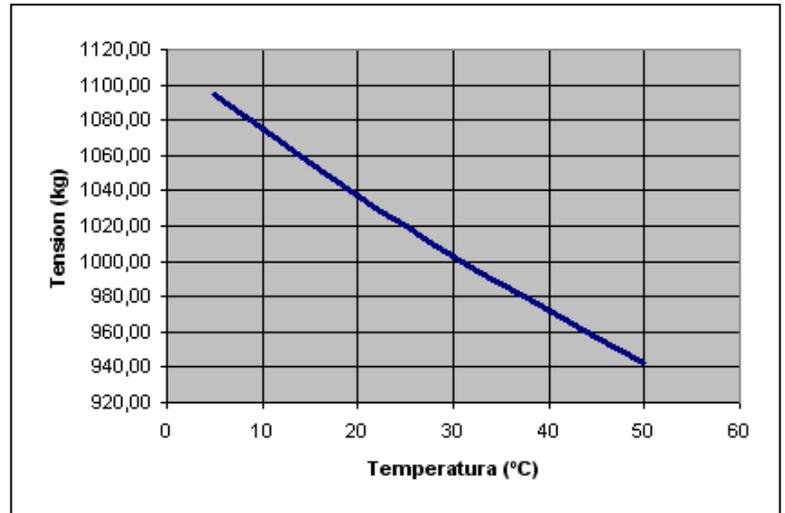
C

TABLA

VANO(m)

260

Temperatura (°C)	Tension (kg)	Flecha (m)
5	1094,90	7,55
10	1074,66	7,69
15	1055,41	7,83
20	1037,07	7,97
25	1019,58	8,11
30	1002,87	8,24
35	986,91	8,38
40	971,62	8,51
45	956,98	8,64
50	942,94	8,77



RESULTADOS HERRAJES

ELEMENTO		COEFICIENTE DE SEGURIDAD MECÁNICA
GRAPA DE SUSPENSIÓN	GS-3	10,68
RÓTULA	R-11	7,12
HORQUILLA-BOLA EN V	HB-11	7,12
ESLABONES	ESR-16	18,51
GRAPAS DE AMARRE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO	GA-4T	4,62

NOTA: las capturas de pantalla que se han realizado para el gráfico de la catenaria y la tabla de herrajes son para la última hipótesis que se menciona en el enunciado.

TABLA DE TENDIDO DEL CONDUCTOR EN ZONA

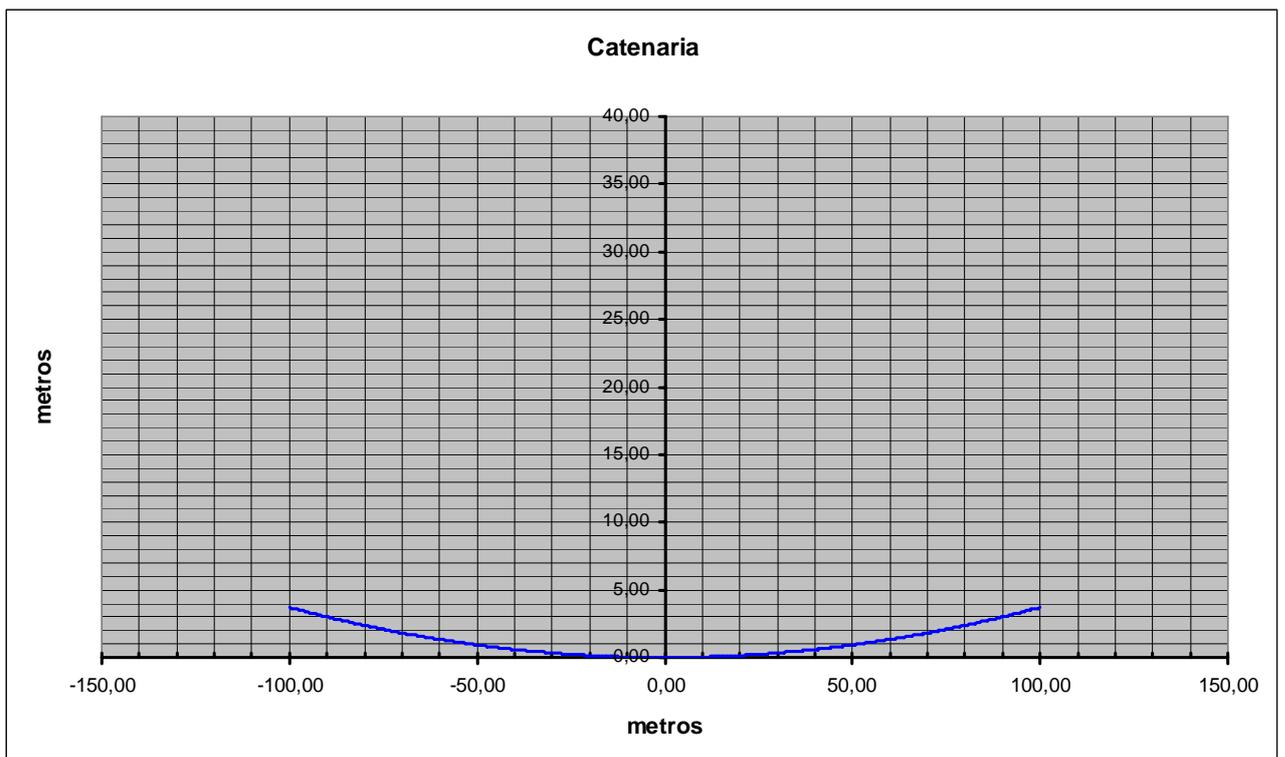
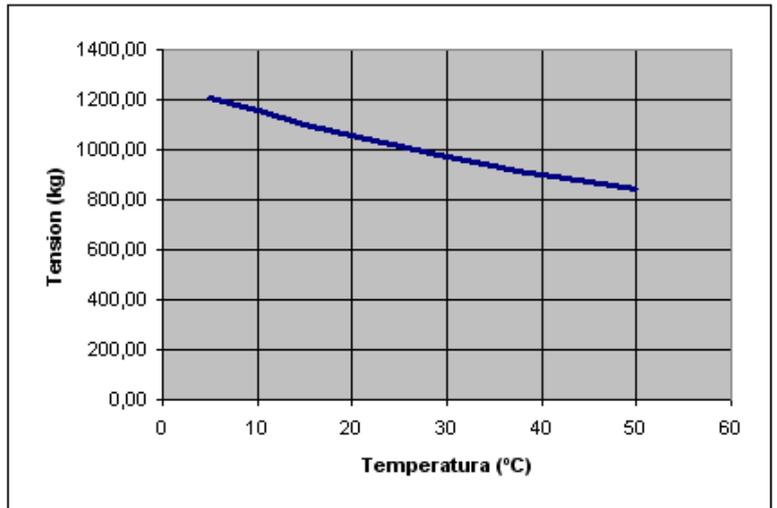
b

TABLA

VANO(m)

200

Temperatura (°C)	Tension (kg)	Flecha (m)
5	1210,25	2,79
10	1154,41	2,93
15	1103,01	3,07
20	1055,76	3,20
25	1012,34	3,34
30	972,44	3,48
35	935,76	3,61
40	901,99	3,75
45	870,87	3,88
50	842,13	4,02



RESULTADOS HERRAJES

ELEMENTO		COEFICIENTE DE SEGURIDAD MECÁNICA
GRAPA DE SUSPENSIÓN	GS-3	25,26
RÓTULA	R-11	16,84
HORQUILLA.BOLA EN V	HB-11	16,84
ESLABONES	ESR-16	43,79
GRAPAS DE AMARRE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO	GA-3	3,99

NOTA: las capturas de pantalla que se han realizado para el gráfico de la catenaria y la tabla de herrajes son para la última hipótesis que se menciona en el enunciado.

Para hacer una comparación con el caso de cálculo manual con la parábola se muestra la variación de las magnitudes de la tensión y la flecha, cuyo razonamiento es aplicable al resto de parámetros que se muestran.

Flecha máxima con viento (15°C)

Tensión (manual): 1.910 kg
Tensión (programa): 1.897,51 kg

Flecha (manual): 9,23 m
Flecha (programa): 9,17 m

Flecha máxima a temperatura de 50°C sin sobrecarga

Tensión (manual): 1.250 kg
Tensión (programa): 1.247,58 kg

Flecha (manual): 9,76 m
Flecha (programa): 9,78 m

Flecha máxima con sobrecarga de hielo (0°C)

Tensión (manual): 3.220 kg
Tensión (programa): 3.213,97 kg

Flecha (manual): 9,66 m
Flecha (programa): 9,72 m

El error máximo que se produce no llega al 1%. Este error es debido a que el programa utiliza un método de cálculo más preciso que el manual, ya que utiliza las expresiones asociadas a la catenaria. Además en el cálculo mediante el programa la precisión a la hora de tomar decimales es mayor. Aún así el método manual visto el error que se produce se considera perfectamente válido para llevarlo a la práctica.

TABLA DE TENDIDO DEL CONDUCTOR EN ZONA

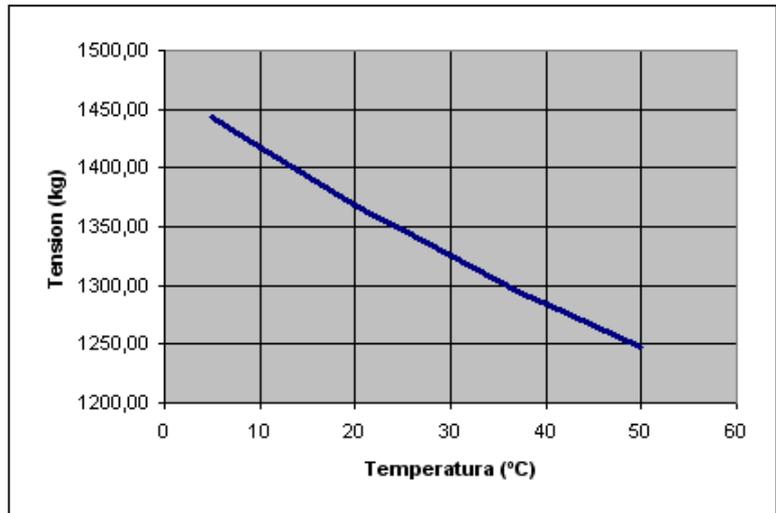
C

TABLA

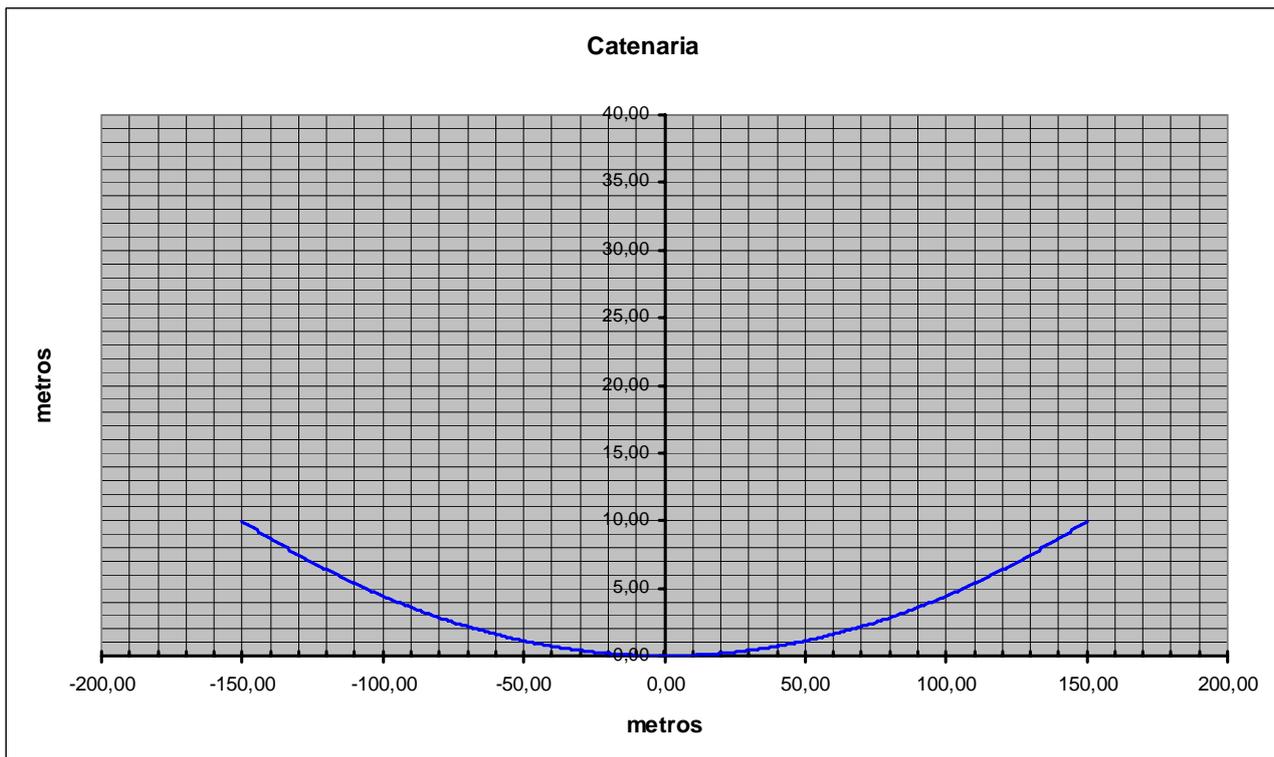
VANO(m)

300

Temperatura (°C)	Tension (kg)	Flecha (m)
5	1442,72	8,45
10	1416,98	8,61
15	1392,43	8,76
20	1368,96	8,91
25	1346,53	9,06
30	1325,05	9,21
35	1304,47	9,35
40	1284,73	9,50
45	1265,79	9,64
50	1247,58	9,78



En el método manual la tensión a 15° sin sobrecarga sale 1.390 kg y con el programa 1.392,43 kg, lo que es perfectamente aceptable y se explica por lo dicho anteriormente.



RESULTADOS HERRAJES

ELEMENTO		COEFICIENTE DE SEGURIDAD MECÁNICA
GRAPA DE SUSPENSIÓN	GS-3	11,68
RÓTULA	R-11	7,79
HORQUILLA-BOLA EN V	HB-11	7,79
ESLABONES	ESR-16	20,24
GRAPAS DE AMARRE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO	GA-3	3,99

NOTA: las capturas de pantalla que se han realizado para el gráfico de la catenaria y la tabla de herrajes son para la última hipótesis que se menciona en el enunciado.

Anexo II. Manual de usuario de la aplicación.

En este manual se menciona las pestañas que son relevantes para el uso del programa. Para el visionado de el resto de pestañas se sugiere ver el punto 6 del documento, en el apartado de “Estructura del programa”.

Conductores: en esta página no es necesario tocar nada. Si se quiere añadir algún conductor a la base de datos basta con insertar fila en la tabla de conductores, rellenarla y ya aparecerá en el desplegable de la aplicación.

CARACTERISTICAS DE CONDUCTORES

101_936799

Denominación	Sección (mm ²) Aluminio	Sección (mm ²) Acero	Sección (mm ²) Total	Equiv.Cu. (mm ²)	Nº alambres y diam. Aluminio	Nº alambres y diam. Acero	Diam. Exterior (mm)	Peso unitario (kg/km) Aluminio	Peso unitario (kg/km) Acero	Peso unitario (kg/km) Total	Carga de rotura (kg)	Resist. Eléct. 20°C (ohm/km)	Coefficiente de dilatación (°C ⁻¹)	Módulo de elasticidad (kg/mm ²)
LA-30	26,7	4,4	31,1	17	6x2,38	1x2,38	7,14	73,2	34,7	0,1079	1009,174312	1,0794	1,91E-05	8100
LA-56	46,8	7,8	54,6	30	6x3,15	1x3,15	9,45	128,3	60,8	0,1891	1671,763507	0,6136	1,91E-05	8100
LA-78	67,4	11,2	78,6	42	6x3,78	1x3,78	11,34	185	87	0,272	2354,740061	0,4261	1,78E-05	8200
LA-110	94,2	22	116,2	60	30x2	7x2	14	280,4	172,3	0,433	4393,476045	0,3066	1,78E-05	8200
LA-145	119,3	27,8	147,1	75	30x2,25	7x2,25	15,75	330	218	0,548	5514,780836	0,2422	1,78E-05	8200
LA-180	147,3	34,3	181,6	93	30x2,50	7x2,50	17,5	407	269	0,676	6513,761468	0,1962	1,78E-05	8200
LA-280	241,7	39,4	281,1	162	26x3,44	7x2,68	21,8	667	310	0,977	8613,659531	0,1194	1,89E-05	7700
LA-280a.Checa	234	54,6	288,6	160	30x3,15	7x3,15	22,05	853	430	1,083	10163	0,12	1,77E-05	8000
LA-380	337,3	43,7	381	212	54x2,82	7x2,82	25,38	932	343	1,275	10856,26911	0,0857	1,93E-05	7000
LA-455	402,3	62,2	464,5	253	54x3,08	7x3,08	27,72	1112	469	1,521	12640,1631	0,0716	1,93E-05	7000
LA-545	484,5	62,8	547,3	305	54x3,38	7x3,38	30,42	1340	492	1,832	15137,61468	0,0596	1,93E-05	7000
LA-635	565	71,6	636,6	365	54x3,65	19x2,19	32,85	1562	563	2,125	17838,33986	0,0511	1,94E-05	6800

Entradas: en esta pestaña el usuario debe introducir los siguientes parámetros antes de que el programa empiece a calcular:

- a) Seleccionar el conductor.
- b) Introducir la zona en que se encuentra la línea.
- c) Introducir el vano teórico.
- d) Introducir el coeficiente de seguridad.
- e) Introducir la longitud de la cadena de aisladores.
- f) Seleccionar las hipótesis inicial y de estudio de sus respectivos desplegables.

Nota: el orden en el que se introduzcan los parámetros anteriores no es relevante.

ENTRADA DE DATOS

LA-180 SELECCIÓN DEL CONDUCTOR

Sección(mm ²) Aluminio	Sección(mm ²) Acero	Sección(mm ²) Total	Equiv. Cu.(mm ²)	Nº alambres y diam. Aluminio	Nº alambres y diam. Acero	Diam. Exterior (mm)	Peso unitario (kg/km) Aluminio	Peso unitario (kg/km) Acero	Peso unitario (kg/km) Total	Carga de rotura (kg)	Resist. Eléct. 20°C (ohm.km)	Coefficiente de dilatación (°C ⁻¹)	Módulo de elasticidad (kg/mm ²)	
LA-180	147	34,3	181,6	93	30x2,50	7x2,50	17,5	407	269	0,676	6513,8	0,1962	1,8E-05	8200

CARACTERÍSTICAS

ZONA

VANO m

COEFICIENTE SEGURIDAD MECÁNICO

TENSIÓN ELÉCTRICA DE LÍNEA kV

Tracción máxima de seguridad
(Carga de rotura / coeficiente de seguridad)

kg

Coeficiente de seguridad mecánica

RESULTADOS PESOS APARENTES SEGÚN HIPÓTESIS

ACCIONES CONSIDERADAS

I Peso Propio Conductor kg

HIPOTESIS REGLAMENTARIAS TENSION MAXIMA ADMISIBLE

ZONA		Ppropio	Fv	Ph	Tracción	
c	Ia	Tracción Máxima Viento (-15°C)	202,800	262,500	0,00	331,714 kg
	Ila	Tracción Maxima de Hielo (-20°C)	202,800	0,000	451,796	654,596 kg
	IIla	Tracción Maxima de Hielo + Viento (-20°C)	202,800	200,648	451,796	684,658 kg

HIPOTESIS REGLAMENTARIAS FLECHA MAXIMA

ZONA		Ppropio	Fv	Ph	Tracción	
c	Ib	Flecha Maxima con Viento (15°C)	202,800	262,500	0,000	331,714 kg
	IIb	Flecha Maxima a Temperatura (50°C)	202,800	0,000	0,000	202,800 kg
	IIIb	Flecha Maxima con Hielo (0°C)	202,800	0,000	451,796	654,596 kg

Hipotesis Estudio

Hipotesis inicial

Ppropio: peso del conductor seleccionado para el vano escogido.

Fv: peso total de la componente vertical de la fuerza.

Ph: peso del hielo.

Tracción: peso aparente del conductor sometido a sobrecargas.

Una vez se hayan introducido los datos anteriores se pulsa el botón “Calcular”.

-Para ir calculando más hipótesis de estudio, la vamos seleccionando de su desplegable y pulsamos de nuevo “Calcular”.

-Se debe pulsar este botón cada vez que se cambie un valor de entrada de los anteriormente citados.

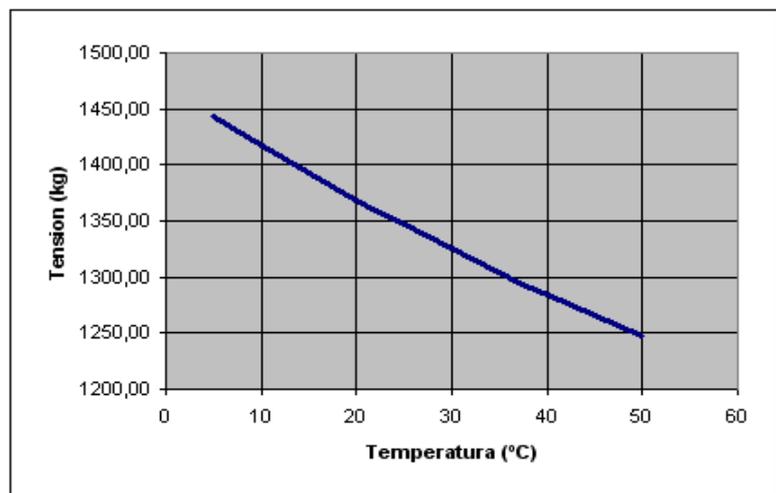
Tabla de tendido: aquí se pulsará el botón tabla para que muestre por pantalla los valores de tendido así como el gráfico. Hay que pulsar el botón cada vez que se cambie algún parámetro que afecte al cálculo de dicha tabla de tendido como son:

- a) Hipótesis de partida.
- b) Zona.
- c) Longitud del vano.
- d) Coeficiente de seguridad mecánica.

TABLA DE TENDIDO DEL CONDUCTOR EN ZONA c

TABLA **VANO(m)** 300

Temperatura (°C)	Tension (kg)	Flecha (m)
5	1442,72	8,45
10	1416,98	8,61
15	1392,43	8,76
20	1368,96	8,91
25	1346,53	9,06
30	1325,05	9,21
35	1304,47	9,35
40	1284,73	9,50
45	1265,79	9,64
50	1247,58	9,78



Herrajes: esta pestaña al igual que la de conductores sólo se debe modificar si se quiere introducir algún nuevo catálogo, y se hará insertando una nueva fila en las tablas de los catálogos. Cabe recordar que para que el programa funcione y busque los valores, estos deben escribirse en el mismo orden que los que ya hay.

RESULTADOS HERRAJES

ELEMENTO		COEFICIENTE DE SEGURIDAD MECÁNICA
GRAPA DE SUSPENSIÓN	GS-3	11,68
RÓTULA	R-11	7,79
HORQUILLA-BOLA EN V	HB-11	7,79
ESLABONES	ESR-16	20,24
GRAPAS DE AMARRE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO	GA-3	3,99

Anexo III. Conductores.

CONDUCTORES DE ALUMINIO-ACERO											NORMA UNE 21018	
Denominación	Sección trans.			Equiv. Cu. mm ²	Nº de alambres y diam. ø exterior			Peso unitario			Carga de rotura KN	Resist. eléct. a 20°C ohm/km
	mm ²	mm ²	mm ²		Nºx mm	Nºx mm	mm	kg/km	kg/km	kg/km		
	Aluminio	Acero	Total					Aluminio	Acero	Total		
LA- 30	26,7	4,4	31,1	17	6X2,38	1X2,38	7,14	73,2	34,7	107,9	9,90	1,0794
LA- 56	46,8	7,8	54,6	30	6X3,15	1X3,15	9,45	128,3	60,8	189,1	16,40	0,6136
LA- 78	67,4	11,2	78,6	42	6X3,78	1X3,78	11,34	185,0	87,0	272,0	23,10	0,4261
LA-110	94,2	22,0	116,2	60	30X2,00	7X2,00	14,00	260,4	172,3	433,0	43,10	0,3066
LA-145	119,3	27,8	147,1	75	30X2,25	7X2,25	15,75	330,0	218,0	548,0	54,10	0,2422
LA-180	147,3	34,3	181,6	93	30X2,50	7X2,50	17,50	407,0	269,0	676,0	63,90	0,1962
LA-280	241,7	39,4	281,1	152	26X3,44	7X2,68	21,80	667,0	310,0	977,0	84,50	0,1194
LA-380	337,3	43,7	381,0	212	54X2,82	7X2,82	25,38	932,0	343,0	1.275,0	106,50	0,0857
LA-455	402,3	52,2	454,5	253	54X3,08	7X3,08	27,72	1.112,0	409,0	1.521,0	124,00	0,0718
LA-545	484,5	62,8	547,3	305	54X3,38	7X3,38	30,42	1.340,0	492,0	1.832,0	148,50	0,0596
LA-635	565,0	71,6	636,6	365	54X3,65	19X2,19	32,85	1.562,0	563,0	2.125,0	175,00	0,0511

Figura . Tabla de conductores aluminio-acero Norma UNE-21018.

Anexo IV. Capturas de pantalla.

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

D26

101,936799

Denominación	Sección (mm2) Aluminio	Sección (mm2) Acero	Sección (mm2) Total	Equiv.Cu. (mm2)	Nº alambres y diam. Aluminio	Nº alambres y diam. Acero	Diam. Exterior (mm)	Peso unitario (kg/km) Aluminio	Peso unitario (kg/km) Acero	Peso unitario (kg/m) Total	Carga de rotura (kg)	Resist. Eléct.20°C (ohm/km)	Coefficiente de dilatación (°C ⁻¹)	Módulo de elasticidad (kg/mm ²)
LA-30	26,7	4,4	31,1	17	6x2,38	1x2,38	7,14	73,2	34,7	0,1079	1009,174312	1,0794	1,91E-05	8100
LA-56	46,8	7,8	54,6	30	6x3,15	1x3,15	9,45	128,3	60,8	0,1891	1671,763507	0,6136	1,91E-05	8100
LA-78	67,4	11,2	78,6	42	6x3,78	1x3,78	11,34	185	87	0,272	2354,740061	0,4261	1,78E-05	8200
LA-110	94,2	22	116,2	60	30x2	7x2	14	260,4	172,3	0,433	4393,476045	0,3066	1,78E-05	8200
LA-145	119,3	27,8	147,1	75	30x2,25	7x2,25	15,75	330	218	0,548	5514,780836	0,2422	1,78E-05	8200
LA-180	147,3	34,3	181,6	93	30x2,50	7x2,50	17,5	407	269	0,676	6513,761468	0,1962	1,78E-05	8200
LA-280	241,7	39,4	281,1	152	26x3,44	7x2,68	21,8	667	310	0,977	9613,659531	0,1194	1,89E-05	7700
LA-380	337,3	43,7	381	212	54x2,82	7x2,82	25,38	932	343	1,275	10856,26911	0,0857	1,93E-05	7000
LA-455	402,3	52,2	454,5	253	54x3,08	7x3,08	27,72	1112	409	1,521	12640,1631	0,0718	1,93E-05	7000
LA-545	484,5	62,8	547,3	305	54x3,38	7x3,38	30,42	1340	492	1,832	15137,61468	0,0596	1,93E-05	7000
LA-635	565	71,6	636,6	365	54x3,65	19x2,19	32,85	1562	563	2,125	17838,93986	0,0511	1,94E-05	6800

LA-145

LA-145	119,3	27,8	147,1	75	30x2,25	7x2,25	15,75	330
--------	-------	------	-------	----	---------	--------	-------	-----

Figura 18. Pestaña “Conductores”.

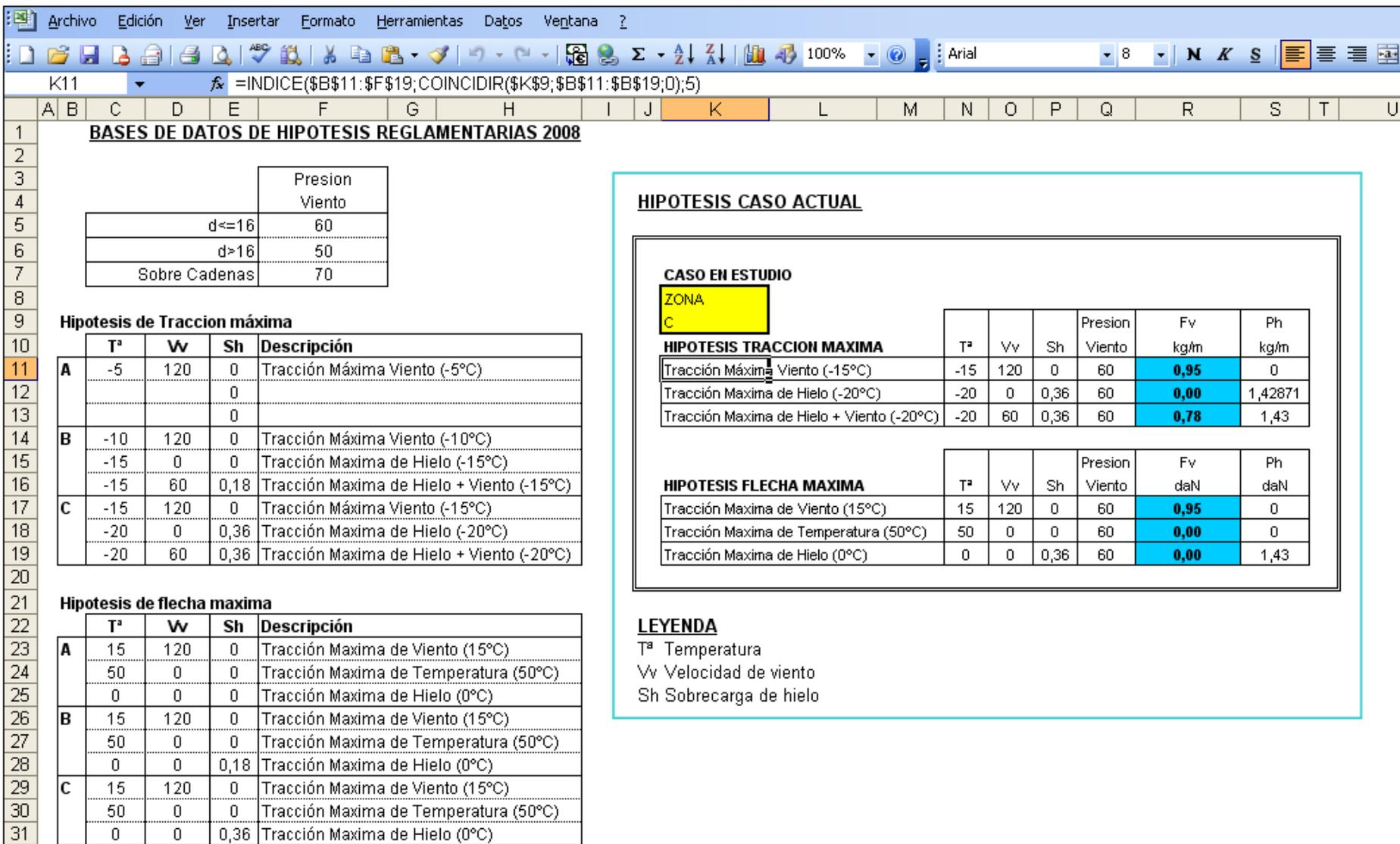


Figura 19. Pestaña “Hipótesis”.

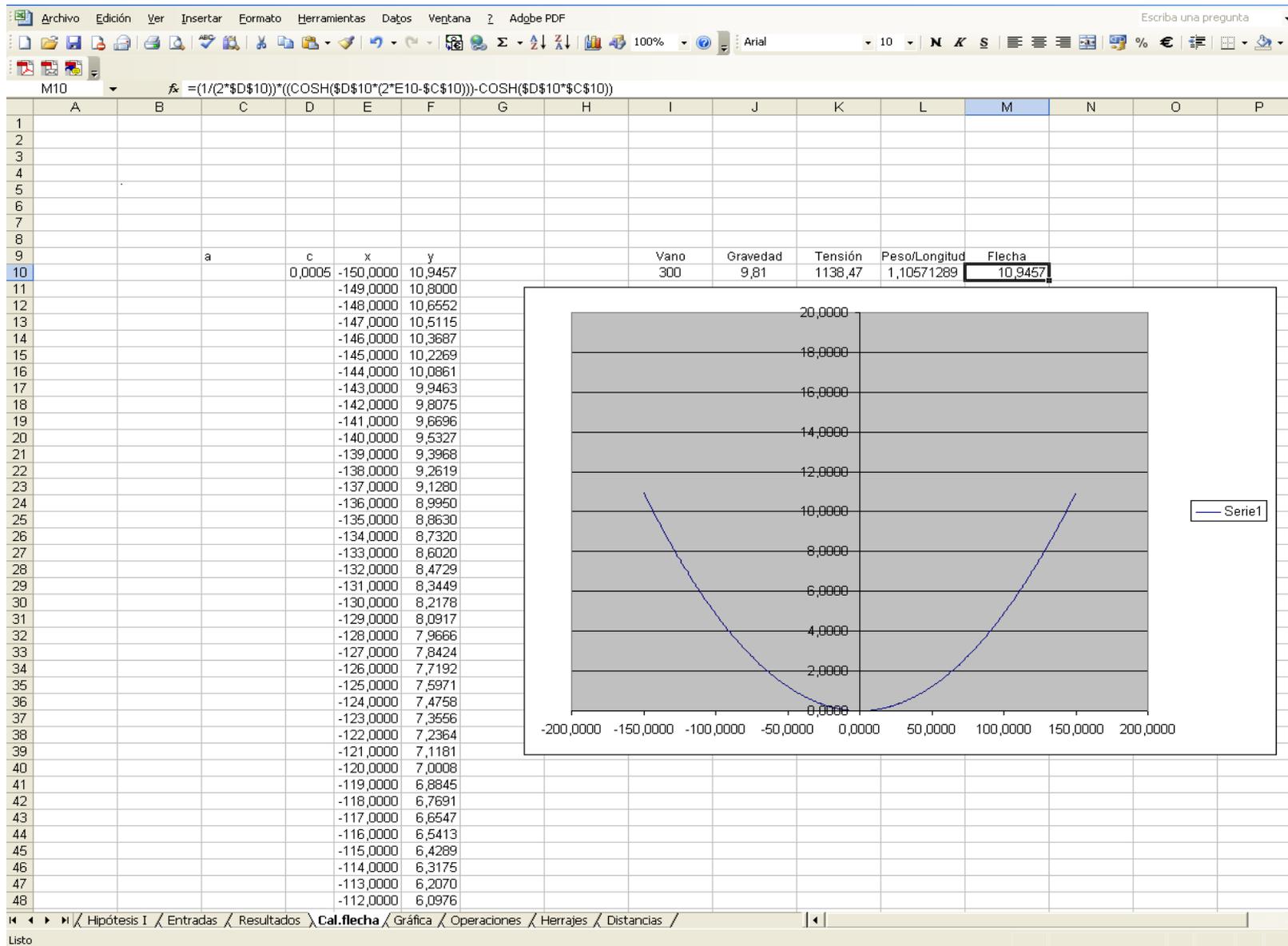


Figura 20. Pestaña “Cál.flecha”.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
2																						
3		T ₁	a	P ₁	P ₂	Temp.1	Temp.2	Coef.dilat.	Sección(S)	Mód.Young E	A	B	T ₂₀	C	f(t)	f(t)	f(T ₁)+(T ₂ -T ₁)*f(T ₁)	T ₂₀ T ₁ -(f(T ₁)/f(T ₁))	Diferencia (T ₁ -T _{ii})			
4		2 871,22	260	2,6579	2,754	-20	-20	1,89E-05	281,1	7700	260,628	1	2952,22	260,637745	4,48538E-08	-0,0005528	-0,044775564	2952,22	0,00			
5													2952,22	260,637745	-2,27374E-13	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00		Nº iteraci	
6													2952,22	260,637745	5,68434E-14	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
7													2952,22	260,637745	1,13687E-13	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
8													2952,22	260,637745	5,68434E-14	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
9													2952,22	260,637745	-2,27374E-13	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
10													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
11													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
12													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
13													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
14													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
15													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
16													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
17													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
18													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
19													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
20													2952,22	260,637745	0	-0,0005528	-0,044775565	2952,22	0,00			
21			según tipo de cable																			
22			hipotesis inicial																			
23			hipotesis estudio																			
24													Paparente	Temp.	Flecha	F.Vert.	F.Hor.	Ángulo (º)				
25		Hipotesis de estudio					IIa	Tracción Máxima de Hielo + Viento (-20ºC)				716,03	-20,00		691,04	187,51	14,87					
26		Hipotesis inicial					IIa	Tracción Máxima de Hielo (-20ºC)				691,04	-20,00		691,04	0,00	0,00					
27													716,03									
28																						
29							Ppropio	Fviento	Phielo	Paparente	Temp.	F.Vert.	Ángulo	Tensión	Flecha	Hipótesis				Ángulo 2		
30							Ia	254,02	283,40	0,00	380,58	-15	254,02	36,67		Tracción Máxima Viento (-15ºC)				20,42		
31							Ib	254,02	283,40	0,00	380,58	15	254,02	36,67		Flecha Máxima con Viento (15ºC)				20,42		
32							IIa	254,02	0,00	437,02	691,04	-20	691,04	0,00		Tracción Máxima de Hielo (-20ºC)				0,00		
33							IIb	254,02	0,00	0,00	254,02	50	254,02	0,00		Flecha Máxima a Temperatura (50ºC)				0,00		
34							IIIa	254,02	187,51	437,02	716,03	-20	691,04	14,87		Tracción Máxima de Hielo + Viento (-20ºC)				7,46		
35							IIIb	254,02	0,00	437,02	691,04	0	691,04	0,00		Flecha Máxima con Hielo (0ºC)				0,00		
36												40										

Figura 21. Pestaña “Operaciones”.

CADENAS DE SUSPENSIÓN

GRAPA DE SUSPENSIÓN

Tensión Calculada
2130,00 daN

Peso
671,65 daN

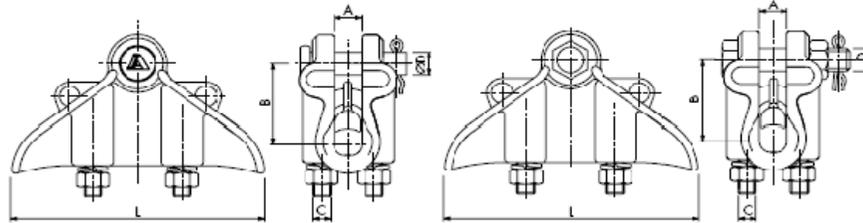


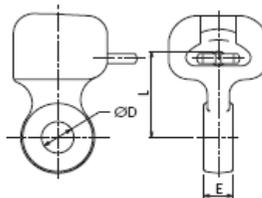
Fig. 1

Fig. 2

Modelo
GS-3

Conductor		Ref.	Fig.	mm					Estribos Nº	Par de apriete	Peso (kg)	Carga de rotura (daN)
min.	max.			A	B	C	D	L				
5	12	GS-1	1	19	41	M-10	16	140	2	30	0,46	2500
12	17	GS-2	1	19	50	M-12	16	170	2	30	0,85	6000
17	23	GS-3	1	27	54	M-12	16	190	2	40	1,1	7500
25	36	GS-5T	2	39	62	M-14	M-16	225	2	60	2	10000

RÓTULA



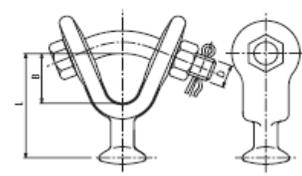
Modelo
R-11

2
5000,00

Figura 21a. Pestaña “Herrajes”

38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76

Carga de rotura (daN)	Ref.	mm			Peso (kg)	Carga de rotura (daN)
		D	E	L		
0	R-11					0
5.000	R-11	17,5	16	42	0,22	5.000
12.500	R-16	17,5	16	50	0,55	12.500

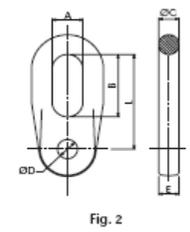
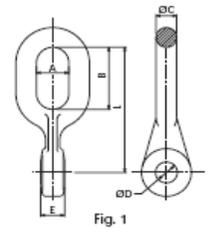


HORQUILLA-BOLA EN V

Carga de rotura (daN)	Ref.	mm			Peso (kg)	Carga de rotura (daN)
		B	D	L		
0	HB-11					0
5.000	HB-11	32	M-12	64	0,31	5.000
12.500	HB-16	35	M-16	75	0,66	12.500

Modelo

ESLABONES



Modelo

Carga de rotura (daN)	Ref.	Fig.	mm						Peso (kg)	Carga de rotura (daN)
			A	B	C	D	E	L		
0	ESR-16									0
13.000	ESR-16	1	26	52	16,5	17,5	14,5	105	0,475	13.000
13.500	ESP-16	2	27	57	18	17,5	18	91	0,6	13.500
21.000	ESP-20	2	27	57	18	20	18	86	0,6	21.000

2
13000

Figura 21b. Pestaña “Herrajes”.

Q132 fx

76	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

CADENAS DE AMARRE

GRAPAS DE AMARRE PARA CONDUCTORES DE ALUMINIO

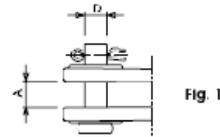
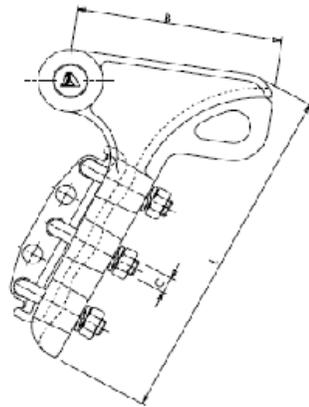


Fig. 1

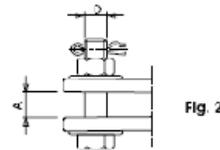


Fig. 2

Modelo

GA-3

	Diámetro conductor		Carga de rotura (daN)	Ref.	Fig.	mm					Estribos Nº	Par de apriete	Peso (kg)	Carga de rotura (daN)
	min.	max.				A	B	C	D	L				
98														
99														
100	6	12,5	3.500	GA-1-PE	1	19	80	M-10	16	120	2	25	0,4	3.500
101	6	10	4.000	GA-1	1	19	125	M-12	16	155	2	35	0,7	4.000
102	10	16	6.500	GA-2	1	20	145	M-12	16	245	3	45	1,3	6.500
103	16	20	8.500	GA-3	1	24	168	M-12	16	340	4	50	1,8	8.500
104	20	31	13.000	GA-4T	2	39	245	M-14	M-16	460	5	80	4,3	13.000

Figura 21c. Pestaña “Herrajes”.

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ? Adgbe PDF Escriba una p

Arial 10 N K S

D7	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
4	Distancias entre conductores			Altura mínima del apoyo (m)				Distancia conductor-apoyo (m)			Distancia conductor-apoyo (m)				Distancia al terreno (m)	
5	m			m				Cadena de amarre			Cadena de suspensión					
6	1,05			11,72				1,2			1,20				6,5	
7																
8																
9																
10																
11	HIPOTESIS DE ESTUDIO				Ángulo de oscilación (°)			K	Ángulo de oscilación 2 (°)							
12																
13	IIIb	Flecha Maxima con Hielo (0°C)				0,00		0,6			0,00					
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23	TABLA DE COEFICIENTES DE K SEGÚN ÁNGULO DE OSCILACIÓN Y DISTANCIAS DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO PARA EVITAR DESCARGAS															
24																
25				Ángulo de oscilación	Valores de k			Tensión más elevada de la red (kV)	Del (m)	Dpp (m)		Del (m)	Dpp (m)			
26					Vn>30kV	Vn<=30kV										
27	0,00				0,6	0,55		3,6	0,08	0,1						
28	38,00	<40°			0,6	0,55		7,2	0,09	0,1						
29	40,00	40°<=a<=60°			0,65	0,6		12	0,12	0,15		1,2		1,4		
30	66,00	>65°			0,7	0,65		17,5	0,16	0,2						
31	90,00				0,7	0,65		24	0,22	0,25						
32								30	0,27	0,33						
33							3	36	0,35	0,4						
34								52	0,6	0,7						
35								72,5	0,7	0,8		145				
36								123	1	1,15		11				
37								145	1,2	1,4						
38								170	1,3	1,5						
39								245	1,7	2						
40								420	2,8	3,2						
41																
42																
43																
44																
45					Ppropio	Fv	Ph	Peso	Temp.	F.Vert.	Ángulo	Tensión	Flecha	Hipótesis		
46		Ia			380,25	346,50	0,00	514,44	-10,00	380,25	33,96	0,00	0,00	Tracción Máxima Viento (-10°C)		
47		Ib			380,25	346,50	0,00	514,44	15,00	380,25	33,96	0,00	0,00	Flecha Maxima con Viento (15°C)		
48		IIa			380,25	0,00	0,00	380,25	-15,00	380,25	0,00	0,00	0,00	Tracción Maxima de Hielo (-15°C)		
49		IIb			380,25	0,00	0,00	380,25	50,00	380,25	0,00	0,00	0,00	Flecha Maxima a Temperatura (50°C)		
50		IIIa			380,25	152,37	236,92	635,70	-15,00	617,17	13,48	0,00	0,00	Tracción Maxima de Hielo + Viento (-15°C)		

Entradas / Tabla de resultados / Tabla de tendido / Cal.flecha / Gráfica / Operaciones / Herrajes / Distancias /

Listo

Figura 22. Pestaña “Distancias”.