

# Sistema On-Line para la medición de temperatura en el tendido topográfico de vanos de alta tensión



Francisco Manzano-Agugliaro\*  
Alfredo Alcayde-García\*  
Francisco Gil-Montoya\*  
Miguel Ángel Montero-Rodríguez\*\*

Dr. Ingeniero Agrónomo  
Ingeniero Informático  
Dr. Ingeniero Industrial  
Ingeniero Agrónomo

\* UNIVERSIDAD DE ALMERÍA. Escuela Politécnica Superior. Dpto. de Ingeniería Rural. La Cañada de San Urbano - 04120 Almería. Tfno: +34 950 014091. fmanzano@ual.es; aalcayde@ual.es; pagilm@ual.es

\*\* BMG Topografía, Calle Catedrático Ignacio Cubillas, 13 – 04006 Almería. Tfno: +34 662 482537. ma.montero@bmgtopografia.com

Recibido: 13/07/2010 • Aceptado: 18/10/2010

## On Line temperature measurement system in the laying of high-voltage power-line conductors by topographic surveying

### ABSTRACT

- In the laying of high voltage power lines, special cases exist where there is a large gap between the supports, which must be controlled by surveying methods during the installation process. The control involves the calculation of the angle corresponding to the arrow on the conductor at a given temperature. As there may be significant variations in temperature between the ground and the conductor (in its final location), it is necessary controlling this variation. It has been developed a system for measuring the temperature of the conductor ends at the time of installation. This information is transmitted to a computer through an application developed in Matlab. This one automatically calculates the average temperature of the conductor, and, at the same time, it calculates the angle that should be the lowest point of the conductor in time to be fixed. On the other hand, the developed application also allows verifying by surveying methods whether the sag of a fixed conductor complies with current regulations: it is possible doing it in situ, without having to be under the power line.
- **Key Words:** sag, power lines, temperature, topographic surveying.

### RESUMEN

En el tendido de líneas eléctricas de alta tensión se da el caso de vanos especiales donde existe gran desnivel entre los apoyos, los cuales deben ser regulados mediante métodos topográficos. La regulación implica el cálculo del ángulo que corresponde a la flecha del conductor a una determinada temperatura. Dado que pueden existir variaciones apreciables de temperatura entre el suelo y el cable (en su ubicación final), se ha desarrollado un sistema de medición de la temperatura para los extremos de dicho cable en el momento del montaje. Esta información es transmitida a un ordenador que, mediante una aplicación desarrollada en *Matlab* para tal fin, calcula automáticamente la temperatura media del conductor, y con ésta, el ángulo que debe tener el punto más bajo del conductor en el momento de ser fijado, para cumplir con la reglamentación vigente. Por otro lado, la aplicación desarrollada también permite comprobar, in situ, por métodos topográficos si la flecha de un vano cumple con la reglamentación vigente, sin tener que estar bajo el conductor.

**Palabras clave:** flecha, líneas aéreas, temperatura, topografía, tiempo real.

### 1. INTRODUCCIÓN

El tendido de líneas de alta tensión es especialmente importante para un desarrollo seguro y fiable de la red eléctrica, por lo que es necesario realizar una previsión y planificación adecuada de su topología y estructura. Asimismo, su instalación presenta inconvenientes y complejidades que deben ser acometidos con el fin de cumplir con las restricciones reglamentarias en materia de seguridad e idoneidad técnica.

Como es sabido, la mayor parte de la red de alta tensión es de tipo aérea. En ella, los conductores de la línea se fijan mediante herrajes adecuados a los aisladores, y estos a su vez a las estructuras de apoyo, denominados simplemente “apoyos”. La distancia entre dos apoyos consecutivos se denomina “vano” de la línea. En España, cada uno de ellos debe cumplir con el reglamento de líneas eléctricas

de alta tensión, LAT (RD 223/2008). En su instrucción técnica ITC-LAT 07, apartado 5, se establecen una serie de distancias de seguridad que deben ser respetadas para que la línea no pueda poner en peligro a las personas u objetos por motivo de una descarga eléctrica. Estas distancias varían en función de diversos criterios relacionados con el medio por el que discurren (por ejemplo, cruzamientos con caminos, cursos de agua, otras líneas eléctricas, etc.).

A modo de ejemplo, el LAT en su apartado 5.5 (ITC-LAT 07) establece que “La altura de los apoyos será la necesaria para que los conductores, con su flecha máxima vertical, según las hipótesis de temperatura y de hielo del apartado 3.2.3, queden situados por encima de cualquier punto del terreno, senda, vereda o superficies de agua no navegables, a una altura mínima de  $5,3 + D_{el}$ , (en metros) con un mínimo de 6 m”.

Siendo  $D_{el}$  la 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. Es un valor tabulado que depende de la tensión más elevada de la red.

El valor 5,3 es específico para esta situación y puede variar para otras circunstancias, siendo conocido como  $D_{add}$ , distancia de aislamiento adicional, es decir, distancia mínima de seguridad al suelo, a líneas eléctricas, a zonas de arbolado, etc. Este valor asegura que las personas u objetos no se acerquen a una distancia menor que  $D_{el}$  de la línea eléctrica.

Para realizar un proyecto que cumpla estas condiciones, es necesario un levantamiento previo del perfil del terreno por métodos topográficos, teniendo en cuenta, a parte del terreno, el arbolado, las construcciones y cualquier otro elemento que pudiese afectar a la distancia de seguridad (véase Figura 1). En dicha figura, el perfil del terreno está representado en trazo verde y sobre éste aparece la representación (en otro color) de una construcción. Igualmente, en la Figura 2 en uno de los perfiles se representa un árbol por si pudiese comprometer la distancia de seguridad.

Representado el perfil topográfico del terreno y sus elementos, se diseñan los puntos donde van ubicados los apoyos y las alturas de estos en función del conductor a emplear. Así, una vez determinadas las coordenadas planimétricas de los apoyos, replanteados y materializados en campo, viene la fase de instalación de los cables sobre estos. En esta fase de montaje, en función de la posición relativa entre los apoyos y el conductor (cable) elegido, se debe aplicar una tensión que debe tener en cuenta los valores de temperatura reales del cable durante el tense, que es la temperatura ambiente en ese instante en la posición final del tendido; pues estos factores afectarán a la tensión final del mismo. De este modo, cuando el cable entre en servicio y esté sometido a las condiciones ambientales más desfavorables, quedará asegurado el cumplimiento del reglamento LAT.

Unos elementos importantes en el montaje de las líneas son las denominadas “tablas de tense”.

En el montaje se pueden presentar dos casos en función del perfil del terreno:

- Que exista visibilidad entre los apoyos, Figura 1. En este supuesto, y debido a que los montadores saben por el proyecto el punto más bajo de la catenaria, fijan esta altura en los apoyos mediante una “tablilla” de color llamativo (p. ej., rojo) creando unas líneas horizontales rojas, para poder verlo desde el otro apoyo. De este modo tensan el cable hasta que alinean el punto más bajo del cable con las líneas rojas.

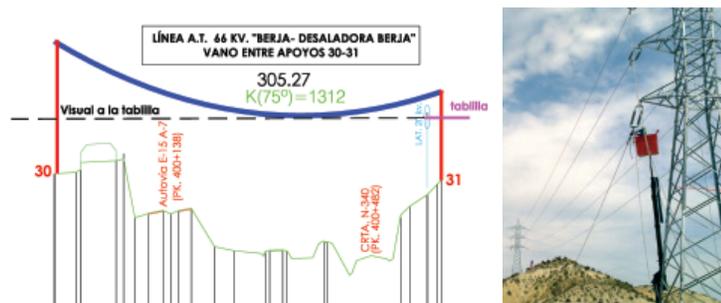


Fig. 1: Ejemplo de tense de un vano con visibilidad entre los apoyos

- Que no haya visibilidad entre los apoyos, debido a que exista un gran desnivel en el terreno. Este caso es conocido como “vanos singulares o especiales” (Bautista, 1998), Figura 2. En esta situación no se puede regular el vano como se ha expuesto anteriormente, sino que se debe recurrir a la regulación por métodos topográficos clásicos. Para una correcta regulación hay que determinar el ángulo que se forma entre la base de uno de los apoyos y el punto teórico más bajo del vano respecto de la vertical (ángulo cenital) o de la horizontal (ángulo de elevación), y fijarlo en el instrumento topográfico de forma que se puede regular correctamente una vez el cable alcance dicha posición. El problema que se plantea con este procedimiento es que el tense del cable es función de la temperatura del mismo, lo cual plantea ciertas dificultades técnicas. Las variaciones de temperatura a lo largo de la regulación de un vano de 5 cables, que puede emplear 6 o 7 horas, pueden ser de más de 30 grados, sobre todo en verano. Esto obliga a estar realizando cálculos en función de la temperatura instantánea, que habitualmente es la del aire a la altura del suelo, lo cual no es lo más idóneo ya que el cable puede estar a una temperatura diferente debido a que se encuentra a una altura de varios metros sobre el suelo.

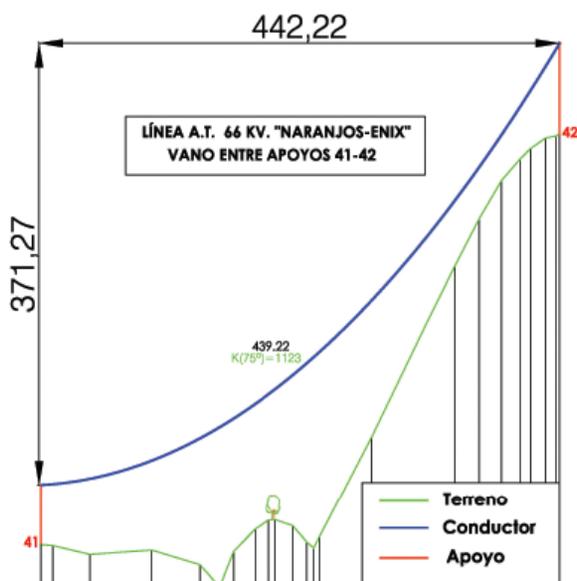


Fig. 2: Ejemplo de vano real que necesitó regulación por métodos topográficos

A modo de ejemplo, se muestra en la Tabla 1 las fechas de ejemplos reales, para temperaturas de 10 y 45° C, las cuales son muy frecuentes desde que se inicia el tense del primer conductor de un vano hasta que se finaliza con el último. Obsérvese que puede haber una variación de hasta 2,29 m en vertical, en función de la temperatura.

LÍNEA A.T. (apoyos)	KV	Conductor	Longitud del vano (m)	Desnivel (m)	Temperatura (° C)	Flecha (m)
Berja-Desalarora de Berja (17-18)	66	LA 180	282,8	207,5	10	26,93
					45	28,25
Naranjos-Enix (41-42)	66	LA 280	422,22	371,27	10	19,44
					45	20,59
Naranjos-Carboneras(33-34)	132	D 450	487,47	364,52	10	21,32
					45	23,15
Naranjos-Carboneras (40-41)	132	D 450	528,06	289,57	10	24,74
					45	27,03

Tabla 1: Ejemplos de flechas en función de las temperaturas de líneas reales que necesitaron regulación por Topografía

La relación entre la temperatura de un conductor apoyado en sus extremos y su tensión para estudiar su flecha, ha sido analizada mediante balance termodinámico entre el calor recibido desde el ambiente (radiación solar y absorptividad del conductor) y la ley de Joule ( $RI^2$ ), frente a las pérdidas por radiación y convección. Se ha supuesto que la convección depende de la velocidad y dirección del viento, mientras que la radiación lo hace de la temperatura del conductor frente a la temperatura ambiental y de la emisividad del conductor (su color infrarrojo) (Seppa, 1994).

Según estos principios, ciertos trabajos utilizan la tensión de las líneas aéreas para calcular la temperatura y la flecha de

las mismas, teniendo así una estimación del estado mecánico de la línea, (Keshavarzian y Priebe, 2000). Esto ha dado lugar al desarrollo de sensores para deducir la flecha a base de medir el ángulo de inclinación del conductor en el apoyo de la línea (Ramachandran et al 2008) o sensores basados en el comportamiento de la señal eléctrica empleando el estándar PLC, *Power-Line Carrier* (de Villiers W et al. 2008), y deducir así la flecha de la línea, pudiendo generar señales de alerta al operador de la red para prevenir un fallo en cascada de todo el sistema.

Existen aplicaciones diseñadas 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, como el de Palacin-Farre y Molins-Vara (2007), cuando se introduce un perfil del terreno en el *software*, o el de Peña et al. (1998), para la comprobación en campo de este requisito, pero en ambos casos no se tiene en cuenta la temperatura, factor que puede cambiar el resultado de la comprobación.

Sun et al. (2006), para realizar la comprobación de distancia de seguridad de la catenaria al terreno y a la vegetación, proponen el uso de visión 3D generando incluso un modelo de elevaciones del terreno, a través de cámaras instaladas en una avioneta, pero este método tampoco tiene en cuenta la temperatura del conductor. Otros trabajos plantean la comprobación en campo, de modo teórico, mediante el empleo de GPS en modo relativo (DGPS), para estudiar la flecha de la línea, aunque con resultados dudosos

(Mahajan y Singareddy, 2008), y también sin tener en cuenta la temperatura del conductor.

En este trabajo se ha planteado el desarrollo de una aplicación para la toma de temperatura del cable en tiempo real (en los extremos del mismo), y que realiza el cálculo instantáneo para la regulación topográfica de vanos especiales, esto es, de aplicación in situ a la hora del montaje del conductor. Además, para comprobar los vanos ya tensados, se ha preparado en la misma aplicación un módulo de cálculo instantáneo, para la comprobación del tense por métodos topográficos basado en estacionar el instrumento topográfico en un punto cualquiera del exterior de la línea.

## 2. DISEÑO DEL SISTEMA

En el diseño de la aplicación se ha tenido en cuenta la funcionalidad del *software*, dividiendo la misma en dos partes bien diferenciadas: por un lado la parte de la aplicación encargada de realizar el cálculo de catenarias en función de la temperatura del cable, y por otro la parte encargada de realizar la comprobación de la correcta instalación de las catenarias existentes.

Toda la aplicación se ha desarrollado en C# y está preparada para ser instalada en cualquier PC con sistema operativo *Windows XP* (o superior) o *pocketPC - PDA* con sistema operativo *Windows Mobile 6.1*.

### 2.1. REGULACIÓN DE LOS VANOS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA INSTANTÁNEA DEL CABLE

Dada la tabla de tense de un vano por el proyecto de instalación de la línea, véase ejemplo en la Tabla 2, ésta tiene asociada una flecha (F) para una determinada temperatura del cable. Además son conocidos los siguientes datos topográficos gracias al proyecto de ejecución: desnivel entre los puntos de sujeción del cable (D), distancia taquímetro-cable apoyo 1 (H1), distancia taquímetro-cable apoyo 2 (H2), estas últimas son el resultado de restar a la altura del apoyo al suelo, la altura de estacionamiento del instrumento topográfico que se establece en campo. Con estos datos, las incógnitas a determinar son: el ángulo de elevación para la regulación desde apoyo 1 ( $\alpha_1$ ), y/o el ángulo de regulación desde apoyo 2 ( $\alpha_2$ ), véase Figura 3. De este modo el cable se va tensando hasta que el técnico, situado bajo el apoyo con el instrumento topográfico, indica que se ha alcanzado el ángulo exacto.

El modo tradicional de realizar esta operación consiste en la colocación de un termómetro en la base del apoyo, donde se encuentra el operario con el instrumento topográfico, el cual debe realizar los cálculos manualmente en función de los cambios de temperatura que marca dicho termómetro. La principal limitación de este procedimiento es que la temperatura del conductor, en su posición de tendido, es diferente a la que existe en la base de un apoyo; ya que el desnivel entre los dos apoyos puede ser de hasta centenares de metros, véase desniveles entre apoyos de la Tabla 1.

T (°C)	Ten (Kg)	f (m)
-5	1838	20,51
0	1814	20,78
5	1790	21,05
10	1768	21,32
15	1746	21,59
20	1725	21,86
25	1704	22,12
30	1685	22,38
35	1666	22,64
40	1647	22,89
45	1629	23,15
50	1612	23,40

Tabla 2: Ejemplo de tabla de tense para conductor D 450, tramo 33-34 de la línea 132 KV "Naranjos-Carboneras"

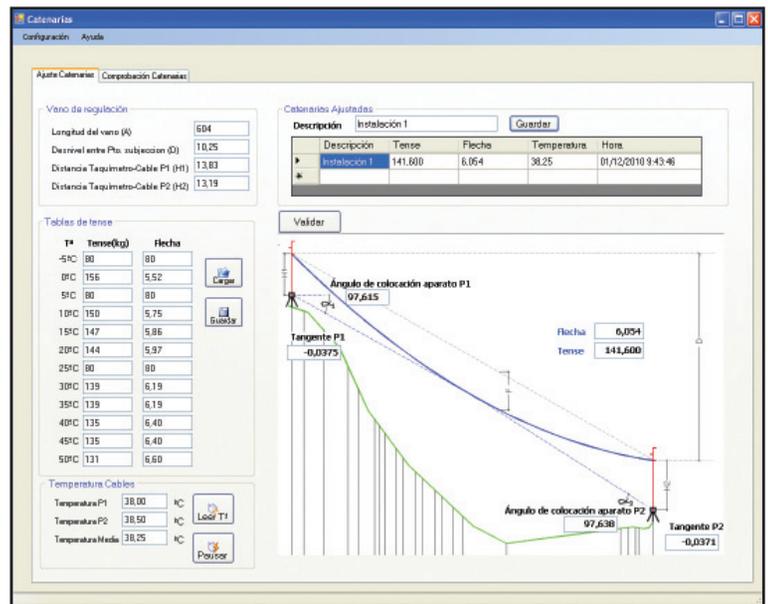


Fig 3: Captura de pantalla de la pestaña de ajuste de catenarias

En la Figura 3, se puede apreciar una captura de pantalla de la pestaña de ajuste de catenarias, donde se pueden apreciar cuatro zonas:

- Vano de regulación. Lugar donde se introducirán los valores característicos del vano.
- Tabla de tense. En estos campos el instalador introducirá los valores de tense y flecha según el proyecto de instalación.
- Temperatura del cable. Parte de la aplicación que muestra en tiempo real la temperatura del cable en ambos extremos, así como la temperatura media.
- Registro de Catenarias ajustadas. Registro de trabajos realizados.
- Visualización de parámetros de salida. Muestra los valores de ajuste del aparato y los valores de regulación del vano (tense y flecha).

Para el hardware de medida de la temperatura se ha hecho uso de la plataforma de hardware libre *Arduino*, con el módulo de comunicación *Xbee* que ha sido equipado con el chip

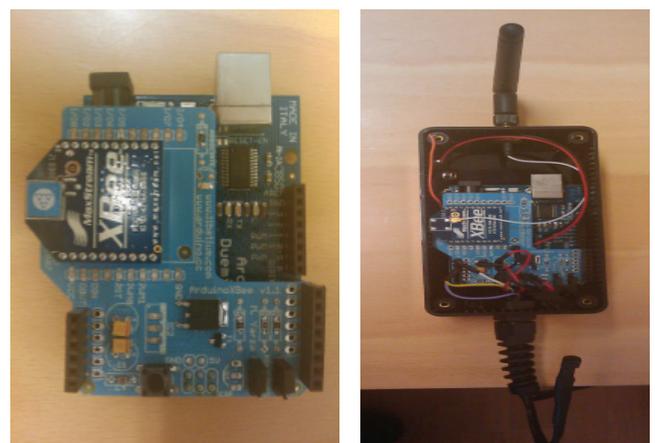


Fig. 5: A la izquierda, la placa Arduino y a la derecha placa Arduino más sensor de temperatura

Xbee Pro del fabricante MaxStream, que permite conectar varios dispositivos de forma inalámbrica hasta una distancia de 1200 metros en exteriores, en una banda de frecuencia libre (2,4GHz) y a una velocidad de transferencia de 250.000 bps, Figura 4. Para realizar la medida de la temperatura se han implementado 2 placas Arduino-Xbee con los sensores de temperatura que se colocarán en los extremos del cable y una tercera que hará de Gateway Xbee conectándose al PC y reenviando datos que recibe de las placas de temperatura. El coste total del sistema de medida de la temperatura es inferior a 250 euros. Ver Figura 5 para apreciar el esquema de conexión.

La aplicación informática se comunica a través del Gateway Xbee, conectado a través del puerto USB del PC, con los sensores de temperatura Xbee colocados en los extremos del cable. Por tanto la aplicación recibe en tiempo real los valores de temperatura del cable, tomada en ambos apoyos.

Los valores de temperatura son muestreados a una frecuencia de un 1Hz, realizando sobre ellos un filtro de media de los últimos 100 valores para obtener la medida de temperatura, calculando la temperatura media del cable con la media de la temperatura en los extremos del cable.

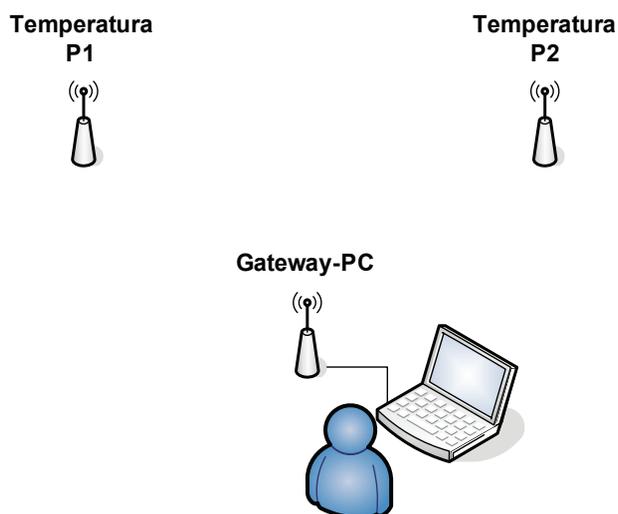


Fig. 5: Esquema de conexión

Una vez obtenida la temperatura del cable, se calcula el valor de flecha y tense del cable para ese vano, realizando una interpolación de los valores de tense y flecha de la tabla de tense que venían fijados por el proyecto. Posteriormente se calculan los ángulos verticales que debe visar el instrumento topográfico situado bien en el apoyo inicial o bien en el final (P1 o P2).

A parte de la realización de los cálculos, la aplicación nos permite llevar un registro del trabajo realizado, permitiendo almacenar y exportar a una tabla los parámetros de regulación del vano, la fecha y hora de realización del trabajo.

## 2.2. COMPROBACIÓN DEL TENSE DE LOS VANOS

A la hora de comprobar la flecha de una línea en servicio por los métodos topográficos descritos anteriormente, es necesario situarse bajo el propio tendido, observando el cumplimiento del RD 614/2001, sobre disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.

Para evitar la situación de riesgo anterior en la comprobación del tense del vano, se propone este otro procedimiento. Se calcula teóricamente cual es el punto más bajo del mismo a partir de la ecuación de la catenaria y la lectura instantánea de la temperatura, conocida la distancia entre los apoyos, y el desnivel entre ambos. Por otro lado, se comprueba topográficamente, estacionado el instrumento topográfico en cualquier punto entre ambos apoyos, teniendo en cuenta que el cero del ángulo horizontal no esté entre ambos apoyos, y se realizan las lecturas de los ángulos horizontales al apoyo inicial (I'), punto más bajo del conductor (C'), y al apoyo final (F'), tal como se ve en la Figura 6.

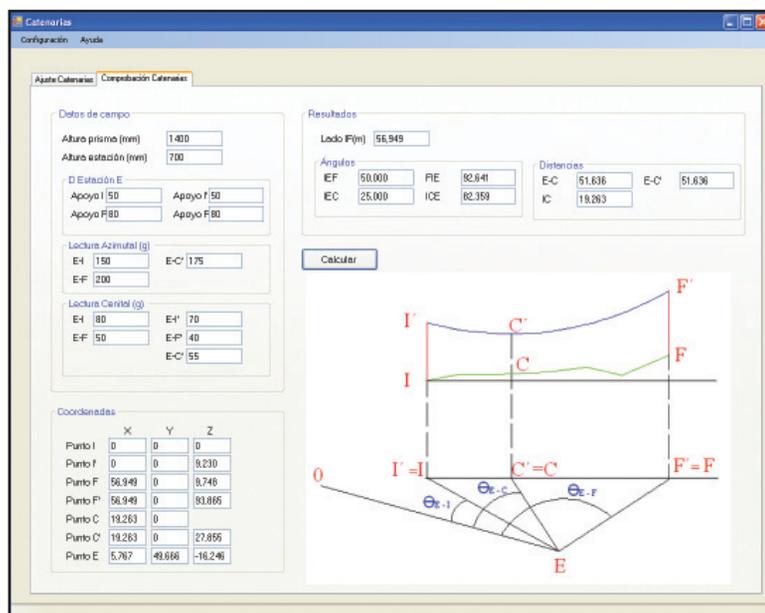


Fig. 6: Esquema de comprobación topográfica de un conductor: Catenaria

A partir de las coordenadas de los puntos de sujeción del cable a los apoyos (I' y F'), y el punto más bajo de la catenaria, obtenido por enrase de la cruz filar del instrumento topográfico, el programa calcula los parámetros de la misma a partir de la ecuación de la catenaria

$$Y = c \cdot \cosh\left(\frac{X + C_1}{c}\right) \cdot C_2$$

Donde c es el resultado de dividir la tensión del cable (que es función de la temperatura) entre su peso por metro lineal; C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> son unas constantes para referir la solución al sistema de referencia con origen en la base del apoyo inicial (I).

### 3. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha desarrollado un sistema *on line* para la medición de la temperatura en la posición de tendido del cable, evitando la aproximación que se hace de manera tradicional, respecto a la temperatura en la base de uno de los apoyos. Además se calculan, instantáneamente, los parámetros topográficos necesarios para realizar el tense del conductor, evitando los posibles errores de lectura e introducción de datos por parte del operario, todo ello hace ganar en seguridad el tendido de las líneas eléctricas.

El método implementado aporta ventajas desde el punto de vista de la seguridad de los trabajadores, ya que a la hora de realizar la verificación de la flecha del vano, no es necesario estacionarse bajo la línea en carga, si no que es posible hacerlo a una distancia de seguridad.

Tanto el *hardware* como el *software* desarrollado emplean tecnología de bajo coste, lo que los hace muy rentables tanto para las empresas instaladoras de líneas de alta tensión como para empresas de topografía que les prestan servicio en la regulación de vanos especiales.

- Ramachandran P, Vittal V, Heydt GT. 2008. "Mechanical State Estimation for Overhead Transmission Lines With Level Spans". *IEEE transactions on power systems*, Vol. 23-3 p.908-915
- RD 223/2008. BOE núm. 68 Miércoles 19 marzo 2008. Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión.
- RD 614/2001. BOE nº 148 de 8 de junio 2001, Disposiciones mínimas para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- Seppa TO. 1994 "Factors influencing the accuracy of high temperature sag calculations". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 9-2 p.1079-1089
- Sun C, Jones R, Talbot H, et al. 2006. "Measuring the distance of vegetation from powerlines using stereo vision". *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. Vol. 60 p.269-283

### 4. BIBLIOGRAFÍA

- Bautista Herrero A. 1998. "Cálculo de líneas eléctricas aéreas: cuestiones puntuales". *Energía*, julio-agosto, p 55-60
- de Villiers W, Cloete JH, Wedepohl LM, Burger A, 2008. "Real-time sag monitoring system for high-voltage overhead transmission lines based on power-line carrier signal behavior". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.23-1 p. 389 -395
- Keshavarzian M, Priebe CH. 2000. "Sag and Tension Calculations for Overhead Transmission Lines at High temperatures-Modified Ruling Span Method". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol.15-2 p 777-783
- Malhara S, Vittal V. 2009. Monitoring Sag and Tension of a Tilted Transmission line using Geometric Transformation" *IEEE POWER & ENERGY Society General Meeting*, Vols.1-8 Book Series: *IEEE Power and Energy Society General Meeting- PESGM* p.1568-1574
- Mahajan SM, Singareddy UM. 2008. "Real Time GPS Data Processing for 'Sag Measurement' on a Transmission Line". *Joint International Conference On Power System Technology (Powercon) And IEEE Power India Conference*, Vols 1-2 p.496-501.
- Palacin-Farre P, Molins-Vara J. 2007. "Estudio de líneas eléctricas aéreas con *software* científico". *DYNA Ingeniería e Industria*. Vol.82-2 p.59-62
- Peña-Santamaría J, Sáez-Díez Muro J. C., Blanco Barrero J. M. 1998. "Obtención y comprobación de catenarias en líneas eléctricas, por métodos topográficos simples". *Topografía y cartografía*. Vol. 15-87 p.44-45