

ESTUDIO DE LÍNEAS ELÉCTRICAS AÉREAS CON SOFTWARE CIENTÍFICO

STUDY OF OVERHEAD ELECTRIC LINES WITH SCIENTIFIC SOFTWARE



Pere Palacín Farré
Dr. Ingeniero Industrial
Profesor de Tecnología Eléctrica
de Ingeniería Industrial

Escuela Técnica Superior IQS. Universidad Ramon Llull



José Javier Molins Vara
Dr. Ingeniero Industrial
Profesor de Métodos Matemáticos
de Ingeniería Industrial

Recibido: 14/11/06

Aceptado: 11/01/07

RESUMEN

Se describe una aplicación que se ha desarrollado con *Matlab*[®], especialmente diseñada para analizar proyectos de líneas eléctricas a construir o ya instaladas de las que se pretende verificar si cumplen con los requisitos de distancia de seguridad al terreno, superficie de agua u otros objetos bajo ella. El funcionamiento de la aplicación se presenta ilustrándose con diversos ejemplos prácticos.

Palabras clave: Catenaria, líneas aéreas, distancias reglamentarias, conductores eléctricos, *Matlab*.

ABSTRACT

An application developed with *Matlab*[®], specially designed to analyze projects of electrical lines to constructing or already installed, is described. The application verifies if they fulfil with the requirements of safety distance to the area, surface of water or other objects under it. The proper operation of the application is shown with diverse practical examples.

Key words: Catenary, aerial lines, distances, electric conductors, *Matlab*.

1. INTRODUCCIÓN

En una línea eléctrica aérea, los conductores deben quedar situados a una altura mínima por encima de

cualquier punto del terreno, superficie de agua, carreteras, ferrocarriles, etc. que depende de la tensión de la línea y del uso bajo ésta. Estas distancias mínimas de los conductores respecto a cualquier elemento son definidas por el *Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión* (RLAT) aprobado por el Decreto 3151/1968 de 28 de noviembre. Estas distancias definirán la altura necesaria de los apoyos para que los conductores, con su máxima flecha¹ vertical en las condiciones más desfavorables cumplan las distancias de seguridad reglamentarias.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Un conductor flexible suspendido (tendido) entre dos puntos adopta la forma de una curva denominada catenaria, cuya ecuación es [1]:

$$y = h \cdot \cosh\left(\frac{x}{h}\right) = h \cdot \left(\frac{e^{\frac{x}{h}} + e^{-\frac{x}{h}}}{2} \right)$$

donde:

x, y: ejes cartesianos

h: parámetro de la catenaria, igual a

Ta/w

Ta: Tensión del cable en el punto más bajo

w: peso unitario del cable (peso por unidad de longitud)

En la práctica, la ecuación es compleja y se utiliza en muchas ocasiones la aproximación parabólica [2], con lo que se comete un error despreciable (las flechas calculadas son menores que las reales y las distancias al suelo son superiores a la reales) hasta longitudes de vanos² de unos 500 m, que es la mayoría de los casos de líneas eléctricas de M.T y A.T (Fig. 1).

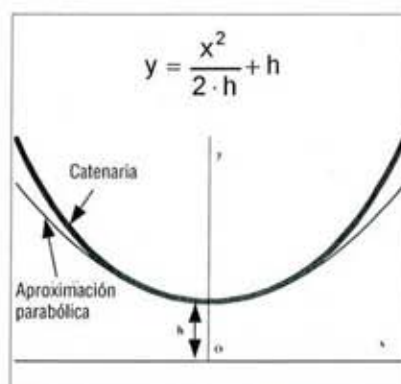


Figura 1. Representación de la catenaria y la aproximación parabólica

Por otro lado, es conocida en el cálculo mecánico de líneas eléctricas aéreas la denominada *Ecuación de cambio de condiciones*, que relaciona

¹ Flecha. Definida como la distancia vertical máxima entre un punto de la curva y el correspondiente de la recta teórica que une los puntos de fijación del conductor.

² Vano. Distancia entre dos apoyos consecutivos, sobre los cuales van sustentados los conductores.

Variación total en la longitud del cable al pasar del estado inicial al final	=	Variación térmica de longitud debida a cambio de temperatura	+	Variación elástica de longitud debida a cambio de tensión mecánica
$L - L_0$	=	$a \cdot \delta \cdot (t - t_0)$	+	$a \cdot \frac{1}{S \cdot E} \cdot (T - T_0)$

dos estados diferentes de un cable tendido entre dos puntos. Es decir, para un cable dado, tendido en un vano de longitud dada, si conocemos la tensión (y/o la flecha) a una temperatura y una sobrecarga (Estado inicial), podemos conocer la tensión (y/o la flecha) a otra temperatura y otra sobrecarga (Estado final) donde:

L_0 : Longitud del cable tendido en el estado inicial (m)

L : Longitud del cable tendido en el estado final (m)

t_0 : Temperatura del cable en el estado inicial (°C)

t : Temperatura del cable en el estado final (°C)

T_0 : Tensión del cable en el estado inicial (daN)

T : Tensión del cable en el estado final (daN)

a : Longitud horizontal del vano (m)

d : Coeficiente de dilatación lineal del cable (°C⁻¹)

S : Sección del cable (mm²)

E : Módulo de elasticidad del cable (daN/mm²)

3. CÁLCULOS

Hoy en día, el Ingeniero dispone de una serie de herramientas de desarrollo de *software* de aplicación general que le permiten resolver problemas habituales en Ingeniería en un plazo de tiempo relativamente corto. Entre las aplicaciones disponibles se pueden mencionar *SciLab*, *Matlab*®, *GNU Octave*, entre otros. Algunos de ellos son de libre distribución y, en algunos casos (*GNU Octave*), tienen un alto grado de compatibilidad con *Matlab*.

Con estas herramientas es posible desarrollar programas con el código necesario para resolver problemas específicos, y además permiten incorporar lo que se conoce como GUI (*Grap-*

hical User Interface) o Interfaz Gráfica de Usuario, de forma que el usuario de la aplicación puede emplearla sin necesidad de conocer el código del programa, y en la que se presentan de forma organizada los resultados de los cálculos efectuados.

El presente artículo describe una aplicación especialmente diseñada para analizar proyectos de líneas eléctricas a construir o ya instaladas de las que se pretende verificar si cumplen con los requisitos de distancia de seguridad al terreno, superficie de agua u objetos bajo ella. Estas distancias en el estado español vienen definidas por el *Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión* (RLAT) aprobado por el Decreto 3151/1968 de 28 de noviembre.

Para analizar la utilidad de la aplicación y a título de ejemplo, imaginémos que para una línea ya instalada se desee efectuar un cambio de uso del suelo que se encuentra bajo ella, por ejemplo, que pase una carretera por debajo de ésta, deseándose comprobar que en las nuevas condiciones se sigue cumpliendo la normativa vigente, ya que la distancia de seguridad en esta nueva situación por la reglamentación debe incrementarse.

En caso de que la línea no cumpla con la legislación, es interesante conocer qué medidas se deberían adoptar para corregir el problema e incluso, si ello fuera posible, evaluar el coste económico que ello representaría.

Para el caso concreto de una línea que no cumpla los requisitos de distancia de seguridad, es posible corregir dicho problema mediante una de las dos opciones siguientes:

Elevar las dos torres una distancia tal que cuando la línea eléctrica esté lo más dilatada posible según los valores del coeficiente de dilatación del material, toda la línea se encuentre

por encima de la distancia de seguridad a aplicar. Esta solución siempre es posible y mantiene los parámetros de la catenaria sin modificar respecto a los iniciales.

Elevar, o bien la torre izquierda o bien la torre derecha, sin cambiar la otra de posición. En este caso no siempre existe solución al problema, ya que se considera como planteamiento del problema que la longitud de la catenaria no debe cambiar al modificar la altura de las torres. Ello provoca que en algunos casos, la modificación de la altura de la torre haga que sea físicamente imposible que la catenaria no varíe su longitud, y por tanto, el sistema no tiene solución.

Además, en este caso cambian los parámetros de la catenaria por lo que se debe comprobar que los nuevos parámetros sean físicamente viables y no cambien tanto su valor que lleven a problemas de diseño que hagan que las nuevas tensiones calculadas no se soporten por los anclajes de la línea.

Como ya se ha mencionado, la aplicación desarrollada permite comprobar si una línea eléctrica ya existente, cumple los requisitos exigidos y, en caso de que no sea así, propone las alternativas físicamente posibles para conseguir que se cumplan las especificaciones de seguridad requeridas.

Para ello, se necesita la siguiente información:

- Mediciones de la catenaria. Es necesario disponer de las coordenadas de diversos puntos de la catenaria a una temperatura determinada, para que se pueda determinar el perfil completo de ésta y los parámetros que la definen (Ta/w).

- Coordenadas del suelo para poder determinar la distancia existente entre la línea eléctrica aérea y el suelo y determinar si cumple en todos los puntos los requerimientos de distancia de seguridad mínima.

- Dilatación de la catenaria en las condiciones más desfavorables, que depende del coeficiente de dilatación del material, la longitud de la línea y el incremento de temperatura máximo previsto, que permite calcular el perfil de la catenaria en las condicio-

" Línea de 66 kV"		Dilatación de la catenaria: 6 cm	
Mediciones de la catenaria (m)"		Mediciones de altura del suelo (m)	
x	y	x	y
0.000	104.180	0.000	96.230
34.440	107.078	34.440	99.948
76.660	112.260	76.660	99.983
118.463	119.230	118.463	103.410

Distancia de seguridad: 6 m (distancia mínima al terreno) y 7 m (altura mínima de los conductores sobre la rasante de una carretera)

nes más desfavorables, que corresponden a las más cercanas al suelo.

- Distancia de seguridad que debe existir entre la línea y el suelo para cumplir las especificaciones, según los usos que se den por debajo de la línea eléctrica.

Una vez definidos esos valores, la aplicación calcula si la instalación de la línea cumple con los requerimientos legales y, si no es así, presenta las posibles alternativas:

- En primer lugar, a partir de los valores experimentales de las coordenadas de la catenaria, que deben ser como mínimo tres, ajusta los parámetros de la catenaria, y especialmente el parámetro de diseño Ta/w , relacionado con la tensión que soportan los diferentes elementos de anclaje de la catenaria.

Seguidamente, recalcula la catenaria teniendo en cuenta el incremento de longitud de ésta según la dilatación, por incremento de temperaturas, que se ha definido en el problema, que dependerá de la longitud y material de la línea. Una vez determinada esta curva, se puede establecer qué puntos no cumplen la mínima distancia de seguridad, ya que en el caso en que haya valores en esta situación, se proseguirá con el cálculo para determinar las posibles soluciones del problema.

La primera alternativa, en este último caso, consiste en desplazar la catenaria verticalmente a partir de la información del paso anterior, ya que basta evaluar la distancia mínima existente entre la catenaria y el suelo y la distancia de seguridad mínima para saber cuánto se han de desplazar ambas torres.

- La segunda opción, que consiste en elevar una de las dos torres, re-

quiere que se cumplan las siguientes condiciones para un determinado desplazamiento:

La longitud de la catenaria a temperatura ambiente ha de ser la misma que la que había en el problema inicial (si al variar la altura la distancia aumenta, el sistema no tendría solución).

Al aplicar el incremento de longitud por dilatación, la catenaria debe de cumplir la condición de pasar por los puntos extremos.

Todos los puntos de la curva catenaria con la máxima dilatación deben encontrarse a una distancia del suelo superior a la distancia mínima de seguridad.

El sistema verifica las tres condiciones. En el caso en que alguna de ellas no se cumpla, no presenta la solución, mientras que para los casos con solución se muestran los parámetros ajustados de la catenaria, de forma que el usuario pueda determinar si los anclajes pueden soportar los cambios en la tensión que se han producido al modificar la altura de las torres.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Supongamos un caso en que se dispone de la siguiente información:

Las torres de este tramo de catenaria se encuentran en los puntos extremos. Si se efectúan los cálculos de la catenaria, en este caso, el sistema presenta los siguientes resultados (Fig. 2):

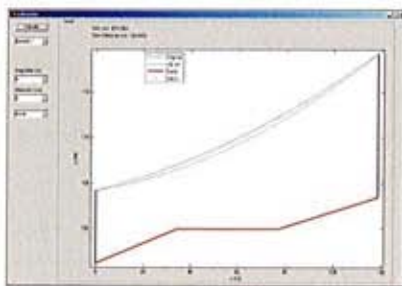


Figura 2. Ejemplo con una distancia de seguridad de 6 m.

Ta/w (m): 974,53

Ta/w (m) Dilatación: 720,63

Como es lógico, dicho parámetro disminuye cuando se dilata el cable. El valor más elevado permite tener una referencia en los diferentes casos para poder establecer si hay variaciones significativas en las tensiones, y si puede haber problemas con las estructuras que soportan los cables.

Si se modifica la distancia de seguridad a 7 m, para tener en cuenta el cambio de usos por el paso de una carretera por debajo de la línea eléctrica, se puede observar que la línea deja de cumplir la distancia de seguridad, ya que como se indica, entre los 18,82 m y los 3,82 m desde el soporte 1 (izquierdo) no se cumplen los requerimientos de mínima distancia de seguridad (Fig. 3) y que se presenta en rojo.

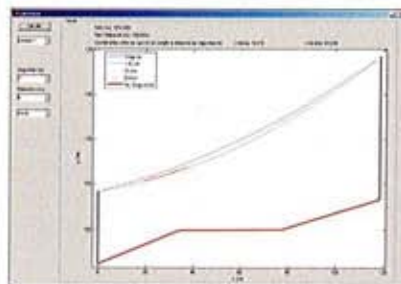


Figura 3. Ejemplo con una distancia de seguridad de 7 m.

Como ya se ha mencionado, existen una serie de soluciones contempladas en la aplicación desarrollada:

- Elevar ambas torres. En este caso, la solución consiste en elevar las dos torres 0,42 m, de forma que los parámetros de la catenaria no cambian y todos los puntos respetan la distancia de seguridad (Fig. 4).

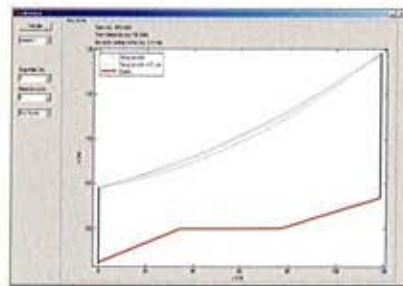


Figura 4. Ejemplo con la solución en la que se elevan las dos torres

- Elevar la torre izquierda. Si se eleva la torre izquierda una distancia de 3,24 m, se consigue que, manteniendo la longitud de la catenaria, todos los puntos cumplan con los requerimientos de distancia de seguridad. Además, en este caso, el valor del parámetro de diseño Ta/w ha disminuido a 397,41 m a baja temperatura y a 372,68 m en el caso de máxima dilatación considerada (Fig. 5). Por tanto, de los resultados

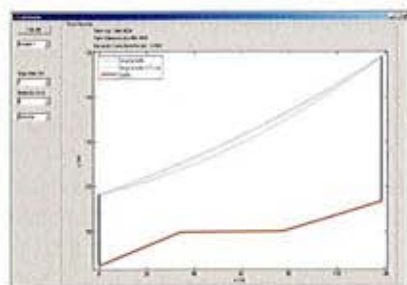


Figura 5. Ejemplo con la solución en la que se eleva únicamente la torre izquierda.

obtenidos se puede concluir que no habría problemas para modificar la torre que soporta la catenaria ya que tiene menos requerimientos de tensión en los soportes.

Elevar la torre derecha. En este caso, la solución propuesta consiste en elevar la torre derecha 0,31 m. Tal como se aprecia en la figura 6, al au-

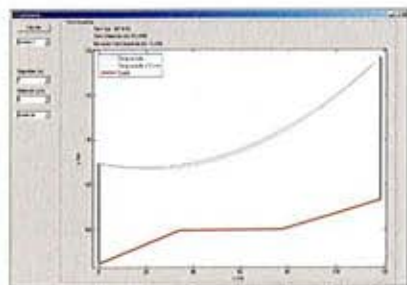


Figura 6. Ejemplo con la solución en la que se eleva únicamente la torre derecha.

mentar la altura de la torre derecha dejando a la misma altura la torre izquierda, la tensión en la catenaria ha aumentado ya que ha disminuido su curvatura al incrementarse la distancia entre los extremos de la catenaria. El valor el parámetro Ta/w ha aumentado considerablemente ya que ha pa-

sado a tener un valor de 1440,46 m, lo que corresponde a 1,5 veces la del diseño inicial. Ello hace que esta alternativa, aunque sea físicamente posible, presente problemas ya que los parámetros de diseño han variado ostensiblemente y hacen que los soportes puedan no soportar el incremento de tensión al que se ven sometidos.

En este caso, por tanto, de las dos alternativas viables, se podría elegir la que fuese económicamente más favorable.

Se podrían estudiar otros ejemplos de aplicación, desde los que no es necesario efectuar corrección alguna, hasta aquellos en los que alguna de las tres alternativas consideradas no es viable.

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una aplicación con una interfaz de usuario que permite comprobar si una línea eléctrica ya instalada cumple con los requerimientos de seguridad que marca la legislación vigente. En caso de no ser así, la aplicación desarrollada presenta diversas alternativas para corregir las deficiencias detectadas. El usuario, a partir de la información suministrada, puede establecer la alternativa más interesante según el coste económico que presente cada una de ellas.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- BACIGALUPE, F. (2000). "Líneas aéreas de media y baja tensión. Cálculo mecánico", Ed. Paraninfo, Madrid. ISBN:84-283-2611-8.

- DEL HIERRO SANCHEZ MONGE, E. (1995) "Apuntes de líneas aéreas de transporte y distribución de energía eléctrica". Sección de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Madrid.

- MORENO CLEMENTE, J. (2004) "Cálculo de líneas eléctricas aéreas de alta tensión", Ed. Arte Impresores S.L., Málaga. ISBN: 922396-5-4

- RLAT (1968) "Reglamento de líneas eléctricas de alta tensión", Ministerio de Industria, Madrid.

- Software interactivo computacional Matlab® v 7.2 (R2006a).

- RUBIO, Juan Antonio; MOLINA, Antonio. Gestión de cálculos: la Ingeniería eficiente. Revista DYNA. Vol. LXXXI, nº 6. Jul.-Ag.- Sept. 2006. Pág. 23 - 28. ■